

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza speciálních betonů
vystavených extrémním teplotním namáháním

Vladimír Suchánek

Disertační práce

2018

Studijní program:

P3710 Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor:

3706V005 Dopravní prostředky a infrastruktura:

Dopravní infrastruktura - stavební

Školitel: doc. Ing. Jiří Pokorný, CSc.

Školitel specialista: Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.

Disertační práce vznikla na školícím pracovišti:

Katedra dopravního stavitelství

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 27. 8. 2018

Vladimír Suchánek

Na tomto místě bych rád poděkoval mému školiteli doc. Ing. Jiřímu Pokornému, CSc. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství) za vstřícný přístup, cenné rady a podporu nejenom při zpracování práce, ale i při mém působení na fakultě. Následující poděkování patří Ing. Ladislavovi Řoutilovi, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství) za konzultace a doporučení k dané tématice.

Velké poděkování patří Ing. Pavlovi Paterovi (M.I.S. a.s.), který mi předal cenné zkušenosti a dlouhodobě mi umožňoval využívat technické zázemí laboratoře. Další poděkování patří Miloslavu Klozovi (M–Silnice a.s.) za předání hodnotných praktických zkušeností.

Rád bych poděkoval Ing. Tomášovi Bednarzovi a Ing. Tomášovi Svojanovskému (oba: Sobriety s.r.o.) za spolupráci při využití korelace digitálního obrazu. Děkuji doc. Ing. Pavlovi Švandovi, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů) za poskytnutou pomoc při doplňkovém zobrazení mikrostruktury pomocí elektronové mikroskopie.

Současně bych rád poděkoval kolegům z Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice za inspirativní prostředí.

Poslední poděkování patří mým rodičům za jejich podporu nejenom při mé cestě studiem.

Práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumných projektů Univerzity Pardubice č. 51030/20/SG520001, 51030/20/SG530001, 51030/20/SG540001, SGSDFJP_2015001, SGS_2016_008, SGS_2017_009, SGS_2018_023, IRS2016/028, IRS2018/007. Dále za podpory projektu GAČR 104/10/1021 (Cementové kompozity v režimu extrémních teplot) a projektu TAČR – TG02010058 – Podpora aktivit proof-of-concept na Univerzitě Pardubice, číslo projektu GAMA02/015 (Návrh nového tvaru předpjatého železobetonového nosníku).

ANOTACE

Disertační práce se zabývá rozбором vybraných speciálních betonů. Zaměřuje se na stanovení základních charakteristik v čerstvém i ztvrdlém stavu. Klade si za cíl postihnout a popsat pevnostní a přetvárné vlastnosti (včetně stanovení Poissonova součinitele) na autorem modifikovaných speciálních betonech. Dalším cílem práce je představit a vyhodnotit experimentální studii vlivu teplotního namáhání na reziduální mechanicko-fyzikální vlastnosti. Práce upozorňuje na rozličné chování daných speciálních betonů.

KLÍČOVÁ SLOVA

samozhutnitelný beton, samozhutnitelný vláknobeton / drátkobeton, lehký samozhutnitelný beton, vysoká teplota, pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, statický modul pružnosti v tlaku

TITLE

Experimental Analysis of Special Concrete Exposed to Extreme Thermal Stress

ANNOTATION

The dissertation deals with analysis of selected special types of concrete. It focuses on determination of the basic properties in fresh and hardened state of concrete. Goal of the dissertation is to cover and describe strength and deformation properties (including Poisson's ratio) on special types of concrete modified by the author. Further goal of the thesis is to introduce and evaluate experimental study of thermal stress influence on residual mechanical-physical properties. The dissertation points out diverse behaviour of the given special types of concrete.

KEYWORDS

self-compacting concrete, fibre reinforced self-compacting concrete / steel fibre reinforced self-compacting concrete, lightweight self-compacting concrete, high temperature, compressive strength, flexural strength, static modulus of elasticity in compression

OBSAH

ÚVOD.....	23
1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU V OBLASTI TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE	25
1.1 Právní a normativní předpisy	25
1.2 Vady a poruchy betonu	25
1.3 Degradace betonu.....	26
1.3.1 Trhliny v betonu.....	27
1.4 Požární návrh konstrukce.....	28
1.5 Požární odolnost.....	29
1.5.1 Aktivní a pasivní požární ochrana.....	30
1.6 Vliv působení vysokých teplot na beton	30
1.6.1 Explosivní odštěpování betonu	31
1.6.2 Odpadávání betonu.....	32
1.7 Transformace betonu při zvýšených teplotách.....	33
1.8 Vliv působení vody na beton.....	35
1.8.1 Voda – pórová struktura betonu a druh vody	35
1.8.2 Vliv vlhkosti na objemové změny.....	36
1.8.3 Mechanismus prudkého ochlazení betonu vodou	37
1.9 Návrh prvků za požární situace.....	37
1.10 Zkoušení požární odolnosti betonových konstrukcí (experimentální metody).....	38
1.10.1 Rozměry zkušebních vzorků	38
1.10.2 Vybrané prováděné experimenty v ČR	39
1.10.3 Vybrané prováděné experimenty v zahraničí.....	40
1.10.4 Stav požární ochrany tunelů.....	41
1.11 Teplotní křivky.....	41
1.11.1 Normová křivka	42
1.11.2 Uhlovodíková křivka.....	42
1.11.3 Křivka vnějšího požáru	43
1.11.4 Křivka pomalého zahřívání	43
1.11.5 Odvozené teplotní křivky	43
1.12 Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru (souhrnně).....	44
1.12.1 Posuzování požární odolnosti v České republice.....	44
1.12.2 Posuzování požární odolnosti ve Slovenské republice.....	46

1.12.3	Posuzování požární odolnosti v členských státech CEN.....	46
1.12.4	Posuzování požární odolnosti ve Velké Británii	46
1.13	Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru podle Eurokódů	46
1.14	Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (souhrnně).....	47
1.15	Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ČSN EN 1992-1-2, 2006) 48	
1.15.1	Metodika návrhu s přihlédnutím k požární odolnosti	48
1.15.2	Norma ČSN EN 1992-1-2, 2006.....	49
1.16	Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ACI 216R-89, 1994).....	51
1.17	Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (rešerše z vědeckých prací).....	53
1.18	Popis složek betonu při zvýšených teplotách.....	55
1.18.1	Plnivo – kamenivo.....	55
1.18.2	Pojivo – cement.....	56
1.18.3	Voda.....	57
1.18.4	Příměsi	58
1.18.5	Přísady.....	58
1.19	Speciální cementové kompozitní materiály	58
1.19.1	Samozhutnitelný beton (SCC).....	59
1.19.2	Lehký samozhutnitelný beton (LWSCC).....	66
1.19.3	Vláknobeton (FRC).....	69
1.19.4	Drátkobeton (SFRC)	74
1.19.5	Samozhutnitelný vláknobeton (FRSCC).....	79
2	KRITICKÉ ZHODNOCENÍ ANALÝZY SOUČASNÉHO STAVU.....	80
2.1	Teplotní degradace betonu	80
2.2	Popis materiálových vlastností speciálních betonů vystavených vysokým teplotním namáháním.....	80
2.2.1	Problematika modulu pružnosti betonu.....	81
2.2.2	Problematika Poissonova součinitele	81
2.3	Faktory omezující širší uplatnění speciálních betonů	82
3	DEFINICE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	83
4	PŘEHLED VYBRANÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ.....	85
4.1	Modul pružnosti betonu	85
4.1.1	Modul pružnosti betonu při zvýšených teplotách	86
4.2	Poissonův součinitel.....	86

4.3	Korelace digitálního obrazu (DIC).....	86
5	VLASTNÍ ŘEŠENÍ – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VČETNĚ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ	88
5.1	Výroba betonu.....	89
5.1.1	Motivace volby druhu betonu a počtu zkušebních těles.....	89
5.1.2	Metodika přípravy vstupních surovin, surovinová základna.....	100
5.1.3	Odformování a ošetřování zkušebních těles.....	101
5.2	Výroba betonu – vyhodnocení	102
5.2.1	Vliv použitých forem	103
5.2.2	Zhodnocení výroby zkušebních těles TVB	104
5.2.3	Zhodnocení výroby SCC, PFRSCC, SFRSCC, LWSCC	104
5.2.4	Zhodnocení výroby SFRC, PFRC.....	105
5.2.5	Zhodnocení výroby PFRC (C2_2013)	105
5.2.6	Zhodnocení výroby „souvisejících“ speciálních betonů	106
5.2.7	Zhodnocení výroby „cementových těles“	106
5.3	Zkoušení čerstvého betonu.....	107
5.4	Zkoušení čerstvého betonu – vyhodnocení získaných výsledků.....	107
5.5	Zkoušení ztvrdlého betonu (souhrnně).....	114
5.5.1	Skutečné rozměry zkušebních těles.....	114
5.5.2	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu	114
5.5.3	Úprava těles řezem.....	114
5.6	Stanovení pevnostních charakteristik.....	115
5.6.1	Stanovení pevnosti v tlaku	115
5.6.2	Stanovení pevnosti v tahu ohybem.....	115
5.6.3	Stanovení pevnostních charakteristik na „cementových tělesech“	116
5.7	Stanovení pevnostních charakteristik – vyhodnocení získaných výsledků.....	117
5.8	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, využití DIC.....	118
5.9	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, využití DIC – vyhodnocení získaných výsledků 120	
5.9.1	Zhodnocení statického modulu pružnosti v tlaku.....	120
5.9.2	Zhodnocení modulu pružnosti betonu při zvýšených teplotách.....	121
5.9.3	Zhodnocení barevných přechodů stanovených pomocí DIC	123
5.9.4	Statistické porovnání dvou odlišných přístupů (měření deformací) v reálném čase.....	123
5.10	Experimentální stanovení Poissonova součinitele	124

5.11	Experimentální stanovení Poissonova součinitele – vyhodnocení získaných výsledků	124
5.12	Vystavení teplotním namáháním (souhrnně)	128
5.12.1	Stanovení vlhkosti betonu	128
5.13	Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci	128
5.13.1	Metodika zkoušení	128
5.13.2	Zkušební podmínky	130
5.13.3	Monitorování teploty v elektrické peci	130
5.14	Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci – vyhodnocení získaných výsledků	132
5.14.1	Přiblížení se popisu normové křivky v elektrické peci (max. teplota 1049 °C) – vyhodnocení získaných výsledků.....	133
5.14.2	Přiblížení se popisu křivky vnějšího požáru v elektrické peci (max. teplota 680 °C / 750 °C) – vyhodnocení získaných výsledků.....	134
5.14.3	Vyhodnocení teplotních účinků v elektrické peci (max. teplota 400 °C).....	135
5.14.4	Vyhodnocení teplotních účinků v elektrické peci na dalších souvisejících speciálních betonech	136
5.15	Vystavení teplotnímu lokálnímu (bodovému) namáhání	144
5.16	Vystavení teplotnímu lokálnímu (bodovému) namáhání – vyhodnocení získaných výsledků 147	
5.16.1	Přiblížení se popisu normové křivky, lokálně (max. teplota 1049 °C) – vyhodnocení získaných výsledků	148
5.16.2	Přiblížení se popisu křivky vnějšího požáru, lokálně (max. teplota 680 °C / 750 °C) – vyhodnocení získaných výsledků.....	148
5.16.3	Vyhodnocení teplotních účinků, lokálně (max. teplota 400 °C)	148
5.17	Vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání (proteptování).....	151
5.18	Vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání (proteptování) – vyhodnocení získaných výsledků	151
5.19	Doplňkové vyšetřování mikro vlastností ztvrdlého betonu.....	152
5.19.1	Elektronová mikroskopie	152
5.19.2	Světelná mikroskopie	152
5.20	Doplňkové vyšetřování mikro vlastností ztvrdlého betonu – vyhodnocení získaných výsledků	152
6	ZÁVĚR	154
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	158
7.1	Odborné publikace	158
7.2	Normy	166
7.3	Ostatní standardy, TP, TKP, mezinárodní doporučení, předpisy	170

7.4	Dokumenty dostupné z www	172
7.5	Ostatní	173
8	PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTAČNÍ PRÁCE.....	174
8.1	Vedené citované závěrečné práce	176
9	SEZNAM PŘÍLOH.....	177

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vliv teploty na povrchové změny betonu.....	33
Tabulka 2 Pevnostní a mineralogické změny betonu při zahřívání.....	34
Tabulka 3 Vliv porušené vrstvy betonu v závislosti na délce působení požáru	35
Tabulka 4 Označení a příčiny smršťování.....	36
Tabulka 5 Seznam souvisejících norem – požární odolnost, navrhování betonových konstrukcí: 80., 90. léta.....	45
Tabulka 6 Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu při zvýšených teplotách.....	50
Tabulka 7 Srovnání technických a technologických parametrů lehkých umělých kameniv dostupných v ČR.....	68
Tabulka 8 Základní charakteristiky vybraných vláken	73
Tabulka 9 Porovnání základních charakteristik různých zkušebních postupů vedoucích ke stanovení reziduální pevnosti v tahu ohybem.....	77
Tabulka 10 Označení a legenda zhotovených klíčových druhů betonu.....	92
Tabulka 11 Označení a legenda zhotovených klíčových druhů betonu, pokračování	93
Tabulka 12 Označení a legenda doplňkových druhů betonu	94
Tabulka 13 Označení a legenda doplňkových „cementových těles“	94
Tabulka 14 Publikovatelná forma receptur – složení klíčových druhů betonu, složení malty CEM	95
Tabulka 15 Publikovatelná forma receptur – složení klíčových druhů betonu, složení malty CEM, pokračování	96
Tabulka 16 Publikovatelná forma receptur – složení doplňkových druhů betonu.....	97
Tabulka 17 Publikovatelná forma receptur – složení doplňkových druhů betonu, pokračování.....	98
Tabulka 18 Označení a legenda aplikovaných vláken	99
Tabulka 19 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – klíčový beton	110
Tabulka 20 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – klíčový beton , pokračování.....	111
Tabulka 21 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – klíčový beton , pokračování.....	112
Tabulka 22 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – doplňkový beton	113

Tabulka 23 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace, počet zhotovených těles – „cementová tělesa“	113
Tabulka 24 Porovnání sečnových modulů pružnosti v tlaku (stanovené hodnoty na sadě těles, směrné hodnoty), SCC, SFRSCC, TVB	121
Tabulka 25 Zjištěné – přehledné – hodnoty na vybraných tělesech ; stanoveno dle (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; včetně hodnot Poissonova součinitele (SCC, SFRSCC, TVB), více zkušebních těles s podrobnějšími údaji – viz příloha E.....	125
Tabulka 26 Zjištěné – přehledné – hodnoty na vybraných tělesech ; stanoveno dle (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; včetně hodnot Poissonova součinitele (SCC, SFRSCC, TVB), více zkušebních těles s podrobnějšími údaji – viz příloha E, pokračování.....	126
Tabulka 27 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 1049 °C	137
Tabulka 28 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 400 °C (pevnostní třída SCC45/55)	138
Tabulka 29 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 400 °C	139
Tabulka 30 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 680 °C / 750 °C	140
Tabulka 31 Stanovené hodnoty, lokální (bodové) teplotní namáhání na max. ~ 1049 °C , ~ 750 °C , ~ 680 °C , ~ 400 °C	149
Tabulka C 1 Průběh teploty na povrchu betonu [°C], vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce	193
Tabulka C 2 Průběh teploty na povrchu betonu [°C], vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce	196
Tabulka E 1 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (SCC45/55_2013ref; SCC45/55_2016ref; SCC45/55_2017ref; SCC45/55_2016žih, 25_2013ref; 25_2015ref; 25_2016ref; 25_2017ref)	202
Tabulka E 2 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (25_2017ref; 25_2015žih; 25_2016žih; 25_2017žih).....	205
Tabulka E 3 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (50_2013ref; 50_2016ref; 75_2013ref; 2PP_2013ref; 4PP_2013ref; Syn2_2013ref; Syn4_2013ref; C2_2013ref; Syn2_2013žih; Syn4_2013žih; 50_2016žih)....	207
Tabulka E 4 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (SCC30/37/14ref; Syn2_30/37/13ref; 40_30/37/13ref; 25_30/37/14ref; Syn2_30/37/13žih; 40_30/37/13žih; 25_30/37/14žih; SCC30/37/14žih; C25/30ref; 2PP_C25/30ref; FRC_C25/30_2015ref; C25/30žih; FRC_C25/30_2015žih; HSC_2014ref)	210

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma rozdělení činitelů ovlivňujících životnost betonových konstrukcí, upraveno z (Bilčík et al., 2003).....	27
Obrázek 2 Model požáru – tři fáze rozvoje požáru, upraveno z (Procházka et al., 2010)	28
Obrázek 3 Povrchové (barevné) změny betonu, upraveno z (Hager, 2004)	33
Obrázek 4 Návrh prvku a konstrukce za požární situace, upraveno z (Kučera et al., 2010)....	37
Obrázek 5 Nominální a parametrické teplotní křivky (Kupilík, 2006), více (ČSN EN 1363-1, 2013; ČSN EN 1363-2, 2000).....	44
Obrázek 6 Části návrhu konstrukce za požární situace, upraveno z (Wald et al., 2005)	47
Obrázek 7 Celkové teplotní prodloužení betonu, upraveno z (ČSN EN 1992-1-2, 2006).....	51
Obrázek 8 Reziduální pevnosti (v tlaku) betonu s křemičitým kamenivem (ACI 216R-89, 1994)	52
Obrázek 9 Reziduální pevnosti (v tlaku) betonu s vápencovým kamenivem (ACI 216R-89, 1994)	52
Obrázek 10 Reziduální pevnosti (v tlaku) lehkého betonu (ACI 216R-89, 1994).....	53
Obrázek 11 Teplotní prodloužení betonů s křemičitým, vápencovým kamenivem (ACI 216R-89, 1994).....	53
Obrázek 12 Reziduální statické moduly pružnosti betonů s křemičitým, vápencovým kamenivem a lehkých betonů (ACI 216R-89, 1994).....	53
Obrázek 13 Reziduální procentuální pevnosti v tlaku, betony s křemičitým kamenivem, převzato z (Matesová, 2005).....	54
Obrázek 14 Reziduální procentuální pevnosti v tlaku, betony s vápencovým kamenivem, převzato z (Matesová, 2005).....	54
Obrázek 15 Reziduální procentuální pevnosti v tlaku, HSC betony, převzato z (Matesová, 2005)	55
Obrázek 16 Idealizované křivky zrnitosti obyčejného (vibrovaného) betonu (TVB) pro $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ (1 = Bolomey, 2 = Fuller, 3 = EMPA I, 4 = EMPA II), upraveno z (Bajza, 2006)	61
Obrázek 17 Hranice zrnitosti SCC, $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ (TKP 18, 2016).....	61
Obrázek 18 Typická křivka zrnitosti SCC, upraveno z (Aarre et al., 2003)	61
Obrázek 19 Mezifázové smykové napětí τ a napětí vlákna δ_f za předpokladu elastické matrice c), resp. elastoplastické matrice d), v důsledku napěťového pole kolem vlákna b) v usměrněném kompozitu s krátkými vlákny a). Průměrné hodnoty tahového napětí vláken znázorňuje schéma c). κ představuje napětí rovné pevnosti vlákna. Upraveno z (Bareš, 1988)	71

Obrázek 20 Porovnání vlivu vláken při tahovém namáhání: a) prostý beton (chování strain-softening typu I); b) vyztužený beton polymerními vlákny (chování strain-softening typu II); c) vyztužený beton ocelovými vlákny (chování strain-hardening). Upraveno z (Colleparidi, 2009)	72
Obrázek 21 Vliv teploty na pevnost v tahu u vybraných vláken, upraveno z (Bareš, 1988) ..	74
Obrázek 22 Příklad pracovního diagramu provedených ohybových zkoušek drátkobetonových trámů (150 x 150 x 550 mm, vlákna HE 1/50), (Kosinka, 2018)	77
Obrázek 23 Volba počtu zkušebních těles jednotlivých sad klíčových druhů betonů (ref, žih), 7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	91
Obrázek 24 Odběr kameniva, následovalo sušení	102
Obrázek 25 Příprava, vážení vstupních surovin	102
Obrázek 26 Míchání čerstvého SCC	102
Obrázek 27 Zpracování čerstvého SCC betonu.....	102
Obrázek 28 Typický trend klasifikace konzistence podle sednutí-rozlitím (SCC, SFRSCC / SFRC).....	108
Obrázek 29 Typický trend klasifikace konzistence podle sednutí-rozlitím (PFRSCC, PFRC, pevnostní třída 30/37, LWSCC)	108
Obrázek 30 Úprava těles řezem na pile s diamantovým kotoučem, řezání pod vodou.....	115
Obrázek 31 Krychle (upravené řezem) pro stanovení převodního součinitele	115
Obrázek 32 Zkušební lis ED400 (4000 kN)	116
Obrázek 33 Zkušební lis EU40 (400 kN)	116
Obrázek 34 Stanovení pevnosti v tahu ohybem (cementová tělesa)	117
Obrázek 35 Stanovení pevnosti v tlaku (cementová tělesa)	117
Obrázek 36 Označení tělesa křížovými značkami, Suchánek et al. (2017d).....	120
Obrázek 37 Kamerový pohled DIC (130 mm), Suchánek et al. (2017d)	120
Obrázek 38 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 2D DIC, Suchánek et al. (2017c)	120
Obrázek 39 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 3D DIC	120
Obrázek 40 Počáteční / stabilizovaný sečnový modul pružnosti v tlaku (25_2017), stanoveno normově ; zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{ref} , žih: 1 měsíc).....	122
Obrázek 41 Počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku (25_2017), stanoveno pomocí 3D DIC ; zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{ref} , žih: 1 měsíc)	122
Obrázek 42 Barevný přechod: Displacement Y [mm], těleso 25_2015ref, viz Suchánek et al. (2017c).....	123
Obrázek 43 Barevný přechod: Strain ϵ_Y [%], těleso 25_2015ref, viz Suchánek et al. (2017c)	123

Obrázek 44 Počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku SCC, SFRSCC.....	127
Obrázek 45 Počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku SFRSCC, FRC.....	127
Obrázek 46 Stabilizovaný sečnový modul pružnosti v tlaku SCC, SFRSCC	127
Obrázek 47 Stabilizovaný sečnový modul pružnosti v tlaku SFRSCC, FRC	127
Obrázek 48 Poissonův součinitel SCC, SFRSCC (počáteční / stabilizovaný), svislá vzdálenost 130 mm	127
Obrázek 49 Poissonův součinitel SFRSCC, FRC (počáteční / stabilizovaný), svislá vzdálenost 130 mm	127
Obrázek 50 Elektrická pec BVD 800/K	129
Obrázek 51 Regulátor Tempreg 400	129
Obrázek 52 Průběh teplotních křivek (1, 2 – nominální křivky (ČSN EN 1363-2, 2000); 3, 4, 5, 6 – experimentální křivky teplotního namáhání v elektrické peci)	131
Obrázek 53 Průběh experimentálních teplotních křivek – samovolné ochlazování v elektrické peci (3, 4, 5, 6 – experimentální křivky teplotního namáhání v elektrické peci)	131
Obrázek 54 Pevnost v tlaku SCC, SFRSCC, PFRSCC, zatíženo na 1049 °C v el. peci (stáří _{žih} : 3 měsíce), pevnostní třída SCC45/55	141
Obrázek 55 Pevnost v tlaku LWSCC, TVB, FRC, AAM, zatíženo na 1049 °C v el. peci (stáří _{žih} : C30/37: 2 roky, ostatní: 3–5 měsíců), (C25/30: N/A).....	141
Obrázek 56 Pevnost v tlaku SCC, LWSCC zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : SCC: 1 měsíc, LWSCC: 6 měsíců), (* d = 100 mm)	141
Obrázek 57 Pevnost v tlaku SFRSCC, zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : 25_2013: 3 měsíce, ostatní: 1 měsíc).....	141
Obrázek 58 Pevnost v tlaku SCC, FRC, SFRSCC, zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : 1 měsíc), pevnostní třída SCC30/37	141
Obrázek 59 Typický trend reziduálních pevností v tlaku HSC, zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : 3,5 měsíce), (* d = 100 mm)	141
Obrázek 60 Pevnost v tlaku FRC, LWSCC, zatíženo na 680 °C v el. peci (stáří _{žih} : LWSCC: 6,5 měsíce, ostatní: 3 měsíce)	142
Obrázek 61 Pevnost v tlaku FRC, FRSCC, zatíženo na 750 °C v el. peci (stáří _{žih} : 3 měsíce)	142
Obrázek 62 Pevnost v tahu ohybem SCC, SFRSCC, PFRSCC, zatíženo na 1049 °C v el. peci (stáří _{žih} : 3 měsíce), (50_2013žih: N/A), pevnostní třída SCC45/55	142
Obrázek 63 Pevnost v tahu ohybem LWSCC, TVB, FRC, AAM, zatíženo na 1049 °C v el. peci (stáří _{žih} : 3–11 měsíců), (* 4-bodový ohyb), (C30/37: N/A).....	142
Obrázek 64 Pevnost v tahu ohybem SCC, LWSCC, zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : SCC: 1 měsíc, LWSCC: 6 měsíců), (SCC45/55_2015, SCC45/55_2017: N/A).....	142

Obrázek 65 Pevnost v tahu ohybem SFRSCC, zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : 25_2013: 3 měsíce, ostatní: 1 měsíc), (25_2017: N/A)	142
Obrázek 66 Pevnost v tahu ohybem SCC, FRC, SFRSCC, zatíženo na 400 °C v el. peci (stáří _{žih} : 1 měsíc), pevnostní třída SCC30/37.....	143
Obrázek 67 Pevnost v tahu ohybem HSCref, (* 4-bodový ohyb), (HSCžih: N/A).....	143
Obrázek 68 Pevnost v tahu ohybem FRC, LWSCC, zatíženo na 680 °C v el. peci (stáří _{žih} : LWSCC: 6,5 měsíce, ostatní: 3 měsíce)	143
Obrázek 69 Pevnost v tahu ohybem FRC, FRSCC, zatíženo na 750 °C v el. peci (stáří _{žih} : 3 měsíce)	143
Obrázek 70 Průběh teplotních křivek (1, 2 – nominální křivky (ČSN EN 1363-2, 2000); 3, 4, 5, 6 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání: Teplota na povrchu vystavenému ohni (bod 0).....	145
Obrázek 71 Průběh teplotních křivek: 3, 4, 5, 6 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání / ochlazování: Teplota na povrchu vystavenému ohni (bod 0)	145
Obrázek 72 Průběh teplotních křivek: 3, 4, 5, 6, 7 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání: Teplota na povrchu odvrácenému ohni (bod 0).....	146
Obrázek 73 Průběh teplotních křivek: 3, 4, 5, 6, 7 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání / ochlazování: Teplota na povrchu odvrácenému ohni (bod 0)	146
Obrázek 74 Poloha měřených bodů, viz Suchánek et al. (2013b), těleso AAMžih_1	147
Obrázek 75 Zatěžování lokálním požárem.....	147
Obrázek 76 Pevnost v tlaku TVB, AAM, LWSCC, zatíženo na ~ 1049 °C teplotní lokální (bodové) namáhání, (stáří _{žih} : C25/30: 7 měsíců, ostatní: 1,5 měsíce), (* d = 100 mm)	150
Obrázek 77 Pevnost v tlaku SCC, FRSCC, FRC, zatíženo na ~ 750 °C , ~ 680 °C , teplotní lokální (bodové) namáhání, (stáří _{žih} : C2_2013: 4 měsíce, ostatní: 3 měsíce), (* d = 100 mm)	150
Obrázek 78 Pevnost v tlaku SFRSCC, zatíženo na ~ 400 °C teplotní lokální (bodové) namáhání, (stáří _{žih} : 1,5 měsíce, 5 měsíců), (* d = 100 mm), (# jiné stáří).....	150
Obrázek 79 Typický trend rychlosti zahřívání – vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání.....	151
Obrázek A 1 Skládka kameniva (HTK 4/8)	180
Obrázek A 2 Příprava vstupních surovin.....	180
Obrázek A 3 Situace při výrobě betonu	180
Obrázek A 4 Zkoušení čerstvého SCC: zkouška sednutí-rozlitím (LWSCC).....	180

Obrázek A 5 Fibrilovaná PP mikrovlákná Texzem PPF 370	180
Obrázek A 6 Syntetická PP makrovlákná Synmix 55	180
Obrázek A 7 Detail carbonové tkaniny	181
Obrázek A 8 Připravená carbonová vlákna	181
Obrázek A 9 Vlákna Dramix 3D 45/50-BL	181
Obrázek A 10 Značení vzorků.....	181
Obrázek A 11 Zkouška pevnosti v tlaku (a=150 mm)	181
Obrázek A 12 Zkouška pevnosti v tahu ohybem (100 x 100 x 400 mm).....	181
Obrázek A 13 Kalibrace, určení měřicí roviny	182
Obrázek A 14 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 3D DIC, detail	182
Obrázek A 15 Situace při sběru dat	182
Obrázek A 16 Pohled do prostoru elektrické pece	182
Obrázek A 17 Termodiagnostika, teplota na povrchu lokálně ohřivaného tělesa.....	182
Obrázek A 18 Průběh teploty [°C] na povrchu tělesa (boční pohled) – v místě řezu P1z Obr. A 17	182
Obrázek A 19 Zatěžování lokálním požárem.....	183
Obrázek A 20 Zatěžování lokálním požárem, detail difuze vodní páry, těleso Syn2_2013_žih	183
Obrázek A 21 Poškozené zkušební těleso – válec (25_2013žih), zatíženo na 1049 °C.....	183
Obrázek A 22 Poškozené zkušební těleso – válec (4PP_2013žih), zatíženo na 1049 °C	183
Obrázek A 23 Poškozené zkušební těleso – hranol (50_2013žih), zatíženo na 1049 °C	183
Obrázek A 24 Poškozené zkušební těleso – krychle (50_2013žih), zatíženo na 1049 °C	183
Obrázek A 25 Rozmístění těles v elektrické peci.....	184
Obrázek A 26 Těleso protkané sítí trhlin po teplotním lokálním namáhání – (LWSCCžih) zatíženo na ~ 1049 °C	184
Obrázek A 27 Poškozené zkušební těleso – hranol (Syn2_2013žih), zatíženo na 750 °C....	184
Obrázek A 28 Zkušební tělesa 25_2017žih po teplotním namáhání na 400 °C.....	184
Obrázek B 1 Průběh teploty na povrchu vystavenému ohni, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	186
Obrázek B 2 Průběh teploty na povrchu odvrácenému ohni, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	186
Obrázek B 3 Průběh teploty na povrchu – ochlazování, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	187

Obrázek B 4 Průběh teploty na zbývající části vzorku, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	187
Obrázek B 5 Průběh teploty na zbývající části vzorku – ochlazování, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	188
Obrázek B 6 Průběh teploty na povrchu vystavenému ohni, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	189
Obrázek B 7 Průběh teploty na povrchu odvrácenému ohni, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	189
Obrázek B 8 Průběh teploty na povrchu – ochlazování, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	190
Obrázek B 9 Průběh teploty na zbývající části vzorku, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	190
Obrázek B 10 Průběh teploty na zbývající části vzorku – ochlazování, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	191
Obrázek D 1 Ilustrační cyklus napětí pro stanovení počátečního a stabilizovaného sečnového modulu pružnosti v tlaku (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E.....	200
Obrázek D 2 Ilustrační kontrola přetvoření mechanických snímačů (levá / pravá), (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E.....	200
Obrázek D 3 Ilustrační diagram napětí-deformace, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E.....	200
Obrázek F 1 Elektronový mikroskop (TESCAN VEGA 5130SB) s mikroanalyzátozem EDXA (Bruker Quantanax 200).....	215
Obrázek F 2 Odštěpek zkušební tělesa (2PP_2013ref).....	215
Obrázek F 3 Mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013ref (2,5 kx).....	215
Obrázek F 4 Mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013žih na 1049 °C (1 kx).....	215
Obrázek F 5 EDXA – SCC45/55_2013ref.....	216
Obrázek F 6 EDXA – SCC45/55_2013žih na 1049 °C.....	216
Obrázek F 7 Mikrostruktura ztvrdlého 25_2013ref, rozhraní cementová matrice–ocelové vlákno (2 kx).....	216
Obrázek F 8 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, rozhraní cementová matrice–syntetické vlákno (700 x).....	216
Obrázek F 9 Mikrostruktura ztvrdlého 25_2013ref (SE vlevo, BSE vpravo), řez přes ocelový drátek (100 x).....	217

Obrázek F 10 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, rozhraní cementová matrice– syntetické vlákno (100 x).....	217
Obrázek F 11 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, „stabilní“ kostra (2,5 kx).....	217
Obrázek F 12 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref (SE, BSE), cementová matrice, syntetické vlákno (300 x).....	218
Obrázek F 13 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013žih na 1049 °C, viditelný otisk po vytavení vláken (100 x).....	218
Obrázek F 14 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013žih na 1049 °C, (1 kx).....	218
Obrázek F 15 Carbonové (uhlíkové) vlákno (1 kx)	219
Obrázek F 16 Mikrostruktura ztvrdlého C2_2013ref (700 x).....	219
Obrázek F 17 Mikrostruktura kameniva Rugen, žih na 400 °C (2,5 kx)	219
Obrázek F 18 Mikrostruktura kameniva Rugen, žih na 400 °C (1 kx)	219
Obrázek F 19 Binokulární mikroskop (Nikon SMZ 800).....	220
Obrázek F 20 Světelná mikroskopie: porovnání ocel. drátků po zatížení na 1049 °C (vlevo) / před teplotním namáhání (vpravo).....	220
Obrázek F 21 Struktura LWSCCref	220
Obrázek F 22 Porušená tranzitní zóna C30/37žih na 1049 °C.....	220

SEZNAM ZKRATEK

ACI	American Concrete Institut
C	samouzavírání
CEB	Comites Euro-International du Beton
CEN	Evropský výbor pro normalizaci European Committee for Standardization
CHRL	chemické rozmrazovací látky
CMOD	přímé měření rozevírání trhliny Crack Mouth Opening Diagram
Ca(OH) ₂	portlandit / hydroxid vápenatý
C-S-H gel	kalcium–silikátový–hydrát (skupina produktů amorfního charakteru)
C-A-H	kalcium–aluminát–hydrát
C-H	kalcium–hydrát
DFJP	Dopravní fakulta Jana Pernera
ČR	Česká republika
DIC	korelace digitálního obrazu Digital Image Correlation
E	celistvost konstrukce
EDXA / EDS	Energeticky disperzní rentgenová analýza / Energiově disperzní spektroskopie / Energy dispersive X-ray analysis
f _c	pevnost v tlaku stanovená na válcích
fib	Mezinárodní betonářská organizace Fédération internationale du béton International Federation for Structural Concrete
FRC	vláknobeton Fibre Reinforced Concrete
FRSCC	samozhutnitelný vláknobeton Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete

HSC	vysokopevnostní beton High Strength Concrete
HPC	vysokohodnotný beton High Performance Concrete
HPSFRC	vysokohodnotný drátkobeton High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete
I	tepelná izolace konstrukce
LC	lehký beton Lightweight Concrete
LWSCC	lehký samozhutnitelný beton Lightweight Self-Compacting Concrete
M	mechanická odolnost
MKP	metoda konečných prvků
N/A	nedostupná hodnota
PAVUS	Požárně atestační a výzkumný ústav stavební (PAVUS, a.s.)
PO	požární odolnost
PP	polypropylén
PPF	polypropylénfumarát
PCE	polykarboxylátový ester Polycarboxylate Ether
PFRC	vláknobeton s přidáním syntetickými (polymerními) vlákny Polymer Fibre Reinforced Concrete
PVA	polyvinylalkohol
R	nosnost konstrukce
(ref)	referenční tělesa (teplotně nezatěžovaná)
SFRC	drátkobeton Steel Fibre Reinforced Concrete
SFRSCC	samozhutnitelný drátkobeton Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie Scanning Electron Microscopy
SCC	samozhutnitelný beton

	Self-Compacting Concrete
SRA	přísada redukující smršťování Shrinkage-Reducing Admixture
SFRC	drátkobeton Steel Fibre Reinforced Concrete
SFRSCC	samozhutnitelný drátkobeton Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete
Sa, Sm	kouřotěsnost konstrukce
TC	Technical Committee
TP	technické podmínky
TKP	technické kvalitativní podmínky
TVB	tradiční (vibrovaný) beton
UHPC	ultra-vysokohodnotný beton Ultra High Performance Concrete
UK	Spojené království Velké Británie a Severního Irska the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
VVCD	Výukové a výzkumné centrum v dopravě
W	radiace z povrchu konstrukce
(žih)	teplotně zatěžovaná tělesa

ÚVOD

V návaznosti na rychlý rozvoj cementových kompozitních materiálů a v souvislosti s rozmanitou materiálovou základnou při vlastním návrhu vstupních surovin, z nichž budou betonové konstrukce zhotoveny, vstupuje do popředí otázka vlivu teplotních namáhání na moderní – speciální – druhy betonů.

Požáry způsobují nejenom obrovské materiální škody, nýbrž představují riziko pro ohrožení zdraví nebo úmrtí osob či zvířat. I když požárům nelze zcela zabránit, snahou je eliminovat jejich počet a v neposlední řadě i rozsah jejich škod. Pro zajištění požární ochrany je využívána aktivní, případně pasivní požární ochrana.

Beton musí odpovídat platným zákonným předpisům. S ohledem na normativní zakotvení je možno konstatovat, že betonové konstrukce vystavené účinkům požáru „lze posuzovat“ (závaznost norem je dána smluvně) stejným způsobem jako při návrhu podle (ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011), do výpočtu se však zavádí změny pevnostních a přetvárných vlastností formou redukčních součinitelů, viz (ČSN EN 1992-1-2, 2006). Tato metodika, aplikovaná při navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru pro jednoduché a zpřesněné metody (ČSN EN 1992-1-2, 2006), nepostihuje chování speciálních betonů. Matematický model pracovního diagramu betonu v tlaku při zvýšených teplotách je popsán funkcí teploty obvyčejného betonu v závislosti na typu použitého kameniva (křemičitého, nebo vápencového). Neplatí však pro popis betonu s lehkým kamenivem. Dle autorova přesvědčení, tento přístup pro určení redukčních součinitelů ke stanovení reziduálních vlastností, nevystihuje v dostatečné míře chování dalších speciálních betonů – citovaných v základní „betonářské“ normě (ČSN EN 206+A1, 2018; ČSN P 73 2404, 2016).

Disertační práce si klade za svůj hlavní úkol prověřit základní vlastnosti (v čerstvém i ztvrdlém stavu) vybraných nosných kompozitních materiálů na bázi hydraulicky vytvrzovaných cementových pojiv používaných (eventuálně použitelných) v dopravním nebo pozemním stavitelství. Dalším cílem bylo stanovit reziduální mechanicko-fyzikální vlastnosti (včetně Poissonova součinitele) těchto betonů po účincích extrémních teplotních namáhání. Pozornost byla věnována experimentálnímu zkoušení na autorem zhotovených zkušebních tělesech ze speciálních betonů [samozhutnitelný beton (SCC), samozhutnitelný vláknobeton (FRSCC) / vláknobeton (FRC), samozhutnitelný drátkobeton (SFRSCC) / drátkobeton (SFRC), lehký samozhutnitelný beton (LWSCC), okrajově specifický vysokopevnostní beton (HSC) a doplňkově obvyčejný (vibrovaný) beton (TVB)] a na odebraných tělesech z alkalicky aktivovaného materiálu (AAM). Kromě zkoušení čerstvého betonu je důraz kladen

na stanovení základních atributů betonu – pevnostních a přetvárných charakteristik. Z „trvanlivostních vlastností“ byla pozornost věnována experimentálnímu zkoušení odolnosti speciálních betonů proti působení vysokým teplotám.

1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU V OBLASTI TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce navazuje na soudobé poznatky v tématice vybraných nosných betonových kompozitních materiálů (v čerstvém a ztvrdlém stavu) a jejich závislosti na mechanicko-fyzikálních vlastnostech při zvýšených teplotách vznikajících při působení vysokých teplot.

Analýza současného stavu poznání je založena na studiu odborných publikací, vědeckých prací, evropských a národních technických předpisů, norem a mezinárodních doporučení.

1.1 Právní a normativní předpisy

Beton musí odpovídat platné legislativě. Z hlediska bezpečnosti staveb jde o zákon (č. 22/1997 Sb.), o technických požadavcích na výrobky.

S ohledem na požární ochranu staveb musí splňovat požadavky zákona (č. 133/1985 Sb.) a vyhlášky Ministerstva vnitra (č. 246/2001 Sb.). Z hlediska nároků na požární bezpečnost staveb jde o stavební zákon (č. 183/2006 Sb.) a vyhlášku (č. 137/1998 Sb.).

Normativní zkoušení požární bezpečnosti a navrhování / posuzování požární odolnosti betonových konstrukcí (účinků extrémních teplotních namáhání) je podrobněji popsáno v teoretické části této práce.

1.2 Vady a poruchy betonu

Vada betonu je nepříznivý jev, který nesnižuje míru spolehlivosti betonu / konstrukce (například: estetická vada betonu, nadměrný průhyb konstrukce).

Porucha je částečná nebo úplná ztráta schopnosti betonu, prvku nebo konstrukce plnit požadované funkce. Dochází k dosažení některého z mezních stavů. Poruchy mívají původ ve vzájemném působení vad. Lze je rozdělit na staticky nevýznamné poruchy; ze statického a funkčního hlediska významné a poruchy staticky velmi závažné (havarijní).

K poruchám betonu dochází vlivem působení nepříznivě ovlivňujících činitelů, více kap. (1.3 Degradace betonu), Obr. 1.

1.3 Degradace betonu

Degradace materiálu **tepelným zatížením** patří do základní skupiny degradačních procesů. Dalšími degradačními procesy lze označit degradaci mechanickým zatěžováním, degradaci chemickou – koroze, degradaci zářením.

Působení vysokých teplot patří mezi základní – vnější – činitele ovlivňující životnost betonových prvků / konstrukcí. Obr. 1 deklaruje vnější, vnitřní a konstrukční činitele ovlivňující životnost betonu včetně následků jejich působení.

Degradační procesy v betonu lze rozdělit na:

- **fyzikální** (vliv mrazu, vlhkosti, teploty, větru, záření, otěru, apod.),
- **chemické,**

Při chemické reakci materiálu se složkami okolního prostředí dochází k chemické korozi betonu. Jedná se o trvalé porušení postupující od povrchových vrstev, závisí na chemických i fyzikálních podmínkách (teplota, tlak a rychlost proudění).

Chemické procesy lze rozdělit na:

- **koroze prvního druhu** – vyluhování (rozpuštění a vyluhování složek cementového tmele).

Projev: tvorba kalcitového výluhu.

Nejvyšší rozpustnost má portlandit Ca(OH)_2 . Dochází ke snížení stability hydrátů C-S-H a C-A-H, hydráty se rozpadají až na oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) a ztrácí vazebné schopnosti. Pokles koncentrace Ca(OH)_2 vede k poklesu pH betonu.

- **koroze druhého druhu** – nevazebné produkty (chemické reakce cementového tmele se složkami prostředí).

Projev: tvorba výkvětů ve formě hydrátů.

Např. kyselinová koroze, karbonatace, alkalické a hořečnaté rozpínání.

Výkvěty se tvoří na povrchu betonu, který je střídavě smáčen a vyluhován. Více např. Matoušek et al. (1998).

- **koroze třetího druhu** – rozpínání (vznik objemných produktů, které svým rozpínáním způsobují poškozování struktury betonu).

Dochází k velkému zvětšení objemu v pevné fázi, k expanzi cementového tmele a s tím souvisejícího vzniku vnitřních napětí a trhlin v betonu.

Např. síranová koroze / sádrovcová koroze (složena z reakcí: vytvoření sádrovce, vytvoření hydratovaného sulfoaluminátu); hořečnaté rozpínání; solná koroze. Více např. Pavlíková et al. (2011).

- **případně: koroze ocelové výztuže v betonu** (chemická, elektrochemická a interkrystalická koroze).
- **biologické** (bakterie, houby, mechy).

V reálných podmínkách však dochází k působení několika degradačních procesů zároveň.



Obrázek 1 Schéma rozdělení činitelů ovlivňujících životnost betonových konstrukcí, upraveno z (Bilčík et al., 2003)

1.3.1 Trhliny v betonu

Při zatěžování betonu vznikají vnitřní mikroporuchy – mikrotrhliny, které způsobují nevratné změny vnitřní struktury betonu. Energie je disipována ve formě tepla, mechanických vibrací a vytvářením nových povrchů.

Trhliny mohou vzniknout na rozhraní plnivo-cementový tmel, v cementovém tmelu, v maltové matici, v plnivu. Jsou považovány za funkční vadu (estetickou, trvanlivostní – koroze výztuže; mají negativní vliv na vodonepropustnost).

1.3.1.1 Příčiny a mechanismus vzniku trhlin

Teorie rozvoje trhlin a porušení betonu je založena na Griffithově teorii. Je zatížena určitými nedostatky (předpoklad pružnosti a homogenní spojitosti, předpoklad konstantního modulu pružnosti a konstantní specifické povrchové energie).

Příčiny vzniku trhlin vyvolané vlivem objemových změn:

- Silové změny (pružné, plastické),
- Nesilové změny:
 - **Teplotní.** Rozhodující činitele: množství cementu, hydratační teplo cementu, počáteční teplota čerstvého betonu, (výpočet teploty a napětí), použitá protiopatření.
 - **Vlhkostní a chemické:** plastické smrštění / hydratační smrštění / karbonatační smrštění.

1.4 Požární návrh konstrukce

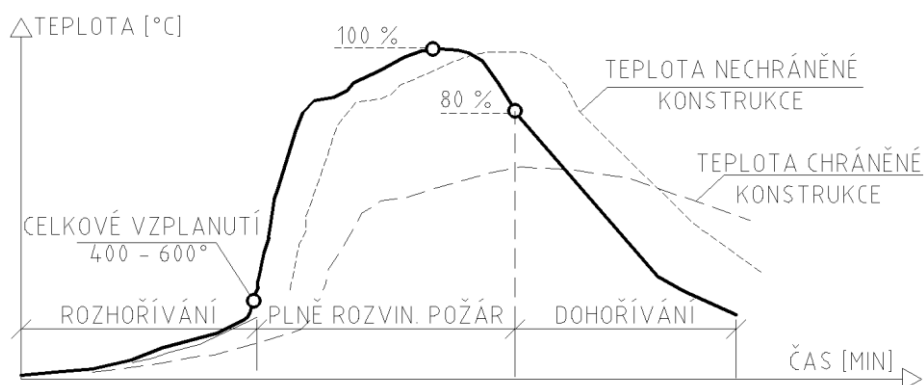
Termíny a definice:

Zvýšená teplota vyvodí v betonovém prvku dlouhodobě teplotu max. 250 °C (ČSN 73 1230, 1990).

Vyšší teplota vyvodí v betonovém prvku dlouhodobě teplotu vyšší než 250 °C (ČSN 73 1230, 1990).

Požár je nežádoucí, živelné a nekontrolovatelné hoření. Jedná se o proces doprovázený chemickými a fyzikálními jevy (ČSN ISO 8421-1, 1996).

Intenzita požáru je dána množstvím, druhem, výhřevností, pórovitostí, způsobem uložení, rozmístěním hořlavých látek a rovněž podmínkami hoření (Voves, 1983).



Obrázek 2 Model požáru – tři fáze rozvoje požáru, upraveno z (Procházka et al., 2010)

Pokud je hořlavá látka zahřátá na teplotu uvolňující z povrchu hořlavé plyny, dochází k **hoření** (tzv. rychlé chemické oxidační reakci). Vlastní průběh hoření lze rozdělit do třech fází (Procházka et al., 2010) – charakteristických časových období – na rozhořívání, plně rozvinutý požár a dohořívání, viz schematický model požáru na Obr. 2.

Návrhový požár představuje pravděpodobný rozvoj a průběh požáru v požárním úseku nebo objektu, na který je dimenzováno požární zabezpečení (požárního úseku nebo

objektu). Jedná se o kvantitativní popis předpokládaných charakteristik požáru ve scénáři návrhového požáru (ČSN EN ISO 13943, 2011). Zahrnuje tři etapy rozvoje požáru, viz Obr. 2. **Výpočtové požární zatížení** se vztahuje pouze ke druhé fázi.

Lokální požár nastává v případě, pokud nedojde k rozšíření hoření po celé ploše požárního úseku, ale jeho průběh je pouze místní. Rozlišují se dva modely lokálního požáru (plameny nezasahující strop, plameny zasahující strop). Délka plamene lokálního požáru závisí na rychlosti uvolňování tepla a na průměru ohně, více (ČSN EN 1991-1-2, 2004), Příloha C.

Norma (ČSN EN 1990, 2004) **definuje mimořádnou návrhovou situaci** jako stav, kdy je konstrukce vystavena mimořádným podmínkám, nebo vlivům, včetně požáru (např. požár v tunelu Lochkov – (Svoboda et al., 2014)), výbuchu, nárazu, nebo místním porušením.

Extrémní návrhové situace (např. působení požáru) mohou způsobit selhání konstrukce ještě před vypršením návrhové životnosti. Informativní návrhové životnosti – viz (ČSN EN 1990: Změna Z1, 2010). **Navrhování konstrukcí na zatížení požárem** se stalo součástí statického výpočtu již v době návrhu prvku / konstrukce.

1.5 Požární odolnost

Při posuzování staveb **bývá mnohdy jedním z rozhodujících faktorů** požární odolnost. Požární odolnost zkušebního prvku **je vyjádřena dobou (v minutách), po níž jsou splněna příslušná kritéria** (ČSN EN 1363-1, 2013). Je definována jako schopnost konstrukce odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce (mezního stavu únosnosti nebo použitelnosti), ke ztrátě celistvosti nebo izolační schopnosti (tzv. překročení mezních teplot), více (ČSN EN 1991-1-2, 2004). Pokud konstrukce nemá požárně dělící funkci, ztráta celistvosti a překročení mezních teplot se neposuzuje.

Základní normativní předpis, norma (ČSN 73 0810, 2016) „Požární odolnost staveb – Společná ustanovení“, charakterizuje mezní stavy (tzv. charakteristické vlastnosti požární odolnosti):

- nosnost (nebo stabilita) konstrukce R,
 - celistvost konstrukce E,
 - tepelná izolace konstrukce I (teplota na neohřívané straně),
 - radiace z povrchu konstrukce W (hustota tepelného toku),
 - kouřotěsnost konstrukce S (prostup zplodin hoření),
- v případě požárních uzávěrů: Sa, Sm,

- samouzavírání C,
- mechanická odolnost M.

Dále zavádí konstrukční části druhu (DP1, DP2, DP3), více viz (ČSN 73 0810, 2016).

Značení doplňkových vlastností stavebních konstrukcí je uvedeno v normách (ČSN EN 13501-1+A1, 2010; ČSN EN 13501-2+A1, 2010).

Norma (ČSN 73 0810, 2016) seznamuje s požadavky na stavební výrobky, zavádí požadovanou dobu stanovenou v minutách, tzv. **stupnici požární odolnosti**: 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut, více např. (ČSN 73 0802, 2009; ČSN 73 0804, 2010). Stupnice požární odolnosti přímo souvisí s označením stupně požární bezpečnosti (např.: I–VII).

1.5.1 Aktivní a pasivní požární ochrana

Pro zajištění požární bezpečnosti staveb je nutné navrhovat **aktivní** požární ochranu (např. samočinná hasicí zařízení – vodní rozstřikovače, pěnotvorné systémy; zařízení pro odvod kouře a tepla; elektrická požární signalizace; jednotka hasičského záchranného sboru) a **pasivní** požární ochranu (odolnost obalového systému – stříkané malty na bázi vermikulitu, protipožární prefabrikované prvky, beton modifikovaný polymerními vlákny; dělení na požární úseky; požární odolnost nosných konstrukcí; požární odolnost požárně dělicích konstrukcí).

Poznámka: v předložené práci jsou využívána opatření spadající do pasivní ochrany, konkrétně modifikace čerstvého betonu přidáním syntetických vláken.

1.6 Vliv působení vysokých teplot na beton

Při extrémním teplotním namáhání dochází ke **změně fyzikálně-chemických vlastností** betonu. Nastává značné vnitřní pnutí vyvolané rozdílnou teplotní roztažností jednotlivých složek betonového prvku nebo konstrukce.

Nepříznivé vlivy způsobené účinkem teplotní expozice se projevují nejen při působení požáru, ale i po vychladnutí hmoty.

Negativní aspekty, ke kterým dochází:

- nárůst propustnosti a pórovitosti, více (Bangí et al., 2011, Chan et al., 1999), (vlivem porušení celistvosti dochází ke vzniku trhlin a puklin, eventuálně ke drolení),
- explozivní odštěpování betonu (trvá, dokud se beton nerozpadne nebo dokud nepoleví požár),
- odpadávání betonu (nastává především v pokročilejší fázi požáru),
- ztráta konstrukční pevnosti a zmenšení modulu pružnosti (Khoury, 1992).

Pokles mechanických vlastností betonu závisí především na **rychlosti zahřívání, maximální dosažené teplotě, vlhkosti betonu** a ze surovinové základny **zejména na druhu použitého kameniva**.

1.6.1 Explosivní odštěpování betonu

Zvýšení teploty má značný vliv na odštěpování betonu v důsledku rychlé tvorby vodní páry a teplotní rozpínivosti kameniva. Nejdůležitější hnací mechanismy odštěpování povrchové vrstvy betonu přímo souvisí s **vlhkostí, mikrostrukturou** a transportními ději cementového materiálu.

Odštěpování betonu je **popisováno** jako explozivní odprýskávání a oddělování povrchové vrstvy betonu. K odprýsknutí betonu dochází obvykle do 20 minut po vzniku požáru, již při teplotách kolem 300 °C.

Nejúčinnějším opatřením proti odprýsknutí je zmenšení vnitřní napjatosti (např. použití polymerních vláken), případně návrh konstrukčních opatření (např. vhodným tvarem průřezu) podle Bulletin D'Information CEB (Kučera et al., 2010; Bulletin D'Information, 1991), nebo vyloučením velkých rozdílů tloušťek průřezu.

Polypropylenová vlákna se taví při teplotě 150–160 °C (Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete, 2007), což umožní vodní páře unikat bez vytvoření vnitřního tlaku. Tento efekt zabraňuje, nebo determinuje explozivní odštěpování.

Bošnjak et al. (2013) popisuje stěžejní vliv relativní vlhkosti prostředí na vlastní efekt explozivního odštěpování betonových těles vyztužených PP vlákny. Uvádí, že při relativní vlhkosti prostředí nad 70 % vzniká velké riziko odprýskávání i při dávce vláken 1 kg·m⁻³.

Principem odštěpování betonu se ve svých tezích zabývá kolektiv autorů Štefan – Beneš (Beneš et al., 2015, 2013a, 2013b). Procházka a Štefan (2015) se podíleli na vývoji software pro transportní úlohy odštěpování betonu (Procházka et al., 2011, 2009).

Lennon (2004) popisuje odštěpování betonu na experimentálních tělesech zhotovených pro vývoj britských norem BS 8110 (BS 8110-1, 1997). Skutečná požární odolnost byla nižší než předpokládaná. Bylo potvrzeno, že odštěpování betonu by nemělo vážně ohrozit požární odolnost betonových prvků při běžných požárech.

Procházka et al. (2009) poukazuje na **možný transport vodní páry v prostoru mezi vlákny a okolním povrchem betonu** (v důsledku jejich špatné soudržnosti) ještě před začátkem tavení vláken. Mikroskopický snímek rozhraní (PP vlákno-matrice) je zobrazen v příloze F – Obr. F 8, F 10, F 12.

Pro **obyčejné betony** platí, že při vlhkosti betonu $\leq 3\%$ **hmotnosti**, nebo při navrženém stupni vlivu prostředí X0 a XC1 (ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011) je účinek explozivního odštěpování nepravděpodobný. Při vlhkosti betonu $> 3\%$ se musí posoudit množství vlhkosti, typ kameniva, propustnost betonu a rychlost zahřívání. Poznámka: hodnota (3 %) se může měnit dle národní přílohy v konkrétních členských státech CEN (ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011).

V případě **vysokohodnotných, vysokopevnostních betonů** (HPC, HSC) platí výše uvedená pravidla za předpokladu, že maximální obsah křemičitého úletu je menší než 6 % hmotnosti cementu. Pro vyšší obsah křemičitého úletu a pro betony pevnostních tříd $80/95 < C \leq 90/105$ může dojít k odštěpování pokaždé – při přímém vystavení betonu účinkům požáru. Má se použít nejméně jeden z následujících postupů:

- **Postup A:** výztužná síť se jmenovitou krycí vrstvou 15 mm. Průměr ≥ 2 mm, oka $\leq 50 \times 50$ mm. Jmenovitá krycí vrstva hlavní výztuže $c_1 \geq 40$ mm,
- **Postup B:** typ betonu, u kterého bylo prokázáno, že za požáru nedochází k odštěpování,
- **Postup C:** ochranné vrstvy, u kterých bylo prokázáno, že za požáru nedochází k odštěpování betonu,
- **Postup D:** přidání PP vláken do čerstvého betonu v množství $> 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Dalším negativním aspektem odprýsknutí betonu (v případě vyztužených betonů) je obnažení výztuže, což má za následek rychlé zahřátí výztuže a její porušení (např. vybočení podélné výztuže, roztržení třmenů, výrazný pokles meze kluzu a pevnosti výztuže, apod.). Poznámka: pevnostní a deformační vlastnosti výztuže klesají při teplotách nad 100°C , více (ČSN EN 1992-1-2, 2006). Kritickou teplotou lze označit mez 500°C .

1.6.2 Odpadávání betonu

V pokročilejší fázi požáru se musí zabránit odpadávání betonu.

V případě železového betonu: pokud je osová vzdálenost výztuže vzdálena od povrchu 70 mm a více nebo nebyly provedeny zkoušky (prokazující, že nedojde k odpadávání betonu), je nutné provést povrchovou výztuž (průměr ≥ 4 mm, rozteč prutů max. 100 mm, více (ČSN EN 1992-1-2, 2006)).

1.7 Transformace betonu při zvýšených teplotách

V Tab. 1, 2 jsou shrnuty zásadní změny betonu při působení vysokých teplot.

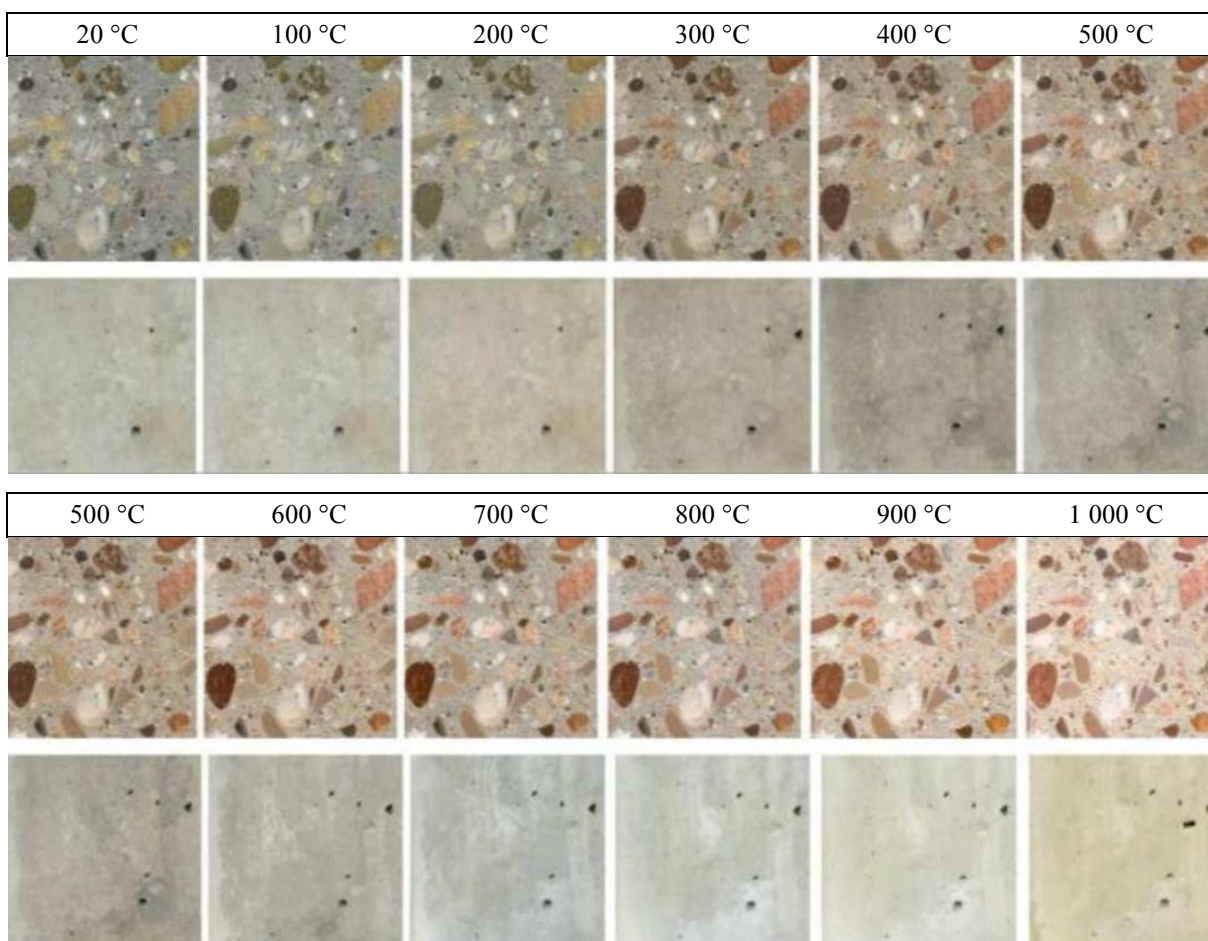
Při teplotách vznikajících při požáru (do 1 200 °C) dochází k rozpadu betonu a porušení jeho struktury. Proces porušování probíhá od povrchových vrstev směrem dovnitř průřezu betonu.

Tabulka 1 Vliv teploty na povrchové změny betonu

Teplota [°C]	Barevné změny	Změny konstrukce	Stav betonu
0–290	-	Bez poškození.	Bez poškození.
290–590	růžová–červená	Povrchové trhliny: 300 °C. Hluboké trhliny: 550 °C.	Pevnost výrazně snížena.
590–950	šedobílá	Odprýskávání: 800 °C.	Neúnosný a drobnivý beton.
≥ 950	žlutohnědá	Rozsáhlé odprýskávání.	Neúnosný a drobnivý beton.

Zdroj: Upraveno z (Gosain et al., 2008)

Obrázek 3 Povrchové (barevné) změny betonu, upraveno z (Hager, 2004)



Tabulka 2 Pevnostní a mineralogické změny betonu při zahřívání

Teplota [°C]	Změny způsobené zahříváním	
	Mineralogické změny	Pevnostní změny
70–80	Disociace etringitu způsobuje jeho úbytek v cementové matici.	
105	Ztráta fyzikálně vázané vody v betonu způsobuje vzrůstající kapilární porozitu a vznik menších mikrotrhlin. Rychlost odpařování vody ovlivňuje druh betonu.	Ztráta pevnosti < 10 %
120–163	Rozklad $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
250–350	Oxidací sloučenin železa (kolem 300 °C) se kamenivo začíná zabarvovat do růžova / červena. Úbytek vázané vody v cementovém tmelu způsobuje výraznější degradaci.	Významná ztráta pevnosti okolo 300 °C (15–40 %).
450–500	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ dehydratuje. Zabarvení kameniva do červena se zvýrazňuje až do teploty 600 °C. Křemenné kamenivo se může zbarvit do šedé, nebo bílé barvy. Normálně izotropní cementový tmel vykazuje nestejnoroďe žlutou / béžovou barvu v příčném polarizovaném světle. Mnohdy vykazuje i dvojlom při teplotě 500 °C.	Ztráta pevnosti okolo 400 °C (> 40 %).
573	Nastává přeměna z α na β -křemen. Dochází k nárůstu objemu křemene o cca 5 %, což způsobuje vznik radiálních trhlin a praskání zrn kameniva.	Beton přestává být konstrukčně použitelný při teplotách nad 550 °C (55–70 %).
600–800	Dekarbonatace uhličitanů. V závislosti na obsahu uhličitanů v betonu dochází ke kontrakci v důsledku uvolňování oxidu uhličitého, čímž dochází ke vzniku významného množství mikrotrhlin v cementovém tmelu. Výraznější projev je u vápencového kameniva.	
800–1 200	Při teplotách nad 800 °C se struktura betonu sline. Kompletní rozklad vápencových složek kameniva a cementové matrice v důsledku jejich disociace. Dochází k bělavě šedému zbarvení betonu a ke vzniku rozsáhlé sítě mikrotrhlin. Vápencové kamenivo se zbarvuje do bíla.	Ztráta pevnosti při teplotách nad 800 °C (> 90 %).
1 200	Začátek tavení betonu (žáruvzdorné betony až okolo 1 550 °C).	
1 300–1 400	Kompletní roztavení betonu.	

Zdroj: Upraveno z (Ingham, 2009; Lee et al., 2010)

Tabulka 3 Vliv porušené vrstvy betonu v závislosti na délce působení požáru

Materiál	Porušená vrstva materiálu [mm]		
	Doba požáru		
	30 min	90 min	180 min
Beton, malta	0–1	15–25	25–40
Pórobeton	0–5	30–40	50–70

Zdroj: Upraveno z (Bilčík et al., 2003)

1.8 Vliv působení vody na beton

1.8.1 Voda – pórová struktura betonu a druh vody

Prostor mezi plnivem (spojeným dohromady pomocí cementového tmele) zaujímá systém pórů obsahující vodu a vzduch s vodní párou.

Podle uspořádání pórů lze rozdělit pórovitost na:

- uzavřenou,
- otevřenou.

Vodu v betonu podle intenzity vazeb lze rozčlenit na:

- chemicky vázanou (hydratovanou),
- fyzikálně vázanou (adsorbovanou na stěnách pórů),
- volnou vodu.

Adsorbovaná voda a volná voda je označována jako **odpařitelná voda**.

Hydratovaná voda jako **neodpařitelná**.

Dělení odpařitelné vody podle velikosti pórů:

- gelová voda (výskyt v nejmenších pórech),

gelové póry:

- mikropóry < 2 nm,

- kapilární voda (výskyt ve větších pórech).

kapilární póry:

- mezopóry: 2–50 nm,

- makropóry ≥ 50 nm.

Klasifikace pórů je uvedena podle IUPAC (1985). Mezi jednotlivými vrstvami C-S-H gelu může být voda uzavřená. Čím menší je pór, tím složitější je z něj vodu vysušit.

Zjednodušené modely pórů a jejich rozdělení v cementové kaši blíže popisuje Telford (1992).

Popis iniciace transportu vody v betonu při vysokých teplotách je uveden v kap. (1.18 Popis složek betonu při zvýšených teplotách) > (1.18.3 Voda).

1.8.2 Vliv vlhkosti na objemové změny

Vlhkost betonu hraje významnou roli při chování betonových prvků nebo konstrukcí při působení požáru. Je ovlivněna poměrnou hmotností volné vody v betonu, složením čerstvého betonu, stářím betonu a vlhkostí prostředí.

Změny vlhkosti patří k podceňovaným faktorům ovlivňujícím pevnostní a přetvárné charakteristiky cementových kompozitních materiálů.

V závislosti na okamžiku vzniku (a příčin) lze rozlišovat smršťování podle Tab. 4.

Tabulka 4 Označení a příčiny smršťování

Označení zmenšení objemu betonu	Příčiny zmenšení objemu betonu	
Počáteční (plastické) smršťování	Kapilární síly v čerstvém betonu	Vypařování vody z povrchu čerstvého betonu.
(Normální) smršťování	Odpařování vody ze ztvrdlého betonu	
Chemické („autogenní“) smršťování / Autogenní deformace	Hydratace cementu	Mikroúroveň: Zmenšení objemu cementové matrice / chemické smršťování. Makroúroveň: Může docházet i k autogennímu nabývání .
Karbonatační smršťování	Karbonatace betonu	Vyvolává nezvratné zmenšení objemu. Dochází k odbourávání krystalů portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), které bránily změně objemu. Probíhá v povrchových vrstvách betonu.

Zdroj: Upraveno z (Bilčík et al., 2003; Vinkler, 2017)

Plastické smršťování nastane, pokud se voda odpařuje rychlostí $> 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{hod})$.

V první fázi hydratace je chemické a autogenní smršťování cementového tmelu téměř totožné – bez vlivu kameniva, k výraznějšímu rozdílu dochází v době mezi začátkem a koncem tuhnutí (Vinkler, 2017).

Betony s nižším vodním součinitelem vykazují větší autogenní smršťování a menší smršťování vysycháním v porovnání s betony s vyšším vodním součinitelem.

Suché plyny degradují beton ve vysokých koncentracích. Pokud stoupne relativní vlhkost vzduchu, působí většina plynů ve formě kyselin.

1.8.3 Mechanismus prudkého ochlazení betonu vodou

Při prudkém ochlazení betonu vodou (při hašení požáru) dochází k nepříznivému ovlivnění struktury betonu. Voda reaguje s oxidem vápenatým, který vznikl rozkladem hydroxidu vápenatého při vysokých teplotách.

Dochází k rozpínání objemu a k následnému porušení betonu.

1.9 Návrh prvků za požární situace



Obrázek 4 Návrh prvku a konstrukce za požární situace, upraveno z (Kučera et al., 2010)

Pro posuzování betonových prvků existují tři návrhové přístupy:

- nejpřesnější je předpověď teploty při požáru dynamickou analýzou plynů s využitím numerických metod,
- jednodušší přístup využívá parametrických teplotních křivek (využívají fyzikální parametry a analytický popis průběhu požáru, používají se zejména pro složité konstrukce),
- nejjednodušší postup využívá nominálních teplotních křivek (nebere v úvahu ochlazování konstrukce, proto je méně přesný), viz kapitola (1.11 Teplotní křivky).

Dle normy (ČSN EN 1991-1-2, 2004) lze PO (spolehlivost) ověřit různými způsoby: z hlediska času:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,req} \quad (1)$$

z hlediska únosnosti:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (2)$$

z hlediska teploty:

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (3)$$

kde:

$t_{fi,d}$... normová požární odolnost v minutách

$t_{fi,req}$... požadovaná normová požární odolnost v minutách (např. *REI 90*)

$R_{fi,d,t}$... návrhová hodnota únosnosti prvku při požární situaci v čase t

$E_{fi,d,t}$... návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase t

θ_d ... návrhová hodnota teploty materiálu

$\theta_{cr,d}$... návrhová hodnota kritické teploty materiálu

Základní podmínka pro splnění požární odolnosti:

$$„Požadovaná PO“ \leq „Skutečná PO“ \quad (4)$$

1.10 Zkoušení požární odolnosti betonových konstrukcí (experimentální metody)

Základem stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí jsou **experimentální zkušební metody**. Oproti teoretickým postupům či výpočetním modelům **jsou však časově a ekonomicky náročnější**. U výpočtů nelze vystihnout např. celistvost plošné konstrukce, časové průběhy trhlin, odpadávání vrstev apod. Výsledky výpočetních modelů dosahují méně ekonomická řešení.

Zkouška požární odolnosti se provádí ve zkušebních pecích (v ČR: společnost PAVUS, a.s.) podle obecných zkušebních podmínek (tepelné a tlakové podmínky a atmosféra) uvedených v normách (ČSN EN 1363-1, 2013, ČSN EN 1363-2, 2000, respektive ČSN EN 1363-3, 1999) na zhotovených zkušebních vzorcích.

1.10.1 Rozměry zkušebních vzorků

Zkušební vzorky se provádí ve **skutečné velikosti**. Pokud není možné prvky se skutečnou velikostí umístit do pece, musí být požáru vystaveny alespoň prvky s minimálními rozměry.

Velikost zkušebních vzorků s **minimálními**, požáru vystavenými rozměry (délka x šířka):

- Stěny
 - nosné: 3 x 3 m (ČSN EN 1365-1, 2013),
 - nenosné: 3 x 3 m (ČSN EN 1364-1, 2017),
 - závěsové obvodové stěny – celá sestava, dokončená montáž: 3 x 3 m (ČSN EN 1364-3, 2016)

- závěsové obvodové stěny – částečná sestava:
výška parapetu: 1 m,
šířka závěsové obvodové stěny < 3 m... min. šířka: skutečná velikost,
šířka závěsové obvodové stěny > 3 m... min. šířka: 3 m,
(ČSN EN 1364-4, 2016),
- Podhledy
 - 4 x 3 m (ČSN EN 1364-2, 2018),
- Stropní a střešní desky
 - 4 x 3 m (ČSN EN 1365-2, 2017),
- Nosníky
 - délka: 4 m (ČSN EN 1365-3, 2000),
- Sloupy
 - výška: 3 m (ČSN EN 1365-4, 2000),
- Balkony a rampy
 - balkony: 3 x 3 m (ČSN EN 1365-5, 2005),
 - rampy: 3 x 4 m (ČSN EN 1365-5, 2005),
- Schodiště
 - 4 x 3 m, výška 3 m (ČSN EN 1365-6, 2005),
- Větrací mřížky
 - skutečná velikost,
min. vzdálenost mezi sousedními mřížkami: 200 mm,
(ČSN EN 1364-5, 2017),
- případně: použití minimálních rozměrů zkušebních těles uvedených v normách (ČSN EN 13381-3, 2015; ČSN EN 13381-5, 2015) – ochrana aplikovaná na betonové a spřažené ocelobetonové prvky. Poznámka: je připravována revize těchto norem.

1.10.2 Vybrané prováděné experimenty v ČR

Kučera et al. (2012) pokládá za nejvýznamnější požární zkoušky v podzemních stavbách v ČR:

- **Tunel Mrázovka** v roce 2004 (jednalo se o první velkorozměrové požární zkoušky simulující požár osobního automobilu v tunelu – v ČR),
- **Tunel Valík** v roce 2006 (dvě zkoušky simulovaly požár osobního automobilu).

1.10.2.1 Další vybrané experimenty v ČR

Panely Spiroll

Zkouška požární odolnosti panelu Spiroll probíhala v ústavu Pavus, a.s.

Byly zaznamenávány hodnoty teplot nejen na odvrácené straně od požáru, ale i na dně, ve středu i na stropě dutin. Požární odolnost předpjatého panelu byla stanovena na základě zkoušky na 60 minut, pro panely většího rozpětí pouze na 45 minut. Výpočtem byla stanovena PO na 45 minut (Čajka et al., 2008).

Zkušební objekt v Mokrsku

Zkoušení požární odolnosti vybudovaného objektu v Mokrsku (s ocelobetonovou deskou) bylo provedeno pod vedením pracovníků fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze. Zkouška navazovala na experimenty prováděné v Cardingtonu, byla zaměřena na zpřesnění popisu chování prvků a spojů. Podařilo se dosáhnout kolapsu ocelobetonové desky a prokázat požární odolnost R60.

1.10.3 Vybrané prováděné experimenty v zahraničí

Za významné požární zkoušky v podzemních stavbách – prováděných v zahraničí – lze pokládat (Kučera et al., 2012):

- **Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program** v letech 1993–1995 (98 zkoušek proběhlo v tunelu dlouhém 850 m),
- **2nd Benelux Tunnel** v letech 2000–2001 (byl modelován požár osobního auta, dodávky a nákladů těžkých vozidel),
- **Tunel Runehamar** v roce 2003 (požární zkoušky simulovaly požár těžkých nákladních automobilů).

1.10.3.1 Další vybrané experimenty v zahraničí

Střešní panely TT

Zkouška požární odolnosti prefabrikovaných panelů TT byla provedena v Dánsku, v rámci projektu Basismiddel, v Danish Institute of Fire Technology. Během experimentu byly využity panely redukované délky 6 m. Modifikacemi konstrukčního uspořádání bylo simulováno chování reálných panelů TT. Teplota v peci byla řízena normovou teplotní křivkou. Teplotní průběh byl měřen uvnitř pece, na horní straně panelů a v místě výztuže. Výsledkem zkoušky bylo stanovení požární odolnosti na 41–42 minut (Langer et al., 2004).

Železobetonová stěna

V rámci totožného projektu Basismiddel, v Danish Institute of Fire Technology, byly připraveny 3 typy vyztužených stěnových dílců rozměrů 2,5 x 4,5 m v tloušťkách

120 a 150 mm. V počátečních minutách se vypočtené výsledky shodovaly se zkouškami. V další fázi bylo zjištěno, že průhyby byly výraznější než vypočtené hodnoty. Výpočty podceňovaly vodorovný průhyb (Langer et al., 2004).

Budova v Cardingtonu

V rozlehlých konstrukcích se uplatňuje spolupůsobení jednotlivých prvků. V roce 2001 byla v Cardingtonu provedena zkouška požární odolnosti betonové budovy ve skutečném měřítku o půdorysných rozměrech 30 x 22,5 m. Stropní desky byly podporovány sloupy čtvercového a obdélníkového průřezu. Budova byla navržena na účinky požáru podle normy ČSN EN 1992-1-2 s normovou požární odolností 60 minut. Byl využit vysokopevnostní beton (HSC). Sloupy byly navrženy z vláknobetonu s polypropylenovými vlákny (PFRC).

Vlhkost stropní desky byla 3,8 %, vlhkost sloupů 4,2 %.

V části objektu vystaveného požáru byly umístěny dřevěné hranoly pro vyvození požárního zatížení $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (představující požární zatížení kancelářských budov).

Již 10 minut po zatížení konstrukce požárem docházelo k odprýskávání, k obnažení výztuže desky došlo po 25 minutách. Proces odštěpování pokračoval až do konce zkoušky. Betonová konstrukce se nezřítla. Prokázala kritéria R, I a E (Wald et al., 2005).

1.10.4 Stav požární ochrany tunelů

V návaznosti na významné požáry v podzemních stavbách byla výrazně zvýšena znalost problematiky bezpečnosti tunelů. Začátkem 21. století vznikala řada výzkumných programů.

Realizací velkorozměrových požárních zkoušek v tunelech se zabývá např. evropský finanční program – výzkum HRR (Heat Release Rates = rychlost uvolňování tepla během skutečného požáru v tunelu), Švédský národní zkušební a výzkumný ústav (SP), Výzkum staveb a konstrukcí v Holandsku (TNO), Výzkumný ústav požáru v Norsku (SINTEF/NBL).

1.11 Teplotní křivky

Teplotní křivky jsou definovány teplotou plynu v okolí povrchu prvku jako funkce času (ČSN EN 1991-1-2, 2004). Lze je rozdělit na:

- nominální (konvenční křivky používané pro klasifikaci nebo ověření požární odolnosti),
- parametrické (stanovené na základě modelů požáru a specifických fyzikálních parametrů definujících podmínky v požárním úseku).

Při zkoušení požární odolnosti je zahřívání řízeno podle popisu nominálních normových křivek (kap. 1.11.1 Normová křivka, 1.11.2 Uhlovodíková křivka, 1.11.3 Křivka vnějšího požáru, 1.11.4 Křivka pomalého zahřívání), nebo odvozených křivek (kap. 1.11.5 Odvozené teplotní křivky).

Tepelnou zátěží jsou v materiálech vyvolána vnitřní pnutí a strukturální napětí. Míra vnitřní napjatosti je závislá zejména na intenzitě a rychlosti tepelného působení. Z tohoto důvodu byly definovány normové zkušební podmínky.

V případě některých praktických případů mohou vznikat zřetelné odchylky od standardního požáru. Je vhodné zvolit některou z teplotních křivek – viz Obr. 5 (A = normová křivka, B = uhlovodíková křivka, C = křivka vnějšího požáru, D = křivka pomalého zahřívání), (ČSN EN 1363-2, 2000). Poznámka: teplotní křivky E, F jsou odvozené, více (kap. 1.11.5 Odvozené teplotní křivky). Při výběru nominální teplotní křivky záleží na poloze teplotního zatížení. Křivky popisují fázi plně rozvinutého požáru, (jednotlivé fáze požáru – viz Obr. 2).

1.11.1 Normová křivka

Normová (celulosaová) křivka **byla odvozena pro požár v pozemních stavbách**. Používá se pro posuzování požární odolnosti v tunelech, kde je nejnižší z dostupných teplotních křivek. Je modelován plně rozvinutý požár. Rozhořování a chladnutí není uvažováno. Ve starší literatuře je křivka označována jako ISO 834, viz (Reichel, 1979; ČSN 73 0851, 1984).

Teplota v peci

Nominální normová křivka je dána vztahem (ČSN EN 1363-1, 2013):

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (5)$$

kde:

T ... průměrná teplota v peci (resp. v příslušném požárním úseku) [°C]

t ... doba [min]

Tlak v peci

S ohledem na skutečnost, že se zkušební pece konstruuji na kapalná nebo plynná paliva, jsou předepsány podmínky pro rozložení tlaku po výšce pece (přibližně 8,5 Pa na 1 m výšky pece), viz (ČSN EN 1363-1, 2013).

1.11.2 Uhlovodíková křivka

Teplota v peci

Uhlovodíková křivka je dána vztahem (ČSN EN 1363-2, 2000):

$$T = 1080 [1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}] + 20 \quad (6)$$

kde:

T ... průměrná teplota v peci (resp. v příslušném požárním úseku) [°C]

t ... doba [min]

1.11.3 Křivka vnějšího požáru

Teplota v peci

Křivka vnějšího požáru je dána vztahem (ČSN EN 1363-2, 2000):

$$T = 660 [1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}] + 20 \quad (7)$$

kde:

T ... průměrná teplota v peci (resp. v příslušném požárním úseku) [°C]

t ... doba [min]

1.11.4 Křivka pomalého zahřívání

Teplota v peci

Křivka pomalého zahřívání je dána vztahem (ČSN EN 1363-2, 2000):

pro $0 < t \leq 21$:

$$T = 154 t^{0,25} + 20 \quad (8)$$

pro $t > 21$:

$$T = 345 \log_{10}(8(t - 20) + 1) + 20 \quad (9)$$

kde:

T ... průměrná teplota v peci (resp. v příslušném požárním úseku) [°C]

t ... doba [min]

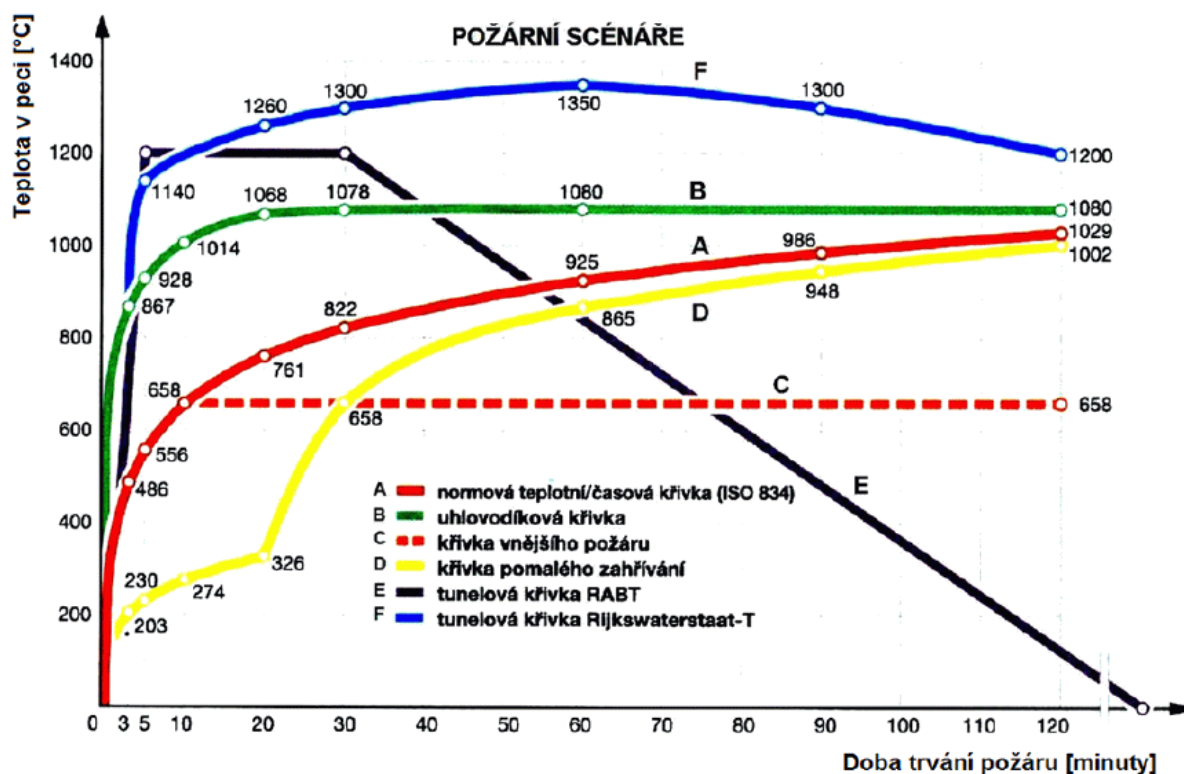
1.11.5 Odvozené teplotní křivky

Ve směrnici ZTV-ING jsou uvedeny odvozené teplotní křivky.

Modifikovaná uhlovodíková teplotní křivka byla odvozena z uhlovodíkové teplotní křivky ve Francii. Maximální dosažená teplota byla zvýšena z původních 1 100 °C na 1 300 °C. Křivka **RABT ZTV** byla odvozena v Německu a odpovídá požáru jednoho těžkého nákladního vozidla. V Japonsku je požadováno u všech tunelů 120 minut požární odolnosti dle křivky RABT ZTV.

Teplotní křivka **RWS (Rijkswaterstaat)** byla vyvinuta v Nizozemí. Předpokládá, že v nejnebezpečnějším případě bude požární zatížení od hořící cisterny s benzínem nebo ropou 300 MW a požár bude trvat až 120 minut. Oproti uhlovodíkové křivce vystihuje teploty při požáru v uzavřeném prostoru, kde je omezená možnost úniku tepla do okolní atmosféry (Čajka et al., 2004).

Schematické znázornění odvozených křivek je zobrazeno v Obr. 5 (E = tunelová křivka RABT, F = tunelová křivka RWS Rijkswaterstaat).



Obrázek 5 Nominální a parametrické teplotní křivky (Kupilík, 2006), více (ČSN EN 1363-1, 2013; ČSN EN 1363-2, 2000)

1.12 Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru (souhrnně)

1.12.1 Posuzování požární odolnosti v České republice

Historie

Československo se řadilo na vůdčí místo v Evropě ve využívání poznatků při požárním návrhu konstrukcí. Tato skutečnost byla zapříčiněna především kolektivem pracovníků Výzkumného ústavu pozemních staveb (Reichel, 1979). Parametrické teplotní křivky byly představeny v technických normách již od roku 1986 (ČSN 73 0804, 1988). Zjednodušené posuzování prvků konstrukce bylo zavedeno v normě již v roce 1973 (ČSN 73 0821, 1974). Naopak „modelování teplotní analýzy nebylo v té době dostatečně rozvinuto“ (Wald et al., 2005).

Tabulka 5 Seznam souvisejících norem – požární odolnost, navrhování betonových konstrukcí: 80., 90. léta

Označení	Vydána	Předmět
ČSN 73 0035	1978	Zatížení stavebních konstrukcí
ČSN 73 0802	1977	Požární bezpečnost staveb
ČSN 73 0804	1988	Požární bezpečnost staveb. Výrobní objekty
ČSN 73 0821	1974	Požární bezpečnost staveb. Požární odolnost stavebních konstrukcí
ČSN 73 0823	1983	Požárně technické vlastnosti hmot. Stupeň hořlavosti stavebních hmot
ČSN 73 0851	1984	Stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí
ČSN 73 0852	1976	Požární bezpečnost staveb. Stanovení požární odolnosti požárních uzávěrů
ČSN 73 0855	1980	Stanovení požární odolnosti obvodových stěn
ČSN 73 0856	1986	Stanovení požární odolnosti zavěšených podhledů
ČSN 73 0861	1979	Požární bezpečnost staveb. Zkoušení hořlavosti stavebních hmot. Nehořlavé hmoty
ČSN 73 0862	1980	Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot
ČSN 73 1201	1986	Navrhování betonových konstrukcí
Další normy		
DIN 41 02	1977	Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 1-4 (Chování stavebních hmot za požáru)
ON 73 1207	1980	Navrhování žárobetonových konstrukcí
RVHP ST SEV 466-77	1977	Požární bezpečnost staveb. Metodika stanovení výpočtového požárního zařízení

Zdroj: Upraveno z (Gartner et al., 1980)

Současnost

Zavedení evropských požárních norem a využívání poznatků při modelování požáru na konstrukce pomocí MKP přineslo zvýšení spolehlivosti konstrukcí.

Normativní dokument – **ČSN 73 1230: Navrhování betonových konstrukcí pro zvýšené a vyšší teploty** byl zaveden v roce 1990, viz (ČSN 73 1230, 1990). Zavádí hodnoty redukčních součinitelů (pevnostní, přetvárné charakteristiky, fyzikální veličiny charakterizující ohřev betonu) pro dva typy ohřevu (krátkodobý / dlouhodobý) v závislosti na teplotě betonu (50, 70, 100, 200, 300, 500, 700, 900, 1000 °C). Mezilehlé hodnoty se interpolují. Druh betonu (obyčejný / žárobeton) popisuje tabulka „Tab. 1 Vlastnosti a složení betonu pro zvýšené a vyšší teploty“, viz (ČSN 73 1230, 1990, s. 7–11). Významnou roli představuje druh kameniva.

CEB-FIP (Model Code 90, 1993) byl základem pro vznik Eurokódů 1992.

Norma (ČSN 73 1230, 1990) byla zrušena v době zavedení platnosti **Eurokódů** (od 1. března 2010).

1.12.2 Posuzování požární odolnosti ve Slovenské republice

Pro potřeby posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí na území Slovenské republiky byly, podobně jako v České republice, normové dokumenty – např. (STN 73 0821, 1973).

Důvody překonání technických předpisů podle Bellové (2010): různorodost a množství modifikací nových materiálů včetně vysoké finanční náročnosti požárních experimentů.

Evropské normy vstoupily v platnost od roku 2010.

1.12.3 Posuzování požární odolnosti v členských státech CEN

První generace evropských norem se datuje k roku 1975, kdy komise evropského společenství rozhodla o akčním programu v oblasti stavebnictví. V roce 1989 přechází tvorba a vydávání Eurokódů na CEN. V roce 2010 vstoupily v platnost Evropské normy (plně převzaté normy), které jsou platné ve státech Evropské unie a v některých dalších státech – v členských státech CEN.

1.12.4 Posuzování požární odolnosti ve Velké Británii

Ve Velké Británii jsou doporučeny britské normy (BS 8110-1, 1997; BS 8110-2, 1985).

Lennon (2004) popisuje výzkum experimentálních prací – stanovení požární odolnosti – sloužících jako základ pro vývoj britských norem BS 8110. Dosažené výsledky byly konzervativní (většina těles překonala předpokládanou úroveň požární odolnosti). V mnoha případech docházelo k odštěpování betonu.

1.13 Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru podle Eurokódů

Eurokód „Zásady navrhování konstrukcí“ (ČSN EN 1990, 2004) seznamuje s obecnými zásadami navrhování konstrukcí na účinky požáru.

Představuje následující možnosti přístupu:

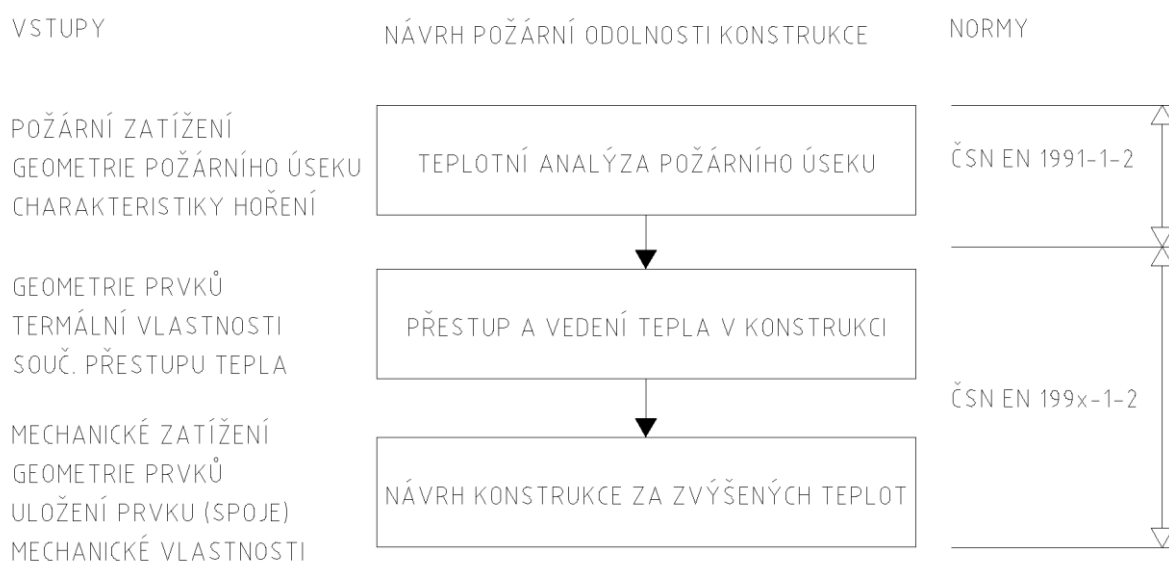
- analýza konstrukce na účinky požáru,
- navrhování pomocí zkoušek.

Analýza návrhu musí vycházet z návrhových scénářů při požáru (ČSN EN 1991-1-2, 2004). Uvažují se modely vývoje teplot v konstrukci i modely mechanického chování konstrukce za zvýšené teploty. Chování konstrukce se posuzuje podle ČSN EN 1992 až ČSN EN 1996 včetně ČSN EN 1999 – s ohledem na použitý druh materiálu. V normách jsou uvedeny definované modely teplot a modely konstrukce. Modely mechanického chování

nosných prvků za zvýšených teplot mají být lineární. V případě navrhování na základě zkoušek má návrh vycházet z kombinace zkoušek a výpočtů.

Zatížení betonových konstrukcí vystavených požáru popisuje platná norma (ČSN EN 1991-1-2, 2004). Představuje podstatu teplotní analýzy konstrukce pro návrh „konstrukce na účinky požáru“.

Evropská norma (ČSN EN 1992-1-2, 2006) pro navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru je blíže představena v kap. (1.15 Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ČSN EN 1992-1-2, 2006)).



Obrázek 6 Části návrhu konstrukce za požární situace, upraveno z (Wald et al., 2005)

1.14 Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (souhrnně)

Existují doporučující normy, předpisy pro navrhování betonových konstrukcí při vysokých teplotách / na účinky požáru: Eurokódy platné v členských státech **CEN** (ČSN EN 1992-1-2, 2006), **fib** Model Code 2010 (Model Code 2010, 2012), American Concrete Institut – **ACI** (ACI 216R-89, 1994), doporučení **RILEM** – (RILEM TC 129-MHT; RILEM TC 44-PHT; RILEM TC 74-THT), the National Building Code of Finland (**RakMK** B4, 1991), standardy **ASTM** (ASTM E 119; ASTM E 84) a **CEB** Model Code (Bulletin D'Information, 1991).

Některé vybrané předpisy pro stanovení mechanických vlastností betonu při vysokých teplotách jsou představeny v následujícím textu.

1.15 Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ČSN EN 1992-1-2, 2006)

1.15.1 Metodika návrhu s přihlédnutím k požární odolnosti

Evropská norma (ČSN EN 1992-1-2, 2006) – „navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru“ platí pro konstrukce nebo prvky navržené podle norem (ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011, ČSN EN 1992-2, 2007, ČSN EN 1992-3, 2007); neplatí pro skořepiny a předpjaté konstrukce s volnými kabely.

Norma (ČSN EN 1992-1-2, 2006) představuje tři možnosti návrhu požární odolnosti:

- využití tabulek,
- zjednodušené metody návrhu,
- obecná metoda návrhu pro modelování konstrukčních prvků, nebo celé konstrukce.

Tabulkový přístup

Výpočet s použitím tabulkových hodnot odpovídá ohřevu podle nominální normové teplotní křivky (Zoufal et al., 2009). Hodnoty jsou uváděny pro obyčejný beton se silikátovým kamenivem. Pro beton s křemičitým kamenivem a pro lehký beton lze rozměry příčného řezu redukovat o 10 %. Pro kritérium R (nosnost konstrukce) jsou uváděny hodnoty minimálních rozměrů průřezu a minimální osové vzdálenosti těžiště výztužných vložek.

U sloupů se požární odolnost stanoví použitím metody A, B nebo C.

Zjednodušené metody

Zjednodušenými metodami se určuje mezní únosnost otepleného průřezu.

K dispozici jsou dvě alternativní zjednodušené průřezové metody (využívající redukováný průřez):

- metoda izotermy 500 °C,
- zónová metoda.

Metoda izotermy 500 °C zanedbává ve výpočtech beton vystavený teplotě vyšší než 500 °C formou redukováného průřezu (je nutno stanovit redukované pevnosti). Beton s nižší teplotou si zachová svoji únosnost. Metoda platí pro namáhání průřezu normálovou silou, ohybovým momentem, nebo jejich kombinací. Lze jej využít pro konstrukce vystavené normovému i parametrickému požáru.

Zónová metoda je doporučena pro malé průřezy a štíhlé sloupy. Principiálně rozděluje průřez prvku na zóny a vylučuje části betonu poškozeného teplotou. Tato metoda je oproti metodě izotermy pracnější. U sloupů však vyniká přesnějšími výsledky. Metodu lze použít pro konstrukce vystavené normovému požáru.

Redukce charakteristické pevnosti je blíže popsána v kap. (1.15.2 Norma ČSN EN 1992-1-2, 2006).

Obecná metoda

Tato metoda poskytuje reálný výpočet konstrukce vystavené požáru. Vyjadřuje základní fyzikální chování vystihující chování konstrukce při požáru.

1.15.2 Norma ČSN EN 1992-1-2, 2006

Norma pro navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru (ČSN EN 1992-1-2, 2006) uvažuje **teplotní závislost vyjadřující degradaci mechanických, teplotních a fyzikálních vlastností** se vzrůstající teplotou – viz Tab. 6. Tento přístup je popisován jednoduchou výpočetní metodou – redukcí (charakteristické) pevnosti.

Materiálové modely jsou aplikovatelné pro rychlost zahřívání mezi 2 K/min a 50 K/min.

Matematický model pro pracovní diagram betonu v tlaku při zvýšených teplotách

Hodnoty pro matematický model pro pracovní diagram betonu v tlaku při zvýšených teplotách se vyjádří ze vztahu (10), mezilehlé hodnoty se interpolují. Poznámka: pracovní diagram je definován pevností v tlaku $f_{c,\theta}$, poměrném přetvořením $\varepsilon_{c1,\theta}$ a odpovídajícím $f_{c,\theta}$.

pro $\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$:

$$\sigma(\theta) = \frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \quad (10)$$

pro $\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$:

„Sestupná větev se má přizpůsobit. Je přípustný lineární i nelineární model.“

kde:

$\sigma(\theta)$... tlakové napětí v betonu při teplotě θ [MPa]

ε ... poměrné přetvoření betonu [-]

$\varepsilon_{c1,\theta}$... teplotní poměrné přetvoření betonu odpovídající $f_{c,\theta}$ [-]

$f_{c,\theta}$... pevnost v tlaku při teplotě θ pro stanovené poměrné přetvoření [MPa]

Tlačený beton

Tabulka 6 Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu při zvýšených teplotách

Beton	Křemičité kamenivo			Vápencové kamenivo		
	Teplota [°C] θ	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	-	-	0,00	-	-

Zdroj: Upraveno z (ČSN EN 1992-1-2, 2006)

kde:

θ ... teplota [°C]

$f_{c,\theta}$... pevnost v tlaku při teplotě θ pro stanovené poměrné přetvoření [MPa]

f_{ck} ... charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku [MPa]

$\varepsilon_{c1,\theta}$... teplotní poměrné přetvoření betonu odpovídající $f_{c,\theta}$ [-]

$\varepsilon_{cu1,\theta}$... mezní teplotní poměrné přetvoření betonu odpovídající $f_{c,\theta}$ [-]

Redukce (charakteristické) pevnosti betonu v tlaku je funkcí teploty θ podle Tab. 6.

Pevnost v tahu

Při použití jednoduché, nebo zpřesněné výpočetní metody lze použít:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) \cdot f_{ck,t} \quad (11)$$

Pokud nejsou k dispozici přesnější informace, použijí se hodnoty pro $k_{c,t}(\theta)$:

pro $20\text{ °C} \leq \theta \leq 100\text{ °C}$:

$$k_{c,t}(\theta) = 1 \quad (12)$$

pro $100\text{ °C} < \theta \leq 600\text{ °C}$:

$$k_{c,t}(\theta) = 1,0 - 1,0 (\theta - 100)/500 \quad (13)$$

kde:

$f_{ck,t}(\theta)$... charakteristická hodnota pevnosti betonu v tahu při teplotě θ

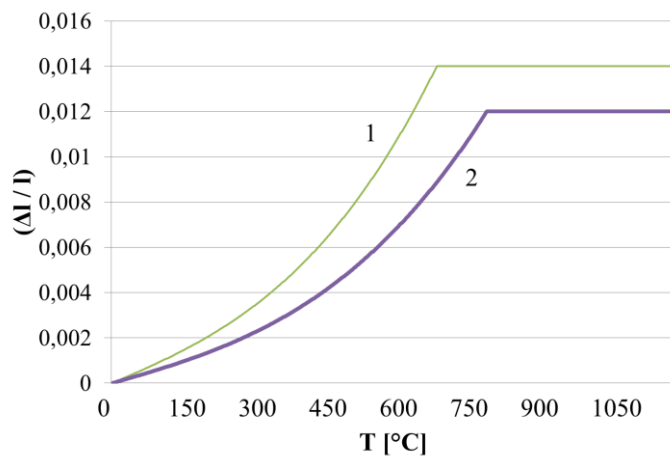
$k_{c,t}(\theta)$... redukční součinitel pro pevnost v tahu, závisí na teplotě materiálu θ

$f_{ck,t}$... charakteristická pevnost betonu v tahu [MPa]

θ ... teplota [°C]

Teplotní prodloužení

Teplotní prodloužení betonu lze stanovit podle vzorců doporučených v normě ČSN EN 1992-1-2 (2006, s. 27), nebo přibližně podle grafického znázornění – viz Obr. 7 (1 = křemičité kamenivo, 2 = vápencové kamenivo).



Obrázek 7 Celkové teplotní prodloužení betonu, upraveno z (ČSN EN 1992-1-2, 2006)

Měrné teplo a objemové měrné teplo

Norma ČSN EN 1992-1-2 (2006, s. 27–28) definuje hodnotu měrného tepla (pro křemičité a vápencové kamenivo) v závislosti na teplotě pro tři rozdílné vlhkosti ($u = 0\%$, $1,5\%$ a 3% hmotnosti). **Změna objemové hmotnosti** v závislosti na teplotě je ovlivněna ztrátou vody.

Tepelná vodivost

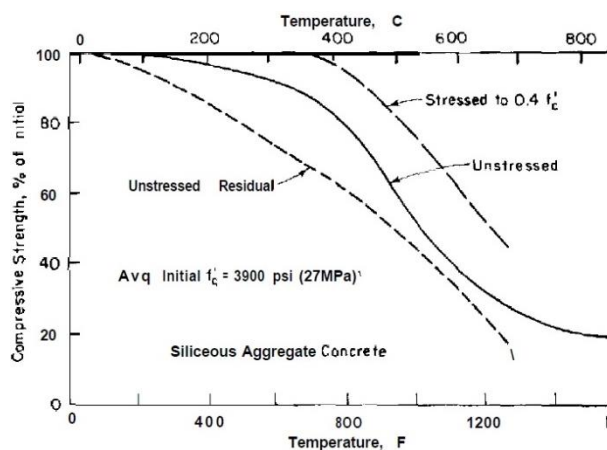
Tepelnou vodivost lze stanovit mezi dolní a horní mezní hodnotou podle vztahů definovaných v normě ČSN EN 1992-1-2 (2006, s. 29) – pro obyčejný beton. Teplota betonu se uvažuje v rozmezí 20–1200 °C.

1.16 Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ACI 216R-89, 1994)

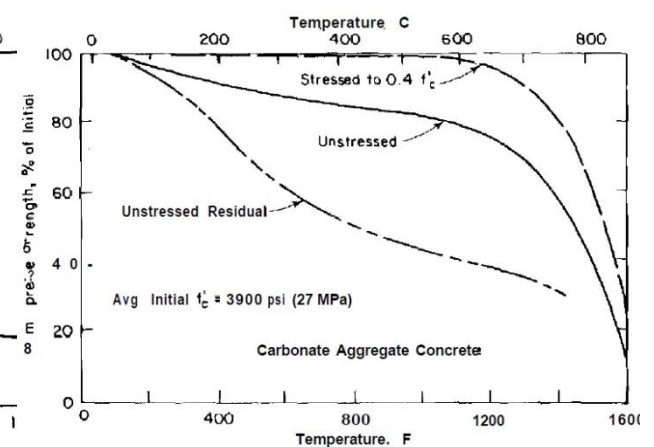
Americký standard (ACI 216R-89, 1994) zavádí reziduální pevnosti betonu v tlaku s použitým křemičitým, nebo vápencovým kamenivem (Obr. 8, 9) a reziduální pevnosti lehkého betonu v tlaku (Obr. 10).

„Unstressed“ (plná křivka) představuje testování zkušebních těles ohřátých na stanovenou teplotu bez jakéhokoliv mechanického zatěžování. Reziduální pevnosti byly zjišťovány přímo na ohřátých tělesech. „Stressed to $0.4 f_c$ “ (čárkovaná křivka) představuje reziduální pevnosti těles ohříváných při současném zatížení na $0,4 f_c$. „Unstressed Residual“ (čerchovaná křivka se dvěma tečkami) představuje reziduální pevnosti těles vystavených danému teplotnímu namáhání bez jakéhokoliv mechanického zatěžování. Tělesa byla následně ochlazena na laboratorní teplotu (při relativní vlhkosti vzduchu 75 %). Po 6 dnech byla stanovena reziduální pevnost.

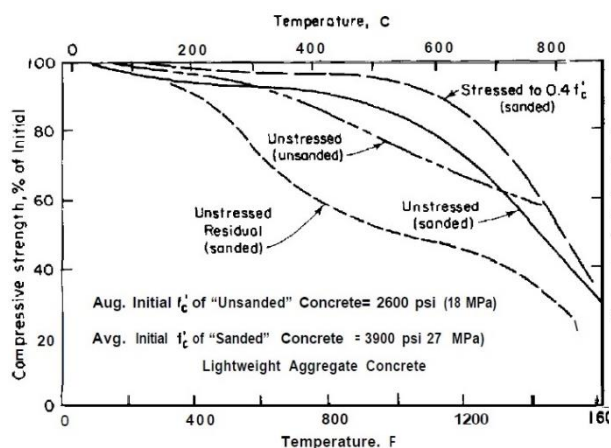
Poznámka: autorem prováděné experimenty se přibližují zkušebním podmínkám podle „Unstressed Residual“, více kap. (5.13 Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci, 5.15 Vystavení teplotnímu lokálnímu (bodovému) namáhání). Z Obr. 8–12 je patrné, že pevnosti stanovené metodikou „Unstressed Residual“ dosahují nejnižších reziduálních procentuálních hodnot [%]. Vliv vybraných teplotních účinků na teplotní prodloužení betonu je znázorněno na Obr. 11, reziduální statické moduly pružnosti – viz Obr. 12.



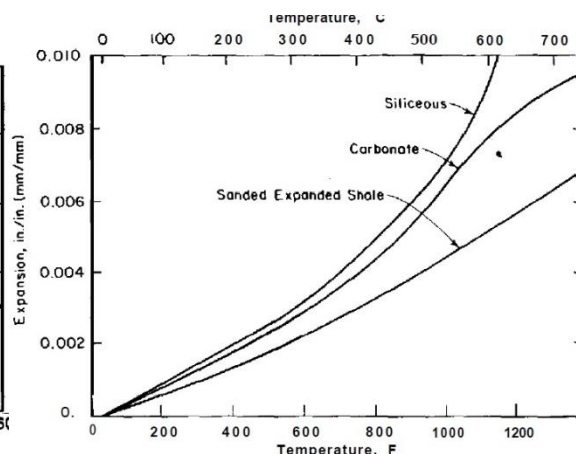
Obrázek 8 Reziduální pevnosti (v tlaku) betonu s křemičitým kamenivem (ACI 216R-89, 1994)



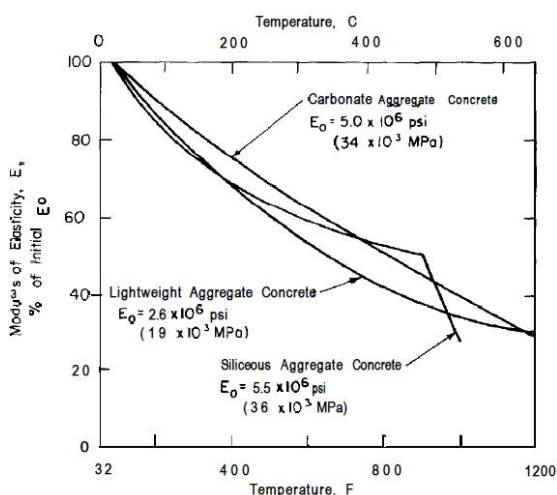
Obrázek 9 Reziduální pevnosti (v tlaku) betonu s vápencovým kamenivem (ACI 216R-89, 1994)



Obrázek 10 Reziduální pevnosti (v tlaku) lehkého betonu (ACI 216R-89, 1994)



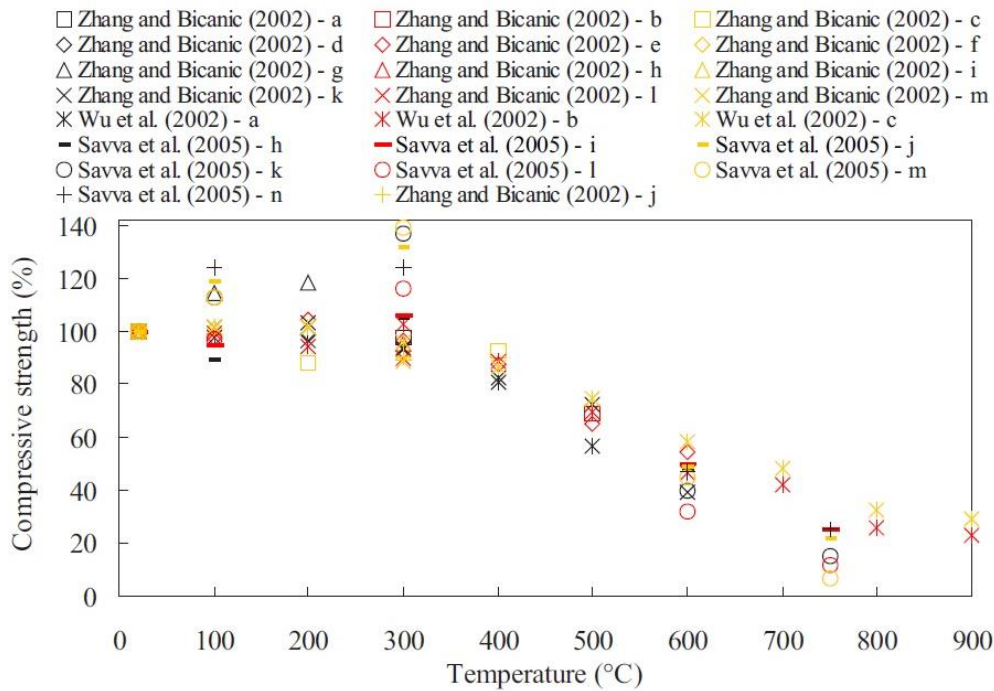
Obrázek 11 Teplotní prodloužení betonů s křemičitým, vápencovým kamenivem (ACI 216R-89, 1994)



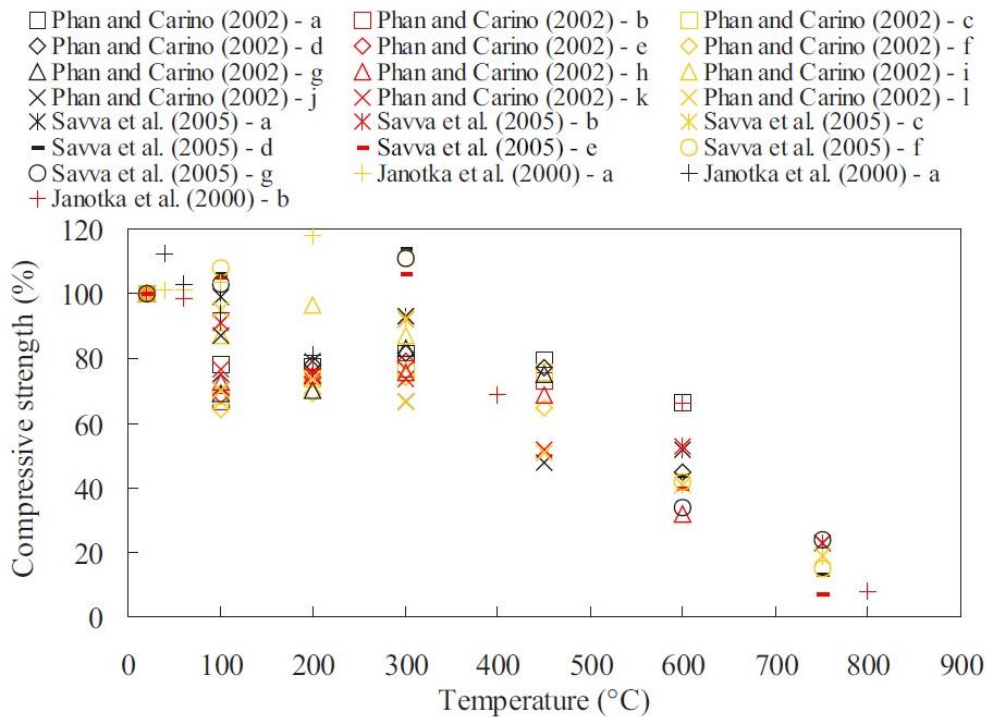
Obrázek 12 Reziduální statické moduly pružnosti betonů s křemičitým, vápencovým kamenivem a lehkých betonů (ACI 216R-89, 1994)

1.17 Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (rešerše z vědeckých prací)

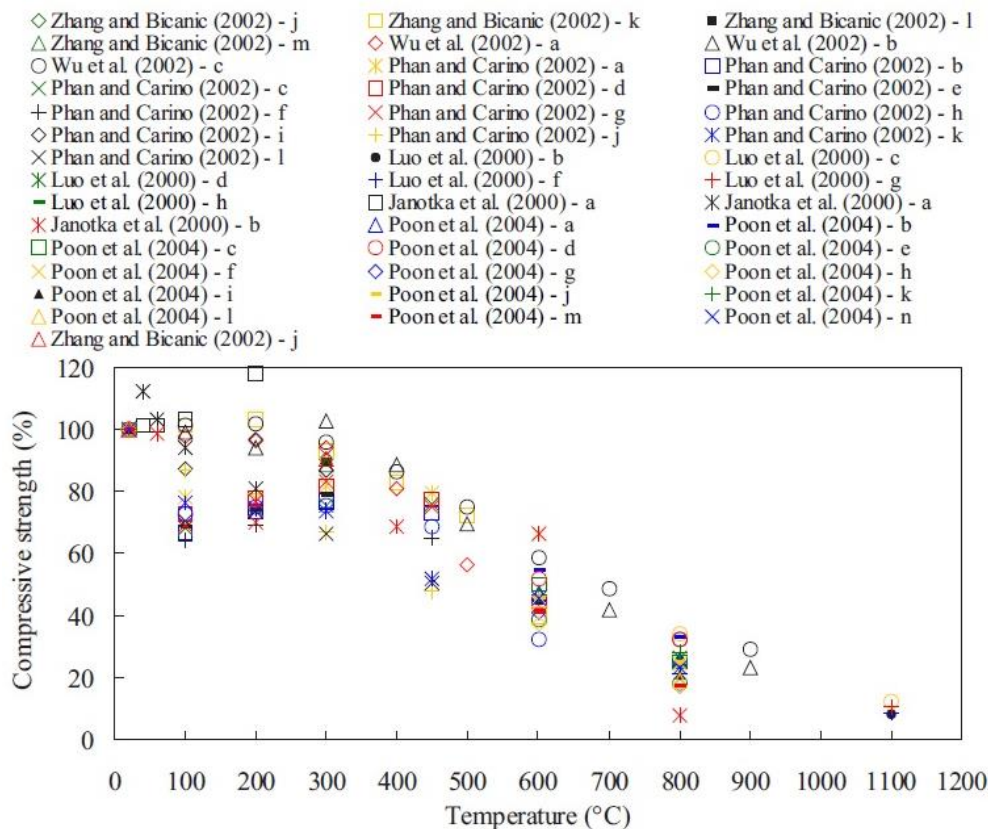
Podrobnou rešerši reziduálních vlastností betonů při vysokoteplotním namáhání popisuje (Matesová, 2005). Jako příklady byly zvoleny Obr. 13–15. Matesová (2005) ve své práci dále představuje typické trendy reziduální pevnosti betonu v tlaku, pevnosti v tahu, reziduální hodnoty statických modulů pružnosti a hodnoty Poissonova součinitele.



Obrázek 13 Reziduální procentuální pevnosti v tlaku, betony s křemičitým kamenivem, převzato z (Matesová, 2005)



Obrázek 14 Reziduální procentuální pevnosti v tlaku, betony s vápencovým kamenivem, převzato z (Matesová, 2005)



Obrázek 15 Reziduální procentuální pevnosti v tlaku, HSC betony, převzato z (Matesová, 2005)

1.18 Popis složek betonu při zvýšených teplotách

V následujícím textu budou popsány zásadní charakteristiky vybraných vstupních surovin při zvýšených teplotách. Autorem pužité suroviny při výrově zkušebních těles jsou uvedeny v kap. (5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VČETNĚ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ).

1.18.1 Plnivo – kamenivo

Při ohřátí se objem kameniva zvětšuje.

Je obecně známo, že méně příznivé chování při vysokých teplotách vykazuje beton s křemičitým kamenivem. Příznivějších výsledků dosahují betony s vápencovým kamenivem, nejpříznivějších hodnot betony s kamenivem z expandovaného jílu.

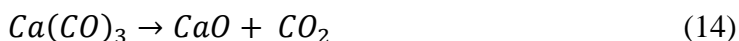
Vnitřní pnutí v betonu s použitým vápencovým kamenivem je menší než u betonu s křemičitým kamenivem. Použití kombinace obou těchto typů kameniva v čerstvém betonu není vhodné, neboť dochází k většímu vnitřnímu pnutí.

Při teplotách 700–1 000 °C dochází k uvolňování CO₂ z kalcitu.

Mineralogické složení kameniva lze označit za stěžejní parametr pro popis chování kameniva při požáru. Při teplotách nad 1 000 °C může docházet k tavení kameniva.

Vápencové kamenivo

Příznivější chování betonů s vápencovým kamenivem (při požáru) je přisuzováno vyššímu množství tepla, které se spotřebuje při endotermickém rozkladu na oxid uhličitý při teplotách v rozmezí 600–900 °C, více (Bažant et al., 1996; Collepari, 2009):



Křemičité kamenivo

Při teplotách nad 573 °C se mění křemen (SiO_2) z modifikace α (trigonální) na β (hexagonální) za současného zvětšení objemu o cca 5 %. Kolem okrajů inkluzí vzniká koncentrace napětí (Matesová et al., 2006), proto jsou hranice fází obvykle nejslabším místem (v pružném oboru). Může dojít ke vzniku trhlin přes zrna kameniva. Při teplotách „přeměny modifikace křemene“ dochází k výraznému snížení pevnosti křemičitého kameniva. Kompletní tání nastává kolem 1 700 °C.

Poznámka: v případě betonů určených pro konstrukce namáhané vysokým teplotám, lze aplikovat horniny a minerály s nízkou teplotní roztažností (šamot, apod.).

1.18.2 Pojivo – cement

Cementový kámen se při ohřátí smršťuje. Jednotlivé složky cementu se chovají různě, změnou objemu se liší. Výraznější projevy vznikají v betonech s větší dávkou cementu (Voves, 1983).

Teploty nad 110 °C vedou k vypuzení fyzikálně vázané vody a narušuje se krystalová kostra cementového kamene, čímž dochází k poklesu pevnosti.

Při teplotách nad 200 °C se sloučeniny cementového tmele rozkládají (dehydratují) na sloučeniny bez vazebných vlastností.

Zobal et al. (2010) ve svém článku popisuje nárůst pevnosti (v tlaku i v tahu ohybem) cementové pasty při teplotách kolem 200 °C. Uvádí, že k poklesu pevnosti dochází při vyšších teplotách.

Při teplotách 500–600 °C dochází k částečnému rozkladu cementového kamene.

Vyšvařil et al. (2010) uvádí, že při zahřátí na maximální teplotu < 600 °C dochází k poklesu objemové hmotnosti na tělesech zhotovených z portlandského cementu. Při vyšších teplotách nastává stagnace. Při teplotách kolem 1 200 °C dochází k výraznému zvýšení objemové hmotnosti.

Teploty okolo 1 000 °C způsobují významné zvýšení porozity cementového tmele (Válek, 2010), že dochází ke kompletnímu rozpadu C-S-H gelu (Mehta et al., 2014).

Cementy obsahující pucolánové látky, nebo strusku (portlandský struskový, vysokopecní cement) a cementy s vysokým obsahem Al_2O_3 (hlinitanový) dokládají příznivější chování za vysokých teplot (Netopilová et al., 2010). Je však nutno podotknout, že hlinitanové cementy se od roku 1985 nesmí používat do nosných konstrukcí. Tato skutečnost je způsobena možností ztráty pevnosti vlivem rekrystalizace (vzniká C_3AH_6 s nestabilní strukturou). Příhodnější chování cementů obsahujících pucolánové látky nebo strusku je přiřazováno skutečnosti, že beton je odolnější požáru, pokud je vyroben z cementu, který uvolňuje méně $\text{Ca}(\text{OH})_2$, viz Collepardi (2009). Portlandit se v žáru rozkládá na vodní páru a CaO :



1.18.3 Voda

„K dobré požární odolnosti běžného betonu přispívá nejenom jeho pórovitá struktura, ale i množství volné a vázané vody.“ (Aitcin, 2005).

Základní roli hraje transport vody v pórech betonu, neboť způsobuje vznik vnitřních pnutí v okolí póru (kapilární tlak apod.). Důsledkem je změna objemu – smršťování nebo nabývání.

Póry vznikají již při výrobě betonu a jejich množství se zvětšuje s množstvím nedokonalého zhutnění a s množstvím vody, případně důsledkem přidání provzdušňovací přísady. Póry bývají propojeny množstvím kapilár a mikrotrhlin.

Volná voda v betonu se při rostoucí teplotě odpařuje z povrchu konstrukce a beton se vysušuje. Vysušování je učiněno důsledkem odvodu vnitřní vlhkosti betonu směrem k povrchu, odkud se voda vypařuje (Vinkler, 2017). Při vysušování dochází k vyprazdňování největších pórů a postupně dochází k vysušování menších pórů.

Při teplotách nad 100 °C se voda mění v páru, která z betonu uniká póry, kapilárami, mikrotrhlinami, případně trhlinami (voda je uvolňována z fází C-A-H, C-H a C-S-H). Pára vždy uniká do míst s chladnější teplotou, probíhá **difuze**. Pára kondenzuje, pokud se stane přesycenou a vydává skupenské teplo.

Při vyšších teplotách se uvolňuje **fyzikálně vázaná voda** z hydratačních produktů cementu, v intervalu 500–600 °C z hydroxidu vápenatého.

V případě betonu s vysokým vodním součinitelem dochází ke snadnějšímu průběhu difuze vlivem „otevřenější mikrostruktury“. Naopak v případě velmi hutných betonů (s vysokým obsahem jemných částic) nemůže voda z betonu unikat zásluhou nízké permeability cementové matrice.

Pórová struktura a druh vody je uvedena v kap. (1.8.1 Voda – pórová struktura betonu a druh vody).

1.18.4 Příměsi

Betony s pucolánovými látkami, nebo se struskou mají lepší odolnost proti požáru v porovnání s betony pouze se samotným portlandským cementem. Příčina je přisuzována vzniku menšího množství Ca(OH)_2 .

1.18.4.1 Vápenec

Vápenec se vypaluje při ohřátí na 900 °C, ztrácí pevnost a zmenšuje svůj objem.

Při teplotách do 650 °C ztrácejí betony s použitým vápencem pouze 20 % z původní pevnosti, viz (Collepari, 2009).

1.18.5 Přísady

1.18.5.1 Superplastifikační přísady

Kupilík (2004) uvádí, že na chování betonu v podmínkách požáru má vliv použitého typu plastifikátoru, např. superplastifikovaný beton na bázi naftalenu v množství 0,3 % z hmotnosti cementu bude vykazovat vyšší požární odolnost v porovnání s betonem bez superplastifikační přísady (při zachování totožné konzistence). Vavřín et al. (1987) uvádí skutečnost, že vlastnosti plastifikátorů se mění i při relativně nízkých teplotních změnách.

1.19 Speciální cementové kompozitní materiály

Kompozit je materiálový systém, který je složen z více (minimálně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostorovou sumací, více Bareš (1988).

Mechanismus porušování je komplikovaný jednak s ohledem na složitost nehomogenní struktury, jednak přítomnost hydratačních pórů, smršťovacích pórů a mikrotrhlin. Situace je ztížena přítomností termodynamicky různých fází (tuhé, kapalné, plynné) a časově proměnnou strukturou matrice, ve které neustále probíhají hydratační procesy.

S použitím speciálních betonů úzce souvisí „novodobý“ přístup zkoušení v čerstvém i ztvrdlém stavu, specifické zpracování čerstvého betonu, pokrokové ošetřování a v neposlední řadě zkoumání reziduálních vlastností proti působení nejrůznějších degradačních činitelů.

S ohledem na skutečnost, že „nedostatečné zhutnění“ (vibrací / ostatními způsoby: propichování, dusání, střásání, lisování, válcování, extrudování) **bývá hlavní příčinou zhoršené kvality ztvrdlého betonu**, pozornost byla zaměřena především na samozhutnitelný beton a jeho následnou modifikaci.

Pro potřeby experimentálních prací byla volba druhu speciálního betonu zaměřena na níže specifikované typy betonů. Metodika volby druhu betonu je uvedena v kap. (5.1.1 Motivace volby druhu betonu a počtu zkušebních těles).

1.19.1 Samozhutnitelný beton (SCC)

Moderní SCC se datuje od druhé poloviny 80. let 20. století v Japonsku.

Stále častěji nalézá uplatnění v dalších zemích. Hojného rozšíření se dočkal v severských státech (Kanada, Švédsko, Norsko, Island, Skotsko, Holandsko).

Definice SCC:

- SCC se vyznačuje vyšším poměrem: cementová matrice / kamenivo (v porovnání s běžnými betony),
- má schopnost téct a zhutnit se působením vlastní tíhy,
- tzn., odpadáva význačný vliv lidského faktoru (odpadává zhutňování betonu působením vnějších sil),
- dochází k lepšímu probetonování oblastí s hustou výztuží a míst, která jsou pro vibrování nedostupná,
- dochází ke zlepšení pohledové plochy,
- dochází k dobrému vyplnění prostoru bednění, odvzdušnění,
- v případě prefabrikace dochází ke zvýšené životnosti forem.

Výhodami lze označit výrazné omezení hlučnosti při výrobě, zrychlení procesu betonáže, zvýšení kvality (nejenom povrchu) betonu, využití neorganických jemnozrnných prachů, mouček apod. **Nevýhodami** lze označit požadavek vyšších tlaků na bednění, možnost betonování do sklonu cca 3 %, viz (TP 187, 2008), případně „vyšší citlivost“ k explozivnímu odštěpování při působení vysokých teplot.

1.19.1.1 Technologické závislosti složení SCC

Viskozita (tekutost) čerstvého SCC je způsobena použitím vhodných přísad a příměsí do max. velikosti zrn 0,25 mm (často velkého obsahu), více např. (Okamura et al., 1995; Okamura, 1997; Lukáš et al., 2003).

Bohatě jsou využívány superplastifikační přísady (na bázi polykarbonátů), případně stabilizační přísady. Výhodou superplastifikačních přísad je snížení vodního součinitele při zvýšené pohyblivosti čerstvého betonu (dosažení tekutosti při zachování dostatečné soudržnosti a zabránění segregace), viz (Schutter et al., 2008). Dochází k urychlení nárůstu počátečních pevností a zlepšení pohledové plochy. Pokrok ve vývoji plastifikačních / superplastifikačních přísad se datuje ke konci osmdesátých let dvacátého století.

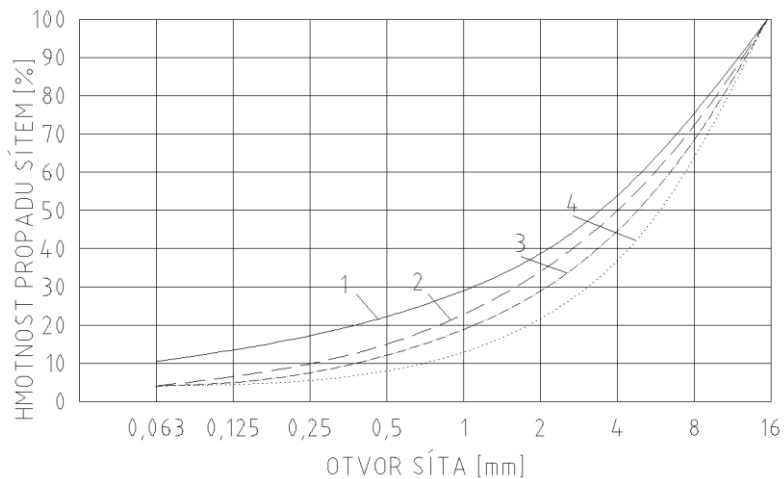
S ohledem na výborné reologické vlastnosti čerstvých samozhutnitelných betonů je SCC využíván při provádění pohledových betonových ploch (pohledový beton) – více např. (Sichtbeton, 2012; Technická pravidla ČBS 03, 2018). Zlepšení kvality povrchu lze dosáhnout vyvarujíc se vad uvedených v Příloze C (Evropská směrnice pro samozhutnitelný beton, 2005) nebo v Příloze P5 (TP 187, 2008).

Jako příměsi jsou ke kamenivu **přidávány jemné složky**, které zajišťují snížení viskozity. Jsou používány všechny typy inertních materiálů (jemně mletý vápenec, kamenné odprašky), pucolánových materiálů (elektrárenský popílek, mikrosilika) a latentně hydraulických materiálů (mletá granulovaná vysokopecní struska).

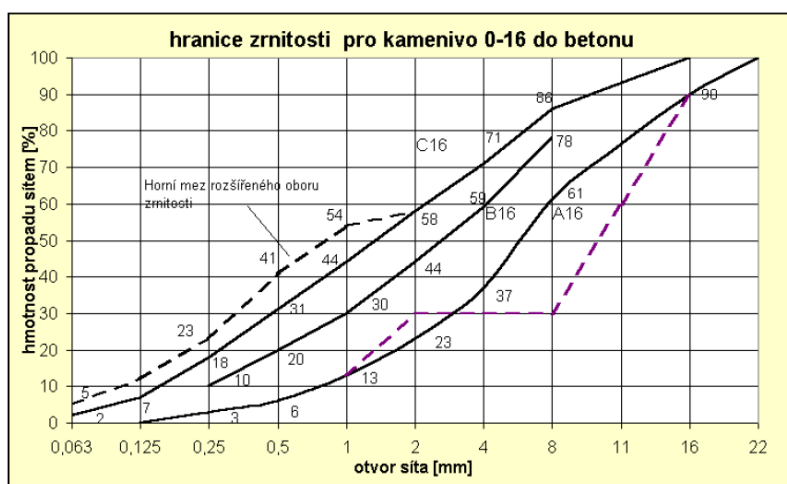
SCC beton je velmi **citlivý na přesnost dávkování** jednotlivých složek. Míchání je možné provést v jakékoliv míchačce (TP 187, 2008). Doporučené typy jsou s nuceným oběhem. Pořadí vkládání složek je nutné prověřit pro každý druh SCC betonu, neboť nedostatky při nedodržení technologie výroby se projevují mnohem zřetelněji než u „běžných“ betonů (Khayat, 1999).

Colleparidi (2009) uvádí pravidla pro úspěšný návrh SCC podle (ACI SP-140):

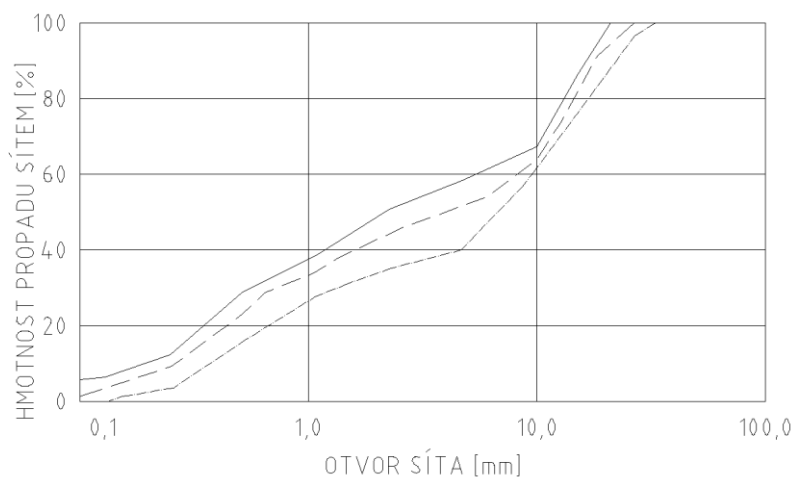
- objem cementu (V_c) + objem příměsí (V_f – tj. popílek, mletý vápenec, křemičitý úlet, frakce písku pod 0,125 mm) leží v intervalu 170–200 l/m³,
- objemový poměr: voda / (cement + příměsi), tj. $V_w / (V_c + V_f)$, leží v rozsahu 0,85–1,20,
- objem hrubého kameniva < 340 l/m³,
- $D_{max} = 25$ mm (ideálně $D_{max} = 20$ mm).



Obrázek 16 Idealizované křivky zrnitosti obyčejného (vibrovaného) betonu (TVB) pro $D_{max} = 16$ mm (1 = Bolomey, 2 = Fuller, 3 = EMPA I, 4 = EMPA II), upraveno z (Bajza, 2006)



Obrázek 17 Hranice zrnitosti SCC, $D_{max} = 16$ mm (TKP 18, 2016)



Obrázek 18 Typická křivka zrnitosti SCC, upraveno z (Aarre et al., 2003)

1.19.1.2 Zkoušení čerstvého SCC

Zkoušení čerstvého SCC se zaměřuje **na stanovení čtyř klíčových vlastností**. Předpokládá se, že není jednotlivá metoda, která by mohla pokrýt všechny základní vlastnosti (schopnost plnění bednění, schopnost průtoku, odolnost vůči segregaci, odolnost proti krvácení).

- **Schopnost plnění bednění** (tekutost = tečení = filling ability, flow).

Zkušební metody: zkouška sednutí-rozlitím (ČSN EN 12350-8, 2010), zkouška V-nálevkou (ČSN EN 12350-9, 2010).

Další zkušební metody: O-trychtýř – analogie V-nálevky (jedná se o zásobník, který se po celé délce směrem dolů zužuje (poznámka: rozměry shodné s přípravkem V-nálevky), avšak nad spodním otvorem je zakončen krátkou rourou kruhového průřezu); zkouška „rozlitím Abramsova kužele“ – modifikace normy (ČSN EN 12350-2, 2009); zkušební metoda Orimet; zkušební metoda vyplňováním (Schutter et al., 2008). Viskozitu je možné zkoušet na rotačních viskozimetrech.

Autorem bylo osobně zjištěno, že (v nejmenovaných betonárnách) v ČR je doposud aplikována modifikace zkušební metody „rozlitím Abramsova kužele“ tak, že standardní kuželová forma je použita v převrácené poloze. Tato modifikovaná metoda slouží pro nenormové posouzení tekutosti a průtokové rychlosti SCC. Schutter et al. (2008) uvádí převyšující nevýhody této modifikace. Poznámka: normový postup je uveden v normě (ČSN EN 12350-8, 2010)

Tekutost ukazuje, jak daleko může čerstvý beton téci. Pokud klesne tečné napětí v SCC během tečení pod hodnotu meze kluzu, čerstvý beton přestává téct. Je sledována **viskozita** (tj. vnitřní tření v betonu). Čím je viskozita nižší, tím rychleji může beton téci.

- **Schopnost průtoku** (prostupnost = odolnost proti blokování = schopnost snadného tečení přes výztuž = passing ability, low blocking).

Zkušební metody: L-box s vertikální výztuží (ČSN EN 12350-10, 2010), zkouška J-kroužkem (ČSN EN 12350-12, 2010).

Další zkušební metody: L-box s horizontální výztuží, metoda U-box (více Schutter et al., 2008), anebo použití J-kroužku a Orimetu zároveň.

Prostupnost určuje, jakým způsobem bude čerstvý SCC protékat stísněnými prostory (např. mezi pruty výztuže, zúženými dimenzemi). Hrubé kamenivo přemísťuje svoji polohu, nesmí se shlukovat a blokovat otvory.

- **Odolnost vůči segregaci / rozměšování** (stabilita čerstvého betonu = rozmísení čerstvého SCC = segregation resistance).

Zkušební metody: zkouška segregace při prosévání (ČSN EN 12350-11, 2010).

Další zkušební metody: Vizuální kontrola. Odolnost proti segregaci v odměrném sloupku; penetrační zkouška odolnosti proti segregaci. Rozmísení je patrné všemi druhy zkoušení čerstvého SCC, protože jev segregace markantně zhoršuje výsledky zkoušek (Hela et al., 2006).

Poznámka: zkušební metody stanovení segregace pro obyčejný (vibrovaný) beton (TVB) v čerstvém stavu neexistují. Není stanoveno ani přijatelné orientační měřítko.

Zkušební metody ve ztvrdlém stavu: (ČSN 73 1371, 2011).

Odolnost vůči segregaci se vztahuje k plastické viskozitě a hustotě cementové pasty. Pokud je hustota kameniva vyšší než hustota cementové pasty a viskozita pasty je nízká, pravděpodobně dojde k segregaci.

Stabilita čerstvého betonu je schopnost zachovat si původní distribuci složek. Rozmísení čerstvého betonu je charakterizováno nerovnoměrným rozložením komponent, tj. vyloučením vody na povrchu prvku / konstrukce a sednutím kameniva ve spodní úrovni. Tato závada způsobuje zeslabení celé struktury.

Čerstvý SCC musí mít dostatečnou vnitřní kohezi (soudržnost), která zajistí rovnoměrné vnitřní složení (např. při dopravě a ukládání čerstvého SCC).

Stabilitu lze ověřit kompatibilitou systému: cement – voda – plastifikátor – příměs, více (Aitcin, 2005).

Činitelé snižující riziko segregace: plynulá křivka zrnitosti, zavedení vzduchu do čerstvého betonu, zvýšený podíl jemných částic, optimální poměr vodního součinitele a obsahu cementového tmele, přídavek superplastifikačních přísad.

Colleparidi (2009) uvádí, že použitím jedinečného pucolánového materiálu – křemičitého úletu – v kombinaci se superplastifikační přísadou nedochází k segregaci čerstvého betonu (častá aplikace v HSC / HPC). Křemičité úlety vynikají velmi malou velikostí zrn, která se mohou vměstnat do dutin mezi zrna cementu (působí jako výplň, vznikne hutný beton). Současně obsahují velké množství oxidu křemičitého v amorfním stavu. Je velmi reaktivní při styku s hydroxidem vápenatým vzniklým při hydrataci portlandského cementu.

Při dávce 3–5 % ultrajemné amorfní koloidní siliky (nanosiliky) dochází k redukci odlučování vody a ke snížení segregace (Colleparidi, 2009).

Kvalitní filler tvoří prach vzniklý při drcení betonu. Snižuje segregaci SCC a zvyšuje pevnost v tlaku (více než popílek).

Činitelé zvyšující riziko segregace: přetržitá křivka zrnitosti (především, je-li $D_{\max} \geq 22$ mm), nesprávný poměr složek kameniva, nedostatečné množství jemných podílů, vysoký vodní součinitel, příliš nízký vodní součinitel, vysoký obsah částic s nevhodným tvarovým indexem, velký rozdíl mezi objemovou hmotností hrubého kameniva a jemných podílů, velké množství plastifikačních / superplastifikačních přísad. Dále mechanické vlivy: volný pád z výšky $\geq 1,5$ m; převibrování; pumpování, více (Hela, 2002).

Poznámka o rozměšování obyčejných (vibrovaných) betonů:

Segregace obyčejných betonů je označována jako poréznost ztvrdlého betonu, která se projeví po vyjmutí těles z forem / odbednění. Možnými riziky vzniku poréznosti jsou: nedostatečné zhutnění, nebo volný pád čerstvého betonu (omezení: maximální výška dopadu = 1,5 m). Rozměšováním v čerstvém betonu je – obecně – označován negativní efekt „pocení“, neboli vystupování vody na povrch a vytváření tenké vrstvy na povrchu kaše (o menší pevnosti a trvanlivosti). Toto je způsobeno např. chudším obsahem cementové kaše v oblasti pod betonářskou výztuží, nebo jako důsledek uzavřené vody při jejím vzestupu. Případně jako důsledek kavitačního působení materiálu v konstrukci. Kavítace (u obyčejného TVB) se objevuje viditelně na povrchu ztvrdlého betonu a způsobuje (pouze) zeslabení vrstvy na povrchu, nebo pod pruty výztuže (Hela et al., 2006).

- **Odolnost proti krvácení (bleeding).**

Zkušební metody: Vizuální kontrola.

Jedná se o stav, kdy cementová zrna sedimentují ve vodní suspenzi s kamenivem. Na povrchu čerstvého betonu se objeví vodní hladina (poměrně) čisté vody. Sedimentace cementových zrn je způsobena buď flokulací zrn cementu (vlivem přitažlivých sil a polarity vody se zrna spojují do větších celků a pak rychleji sedimentují), anebo nadměrným množstvím vody v suspenzi (Hela, 2010).

Stupeň bleedingu lze snížit úpravou vodního součinitele, anebo opakovaným přemícháním čerstvého betonu po několika minutách (remixováním).

Pohyblivost a čerpatelnost čerstvého SCC

Během zpracovatelnosti čerstvého SCC je důležitá neměnnost kvality čerstvého SCC.

Pohyblivost lze určit jako schopnost čerstvého SCC téci. Čerpatelnost je definována jako pohyblivost a stabilita pod tlakem v uzavřeném potrubí.

Další charakteristiky čerstvého SCC

Mezi dodatečné charakteristiky lze zařadit odolnost proti rozplavování, zpracovatelnost povrchu, samonivelace, čerpatelnost při neobvyklých situacích, odolnost proti plastickému sednutí, požadavek na pohledové betony a rychlost roztečení.

Rychlost roztečení je důležitým parametrem v prefabrikaci, kde ovlivňuje produktivitu. Rychlost roztečení: čas t_{500} (ČSN EN 12350-8, 2010), doba výtoku V-nálevkou: čas t_v (ČSN EN 12350-9, 2010), doba výtoku: čas t_{02} , t_{03} – při zkušební metodě Orimet, doba výtoku J-kroužkem: čas t_{500j} (ČSN EN 12350-12, 2010), doplňkový čas průtoku čerstvého SCC V-nálevkou t_L (norma nezavádí).

1.19.1.3 Příklady aplikace SCC v ČR a v zahraničí

- Betonáž základů, opěr a kotevních bloků visutého mostu Akashi-Kaikyo u Kobe (Japonsko) probíhala v 90. letech 20. století. Díky aplikaci SCC se doba výstavby pilířů zkrátila o 20 %.
- Stavba světového finančního centra v Šanghaji, Čína.
- Stavba Muzea (vysoké dlouhé stěny / šikmé stěny) moderního umění v Římě (suché ošetřování, nebyly navrženy dilatační spáry – aplikace: smršťení kompenzující přísady a smršťení snižující přísady – SRA). Byl aplikován cement CEM II / A-L (42,5 R).
- Typické prefabrikáty jsou vysoce vyztužené nebo předpjaté nosníky a sloupy,

Vybrané aplikace SCC v ČR:

- Deskové prefabrikované příčníky a filigránové panely (pro mostní estakádu obchvatu Vamberka) byly provedeny společností M-Silnice a.s. (Prefa Nový Bydžov). Současně zde probíhá výroba prefabrikovaných předpjatých mostních nosníků VSTI 2000 z betonu SCC 45/55. Příkladem může být most v Dolní Branné ev. č. 2953-2. Poznámka: ve všech případech byl upotřeben cement pevnostní třídy 52,5 R (CEM I).
- Železniční most na Zlíchově byl realizovaný společností Metrostav. SCC beton dodával TBG Metrostav, více (Vítek et. al., 2001),
- Most přes Rybný potok na dálnici D8,
- Betonáž pilířů Vysočanské radiály v Praze – pohledový SCC 35/45 - XF2.

1.19.1.4 Požární odolnost SCC

Mikrostruktura a pórovitost SCC je odlišná od obyčejných TVB. Pórová struktura SCC je „podobnější“ vysokohodnotným betonům (HPC), viz (Boström et al., 2007).

Mikrostruktura závisí na druhu a množství jemnozrnných příměsí. Lze proto konstatovat, že se vzrůstající teplotou – s ohledem na hutnou strukturu SCC a v důsledku difuze vodní páry v betonu – snadněji dochází k explozivnímu odštěpování povrchové vrstvy SCC, více kapitola (1.6.1 Explozivní odštěpování betonu).

Typický trend poklesu reziduálních vlastností SCC betonu při vysokoteplotním namáhání (v závislosti na druhu příměsí) popisuje např. Uysal (2012).

1.19.2 Lehký samozhutnitelný beton (LWSCC)

Lehké betony **vynikají** nižší objemovou hmotností [poznámka: klasifikace do třídy objemové hmotnosti (D 1,0–D 2,0) s rozsahem objemové hmotnosti 800–2000 kg/m³ (ČSN EN 206+A1, 2018)]. Mnohdy je uváděna horní hodnota objemové hmotnosti 1800 kg/m³, např. (Schulze, 1984). Další předností LC / LWSCC je nižší tepelná vodivost, lepší tepelně izolační vlastnosti, případně (s ohledem na druh kameniva) „zpracování průmyslových odpadů“. LWSCC mají nižší koeficient tepelné roztažnosti.

Nižší objemová hmotnost LWSCC úzce souvisí s nižší pevností LWSCC v tlaku (Schutter et al., 2008). Naproti tomu LWSCC vyrobený např. z expandovaného jílu vyniká vysokou pevností. Vhodné využití je pro konstrukční LWSCC (např. pro předpjaté konstrukce apod.).

Nevýhody: LWSCC vykazují nižší moduly pružnosti oproti TVB. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti (měřeno ultrazvukovou impulsovou metodou) a statickým modulem pružnosti LWSCC popisuje Hubertová et al. (2006) s těsnou korelací $r = 0,95$.

Duktilita LWSCC je nižší. Lehké kamenivo je finančně náročnější oproti běžnému kamenivu, proto jednotková cena LWSCC je vyšší než SCC. Poznámka: snížení hmotnosti konstrukce může vést (za určitých předpokladů) k návrhu subtilnějšího průřezu a s tím souvisejícího menšího množství materiálu.

1.19.2.1 Čerstvý LWSCC

Čerstvý LWSCC prokazuje odlišné charakteristiky (oproti SCC):

- tekutost a „samozhutnitelnost“ může být dosažena v menším měřítku – dochází k navýšení časových intervalů tečení / průtoků čerstvého LWSCC (na rozdíl od SCC) kvůli nižší objemové hmotnosti, nedostatečně velké vnitřní pohybové energii,
- lehké kamenivo adsorbuje část záměsové vody, může vést k předčasnému ztuhnutí LWSCC. (Poznámka k experimentální části: s ohledem na tuto skutečnost bylo lehké kamenivo (před zpracováním) vždy uloženo ve vodní lázni),

- lehké kamenivo „využije“ vodu v pórech kameniva pro další hydrataci („vnitřní samoošetření“), dochází k redukcí hodnoty celkového smrštění (Hela et al., 2007).
- při vyšší hodnotě cementové pasty má lehké kamenivo tendenci k „plavání“ na povrchu čerstvého betonu, neboť hustota lehkého kameniva může být výrazně nižší než hustota cementové pasty (tendence k segregaci „v opačném směru“ – v porovnání s hutným přírodním kamenivem),
- stanovení obsahu vzduchu se nezkouší podle standardní normy (ČSN EN 12350-7, 2009), nýbrž podle (ASTM C173, ASTM C 23). Evropská norma (ČSN EN 12350-7, 2009) uvádí pouze metody pro stanovení obsahu vzduchu ve ztuhnutém čerstvém betonu z hutného nebo těžkého kameniva (o maximální velikosti zrn do 63 mm).

1.19.2.2 Technologické závislosti složení LWSCC

Snížení hmotnosti LWSCC je možné dosáhnout využitím mezerovitosti kameniva („mezerovitý LWSCC“), použitím lehkého, nebo pórovitého kameniva („nepřímě lehčený LWSCC“), zvětšením objemu pórů v zatvrdlé struktuře, nebo užitím plynotvorných či pěnotvorných přísad („přímě lehčený vytvořenými póry při výrobě LWSCC“).

Schulze (1984) popisuje návrh složení lehkých betonů podle Bache-ho (vyjádřen jako logaritmus pevnosti v tlaku LC). Metodiku výpočtu složení uvádí (Nedbal et al., 2004), cituje pravidla Merkblatt I, II, III podle Heuferse (1979).

Druhy pórovitého kameniva

- **Přírodní pórovité kamenivo** (vulkanické tufy, tufity, napěněná láva, pemza, diatomity, spongility) se v podmínkách ČR nevyskytují. V minulosti se využívala křemelina.
- **Umělé pórovité kamenivo vyráběné z průmyslových odpadů** – využití je podmíněno nízkou aktivitou radonu. Např. sbalkované spékané popílky, popílky sbalkované za studena, Agloporit, Rugen, Poraver, Lytag, Termozit, cihelná drť, zpěněná struska, škvára.
- **Umělé pórovité kamenivo vyráběné z přírodních látek** – např. Keramzit, Liapor, SioPor, Kavilit, Expandit, Expandovaný perlit, expandovaný vermikulit.

1.19.2.3 Kamenivo Rugen

Pro potřeby experimentálních prací bylo zvoleno nové lehké umělé pórovité kamenivo Rugen (výroba: Strakonice, ČR). Kamenivo Rugen, v porovnání s nabízenými alternativními umělými kamenivem, vyniká ve zpracování **vysokých podílů jemných anorganických odpadních materiálů při zachování nejnižší energetické náročnosti** (charakterizované nízkou teplotou výroby), přispívá ke snížení spotřeby neobnovitelných zdrojů – viz Tab. 7. Vstupními surovinami při výrobě jsou anorganické odpadní materiály, odprašky, vzdušná a hydraulická pojiva a přísady do betonu.

Vlastnosti pórovitého kameniva, kontrolu kvality stanovuje (ČSN EN 13055, 2017).

Tabulka 7 Srovnání technických a technologických parametrů lehkých umělých kameniv dostupných v ČR

Název	Frakce [mm]	Sypná objemová hmotnost [ps]	Odolnost proti drcení [MPa]	Podíl odpadních surovin [%]	Teplota výroby kameniva [°C]
Rugen	4/8	500 - 1200	2 - 20	60 - 100	≥ 5
	8/16	400 - 1000	1 - 12	60 - 100	≥ 5
SioPor	0,1/1	120 - 160	0,08	0	300
	0,63/2,5	60 - 100	0,03	0	300
	2,5/4	60 - 80	0,01	0	300
Poraver	2,4/4,8	145 - 230	1,3	100	900
Liapor	0/2	575	4	0	> 1100
	0/4	450	2,1	0	> 1100
	4/8	450	1,7	0	> 1100
	8/16	275	0,6	0	> 1100

Zdroj: Upraveno z (Popis produktu RUGEN, 2013)

1.19.2.4 Příklady aplikace LWSCC, kameniva Rugen v ČR a v zahraničí

Příklady aplikace LWSCC v ČR a v zahraničí

- Prefabrikovaná tribuna fotbalového stadionu v Praze: dílce z LWSCC třídy LC 25/28 D 1,6 - XF4 a LWSCC třídy LC 35/38 D 1,8 - XF4,
- Fotbalový stadion ve Wolfsburgu, Německo,
- Stropní konstrukce RD v Soběšicích: LWSCC třídy LC 25/28 D 1,6.

Příklady aplikace kameniva Rugen v LWSCC / LC v ČR

- LWSCC: prefabrikace v ČR, např. při výrobě železobetonových stěnových panelů pozemních staveb – dostavba tenisové haly ve Vysokém Mýtě. Vnitřní panely byly z betonu LWSCC (umělé_HK: Rugen (4/8, 8/16), DTK: přírodní kamenivo (0/4)). Vnější obvodové panely byly sendvičové. Vnitřní část – LWSCC (Rugen (4/8, 8/16)), vnější část – SCC bez využití umělého kameniva,

- LC (vibrovaný): prefabrikované hybridní obvodové panely tloušťky 160 mm. Nosný rám – lehký hutný beton (D 2,0), výplň z lehkého mezerovitého betonu (D 1,4). Betonáž probíhala ve dvou taktech. Vnitřní panely – lehký hutný (vibrovaný) beton tl. 200 mm. Jedná se o bytové domy Rudná, obecní úřad Němčice, DPS Rtyně v Podkrkonoší, mezonetové RD Církvice, DPS Tuřice.

1.19.2.5 Požární odolnost LWSCC

Požární odolnost LWSCC / LC je s ohledem na složení vstupních surovin v porovnání s SCC odlišná, viz kap. (1.19.2.1 Čerstvý LWSCC). Požární odolnost LC popisuje ve své práci Hora (2012).

1.19.3 Vláknobeton (FRC)

„Vláknobeton je beton s dispergovanou výztuží ve tvaru vláken z vhodného materiálu – ocel, sklo, polymer, uhlík apod. Vlákna jsou v betonu zpravidla rozptýlena, ale mohou být i usměrněna“. (Krátký et al., 1999a).

Vlastnosti vláknových kompozitů závisí na vlastnostech jednotlivých složek, na jejich rozložení a vzájemné fyzikální či chemické interakci. Při vyšším množství vláken se projevuje efekt zhoršené čerpatelnosti čerstvého betonu.

Vláknobetony **vynikají** vyšší houževnatostí, odolností proti rázu a tažností, více Obr. 20. Tyto vlastnosti pramení z vysoké odolnosti proti rozvoji mikrotrhlin.

Další důvod použití betonu s rozptýlenou výztuží (vhodně navrženou) pramení z odolnosti vůči náhlým vysokým teplotám – úprava betonu PP vlákny je označována za jednu z možných alternativ pasivní požární ochrany, viz kapitola (1.5.1 Aktivní a pasivní požární ochrana).

Dělení rozptýlené výztuže:

- **tahová rozptýlená výztuž** zachycuje lokální tahové účinky způsobené prostorovou napjatostí v oblasti mezi zrny hrubého kameniva. V některých případech může vhodně navržená výztuž plně nahradit výztuž betonářskou. Dokáže přenášet tahová napětí ve všech směrech.
- **tlaková rozptýlená výztuž** nemá charakter vláken, zmenšuje objemové změny betonu, zajišťuje polohu hrubých zrn kameniva. Většinou jsou vlákna aplikována do betonu kvůli eliminaci vzniku a šíření trhlin (účinky smršťování, změny teplot).

1.19.3.1 Dělení vláken

Základní dělení vláken podle zdroje a procesu výroby:

- Přírodní:
 - Organická (hobliny, piliny, dřevěné třísky, buničina, stvolý rostlin, apod.),
 - Anorganická (azbest),
- Syntetická:
 - Organická (celulosová vlákna, polymery, apod.),
 - Anorganická (ocelová, skleněná, apod.).

Poznámka: skleněná vlákna musí být alkalivzdorná, např. ochráněna polyvinylacetátovým povlakem, anebo je aplikován speciální typ skla.

Podle způsobu aplikace vláken:

- Kompozity dlouhovláknové:
 - s jednosměrovou organizací,
 - s vícesměrovou orientací,
- Kompozity krátkovláknové:
 - s přednostní orientací,
 - s všesměrovou orientací.

Dělení podle průměru:

- Mikrovlákná: průměr $< 300 \mu\text{m}$,
- Makrovlákná: průměr $> 300 \mu\text{m}$.

Dělení PP vláken podle způsobu výroby:

- Monofilamentní (výroba rozvlákněním z taveniny; protlačování tryskou do vzduchu),
- Fibrilovaná (výroba fibrilací/rozvlákněním předepnuté fólie),
- Sdružená (vytvořená složením z vláken vyrobených předcházejícími výrobními postupy).

1.19.3.2 Účinnost a chování vláken

Účinnost vyztužení včetně popisu omezení vzniku trhlin je popisováno celkovým objemem vláken V_f , štíhlostním poměrem, soudržností vláken s matricí (např. smykovým napětím na rozhraní vlákno–matrice τ), poměrem modulů pružnosti vláken a matrice (E_f / E_m), mechanickými vlastnostmi vláken (pevnost R_f , tažnost A_f), geometrií vláken, rovnoměrností rozptýlení vláken a v konečném důsledku složením a mechanickými vlastnostmi matrice.

Štíhlostní poměr / tvarový součinitel

Tvarový součinitel je dán vztahem:

$$\alpha = l_f / d_f \quad (16)$$

kde:

α ... štíhlostní poměr / tvarový součinitel

l_f ... délka vlákna

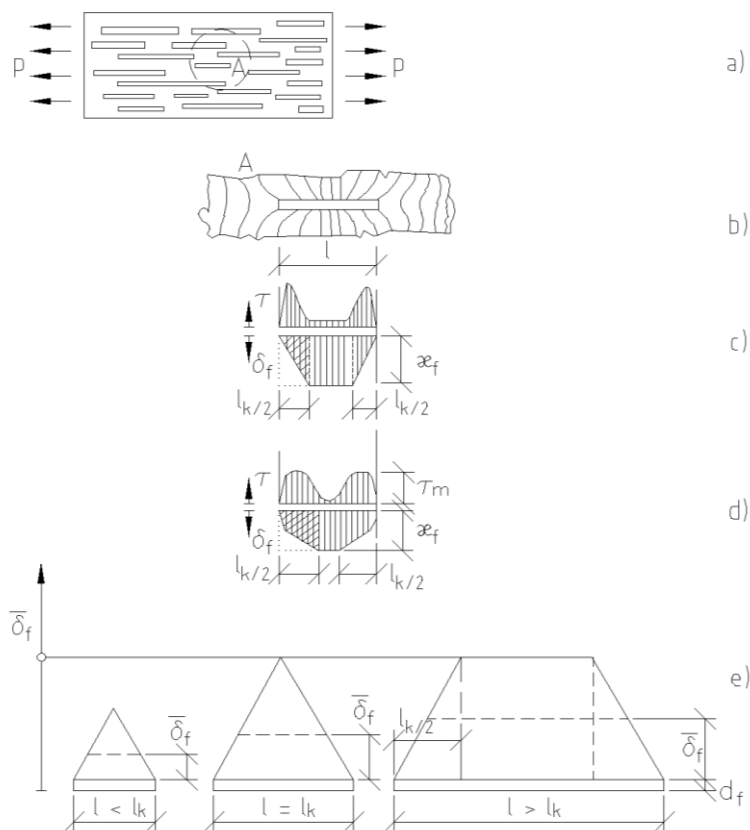
d_f ... průměr vlákna

Aby byla výztuž efektivní, musí být hodnota tvarového součinitele v rozmezí $\alpha = 50\text{--}100$.

Kritická délka

Kritická délka (l_k) dovoluje dosažení hodnoty jejich napětí až na mezi pevnosti.

Pokud je délka vláken $l < l_k$, vlákna se při namáhání **nepřetrhnou, ale vytahují**. Napětí je nerovnoměrné (viz Obr. 19), mění se od 0 (konec vlákna) až k maximální hodnotě ve vzdálenosti $l_k / 2$. Napětí je přenášeno do vláken smykem na styčné ploše, více Obr. 19.



Obrázek 19 Mezifázové smykové napětí τ a napětí vlákna δ_f za předpokladu elastické matrice c), resp. elastoplastické matrice d), v důsledku napětíového pole kolem vlákna b) v usměrněném kompozitu s krátkými vlákny a). Průměrné hodnoty tahového napětí vláken znázorňuje schéma e). κ představuje napětí rovné pevnosti vlákna. Upraveno z (Bareš, 1988)

Při délce vláken mnohem větší, než je délka kritická (cca 50 x), chování krátkovláknových kompozitů se blíží chování dlouhovláknovým kompozitům. Vliv konců vláken je možné zanedbat.

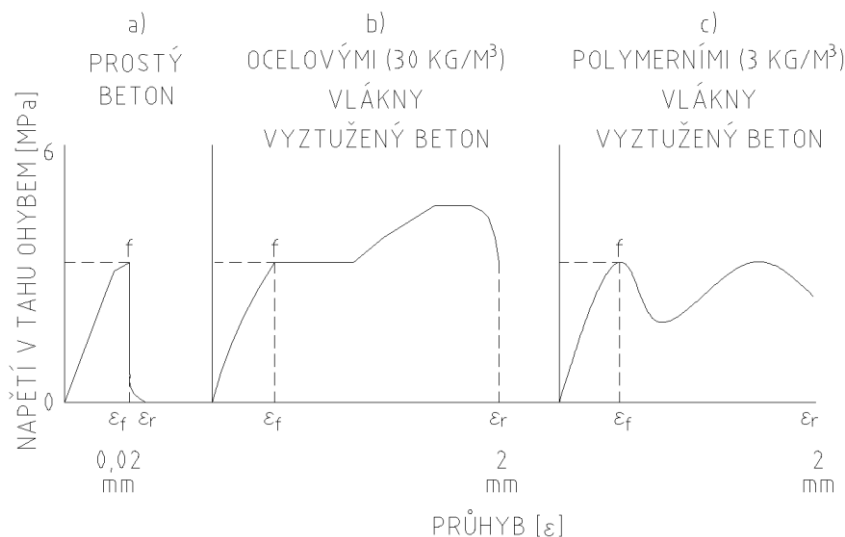
Přenos napětí do vláken (v případě orientace vláken ve směru namáhání) je funkcí délky vlákna a štíhlostního poměru α .

Bareš (1988) představuje (kvalitativní) pohled na vztahy pro výpočet kritického tvarového poměru (plastický / elastický), kritického tvarového objemu a průměrného napětí vlákna a kompozitu. Současně uvádí, že experimentálně stanovené napětí kompozitu převyšuje o 63–83 % napětí vyjádřené rovnicí. Pro náhodně uspořádaná vlákna (rovnoměrně rozptýlená ve třech směrech) se redukuje pevnost i modul pružnosti na 1/3, neboť v jednom okamžiku působení – ve směru namáhání – působí pouze 1/3 vláken. Krenchel (1964) zavádí účinnost vláken na 1/5.

Porovnání chování prostého betonu, SFRC a PFRC se stejným štíhlostním součinitelem a identickým tvarem vláken je znázorněno na Obr. 20.

Základní charakteristiky vláken jsou uvedeny v Tab. 8. Mechanické vlastnosti matrice a vláken se vyvíjí v čase.

Omezení trhlin ve ztvrdlém betonu lze experimentálně charakterizovat stanovením lomových vlastností betonu – zkouškou lomové energie. Více kap. (1.19.4.3 Normativní zakotvení / předpisy SFRC v ČR a v zahraničí) > (Zkouška lomové energie).



Obrázek 20 Porovnání vlivu vláken při tahovém namáhání: a) prostý beton (chování strain-softening typu I); b) vyztužený beton polymerními vlákny (chování strain-softening typu II); c) vyztužený beton ocelovými vlákny (chování strain-hardening). Upraveno z (Collepari, 2009)

Tabulka 8 Základní charakteristiky vybraných vláken

Materiál vlákna	Pevnost v tahu	Modul pružnosti	Protažení při přetržení, tažnost	Průměr vlákna	Objemová hmotnost	Další charakter.
	[MPa]	[GPa]	[%]	[μm]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	
PP	200-700	3,5-18	5-40	10-300	910	Bod tavení: 160–170°C. Teplota samovznícení: 360°C.
PVA	800-2500	25-60	6-10	14-40	1300	Vynikající soudržnost s cementovou maticí (přítomnost OH skupin).
Skleněná vlákna	(1500-3600) Monovláken: 3550. Pramenů: 1720.	60-90	2-4	10-15	2700	Bod měknutí: 830°C.
Polykrystalická - Uhlíková vlákna	1700-3500	200-700	2-4	15-200	1600-2100	
Ocelová vlákna	1500-3800	170-300	1-2	100-600	7850	

Zdroj: Upraveno z (Bareš, 1988; Kolísko, 2008; Machek et al., 2008; Technické listy společností)

1.19.3.3 Aplikovatelnost polymerních vláken

Polymerní mikrovlákna slouží k redukcí a potlačení vzniku mikrotrhlin (způsobené díky plastickému smršťování).

Polymerní makrovlákna (nepravidelného tvaru) slouží ke zlepšení soudržnosti cementové pasty a polymeru. Vlákna bývají větší ($d_f = \text{cca } 10 \mu\text{m}$), zastavují růst makrotrhlin vznikajících důsledkem smrštění vysycháním. Konstrukční vlákna na bázi **PVA** zvyšují hodnoty tahové pevnosti a modul pružnosti. Působí obdobně jako vlákna ocelová. Ve srovnání s PPF jsou tažnější a pevnější (asi 500 x), ale dražší.

Dávkování vláken

Fiala (2006) doporučuje přidávat PP a skleněná vlákna při míchání „suché směsi“, ocelová vlákna naopak po přidání vody.

1.19.3.4 Požární odolnost PFRC

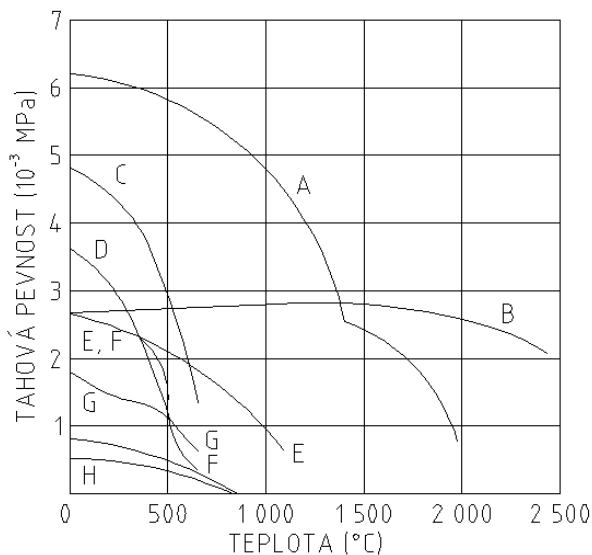
Při působení požáru se projevuje mechanismus odolnosti PFRC.

Polypropylenová vlákna v betonových prvcích přináší snížení explozivního odstřelování, nezabrání však snížení reziduální pevnosti betonu po působení vysoké teploty.

Pozitivní vliv vláken při zvýšených teplotách (mechanismus tavení vláken) je dále popsán v kapitole (1.6.1 Explosivní odštěpování betonu).

Herka (2003, 2004) experimentálně popisuje pozitivní význam přidání polypropylénových vláken. Uvádí, že přidáním 1 kg do 1 m³ betonu se zvyšuje odolnost vůči explozivnímu odprýskávání (při zatížení návrhovým požárem podle normové křivky), **přidáním 2 kg do 1 m³ betonu je odprýskávání úplně vyloučeno („dosažení vyšší difuzivity“ vlivem zvýšení pórovitého systému po roztavení PP vláken)**. Proces difuzivity vlhkosti popsal funkční závislostí pomocí nelineárního vyjádření Bažant et al. (1972).

Clement et al. (2006) uvádí, že přidáním 3 kg·m⁻³ polypropylenových vláken lze odštěpení vyloučit i při zatížení podle křivky RWS, viz kap. (1.11.5 Odvozené teplotní křivky).



Obrázek 21 Vliv teploty na pevnost v tahu u vybraných vláken, upraveno z (Bareš, 1988)

Obr. 21 demonstruje rozdílné pevnosti v tahu u vybraných vláken v závislosti na teplotě (A = vlákna Al₂O₃, B = grafit, C = S-sklo, D = E-sklo, E = vlákno borsic na wolframovém substrátu, F = borové vlákno na wolframovém substrátu, G = maragingová ocel, H = ocelové vlákno).

1.19.4 Drátkobeton (SFRC)

Pojmem drátkobeton je označován vláknobeton, ve kterém jsou použita rovnoměrně rozptýlená kovová vlákna, obvykle v minimálním množství 20 kg·m⁻³ (až max. 120 kg·m⁻³).

Výhodami SFRC lze označit možnost přenášet tahová napětí (houževnatost, tažnost) ve všech směrech, s touto skutečností souvisí zabránění šíření trhlin – „překlenutí mikrotrhlin“ (v důsledku smršťování, teplotních spádů, mechanických vlivů) a dosažení

příznivého vlivu na životnost konstrukce. Vyztužení ocelovými vlákny obecně zlepšuje ohybovou, tahovou a smykovou pevnost, tuhost, odolnost proti nárazu a mrazuvzdornost.

Ocelová vlákna zachycují tahové síly v oblastech cementového tmele – při prostorovém namáhání, zmírňují křehký charakter poškození betonu.

Lze předpokládat i nižší nároky na údržbu SFRC. Je možné dosáhnout snížení ceny prvku / konstrukce. Prvky lze vyrobit rychleji a jednodušeji za současné úspory oceli.

V případě prefabrikace prvky vynikají vyšší odolností proti nárazu a odlamování při povrchu a hranách (oproti nevyztuženým krajům železobetonových prvků). V některých případech může SFRC nahradit betonářskou výztuž.

Některé obecné charakteristiky jsou uvedeny v kap. (1.19.3 Vláknobeton (FRC)).

1.19.4.1 Dělení ocelových vláken

Základní dělení vláken (obecně) je popsáno v kapitole (1.19.3.1 Dělení vláken).

Ocelová vlákna lze dále rozdělit:

Dělení ocelových vláken podle technologie výroby (ČSN EN 14889-1, 2007):

- Skupina I: za studena tažený drát
- Skupina II: vlákna stříhaná z plechu
- Skupina III: vlákna oddělovaná z taveniny
- Skupina IV: vlákna protahovaná z drátu taženého za studena
- Skupina V: vlákna frézovaná z ocelových bloků

Dělení ocelových vláken podle tvaru:

- Přímá (rovná):
 - s hladkým povrchem,
 - s rilovaným povrchem.
- Zvlněná:
 - s koncovými kotvícími ohyby,
 - s koncovými kotvícími ohyby a rilováním,
- Segmentová:
 - pozinkovaná a antikorozi vlákna,
 - speciální vlákna.

1.19.4.2 Technologie provádění SFRC

Zpracování SFRC lze provést:

- Klasickou technologií zpracování čerstvého SFRC,

- Technologií stříkaného SFRC:
 - suchá technologie nástřiku,
 - mokrá technologie nástřiku.

Poznámka: průměr stříkacího potrubí musí být větší než délka drátků, aby nedocházelo k usměrňování vláken během proudění čerstvého SFRC potrubím, více např. Hilar et al. (2008).

1.19.4.3 Normativní zakotvení / předpisy SFRC v ČR a v zahraničí

Normativní zakotvení / předpisy

Pro **navrhování drátkobetonových konstrukcí** je možné využít pokyn „Směrnice pro drátkobetonové konstrukce“ (Krátký et al., 1999a, Krátký et al., 1999b). Směrnice předepisuje tři druhy pevnosti v tlaku (zaručená, normová, výpočtová) a tři druhy pevnosti v tahu (rovněž: zaručená, normová, výpočtová). Popř. doplněné o ekvivalentní pevnost v tahu po vzniku trhliny, více Krátký et al. (1999a) – Tab. 1.1 a Tab. 1.2.

(Stahlfaserbeton: Fassung, 2001) předepisuje minimální rozměr tělesa (délku hrany) o velikosti nejméně dvojnásobku délky drátků.

Zkoušení čerstvého / ztvrdlého FRC v ČR

Čerstvý vláknobeton se zkouší podle předběžné normy (ČSN P 73 2451, 2015). Ztvrdlý vláknobeton (pevnost v tahu ohybem) podle normy (ČSN P 73 2452, 2015).

Zkouška lomové energie

Přidáním ocelových drátků může vést až k řádovému zvýšení hodnot lomové energie. Klasickým způsobem stanovení lomové energie je ohybová zkouška hranolu (obvykle se zářezem). Princip je v předpisu RILEM (RILEM TC 162-TDF), kde je stanovena lomová energie vyjadřující množství práce k šíření trhliny v dané ploše průřezu.

$$G_f = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0}{b \cdot (h - a_0)} \quad (17)$$

kde:

G_f ... hodnota lomové energie [J/m^2]

W_0 ... plocha vymezená pracovním diagramem a osou znázorňující průhyb [J]

m ... hmotnost tělesa mezi podporami [kg]

g ... tíhové zrychlení [$9,806 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$]

δ_0 ... maximální průhyb [m]

b ... příčný rozměr hranolu, vodorovný rozměr [m]

h ... příčný rozměr hranolu, svislý rozměr [m]

a_0 ... hloubka zářezu [m]

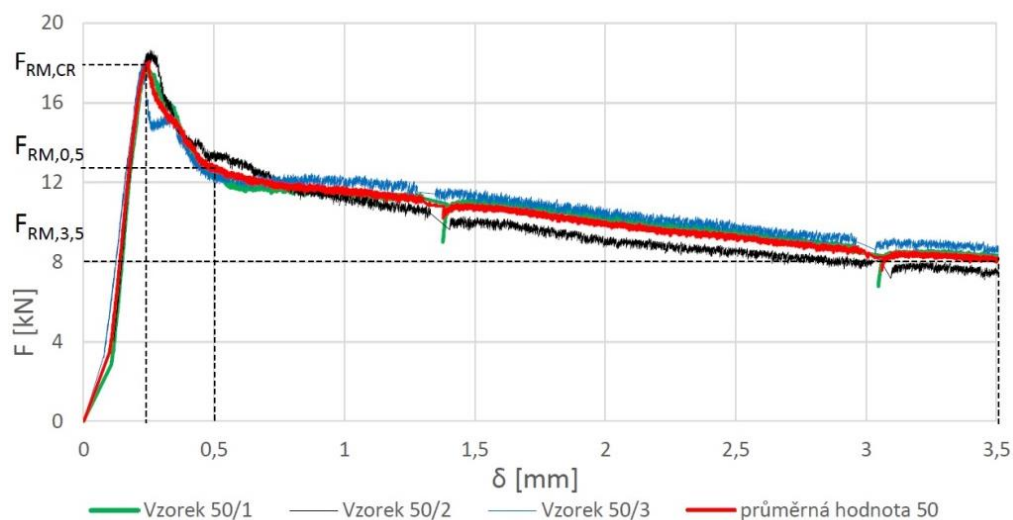
Normativní stanovení (reziduální pevnosti SFRC / PFRC)

Pokud je potřeba určit ekvivalentní pevnost SFRC v tahu po vzniku trhliny, provede se zkouška pevnosti v tahu ohybem při řízeném průhybu zkušebního hranolu.

Existuje několik doporučení pro stanovení reziduálních pevností (zkoušení stříkaného betonu, zkušební metoda betonu s kovovými vlákny, zkušební metoda pro vlákna do betonu, apod.). Schématické porovnání základních parametrů je uvedeno v Tab. 9.

Tabulka 9 Porovnání základních charakteristik různých zkušebních postupů vedoucích ke stanovení reziduální pevnosti v tahu ohybem

Normativní dokument	Uspořádání zkoušky, ohyb:	Rozměry tělesa	Stanovení reziduální pevnosti:
ČSN P 73 2452, 2015	3-bodový	150x150x700	Vyhodnocení zkoušky: $\delta_1 = 0,5$ mm, $\delta_2 = 3,5$ mm
ČSN EN 14845-2, 2007 Zkušební metoda dle: ČSN EN 14651+A1, 2008	3-bodový	150x150x550	Vyhodnocení zkoušky: CMOD 0,5; CMOD 3,5 mm
ČSN EN 14651+A1	3-bodový	150x150x550	Ukončení zkoušky: CMOD ≥ 4 mm
RILEM TC 162-TDF	3-bodový	N/A	Vyhodnocení zkoušky: CMOD 0,5; CMOD 3,5 mm
Model Code, 2010, 2012	3-bodový	150x150x550	Vyhodnocení zkoušky: CMOD 0,5 (MSP); CMOD 2,5 mm (MSÚ)
ČSN EN 14488-3, 2006	4-bodový	75x125x500 a více	Ukončení zkoušky: $\delta = 4$ mm
TP FC 1-1	4-bodový	150x150x700	Ukončení zkoušky: $\delta = 10$ mm
DBV-Merkblatt - Faserbetonklassen (Německo)	4-bodový	150x150x700	Vyhodnocení zkoušky: $\delta_1 = 0,5$ mm, $\delta_2 = 3,5$ mm
ÖVBB-Richtlinie - Faserbeton (Rakousko)	4-bodový	150x150x600 (700)	Vyhodnocení zkoušky: $\delta_1 = 0,5$ mm, $\delta_2 = 3,5$ mm



Obrázek 22 Příklad pracovního diagramu provedených ohybových zkoušek drátkobetonových trámců (150 x 150 x 550 mm, vlákna HE 1/50), (Kosinka, 2018)

Drátkobetonové podlahy:

Tematika drátkobetonových podlah je blíže rozepsána v (Concrete Society Report: TR34, 2003), viz kapitola „7 Reinforcement“, Steel Fibres. Platnost doporučení tohoto dokumentu je ve vybraných evropských státech.

1.19.4.4 Aplikovatelnost ocelových vláken

Kovová vlákna / drátky slouží ke zvýšení houževnatosti, tažnosti a rázové pevnosti vyztuženého betonu.

Základní chování a účinnost ocelových vláken (obecně) je charakterizována v kapitole (1.19.3.2 Účinnost a chování vláken). Základní charakteristiky ocelových vláken jsou popsány v Tab. 8.

1.19.4.5 Příklady aplikace SFRC v ČR a v zahraničí

Největší zastoupení drátkobetonu bylo ještě před cca 10 lety **v průmyslových podlahách**, více např. Svoboda et al. (2007), Hela et al. (2006). V současné době je trend využívat výhody tohoto speciálního betonu zejména v podzemních stavbách, **v tunelech**.

Prefabrikované drátkobetonové dílce ostění tunelů:

- Tunely Ejpvovice (CZ), Channel Tunnel Rail Link CTRL (UK), Heathrow PiccEx, HexEx, SWOT (UK).

Zhotovení definitivního ostění ze stříkaného drátkobetonu:

- Heathrow Express Rail Link – křížení (UK), Heathrow Terminál 5 (UK), Jubilee Line Extension – křížení (UK), Mission Valley East Light Rail Transit (USA – San Diego), Vítkovské tunely (CZ), tunel Libouchec (CZ).

Kombinace obou technologií:

- Crossrail (UK).

1.19.4.6 Požární odolnost SFRC

Sukontasukkul et al. (2010) popisuje lepší odolnost drátkobetonu oproti vláknobetonu – při vysokých teplotách.

SFRC ovlivňuje šíření trhlin – viz kap. (1.19.4 Drátkobeton (SFRC)). Zvýšenou odolnost HPSFRC proti vysokoteplotním zatížením potvrdil např. Lau et al. (2006), nebo Lukš et al. (2003).

1.19.5 Samozhutnitelný vláknobeton (FRSCC)

1.19.5.1 Technologické závislosti složení FRSCC

Všesměrně rozptýlená výztuž v SCC disponuje celou řadou výhod uvedených v kapitolách (1.19.3 Vláknobeton (FRC) a 1.19.4 Drátkobeton (SFRC)).

Naopak vlákna v SCC negativně ovlivňují např.:

- zhoršení reologických vlastností SCC,
- prodloužení doby míchání, přípravy čerstvého FRSCC,
- zhoršení prostupu vláken přes betonářskou výztuž,
- snížení čerpatelnosti.

2 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ ANALÝZY SOUČASNÉHO STAVU

2.1 Teplotní degradace betonu

Beton je nejpoužívanější stavební materiál, je nehořlavý (**třída A1**: minerální složky betonu jsou zaručeně nehořlavé), má nízkou tepelnou vodivost. Při vysokoteplotním zatížení dochází ke značnému negativnímu ovlivnění jeho fyzikálně-chemických a mechanických vlastností.

V globálním pohledu dochází ke ztrátě mechanických vlastností betonu při teplotách vyšších než 100 °C, více kap. (1.15 Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ČSN EN 1992-1-2, 2006); 1.16 Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ACI 216R-89, 1994); 1.18 Popis složek betonu při zvýšených teplotách). Kapitola (1.17 Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (rešerše z vědeckých prací)) představuje souhrn vlastností z vědeckých publikací – reziduální mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě. K významným ztrátám pevnostních a přetvárných vlastností dochází při teplotách 400 °C a vyšších. V teplotním rozsahu 20–300 °C dochází sporadicky ke stanovení reziduálních mechanických vlastností přibližujících se referenčním charakteristikám. Poznámka: Chan et al. (1999) experimentálně určil reziduální procentuální pevnosti HSC betonu (90–100 %), v případě TVB (85 %) – při dosažení maximální teploty 400 °C.

2.2 Popis materiálových vlastností speciálních betonů vystavených vysokým teplotním namáháním

SFRC byl v minulosti využíván ve velké míře do průmyslových podlah. V současné době nachází uplatnění (stále častěji) v podzemním stavitelství (tunelová ostění – stříkaný SFRC, nebo v prefabrikovaných tunelových segmentech). Popis materiálových reziduálních vlastností po teplotním zatížení speciálních betonů není uspokojivě popsán. Informace o chování SFRC po působení vysokoteplotních namáháních jsou pro stavební praxi, nebo materiálový výzkum, v oblasti požární odolnosti velmi cenné.

Platná evropská norma (ČSN EN 1992-1-2, 2006, kap. 3.2 a 3.3) připouští aplikaci jednoduché výpočetní metody, která redukuje materiálové vlastnosti betonu (mechanické, teplotní a fyzikální) při vzrůstající teplotě formou „redukčních koeficientů“ (více kap. 1.15 Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ČSN EN 1992-1-2, 2006)). Stanovené parametry jsou funkcí teploty a druhu použitého kameniva (křemičitého / vápencového). Norma neuvádí materiálové vlastnosti lehkých betonů.

Lze konstatovat, že technické předpisy nepostihují popis mechanických, teplotních a fyzikálních vlastností speciálních betonů (např. SCC, LWSCC, FRC, SFRC, FRSCC, HSC, HPC, UHPC apod.) – při působení vysokoteplotního zatížení (požáru).

Model Code

Pracovní skupina fib neuvažuje se zavedením nových doporučení – či upřesnění – materiálových (mechanických, teplotních, fyzikálních) vlastností speciálních betonů při zvýšených teplotách, více (Model Code 2010, 2012).

2.2.1 Problematika modulu pružnosti betonu

Statický modul pružnosti v tlaku je jednou ze základních vlastností ztvrdlého betonu. V celé řadě případů se jedná o stěžejní charakteristiku pro vlastní funkci i únosnost konstrukce (např. mosty, předpjaté konstrukce). Variabilita výsledků zkoušek je ovlivněna souborem vstupních parametrů. V platných českých normách je uvedeno pět metodik pro stanovení modulu pružnosti. Do doby vydání Technických pravidel ČBS 05 (2016) nebylo možné specifikovat beton včetně předepsané hodnoty modulu pružnosti. Nebylo ani patrné, která metodika je referenční, více kap. (4.1 Modul pružnosti betonu).

V platné betonářské normě (ČSN EN 206+A1, 2018; ČSN P 73 2404, 2016), popisující charakteristiku betonu, jeho specifikaci, vlastnosti, výrobu a shodu, není modul pružnosti charakterizován. Nejsou definovány ani jakékoliv charakteristické hodnoty. Požadavky na modul pružnosti vychází proto z hodnot doporučených (přibližných, směrných) stanovených v normě (ČSN EN 1992-1-2, 2006; ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011), případně v (Model Code 2010, 2012). Sečnové moduly pružnosti jsou pouze orientačně přiřazeny k pevnostní třídě betonu. Soudobé betony však obsahují větší množství jemných složek a (super) plastifikačních přísad, vedou tedy k nižším hodnotám modulům pružnosti.

Při realizaci staveb není mnohdy ani požadováno kontrolní zkoušení modulu pružnosti. (TKP 18, 2016) však doporučují **provedení kontrolní zkoušky statického modulu** pružnosti v tlaku (Tabulka 18-5) v počtu 3 těles – u mostů s rozpětím pole větším než 50 m (v případě železového i předpjátého betonu). (TKP 17, 2002) předepisují stanovení modulu pružnosti kontrolní zkouškou v případě letmo betonovaných nebo příčně dělených segmentových mostních konstrukcí.

2.2.2 Problematika Poissonova součinitele

Poissonův součinitel, podobě jako modul pružnosti, není charakterizován v betonářské normě (ČSN EN 206+A1, 2018; ČSN P 73 2404, 2016).

Poissonův součinitele je stanovena v návrhové evropské normě (ČSN EN 1992-1-2, 2006; ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011) směrnou (doporučenou) hodnotou 0,2 pro beton neporušený trhlinami, 0 pro beton s trhlinami, více kap. (4.2 Poissonův součinitel).

2.3 Faktory omezující širší uplatnění speciálních betonů

Nedostatečné zhutnění bývá jednou z hlavních příčin zhoršené kvality ztvrdlého betonu. Různé druhy speciálních betonů vynikají celou řadou předností. Faktory omezující širší uplatnění vybraných speciálních betonů při vlastním návrhu / realizaci (nosných, nenosných) konstrukcí jsou různé, například:

- nedostatečné legislativní / normové zakotvení,
- v případě FRC jde o obtížný způsob kontroly rovnoměrnosti rozmísení drátků,
- nedostatečné proškolení pracovníků v tematice technologie a zkoušení speciálních betonů,
- navýšení ekonomických nákladů za 1 m³ čerstvého betonu.

Poznámka: v celé řadě případů může dojít ke snížení celkové ceny stavebního díla nebo zvýšení kvality zásluhou použití speciálních betonů. Faktory mohou být rozmanité, např.:

SCC: urychlení betonáže / výstavby; zvýšení kvality, zamezení nedostatečného zhutnění betonu v porovnání s TVB,

FRC: urychlení výstavby (např. nahrazení betonářské výztuže ocelovými vlákny; nahrazení smykové výztuže ocelovými vlákny: časová úspora za vázání třmínků apod.),

PFRC: zmírnění následků po mimořádném teplotním zatížení, (zamezení explozivního odštěpování),

HPC: úspora materiálu (s ohledem na návrh subtilních konstrukcí), úspora finančních prostředků za výluky (se zřetelem na možnost návrhu rozměrnějších prefabrikovaných konstrukcí, s kterými lze manipulovat pomocí těžké mechanizace),

LC / LWSCC: zlepšení tepelně-izolačních vlastností (finanční úspora za aplikaci dalších tepelně-izolačních materiálů),

Vodonepropustný beton: urychlení výstavby, znemožnění poruchy izolace proti vodě a zemní vlhkosti.

3 DEFINICE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce navazuje na soudobé poznatky v tematice technologie a zkoušení vybraných speciálních betonů (v čerstvém i ztvrdlém stavu). V úvodní části práce (kap. 1.3 Degradace betonu) je představeno krátké seznámení s degradačními mechanizmy, mezi které lze bezesporu zařadit vysokoteplotní zatížení. Při působení vysokých teplot dochází k nepříznivému ovlivnění fyzikálně-chemických a mechanických vlastností. S touto skutečností souvisí negativní ovlivnění životního cyklu betonových konstrukcí.

Práce představuje důsledky vlivu působení vysokých teplotních zatížení na beton, zohledňuje nejdůležitější aspekty ovlivňující výsledné reziduální charakteristiky.

Disertační práce si neklade za cíl provést standardní (normové) zkoušky požární odolnosti na velkorozměrových zkušebních tělesech, nýbrž experimentálně provádět vysokoteplotní namáhání na základě autorem navrženého gradientu rychlosti zahřívání na zhotovených zkušebních tělesech ze speciálních betonů. Cílem je aplikovat dvě odlišné experimentální metodiky teplotního namáhání, jednak v elektrické peci a jednak simulaci lokálního (bodového) požáru pomocí propan-butanového hořáku. Oba experimentální přístupy byly zvoleny na základě studia vědeckých publikací, kdy autora zaujalo sporadické stanovení reziduálních vlastností shodných s referenčními hodnotami, viz kap. (2.1 Teplotní degradace betonu), v teplotním rozsahu 20–300 °C. Směr zkoumání bude proto zaměřen na dosažení maximální teploty přibližující se horní hranici tohoto teplotního rozsahu. Autorův návrh – dosažení teploty 400 °C – převyšuje výše uvedený teplotní rozsah. Další směr zkoumání bude zaměřen na dosažení maximální teploty 1049 °C (přiblížení se popisu normové křivky), 680 °C / 750 °C (křivky vnějšího požáru) a doplňkově, na zhotovených cementových tělesech, do dosažení teplot 70 a 100 °C.

Speciální druhy betonů se dostávají do popředí zájmu odborné stavařské veřejnosti. Zabývá se jimi stále větší množství výzkumných laboratoří. I přes přednosti, kterými disponují, různé faktory brání širšímu uplatnění v praxi (týká se některých druhů), více kap. (2.3 Faktory omezující širší uplatnění speciálních betonů). Snahou je zachytit současný stav poznání v oblasti vybraných speciálních betonů (SCC, FRSCC, SFRC, PFRC, LWSCC), prověřit nabídku těchto materiálů a na základě autorem vyrobených zkušebních těles – z (modifikovaných) speciálních betonů – aplikovat experimentální vysokoteplotní namáhání. Výroba žárobetonů a betonů s hlinitanovým cementem není v rozsahu této práce uvažována.

Pro potřeby definování reziduálních mechanických vlastností využívá disertační práce destruktivních metod. Pozornost je zaměřena na stanovení základních charakteristik ztvrdlého betonu, kterými jsou pevnostní a přetvárné vlastnosti.

Snahou autora bylo rovněž paralelně uplatnit (v reálném čase) dva odlišné přístupy ke stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku, jednak evropský normový přístup a jednak korelaci digitálního obrazu – ve spolupráci se společností Sobriety s.r.o. Cílem tohoto záměru bylo souběžně (experimentálně) stanovit Poissonův součinitel speciálních betonů.

4 PŘEHLED VYBRANÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ

Konkrétní metody využití při vlastním řešení práce jsou uvedeny v kapitole (5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VČETNĚ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ).

Tato kapitola blíže seznamuje s dalšími souvisejícími vlastnostmi / metodami aplikovanými v experimentální části práce.

4.1 Modul pružnosti betonu

Modul pružnosti betonu v tlaku je jednou z nejzákladnějších přetvárných charakteristik betonu. Mehta (2014) popisuje jednotlivé druhy modulu pružnosti betonu.

Modul pružnosti je stěžejní materiálový parametr popisující vztah mezi napětím a deformací betonu. Jedná se o reversibilní (vratnou) pružnou deformaci. Zvyšuje se s rostoucí pevností chemických vazeb v materiálu.

U celé řady konstrukcí se jedná o rozhodující charakteristiku pro vlastní funkci i únosnost (např. mosty, předpjaté konstrukce), neboť je tento atribut zahrnut ve výpočtu deformací. Variabilita výsledků zkoušek je ovlivněna celou řadou vstupních parametrů, více např. Technická pravidla ČBS 05 (2016). Kocáb (2016) ve své disertační práci popisuje faktory ovlivňující modul pružnosti betonu, současně stanovuje kalibrační vztahy pro určení statické hodnoty modulu pružnosti betonu z nedestruktivních měření.

Situace je zkomplikována současně existujícími **pěti platnými metodikami** v platných českých normách.

Rozdělení metod:

- **statické:**
(využívají Hookeova zákona)
 - v tlaku (ČSN ISO 1920-10, 2016),
 - v tlaku (ČSN EN 12390-13, 2014),
 - v tahu ohybem (ČSN 73 6174, 1994),
- **dynamické:**
(založeny na nedestruktivních elektroakustických principech),
 - ultrazvukové (ČSN 73 1371, 2011),
 - ultrazvukové (ČSN EN 12504-4, 2005),
 - rezonanční dle (ČSN 73 1372, 2012),
- **odvozené:** empirické vztahy, převodní vztahy, teoretické vztahy.

Požadavky na kontrolní zkoušky modulu pružnosti jsou uvedeny v kap. (2.2.1 Problematika modulu pružnosti betonu).

„TKP 18 (2016) předepisují stanovení modulu pružnosti podle (ČSN ISO 1920-10, 2016). Díky zavedeným Technickým pravidlům ČBS 05 (2016) je možné specifikovat beton včetně předepsané hodnoty modulu pružnosti. Referenční zkouškou podle ČBS 05 (2016) je metodika podle (ČSN ISO 1920-10, 2016), koncování broušením.“ (Suchánek et al., 2017c).

4.1.1 Modul pružnosti betonu při zvýšených teplotách

Při působení vysokoteplotního namáhání dochází ke snížení přetvárných vlastností výrazněji než pevnost v tlaku. Colleparidi (2009) přisuzuje tento důsledek chování tranzitní zóny při požáru.

4.2 Poissonův součinitel

Je obecně známo, že Poissonův součinitel vyjadřuje poměr příčné a podélné deformace.

V závislosti na složení betonu lze uvažovat Poissonův součinitel v intervalu 0,15–0,20 (Mehta et al., 2014). Pro FRC lze uvažovat hodnotu 0,15 – viz (Shen et al., 2011; Shen, 2009). Poissonův součinitel má klesající tendenci s rostoucím vodním součinitelem (Logan, et al., 2009). Perenchio a Klieger uvádí hodnotu 0,20–0,28 pro HSC betony (ACI 363, 1992).

Experimentální stanovení Poissonova součinitele popisuje Li et al. (2012), Wang et al. (2006). Některé další hodnoty uvádí Cruz (1966), nebo Philleo (1958).

Hodnoty Poissonova součinitele po působení teplotních namáhání jsou uvedeny v Tab. 25, podrobně v příloze E.

4.3 Korelace digitálního obrazu (DIC)

Metoda DIC nachází stále větší uplatnění v mnoha oblastech výzkumu a v průmyslu, tato skutečnost souvisí se sofistikovanějšími algoritmy a výkonnějším hardware.

„Prakticky dosažitelná relativní přesnost této metody je 0,01 px, což znamená, že absolutní přesnost lze téměř libovolně nastavit. Obvykle se absolutní přesnost pohybuje od desítek mikrometrů (měření velkých předmětů v řádech metrů) přes jednotky mikrometrů (běžně velké předměty v řádech desítek milimetrů) až po desetiny mikrometrů (malé předměty v řádech jednotek milimetrů). Zásadním faktorem určujícím přesnost měření je kvalita kamerových objektivů a senzorů, ale především kvalita provedení kalibrace, více např. (Bornert, et al., 2009; Shao et al., 2016).

Pokud se zkoumaný objekt nachází v jedné rovině a také se v této rovině deformuje, postačí k měření jedna kamera – 2D DIC systém. 2D DIC zahrnuje základní a relativně jednoduchý algoritmus DIC. Za předpokladu obecného tvaru objektu nebo prostorové deformace rovinného objektu je nezbytné aplikovat 3D DIC systém, který sestává ze dvou kamer (stereo pár). Tento algoritmus je vzhledem k triangulaci mezi dvěma kamerami složitější.

Ke kalibraci DIC systému se používá speciální kalibrační destička, která v případě 2D systému určuje měřicí rovinu a eliminuje optické distorze objektivu. V případě 3D systému dává informaci o vzájemné poloze kamer a také eliminuje optické distorze objektivu, které by jinak zavedly do analýzy významné nepřesnosti.

Základní princip DIC: snímky deformovaného objektu jsou porovnávány s referenčním snímkem. Přitom je sledována poloha daného bodu na základě největší podobnosti. Nelze však sledovat polohu pouze jediného pixelu. Je nutné definovat soubor pixelů (nazývaný template), nejčastěji čtverec či obdélník o straně několika desítek pixelů. Kromě polohy jednoho bodu lze analyzovat změnu délky mezi dvěma body a mnoho dalších. Jestliže je velký počet jednotlivých bodů uspořádaný do dvourozměrného pole, je možné sestavit barevná rozložení posuvů a deformací po celém zvoleném povrchu.

Kromě základního algoritmu DIC obsahuje systém řadu dalších a poněkud komplikovaných algoritmů. Součástí jsou transformační algoritmy umožňující sledování zdeformovaného povrchu, dále algoritmy minimalizující negativní důsledky šumu a zkreslení různého druhu, optimalizační algoritmy, interpolaci pro přesnost měření v rámci jednoho pixelu apod., více (Mercury RT v2.5: Reference Handbook, 2017).“ – viz Suchánek et al. (2017d).

5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VČETNĚ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Autor prováděl veškerou výrobu – klíčových – zkušebních těles v centrální laboratoři M.I.S. a.s., akreditované pracoviště Nový Bydžov, v areálu betonárny M – Silnice, a.s. v Novém Bydžově. Obě společnosti jsou součástí (uskupením) společnosti MEDIS Holding a.s. a koncernu MEDIS.

Tělesa byla důkladně ošetřována v klimatizované místnosti až do stáří 28 dní, viz kapitola (5.1.3 Odformování a ošetřování zkušebních těles). V této referenční době autor stanovil pevnostní charakteristiky na tepelně nezatěžovaných tělesech (ref) – v akreditované laboratoři M.I.S. a.s.

Ve stáří 28 dní byla zbývající tělesa (žih) převezena do Pardubic, kde byla bezodkladně kondicionována v laboratorním prostředí až do doby zkoušení požární odolnosti, v maximální možné míře podle požadavku normy (ČSN EN 1363-1, 2013), Příloha F – do dosažení rovnovážného stavu (uvažuje se po uložení ve vnějším prostředí při teplotě 23 °C s 50% relativní vlhkostí). Poznámka: v některých případech byla tělesa přímo teplotně zatěžována v referenční době 28 dní.

Ve výjimečných případech, při zkoušení „cementových těles“ probíhal převoz a teplotní zatěžování dříve, než ve stáří 28 dní, viz kap. (5.17 Vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání (proteptování)). Jednalo se o doplňková měření rozšiřující informace o vlastnostech daného materiálu při teplotním namáhání.

V laboratoři byla pravidelně odečítána teplota a vlhkost vzduchu. Průběh teploty vzduchu byl zaznamenáván teplotním dataloggerem (vždy minimálně v době experimentálního zatěžování vysokou teplotou v elektrické peci – cca 1 týden nepřetržitě), data jsou uložena v archivu autora.

Vysokoteplotní experimentální zatěžování probíhalo ve všech případech v Pardubicích. Nejprve v tehdejších prostorách těžkých laboratoří katedry dopravního stavitelství Dopravní fakulty Jana Pernera – v Polabinách. Po vybudování Výukového a Výzkumného centra v Dopravě pokračovala experimentální činnosti v nově vybudovaném laboratorním zázemí VVCD.

Ve snaze dosažení nejvyšší přesnosti, byla veškerá tělesa po provedených teplotních zkouškách (žih) převážena zpět do laboratoře M.I.S. a.s., kde byly autorem stanoveny reziduální vlastnosti. Určení pevnostních charakteristik bylo prováděno na identických

kalibrovaných lisech, v případě zkušebních těles (ref) i (žih), více kap. (5.6 Stanovení pevnostních charakteristik).

Přetvárné charakteristiky byly stanoveny na zkušebním lisu ve VVCD, více kap. (5.8 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, využití DIC).

Poznámka k jednotné volbě stáří stanovení (ref) pevností: volba vychází z charakteru použitých receptur betonu, kdy ve všech případech byla využita příměs typu I v kombinaci s rychletuhnoucím cementem (viz Tab. 14–17). V případě betonu (C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - Cl 0,2 - D_{max}16 - SCC (SF2)) je 80% pevnost dosažena za 2 dny.

5.1 Výroba betonu

5.1.1 Motivace volby druhu betonu a počtu zkušebních těles

Motivace volby klíčových druhů betonů

S ohledem na vymezený rozsah normy (ČSN EN 1992-1-2, 2006) – (materiálové vlastnosti při zvýšených teplotách pro beton s křemičitým nebo vápencovým kamenivem) bylo přistoupeno k výrobě perspektivních speciálních betonů aplikovaných (aplikovatelných) na reálných stavbách. Se zřetelem na záměr experimentálního zkoušení reziduálních vlastností speciálních betonů používaných v dopravním (případně pozemním) stavitelství a v návaznosti na požadavky (TKP 18, 2016, Tabulka 18-2) na minimální pevnostní třídu „nosných konstrukcí“, byla pozornost zaměřena na typový SCC beton pevnostní třídy C 45/55, C 30/37 a LWSCC pevnostní třídy C 25/28. Autor navrhl jejich další modifikaci přidáním vláken a drátků v různých hmotnostních dávkách, viz Tab. 10–11 (klíčové druhy betonu).

Vybraný klíčový beton (C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - Cl 0,2 - D_{max}16 - SCC (SF2)) je hojně využíván v prefabrikaci. Příklady z reálných staveb jsou uvedeny v kap. (1.19.1.3 Příklady aplikace SCC v ČR a v zahraničí) > (Vybrané aplikace SCC v ČR).

Receptura betonu (C 30/37 - XF2 (CZ, F1.2) - Cl 0,2 - D_{max}16 - SCC (SF2)) je využívána při výrobě nejrůznějších druhů prefabrikovaných dílců, nebo v oblasti monolitických konstrukcí.

Receptura LWSCC (LC 25/28 D 1,8 - XC1 (CZ, F.1.1) - Cl 0,2 - D_{max}16 - SCC (SF1)) byla na reálných stavbách využita při dostavbě tenisové haly ve Vysokém Mýtě. Vnitřní prefabrikované panely byly z betonu LWSCC. Vnější obvodové panely byly sendvičové (vnitřní část: LWSCC, vnější část: SCC).

Tento LWSCC byl zvolen se zřetelem na využití moderního umělého kameniva Rugen, které vyniká ve využití největšího množství jemných anorganických odpadních

materiálů při zachování nejnižší energetické náročnosti při výrobě. Více kap. (1.19.2.3 Kamenivo Rugen).

Motivace volby doplňkových druhů betonů

Autor zařadil doplňkové druhy betonů do disertační práce, i přes absenci některých pevnostních charakteristik (zásluhou nižšího počtu vyrobených / odebraných zkušebních těles), viz Tab. 12. Autor vycházel z technických možností při odběru čerstvého betonu a se zřetelem na zamýšlené experimentální činnosti / kontrolní zkoušky. Doplňkové druhy betonů připojují komplexnější informace o speciálních betonech. Ve většině případů sloužily pro stanovení modulu pružnosti (v kombinaci s DIC) a Poissonova součinitele. AAM byl doplněn s ohledem na potvrzení vysoké odolnosti alkalicky aktivovaných materiálů proti působení požáru. Se stanovením modulu pružnosti nebylo v tomto případě uvažováno.

Čerstvý beton C30/37 byl odebrán z betonárny M – Silnice, a.s. v Novém Bydžově. Jednalo se o zbytkový čerstvý beton.

Zbytkový čerstvý beton C25/30 byl odebrán z betonárny Liberec - Chrastava společnosti FRISCHBETON s.r.o. Beton byl vyroben pro konstrukci propustku.

Autor se přímo podílel na modifikaci betonu FRC_C25/30_2015. Jedná se o jediného zástupce TVB s přidanými vlákny do odebraného čerstvého betonu (FRC). Čerstvý beton byl odebrán z betonárny Pardubice – Semtín, spol. CEMEX Czech Republic, s.r.o. Více např. Suchánek et al. (2015e), Jirovský (2015).

Doplňková tělesa z alkalicky aktivovaného materiálu (AAM) byla odebrána od doc. Ing. Vlastimila Bílka, Ph.D. Receptura byla totožná s referenční recepturou „Směs 3“, kterou aplikovala ve své disertační práci Tišlerová (2012).

Na návrhu receptur a vlastní výrobě specifických vysokopevnostních betonů (HSC_I_2014, HSC_II_2014, HSC_III_2014) se autor přímo podílel při svém působení na Dopravní fakultě Jana Pernera. Tato tělesa byla zhotovena ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě, více Suchánek et al. (2015a, 2014a). Specifický HSC byl představen s ohledem na určení statického modulu pružnosti v tlaku, aplikaci 3D DIC a vyjádření Poissonova součinitele, viz příloha E. HSC rozšiřuje teplotní namáhání pouze okrajově.

Motivace volby „cementových těles“

Cementová tělesa byla využita při teplotním zatěžování na maximální teplotu 70 a 100 °C. Poznámka: tělesa byla vystavena teplotní expozici v různém stáří.

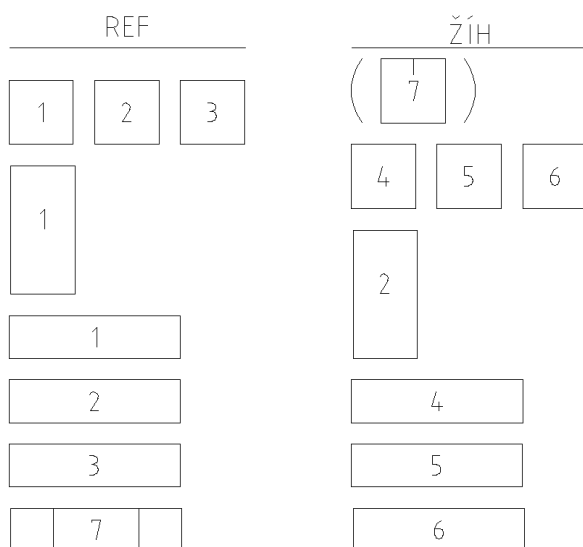
Motivace volby počtu zkušebních těles

Volba počtu zkušebních těles pro jednotlivé – klíčové – druhy betonů byla navržena v počtu 7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů. Schematické znázornění dokládá Obr. 23. V některých

případech autor přistoupil k návrhu většího počtu těles (např. válců pro zkoušení modulu pružnosti v různém stáří). Volba počtu 2 válců je objasněna v kap. (5.8 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, využití DIC). Počet „cementových těles“ vycházel z navrženého zkušebního plánu se zřetelem na teplotní zatěžování v různém stáří zkušebních těles, více kap. (5.17 Vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání (proteptování)).

Konkrétní počet vyrobených zkušebních těles jednotlivých druhů betonů a „cementových těles“ je doplněn do Tab. 19–23.

Rozměry zkušebních těles vychází z použitých forem, více kap. (5.1.2.6 Příprava forem). Skutečné – změřené – rozměry těles jsou uvedeny v protokolech o zkouškách v archivu autora.



Obrázek 23 Volba počtu zkušebních těles jednotlivých sad klíčových druhů betonů (ref, žih), 7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů

Tabulka 10 Označení a legenda zhotovených **klíčových** druhů betonu

Pevnost. třída	Označení betonu	Vyrobeno	Legenda		Míchání	Poznámka
	Beton ČSN EN 206+A1 a ČSN P 73 2404		Tepelně nezatěž.:	Tepelně zatěž.:		
45/55	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2)	24.2.2013, 26.2.2013	SCC45/55_2013 _{ref}	SCC45/55_2013 _{žih}	Lab. míchačka	SCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2)	28.8.2015	SCC45/55_2015 _{ref}	SCC45/55_2015 _{žih}	Lab. míchačka	SCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2)	11.11.2016, 14.11.2016	SCC45/55_2016 _{ref}	SCC45/55_2016 _{žih}	Betonárna	SCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2)	27.6.2017	SCC45/55_2017 _{ref}	SCC45/55_2017 _{žih}	Betonárna	SCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 25 kg.m ⁻³	26.2.2013	25_2013 _{ref}	25_2013 _{žih}	Lab. míchačka	SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 25 kg.m ⁻³	28.8.2015	25_2015 _{ref}	25_2015 _{žih}	Lab. míchačka	SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 25 kg.m ⁻³	11.11.2016, 14.11.2016	25_2016 _{ref}	25_2016 _{žih}	Betonárna	SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 25 kg.m ⁻³	27.6.2017	25_2017 _{ref}	25_2017 _{žih}	Betonárna	SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 50 kg.m ⁻³	26.2.2013, 1.3.2013	50_2013 _{ref}	50_2013 _{žih}	Lab. míchačka	SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 50 kg.m ⁻³	14.11.2016	50_2016 _{ref}	50_2016 _{žih}	Betonárna	SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 75 kg.m ⁻³	1.3.2013	75_2013 _{ref}	75_2013 _{žih}	Lab. míchačka	SFRC / SFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými PP vlákny TEXZEM PPF 370 v dávce 2 kg.m ⁻³	24.2.2013	2PP_2013 _{ref}	2PP_2013 _{žih}	Lab. míchačka	PFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými PP vlákny TEXZEM PPF 370 v dávce 4 kg.m ⁻³	24.2.2013	4PP_2013 _{ref}	4PP_2013 _{žih}	Lab. míchačka	PFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými PP vlákny Synmix 55 v dávce 2 kg.m ⁻³	20.3.2013	Syn2_2013 _{ref}	Syn2_2013 _{žih}	Lab. míchačka	PFRC/PFRSCC
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými PP vlákny Synmix 55 v dávce 4 kg.m ⁻³	20.3.2013	Syn4_2013 _{ref}	Syn4_2013 _{žih}	Lab. míchačka	PFRC

Tabulka 11 Označení a legenda zhotovených **klíčových** druhů betonu, pokračování

Pevnost. třída	Označení betonu	Vyrobeno	Legenda		Míchání	Poznámka
	Beton ČSN EN 206+A1 a ČSN P 73 2404		Tepelně nezatěž.:	Tepelně zatěž.:		
45/55	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými carbonovými vlákny v dávce 2 kg.m ⁻³	1.3.2013	C2_2013 _{ref}	C2_2013 _{žih}	Lab. míchačka	specif. PFRC / PFRSCC
30/37	C 30/37 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2)	5.6.2014	SCC30/37/14 _{ref}	SCC30/37/14 _{žih}	Betonárna	SCC
	C 30/37 - XF2(CZ, F) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými PP vlákny Synmix 55 v dávce 2 kg.m ⁻³	30.9.2013	Syn2_30/37/13 _{ref}	Syn2_30/37/13 _{žih}	Betonárna	PFRC/PFRSCC
	C 30/37 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 40 kg.m ⁻³	5.11.2013	40_30/37/13 _{ref}	40_30/37/13 _{žih}	Betonárna	SFRSCC
	C 30/37 - XF2 (CZ, F1.2) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny Dramix 3D 45/50-BL v dávce 25 kg.m ⁻³	26.6.2014	25_30/37/14 _{ref}	25_30/37/14 _{žih}	Betonárna	SFRSCC
25/28	LC 25/28 D 1,8 - XC1 (CZ, F.1.1) - C1 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF1)	17.12.2012	LWSCC _{ref}	LWSCC _{žih}	Lab. míchačka	LWSCC

Tabulka 12 Označení a legenda **doplňkových** druhů betonu

Pevnostní třída	Označení betonu	Vyrobeno	Legenda		Míchání	Poznámka
	Beton ČSN EN 206+A1 a ČSN P 73 2404		Tepelně nezatěž.:	Tepelně zatěž.:		
30/37	C 30/37 - XF4 (F.1.2) - CI 0,2 - D _{max} 16 - S3	22.4.2011	C30/37 _{ref}	C30/37 _{žih}	Betonárna	Obyčejný beton
25/30	C 25/30 - XF3 (F.1.2) - CI 0,2 - D _{max} 16 - S3	27.6.2012	C25/30 _{ref}	C25/30 _{žih}	Betonárna FRISCH-BETON s.r.o.	Obyčejný beton
	C 25/30 - XC3 - XD1 - XA1 - XF1 (F.1.1) - CI 0,2 - D _{max} 16 - S3 s přidanými vlákny Dramix 3D 65/35-BG v dávce 75 kg.m ⁻³ , TEXZEM PPF 370 v dávce 2 kg.m ⁻³	24.2.2015	FRC_C25/30_2015 _{ref}	FRC_C25/30_2015 _{žih}	Betonárna CEMEX s.r.o.	Vlákna přimíchána dodatečně v lab. míchačce
~ 35/45	Alkalicky aktivovaný materiál	19.12.2012	AAM _{ref}	AAM _{žih}	Odběr těles: Lab. míchačka	AAM
~ 60/75	Navržený HSC I ~ C 60/75 - XF4 (F.1.2) - D _{max} 16 - F4	8.4.2014	HSC_I_2014 _{ref}	HSC_I_2014 _{žih}	Spádová míchačka	HSC
~ 70/85	Navržený HSC II ~ C 70/85 - XF4 (F.1.2) - D _{max} 16 - (SCC) SF2	8.4.2014	HSC_II_2014 _{ref}	HSC_II_2014 _{žih}	Spádová míchačka	HSC (SCC)
~ 80/95	Navržený HSC III ~ C 80/95 - XF4 (F.1.2) - D _{max} 16 - (SCC) SF3	8.4.2014	HSC_III_2014 _{ref}	HSC_III_2014 _{žih}	Spádová míchačka	HSC (SCC)

Tabulka 13 Označení a legenda **doplňkových „cementových těles“**

Pevnostní třída	Označení cementových těles velikost 4x4x16	Vyrobeno	Legenda		Míchání	Poznámka
			Tepelně nezatěž.:	Tepelně zatěž.:		
Prosátý beton	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - CI 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny, následné prosévání přes síto: a=5 mm	28.8.2015	Malé_25_2015 _{ref}	Malé_25_2015 _{žih}	Lab. míchačka	Prosévání přes síto
	C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - CI 0,2 - D _{max} 16 - SCC (SF2) s přidanými ocel. vlákny, následné prosévání přes síto: a=5 mm	14.11.2016	Malé_25_2016 _{ref}	Malé_25_2016 _{žih}	Lab. míchačka	Prosévání přes síto
Cem. tělesa	Cementová tělesa s využitím normalizovaného písku CEN (ČSN EN 196-1, 2005)	24.9.2015	CEM _{ref}	CEM _{žih}	Míhací metla	CEM

Tabulka 14 Publikovatelná forma receptur – složení **klíčových** druhů betonu, složení malty **CEM**

Výchozí látky	SCC45/55_2013, SCC45/55_2015	SCC45/55_2016, SCC45/55_2017	SCC30/37/14	LWSCC	CEM
KAMENIVO					
Poměr frakcí kameniva	0/4 : 4/8 : 8/16 (43:17:40)	0/4 : 4/8 : 8/16 (45:19:36)	0/4 : 4/8 : 8/16 (47:18:35)	0/4 : 4/8 : 8/16 (36:32:32)	více (ČSN EN 196-1, 2005)
0/4 Roudnice; ACHP, spol. s.r.o. Hradec Králové DTK, Hornina: štěrkopísek	Y	Y	Y	Y	-
4/8 Čeperka; Cemex Sand, k.s. HTK, Hornina: štěrkopísek	Y	-	Y	-	-
4/8 Smiřice; Cemex Sand, k.s. HTK, Hornina: štěrkopísek	-	Y	-	-	-
8/16 Černá Skála; M – SILNICE a.s. HDK, Hornina: Paralula/Granit	Y	Y	Y	Y	-
4/8 Rugen, Teplárna Strakonice, a.s. Umělé kamenivo	-	-	-	Y	-
8/16 Rugen, Teplárna Strakonice, a.s. Umělé kamenivo	-	-	-	Y	-
Písek (Střeleč) splňující zrnitost referenčního písku CEN	-	-	-	-	1,35 kg/záměs
CEMENT					Množství na 1 záměs [kg]
Množství na 1 m³ čerstvého betonu [kg]					
Cement Cem I 52,5 R Prachovice Cemex Czech republic, s.r.o.	400	400	375	380	0,45
VODA	190	188	180	159	0,225

Tabulka 15 Publikovatelná forma receptur – složení **klíčových** druhů betonu, složení malty **CEM**, pokračování

Výchozí látky	SCC45/55_2013, SCC45/55_2015	SCC45/55_2016, SCC45/55_2017	SCC30/37/14	LWSCC	CEM
PŘÍSADY					
Superplastifikační přísada MasterGlenium Ace 446 BASF Stavební hmoty ČR s.r.o.	Y	Y	Y	Y	-
Stabilizační přísada RheoMATRIX 100 BASF Stavební hmoty ČR s.r.o.	-	-	-	Y	-
PŘÍMĚSI					
Vápenec velmi jemně mletý třída V, druh 8, Mokrá CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o.	Y	Y	Y	Y	-
DALŠÍ VLASTNOSTI Vodní součinitel	0,47	0,45	0,46	0,41	0,50
OCELOVÁ VLÁKNA					
Dramix 3D 45/50 BL Bekaert Bohumín s.r.o.	25_2013, 50_2013, 25_2015, 50_2016, 75_2013	25_2016, 25_2017	40_30/37/13, 25_30/37/14	-	-
SYNTETICKÁ VLÁKNA					
TEXZEM PPF 370 (Fibrilované pásky) KORDÁRNA Plus a.s.	2PP_2013, 4PP_2013	-	-	-	-
Synmix 55 (Velkopřůměrová vlákna) Bekaert Bohumín s.r.o.	Syn2_2013, Syn4_2013	Syn2_30/37/13	-	-	-
CARBONOVÁ VLÁKNA					
Ručně připravená vlákna Dodavatel tkaniny: CHARLES – Kompozity s.r.o.	C2	-	-	-	-

Tabulka 16 Publikovatelná forma receptur – složení **doplňkových** druhů betonu

Výchozí látky	C30/37	C25/30	HSC_I_2014	HSC_II_2014	HSC_III_2014	C25/30_2015	AAM
KAMENIVO			více Radouš (2014)				
Poměr frakcí kameniva	0/4 : 4/8 : 8/16 (46:12:42)	0/4 : 4/8 : 8/16 (47:0:53)	0/4 : 4/8 : 8/16 (39:26:35)	0/4 : 4/8 : 8/16 (36:27:37)	0/4 : 4/8 : 8/16 (40:32:28)	viz Jirovský (2015)	viz Tišlerová (2012)
0/4 Roudnice; ACHP, spol. s.r.o. Hradec Králové DTK, Hornina: štěrkopísek	Y	-	-	-	-		
4/8 Čeperka; Cemex Sand, k.s. HTK, Hornina: štěrkopísek	Y	-	-	-	-		
0/4 Křenek; České štěrkopísky s.r.o. DTK, Hornina: štěrkopísek	-	Y	-	-	-		
8/16 Černá Skála; M – SILNICE a.s. HDK, Hornina: Paralula/Granit	Y	-	-	-	-		
8/16 Košťálov; EUROVIA Kamenolomy, a.s. HDK	-	Y	-	-	-		
0/4 Čeperka; Cemex Sand, k.s. DTK, Hornina: štěrkopísek	-	-	Y	Y	Y		
4/8 Čeperka; Cemex Sand, k.s. HTK, Hornina: štěrkopísek	-	-	Y	Y	Y		
8/16 Čeperka; Cemex Sand, k.s. HTK, Hornina: štěrkopísek	-	-	Y	Y	Y		
CEMENT			Množství na 1 m³ čerstvého betonu [kg]				
Cement Cem I 52,5 R Prachovice Cemex Czech republic, s.r.o.	340	-	450	480	570		
Cement Cem I 42,5 R Radotín Českomoravský cement, a.s.	-	360	-	-	-		
VODA	160	180	135	160	192		

Tabulka 17 Publikovatelná forma receptur – složení **doplňkových** druhů betonu, pokračování

Výchozí látky	C30/37	C25/30	HSC_I_2014	HSC_II_2014	HSC_III_2014	C25/30_2015	AAM	
PŘÍSADY							viz Jirovský (2015)	viz Tišlerová (2012)
Superplastifikační přísada Stachement 2095 Stachema CZ s.r.o.	Y	-	-	-	-			
Provdzušňující přísada Microporan 2 Stachema CZ s.r.o.	Y	Y	-	-	-			
Superplastifikační přísada Stacheplast S 33 Stachema CZ s.r.o.	-	Y	-	-	-			
Superplastifikační přísada MasterGlenium Ace 446 BASF Stavební hmoty ČR s.r.o.	-	-	Y	Y	Y			
PŘÍMĚSI							viz Jirovský (2015)	viz Tišlerová (2012)
Vápenec velmi jemně mletý třída V, druh 8, Mokrý CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o.	Y	-	Y	Y	Y			
OCELOVÁ VLÁKNA							viz Jirovský (2015)	viz Tišlerová (2012)
Dramix 3D 65/35-BG Bekaert Bohumín s.r.o.	-	-	-	-	-	FRC_ C25/30_2015		

Tabulka 18 Označení a legenda aplikovaných vláken

Označení vláken	Texiplast – Texzem PPF 370	Synmix 55	Dramix 3D 45/50-BL	Carbonová vlákna	Dramix 3D 65/35-BG
Výrobce	KORDÁRNA Plus a.s.	Bekaert Bohumín s.r.o.	Bekaert Bohumín s.r.o.	Dodavatel: CHARLES – Kompozity s.r.o.	Bekaert Bohumín s.r.o.
Staré označení vláken	-	-	Dramix RL 45/50-BN	-	Dramix RC 65/35-BN
Normové označení vláken	Třída Ib (ČSN EN 14889-2, 2007)	Třída II (ČSN EN 14889-2, 2007)	Skupina I (ČSN EN 14889-1, 2007)	-	Skupina I (ČSN EN 14889-1, 2007)
Aplikace do betonu	2PP_2013, 4PP_2013, FRC_C25/30_2015	Syn2_2013, Syn4_2013, Syn2_30/37/13	25_2013, 25_2015, 25_2016, 25_2017, 50_2013, 50_2016, 75_2013, 40_30/37/13, 25_30/37/14	C2_2013	FRC_C25/30_2015
Materiál	Polypropylen (PP)	Polypropylen (PP)	Ocel	Uhlík	Ocel
Způsob výroby/typ	Fibrilované pásy	Velkopřůměrová vlákna	Za studena tažená ocelová vlákna s háčky na koncích	Monofilamentní	Za studena tažená ocelová vlákna s háčky na koncích. Poznámka: drátky jsou slepeny do svazků lepidlem rozpustným ve vodě.
Délka [mm]	35	55	50	50 (nastříháno)	35
Průměr [mm]	-	0,85	1,05	Vlákna jsou v pramencích. Průměr jednoho vlákna: 0,007	0,55
Tvarový součinitel [-]	-	~ 65	45	-	65
Délková hmotnost	15 000 dtex (= 15 000 g/10 km)	-	-	-	-
Hustota [kg/m ³]	-	905	~ 7850	0,2	~ 7850
Sít' vláken [vláken/kg]	-	39 000	2802 (2,9 km/m ³ - pro 20 kg/m ³)	-	14531 (8,0 km/m ³ - pro 15 kg/m ³)
Pevnost v tahu [N/mm ²]	-	250	1 115	-	1 345
Modul pružnosti [N/mm ²]	-	3 000	210 000	-	210 000
Minimální dávkování [kg/m ³]	0,5–2	2,5	20	-	25

5.1.2 Metodika přípravy vstupních surovin, surovinová základna

5.1.2.1 Plnivo – kamenivo

Přírodní kamenivo

V případě míchání v laboratorní míchačce s nuceným oběhem bylo veškeré přírodní kamenivo (drobné i hrubé) odebráno z nekryté skládky kameniva. Před vlastním zpracováním bylo – vždy – sušeno v sušárně (HS 401 A – Chirana) na 110 °C do ustálené hmotnosti. Vlhkost (ČSN EN 1097-5, 2008) ani nasákavost stanovena nebyla. Po vysušení bylo veškeré kamenivo hmotnostně naváženo (na jednotlivé záměsi).

Umělé kamenivo

Pouze v případě umělého pórovitého kameniva (Rugen) došlo k odběru z kryté skládky, z velkoobjemových pytlů. Kamenivo v pytlích (typu Big Bag) bylo před vlastním odběrem důsledně proléváno vodou pro zajištění nasyceného stavu (za účelem zabránění následnému odebírání záměsově vody z betonu). Fyzikální a mechanické vlastnosti umělého kameniva Rugen (stejně šarže) experimentálně popsal Lyer (2018).

5.1.2.2 Pojivo – cement

Cement byl odebrán z betonárny, ze sila.

5.1.2.3 Voda

Požadované množství vody bylo dávkováno objemově pomocí odměrného válce. Jednalo se o pitnou vodu z vodovodního řádu.

5.1.2.4 Přísady a příměsi

Při vlastní výrobě čerstvého betonu byla využita superplastifikační přísada MasterGlenium Ace 446 (na bázi polykarboxylátetheru).

Při výrobě LWSCC byla použita dále stabilizační přísada (modifikující viskozitu) RheoMATRIX 100. Přísada je charakterizována jako vodní roztok syntetického kopolymeru.

Vápenec byl aplikován jemně mletý, třída V, druh 8 – Mokrý.

Další typy aplikovaných přísad v odebraných (doplňkových) betonech C30/37, C25/30 jsou uvedeny v Tab. 16–17.

5.1.2.5 Vlákna

Pro potřeby experimentálních prací byla využita vlákna různých druhů a hmotnostních dávek, viz Tab. 18.

Motivace výběru délky vláken vycházela z volby standardních rozměrů zkušebních těles podle normy (ČSN EN 12390-1, 2013) a s ohledem na požadavky minimální délky hrany tělesa dle (Stahlfaserbeton: Fassung, 2001).

Jmenovité a změřené skutečné rozměry veškerých zkušebních těles (ref; žih: měřeno před a po teplotním namáhání) jsou k dispozici v archivu autora (protokoly o zkouškách).

Další použitá vlákna jiných typů a výrobců (např. PPF 6/60 a DE 30/0,8N od spol. Krampe Harex CZ s.r.o.) jsou představeny v práci Suchánek et al. (2017a, 2016b). Ostatní druhy FRC s různými typy vláken – např. Suchánek et al. (2014b, 2015b, 2015e, 2013a, 2012a, 2012b).

5.1.2.6 Příprava forem

Byly využity silnostěnné plastové (případně ocelové) formy tvaru krychle (150 x 150 x 150 mm), ocelové formy tvaru hranolu (100 x 100 x 400 mm), silnostěnné plastové a ocelové formy tvaru válce ($d = 150$ mm, výška $2d = 300$ mm). Formy na cementová tělesa o rozměrech (40 x 40 x 160 mm) byly ocelové.

5.1.3 Odformování a ošetřování zkušebních těles

S ohledem na vyšší množství cementového tmelu SCC betonů bylo přistoupeno k ošetřování neprodleně po zpracování čerstvého SCC (po naplnění forem a urovnání hladítkem – v případě FRSCC, FRC, LWSCC) pomocí překrytí povrchu parotěsně uzavřenou fólií (s difuzním odporem). Tímto způsobem byla udržována vlhkost povrchu na úrovni vlhkosti vzduchu (cca 98 % – „vodní mlha“).

K odformování a značení těles (a rovněž čištění forem) docházelo obvykle cca 24 hodin po betonáži. Ve výjimečném případě nejpozději 48 hodin po betonáži. **Ošetřování** probíhalo podle požadavku normy (ČSN EN 12390-2, 2009). Obratem po odformování byla tělesa umístěna do klimatizované místnosti o teplotě $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a relativní vlhkosti $\geq 95\%$ podle (ČSN EN 12390-2, 2009). Ošetřování těles ve vodě nebylo uplatněno. Poznámka: (Model Code 2010, 2012) předepisuje relativní vlhkost $\geq 98\%$.

Cementová tělesa byla po odformování (po 24 hodinách) vystavena stejnému způsobu ošetřování, jako betonová tělesa – v klimatizované místnosti o teplotě $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a relativní vlhkosti $\geq 95\%$ podle (ČSN EN 12390-2, 2009). Zde je rozpor s normou (ČSN EN 196-1, 2005), která předepisuje uložení ve vodě.



Obrázek 24 Odběr kameniva, následovalo sušení



Obrázek 25 Příprava, vážení vstupních surovin



Obrázek 26 Míchání čerstvého SCC



Obrázek 27 Zpracování čerstvého SCC betonu

5.2 Výroba betonu – vyhodnocení

Výroba čerstvého betonu probíhala vždy strojně. V převážné míře, při výrobě největšího souboru zkušebních těles, autor využíval laboratorní míchačku s nuceným oběhem HMB-75 (Brio spol. s.r.o., Hranice). V některých případech došlo k odběru čerstvého betonu z betonárny, obvykle z betonárny M – Silnice, a.s. v Novém Bydžově, viz symbol „Betonárna“. V případě doplňkových druhů betonu autor provedl odběr i z jiných betonáren, viz konkrétní společnost v Tab. 12 (doplňkové druhy betonu).

Prohlášení o shodách, certifikáty výrobků, (případně bezpečnostní listy, hodnocení kvality) jsou v archivu autora.

Technologie výroby čerstvého SCC betonu

Technologie výroby betonu: v zásadě šlo o prvotní obalení zrn kameniva (a příměsí) cementem. Tj. míchání „tužší směsi“, následovalo přidání vody. V konečné fázi byla dávkována superplastifikační přísada (rozmíchaná v části záměsové vody).

Osvědčil se následující postup dávkování jednotlivých složek:

- hrubé kamenivo (8/16, 4/8) + písek (0/4), poznámka: omočeno záměsovou vodou,
- příměs (vápeneč),
- cement,
- voda (cca 2/3 dávky),
- (vlákna),
- superplastifikační přísada (rozmíchaná cca v 1/3 dávce vody).

Vlákna byla přimíchávána do „tužší směsi“. Dávkování probíhalo postupným oddělováním vláken mezi prsty – s ohledem na dosažení požadované jakosti (rovnoměrného rozptýlení vláken). Tímto procesem bylo dosaženo rovnoměrného dávkování vláken do míchačky (kontrola byla provedena vizuální kontrolou na zlomcích hranolů po provedených pevnostních zkouškách v tahu ohybem).

FRC / FRSCC: v případě dávkování vláken do laboratorní míchačky (i v případě velkokapacitní míchačky v betonárně: kapacita 1/3 m³) byla prodloužena doba míchání čerstvého betonu.

Při odběru čerstvého betonu do zednických koleček (plněno z badie), docházelo k ručnímu vážení čerstvého betonu (v plastových přepravkách na váhách Radwag – 25 kg) a k následnému hmotnostnímu dávkování vláken (25_2016, 25_2017, 50_2016, Syn2_30/37/13, 25_30/37/14). Pouze v případě betonu 40_30/37/13 došlo k dávkování ocelových drátků přímo do velkoobjemové míchačky v betonárně.

Etapizace výroby betonu

Se zřetelem na časovou náročnost přípravy vstupních surovin (odběr, sušení veškerého přírodního kameniva, vážení) a provádění navazující experimentální činnosti byly betonářské práce rozděleny do etapizace prací. Termín výroby – viz sloupec „Vyrobeno“ v Tab. 10–13.

5.2.1 Vliv použitých forem

Všechna zkušební tělesa byla zhotovena běžných tvarů a standardních rozměrů dle reálných zvyklostí (ČSN EN 12390-1, 2013), i přestože jsou tyto rozměry v rozporu s požadavky norem pro zkoušení požární odolnosti nosných prvků (viz kap. 1.10.1 Rozměry zkušebních vzorků). Důvodem byla snaha dosažení obecných mechanických vlastností vybraných speciálních betonů. Volba rozměru hranolů (100 x 100 x 400 mm), pro ohybové zkoušky, vychází z normy (ČSN EN 12390-1, 2013). Autor zvolil tento rozměr i po vzniku normy „Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu“ (ČSN P 73 2452, 2015), která

doporučuje odlišné rozměry. Motivací bylo využití stejné metodiky na všech zkušebních hranolech.

Byly využity ocelové a silnostěnné plastové formy. S ohledem na tuto skutečnost, autor nestanovil rovinnost a kolmost těles.

Tato charakteristika by nebyla splněna v případě zhotovených válcových těles – pro stanovení válcové pevnosti v tlaku, viz beton 25/2017_{ref}, tělesa označená (1_Tlak–7_Tlak). Tento atribut byl způsoben použitím „vypouklých“ – tenkostěnných – forem. I přes snahu zapůjčení dostatečného množství forem tvaru válce z různých laboratoří se autorovi nepodařilo získat pro plánovaný termín výroby (27. 6. 2017) dostatečný počet silnostěnných či kalibrovaných válcových forem (získáno 20 forem).

5.2.2 Zhodnocení výroby zkušebních těles TVB

Čerstvé betony pro zhotovení zkušebních těles C25/30 a C30/37 byly odebrány z betonárny, více kap. (5.1.1 Motivace volby druhu betonu a počtu zkušebních těles) > (Motivace volby doplňkových druhů betonů).

Výroba zkušebních těles z obyčejného betonu (C30/37, C25/30) probíhala v souladu s normou (ČSN EN 12390-2, 2009). Čerstvý beton byl plněn v několika vrstvách – v závislosti na tvaru tělesa.

C30/37: odběr čerstvého betonu v betonárně. Zhutňování se provádělo na vibračním stole. Ocelové formy byly uchyceny magnetem, plastové byly ručně přitlačovány.

C25/30: odběr čerstvého betonu na stavbě. Zhutňování bylo provedeno vpichy propichovací tyčí, poklepem formy (ruční zhutňování).

Beton (FRC_C25/30_2015) je uveden v této práci jako doplňkový zástupce, při jehož výrobě se autor podílel. Jedná o jediného zástupce, kdy byla vlákna dávkována dodatečně, (pře-mícháním) v laboratorní míchačce, více Jirovský (2015).

5.2.3 Zhodnocení výroby SCC, PFRSCC, SFRSCC, LWSCC

Zpracování čerstvého SCC betonu (SCC45/55_2013, SCC45/55_2015, SCC45/55_2016, SCC45/55_2017, SCC30/37/14, LWSCC) včetně SCC doplněného fibrilovanými vlákny (TEXZEM PPF 370) – PFRSCC (2PP_2013, 4PP_2013), SFRSCC (25_2013, 25_2015, 25_2016, 25_2017, 50_2013, 25_30/37/14) a LWSCC probíhalo v souladu s normou (ČSN EN 12390-2, 2009). Charakter čerstvého SCC lze očekávat i u betonu (50_2016, 40_30/37/13). S ohledem na dobu zpracovatelnosti dle (TKP 18, 2016) nebylo technicky možné stanovit veškeré dostupné charakteristiky čerstvého betonu.

Čerstvý SCC byl plněn do forem najednou, nechal se volně roztékat, dokud nedosáhl vodorovné hladiny. Se zřetelem na reologické vlastnosti SCC bylo hutnění vyloučeno. Povrch byl následně urovnán ocelovým hladítkem – v případě FRSCC, FRC, LWSCC.

K segregaci kameniva směrem k povrchu nedošlo. LWSCC: lze konstatovat, že negativní efekt segregace kameniva nenastal, neboť byla vhodně zvolena objemová hmotnost použitého umělého kameniva Rugen (4/8, 8/16, obě frakce: 1 650 kg.m⁻³). Stabilizační přísada byla použita pouze v případě LWSCC, viz Tab. 14–15 (receptura LWSCC).

5.2.4 Zhodnocení výroby SFRC, PFRC

Při zpracování čerstvého SFRC (75_2013) bylo přistoupeno k mechanickému hutnění, neboť viskozita byla ovlivněna přidáním ocelovými drátky (zjištěna nízká hodnota sednutí-rozlitím). Čerstvý beton s přimíchanými syntetickými makrovlákný (PFRC: Syn2_2013, Syn4_2013, Syn2_30/37/13), vykazoval nápadně zvýšenou viskozitu, viz Tab. 20. V návaznosti na tuto skutečnost bylo přistoupeno k plnění čerstvého betonu (75_2013, Syn2_2013, Syn4_2013, Syn2_30/37/13 a C2–první záměs) do forem v menších vrstvách za stálé **vibrace na vibračním stole, dokud nepřestalo vytlačování zadrženého vzduchu.**

5.2.5 Zhodnocení výroby PFRC (C2_2013)

Autorův počín vyrobít samozhutnitelný beton doplněný „carbonovými všesměrně rozptýlenými vlákny“ byl doprovázen mnoha obtížemi. Toho času nepůsobí (v podmínkách ČR) žádný dodavatel uhlíkových (krátkých) mikro-vláken do betonových konstrukcí. Patrně je to způsobeno vysokou finanční náročností tohoto materiálu. Ve snaze zhotovit tento příznačný FRC bylo přistoupeno k řadě vícepracím. Tkanina byla upravena (ručním stříháním) do podoby mikro-vláken požadované délky a následně docházelo k hnětení mezi prsty – k oddělení na jednotlivé „pramence vláken“.

Při vlastní výrobě betonu C2_2013 došlo k prodloužené době míchání. Ve snaze zamezení shluků vláken nebylo fyzicky možné dostatečně rychle oddělovat vlákna mezi prsty (i při dávkování vláken dvěma osobami). V době přidání superplastifikační přísady docházelo stále k dávkování vláken, které bylo prodlouženo až do konce míchacího procesu. S ohledem na prodlouženou dobu míchání došlo k nepříznivému jevu. V míchačce (s nuceným oběhem) vznikly „hrudky“ (shluky) z nepromíchaných částí jednotlivých složek. Autor proto přistoupil, při zpracování této (první) záměsi, k hutnění na vibračním stole.

Na základě tohoto poznatku bylo ve druhé záměsi – výrazně – urychleno dávkování vláken (na základě technické pomoci třetí osoby). Druhá záměs C2_2013 potom vykazovala konzistenci SCC, viz Tab. 19–21.

Kromě použití tohoto typu karbonové tkaniny / vláken / se autor dále podílel (při související experimentální činnosti) na výrobě betonu s aplikací čedičové sítě Alligard a čedičové kompozitní kari sítě Rockmesh, více Fadrhons (2018).

5.2.6 Zhodnocení výroby „souvisejících“ speciálních betonů

Na základě navazujících laboratorních činností lze konstatovat, že je možné zhotovit drátkobeton přimícháním vláken do odebraného čerstvého betonu i ve spádové míchačce, více Suchánek et al. (2015b, 2015e), anebo vyrobit specifický HSC ve spádové míchačce (Suchánek et al. 2015a). Technologie výroby HSC betonu popsal (Radouš, 2014), analýzu ultra-vysokopevnostního betonu (Radouš, 2016).

Autor se přímo podílel na návrhu receptury „vodonepropustného drátkobetonu“ zohledňující požadavky rakouské směrnice (ÖVBB - Richtlinie Innenschalenbeton, 2012). Laboratorní činnost byla podnícena na základě nově vydaného dokumentu (TP ČBS 04, 2015). Zhotovená zkušební tělesa byla rovněž vystavena teplotnímu zatěžování. Autor současně provedl stanovení maximální hloubky průniku chloridu sodného (po 150 cyklech, Metoda C podle (ČSN 73 1326, 1984)) pomocí aplikace dusičnanu stříbrného $c(\text{AgNO}_3) = 0,1 \text{ mol/l}$ – více Suchánek et al. (2017a, 2016b). Vlastní návrh receptury a výrobu betonu popsal (Slováček, 2016).

Dlouhodobé sledování trvanlivostních vlastností betonů (s použitím různých druhů příměsí v odlišných hmotnostních dávkách) je popsáno v příspěvku Suchánek et al. (2016a), ve kterém je stanoven typický trend odlupování betonu. Autor provedl zatěžování 475 cykly podle normy (ČSN 73 1326, 1984), Metody C. Jednotlivé druhy příměsí a vlastní výrobu betonu popsala Hájková (2015).

Experimentální analýza provzdušněných vláknobetonů byla představena v příspěvku (Suchánek et al., 2014b). Popis výroby zkušebních těles uvádí Slováček (2014).

5.2.7 Zhodnocení výroby „cementových těles“

Výroba těles s rozměry (40 x 40 x 160 mm) – **Malé_25_2015, Malé_25_2016** nebyla provedena v souladu s normou (ČSN EN 196-1, 2005). Jednalo se o experimentální činnost. Motivací bylo zhotovit malá tělesa připomínající cementová tělesa (ČSN EN 196-1, 2005), která budou obsahovat „identický cementový tmel“ včetně stejné dávky superplastifikační přísady, identické plnivo jako referenční betonová tělesa. D_{max} však bude 5 mm. Tato tělesa vznikla výrobou / odběrem čerstvého SFRSCC a následným proséváním přes síto se čtvercovými otvory o velikosti 5 mm. Použité síto je popsáno v normě (ČSN EN 12350-11,

2010). Proséváním čerstvého betonu došlo k odseparování zrn kameniva > 5 mm a rovněž drátků. Plnění do forem připomínalo plnění čerstvého SCC.

Výroba cementových těles – **CEM** – probíhala v maximálně možné míře podle normy (ČSN EN 196-1, 2005). Z technických důvodů nebyla využita doporučená míchačka. Autor využil míchací metlu uchycenou ve vrtačce. Další odchylka byla v použitém referenčním písku CEN. S ohledem na absenci požadovaných sít byl písek (splňující požadavky normalizovaného písku CEN) připraven ve spolupráci s Ing. Pavlem Reitermanem, Ph.D. (České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Experimentální centrum). Byl odebrán písek Střeleč. Popis granulometrie je k dispozici v archivu autora.

Doporučené stěrky (a stírací pravítko) byly nahrazeny zednickou lžící a ocelovým hladítkem. Motivací výroby cementových těles bylo zohlednění normy (ČSN EN 196-1, 2005) a aplikovat cement, který byl využit v klíčových i doplňkových druzích betonu (kromě C25/30, FRC_C25/30_2015 a AAM).

5.3 Zkoušení čerstvého betonu

Zkoušení čerstvého betonu probíhalo dle doporučení evropských norem. S ohledem na technické možnosti bylo v některých případech přistoupeno k několika rekompencacím, případně vynechání zkoušky, více kap. (5.4 Zkoušení čerstvého betonu – vyhodnocení získaných výsledků) > (Odchylky od normových zkušebních postupů).

5.4 Zkoušení čerstvého betonu – vyhodnocení získaných výsledků

Se zřetelem na dobu zpracovatelnosti, viz (TKP 18, 2016), byl navržen zkušební plán pro zkoušení čerstvého betonu. Návrh vycházel rovněž z technických možností v době provádění zkoušek.

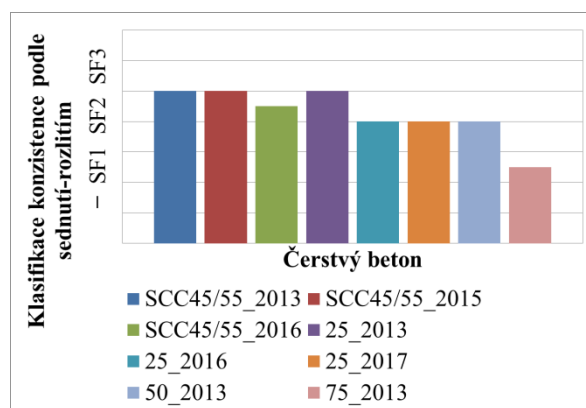
Ve všech případech zkoušení čerstvého betonu byla snaha stanovit jednotlivé charakteristiky ve stejném pořadí a srovnatelné době po namíchání / odběru čerstvého betonu. **Postup zkoušení byl následující:** stanovení konzistence (viskozity) / schopnosti průtoku; objemové hmotnosti (využita 8l válcová nádoba z typického tlakoměrného přístroje) a obsahu vzduchu. V případě zkoušení segregace čerstvého SCC docházelo nejprve k odběru vzorku čerstvého betonu ještě před zkoušením konzistence / viskozity. Vzorek se nechal stát požadovaných 15 minut. Vlévání betonu do síta bylo prováděno v konečné fázi zkoušení čerstvého SCC.

Potvrdil se předpoklad **nakypření kameniva** přidanými drátky, viz Tab. 19–21, typický trend je znázorněn na Obr. 28–29.

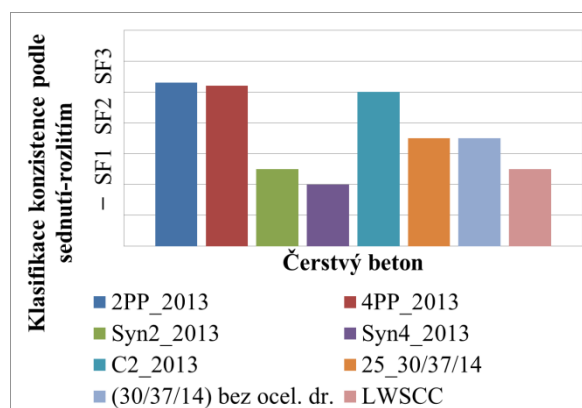
Předpokládanou klasifikaci konzistence podle sednutí-rozlítím ve stupni SF2 vykazovaly čerstvé SCC betony (SCC45/55_2013, SCC45/55_2015, SCC45/55_2016 – zpracovatelnost SF2). V případě přimíchání ocelových drátků v dávce 25 kg/m³ (do odlišné záměsi) byly stanovené hodnoty sednutí-rozlítím nepatrně nižší (v některých případech i srovnatelné s čerstvým SCC). Při dávce drátků 50 kg/m³ již došlo ke značnému poklesu průměrné hodnoty roztečeného betonu. Při dávce 75 kg/m³ (75_2013) došlo ke stanovení klasifikace SF1 (opět zkoušena jiná záměs), více Tab. 19–21.

Velkop průměrová makrovlákna způsobila zvýšení viskozity již při dávce 2 kg/m³ (Syn2_2013). V případě čerstvého betonu Syn4_2013 došlo k výraznému nakypření, které způsobilo zamítnutí zkoušky viskozity (ČSN EN 12350-8, 2010). Byla proto provedena zkouška konzistence dle (ČSN EN 12350-2, 2009), (klasifikace S4). Tato skutečnost je připisována aplikované délce syntetických makrovláken (vlákna mají největší délku: 55 mm). Vliv na roztečení má **nejenom hmotnostní zastoupení, ale i tvar a délka** (tvarový součinitel) použitých vláken.

Carbonová vlákna (C2_2013) vykazovala charakteristiku čerstvého SCC pouze u druhé záměsi. Příčina odlišného chování první záměsi od druhé je popsána v kapitole (5.2.5 Zhodnocení výroby PFRC (C2_2013)).



Obrázek 28 Typický trend klasifikace konzistence podle sednutí-rozlítím (SCC, SFRSCC / SFRC)



Obrázek 29 Typický trend klasifikace konzistence podle sednutí-rozlítím (PFRC, LWSCC)

Vyšší hodnota obsahu vzduchu (2 %) u betonu 25_2016 je přisuzována přimíchaným ocelovým drátkům.

Překvapivě vysoká hodnota obsahu vzduchu byla naměřena v čerstvém betonu SCC30/37/14 – 2,4 % (i přes absenci vláken). Autor očekával hodnotu obsahu vzduchu kolem 1,2 %. Zvýšení obsahu vzduchu po přidání ocelových vláken se potvrdilo i při souvisejících laboratorních činnostech, např. Suchánek et al. (2015e).

Odchyłky od normových zkušebních postupů

S ohledem na technické možnosti, zkouška obsahu vzduchu LWSCC nebyla provedena. Doporučený postup je standardizován podle (ASTM C 173; ASTM C 23).

Podkladní deska, podle požadavku (ČSN EN 12350-8, 2010), byla (v úvodní části zkoušení) nahrazena nenasákavým povrchem čisté pochozí podlahy v laboratoři.

K doporučenému zkoušení konzistence čerstvého vláknobetonu podle (ČSN EN 12350-5, 2009; ČSN EN 12350-4, 2009) nebylo přistoupeno, neboť v době testování čerstvého SFRC / PFRC (75_2013, Syn2_2013, Syn4_2013, C2_2013, Syn2_30/37/13) nebyla v platnosti norma (ČSN P 73 2451, 2015), která doporučuje aplikaci dle (ČSN EN 12350-5, 2009; ČSN EN 12350-4, 2009).

Plnění „Abramsova komolého kužele“ čerstvým TVB (C30/37, C25/30) a betonem nevykazujícím charakter SCC (PFRC: Syn2_2013, Syn4_2013, Syn2_30/37/13) a C2 – pouze první záměs) probíhalo ve třech vrstvách, každá vrstva byla zhutňována propichovací tyčí. Lze očekávat, že v případě PFRC mohlo dojít k usměrnění vláken. Při zpracování tohoto čerstvého betonu bylo proto přistoupeno k hutnění forem na vibračním stole, více kap. (5.2.4 Zhodnocení výroby SFRC, PFRC).

Tabulka 19 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – **klíčový beton**

Označení čerstvého betonu	Stanovení konzistence		Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Počet zhotovených těles	Úprava těles řezem
			ČSN EN 12350-6, 2009	ČSN EN 12350-7, 2009		
SCC45/55_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (740, 720 mm), SF2 (730, 740 mm)		2400, 2400	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
SCC45/55_2015	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (730, 730), VS1 (2,0)		N/A		8 krychlí	ne
SCC45/55_2016	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (710, 710)	ČSN EN 12350-12, 2010 Úzkomezerový: PJ Nevhodné (25), SF2 (730, 730)	2350	0,7	10 krychlí, 2 válce, 6 hranolů	ne
	ČSN EN 12350-11, 2010 SR2					
SCC45/55_2017	N/A		2370	1,0	6 krychlí, 6 válců, 3 hranoly	ne
25_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (740, 730)	ČSN EN 12350-8, 2010 VS1 (1,0)	2400, 2370	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
25_2015	ČSN EN 12350-12, 2010 Úzkomezerový: PJ Nevhodné (46), SF1 (660, 620)	ČSN EN 12350-11, 2010 SR2	2380	1,3	8 krychlí, 2 válce, 10 hranolů, 3 malé krychle (a=100 mm)	ano
	T=24°C					
25_2016	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (680, 670)	ČSN EN 12350-12, 2010 Úzkomezerový: PJ Nevhodné (49), SF2 (610, 650)	2330	2,0	18 krychlí, 4 válce, 9 hranolů	ano
	ČSN EN 12350-11, 2010 SR2					

Tabulka 20 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – **klíčový beton**, pokračování

Označení čerstvého betonu	Stanovení konzistence		Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Počet zhotovených těles	Úprava těles řezem
			ČSN EN 12350-6, 2009	ČSN EN 12350-7, 2009		
25_2017	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (660, 680), VS1 (2,0)	ČSN EN 12350-11, 2010 SR2	2370	1,2	10 krychlí, 20 válců, 3 hranolů	ne
50_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (680, 660)		2440, 2390	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
50_2016	N/A (s ohledem na zpracovatelnost byl zkoušen pouze 25_2016)				6 krychlí, 2 válce, 5 hranolů	ne
75_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF1 (580, 560)	ČSN EN 12350-2, 2009 S5 (220, 220)	2440	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
2PP_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (750, 750)	ČSN EN 12350-2, 2009, pozn.: neuhnutěno S5 (245, 250)	2400, 2410	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
4PP_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (740, 750)	ČSN EN 12350-2, 2009, pozn.: neuhnutěno S5 (215, 220)	2400, 2400	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
Syn2_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF1 (580, 590)		2440	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
Syn4_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 Nevhodné	ČSN EN 12350-2, 2009 S4 (180, 190)	2420	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
C2_2013	ČSN EN 12350-8, 2010 SF2 (720, 720) Poznámka: pouze druhá záměs		2410	N/A	7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano

Tabulka 21 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – **klíčový beton**, pokračování

Označení čerstvého betonu	Stanovení konzistence		Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Počet zhotovených těles	Úprava těles řezem
			ČSN EN 12350-6, 2009	ČSN EN 12350-7, 2009		
SCC30/37/14	ČSN EN 12350-12, 2010 Úzkomezerový: PJ Nevhodné (32), SF Nevhodné (510, 500), t ₅₀₀ =4,9	ČSN EN 12350-12, 2010 Širokomezerový: PJ Nevhodné, SF Nevhodné (520, 510), t ₅₀₀ =4,3	2330	2,4	6 krychlí, 2 válce, 7 hranolů	ano
Syn2_30/37/13	N/A				7 krychlí, 2 válce, 7 hranolů, 3 malé krychle (a=100 mm)	ano
40_30/37/13	N/A				7 krychlí, 2 válce, 8 hranolů	ano
25_30/37/14	ČSN EN 12350-8, 2010 SF1 (650, 640), VS1 (2,0)	ČSN EN 12350-11, 2010 SR2	2330	1,8	10 krychlí, 3 válce, 7 hranolů	ano
	ČSN EN 12350-12, 2010 Úzkomezerový: PJ Nevhodné (21), SF1 (650, 600), t ₅₀₀ =2,3	ČSN EN 12350-12, 2010 Širokomezerový: PJ Nevhodné (18), SF1 (600, 610), t ₅₀₀ =2,0				
T=23°C						
(30/37/14) před přidáním ocel. drátků („25_30/37/14“)	ČSN EN 12350-8, 2010 SF1 (630, 620), VS1 (2,0)	ČSN EN 12350-11, 2010 SR2	2290	1,8		
	ČSN EN 12350-12, 2010 Úzkomezerový: PJ Nevhodné (15), SF1 (570, 550), t ₅₀₀ =2,3	ČSN EN 12350-12, 2010 Širokomezerový: PJ Nevhodné (12), SF1 (570, 560), t ₅₀₀ =2,3				
LWSCC	ČSN EN 12350-8, 2010 SF1 (550, 550)		1840, 1830	N/A	13 krychlí, 12 hranolů	ano

Tabulka 22 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace na viskozitu, schopnost průtoku, odolnost proti segregaci, počet zhotovených těles – **doplňkový beton**

Označení čerstvého betonu	Stanovení konzistence		Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Počet zhotovených těles	Úprava těles řezem
			ČSN EN 12350-6, 2009	ČSN EN 12350-7, 2009		
C30/37	ČSN EN 12350-2, 2009 S3 (135 mm)		2380	N/A	7 krychlí, 3 válce	ne
C25/30	ČSN EN 12350-2, 2009 S3 (135 mm), (130 mm)		2190	N/A	9 hranolů	ano
FRC_C25/30_2015	viz Jirovský (2015)				žih: 9 krychlí, 3 hranoly, 3 malé krychle (a=100 mm), Modul pružnosti: 6 válců	ano
AAM	ČSN EN 12350-5, 2009 F4 (500)		N/A		Odebrána zhotovená tělesa: 7 krychlí, 7 hranolů, 3 malé krychle (a=100 mm)	ano
HSC_I_2014	viz Radouš (2014)				žih: 10 malých krychlí (a=100 mm), Modul pružnosti: 2 válce	ano
HSC_II_2014						ano
HSC_III_2014						ano

Tabulka 23 Vlastnosti čerstvého betonu, klasifikace, počet zhotovených těles – „cementová tělesa“

Označení čerstvého betonu	Stanovení konzistence		Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Počet zhotovených těles	Úprava těles řezem
			ČSN EN 12350-6, 2009	ČSN EN 12350-7, 2009		
Malé_25_2015	viz zkoušení čerstvého betonu SCC45/55_2015				18 malých hranolů (40x40x160)	ne
Malé_25_2016	viz zkoušení čerstvého betonu SCC45/55_2016				18 malých hranolů (40x40x160)	ne
CEM	Není předepsáno, viz (ČSN EN 196-1, 2005)				15 malých hranolů (40x40x160)	ne

5.5 Zkoušení ztvrdlého betonu (souhrnně)

Veškeré stanovení pevnostních charakteristik autor prováděl na kalibrovaném zkušebním lisu v laboratoři M.I.S. a.s. Přetvárné charakteristiky byly stanoveny na zkušebním lisu ve VVCD. Více – úvodní část kap. (5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VČETNĚ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ).

Tělesa ref: Pevnostní vlastnosti byly stanoveny ve stáří 28 dní na referenčních, tepelně nezatěžovaných tělesech.

Tělesa žih: Zbývající tělesa (teplotně zatěžovaná) byla převezena kvůli teplotnímu namáhání do Pardubic, následně probíhal převoz zpět do laboratoře M.I.S. a.s. – s ohledem na provedení reziduálních pevnostních charakteristik na teplotně zatěžovaných tělesech (žih).

Zkušební protokoly (skutečně změřené rozměry, pevnosti stanovené ze skutečných / jmenovitých rozměrů) jednotlivých zkušebních těles jsou v archivu autora.

5.5.1 Skutečné rozměry zkušebních těles

Skutečné rozměry teplotně namáhaných těles dosahují – sporadicky – hodnot, které jsou mimo dovolené odchylky jmenovitých velikostí uvedených v normě (ČSN EN 12390-1, 2013). Měření skutečných rozměrů bylo prováděno posuvným měřidlem (délky 500 mm) s noniem. S ohledem na provádění tepelných účinků zatěžovaných těles (rozpínání těles), nebylo přistoupeno k úpravě zkušebních těles podle Přílohy A normy (ČSN EN 12390-3, 2009). Rozměry s odchylkami mimo tolerance jsou barevně zvýrazněny v protokolech autora (v archivu). U rozměrů s odchylkami mimo tolerance, s délkou hrany ($a = 100$ mm), bylo přistoupeno k doplňkovému měření rozměrů zkušebních těles podle Přílohy B normy (ČSN EN 12390-3, 2009).

5.5.2 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Stanovení objemové hmotnosti bylo vždy prováděno změřením ze skutečných (i kontrolovaných jmenovitých) rozměrů (ČSN EN 12390-7, 2009). Tělesa byla vážena s přirozenou vlhkostí (hmotnost m_T) na váhách Radwag (25 kg). Objemová hmotnost byla prováděna na tělesech ref a žih (žih: stanoveno před i po vlastním teplotním zatěžování). Protokoly jsou v archivu autora.

5.5.3 Úprava těles řezem

I přestože norma (ČSN EN 12390-3: Změna Z1, 2012) doporučuje převodní součinitele pro tělesa tvaru krychle na krychle základního rozměru, autor přistoupil k experimentálnímu stanovení převodních součinitelů na zhotovených zkušebních tělesech,

prováděl úpravu těles řezem na pile s diamantovým kotoučem (řezání pod vodou). Jednalo o úpravu hranolů (100 x 100 x 400 mm) řezem na krychle s délkou hrany 100 mm. Poznámka: experimentálně stanovené přepočtové koeficienty speciálních betonů byly v rozporu s doporučenými hodnotami v evropské normě. Odchylka od doporučených hodnot byla maximálně 10 %.

Na základě požadavku vysokého počtu zkušebních těles bylo přistoupeno k využití zlomků hranolů (po provedené zkoušce pevnosti v tahu ohybem) pro experimentální zkoušku teplotního lokálního (bodového) namáhání. Po vystavení (zlomku) teplotnímu bodovému namáhání, došlo k úpravě řezem na krychle ($a = 100$ mm), více kap. (5.15 Vystavení teplotnímu lokálnímu (bodovému) namáhání).



Obrázek 30 Úprava těles řezem na pile s diamantovým kotoučem, řezání pod vodou



Obrázek 31 Krychle (upravené řezem) pro stanovení převodního součinitele

5.6 Stanovení pevnostních charakteristik

5.6.1 Stanovení pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku byla realizována podle normy (ČSN EN 12390-3, 2009).

Typický způsob zatěžování:

Lis ED400 (rozsah IV (< 2000 kN), rychlost zatěžování $1,4 \text{ f.s}^{-1}$).

Nevyhovující způsob porušení na zkušebních tělesech (ref) nenastal.

5.6.2 Stanovení pevnosti v tahu ohybem

S ohledem na dobu vzniku normy (ČSN P 73 2452, 2015) byla zkouška pevnosti v tahu ohybem realizována podle normy (ČSN EN 12390-5, 2009) – pro veškeré druhy betonů (včetně SFRSCC / SFRC).

Poznámka: normové zakotvení vláknobetonů v USA – viz (ACI 544, 2002). Více kap. (1.19.4.3 Normativní zakotvení / předpisy SFRC v ČR a v zahraničí).

Typický způsob zatěžování:

Lis EU40, zatěžování jedním břemenem uprostřed (rozsah II (< 40 kN), rychlost zatěžování $0,6 \text{ f.s}^{-1}$).

Výpočet rychlosti zatěžování dle Přílohy A (ČSN EN 12390-5, 2009):

$$R = \frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2 \cdot s}{3 \cdot l} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 100^2 \cdot 0,05}{3 \cdot 300} = 111, \bar{1} \text{ N/s} \quad (18)$$

kde:

R ... rychlost zatěžování [N/s]

s ... přírůstek napětí [$\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$]

d_1, d_2 ... rozměry příčného řezu tělesa [mm]

l ... vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]



Obrázek 32 Zkušební lis ED400 (4000 kN)



Obrázek 33 Zkušební lis EU40 (400 kN)

5.6.3 Stanovení pevnostních charakteristik na „cementových tělesech“

Pevnosti byly stanoveny podle (ČSN EN 196-1, 2005).

Typický způsob zatěžování: pevnost v tlaku

Lis ED400 (rozsah I (< 200 kN), rychlost zatěžování $2,5 \text{ f.s}^{-1}$).

Byl využit přípravek pro stanovení pevnosti v tlaku, viz (ČSN EN 196-1, 2005).

Typický způsob zatěžování: pevnost v tahu ohybem

Lis EU40 (rozsah I (< 20 kN), rychlost zatěžování $0,5 \text{ f.s}^{-1}$).

Uspořádání zkoušky bylo podle (ČSN EN 196-1, 2005) – zatěžování jedním břemenem uprostřed.



Obrázek 34 Stanovení pevnosti v tahu ohybem (cementová tělesa)



Obrázek 35 Stanovení pevnosti v tlaku (cementová tělesa)

5.7 Stanovení pevnostních charakteristik – vyhodnocení získaných výsledků

Vyhodnocení pevnostních charakteristik na (ref) i (žih) tělesech je představeno v Tab. 27–30. Představené hodnoty jsou vyjádřeny aritmetickým průměrem ze třech měření, pokud není uvedeno jinak.

U tepelně namáhaných vzorků (žih), zatížených na maximální teplotu 1049 °C, bylo nutno přistoupit k úpravě rozsahu a rychlosti zatěžování v porovnání s údaji v kap. (5.6 Stanovení pevnostních charakteristik). Nastavené způsoby zatěžování jednotlivých těles jsou uvedeny ve zkušebních protokolech, v archivu autora.

V případě naměřených nejnižších hodnot sil při poruše (tělesa (žih): zatíženo na max. 1049 °C), bylo často komplikované stanovit reziduální pevnostní vlastnosti. Předpokládá se, že při naměřených hodnotách do 10 % rozsahu bude chyba měření větší než 1 %.

Porovnání dosažených pevnostních vlastností – (ref) tělesa

Aplikace stejných receptur zhotovených srovnatelným technologickým postupem

Betony **SFRSCC (25_2013ref, 25_2015ref)** byly míchány v míchačce s nuceným oběhem. Byla využita stejná receptura, avšak výroba betonu byla provedena v jiném časovém období. Průměrné referenční pevnosti v tlaku betonu 25_2013ref dosahují hodnoty 76,6 MPa, variační koeficient 4,2 %. Průměrné referenční pevnosti v tlaku betonu 25_2015ref dosahují hodnoty 77,0 MPa, variační koeficient 2,3 %.

Čerstvé betony **SFRSCC (25_2016ref, 25_2017ref)** byly odebrány z betonárny M-Silnice a.s. v Novém Bydžově. Byla aplikována stejná receptura. Betony byly míchány

ve velkokapacitní míchačce v betonárně. Dávkování vláken bylo provedeno stejným technologickým postupem. Průměrné referenční pevnosti v tlaku betonu 25_2016ref dosahují hodnoty 63,9 MPa, variační koeficient 2,8 %. Průměrné referenční pevnosti v tlaku betonu 25_2015ref dosahují hodnoty 64,2 MPa, variační koeficient 2,0 %.

Výroba betonů probíhala v jiném časovém období, z jiné šarže vstupních surovin, byly proto označeny za rozdílné „druhy“ betonů.

Poznámka: receptura betonu (25_2016ref, 25_2017ref) je mírně pozměněna v porovnání s recepturou (25_2013ref, 25_2015ref), více Tab. 14–15.

5.8 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, využití DIC

Ve snaze minimalizovat vliv vstupních proměnných veličin ovlivňujících dosaženou hodnotu modulu pružnosti vznikl počín zaznamenávat data digitálně na základě automatického řízení zkušebního lisu. S ohledem na autorovu snahu paralelně stanovit Poissonovův součinitel speciálních betonů (ref, žíh) pomocí korelace digitálního obrazu (3D DIC), byla zkouška statického modulu pružnosti v tlaku odložena. Tělesa byla kondicionována až do doby souběžného využití DIC a laboratorního zařízení ve VVCD. Stáří zkušebních těles je uvedeno v Tab. 25–26. Stanovené výsledky všech těles včetně podrobných údajů jsou uvedeny v příloze E.

V době výroby válcových zkušebních těles, v roce 2013, 2014, byla v platnosti norma (ČSN ISO 6784, 1993). Norma doporučovala stanovit pevnost v tlaku f_c na třech zkušebních tělesech (shodných velikostí a tvarem s tělesy určenými pro stanovení modulu pružnosti), anebo umožňovala přistoupit k odhadu pevnosti. Autor přistoupil k přepočtu krychelných pevností (stanovených na minimálně 3 tělesech) na válcové. Pro určení modulu pružnosti bylo zhotoveno jedno těleso (ref) a jedno těleso (žíh).

Při výrobě válců v roce 2017 byla vyrobena 3 tělesa pro pevnost v tlaku, 3–4 tělesa pro modul pružnosti – se zřetelem na doporučení (ČSN EN 12390-13, 2014; ČSN ISO 1920-10, 2016): doporučený počet vyrobených těles: „3+2“; počet odebraných těles z konstrukce: „3+3“. Jednotlivá zkušební tělesa jsou uvedena v příloze E.

Experimentální součinnost se společností Sobriety s.r.o. (využití DIC, jmenovitě Ing. Tomáš Bednarz, Ing. Tomáš Svojanovský) bylo prováděno v době červenec–srpen 2016 (2D DIC). Navazující experimentální práce probíhaly v termínu červenec–srpen 2017 (3D DIC, stanovení Poissonova součinitele).

V době zahájení experimentální činnosti stanovení modulu pružnosti + DIC (červenec 2016) bylo přistoupeno k normovému určení sečnového modulu pružnosti v tlaku

podle platné evropské normy (ČSN EN 12390-13, 2014). Koncování bylo provedeno sirnou maltou dle (ČSN EN 12390-3, 2009). **Volba metodiky (ČSN EN 12390-13, 2014) byla zvolena ještě před vydáním technických pravidel ČBS 05 (2016).** Poznámka: zvolená metodika není referenční metodou pro možnost specifikace modulu pružnosti podle ČBS 05 (2016). S ohledem na jednotnost metodiky pro stanovení modulu pružnosti bylo přistoupeno ke zkoušení podle (ČSN EN 12390-13, 2014) i při navazujícím testování.

Paralelně byl uplatněn jednak (evropský) normový přístup (ČSN EN 12390-13, 2014), jednak korelace digitálního obrazu (2D DIC; 3D DIC – s využitím proměnlivé délky ve svislém směru).

Zkoušení statického modulu pružnosti v tlaku bylo prováděno na zkušebním lisu Controls (50-C56Z00) s řídicí jednotkou Advantest 9 ve VVCD.

Statický modul pružnosti v tlaku (počáteční, stabilizovaný)

- aplikovaná normová metodika: (ČSN EN 12390-13, 2014), **Metoda A.**
- předtížení $\sigma_p = 1,5 \text{ MPa}$,
- dolní zatěžovací napětí $\sigma_b = 5 \text{ MPa}$,
- horní zatěžovací napětí $\sigma_a =$ proměnlivé (více příloha E),
- počet mechanických snímačů deformací: 2 (levá / pravá),
- základna průtahoměru mechanických snímačů deformací = 150 mm,
- Modul pružnosti (počáteční, stabilizovaný) byl vyjádřen jako aritmetický průměr ze dvou měření deformací (levá / pravá) – viz sady těles v Tab. 25, podrobnější hodnoty jednotlivých zkušebních válců – viz příloha E.

2D DIC

- referenční (konstantní) délka ve svislém směru 130 mm (více Suchánek et al., 2017c),
- použitá kamera: BFLY125,
- použitý software MercuryRT 2.4.2.

3D DIC

- proměnlivá délka ve svislém směru: 130, 100 a (doplňkově) nenormově 260 mm,
- použité kamery: 2 x PointGrey BFLY-PGE-23S6M-C,
- použitý software MercuryRT 2.4.2.

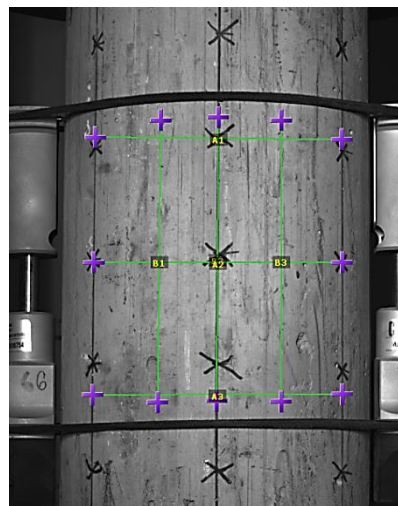
2D DIC, 3D DIC

- Modul pružnosti (počáteční, stabilizovaný) byl vyjádřen jako aritmetický průměr (viz Tab. 25, podrobnější hodnoty: příloha E) ze třech měření deformací (levá / střed / pravá) – viz Obr. 36.

Tělesa byla označena křížovými značkami (preventivní ochrana proti ztrátě sledování bodů) – viz Obr. 36, 37. Aplikovaný přepočít průmětu deformací ve vodorovném směru je zobrazen na Obr. 36.



Obrázek 36 Označení tělesa křížovými značkami, Suchánek et al. (2017d)



Obrázek 37 Kamerový pohled DIC (130 mm), Suchánek et al. (2017d)



Obrázek 38 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 2D DIC, Suchánek et al. (2017c)



Obrázek 39 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 3D DIC

5.9 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku, využití DIC – vyhodnocení získaných výsledků

5.9.1 Zhodnocení statického modulu pružnosti v tlaku

Potvrdil se předpoklad vyššího stabilizovaného sečnového modulu pružnosti v tlaku oproti modulu počátečnímu – se zřetelem na metodiku zkoušení podle Metody A (ČSN EN 12390-13, 2014). Stanovené hodnoty na sadách zkušebních těles jsou uvedeny zjednodušeně v Tab 25. Podrobnější vytyčené hodnoty na všech zkušebních tělesech doplňuje příloha E.

Některá tělesa (pouze (ref)) byla publikována v příspěvcích (Suchánek et al., 2017c; 2017d; 2018a).

Obrázky 44–47 znázorňují počáteční a stabilizované sečnové moduly pružnosti v tlaku. Hodnoty představují aritmetické průměry stanovené minimálně na 2–4 tělesech. Poznámka k určení hodnot; normový způsob: levá / pravá. DIC: levá / střed / pravá. Základna průtahoměru mechanických snímačů je ve všech případech 150 mm, v případě DIC jsou zobrazeny hodnoty modulu pružnosti pouze pro délku ve svislém směru 130 mm – viz Obr. 44–47.

Tab. 24 potvrzuje dosažení nižších hodnot modulů pružnosti (moderních SCC betonů) v porovnání se směrnými hodnotami (ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011; Model Code 2010, 2012), které vychází z pevnostní třídy (obyčejného) betonu. V případě (Model Code 2010, 2012) byla provedena extrapolace.

Tabulka 24 Porovnání sečnových modulů pružnosti v tlaku (stanovené hodnoty na sadě těles, směrné hodnoty), SCC, SFRSCC, TVB

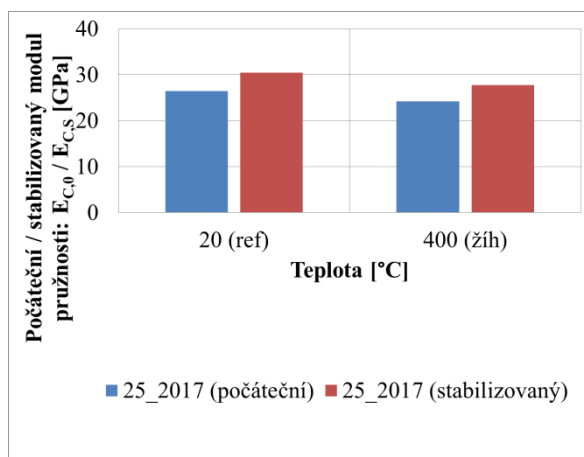
SCC45/55ref	25_2016ref	25_2017_ref	FRC_C25/30_2015ref (bez vláken)
Dle (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A; Stabilizovaný $E_{C,S}$ [GPa], stanoveno			
30,3	30,7	30,5	29,5
Pomocí DIC, Stabilizovaný $E_{C,S,DIC}$ [GPa], svislá vzdálenost 130 mm, stanoveno experimentálně			
31,2	N/A	31,2	28,6
Dle (ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011); směrná hodnota			
36,0	36,0	36,0	31,0
Dle (Model Code 2010, 2012); směrná (extrapolovaná) hodnota			
34,5	34,5	34,5	28,0

5.9.2 Zhodnocení modulu pružnosti betonu při zvýšených teplotách

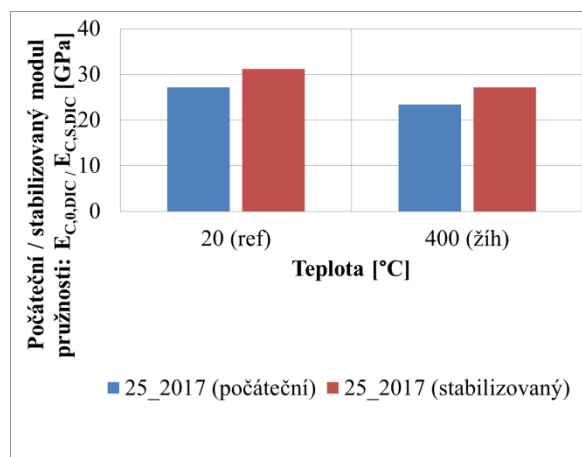
Tělesa vystavena teplotnímu namáhání (žíh) jsou zvýrazněna žlutou barvou.

Potvrdil se předpoklad **mírného snížení** reziduálních procentuálních hodnot modulu pružnosti při maximální teplotě 400 °C. Tento trend je zobrazen na Obr. 40–41. Základna průtahoměru mechanických snímačů byla 150 mm, v případě 3D DIC jsou zobrazeny hodnoty modulu pružnosti pro délku ve svislém směru 130 mm. Tato tendence se zobrazila i u jednotlivých těles uvedených v příloze E.

Lze konstatovat, že dosažení maximální teploty 400 °C (dle experimentální metodiky představené v kap. 5.13 Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci) nemá zásadní vliv na reziduální charakteristiky modulu pružnosti.



Obrázek 40 Počáteční / stabilizovaný sečnový modul pružnosti v tlaku (25_2017), **stanoveno normově**; zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{ref, žih}: 1 měsíc)



Obrázek 41 Počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku (25_2017), **stanoveno pomocí 3D DIC**; zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{ref, žih}: 1 měsíc)

Využitelnost systému DIC

Použitelnost systému DIC byla prokázána na rozsáhlé sadě těles (různého stáří) zhotovených ze SCC, SFRSCC, PFRC, PFRSCC, HSC i z obyčejných (vibrovaných) betonů – TVB.

Platné české normy pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku uvádí jako příklady přístrojů pro měření délkových změn zrcátkové nebo hodinkové deformetry, odporové tenzometry, indukční tenzometry a strunové tenzometry. Lze konstatovat, že DIC lze rovněž využít k měření poměrných přetvoření.

DIC splňuje požadavky na přesnost měření podle (ČSN ISO 1920-10, 2016; ČSN EN 12390-13, 2014) – viz třída 2, Tabulka 2 (ČSN EN ISO 9513, 2013). V porovnání s běžnými přístroji pro měření změn délek vyniká např. úsporou času (odpadá opakované připevnění deformometrů, tenzometrů, apod.), odpadá mechanické poškození (bezkontaktně lze změnu délky zaznamenat až do porušení tělesa).

Autor využil rovněž metodiku DIC, ve spolupráci s doc. Ing. Pavlem Švandou, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů) při monitorování přetvoření subtilních desek (systémem Aramis) při stanovení pevnosti v tahu ohybem a při vlastním proražení desek. Jednalo se o analýzu způsobů vyztužování čedičovými tkaninami, více Fadrhons (2018).

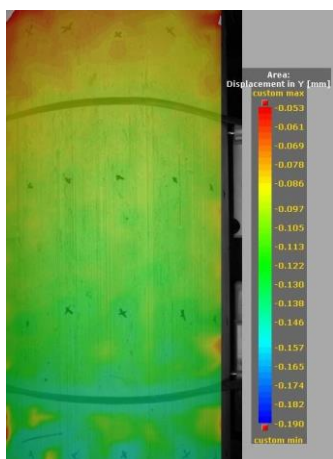
Dosavadní zkušenosti se sofistikovanou metodou DIC nabádají k využití DIC metody i v dalších experimentálních úlohách. Předpokládá se její další využití např. pro potřebu monitorování reálných prvků, nebo konstrukcí. Další příklady reálných aplikací lze nalézt

např. v pracích Chu et al. (1985), Wu et al. (2011), Peters et al. (1982), Crammond et al. (2013).

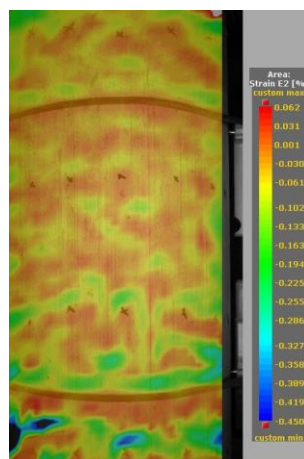
5.9.3 Zhodnocení barevných přechodů stanovených pomocí DIC

„Výhodou systému DIC je možnost analyzovat změnu délky mezi libovolnými body.

Potvrdil se předpoklad nehomogenního rozdělení přetvoření a deformací. U některých těles bylo patrné mírné vyosení. V oblasti tlačných desek dochází k odlišným způsobům přetvoření, než ve střední části.“ viz Suchánek et al. (2018a).



Obrázek 42 Barevný přechod: Displacement Y [mm], těleso 25_2015ref, viz Suchánek et al. (2017c)



Obrázek 43 Barevný přechod: Strain ϵ_Y [%], těleso 25_2015ref, viz Suchánek et al. (2017c)

5.9.4 Statistické porovnání dvou odlišných přístupů (měření deformací) v reálném čase

Na základě dosud provedených experimentálních prací lze konstatovat, že dosažené hodnoty sečnového modulu pružnosti v tlaku (počáteční, stabilizované), stanovené podle Metody A (ČSN EN 12390-13, 2014) a DIC, jsou na hladině významnosti 0,05. Neprůkazné porovnání platí pro tělesa (25_2017ref_3dny). Analýza rozptylu byla provedena testem ANOVA na hladině významnosti 0,05.

Získané variační koeficienty modulů pružnosti – jednotlivých sad zkušebních těles – byly obdobné jak při stanovení podle (ČSN EN 12390-13, 2014), tak při určení systémem DIC, obvykle v rozmezí 2,5–6 %. Nepatrně vyšší variační koeficient byl zjištěn při zkoušení betonu 25_2017_28 dní ($E_{C,0,DIC}$ při nenormové svislé vzdálenosti 260 mm) pomocí systému DIC (8 %). Nejvyšší variační koeficient byl stanoven pro sadu 25_2017_3dny ($E_{C,S,DIC}$ při svislé vzdálenosti 100 mm) pomocí systému DIC (11 %). Určené hodnoty na jednotlivých zkušebních tělesech jsou představeny v příloze E, vybraná tělesa – viz Tab. 25.

Závěry by mohly být odlišné v případě většího statistického souboru zkušebních těles.

Stanovené záznamy dat (hodnoty deformací) na jednotlivých zkušebních tělesech (mechanickými snímači, pomocí DIC) jsou v archivu autora.

5.10 Experimentální stanovení Poissonova součinitele

„Poissonův součinitel byl určen pomocí **3D DIC**. V návaznosti na způsob zatěžování byl stanoven počáteční, stabilizovaný (podobně jako modul pružnosti pomocí DIC) pro modifikované délky ve svislém směru (130, 100 a nenormově 260 mm) – viz aritmetické průměry v Tab. 26 a v příloze E. Ve vodorovném směru byla ve všech případech nastavena referenční délka 130 mm v polovině výšky (střed).“, Suchánek et al. (2017d, 2018a).

5.11 Experimentální stanovení Poissonova součinitele – vyhodnocení získaných výsledků

Při prvotní aplikaci (využití jedné 2D kamery – 2D DIC) bylo měření Poissonova součinitele zatíženo chybou. Tyto hodnoty byly zamítnuty, v disertační práci ani v souvisejících příspěvcích nejsou uvedeny, neboť uspořádání 2D DIC není vhodné pro měření příčných deformací za předpokladu testovaných válcových těles.

Pro stanovení Poissonova součinitele byl proto využit systém **3D DIC**. Průměrná hodnota variačních koeficientů pro jednotlivé sady zkušebních vzorků je 11 %. Nepatrně vyšší variační koeficient vykazoval beton 25_2017_3dny (14 %).

Grafické porovnání počátečních a stabilizovaných hodnot (z jednotlivých sad těles) zobrazuje Obr. 48–49. Znázorněné hodnoty jsou pouze pro svislé vzdálenosti 130 mm. Hodnoty na vybraných tělesech (pro jednotlivé sady těles, svislé vzdálenosti 130, 100 a 260 mm) jsou uvedeny v Tab. 26. Všechny stanovené hodnoty Poissonova součinitele na jednotlivých zkušebních tělesech dokumentuje příloha E.

Potvrdil se trend nepatrně vyšší stabilizované hodnoty v porovnání s počáteční hodnotou Poissonova součinitele. Poissonův součinitel pro nejmenší svislé vzdálenosti (100 mm) vykazuje nepatrně nižší hodnoty v porovnání se zjištěnými hodnotami pro větší svislé vzdálenosti (130 a 260 mm).

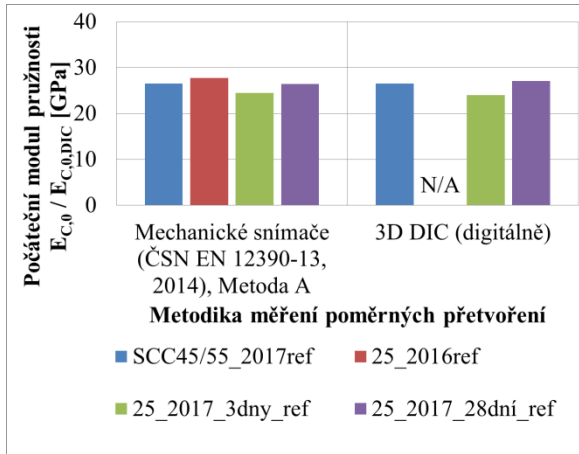
Poissonův součinitel betonu HSC dosahuje průměrné hodnoty 0,19. Tato nižší hodnota je patrně způsobena testováním „specifického HSC“ s maximální velikostí zrna kameniva 16 mm. Aplikace této hrubé frakce v případě HSC / HPC je velmi nestandardní (Poznámka: obvykle bývá $D_{\max} = 4$ mm, nebo 8 mm). Potvrdilo se, že k porušení dochází přes zrna kameniva, více Suchánek et al. (2014a). Lze očekávat, že při testování běžných HSC / HPC by se hodnoty přibližovaly velikostem uvedeným v kap. (4.2 Poissonův součinitel).

Tabulka 25 Zjištěné – přehledné – hodnoty na vybraných tělesech; stanoveno dle (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; včetně hodnot Poissonova součinitele (SCC, SFRSCC, TVB), více zkušebních těles s podrobnějšími údaji – viz příloha E

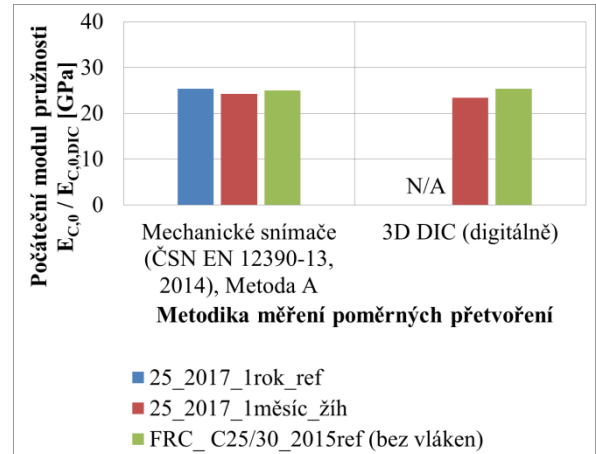
SCC 45/55			25 kg Dramix															FRC C25/30_2015ref (bez vláken)		
SCC45/55_2017ref			25_2016ref		25_2017_3dny_ref			25_2017_28dni_ref				25_2017_1rok_ref			žih					
1E	2E	3E	A	B	1E	2E	3E	4E	5E	6E	13E	10	11	12	25_2017_žih					
																7E	8E	9E	A	B
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]																				
ref			ref		ref			ref				ref			400			ref		
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - dle (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A; (válec: d = 150 mm, h = 300 mm)																				
Počáteční $E_{C,0}$ [GPa]																				
26,4	26,8	26,5	28,8	26,6	24,4	24,7	24,2	25,5	27,1	27,1	26,2	25,4	24,8	25,8	24,8	24,7	23,1	26,2	23,7	
Stabilizovaný $E_{C,S}$ [GPa]																				
30,2	30,6	30,2	31,0	30,3	29,1	29,4	28,7	29,7	31,1	30,9	30,2	29,1	29,0	29,9	28,0	28,1	27,2	30,1	28,9	
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - DIC																				
3D			X	X	3D			3D				X			3D			3D		
Počáteční $E_{C,0,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																				
25,5	26,8	27,3	X	X	24,0	24,1	23,8	26,7	28,5	27,8	25,4	X	X	X	24,2	24,8	21,1	26,3	24,4	
25,2	27,6	27,3	X	X	23,8	24,5	24,1	26,5	28,2	27,0	25,4	X	X	X	24,2	24,4	21,4	25,8	25,5	
26,4	27,7	27,1	X	X	24,9	24,4	24,3	24,4	28,7	28,6	26,0	X	X	X	25,2	25,2	21,6	27,1	26,0	
Stabilizovaný $E_{C,S,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																				
30,3	32,1	31,1	X	X	29,0	31,3	28,7	30,5	32,5	32,0	29,7	X	X	X	27,4	28,1	25,8	29,0	28,2	
30,4	33,0	30,6	X	X	28,0	29,6	28,7	30,3	32,2	31,2	29,7	X	X	X	27,6	27,8	26,0	28,1	29,6	
30,8	32,7	30,9	X	X	29,9	31,2	29,7	29,1	32,4	32,5	31,1	X	X	X	28,7	28,1	26,4	29,7	29,8	
Stáří vzorků v době stanovení: E_C, v																				
28 dní			28 dní		3 dny			28 dní				1 rok			1 měsíc			2,5 roku		

Tabulka 26 Zjištěné – přehledné – hodnoty na vybraných tělesech; stanoveno dle (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; včetně hodnot Poissonova součinitele (SCC, SFRSCC, TVB), více zkušebních těles s podrobnějšími údaji – viz příloha E, pokračování

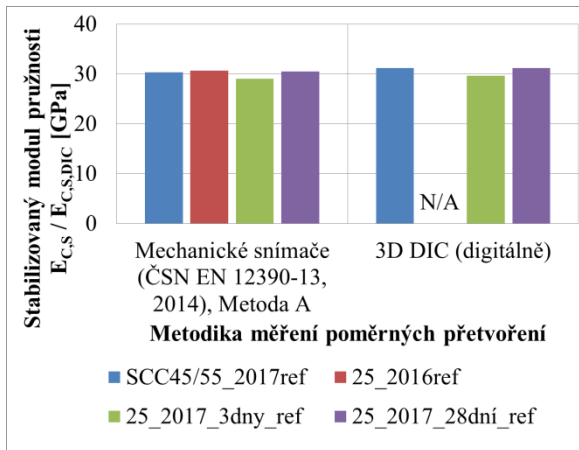
SCC 45/55			25 kg Dramix													FRC_			
SCC45/55_2017ref			25_2016ref		25_2017_3dny_ref			25_2017_28dny_ref				25_2017_1rok_ref			žih			C25/30_2015ref (bez vláken)	
1E	2E	3E	A	B	1E	2E	3E	4E	5E	6E	13E	10	11	12	25_2017žih			A	B
Poissonův součinitel ν (poč. / stabiliz.); v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																			
0,21/ 0,25	0,23/ 0,30	0,26/ 0,28	X	X	0,18/ 0,24	0,21/ 0,35	0,23/ 0,23	0,24/ 0,24	0,25/ 0,27	0,24/ 0,26	0,23/ 0,26	X	X	X	0,23/ 0,23	0,21/ 0,23	0,22/ 0,20	0,24/ 0,22	0,25/ 0,24
0,21/ 0,24	0,24/ 0,31	0,26/ 0,27	X	X	0,18/ 0,22	0,21/ 0,32	0,23/ 0,23	0,23/ 0,25	0,25/ 0,27	0,24/ 0,25	0,23/ 0,26	X	X	X	0,23/ 0,24	0,21/ 0,23	0,23/ 0,20	0,24/ 0,21	0,27/ 0,25
0,22/ 0,25	0,24/ 0,31	0,26/ 0,27	X	X	0,20/ 0,24	0,21/ 0,34	0,23/ 0,24	0,22/ 0,23	0,26/ 0,27	0,25/ 0,25	0,23/ 0,28	X	X	X	0,24/ 0,25	0,22/ 0,23	0,23/ 0,21	0,26/ 0,22	0,26/ 0,25
Stáří vzorků v době stanovení: E_C , v																			
28 dní			28 dní		3 dny			28 dní				1 rok			1 měsíc			2,5 roku	



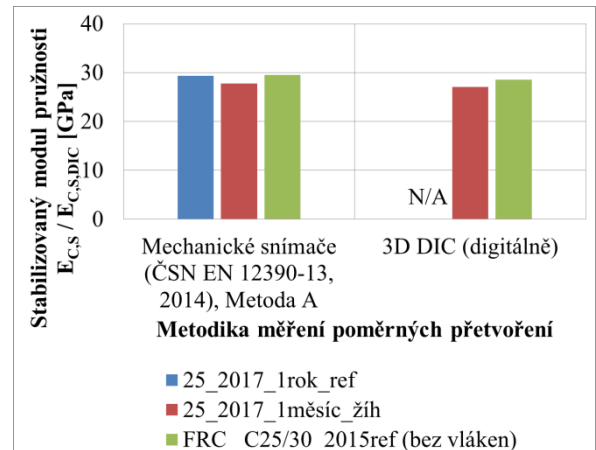
Obrázek 44 Počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku SCC, SFRSCC



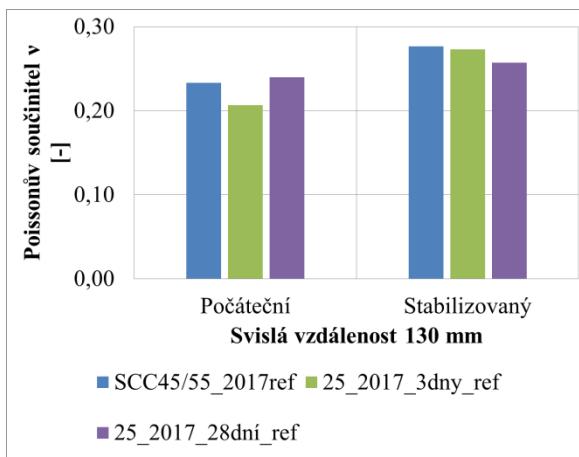
Obrázek 45 Počáteční sečnový modul pružnosti v tlaku SFRSCC, FRC



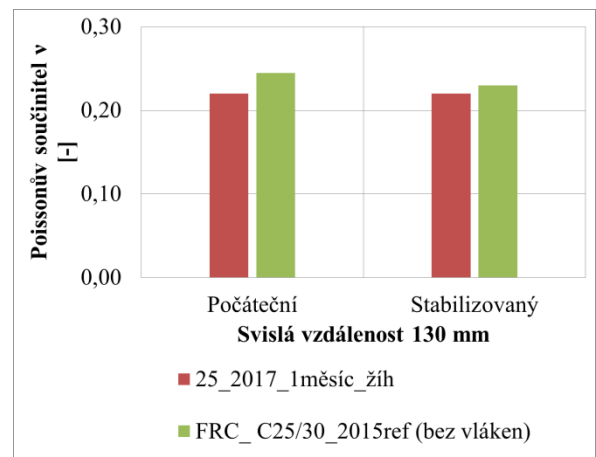
Obrázek 46 Stabilizovaný sečnový modul pružnosti v tlaku SCC, SFRSCC



Obrázek 47 Stabilizovaný sečnový modul pružnosti v tlaku SFRSCC, FRC



Obrázek 48 Poissonův součinitel SCC, SFRSCC (počáteční / stabilizovaný), svislá vzdálenost 130 mm



Obrázek 49 Poissonův součinitel SFRSCC, FRC (počáteční / stabilizovaný), svislá vzdálenost 130 mm

5.12 Vystavení teplotním namáháním (souhrnně)

Norma (ČSN EN 1363-1, 2013) doporučuje využít zkušební zařízení pro zkoušení požární odolnosti. Je jím speciálně konstruovaná pec, řídicí zařízení umožňující řízení teploty v peci, zařízení pro monitorování tlaku horkých plynů, rám pro osazení vzorků, zařízení pro příslušné zatížení a vetknutí, zařízení pro měření teploty v peci a na neohřívané straně zkušební vzorku, zařízení pro měření deformace a celistvosti zkušebních vzorků, zařízení pro průběžné měření času a zařízení pro měření koncentrace kyslíku v pecních plynech.

Při **experimentálním teplotním namáhání** byly využity dvě odlišné (autorem navržené) metodiky. Jednak teplotní namáhání v elektrické peci, jednak zatěžování modelem lokálního požáru. Stanovení reziduálních pevností na jednotlivých tělesech je uvedeno v Tab. 27–30.

5.12.1 Stanovení vlhkosti betonu

Vlhkost betonu byla vždy určena na tepelně nezatěžovaných vzorcích. Obvykle se jednalo o zlomky těles po provedených zkouškách (pevnosti v tahu ohybem). Poznámka: (ref) ani (žih) tělesa určená ke stanovení pevnostních a přetvárných vlastností nebyla využita. Střední obsah vlhkosti byl stanoven podle Přílohy F normy (ČSN EN 1363-1, 2013) s přihlédnutím k normě (ČSN EN 1097-5, 2008). Bylo sušeno při teplotě 105–110 °C až do dosažení rovnovážné hmotnosti.

Hodnota vlhkosti zkušebních těles se „přibližovala“ hodnotě vlhkosti stanovené na reálných konstrukcích (např. vlhkost betonu tunelového ostění), více (Vítek, 2007). S ohledem na tuto skutečnost a ve snaze přiblížení se teplotnímu zatěžování na reálných prvcích nebyla (žih) tělesa vysušována před vlastním experimentálním teplotním zatěžování.

Vlhkosti jednotlivých testovaných těles jsou uvedeny v protokolech autora. Průměrné vlhkosti jednotlivých druhů betonů jsou doplněny do Tab. 27–30.

5.13 Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci

5.13.1 Metodika zkoušení

Se zřetelem na kapitolu (2 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ ANALÝZY SOUČASNÉHO STAVU) a vytyčenými cíli v kapitole (3 DEFINICE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE) autor přistoupil k experimentálnímu nenormovému testování zkušebních těles (žih) v elektrické komorové peci určené pro výpal keramiky – BVD 800/K. Řízení teploty v peci bylo zajištěno čtyřpásmovým programovatelným regulátorem Tempreg 400 od společnosti Smart spol. s.r.o.



Obrázek 50 Elektrická pec BVD 800/K



Obrázek 51 Regulátor Tempreg 400

Předpokládaná doba působení vysokoteplotního namáhání probíhala podle schématického znázornění na Obr. 52, poté následovalo samovolné ochlazování (Obr. 53).

Před zahájením jakýchkoliv zkoušek teplotního zatížení byla zjišťována vlhkost na doplňkových vzorcích ze stejné záměsi, viz kap. (5.12.1 Stanovení vlhkosti betonu).

Zkušební vzorky (žih) byly v různém stáří (viz Tab. 27–30) vystaveny teplotnímu namáhání. Do pece byla tělesa umístěna s přirozenou vlhkostí bez jakéhokoliv mechanického zatěžování.

Situování všech těles v peci bylo vždy v opačném směru proti směru plnění čerstvého betonu. „Plocha urovnaná hladítkem“ směřovala na dno. Motivací bylo vystavit rovnoměrnému teplotnímu namáhání plochy, které budou dodatečně vystaveny mechanickému zatížení při stanovení reziduálních vlastností (v případě krychlí a hranolů).

Zpravidla byla tělesa rozprostřena na dně elektrické pece s přístupem ohřivaného vzduchu ke všem stranám zkušebních těles (kromě spodní podstavy zkušebního tělesa, tj. plochy urovnané hladítkem). S ohledem na kapacitu využití pece autor přistoupil – pouze – v případě prvotního zkoušení na max. teplotu 1049 °C – k situování zkušebních těles ve dvou řadách na sobě. V následujícím testování bylo od tohoto přístupu upuštěno. Byla navržena etapizace výroby betonu.

Poznámka: odchylka umístění těles na dně / při horním povrchu v elektrické peci vyvstala pouze u několika málo těles – primárně určených pro měření teploty uvnitř betonu, více kap (5.13.3 Monitorování teploty v elektrické peci). Reziduální charakteristiky těchto těles nejsou zohledněny v Tab. 27–30.

Se zřetelem k možnému odštěpování betonu byly stěny (i prostor nad tělesy) ohraničeny šamotovými (anebo vermikulitovými) deskami s volným přístupem vzduchu

(zajištěno mezery mezi „ochrannými deskami“). Tímto způsobem byly ochráněny keramické topné spirály elektrické pece (viz Příloha A: Obr. A 16, A 25, A 27–A 28) při explozivním odprýskávání zkušebních těles, více kap. (5.14 Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci – vyhodnocení získaných výsledků).

5.13.2 Zkušební podmínky

Zkušební podmínky v elektrické peci byly nastaveny na přiblížení se popisu nominální normové křivky (max. teplota 1049 °C), křivky vnějšího požáru (max. teplota 680 °C) a na autorem navržené zatěžování na max. teplotu 400 °C, viz Obr. 52.

V případě namáhání na max. teplotu 1049 °C, 750 °C se teplotní gradient přibližoval nejvyšší technicky dosažitelné rychlosti teplotního zatěžování použité elektrické pece. Při zatěžování na max. teplotu 680 °C a 400 °C byla rychlost zatěžování pozvolnější, viz Obr. 52.

Po dosažení maximální nastavené teploty bylo zahřívání ukončeno a docházelo k samovolnému ochlazování až na laboratorní teplotu v uzavřené peci, viz Obr. 53. Poznámka: experimentální činnosti související s rychlým ochlazením není součástí této disertační práce.

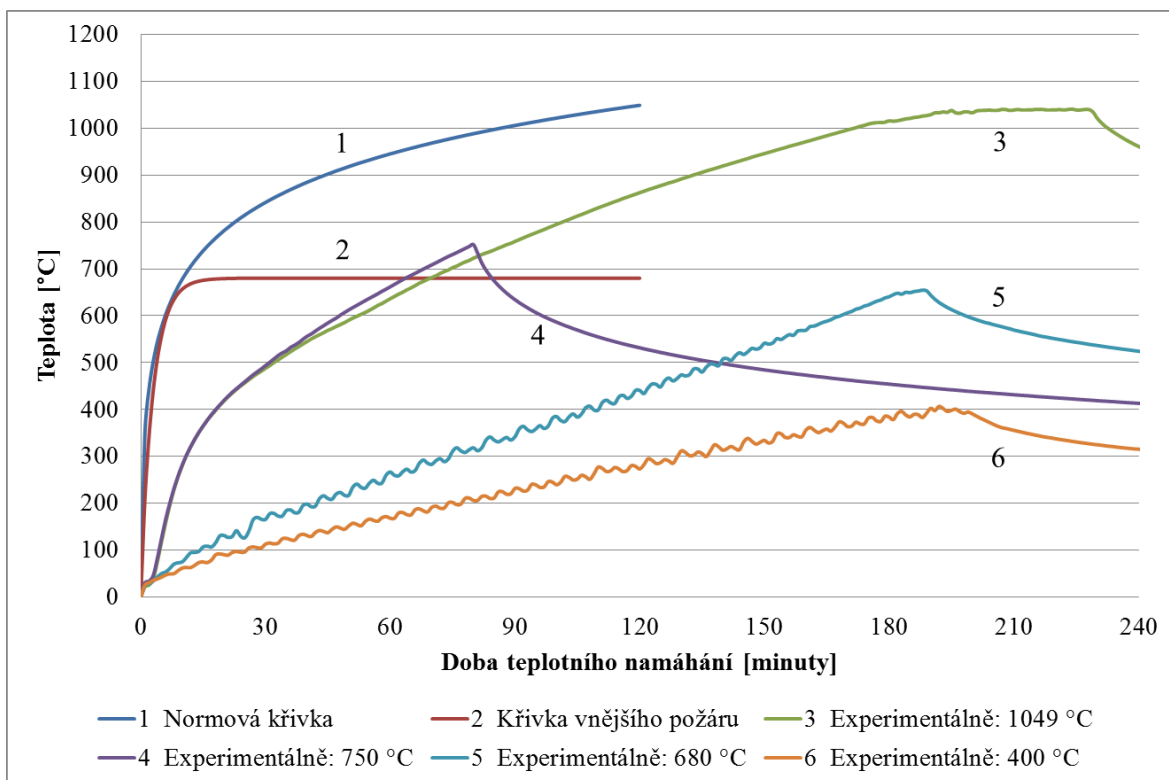
Dosažené maximální teploty při vysokoteplotním namáhání (jednotlivých sad zkušebních těles) je uvedeno v Tab. 27–30.

5.13.3 Monitorování teploty v elektrické peci

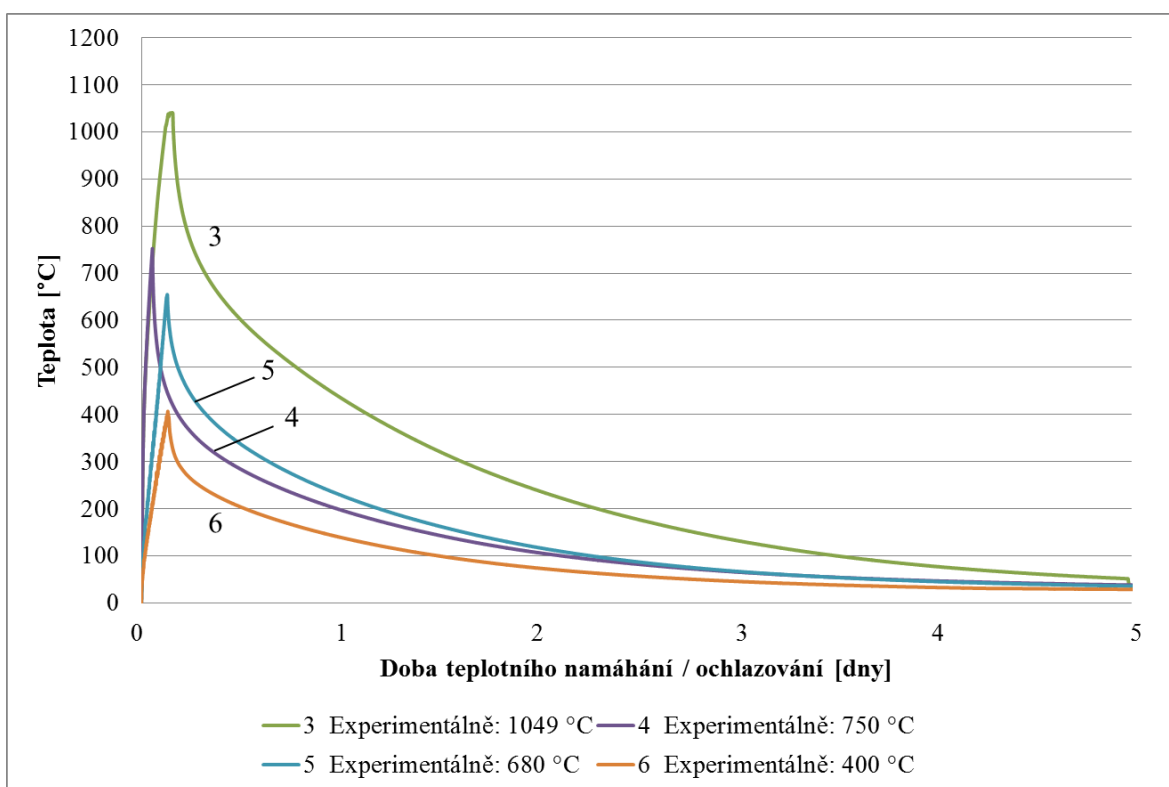
Monitorování teploty bylo uskutečněno 4-kanálovým ručním teploměrem RDXL4SD, vysokoteplotní měření bylo zajištěno měřicími sondami kalibrovanými na termočlánky typu K (Sonda TJ120-CAXL).

S ohledem na zájem autora monitorovat teplotu i uprostřed vzorků byla vybraná zkušební tělesa (označena: „S“) umístěna při horním povrchu pece, kde se nachází prostup pomocí horní větrací klapky. Z tohoto důvodu byla pec dovybavena šamotovými komínovými vložkami RR20 spojenými nasucho (viz Obr. A 16). Na tyto vložky byly osazeny zkušební vzorky tvaru krychle ($d = 150 \text{ mm}$) s předvrtanými otvory do středu tělesa. Teplota byla měřena ve vzdálenosti 75 mm od povrchu krychle, více protokoly autora.

Monitorování teploty bylo prováděno uvnitř pece – při horní úrovni, mimo pec (teplota v laboratoři) a ve vybraných případech i uprostřed vzorků (tělesa „S“).



Obrázek 52 Průběh teplotních křivek (1, 2 – nominální křivky (ČSN EN 1363-2, 2000); 3, 4, 5, 6 – experimentální křivky teplotního namáhání v elektrické peci)



Obrázek 53 Průběh experimentálních teplotních křivek – samovolné ochlazování v elektrické peci (3, 4, 5, 6 – experimentální křivky teplotního namáhání v elektrické peci)

5.14 Vystavení teplotnímu namáhání v elektrické peci – vyhodnocení získaných výsledků

Doporučené (obecné) zkušební podmínky dané normou pro zkoušení požární odolnosti (ČSN EN 1363-1, 2013; ČSN EN 1363-2, 2000) nebyly realizovány. Bylo přistoupeno k experimentálnímu vysokoteplotnímu namáhání na základě navrženého gradientu rychlosti zahřívání. Rychlost zahřívání byla pomalejší v porovnání s normou (ČSN EN 1363-1, 2013; ČSN EN 1363-2, 2000). Motivace volby experimentálního přístupu je objasněna v kap. (3 DEFINICE CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE, případně v kap. 2.1 Teplotní degradace betonu).

Experimentálně stanovené hodnoty referenčních (ref) a reziduálních (žih) charakteristik (pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, objemová hmotnost) včetně reziduálních procentuálních vyjádření jednotlivých vlastností dokládá Tab. 27–30. Hodnoty jsou stanoveny aritmetickým průměrem ze třech měření (pokud není uvedeno jinak). Menší počet zkušebních těles byl způsoben poškozením vzorků vlivem explozivního odštěpování (tělesa: žih), více kap. (5.14.1 Přiblížení se popisu normové křivky v elektrické peci (max. teplota 1049 °C) – vyhodnocení získaných výsledků; 5.14.2 Přiblížení se popisu křivky vnějšího požáru v elektrické peci (max. teplota 680 °C / 750 °C) – vyhodnocení získaných výsledků).

Potvrdilo se snížení objemové hmotnosti vlivem vysokoteplotního namáhání – zásluhou vypuzení volné a fyzikálně vázané vody.

Na tělesech zhotovených z PFRSCC / PFRC s přidanými PP vlákny byly viditelné otisky po rozložení (tání) PP vláken.

Metodika experimentálního zkoušení se přibližuje metodě popsané „Unstressed Residual“ v kap. (1.16 Mechanické vlastnosti betonu při vzrůstající teplotě (ACI 216R-89, 1994)). Z dostupných postupů zkoušení podle (ACI 216R-89, 1994) se jedná o nejkritičtější přístup.

Průběh teplotních křivek (nominální a experimentálně navržené křivky) jsou zobrazeny na Obr. 52. Obr. 53 zobrazuje průběh samovolného ochlazování v elektrické peci.

Data z teplotního měření „uvnitř vzorků“ jsou zálohována v archivu autora. Lze konstatovat, že teploty uvnitř zkušebních těles dosahovaly vysokých hodnot (přibližujících se teplotě v elektrické peci). Za předpokladu vyztužených prvků, při dosažení kritické teploty oceli (cca 500 °C), by docházelo k riziku kolapsu konstrukce. Řešením pro zvýšení požární odolnosti by mohlo být např. využití protipožárních obkladů.

5.14.1 Přiblížení se popisu normové křivky v elektrické peci (max. teplota 1049 °C) – vyhodnocení získaných výsledků

Maximální teplota 1049 °C byla experimentálně dosažena po cca čtyřech hodinách, teplotní průběh – viz Obr. 52. Poznámka: normy pro stanovení požární odolnosti (ČSN EN 1363-1, 2013; ČSN EN 1363-2, 2000) doporučují dosažení této teploty, v případě normové křivky, po dvou hodinách.

Ochlazování na laboratorní teplotu bylo dosaženo v uzavřené peci za cca 5 dní, viz Obr. 53.

Explozivní odštěpování betonu

Vlivem vnitřního pnutí a přetlaku páry v přirozeně vlhkém betonu se potvrdil negativní jev – explozivní odprýskávání. K odštěpování (porušení) došlo u těles z betonu **SFRSCC** (25_2013_žih, 50_2013_žih): celkem 4 krychle, 2 válce, a 1 hranol (v případě zatěžování na max. teplotu 1049 °C), viz Obr. A 21, A 23–A24. Lze předpokládat, že vlivem účinků extrémního teplotního namáhání na zkušebních tělesech z SFRSCC / SFRC došlo k oxidaci ocelových drátků, která zapříčinila rozpínání jednotlivých ocelových vláken. Rozpínání (objemu) ocelových drátků (žih v porovnání s ref-drátkem) je znázorněno pomocí světelné mikroskopie na Obr. F 20. Předpokládá se, že díky vysoké tepelné vodivosti oceli, v porovnání s daleko nižší tepelnou vodivostí betonu, je tepelný tok přenášen do ocelových drátků. Teplotní rozdíly mezi ocelovými vlákny a betonem zapříčinily nárůst tahových napětí, vazby se porušily a došlo k odštěpování betonu.

Zvýšená požární odolnost SFRC se touto skutečností nepotvrdila. Je možné, že při volbě jiné délky (tvaru, průměru, resp. štíhlostního poměru) ocelových vláken by mohly být výsledky odlišné.

Za určitých předpokladů by mohlo docházet k uvolňování vodní páry / fyzikálně vázané vody mezi vlákny a cementovou matricí. SFRSCC / SFRC: očekává se případná odlišná hutnost (pórová struktura) v porovnání s betonem bez vláken (SCC45/55_2013).

Poznámka: v případě zkušebních těles z betonu FRC_C25/30_2015žih k odštěpování nedošlo. Při zkoušení **TVB** (C30/37žih, C25/30žih) k odprýskávání rovněž nedošlo. Za předpokladu odlišných zkušebních podmínek – rychlosti zahřívání – by byly výsledky odlišné.

Reziduální vlastnosti

Tělesa vystavená namáhání na maximální teplotu 1049 °C byla protkána sítí trhlin a puklin. Tato skutečnost byla příznivější v případě TVB (C30/37žih, C25/30žih).

Znatelné snížení zbytkové (krychelné) pevnosti v tlaku se projevilo na všech zkušebních tělesech, více Tab. 27. Výraznější efekt se projevil na tělesech s přidanými mikrovlákny **PFRSCC** (2PP_2013žih, 4PP_2013žih), 13 % z původní hodnoty pevnosti v tlaku. Tento beton byl nejvíce protkán sítí puklin. Tato skutečnost je přisuzována vytavení vláken a tím změněné pórové struktúře v porovnání s betonem bez vláken. Potvrdil se vliv přidání fibrilovaných (mikro) PP vláken jako pasivní požární ochrany, k negativnímu explozivnímu odštěpování nedošlo.

Vysoká reziduální pevnost v tlaku byla naměřena u TVB (C30/37žih), 55 % z původní hodnoty.

U těles **LWSCC** a **AAM** bylo viditelné – velmi výrazné – porušení širokými trhlinami (způsobeno vlivem rozdílné teplotní roztažnosti jednotlivých složek). I přes rozsáhlá viditelná poškození došlo k naměření relativně vysokých reziduálních pevností v tlaku (29 %) a v tahu ohybem (18 a 5 % z referenční hodnoty). Tyto výsledky potvrdily předpokládanou vysokou odolnost AAM při působení vysokoteplotních namáhání.

Nejvýraznější rozdíly objemových hmotností mezi referenčními a tepelně zatěžovanými vzorky se objevily u **LWSCC** (úbytek bezmála 500 kg/m³). Tento efekt byl způsoben vlivem chemických změn v umělém pórovitém kamenivu během teplotního namáhání.

V ostatních případech byla objemová hmotnost průměrně snížena o 8 %.

Reziduální procentuální poklesy pevností v tlaku, v tahu ohybem a objemových hmotností oproti referenčním (ref) vzorkům jednotlivých druhů betonů jsou uvedeny v Tab. 27–30.

Délková roztažnost

Při teplotním namáhání na maximální teplotu 1049 °C se potvrdilo rozpínání zkušebních těles. Rozměry byly stanoveny posuvným měřítkem s noniem. Dosažené hodnoty jsou v protokolech autora, v archivu.

5.14.2 Přiblížení se popisu křivky vnějšího požáru v elektrické peci (max. teplota 680 °C / 750 °C) – vyhodnocení získaných výsledků

I přes odlišnou rychlost zahřívání na maximální teplotu (680 °C / 750 °C) dosahují reziduální pevnosti v tlaku a v tahu ohybem poměrně vysokých hodnot – v porovnání s teplotním namáháním na max. teplotu 1049 °C. Tato skutečnost je přisuzována použitým betonům s vápencem, více kap. (1.18.4.1 Vápenec). Při volbě jiných vstupních surovin (jiné receptury) budou výsledky odlišné.

Viditelná síť trhlin a puklin byla, dle předpokladu, příznivější v porovnání se zatěžováním na max. teplotu 1049 °C.

Délková roztažnost

Rozpínání zkušebních těles – při namáhání na maximální teplotu 680 °C / 750 °C bylo zanedbatelné.

Maximální teplota 750 °C (PFRC / PFRSCC: Syn2_2013_žih a C2_2013)

Gradient rychlosti zahřívání byl nastaven na dosažení maximální teploty 1049 °C, nicméně v důsledku slyšitelného explozivního odštěpení betonu během teplotního zatěžování bylo zahřívání ukončeno dříve – při maximální teplotě 750 °C (dosaženo za 80 minut). Následovalo samovolné ochlazování.

Syn2_2013: ke kompletnímu rozpadu došlo pouze u jednoho hranolu (Syn2_2013_žih, č. vzorku 2), viz Obr. A 27.

Zkušební tělesa C2_2013_žih byla rozdrčena v počtu 5 těles (z celkových sedmi zatěžovaných). Příčina je přikládána technologickému postupu výroby, který vyústil v hutnění čerstvého betonu první záměsi (C2_2013), viz kap. (5.2.5 Zhodnocení výroby PFRC (C2_2013)). Lze očekávat, že hutnost betonu / pórová struktura zkušebních těles (z obou záměsí C2_2013) může být odlišná. Panuje názor, že příčinu lze částečně přisuzovat částicím uhlíku v betonu (vlivem přimíchaných uhlíkových / carbonových / vláken), které by mohly zapříčinit vytvoření „degradujících plynů“. Tato potencialita bude obsahem navazující studie.

Maximální teplota 680 °C (SFRC, PFRC, LWSCC: 75_2013žih, Syn4_2013žih, LWSCCžih)

Při zatěžování podle teplotního gradientu „přibližujícího se křivce vnějšího požáru“ byla maximální teplota (680 °C) dosažena za cca 3 hodiny (normový přístup doporučuje 15 minut).

Významný rozdíl objemových hmotností mezi (ref) a (žih) vzorky se objevil opět u LWSCC (úbytek přes 400 kg/m³). Snížení u ostatních betonů jsou relativně nízká (cca 5 %).

Nejvýraznější pokles reziduálních mechanických vlastností vykazuje beton Syn4_2013žih (při zatížení na max. teplotu 680 °C), více Tab. 30.

5.14.3 Vyhodnocení teplotních účinků v elektrické peci (max. teplota 400 °C)

Disociace portlanditu / Ca(OH)₂ / obecně nastává při teplotách kolem 450 °C. Autor přistoupil k experimentálnímu teplotnímu zatížení na maximální teplotu 400 °C.

Při vyhodnocení reziduálních pevnostních vlastností došlo v několika případech ke stanovení hodnot rovnocenných (či převyšujících) referenční pevnosti. Nejvýraznější přírůstek byl stanoven u LWSCCžih (přes 116 % z původní hodnoty). Navýšení bylo dále zpozorováno u samozhutitelného betonu (SCC45/55_2015žih, SCC45/55_2016žih) a samozhutitelného drátkobetonu (25_2013žih, 25_2015žih): nárůst 112–126 % z původní pevnosti v tlaku. V případě pevnosti v tahu ohybem byly reziduální procentuální hodnoty v rozsahu 103–109 %.

Předpokládá se, že došlo k vytvoření aktivační energie způsobující hydrataci nezhydratovaných cementových zrn.

LWSC: pevnostní nárůst je přisuzován chemickým procesům – v umělém pórovitém kamenivu Rugen – které byly aktivovány daným teplotním namáháním. Autor předpokládá, že došlo k propojení jednotlivých fází, ke „slinutí“ kameniva. Tento druh umělého kameniva bude podroben výzkumu v další fázi experimentálních prací.

U ostatních zkušebních těles namáhaných na 400 °C došlo k dosažení srovnatelných hodnot reziduálních pevnostních vlastností, více Tab. 27–30.

Naopak k drobnému snížení reziduálních pevnostních charakteristik došlo u betonu SCC45/55_2017žih, 25_2017žih. Poznámka: trend mírného snížení reziduálních přetvárných vlastností se objevil i při určení modulu pružnosti, více kap. (5.9.2 Zhodnocení modulu pružnosti betonu při zvýšených teplotách). Tato skutečnost potvrdila předpoklad uvedený v kap. (4.1.1 Modul pružnosti betonu při zvýšených teplotách).

Vady povrchu

Lze konstatovat, že zkušební tělesa nevykazovala známky viditelného porušení. Trhliny byly znatelné – ojediněle – na tělesech LWSCCžih, šířka trhliny maximálně 0,3 mm.

Délková roztažnost

Lze konstatovat, že při teplotním namáhání na maximální teplotu 400 °C si zkušební tělesa zachovala svoje původní skutečné rozměry.

5.14.4 Vyhodnocení teplotních účinků v elektrické peci na dalších souvisejících speciálních betonech

Reziduální pevnosti v tlaku vodonepropustného drátkobetonu ($T_{\max} = 1049$ °C) dosahovaly 14–15% z původní hodnoty, více Suchánek et al. (2017a).

Tabulka 27 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 1049 °C

SCC45/55_2013ref	SCC45/55_2013žih	50_2013ref	50_2013žih	2PP_2013ref	2PP_2013žih	4PP_2013ref	4PP_2013žih	LWSCCref	LWSCCžih	C30/37ref	C30/37žih	C25/30ref	C25/30žih	FRC_C25/30_2015ref	FRC_C25/30_2015žih	AAMref	AAMžih
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]																	
ref	1049	ref	1049	ref	1049	ref	1049	ref	1049	ref	1049	ref	1049	ref	1049	ref	1049
PEVNOST V TLAKU [MPa]																	
Krychelná pevnost [MPa]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																	
76,8	13,0	79,3	17,2: měřeno na 1 tělese (2 tělesa porušená)	77,2	10,0	77,0	9,7	31,2	8,9	32,8	18,1	N/A	45,3	10,0	54,6	16,0	
REZIDUÁLNÍ procentuální krychelná pevnost [%]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																	
100	17	100	22	100	13	100	13	100	29	100	55	N/A	100,0	22	100	29	
PEVNOST V TAHU OHYBEM [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																	
7,7	0,8	8,3	N/A	7,6	0,8	6,9	0,5	2,2	0,4	N/A	N/A	7,3	0,4	* 7,0	1,0	6,3	0,3
REZIDUÁLNÍ procentuální pevnost v tahu ohybem [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																	
100	11	100	N/A	100	11	100	7	100	18	N/A	N/A	100	5	N/A	100	5	
OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg.m⁻³]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																	
2400	2110	2430	2150 (2 tělesa porušená)	2350	2020	2350	2000	1800	1430	2340	2160	2190	2010	2440	2190	2330	2040
REZIDUÁLNÍ procentuální objemová hmotnost [%]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																	
100	88	100	88	100	86	100	85	100	79	100	92	100	92	100	90	100	88
VLHKOST [%]																	
3,6	2,5		2,9 (6,2 ve stáří 28 dní)		2,9		9,9 (ve stáří 28 dní)		N/A		2,5		N/A		2,3 (6,2 ve stáří 28 dní)		
Stáří vzorků v době vystavení vysokým teplotám																	
-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	5 měsíců	-	2 roky	-	11 měsíců	-	3 měsíce	-	4,5 měsíce
Doplňující informace: stáří vzorků v době stanovení: E_C, v																	
3,5 roku	N/A	3,5 roku	N/A	3,5 roku	N/A	3,5 roku	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2,5 roku	2,5 roku	N/A	N/A

Tabulka 28 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 400 °C (pevnostní třída SCC45/55)

SCC45/55_2015ref	SCC45/55_2015žih	SCC45/55_2016ref	SCC45/55_2016žih	SCC45/55_2017ref	SCC45/55_2017žih	25_2013ref	25_2013žih	25_2015ref	25_2015žih	25_2016ref	25_2016žih	25_2017ref	25_2017žih	50_2016ref	50_2016žih
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]															
ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400
PEVNOST V TLAKU [MPa]															
Krychelná pevnost [MPa]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
* 72,4 (převzato z SCC45/55_2013ref)	* 91,2	56,8	63,3 (50,4 ve stáří 3 měsíců)	62,6	52,2	76,6	91,7	77,0	88,9 (90,9 ve stáří 3 měsíců)	63,9	58,8	64,2	55,7	61,1	48,7
REZIDUÁLNÍ procentuální krychelná pevnost [%]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
100	126	100	112	100	83	100	120	100	116	100	92	100	88	100	80
PEVNOST V TAHU OHYBEM [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
N/A	5,8	6,2	N/A	7,9	8,6	7,9 (převzato z 25_2013ref)	8,1	6,4	6,2	N/A	7,9	7,9			
REZIDUÁLNÍ procentuální pevnost v tahu ohybem [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
N/A	100	107	N/A	100	109	100	103	100	97	N/A	100	100			
OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg.m⁻³]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
2370	2260	2300	2200	2320	2270	2410	2310	2390	2300	2320	2170	2350	2310	2360	2230
REZIDUÁLNÍ procentuální objemová hmotnost [%]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
100	95	100	96	100	98	100	96	100	96	100	94	100	98	100	95
VLHKOST [%]															
N/A	5,9 (převzato z 25_2016)	N/A	2,5	4,0	5,9	N/A	5,9 (převzato z 25_2016)								
Stáří vzorků v době vystavení vysokým teplotám															
-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	3 měsíce	-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	1 měsíc
Doplňující informace: stáří vzorků v době stanovení: E_C, v															
N/A	N/A	28 dní	1 měsíc	28 dní	N/A	3,5 roku	N/A	1 rok	1 rok	28 dní	1,3 měsíce	28 dní, 3dny, 1 rok	1 měsíc	28 dní	1 měsíc

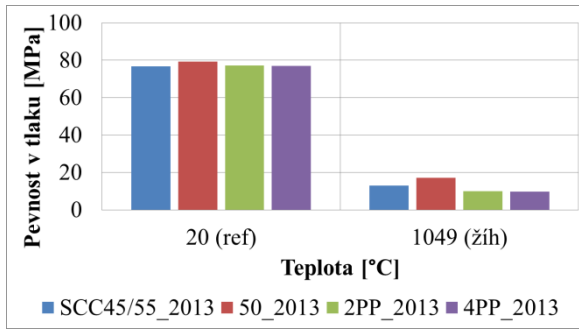
Tabulka 29 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 400 °C

SCC30/37/14ref	SCC30/37/14žih	Syn2_30/37/13ref	Syn2_30/37/13žih	40_30/37/13ref	40_30/37/13žih	25_30/37/14ref	25_30/37/14žih	LWSCCref	LWSCCžih	HSC_I_2014ref	HSC_I_2014žih	HSC_II_2014ref	HSC_II_2014žih	HSC_III_2014ref	HSC_III_2014žih
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]															
ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400	ref	400
PEVNOST V TLAKU [MPa]															
Krychelná pevnost [MPa]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
60,5	62,4	71,0	69,2	68,4	67,4	57,1	56,8	31,2	36,1	84,8	* 107,3	90,2	* 110,2	95,0	* 115,8
REZIDUÁLNÍ procentuální krychelná pevnost [%]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
100	103	100	98	100	99	100	100	100	116	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PEVNOST V TAHU OHYBEM [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
6,4	5,7	6,8	5,5	5,9	6,5	5,4	5,8	2,2	3,3	*6,9	N/A	*7,3	N/A	*7,2	N/A
REZIDUÁLNÍ procentuální pevnost v tahu ohybem [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
100	89	100	81	100	110	100	107	100	150	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg.m⁻³]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
2300	2180	2350	2250	2350	2210	2290	2180	1800	1480	2370	2270	2390	2280	2390	2290
REZIDUÁLNÍ procentuální objemová hmotnost [%]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení															
100	95	100	96	100	94	100	95	100	82	100	96	100	95	100	96
VLHKOST [%]															
5,5		4,0		5,5		5,3		9,9 (ve stáří 28 dní)		N/A		N/A		N/A	
Stáří vzorků v době vystavení vysokým teplotám															
-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	1 měsíc	-	6 měsíců	-	3,5 měsíce	-	3,5 měsíce	-	3,5 měsíce
Doplňující informace: stáří vzorků v době stanovení: E_C, v															
2 roky	2 roky	3,33 roku	3,33 roku	2,66 roku	2,66 roku	2 roky	2 roky	N/A	N/A	3,33 roku	N/A	3,33 roku	N/A	3,33 roku	N/A

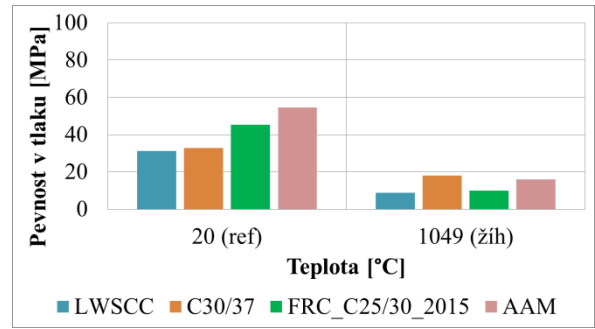
Tabulka 30 Stanovené hodnoty (ref, žih), teplotní namáhání v el. peci na max. 680 °C / 750 °C

75_2013ref	75_2013žih	Syn4_2013ref	Syn4_2013žih	LWSCCref	LWSCCžih	Syn2_2013ref	Syn2_2013žih	C2_2013ref	C2_2013žih
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]									
ref	680	ref	680	ref	680	ref	750	ref	750
PEVNOST V TLAKU [MPa]									
Krychelná pevnost [MPa]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení									
75,3	73,8	76,9	59,6	31,2	23,1	76,4	75,2	80,6	73,6
REZIDUÁLNÍ procentuální krychelná pevnost [%]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení									
100	98	100	78	100	74	100	98	100	91
PEVNOST V TAHU OHYBEM [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení									
9,0	8,2	7,7	3,3	2,2	1,7	7,0	4,4	7,8	4,8
REZIDUÁLNÍ procentuální pevnost v tahu ohybem [MPa]; 3-bodový ohyb (* 4-bodový); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení									
100	91	100	43	100	77	100	63	100	62
OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg.m⁻³]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení									
2380	2300	2370	2250	1800	1470	2370	2260	2360	2240
REZIDUÁLNÍ procentuální objemová hmotnost [%]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení									
100	97	100	95	100	82	100	95	100	95
VLHKOST [%]									
2,4		2,8		9,9 (ve stáří 28 dní)		2,5		2,5	
Stáří vzorků v době vystavení vysokým teplotám									
-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	6,5 měsíce	-	3 měsíce	-	3 měsíce
Doplňující informace: stáří vzorků v době stanovení: E_C, v									
3,5 roku	N/A	3,5 roku	3,5 roku	N/A	N/A	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	N/A

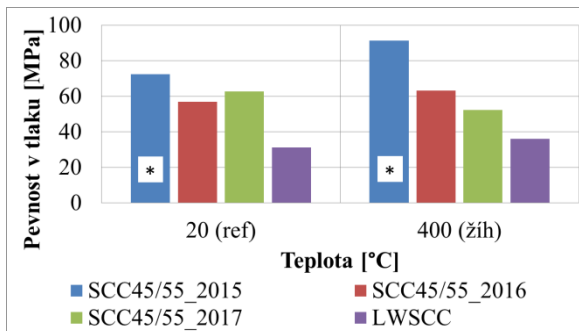
Pevnost v tlaku



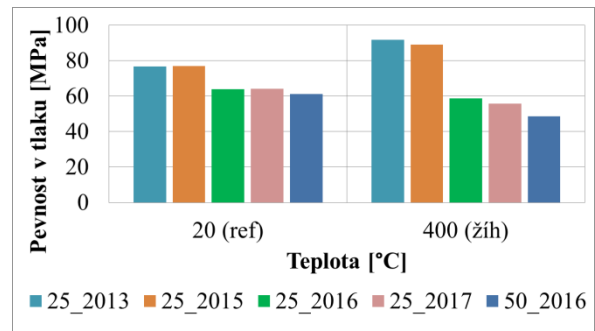
Obrázek 54 Pevnost v tlaku SCC, SFRSCC, PFRSCC, zatíženo na **1049 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 3 měsíce), pevnostní třída SCC45/55



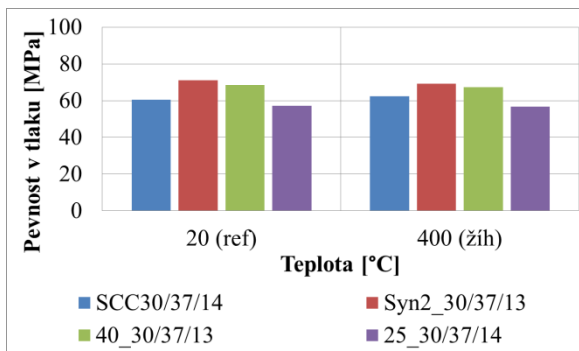
Obrázek 55 Pevnost v tlaku LWSCC, TVB, FRC, AAM, zatíženo na **1049 °C** v el. peci (stáří_{žih}: C30/37: 2 roky, ostatní: 3–5 měsíců), (C25/30: N/A)



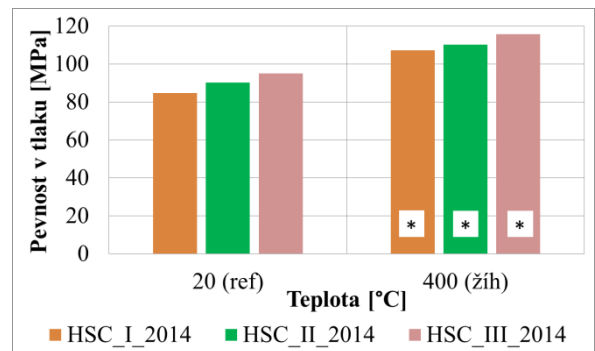
Obrázek 56 Pevnost v tlaku SCC, LWSCC zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: SCC: 1 měsíc, LWSCC: 6 měsíců), (* d = 100 mm)



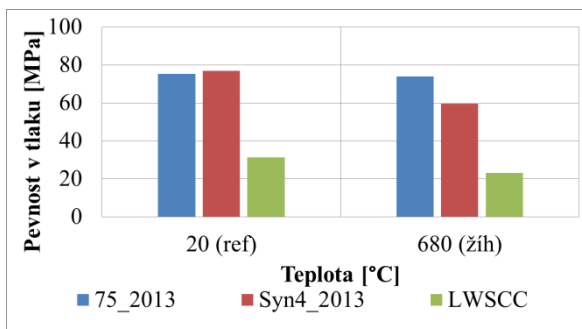
Obrázek 57 Pevnost v tlaku SFRSCC, zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 25_2013: 3 měsíce, ostatní: 1 měsíc)



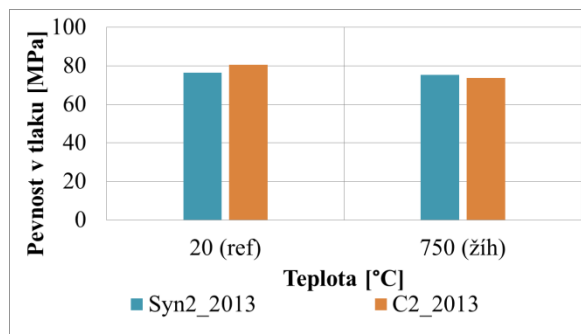
Obrázek 58 Pevnost v tlaku SCC, FRC, SFRSCC, zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 1 měsíc), pevnostní třída SCC30/37



Obrázek 59 Typický trend reziduálních pevností v tlaku HSC, zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 3,5 měsíce), (* d = 100 mm)

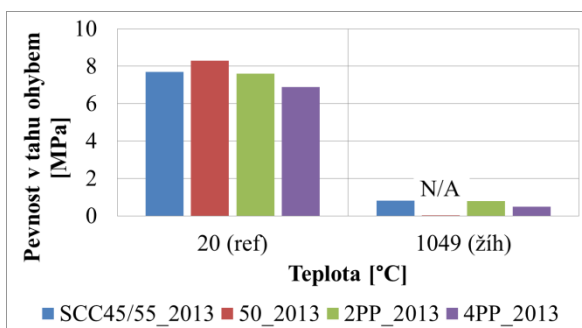


Obrázek 60 Pevnost v tlaku FRC, LWSCC, zatíženo na **680 °C** v el. peci (stáří_{žih}: LWSCC: 6,5 měsíce, ostatní: 3 měsíce)

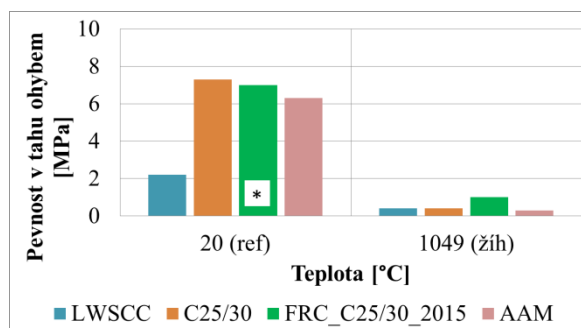


Obrázek 61 Pevnost v tlaku FRC, FRSCC, zatíženo na **750 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 3 měsíce)

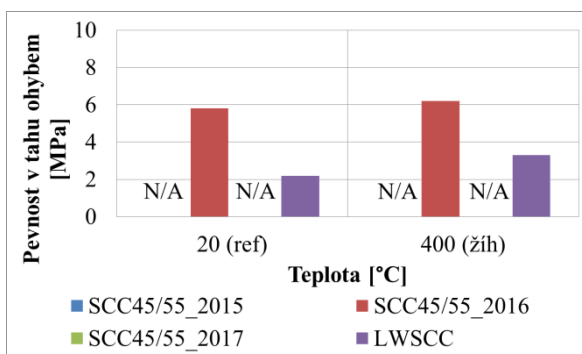
Pevnost v tahu ohybem



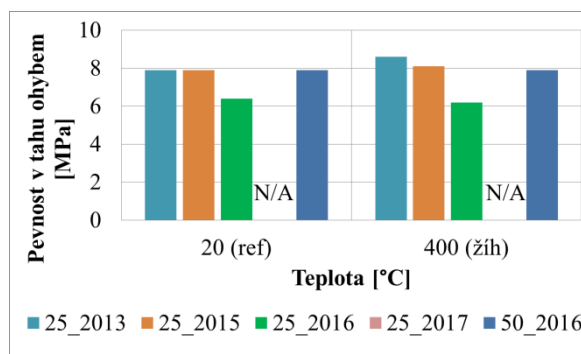
Obrázek 62 Pevnost v tahu ohybem SCC, SFRSCC, PFRSCC, zatíženo na **1049 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 3 měsíce), (50_2013žih: N/A), pevnostní třída SCC45/55



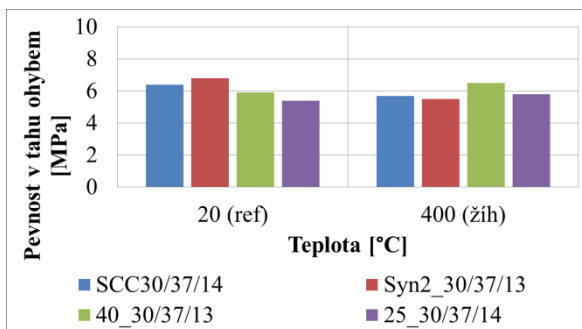
Obrázek 63 Pevnost v tahu ohybem LWSCC, TVB, FRC, AAM, zatíženo na **1049 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 3–11 měsíců), (* 4-bodový ohyb), (C30/37: N/A)



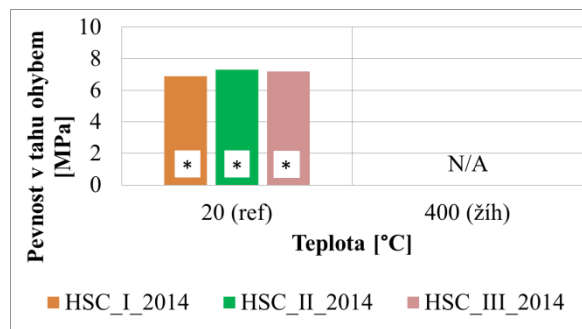
Obrázek 64 Pevnost v tahu ohybem SCC, LWSCC, zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: SCC: 1 měsíc, LWSCC: 6 měsíců), (SCC45/55_2015, SCC45/55_2017: N/A)



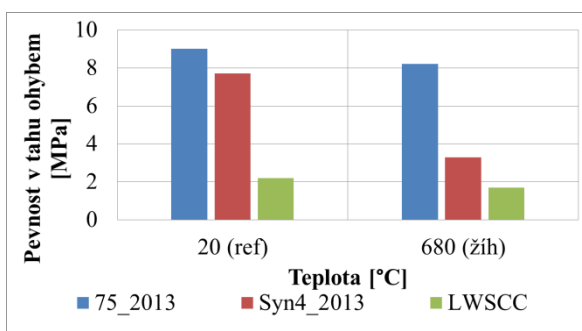
Obrázek 65 Pevnost v tahu ohybem SFRSCC, zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 25_2013: 3 měsíce, ostatní: 1 měsíc), (25_2017: N/A)



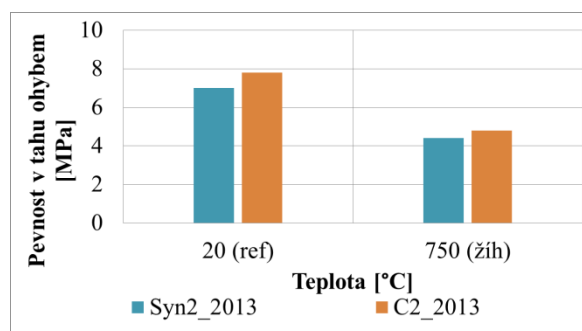
Obrázek 66 Pevnost v tahu ohybem SCC, FRC, FRSCC, zatíženo na **400 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 1 měsíc), pevnostní třída SCC30/37



Obrázek 67 Pevnost v tahu ohybem HSCref, (* 4-bodový ohyb), (HSCžih: N/A)



Obrázek 68 Pevnost v tahu ohybem FRC, LWSCC, zatíženo na **680 °C** v el. peci (stáří_{žih}: LWSCC: 6,5 měsíce, ostatní: 3 měsíce)



Obrázek 69 Pevnost v tahu ohybem FRC, FRSCC, zatíženo na **750 °C** v el. peci (stáří_{žih}: 3 měsíce)

5.15 Vystavení teplotnímu lokálnímu (bodovému) namáhání

Zatěžování lokálním požárem bylo prováděno nejprve v těžkých laboratořích DFJP v Pardubicích, později ve VVCD, na zlomcích hranolů (dříve použitých při zkoušce pevnosti v tahu ohybem). Po samovolném ochlazení byla tělesa převezena do laboratoře M.I.S. a.s., (nejdříve 24 hodin po teplotním zatěžování) byla upravena řezem, více kap. (5.5.3 Úprava těles řezem). Pevnosti v tlaku stanovené na teplotně zatěžovaných tělesech (žih) jsou porovnány s (ref) pevnostmi vyjádřenými na krychli $a = 100$ mm.

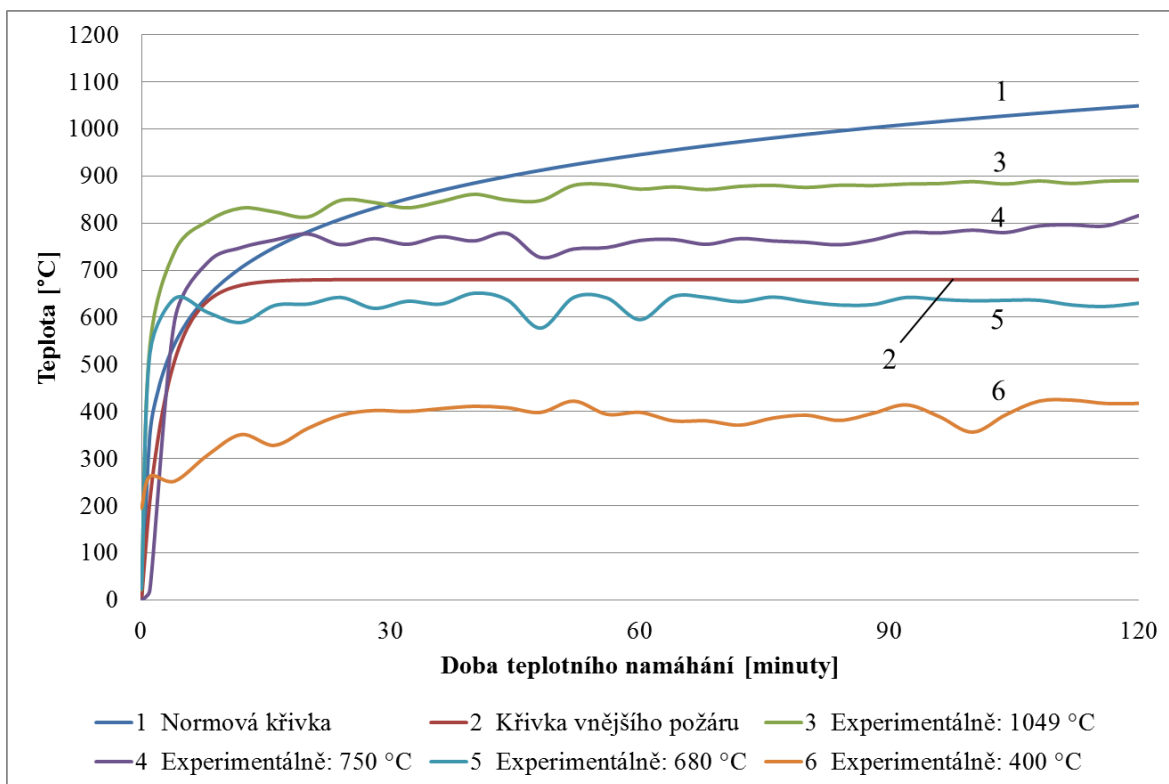
Podobně, jako při stanovení požární odolnosti v elektrické peci, před zahájením zkoušek byla zjišťována vlhkost, viz kap. (5.12.1 Stanovení vlhkosti betonu).

Zkušební vzorky byly v různém stáří (viz Tab. 31) vystaveny teplotnímu namáhání – s přirozenou vlhkostí. Všechna ohřívána tělesa byla instalována mezi vzorky z betonu, bez zatížení. Regulovatelným propan-butanovým hořákem bylo mířeno do středu jednotlivých zatěžovaných zlomků hranolů – viz bod 0 dle Obr. 74).

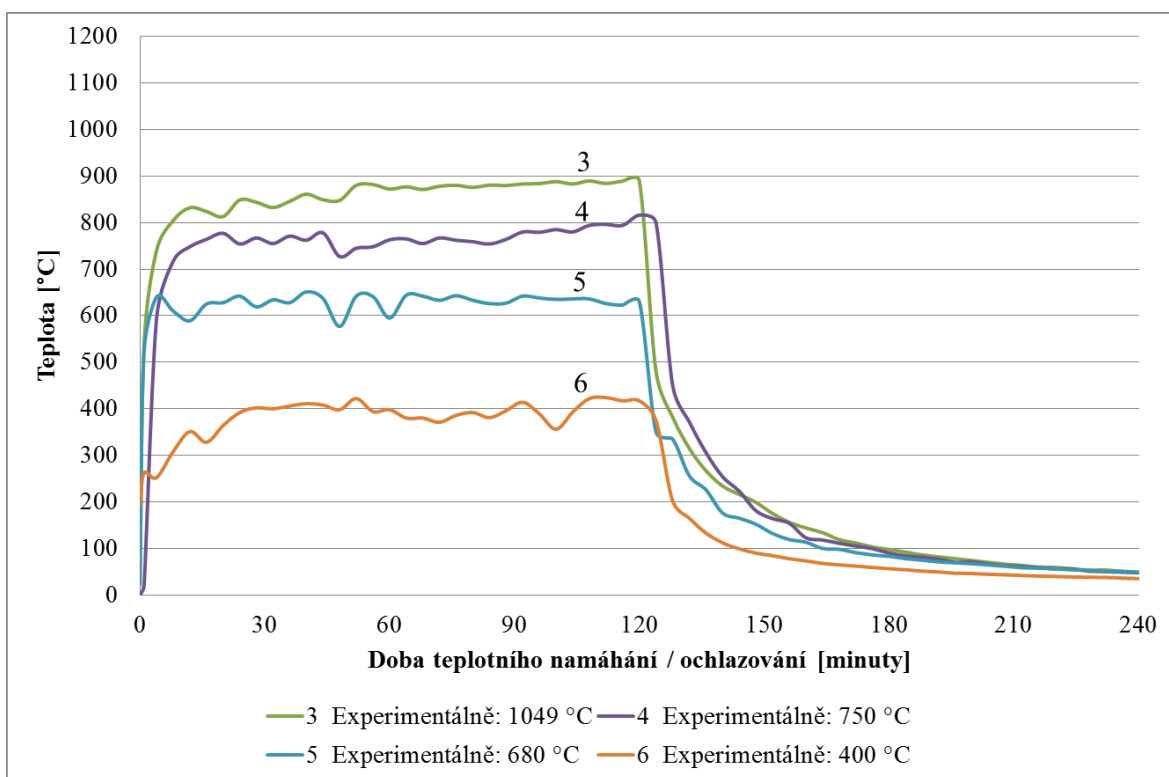
Teplota byla zjišťována na povrchu vystavenému ohni na sedmi exponovaných místech (0, 0_a, 0_b, 1, 2, 3, 4) – viz Obr. 74. Teplota ve středu krychle byla měřena kvůli omezenému teplotnímu rozsahu použitého bezkontaktního teploměru i v bodech 0_a a 0_b. Povrch odvrácený ohni byl měřen na pěti místech (0, 1, 2, 3, 4 – umístění je identické jako na povrchu vystavenému ohni). Sdílení tepla vedením bylo znázorněno průběhem teploty na zbývající části zlomků (bod 5). Hodnoty byly zaznamenány každé 4 minuty. Každý vzorek (zlomek hranolu) byl vystaven působení vysokých teplot po dobu 120 minut. Ihned po zhasnutí plamenu a vyjmutí těles byl zaznamenáván průběh teplot při ochlazování (dalších 120 minut). Naměřená data a vyjádřené grafické průběhy teplotního zatěžování vybraných těles jsou uvedeny v příloze B a C.

Použité přístrojové vybavení:

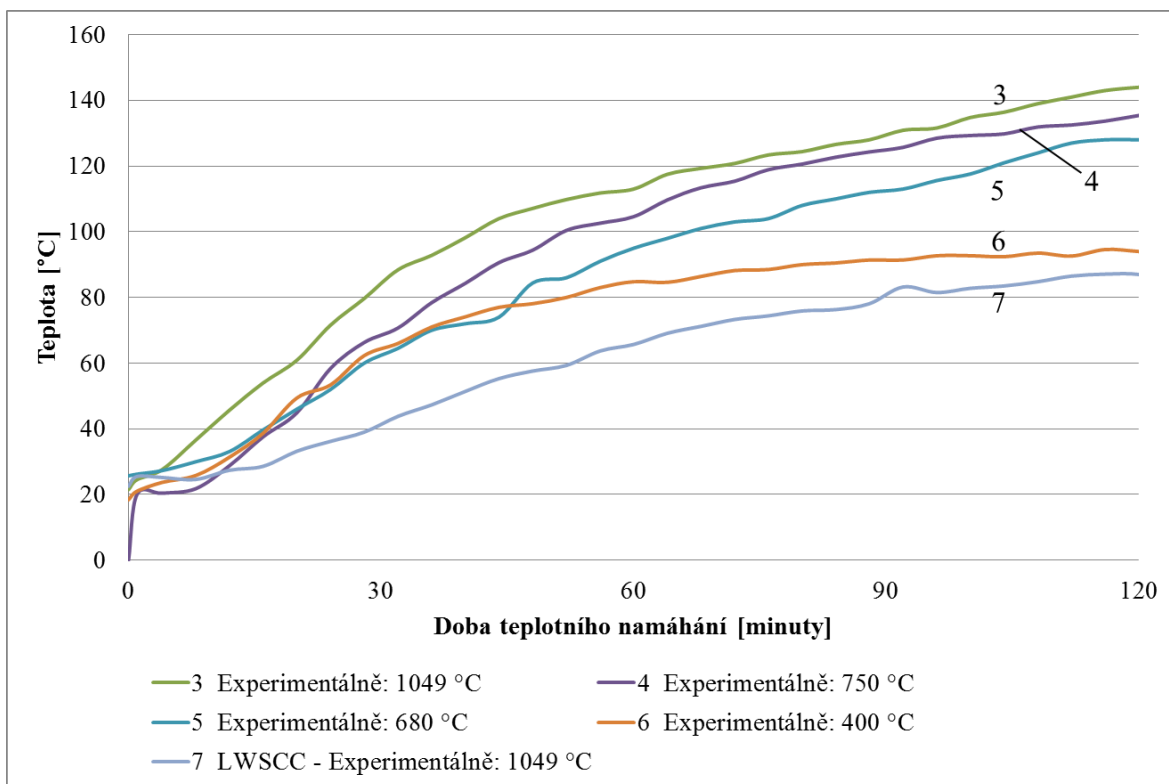
- digitální teploměr a vlhkoměr s externí sondou Commeter C3121,
- odporový měřič vlhkosti GHM 3810 (doplňkové stanovení vlhkosti)
Poznámka: Tab. 31 uvádí hodnoty vlhkostí stanovené v sušárně HS 401 A – Chirana,
- bezkontaktní teploměr Fluke 574 (SCC45/55_2013žih, 25_2013žih, 2PP_2013žih, Syn2_2013žih, C2_2013žih, LWSCCžih, C25/30žih, AAMžih),
- bezkontaktní teploměr Voltcraft IR 1200-50D USB (25_2016_žih, stáří: 1 měsíc, 25_2016žih, stáří: 5 měsíců),
- regulovatelný hořák na propan-butan, viz Obr. 75, Obr. A 19,
- tlaková láhev – propan-butan.



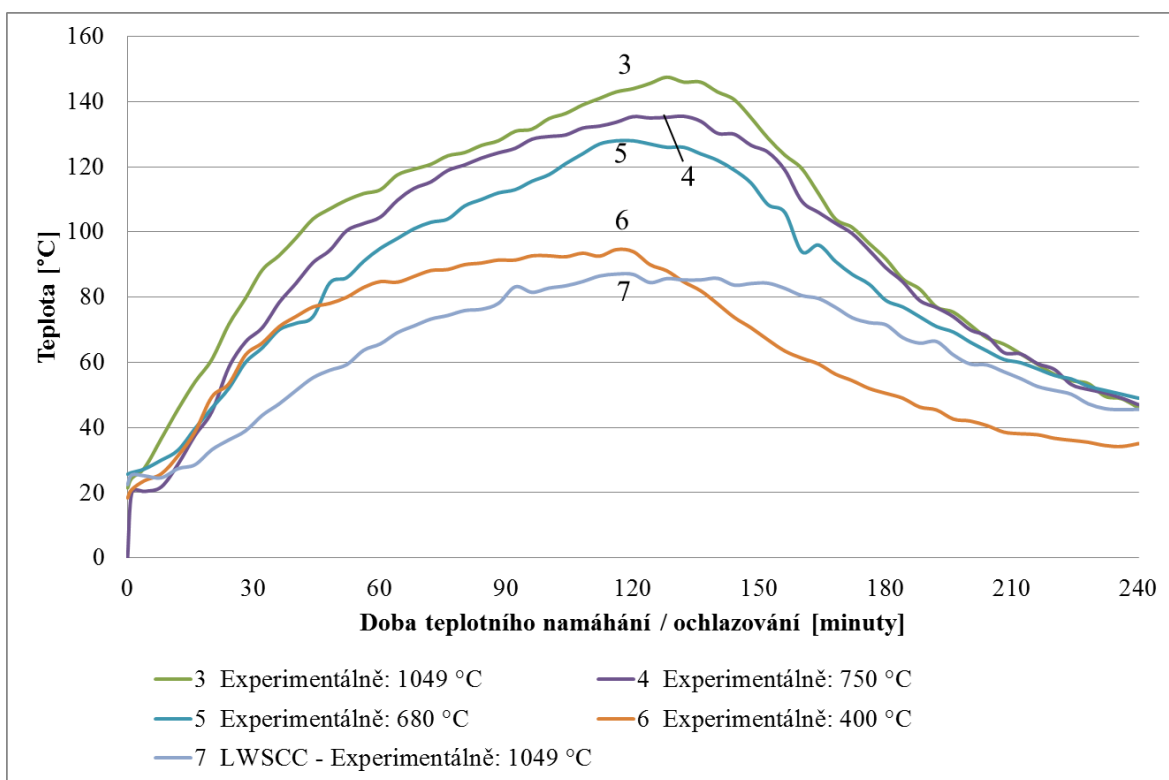
Obrázek 70 Průběh teplotních křivek (1, 2 – nominální křivky (ČSN EN 1363-2, 2000); 3, 4, 5, 6 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání: **Teplota na povrchu vystavenému ohni (bod 0)**)



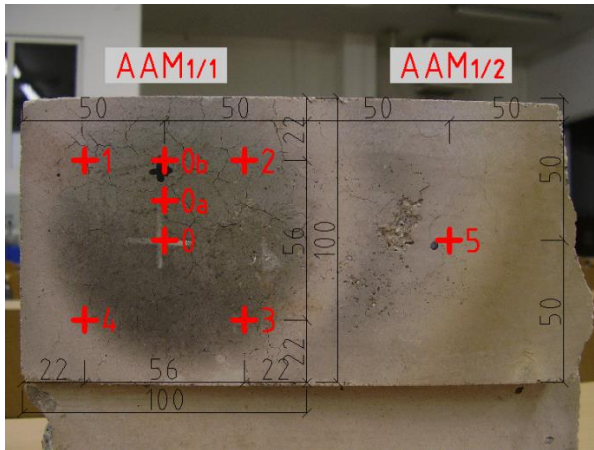
Obrázek 71 Průběh teplotních křivek: 3, 4, 5, 6 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání / ochlazování: **Teplota na povrchu vystavenému ohni (bod 0)**)



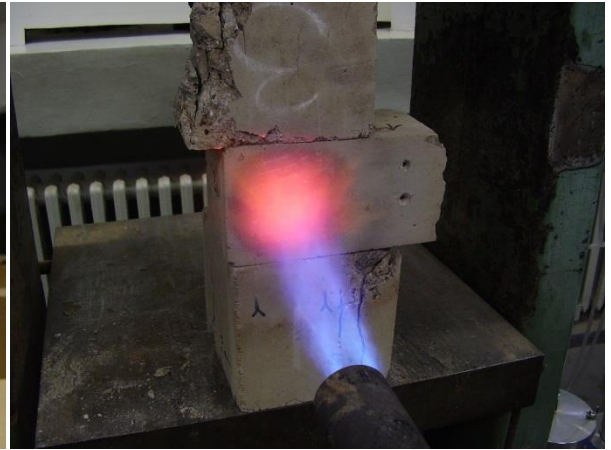
Obrázek 72 Průběh teplotních křivek: 3, 4, 5, 6, 7 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání: **Teplota na povrchu odvrácenému ohni (bod 0)**



Obrázek 73 Průběh teplotních křivek: 3, 4, 5, 6, 7 – typický trend průběhu experimentálních křivek teplotního lokálního (bodového) namáhání / ochlazování: **Teplota na povrchu odvrácenému ohni (bod 0)**



Obrázek 74 Poloha měřených bodů, viz Suchánek et al. (2013b), těleso AAMŽih_1



Obrázek 75 Zatěžování lokálním požárem

5.16 Vystavení teplotnímu lokálnímu (bodovému) namáhání – vyhodnocení získaných výsledků

S ohledem na skutečnost, že se jedná o extermickou reakci způsobující teplotní gradient mezi jádrem a povrchem průřezu, bylo v úvodní fázi – před zahájením teplotního zatěžování – přistoupeno ke sledování povrchových teplot na zkušebních tělesech. Ve spolupráci s Ing. Pavlem Kuklou, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Oddělení diagnostiky a životního prostředí), byla využita **termodiagnostika**. Na základě použité termografické kamery Testo 875-2 byla data vyhodnocena v analyzačním software Testo IR Soft, viz Obr. A 17–A 18. Více např. (Pešta et al., 2011). Lze předpokládat, že sdílení tepla bylo realizováno vedením. Teplo se šířilo z místa vyšší teploty do místa s nižší teplotou. Sdílení tepla vedením bylo znázorněno průběhem teploty na zbývajících částech zlomků (bod 5), typický trend na vybraných zkušebních tělesech – viz příloha B, C.

Potvrdil se efekt tavení syntetických vláken (2PP_2013žih, Syn2_2013žih). K viditelnému rozkladu došlo již v počáteční době teplotního zatěžování (během několika minut).

Docházelo k difuzi. Nejvýraznější kondenzace vodní páry se projevila v případě PFRSCC / PFRC (Syn2_2013žih), viz Obr. A 20. V prvních minutách teplotního namáhání docházelo k viditelnému „vykapávání“ volné vody. Tento efekt se potvrdil i při teplotním namáhání SCC (SCC45/55_2013žih) a PFRC (C2_2013žih).

V porovnání s teplotním namáháním v elektrické peci byly dosaženy odlišné reziduální pevnosti v tlaku. Jedná se o rozdílný způsob zatěžování.

5.16.1 Přiblížení se popisu normové křivky, lokálně (max. teplota 1049 °C) – vyhodnocení získaných výsledků

Teplotním namáháním na maximální teplotu 1049 °C docházelo (ve všech tělesech) k výraznému vnitřnímu pnutí vlivem nerovnoměrného rozložení teploty po průřezu (a vlivem rozdílné teplotní roztažnosti jednotlivých složek). Účinek se projevil narušením struktury, došlo ke vzniku trhlin i puklin. Ojedinele docházelo ke drolení hran nebo porušení rohů na ohříváných stranách zkušebních vzorků.

Procentuální pokles snížení pevnosti v tlaku oproti referenčním vzorkům se pohyboval v rozmezí 11–17 %.

LWSCC: potvrdila se zvýšená tepelně izolační vlastnost. Maximální dosažená teplota na neohříváné straně byla průměrně o 42 % nižší než u vzorků z betonu SCC45/55_2013žih a o 52 % nižší oproti TVB (C25/30žih). Graficky je tato skutečnost doložena na Obr. 73. Nejvýraznější úbytek objemové hmotnosti se projevil opět v případě LWSCC: 10 % (bezmála 200 kg·m⁻³).

5.16.2 Přiblížení se popisu křivky vnějšího požáru, lokálně (max. teplota 680 °C / 750 °C) – vyhodnocení získaných výsledků

U vzorku Syn2_1 došlo k odštěpení povrchové vrstvičky betonu o velikosti plochy 50 x 50 mm a hloubky 4 mm. K odprýsknutí došlo na povrchu vystavenému ohni, do 2 minut po zahájení teplotního zatěžování.

Procentuální pokles snížení pevnosti v tlaku oproti referenčním vzorkům se pohyboval v rozmezí 7–14 %.

5.16.3 Vyhodnocení teplotních účinků, lokálně (max. teplota 400 °C)

Reziduální pevnosti v tlaku dosahovaly obdobných hodnot jako referenční tělesa. Rozdíly nepřevyšovaly 7 % od původní hodnoty.

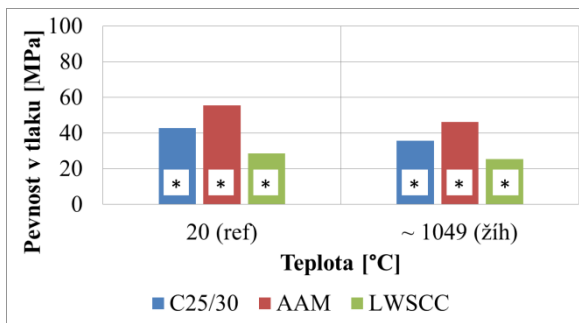
Reziduální objemové hmotnosti byly srovnatelné s referenčními hodnotami.

Povrchové porušení trhlinami nebylo znatelné.

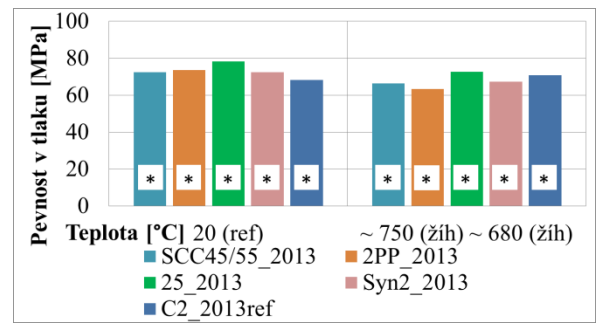
Tabulka 31 Stanovené hodnoty, lokální (bodové) teplotní namáhání na max. ~ 1049 °C, ~ 750 °C, ~ 680 °C, ~ 400 °C

C25/30ref	C25/30žih	AAMref	AAMžih	LWSCCref	LWSCCžih	SCC45/55_2013ref	SCC45/55_2013žih	2PP_2013ref	2PP_2013žih	25_2013ref	25_2013žih	Syn2_2013ref	Syn2_2013_žih	C2_2013ref	C2_2013žih	25_2016ref	25_2016_žih	25_2016ref	25_2016_žih
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]																			
ref	~ 1049	ref	~ 1049	ref	~ 1049	ref	~ 750	ref	~ 750	ref	~ 680	ref	~ 680	ref	~ 680	ref	~ 400	ref	~ 400
PEVNOST V TLAKU [MPa]																			
Krychelná pevnost [MPa]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																			
*42,7	*35,6	*55,5	*46,2	*28,7	*25,5	*72,4	*66,5	*73,7	*63,3	*78,4	*72,7	*72,5	*67,3	*68,2	*70,9	*58,2	*54,4	*58,2	*61,9
REZIDUÁLNÍ procentuální krychelná pevnost [%]; krychle: d = 150 mm (* d = 100 mm); REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																			
100,0	83,0	100	83	100	89	100	92	100	86	100	93	100	93	100	104	100	93	100	106
OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg.m⁻³]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																			
2190	2120	2330	2200	1800	1620	2400	2330	2350	2270	2410	2370	2370	2300	2360	2280	2320	2270	2320	2280
REZIDUÁLNÍ procentuální objemová hmotnost [%]; REF: stáří: 28 dní; ŽÍH: po ochlazení																			
100	97	100	94	100	90	100	97	100	97	100	98	100	97	100	97	100	98	100	98
VLHKOST [%]																			
2,5	2,3 (6,2 ve stáří 28 dní)		9,9 (ve stáří 28 dní)		3,6		2,9 (6,2 ve stáří 28 dní)		2,5	2,5	2,5	5,9	5,9						
Stáří vzorků v době vystavení vysokým teplotám																			
-	7 měsíců	-	1,5 měsíce	-	1,5 měsíce	-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	3 měsíce	-	4 měsíce	-	1,5 měsíce	-	5 měsíců

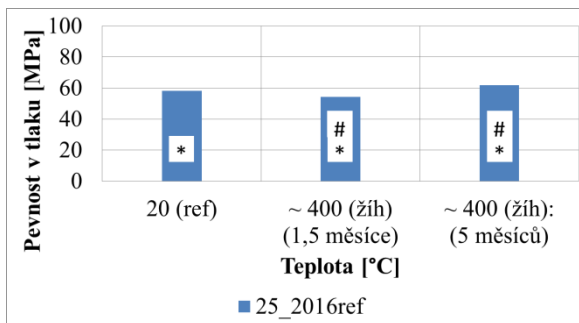
Pevnost v tlaku



Obrázek 76 Pevnost v tlaku TVB, AAM, LWSCC, zatíženo na ~ 1049 °C teplotní lokální (bodové) namáhání, (stáří_{žih}: C25/30: 7 měsíců, ostatní: 1,5 měsíce), (* d = 100 mm)



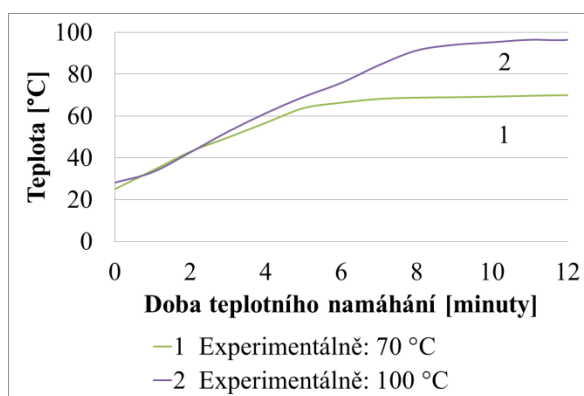
Obrázek 77 Pevnost v tlaku SCC, FRSCC, FRC, zatíženo na ~ 750 °C, ~ 680 °C, teplotní lokální (bodové) namáhání, (stáří_{žih}: C2_2013: 4 měsíce, ostatní: 3 měsíce), (* d = 100 mm)



Obrázek 78 Pevnost v tlaku SFRSCC, zatíženo na ~ 400 °C teplotní lokální (bodové) namáhání, (stáří_{žih}: 1,5 měsíce, 5 měsíců), (* d = 100 mm), (# jiné stáří)

5.17 Vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání (proteptování)

Kromě výše uvedeného hlavního experimentálního programu se autor zabýval doplňujícím teplotnímu namáhání „cementových těles“. Více Tab. 13, kap. (5.2.7 Zhodnocení výroby „cementových těles“, 5.6.3 Stanovení pevnostních charakteristik na „cementových tělesech“). Experiment se věnoval urychlenému proteptování na maximální teplotu **70 °C** (proteptování probíhalo v elektrické peci: teplým vzduchem, anebo ve vodní lázni), **100 °C** (v elektrické peci) v různém stáří (1 a 3 dny). Typický trend rychlosti zahřívání je zobrazen na Obr. 79. Po dosažení maximální teploty (za 12 minut) docházelo k teplotnímu namáhání maximální teplotou po dobu **48 hodin**. Následovalo samovolné ochlazení a konečně kondicionování těles v klimatizované místnosti. Reziduální vlastnosti (žih) byly stanoveny ve stáří 28 dní (podobně jako (ref) charakteristiky).



Obrázek 79 Typický trend rychlosti zahřívání – vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání

5.18 Vystavení „cementových těles“ teplotnímu namáhání (proteptování) – vyhodnocení získaných výsledků

Dosažené výsledky teplotního namáhání na maximální teplotu **70 °C** a **100 °C** byly prezentovány v příspěvku (Suchánek et al., 2018b).

Největších úbytků reziduálních pevnostních charakteristik dosahovala cementová tělesa (CEMžih). V případě pevnosti v tlaku: přibližně 60 % z původních hodnot. Menších procentuálních poklesů bylo dosaženo při stanovení pevnosti v tahu ohybem – přes 80 % z původních hodnot.

Tělesa (Malé_25_2015žih, Malé_25_2016žih) dosahovala reziduálních pevnostních vlastností (v tlaku, v tahu ohybem) v rozmezí 90–100 % z původních hodnot.

Teplotní proteptování ve stáří 1–3 dny: potvrdil se předpoklad úbytku reziduálních mechanických vlastností těles proteptovaných nasucho v porovnání se vzorky proteptovanými

ve vodní lázni. Tato skutečnost byla způsobena „rychlým vysušením betonu“, došlo k narušení tvorby hydratace cementu (narušení tvorby struktury cementového kamene).

Odlišné chování sad těles (CEMžih) a (Malé_25_2015žih, Malé_25_2016žih) pramení z použité rozdílné receptury (viz Tab. 14–17). Ve všech zkušebních tělesech byl aplikován jednotný druh cementu.

5.19 Doplnkové vyšetřování mikro vlastností ztvrdlého betonu

5.19.1 Elektronová mikroskopie

Ve spolupráci s doc. Ing. Pavlem Švandou, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů) byla znázorněna **mikrostruktura** ztvrdlé betonové pasty pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) a energeticky disperzní rentgenové analýzy (EDXA / EDS) – na miniaturních zlomcích zkušebních těles. S ohledem na použitelnost rastrovacího elektronového mikroskopu (TESCAN VEGA 5130SB) a mikroanalyzátoru EDXA (Bruker Quantanax 200), viz Obr. F 1, byly vyšetřovány „úlomky“ těles (ref / žih) o velikosti největší hrany cca 20 mm, viz Obr. F 2. Povrch odštěpků nebyl broušen. Struktura je znázorněna v příloze F.

Zkoušení a interpretace mikrostruktury portlandských cementů a slinku popisuje např. Campbell (1999).

5.19.2 Světelná mikroskopie

V rámci doplnkového pozorování povrchu (betonu / vláken) autor využil světelné mikroskopie. Jednalo se o aplikaci binokulárního mikroskopu (Nikon SMZ 800) – stereomikroskop (vybaven dvěma okuláry), viz Obr. F 19.

5.20 Doplnkové vyšetřování mikro vlastností ztvrdlého betonu – vyhodnocení získaných výsledků

Příloha F znázorňuje zobrazenou mikrostrukturu (SEM) klíčových druhů betonu.

SCC

Na Obr. F 3 je znázorněna mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013ref. Jsou viditelné běžné struktury. SCC45/55_2013žih (na 1049 °C), viz Obr. F 4, vykazuje odlišný charakter lomu, zrna jsou křehčí, lomová plocha je hladší.

Obr. F 5, F 6 znázorňují EDXA analýzu, porovnání SCC45/55_2013ref a SCC45/55_2013žih (na 1049 °C). Na základě teplotního namáhání došlo k vytěkání oxidu vápníku, relativní poměry jiných prvků jsou proto více zastoupeny, viz Obr. F 6.

SFRSCC

Obr. F 7 znázorňuje rozhraní: cementová matrice (25_2013ref) – ocelové vlákno. Je patrná technologie výroby ocelového vlákna – tažením. Obr. F 9 znázorňuje mikrostrukturu betonu 25_2013ref na řezu přes ocelový drátek. Obraz SE (Secondary Electron Image) je zobrazen vlevo, BSE (Backscattered Electron Image) vpravo. Detektor sekundárních elektronů (SE) zobrazuje lepší informaci o textuře povrchů.

PFRSCC

Obrázky F 8, F 10 znázorňují rozhraní: cementová matrice (2PP_2013ref) – syntetické vlákno. Obr. F 11 ilustruje stabilní kostru – útvar ve střední části z Obr. F 10. Viditelný otisk po vytaveném syntetickém vlákně je patrný na Obr. F 13. Zde bylo umožněno vodní páře unikát bez vytvoření vnitřního tlaku (zamezeno explozivnímu odštěpování). Obr. F 14 zobrazuje změnu mikrostruktury vlivem teplotního namáhání – rekrystalizace ztvrdlého betonu.

PFRSCC / PFRC – C2_2013

Monofilamentní uhlíkové vlákno je zobrazeno na Obr. F 15, je tvořeno prameny jednotlivých vláken. Předpokládá se, že vlivem míchání čerstvého betonu (C2_2013) došlo k rozmělnění na jednotlivé části. Mikrostruktura (C2_2013ref) je znázorněna na Obr. F 16.

LWSCC

Mikrostruktura (žih) kameniva Rugen (na Obr. F 17–F 18) znázorňuje výraznější proreagování. Struktura LWSCC je zobrazena na Obr. F 21 pomocí binokulárního mikroskopu.

C30/37

Porušená tranzitní zóna betonu C30/37žih (na 1049 °C) je zobrazena na Obr. F 22.

6 ZÁVĚR

Disertační práce se věnuje experimentální studii speciálních betonů. Zaměřuje se na popis zásadních vlastností vybraných speciálních betonů včetně zahrnutí vlivu působení vysokých teplot na beton. Práce zohledňuje nejdůležitější aspekty na výsledné reziduální charakteristiky a s využitím experimentálního přístupu poukazuje na rozličná chování modifikovaných typů speciálních betonů v čerstvém i ztvrdlém stavu.

Rozsáhlá experimentální studie stanovuje jedny ze základních charakteristik ztvrdlého betonu – pevnostní a přetvárné vlastnosti – na zkušebních tělesech referenčních a teplotně zatěžovaných. S ohledem na absenci dvou stěžejních parametrů v evropské betonářské normě (popisující specifikaci, vlastnosti, výrobu a shodu) – modulu pružnosti a Poissonova součinitele – byla pozornost zaměřena na stanovení těchto důležitých vlastností. Byl aplikován normový i experimentální přístup s využitím korelace digitálního obrazu.

Vystavení teplotním namáháním

Na základě autorem navržených dvou experimentálních metodik teplotního namáhání včetně konceptu gradientu rychlosti zahřívání, je možno konstatovat, že za určitých zkušebních podmínek, při dosažení „extrémní“ maximální teploty **400 °C**, lze dosáhnout reziduálních pevnostních charakteristik rovnocenných – či převyšujících – referenční mechanické vlastnosti.

Nejvýraznější přírůstek reziduálních mechanických vlastností byl stanoven u lehkého samozhutnitelného betonu (přes 116 % z původní hodnoty), dále pak samozhutnitelného betonu a samozhutnitelného drátkobetonu pevnostních tříd C 45/55 (nárůst reziduálních procentuálních krychelných pevností se pohyboval v rozmezí 112–126 %). V případě pevnosti v tahu ohybem v rozsahu 103–109 %. Tato skutečnost je přisuzována vytvoření aktivační energie způsobující hydrataci nezhydratovaných cementových zrn.

Poznámka: k navýšení reziduálních pevnostních vlastností došlo i přes aplikaci „kritické metodiky“ teplotního namáhání v kombinaci s použitým křemičitým kamenivem v betonu.

K drobnému snížení reziduálních pevnostních charakteristik došlo u samozhutnitelného betonu (C 45/55) vyrobeného v roce 2017. Trend mírného snížení se objevil i při stanovení modulu pružnosti.

Vystavení teplotním namáháním – možnosti dalšího výzkumu (~ 400 °C)

Představená experimentální metodika vysokoteplotního namáhání do dosažení maximální teploty 400 °C by mohla naznačovat směr „moderního způsobu vysokoteplotního

proteplování“ (moderní teplotního ošetřování / propařování). Stanovení optimálních zkušebních podmínek teplotního namáhání bude předmětem zkoumání v další fázi experimentálních prací.

Autor si je vědom, že při dosažení vyšších teplot (kolem 450 °C), již dochází k dehydrataci portlanditu a souvisejícím ztrátám pevnosti. Důležitým aspektem je doba exponovaná při působení maximální teploty. Poznámka: při experimentálním přístupu byla maximální teplota pouze dosažena a neprodleně následovalo samovolné ochlazování.

Lehký samozhutnitelný beton – možnosti dalšího výzkumu

Pevnostní nárůst reziduálních mechanických vlastností lehkého samozhutnitelného betonu je přisuzován chemickým procesům vyvolaným teplotním namáháním v aplikovaném druhu umělého pórovitého kameniva. Navazující experimentální studie budou cíleny do vývoje betonu s daným umělým kamenivem. Za excentrickou myšlenku lze označit vývoj „lehkého vysokohodnotného / vysokopevnostního samozhutnitelného vláknobetonu“, který by vynikal přednostmi vyplývajícími z charakteru jednotlivých speciálních betonů včetně zpracování velkého množství odpadních surovin v umělém kamenivu. Tato představa vznikla na základě potvrzené skutečnosti, že specifickým vysokoteplotním zatížením lze navýšit reziduální pevnostní vlastnosti. V případě lehkého samozhutnitelného betonu bude současně snížena objemová hmotnost (v experimentálním přístupu došlo k úbytku bezmála 500 kg/m³). Beton bude odolný vůči působení vysokých teplot, bude zabráněno explozivnímu odštěpování. S ohledem na nižší tepelnou vodivost bude beton déle chránit výztuž. V čerstvém stavu bude mít charakter samozhutnitelného vláknobetonu / drátkobetonu. Druhý úhel pohledu směřuje k možnostem teplotního navýšení mechanických vlastností samotného umělého kameniva.

Shrnutí získaných výsledků

Dosažené výsledky a dílčí vyhodnocení jsou předmětem kapitoly (5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VČETNĚ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ).

Pro jednotlivé části lze provést následující shrnutí:

Výroba a zkoušení speciálních betonů

Bylo potvrzeno, že vhodnou volbou umělého pórovitého kameniva (respektive objemové hmotnosti kameniva) nenastane efekt segregace kameniva směrem k povrchu. Lepší tepelně-izolační vlastnosti lehkého samozhutnitelného betonu byly prokázány.

Je možné vyrobit samozhutnitelný beton, který má výborné vlastnosti v čerstvém stavu, zvýšenou pohledovost, ale nižší modul pružnosti betonu. Se zřetelem na mikrostrukturu dochází snadněji k odštěpování povrchových vrstev při teplotním namáhání.

Zásadní vliv na zvýšení viskozity čerstvého betonu má nejenom hmotnostní (objemové) zastoupení vláken, ale i délka a tvar použitých vláken. Poznámka: (nejdelší použitá) velkopřůměrová syntetická makrovlákna způsobila nakypření kameniva již při dávce 2 kg/m^3 .

Vystavení teplotním namáháním na maximální teplotu 1049 °C

Při experimentální činnosti byla veškerá teplotní namáhání realizována na přirozeně vlhkém betonu i přes nebezpečí vzniku explozivního odštěpování.

Bylo potvrzeno, že dominantní vliv na reziduální vlastnosti betonu má rychlost teplotního zatěžování, maximální dosažená teplota, vlhkost, druh kameniva a v neposlední řadě typ speciálního betonu.

Explozivní odštěpování přímo souvisí s mikrostrukturou a transportními mechanismy. V případě vláknobetonů s přidanými polymerními mikrovlákny bylo zabráněno explozivnímu odštěpování. Pasivní požární ochrana byla prokázána zásluhou aplikace vhodných syntetických vláken – byla snížena vnitřní napjatost. Touto modifikací betonu došlo k minimálnímu navýšení nákladů, důsledkem však byla zvýšená pasivní bezpečnost včetně dalších předností vyplývajících z charakteru vláknobetonů.

Je známo, že za určitých předpokladů mohou drátkobetonu oddálit odštěpování betonu. Na základě provedených experimentálních prací lze konstatovat, že zvýšená požární odolnost drátkobetonu se nepotvrdila. Došlo k explozivnímu odštěpování drátkobetonu v porovnání s betonem bez vláken. Předpokládá se, že poškození těles (odprýskávání) bylo způsobeno oxidací ocelových drátků, která zapříčinila rozpínání jednotlivých ocelových vláken. Efekt rostoucího tahového napětí mezi ocelovými drátky a betonem je přisuzován přenosu tepelného toku do ocelových vláken díky vysoké tepelné vodivosti oceli v porovnání s daleko nižší tepelnou vodivostí betonu. Teplotní rozdíly mezi ocelovými vlákny a betonem zapříčinily odštěpování betonu.

Vysokoteplotním namáháním došlo ke změně fyzikálně-chemických vlastností. Potvrdil se efekt dominantního rozpínání kameniva, došlo k viditelnému porušení v místě hranic fází.

Vlivem vypuzení volné a fyzikálně vázané vody nastalo snížení objemové hmotnosti betonu. Úbytkem fyzikálně vázané vody v cementovém tmelu došlo k výraznější degradaci. Strukturální změny zkoumaných speciálních betonů byly znázorněny pomocí SEM a EDXA.

Modul pružnosti betonu, Poissonův součinitel

Jednou ze základních charakteristik ztvrdlého betonu je modul pružnosti. Hodnoty sečnových modulů pružnosti speciálních betonů v tlaku byly stanoveny normově a pomocí korelace digitálního obrazu. Analýza rozptylu výsledků byla provedena testem Anova na hladině významnosti 0,05. Závěry by mohly být odlišné v případě většího statistického souboru dat.

Uplatněním dvou metod bylo prokázáno, že „moderní betony“ mají nižší hodnoty modulu pružnosti. Skutečnost je přisuzována zastoupení vyššího podílu jemných složek a množství (super) plastifikačních přísad.

Bylo potvrzeno, že vysokoteplotním namáháním dochází k výraznějšímu poklesu reziduálního modulu pružnosti oproti pevnostním charakteristikám.

7 POUŽITÁ LITERATURA

7.1 Odborné publikace

AARRE, T. and P. L. DOMONE, 2003. Reference Concretes for Evaluation of Test Methods for SCC. In: *Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland. Publications PRO 33, France. pp. 495–505.

AĪTCIN, Pierre-Claude, 2005. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.

BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ, 2006. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga. ISBN 80-8076-032-2.

BANGI, Mugume Rodgers and Takashi HORIGUCHI, 2011. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. In: *Cement and Concrete Research*. Vol. 41. pp. 1150–1156. DOI.org/10.1016/j.cemconres.2011.07.001.

BAREŠ, Richard A., 1988. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. Redakce stavební literatury. Typové číslo L17-B3-IV-31/72231.

BAŽANT, Z. P. and M. F. KAPLAN, 1996. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*. London: Longman. ISBN 0-582-08626-4.

BAŽANT, Z. P. and L. J. NAJJAR, 1972. Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete. In: *Materials and Structures*, vol. 5, pgs. 3-20.

BENEŠ, M. a R. ŠTEFAN, 2015. Hygro-thermo-mechanical analysis of spalling in concrete walls at high temperatures as a moving boundary problem. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 110-134.

BENEŠ, M. a R. ŠTEFAN, 2013a. Global weak solutions for coupled transport processes in concrete walls at high temperatures. In: *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 93 (4), 233-251.

BENEŠ, M., ŠTEFAN, R. a J. ZEMAN, 2013b. Analysis of coupled transport phenomena in concrete at elevated temperatures. In: *Applied Mathematics and Computation*, 219 (13), 7262-7274.

BELLOVÁ, Mária, 2010. Určenie požiarnej odolnosti betónových konštrukcií. In: *17. Betonárske dny 2010: Sborník ke konferenci*. Hradec Králové: ČBS Servis, s. 308-311. ISBN 978-80-87158-28-9.

BILČÍK, Juraj a Jiří DOHNÁLEK. *Sanace betonových konstrukcí*. Bratislava: Jaga, 2003. ISBN 80-88905-24-9.

BÍLEK, Vlastimil, David PYTLÍK a Markéta BAMBUCHOVÁ, 2017. Comparison of modulus of elasticity and mechanical properties of different concrete types. In: *Innovative materials and technologies for concrete structures : proceedings of the 12th central european congress on concrete engineering*. August 31 - September 1, 2017, Tokaj, Hungary. Budapešť: Budapest University of Technology and Economics. s. 150-154. ISBN 978-963-12-9651-8.

BÍLEK, V., MOSLER, T., KERŠNER, Z., a P. SCHMID, 2002. The possibility of self-curing concrete. In: *Proceeding of the International Conference*, Dundee, Scotland 2002, part Innovations and Developments In Concrete Materials And Constructions, Thomas Telford, pp. 51 – 60. ISBN: 0-7277-3179-3.

BORNERT, M. et al., 2009. Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results, *Exp. Mech.*, Vol. 49(3), pp. 353–370.

- BOŠNJAK, J., J. OŽBOLT, A. SHARMA a G. PERIŠKIĆ, 2013. Permeability of Concrete at High Temperatures and Modelling of Explosive Spalling. In: *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures: VIII International Conference*. Spain: Concrete Institute, s. 1-8. FraMCos, 8. Dostupné z: <http://www.framcos.org/FraMCoS-8/p363.pdf>.
- BOSTRÖM, L. a R. JANSSON, 2007. Fire resistance in Durability of Self-Compacting Concrete. In: *RILEM State of the art Report*. G. De Schutter, K. Audenaert. pp. 142-151.
- CAMPBELL, Donald H., 1999. *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker: SP030*. Second Edition. United States of America: Portland Cement Association. ISBN - 0-89312-084-7.
- CHAN, Y.N., G.F. PENG, and M. ANSON, 1999. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. In: *Cement and Concrete Composites*. vol. 21, pp. 23–27. DOI 10.1016/S0958-9465(98)00034-1.
- CHU, T. C., RANSON, W. F. and SUTTON, M. A., 1985. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech.* 25(3), 232–44.
- COLLEPARDI, Mario, 2009. *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- CLEMENT, Frank a Michal ZÁMEČNÍK, 2006. Alternativy protipožární ochrany. In: *4. konference speciální betony: Vlastnosti - technologie - aplikace: sborník příspěvků*. Praha: Sekurkon Ostrava, s. 56-70. ISBN 80-86604-27-6.
- CRAMMOND, G. et al., 2013. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51(12), pp. 1368–1378, ISSN 0143-8166, DOI <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.03.014>.
- CRUZ, Carlos R., 1966. Elastic Properties of Concrete at High Temperatures. *Journal, PCA Research and Development Laboratories*, V. 8, No. 1, pp. 37–45.
- ČAJKA, R., P. ŽÍDKOVÁ a K. JORDAN, 2004. Analýza teplotního a mechanického chování tunelového ostění při požáru. In: *Betonové konstrukce v extrémních podmínkách: Sborník k semináři*. Praha: Česká betonářská společnost, s. 34-42. ISBN 80-903501-0-0.
- ČAJKA, Radim a Pavlína MATEČKOVÁ, 2008. Požární odolnost panelu Spiroll podle evropských norem EN a P ENV. In: *7. konference: Technologie betonu (2008): Sborník přednášek*. Praha: ČBS Servis, s. 131-136. ISBN 978-80-87158-09-8.
- DUHOŇ, Miroslav, 2017. *Experimentální analýza samozhutitelného betonu*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- ĐURICA, T., V. HUBOVÁ, A. SIČÁKOVÁ, E. TERPÁKOVÁ a J. SLIMÁK, 2003. Betóny ve vysokých teplotách. In: *Fibre concrete & high performance concrete 2003: 2. mezinárodní sympozium FC & HPC 2003: sborník příspěvků*. Praha: Sekurkon, s. 117-122. ISBN 80-86604-08-X.
- FADRHONS, Jan, 2018. *Experimentální analýza způsobů vyztužování betonu čedičovou tkaninou*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

- FIALA, Ctislav, 2006. *Samozhutnitelný beton vyztužený vlákny: Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete: Vliv vláken na smršťování samozhutnitelného betonu*. [online]. 29. května 2006. [cit. 2017-05-07]. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <http://www.ctislav.wz.cz/publ/SCC-vlakna-smrsteni.pdf>.
- GARTNER, O., NĚMCOVÁ, D., 1980. *Odolnost betonu proti účinkům požáru*. Brno: SVK - odbor technické literatury Brno. Číslo publikace SVK 26/80.
- GOREMINKINS, V., BLESÁK, L., NOVÁK, J., and F. WALD, 2015. *To testing of steel fibre reinforced concrete at elevated temperature*. Proceedings of the International Conference in Dubrovnik, 15-16 October 2015.
- GOSAIN, N. K., R. F. DREXLER a D. CHOUDHURI, 2008. Evaluation and Repair of Fire-Damaged Buildings. In: *Structure magazine*, s. 18-22. Dostupné z: <http://www.structurearchives.org/Archives/2008-9/C-STRForensics-Fire-Gosain-Sept08.pdf>.
- HAGER, I., 2004. *Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (In French).
- HÁJKOVÁ, Kateřina, 2015. *Porovnání vlivu příměsí na trvanlivost betonů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- HELA, Rudolf, 2010. *Problematika čerstvých samozhutnitelných betonů*. Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství. Brno: VUTIUM. ISSN 1213-418X. ISBN 978-80-214-4199-6.
- HELA, R., HUBERTOVIČ, M., 2007. Ready mixed self compacting concrete. In: *Innovations in Structural Engineering and Construction*. 1. Melbourne, Talylor&Francis London. 2007. p. 477–483. ISBN 978-0-415-45754-5.
- HELA, R., P. KLABLENA, J. KRÁTKÝ, J. PROCHÁZKA, P. ŠTĚPÁNEK a J. VÁCHA, 2006. *Betonové průmyslové podlahy*. Praha: Informační centrum ČKAIT. ISBN 80-86769-73-9.
- HELA, Rudolf, 2002. *Intenzifikace zhutňování betonových směsí*. Zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUTIUM. ISBN 80-214-2227-0.
- HEUFERS, H., 1979. Leichtbeton. In: *Zement-Taschenbuch 1979/80*. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf.
- HERKA, Petr, 2003. Odolnost vláknobetonů vůči působení vysoké teploty - požární odolnost. In: *2. mezinárodní sympozium FC & HPC 2003: sborník příspěvků*. Praha: Sekurkon, s. 275-279. ISBN 80-86604-08-X.
- HERKA, Petr, 2004. Odolnost vláknobetonu vůči působení vysoké teploty - požární odolnost. In: *Betonové konstrukce v extrémních podmínkách: Sborník k semináři*. Praha: Česká betonářská společnost, s. 50-57. ISBN 80-903501-0-0.
- HILAR, M., BRAUN, V., BUTOVIČ, A., HORÁK, V., POLÁK, P., SVOBODA, P. a K. TRTÍK, 2008. *Stríkaný beton v podzemním stavitelství*. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, Vydání 1., sv. 3. ISBN 978-80-254-1262-6.
- HORA, Michal, 2012. *Požární odolnost prvků z lehkého betonu*. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Jaroslav Procházka.

- HUBERTOVIÁ, M.; BROŽOVSKÝ, J., 2006. Porovnání dynamických a statických modulů lehkých samozhutnitelných betonů. In *Construmat 2006 conference about structural materials*. 1. Žilina. Žilinská univerzita v Žilině, s. 89–92. ISBN: 80-8069-747-7.
- HUDOBA, Igor, 2008. *Vysokohodnotný betón: Materiály, vlastnosti, výroba, využitie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve STU. ISBN 978-80-227-2836-2.
- INGHAM, Jeremy P., 2009. Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. *Materials characterization: An International Journal on Materials Structure and Behavior*, Volume 60, Issue 7, s. 700-709. ISSN 1044-5803.
- JIROVSKÝ, Leoš, 2015. *Experimentální porovnání metod destruktivního a nedestruktivního zkoušení betonů a vláknobetonů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- KHAYAT, Kamal. (1999). Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*. 96. 346-353.
- KHOURY, G. A, 1992. Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment. In: *Magazine of Concrete Research*, Volume 44, Issue 161, s. 291-309. ISSN 0024-9831.
- KOCÁB, Dalibor, 2016. *Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod*. Brno. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Petr Cirkle.
- KOLÍSKO, Jiří, 2008. *Habilitační přednášky: Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04072-0.
- KOSINKA, Filip, 2018. *Drátkobeton – porovnání vlivu délky drátů na pevnostní charakteristiky*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA, 1999a. *Drátkobetonové konstrukce: Úvodní část a příklady použití: Směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.
- KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA, 1999b. *Komentář a příklady ke směrnici pro drátkobetonové konstrukce: Commentary and Examples to Steel Fibre Reinforced Concrete Structures Directive*. Praha: Sdružení KTV.
- KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 978-80-7080-568-8.
- KRENCHL, H., 1964. *Fibre reinforcement*. 1. ed. Copenhagen.
- KUČERA, P., T. ČESELKÁ a P. MATEČKOVÁ, 2010. *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. SPBI Spektrum: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 71. ISBN 978-80-7385-094-4.
- KUČERA, Petr a Isabela BRADÁČOVÁ, 2012. Rozbor návrhových požárních scénářů tunelových staveb. In: 19. betonářské dny 2012: Sborník příspěvků. Hradec Králové: ČBS Servis, s. 219-224. ISBN 978-80-87158-32-6.
- KUPILÍK, Václav, 2006. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada. ISBN 80-247-1329-2.

- KUPILÍK, Václav, 2004. *Konstrukce pozemních staveb 80: Požární bezpečnost staveb: Přednášky*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 80-01-03056-3.
- LANGER, Jaroslav a Jaroslav PROCHÁZKA, 2004. Zkoušky požární odolnosti betonových prvků a konstrukcí. In: *Betonové konstrukce v extrémních podmínkách: Sborník přednášek semináře*. Praha: Česká betonářská společnost, s. 43-49. ISBN 80-903501-0-0.
- LAU, A. and M. ANSON, 2006. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. In: *Cement and Concrete Research*. Vol. 36. pp. 1698–1707.
- LEE, Joongwon, Kwangho CHOI a Kappyo HONG, 2010. The effect of high temperature on color and residual compressive strength of concrete. In: *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures: High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications*. Korea: Concrete Institute, s. 1772-1775. FraMCos, 7. ISBN 978-89-5708-182-2. Dostupné z: <http://framcos.org/FraMCoS-7/14-11.pdf>.
- LENNON, T., 2004. Fire safety of concrete structures: background to BS 8110 fire design, Building Research Establishment (BRE), Garston, Watford, UK.
- LI, W. N. et al., 2012. Test Research on Elastic Modulus and Poisson's Ratios of Long Age Recycled Aggregate Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 174–177, pp. 1051–1055.
- LOGAN, A. et al., 2009. Short-Term Mechanical Properties of High-Strength Concrete. *Materials Journal*, Vol. 106 (5), DOI 10.14359/51663141, pp. 413–418.
- LUKÁŠ, J., BRANDŠTETR, J., MELCHER, J., KRÁTKÝ, J., KARMAZÍNOVÁ, M., VYMAZAL, T. a V. BÍLEK, 2003. Složení a vlastnosti některých typů vysokohodnotných a samozhutňujících betonů. In: *Beton TKS*, s. 10–13, 16. Praha: Beton TKS. ISSN 1213-3116, 2003
- LUKŠ, Jiří, Jindřich CIGÁNEK a Iveta SKOTNICOVÁ, 2003. Vlastnosti vysokohodnotných drátkobetonů při teplené expozici. In: *Fibre concrete & high performance concrete 2003: 2. mezinárodní symposium FC & HPC 2003: sborník příspěvků*. Praha: Sekurkon, s. 110-116. ISBN 80-86604-08-X.
- LYER, Matěj, 2018. *Konstrukční lehké betony s důrazem na použitý druh kameniva*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- MA, Q., R. GUO, Z. ZHAO, Z. LIN and K. HE, 2015. Mechanical properties of concrete at high temperature – A review. In: *Construction and Building Materials*. Vol. 93. pp. 371–383, ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131.
- MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA, 2008. *Polymery a kompozity s polymerní maticí: Nauka o materiálu - 4. část*. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-03927-4.
- MATESOVÁ, Dita, 2005. *Fracture / mechanical parameters of quasibrittle materials at high temperatures for numerical modelling*. Brno. Dissertation thesis. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering. Supervisor Zbyněk Keršner. (In English).
- MATESOVÁ, D., BONEN, D. and S. P. SHAH, 2006. Factors affecting the resistance of cementitious materials at high temperatures and medium heating rates. In: *Materials and Structures*. Vol. 39. DOI.org/10.1007/s11527-005-9041-4. Online ISSN 1871-6873. Print ISSN 1359-5997.
- MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. *Atmosférická koroze betonů*. Praha: IKAS, 1998. ISBN 80-902558-0-9.

- MEHTA, P. Kumar, MONTEIRO, Paulo J. M., 2014. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.
- MISÁK, P. a T. VYMAZAL, 2009, *Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku*. In: Beton TKS, 02/2009. Praha: Beton TKS. ISSN 1213-3116.
- NEDBAL, František, Milada MAZUROVÁ a Karel TRTÍK, 2004. *Speciální betony*. II. vydání: Aktualizovaný dotisk 2006. Praha: CZ SVB. ISBN 80-238-2678-6.
- NETOPILOVÁ, M., D. KAČÍRKOVÁ a A. OSVALD, 2010. *Reakce stavebních výrobků na oheň*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. SPBI Spektrum: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 72. ISBN 978-80-7385-093-7.
- OKAMURA, H., 1997. Self-Compacting High-Performance Concrete. In: *Concrete International*. Vol. 19, No. 7, pp. 50–54.
- OKAMURA, H., and K. OZAWA, 1995. *Mix Design Method for Self-Compacting Concrete*. Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers, 25, pp. 107–120.
- PARRA, C., VALCUENDE, M. and F. GÓMEZ, 2011. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. In: *Construction and Building Materials* [online]. 25(1). pp. 201-207 [cit. 2014-10-24]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037. ISSN: 09500618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810002862?via%3Dihub>.
- PAVLÍKOVÁ, M., Z. PAVLÍK a J. HOŠEK, 2011. *Materiálové inženýrství I*. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04932-7.
- PAVLÍKOVÁ, Milena a Martin KEPPERT. *Chemie: chemie stavebních materiálů*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04237-3.
- PETERS, W. H., RANSON, W. F., 1982. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Eng.* 21(3): pp. 427–431.
- PEŠTA, Jan, David TESAŘ a Viktor ZWIENER. *Diagnostika staveb: hydroizolace, termografie, blower door test, akustika*. Praha: Dektrade, 2011. ISBN 978-80-87215-09-8.
- PHILLO. Robert, 1958. Some Physical Properties of Concrete at High Temperatures. *ACI JOURNAL, Proceedings* Vol. 54. No. 10, pp. 857-864.
- PROCHÁZKA, J., ŠTEFAN, R. a M. BENEŠ, 2011. *Software pro modelování odštěpování betonu při požáru*. Beton TKS, roč. 11, č. 6, s. 86-89. ISSN 1213-3116.
- PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ, 2010. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04613-5.
- PROCHÁZKA, Jaroslav a Radek ŠTEFAN, 2009. Odštěpování betonu v extrémních teplotních podmínkách. In: *16. Betonářské dny 2009: Sborník ke konferenci*. Hradec Králové: ČBS Servis, s. 431-434. ISBN 978-80-87158-20-3.
- PYTLÍK, Petr, 2000. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ, 2002. *Stavební keramika: Technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm. ISBN 80-7204-234-3.

- RADOUŠ, Michal, 2014. *Experimentální analýza vysokopevnostních betonů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- RADOUŠ, Michal, 2016. *Experimentální analýza ultra-vysokopevnostních betonů*. Pardubice. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- REICHEL, Vladimír, 1979. *Navrhování požární odolnosti staveb: Díl II*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. SIP-41757/03541-05/91-06-052-79.
- SCHULZE, W., 1984. *Der Baustoff Beton. Bd. 1, 8 Aflg.*, VEB Verlag für Bauwesen.
- SCHUTTER, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMONE, John GIBBS a Rudolf HELA, 2008. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS Servis. ISBN 978-1904445-30-2.
- SHAO, X. et al., 2016. Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components. In: *Measurement Science and Technology*, Vol. 27.
- SHEN, B., Paulino, G. H., 2011. *Identification of cohesive zone model and elastic parameters of fiber-reinforced cementitious composites using digital image correlation and a hybrid inverse technique*. Cement and Concrete Composites, vol. 33, no. 5, s. 572-585.
- SHEN, B., 2009. *Functionally graded fiber-reinforced cementitious composites – manufacturing and extraction of cohesive fracture properties using finite element and digital image correlation*, Ph.D. Thesis. United States, University of Illinois at Urbana–Champaign.
- SLOVÁČEK, Matěj, 2014. *Porovnání vlastností drátkobetonů a provzdušněných drátkobetonů*. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- SLOVÁČEK, Matěj, 2016. *Analýza vlastností vodonepropustných drátkobetonů pro betonová ostění tunelových staveb*. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- SUKONTASUKKUL, P., W. POMCHIENGPIN a SONGPIRIYAKIJ, 2010. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. In: *Construction and Building Materials*. Volume 24, Issue 10, s. 1967-1974. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810001236>.
- SVOZIL, Pavel, 1999. *Betonárny a životní prostředí*. Praha: CZ SVB. ISBN 80-238-4549-7.
- SVOBODA, Jiří a Michal HNILČKA, 2014. Požár nákladního vozidla v tunelu Lochkov: Truck Fire in Lochkov Tunnel. *Tunel: Časopis české tunelářské asociace a Slovenskej tunelárskej asociácie ITA-AITES*. Praha: Česká tunelářská asociace a Slovenská tunelárska asociácia ITA-AITES, 2014(2), 56-64. ISSN 1211-0728.
- SVOBODA, Pavel a Josef DOLEŽAL, 2007. *Průmyslové podlahy a podlahy v objektech pozemních staveb*. Bratislava: Jaga Group. ISBN 978-80-8076-054-0.
- ŠTEFAN, Radek. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures: Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling*, 2015. Disertační práce, Praha. Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Concrete and Masonry Structures. Vedoucí práce Jaroslav Procházka.
- TELFORD, T., 1992. *Durable Concrete Structures*. CEB. Printed by Butler and Tanner in Great Britain.

TIŠLEROVÁ, Lenka, 2012. *Využití alkalicky aktivovaných betonů u malých mostních objektů, včetně použití u malých integrovaných mostů*. Pardubice. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Jiří Pokorný.

UYSAL, Mucteba, 2012. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. In: *Construction and Building Materials*. Vol. 26. pp. 701–706. DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.077.

VANDEWALLE, L. et al., 2002. *Recommendations of RILEM TC162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: bending test (final recommendation)*, *Mater. Struct.* 35 (2002), 579-582.

VÁLEK, Jaroslav, 2010. Porovnání vlastností alkalicky aktivovaných materiálů s běžnými cementovými betony po zatížení vysokými teplotami. In: *17. Betonářské dny 2010: Sborník ke konferenci*. Hradec Králové: ČBS Servis, s. 464-467. ISBN 978-80-87158-28-9.

VAVŘÍN, František a Karel RETZL, 1987. *Ochrana stavebního díla proti korozi*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. Redakce stavební literatury. Typové číslo L17-B3-IV-31/72270.

VINKLER, Marek, 2017. *Experimental and Numerical Analysis of Drying and Shrinkage of Concrete*. Praha. Dissertation thesis. Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Concrete and Masonry Structures. Supervisor Jaroslav Procházka. (In English).

VÍTEK, J. L., BARTOS, P. J. M., 2001, *Samozhutnitelný beton*. In: *Beton TKS*, 1/2001, Praha: Beton TKS. ISSN 1213-3116.

VÍTEK, J. L., 2007. Experimentální výzkum vlivu požáru na tunelové ostění, In: *14. Betonářské dny 2007: Sborník konference*. Hradec Králové: ČBS Servis s.r.o., s. 80-85, ISBN 978-80-87158-04-3.

VOVES, Bohumír, 1983. *Vliv požáru na konstrukce z předpjatého betonu*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. Redakce stavební literatury. Typové číslo L17-B3-IV-41/72235.

VYŠVAŘIL, M., P. BAYER a P. ROVNANÍKOVÁ, 2010. Vlastnosti rehydratovaných cementových past po expozici vysokým teplotám. In: *17. Betonářské dny 2010: Sborník ke konferenci*. Hradec Králové: ČBS Servis, s. 479-483. ISBN 978-80-87158-28-9.

WANG, H. and LI, Q., 2007. Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 44(5), pp. 1370–1379, ISSN 0020-7683, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.06.028>.

WALD, F., M. BENEŠ, M. CHLADNÁ, J. KARPAŠ, M. HOLICKÝ, P. KUKLÍK, L. KROUPA, J. LANGER, J. PROCHÁZKA, Z. SOKOL, J. STUDNÍČKA a A. TICHÁ, 2005. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 80-01-03157-8.

WU, Z., RONG, H., ZHENG, J., XU, F., DONG, W., 2011. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique. *Eng. Fract. Mech.* 78, pp. 2978–90.

ZOBAL, Ondřej a Pavel PADEVĚT, 2010. Vysoké teploty: Vliv na vlastnosti cementové pasty. In: *17. Betonářské dny 2010: Sborník ke konferenci*. Hradec Králové: ČBS Servis, s. 495-498. ISBN 978-80-87158-28-9.

ZOUFAL, R., M. BAUMA, J. KARPAŠ a P. KUKLÍK, 2009. *Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí podle eurokódů*. Praha: PAVUS, Centrum technické normalizace pro požární ochranu. ISBN 978-80-904481-0-0.

7.2 Normy

ČSN EN 1008, 2003. *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 1097-3, 1999. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 1097-5, 2008. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 1097-6, 2014. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-1, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-2, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-4, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 4: Stupeň zhutnitelnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-5, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-6, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-7, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-8, 2010. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-9, 2010. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 9: Samozhutnitelný beton - Zkouška V-nálevkou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-10, 2010. *Zkouška čerstvého betonu - Část 10: Samozhutnitelný beton - Zkouška L-truhlíkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-11, 2010. *Zkouška čerstvého betonu - Část 11: Samozhutnitelný beton - Zkouška segregace při prosévání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12350-12, 2010. *Zkouška čerstvého betonu - Část 12: Samozhutnitelný beton - Zkouška J-kroužkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-1, 2013. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-2, 2009. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-3, 2009. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-3: Změna Z1, 2012. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles: Změna : Z1*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-5, 2009. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-7, 2009. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12390-13, 2014. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12504-1, 2009. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12504-4, 2005. *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 12620+A1, 2008. *Kamenivo do betonu*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 13055, 2017. *Pórovité kamenivo*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 13501-1+A1, 2010. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 13501-2+A1, 2010. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1363-1, 2013. *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1363-2, 2000. *Zkoušení požární odolnosti - Část 2: Alternativní a doplňkové postupy*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 1363-3, 1999. *Zkoušení požární odolnosti - Část 3: Ověřování charakteristik pecí*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 1364-1, 2017. *Zkoušení požární odolnosti nenosných prvků - Část 1: Stěny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1364-2, 2018. *Zkoušení požární odolnosti nenosných prvků - Část 2: Podhledy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1364-3, 2016. *Zkoušení požární odolnosti nenosných prvků - Část 3: Závěsové obvodové stěny - Celá sestava (dokončená montáž)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1364-4, 2016. *Zkoušení požární odolnosti nenosných prvků - Část 4: Závěsové obvodové stěny - Částečná sestava*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1364-5, 2017. *Zkoušení požární odolnosti nenosných prvků - Část 5: Větrací mřížky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1365-1, 2013. *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 1: Stěny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- ČSN EN 1365-2, 2017. *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 2: Stropy a střechy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 1365-3, 2000. *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 3: Nosníky*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1365-4, 2000. *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 4: Sloupy*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1365-5, 2005. *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 5: Balkony a rampy*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1365-6, 2005. *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 6: Schodiště*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 13670, 2010. *Provádění betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 14488-3, 2006. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14488-7, 2006. *Zkoušení stříkaného betonu - Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14650, 2006. *Betonové prefabrikáty - Obecná pravidla pro řízení výroby betonu s kovovými vlákny*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14651 +A1, 2008. *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny - Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14721+A1, 2008. *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny - Měření obsahu vláken v čerstvém a ztvrdlém betonu*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14845-1, 2008. *Zkušební metody pro vlákna v betonu - Část 1: Referenční betony*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14845-2, 2007. *Zkušební metody pro vlákna do betonu - Část 2: Vliv na beton*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14889-1, 2007. *Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 14889-2, 2007. *Vlákna do betonu - Část 2: Polymerová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 196-1, 2005. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 197-1 ed. 2, 2012. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 197-2, 2014. *Cement - Část 2: Hodnocení shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 1990, 2004. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1990: Změna Z1, 2010. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- ČSN EN 1991-1-2, 2004. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1992-1-1 ed. 2, 2011. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby: ed. 2*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 1992-1-2, 2006. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1992-2, 2007. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 1992-3, 2007. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 3: Nádrže na kapaliny a zásobníky*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 206+A1, 2018. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 206-9, 2010. *Beton - Část 9: Doplnková pravidla pro samozhutnitelný beton (SCC)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, (zrušená).
- ČSN 73 0802, 2009. *Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 73 0804, 2010. *Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 73 0810, 2016. *Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 73 0821, 1974. *Požární bezpečnost staveb. Požární odolnost stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství norem, (zrušená).
- ČSN 73 0851, 1984. *Stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství norem, (zrušená).
- ČSN 73 1230, 1990. *Navrhování betonových konstrukcí pro zvýšené a vyšší teploty*. Praha: Český normalizační institut, (zrušená).
- ČSN 73 1326, 1984. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*.
- ČSN 73 1371, 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 73 1372, 2012. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 73 6174, 1994. *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN ISO 12570, 2001. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN ISO 13943, 2011. *Požární bezpečnost – Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN ISO 9513, 2013. *Kovové materiály - Kalibrace průtahoměrových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN ISO 1920-10, 2016. *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN ISO 6784, 1993. *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, (zrušená).

ČSN ISO 8421-1, 1996. *Požární ochrana - Slovník - Část 1: Obecné termíny a jevy požárů*. Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 13381-3, 2015. *Zkušební metody pro stanovení příspěvku k požární odolnosti konstrukčních prvků - Část 3: Ochrana aplikovaná na betonové prvky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, (bude zrušena k 1. 10. 2018).

ČSN EN 13381-5, 2015. *Zkušební metody pro stanovení příspěvku k požární odolnosti konstrukčních prvků - Část 5: Ochrana aplikovaná na spřažené ocelobetonové prvky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN P 73 2404, 2016. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN P 73 2450, 2015. *Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN P 73 2451, 2015. *Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN P 73 2452, 2015. *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

7.3 Ostatní standardy, TP, TKP, mezinárodní doporučení, předpisy

ACI 213R, 2014. *Guide for Structure Lightweight-Aggregate Concrete*. American Concrete Institute. State of the Art, USA.

ACI 216R-89, 1994. *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements*. American Concrete Institute. State of the Art, USA.

ACI 233R, 2017. *Guide to the Use of Slag cement in concrete and mortar*. American Concrete Institute. State of the Art, USA.

ACI SP-140, 1993. *High performance concrete in severe environments*. American Concrete Institute. State of the Art, USA.

ACI 363, 1992. *Report on High-Strength Concrete*. American Concrete Institute. State of the Art, Detroit, USA.

ACI 544, 2002. *Report on Fiber Reinforced Concrete*. American Concrete Institute. State of the Art, USA.

ASTM C 173. *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method*.

ASTM C 23. *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*.

- ASTM C 469. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.*
- ASTM E 84. *Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials.*
- ASTM E 119. *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.*
- Bulletin D'Information, 1991. No. 208: *Fire Design of Concrete Structures.* Comite Euro-International Du Beton (CEB), Lausanne, Switzerland.
- BS 8110-1:1997. *Structural use of concrete. Part 1: Code of practice for design and construction.* British Standard Institution, London. ISBN 978-0-580-59893-7.
- BS 8110-2:1985. *Structural use of concrete. Part 2: Code of practice for special circumstances.* British Standard Institution, London. ISBN 0-580-14490-9.
- Concrete Society Report: TR34, 2003. *Concrete industrial ground floors: A guide to design and construction.* Concrete Society. Third Edition. UK. ISBN 1 904482 01 5. [online], [cit. 2016-07-06]. Dostupné z: http://dcp.bg/pages/bg_prod410/TR34%20Concrete_Industrial_Ground_Floors_TR34-2003.pdf.
- Evropská směrnice pro samozhutnitelný beton: Specifikace, výroba, použití*, 2005. [online], [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: <http://www.svb.cz/assets/pdf/smernicescc.pdf>.
- Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete: Report of a Concrete Society Working Group*, 2007. United Kingdom: The Concrete Society. Technical Report, No. 65. ISBN 1-90-4482-34-1.
- IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry, 1985 In: *Recommendations. Pure and Applied Chemistry*, 1985.
- Model Code 1990: CEB-FIP*, 1993. London: Bulletin D'Information. ISBN 978-0-7277-1696-5
- Model Code 2010: Final draft: Volume 1*, 2012. Germany: Ernst. fib Bulletin, 65. ISBN 978-2-88394-105-2.
- Model Code 2010: Final draft: Volume 2*, 2012. Germany: Ernst. fib Bulletin, 66. ISBN 978-2-88394-106-9.
- ÖVBB - Richtlinie Faserbeton*, 2002. Österreichische Vereinigung für Beton - und Bautechnik.
- ÖVBB - Richtlinie Innenschalenbeton*, 2012. Österreichische Vereinigung für Beton - und Bautechnik, Wien.
- RakMK B4, 1991. *High Strength Concrete Supplementary Rules and Fire Design.* Concrete Association of Finland.
- RILEM TC 44-PHT. *Properties of materials at high temperatures.*
- RILEM TC 74-THT. *Test methods for high temperature properties.*
- RILEM TC 162-TDF. *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete sigma-epsilon-design method: Final Recommendation.*
- RILEM TC 129-MHT. *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures.*
- Sichtbeton. Merkblatt für Sichtbetonbauten: cemsuisse-Merkblatt*, 2012. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein. MB 02. Bern: BETONSUISSE.

Stahlfaserbeton: Fassung, 2001. DBV-Merkblatt. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V., 2001.

STN 73 0821, 1973. *Požiarna bezpečnosť stavieb. Požiarna odolnosť stavebných konštrukcií.*

Technická pravidla ČBS 03: Pohledový beton. 2018. 2., přepracované vydání, Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906759-3-3.

Technická pravidla ČBS 04: Vodonepropustné betonové konstrukce: překlad německé směrnice a komentáře. 2015. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. 1. vydání. ISBN 978-80-903806-9-1.

Technická pravidla ČBS 05: Modul pružnosti betonu. 2016. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906097-5-4.

The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, 2005. [online], [cit. 2015-07-06]. Dostupné z: <http://efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.

TP 187, 2008: Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací. In: *Technické podmínky.* Praha: Ministerstvo dopravy ČR: Odbor infrastruktury.

TKP 17, 2002. Technické kvalitativní podmínky staveb Českých drah: Kapitola 17: Beton pro konstrukce. Praha: České dráhy.

TKP 18, 2016. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy.

TKP 31: Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 31: Opravy betonových konstrukcí, 2008. Praha: Ministerstvo dopravy (aktuálně probíhá aktualizace).

Vyhláška č. 137/1998 Sb., o obecných technických požadavcích na výstavbu.

Vyhláška MV č. 246/2001 Sb. o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci).

Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně.

Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon).

Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky.

7.4 Dokumenty dostupné z www

Mercury RT v2.5: Reference Handbook, 2017. In: *Sobriety s.r.o.: Optické systémy.* [online]. Kuřim: Sobriety. [cit. 2017-09-01]. Dostupné z:

http://www.mercuryprogram.eu/phocadownload/demo/ReferenceHandbook_2.5.pdf.

Popis produktu RUGEN, 2013. In: *Ekostat, a.s.* [online]. [cit. 2013-02-02]. Dostupné z:

http://ekostat.cz/app/downloads/rugen_popis.pdf.

Přenosné teploměry a záznamníky dat na SD kartu, 2018. *OMEGA Engineering: Termočlánky, Tlakové snímače, Průtokoměry, PID regulátory* [online]. Česko, c1995-2018 [cit. 2018-08-18].

Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/pptst/RDXL-SD_SERIES.html.

VACHUŠKA, Václav, 2010. 1. Odborný seminář: Enviromentální prohlášení o produktu se zaměřením na oblast stavebnictví: EPD pro umělé kamenivo Rugen RU. *Výzkumný ústav pozemních staveb: Certifikační společnost s.r.o., VÚPS Praha: Autorizovaná, notifikovaná a akreditovaná organizace.* [online]. Roč. 2010, č. 1 [cit. 2014-08-06]. Dostupné z:

http://www.vups.cz/download/9_VUPS-1.EPD_Vachuska%20-%20Pripadova%20studie%20Corydoras.pdf.

Vysoce odolné sondy s přechodkou: Super OMEGACLAD XL, 2018. *OMEGA Engineering: Termočlánky, Tlakové snímače, Průtokoměry, PID regulátory* [online]. Česko, c1995-2018 [cit. 2018-08-18]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/pptst/RDXL-SD_SERIES.html

7.5 Ostatní

Receptura SCC betonu C 45/55 - XF2 (CZ, F1.2) - Cl 0,2 - Dmax16 - SCC (SF2)

Receptura SCC betonu C 30/37 - XF2(CZ, F) - Cl 0,2 - Dmax16 - SCC (SF2)

Receptura SCC betonu LC 25/28 D 1,8 - XC1 (CZ, F.1.1) - Cl 0,2 - Dmax16 - SCC (SF1)

Receptura betonu C 30/37 - XF4 (F.1.2) - Cl 0,2 - Dmax16 - S3

Receptura betonu C 25/30 - XF3 (F.1.2) - Cl 0,2 - Dmax16 - S3

Technické listy společnosti Bekaert Petrovice s.r.o.

Technické listy společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s.

Technické listy společnosti Krampe Harex CZ s.r.o.

Technické listy společnosti KORDÁRNA Plus a.s.

Technické listy společnosti CHARLES - Kompozity s.r.o.

Technické listy společnosti Sklocement Beneš s.r.o.

Technické listy společnosti TRITREG-TŘINEC, s.r.o.

Technické listy společnosti Ekostat a.s.

8 PUBLIKAČNÍ ČINNOST DOKTORANDA SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTAČNÍ PRÁCE

SUCHÁNEK, Vladimír, Jiří POKORNÝ a Petr ŠKRÁČEK, 2011. Protihlukové stěny na mostech. In: *Mosty 2011: 16. mezinárodní symposium: sborník příspěvků*. Brno: Sekurkon, s. 245-250. ISBN 978-80-86604-52-7.

DOLEŽEL, Vladimír, Jiří POKORNÝ a Vladimír SUCHÁNEK, 2012a. Posouzení odolnosti ostění podzemních staveb na zmenšeném modelu tunelu při extrémním zatížení - výbuchu. In: *Technologie betonu 2012: 10. konference*. Praha: ČBS Servis – poster.

DOLEŽEL, Vladimír, Jiří POKORNÝ a Vladimír SUCHÁNEK, 2012b. Vyhodnocení zkoušek odolnosti ostění podzemních staveb při výbuchu. In: *19. betonářské dny 2012: Sborník příspěvků*. Praha: ČBS Servis, s. 379-385. ISBN 978-80-87158-32-6.

SUCHÁNEK, Vladimír a Jiří POKORNÝ, 2012c. *Betonové mosty II* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: http://vladimirsuchanek.upce.cz/files/Betonove_mosty_2.pdf

DOLEŽEL, Vladimír, Jiří POKORNÝ a Vladimír SUCHÁNEK, 2013a. Testing the Model of the Rings of Cement Composites in the Blast. In: *Scientific Papers of the University of Pardubice: Sborník vědeckých prací Univerzity Pardubice*. Pardubice: Univerzita Pardubice, s. 95-104. Series B: Dopravní fakulta Jana Pernera, 18 (2012). ISBN 978-80-7395-684-4 ISSN 1211-6610.

SUCHÁNEK, Vladimír a Jiří POKORNÝ, 2013b. Experimentální výzkum odolnosti vybraných nosných kompozitních materiálů při působení požáru. In: *Mosty 2013: 18. mezinárodní symposium: sborník příspěvků*. Brno: Sekurkon, s. 188-193. ISBN 978-80-86604-60-2.

SUCHÁNEK, Vladimír a Jiří POKORNÝ, 2013c. Analýza odolnosti betonových kompozitních materiálů vůči působení vysokých teplot. In: *20. Betonářské dny 2013: Sborník ke konferenci*. Praha: ČBS Servis, s. 167-172. ISBN 978-80-87158-34-0.

SUCHÁNEK, Vladimír a Michal RADOUŠ, 2014a. Experimentální analýza navrženého vysokopevnostního betonu. In: *21. Betonářské dny 2014: Sborník ke konferenci*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-903806-7-7.

SUCHÁNEK, Vladimír a Matěj SLOVÁČEK, 2014b. Úprava vlastností čerstvých betonů přimícháním přísad a drátků. In: *21. Betonářské dny 2014: Sborník ke konferenci*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-903806-7-7.

SUCHÁNEK, Vladimír, 2014c. *Analýza vlivu extrémních teplotních namáhání na nosné kompozitní materiály*. Pardubice. Odborná písemná práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Jiří Pokorný.

SUCHÁNEK, Vladimír a Michal RADOUŠ, 2015a. Experimental Analysis of the Proposed High-Strength Concrete. In: *Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014*. Vol. 1106. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, pp. 77-80. ISBN 978-0-00003-132-7. ISSN print 1022-6680. ISSN cd 1022-6680. ISSN web 1662-8985. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.77. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.1106.77>

SUCHÁNEK, Vladimír a Matěj SLOVÁČEK, 2015b. Edit the Properties of the Fresh Concrete Admixing Additives and Steel Fibres. In: *Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014*. Vol. 1106. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, pp. 73-76. ISBN 978-0-00003-132-7. ISSN print

- 1022-6680. ISSN cd 1022-6680. ISSN web 1662-8985. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.73. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.1106.73>
- SUCHÁNEK, Vladimír a Jiří POKORNÝ, 2015c. Experimental Investigation of the Properties of the Special Concrete After the Incident – After Fire. In: *6th International Scientific Conference: Conference Proceedings*. Pardubice: Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, s. 461-474. ISBN 978-80-7395-924-1.
- SUCHÁNEK, Vladimír a Kateřina HÁJKOVÁ, 2015d. Experimentální analýza vlivu příměsí na trvanlivost betonu. In: *22. Betonářské dny 2015: Sborník ke konferenci*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906097-0-9.
- SUCHÁNEK, Vladimír, Leoš JIROVSKÝ a Tomáš FRONTZ, 2015e. Nedestruktivní vyšetřování vláknobetonů. In: *22. Betonářské dny 2015: Sborník ke konferenci*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906097-0-9.
- SUCHÁNEK, Vladimír a Kateřina HÁJKOVÁ, 2016a. Experimental Analysis of the Impact on the Durability of Concrete Additions. In: *Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015*. Vol. 249. Switzerland: Solid State Phenomena, pp. 73-78. ISBN 978-3-03835-675-2. ISSN print 1012-0394. ISSN cd 1662-9787. ISSN web 1662-9779. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.73. Dostupné z: <http://www.scientific.net/SSP.249.73>
- SUCHÁNEK, Vladimír a Matěj SLOVÁČEK, 2016b. Experimentální analýza navrženého vodonepropustného drátkobetonu. In: *23. Betonářské dny 2016: Sborník ke konferenci*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906097-6-1.
- SUCHÁNEK, Vladimír a Matěj SLOVÁČEK, 2017a. Experimental Analysis of the Proposed Watertight Steel Fibre Reinforced Concrete. In: *23rd Concrete Days 2016*. Vol. 259. Switzerland: Solid State Phenomena, pp. 25-29. ISBN 978-3-0357-1105-9. ISSN print 1012-0394. ISSN cd 1662-9787. ISSN web 1662-9779. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.25. Dostupné z: <https://www.scientific.net/SSP.259.25>
- POKORNÝ, Jiří, Vladimír SUCHÁNEK a Vladimír KŘÍSTEK, 2017b. Mostní nosné konstrukce z tyčových prefabrikátů (historie, současnost, návrh koncepce nového prefabrikátu). In: *Mosty 2017: 22. mezinárodní sympozium: sborník příspěvků*. Brno: Sekurkon, s. 253-258. ISBN 978-80-86604-71-8.
- SUCHÁNEK, Vladimír, Jiří POKORNÝ a Tomáš BEDNARZ, 2017c. Experimentální analýza statického modulu pružnosti speciálních betonů s využitím digitální korelace obrazu (DIC). In: *Technologie 2017: 14. konference: sborník příspěvků*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906097-9-2.
- SUCHÁNEK, Vladimír, Tomáš BEDNARZ a Tomáš SVOJANOVSKÝ, 2017d. Využití korelace digitálního obrazu (DIC) při stanovení modulu pružnosti a Poissonova součinitele speciálních betonů. In: *24. Betonářské dny 2017: Sborník ke konferenci*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. ISBN 978-80-906759-0-2.
- SUCHÁNEK, Vladimír, Tomáš BEDNARZ a Tomáš SVOJANOVSKÝ, 2018a. Usage of Digital Image Correlation (DIC) in Determination of Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Special Concrete. In: *24th Concrete Days 2017*. Vol. 272. Switzerland: Solid State Phenomena, pp. 154-159. ISBN 978-3-0357-1284-1. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.154. Dostupné z: <https://www.scientific.net/SSP.272.154>.
- SUCHÁNEK, Vladimír, Jiří POKORNÝ a Pavel ŠVANDA, 2018b. Mechanical, Physical and Chemical Properties of Cementitious Composites Finished by Special Heating, 2018.

In: *Juniorstav 2018: 20th International Conference of Doctoral Students: Proceedings*. Brno: Econ publishing, s. 890-899. ISBN 978-80-86433-69-1.

8.1 Vedené citované závěrečné práce

DUHOŇ, Miroslav, 2017. *Experimentální analýza samozhutnitelného betonu*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

FADRHONS, Jan, 2018. *Experimentální analýza způsobů vyztužování betonu čedičovou tkaninou*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

HÁJKOVÁ, Kateřina, 2015. *Porovnání vlivu příměsí na trvanlivost betonů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

JIROVSKÝ, Leoš, 2015. *Experimentální porovnání metod destruktivního a nedestruktivního zkoušení betonů a vláknobetonů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

KOSINKA, Filip, 2018. *Drátkobetony – porovnání vlivu délky drátků na pevnostní charakteristiky*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

LYER, Matěj, 2018. *Konstrukční lehké betony s důrazem na použitý druh kameniva*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

RADOUŠ, Michal, 2014. *Experimentální analýza vysokopevnostních betonů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

RADOUŠ, Michal, 2016. *Experimentální analýza ultra-vysokopevnostních betonů*. Pardubice. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

SLOVÁČEK, Matěj, 2014. *Porovnání vlastností drátkobetonů a provzdušněných drátkobetonů*. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

SLOVÁČEK, Matěj, 2016. *Analýza vlastností vodonepropustných drátkobetonů pro betonová ostění tunelových staveb*. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Fotodokumentace	178
Příloha B Zatěžování lokálním požárem – typické průběhy teploty na povrchu betonu – grafy (vybraná tělesa).....	185
Příloha C Zatěžování lokálním požárem – typické průběhy teploty na povrchu betonu – naměřená data (vybraná tělesa).....	192
Příloha D Stanovení modulu pružnosti v tlaku – typické průběhy (vybrané těleso 25_2017ref)	199
Příloha E Statický modul pružnosti v tlaku, Poissonův součinitel: stanovené hodnoty na jednotlivých tělesech, (podrobná data)	201
Příloha F Mikroskopie elektronová, světelná – snímky	214

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek A 1 Skládka kameniva (HTK 4/8)	180
Obrázek A 2 Příprava vstupních surovin.....	180
Obrázek A 3 Situace při výrobě betonu	180
Obrázek A 4 Zkoušení čerstvého SCC: zkouška sednutí-rozlítím (LWSCC).....	180
Obrázek A 5 Fibrilovaná PP mikrovlákná Texzem PPF 370	180
Obrázek A 6 Syntetická PP makrovlákná Synmix 55	180
Obrázek A 7 Detail carbonové tkaniny	181
Obrázek A 8 Připravená carbonová vlákna	181
Obrázek A 9 Vlákna Dramix 3D 45/50-BL	181
Obrázek A 10 Značení vzorků.....	181
Obrázek A 11 Zkouška pevnosti v tlaku (a=150 mm)	181
Obrázek A 12 Zkouška pevnosti v tahu ohybem (100 x 100 x 400 mm).....	181
Obrázek A 13 Kalibrace, určení měřicí roviny	182
Obrázek A 14 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 3D DIC, detail	182
Obrázek A 15 Situace při sběru dat	182
Obrázek A 16 Pohled do prostoru elektrické pece	182
Obrázek A 17 Termodiagnostika, teplota na povrchu lokálně ohřivaného tělesa.....	182
Obrázek A 18 Průběh teploty [°C] na povrchu tělesa (boční pohled) – v místě řezu P1z Obr. A 17	182
Obrázek A 19 Zatěžování lokálním požárem.....	183
Obrázek A 20 Zatěžování lokálním požárem, detail difuze vodní páry, těleso Syn2_2013_žih	183
Obrázek A 21 Poškozené zkušební těleso – válec (25_2013žih), zatíženo na 1049 °C.....	183
Obrázek A 22 Poškozené zkušební těleso – válec (4PP_2013žih), zatíženo na 1049 °C	183
Obrázek A 23 Poškozené zkušební těleso – hranol (50_2013žih), zatíženo na 1049 °C.....	183
Obrázek A 24 Poškozené zkušební těleso – krychle (50_2013žih), zatíženo na 1049 °C	183
Obrázek A 25 Rozmístění těles v elektrické peci.....	184
Obrázek A 26 Těleso protkané sítí trhlin po teplotním lokálním namáhání – (LWSCCžih) zatíženo na ~ 1049 °C	184

Obrázek A 27 Poškozené zkušební těleso – hranol (Syn2_2013žih), zatíženo na 750 °C....184

Obrázek A 28 Zkušební tělesa 25_2017žih po teplotním namáhání na 400 °C.....184



Obrázek A 1 Skládka kameniva (HTK 4/8)



Obrázek A 2 Příprava vstupních surovin



Obrázek A 3 Situace při výrobě betonu



Obrázek A 4 Zkoušení čerstvého SCC: zkouška sednutí-rozlitím (LWSSC)



Obrázek A 5 Fibrilovaná PP mikrovláčna Texzem PPF 370



Obrázek A 6 Syntetická PP makrovláčna Synmix 55



Obrázek A 7 Detail carbonové tkaniny



Obrázek A 8 Připravená carbonová vlákna



Obrázek A 9 Vlákna Dramix 3D 45/50-BL



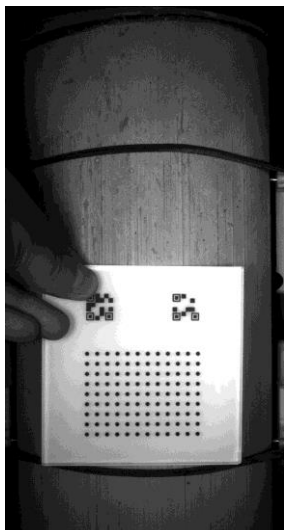
Obrázek A 10 Značení vzorků



Obrázek A 11 Zkouška pevnosti v tlaku
(a=150 mm)



Obrázek A 12 Zkouška pevnosti v tahu ohybem
(100 x 100 x 400 mm)



Obrázek A 13 Kalibrace, určení měřicí roviny



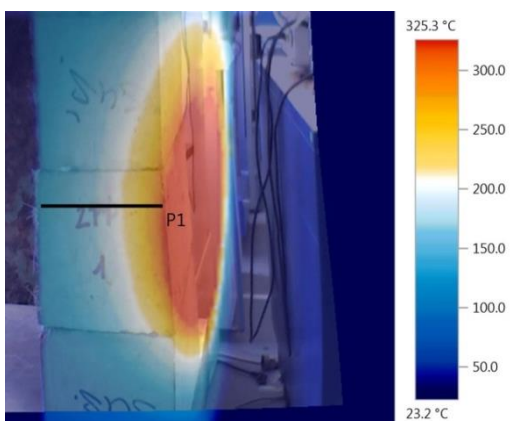
Obrázek A 14 Uspořádání zkoušky: modul pružnosti, 3D DIC, detail



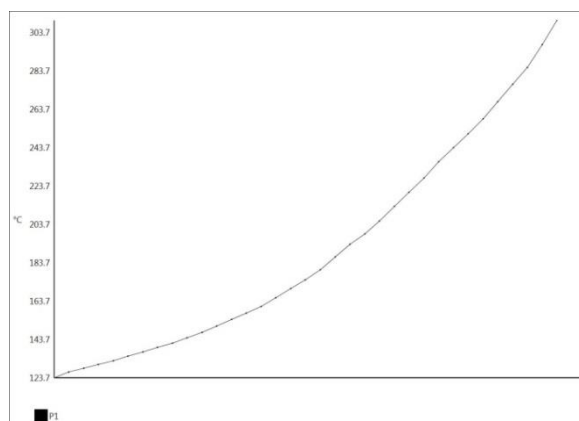
Obrázek A 15 Situace při sběru dat



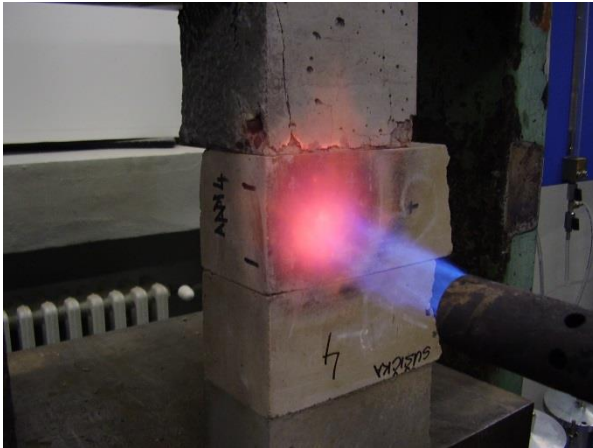
Obrázek A 16 Pohled do prostoru elektrické pece



Obrázek A 17 Termodiagnostika, teplota na povrchu lokálně ohříváného tělesa



Obrázek A 18 Průběh teploty [°C] na povrchu tělesa (boční pohled) – v místě řezu P1 z Obr. A 17



Obrázek A 19 Zatěžování lokálním požárem



Obrázek A 20 Zatěžování lokálním požárem, detail difuze vodní páry, těleso Syn2_2013_žih



Obrázek A 21 Poškozené zkušební těleso – válec (25_2013žih), zatíženo na 1049 °C



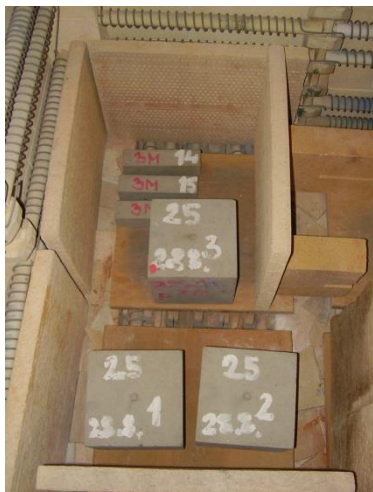
Obrázek A 22 Poškozené zkušební těleso – válec (4PP_2013žih), zatíženo na 1049 °C



Obrázek A 23 Poškozené zkušební těleso – hranol (50_2013žih), zatíženo na 1049 °C



Obrázek A 24 Poškozené zkušební těleso – krychle (50_2013žih), zatíženo na 1049 °C



Obrázek A 25 Rozmístění těles v elektrické peci



Obrázek A 26 Těleso protkané sítí trhlin po teplotním lokálním namáhání – (LWSCCžih) zatíženo na ~ 1049 °C



Obrázek A 27 Poškozené zkušební těleso – hranol (Syn2_2013žih), zatíženo na 750 °C

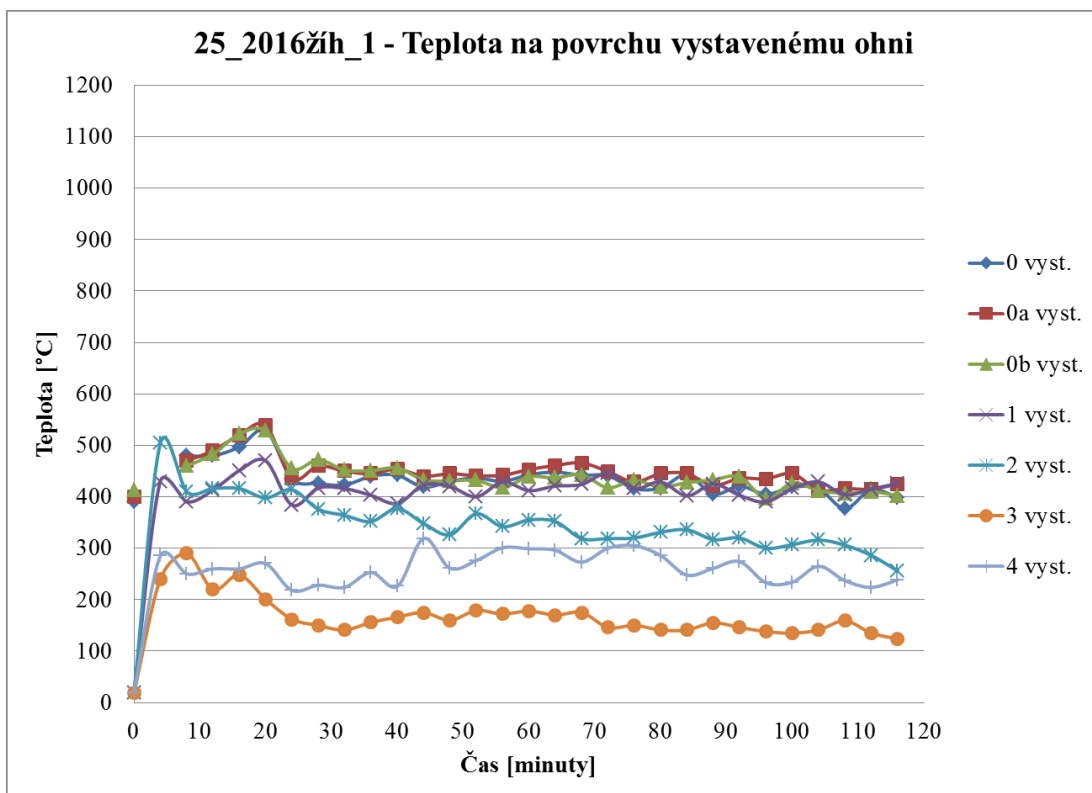


Obrázek A 28 Zkušební tělesa 25_2017žih po teplotním namáhání na 400 °C

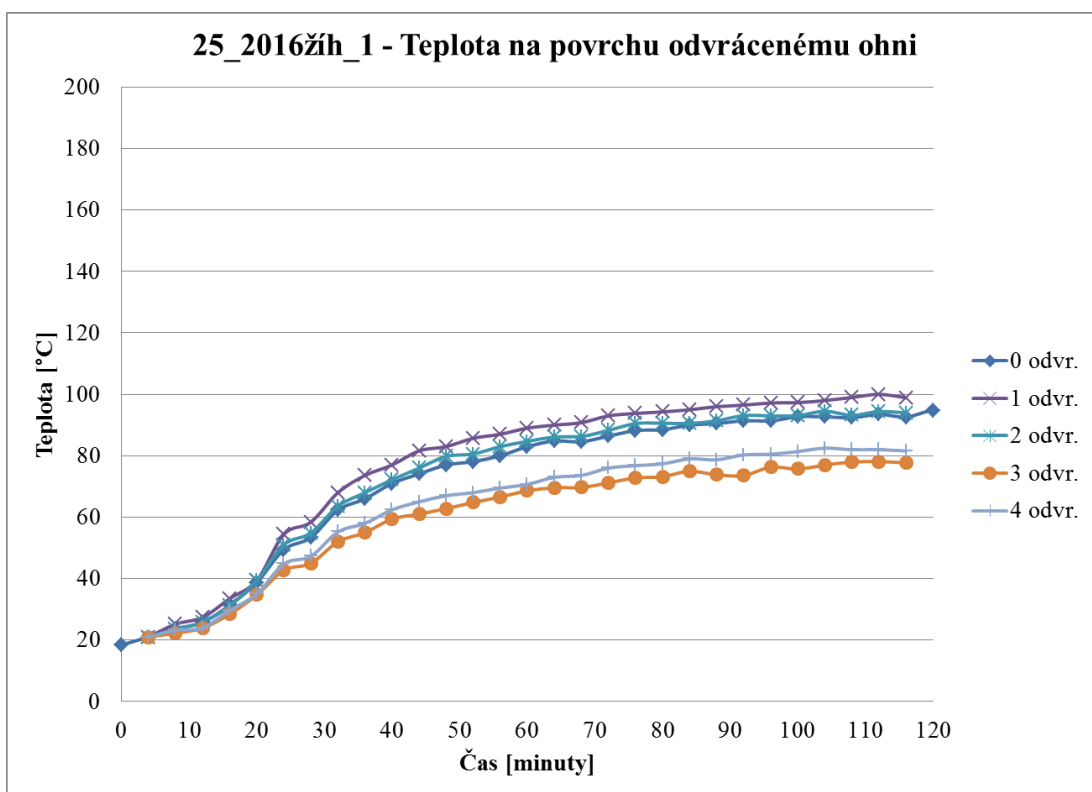
Příloha B Zatěžování lokálním požárem – typické průběhy teploty na povrchu betonu – grafy (vybraná tělesa)

SEZNAM OBRÁZKŮ

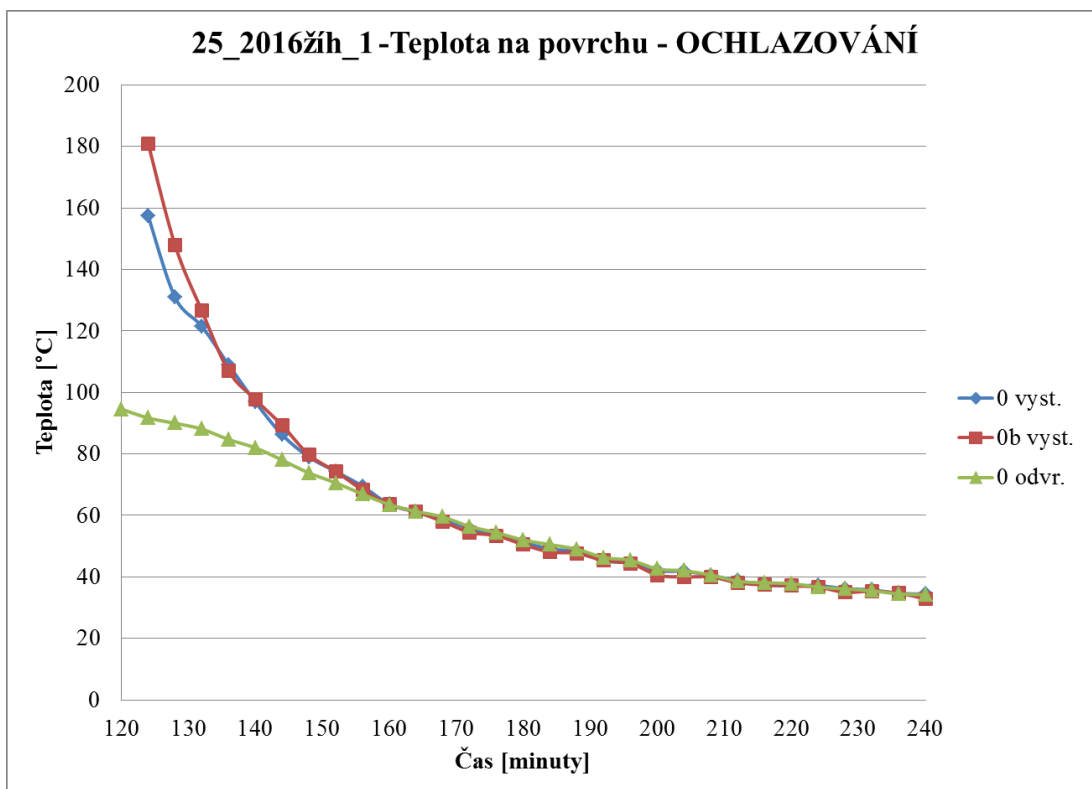
Obrázek B 1 Průběh teploty na povrchu vystavenému ohni, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	186
Obrázek B 2 Průběh teploty na povrchu odvrácenému ohni, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	186
Obrázek B 3 Průběh teploty na povrchu – ochlazování, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	187
Obrázek B 4 Průběh teploty na zbývající části vzorku, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	187
Obrázek B 5 Průběh teploty na zbývající části vzorku – ochlazování, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	188
Obrázek B 6 Průběh teploty na povrchu vystavenému ohni, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	189
Obrázek B 7 Průběh teploty na povrchu odvrácenému ohni, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	189
Obrázek B 8 Průběh teploty na povrchu – ochlazování, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	190
Obrázek B 9 Průběh teploty na zbývající části vzorku, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	190
Obrázek B 10 Průběh teploty na zbývající části vzorku – ochlazování, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce.....	191



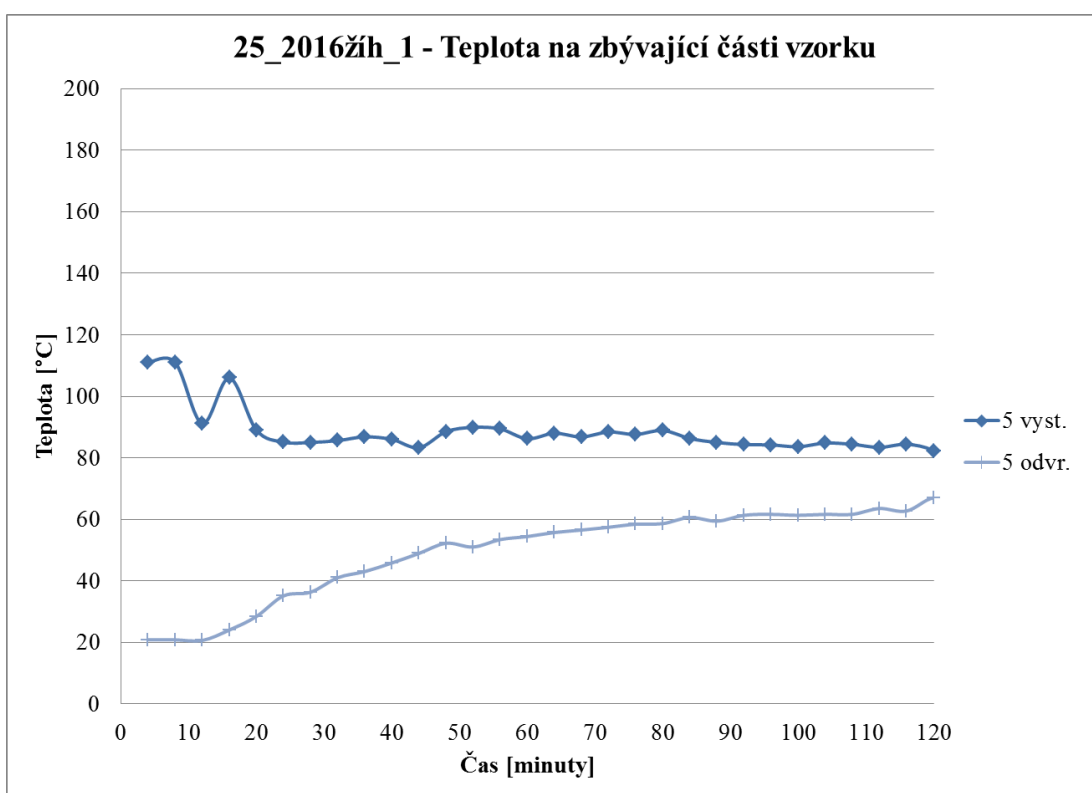
Obrázek B 1 Průběh teploty na povrchu vystavenému ohni, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce



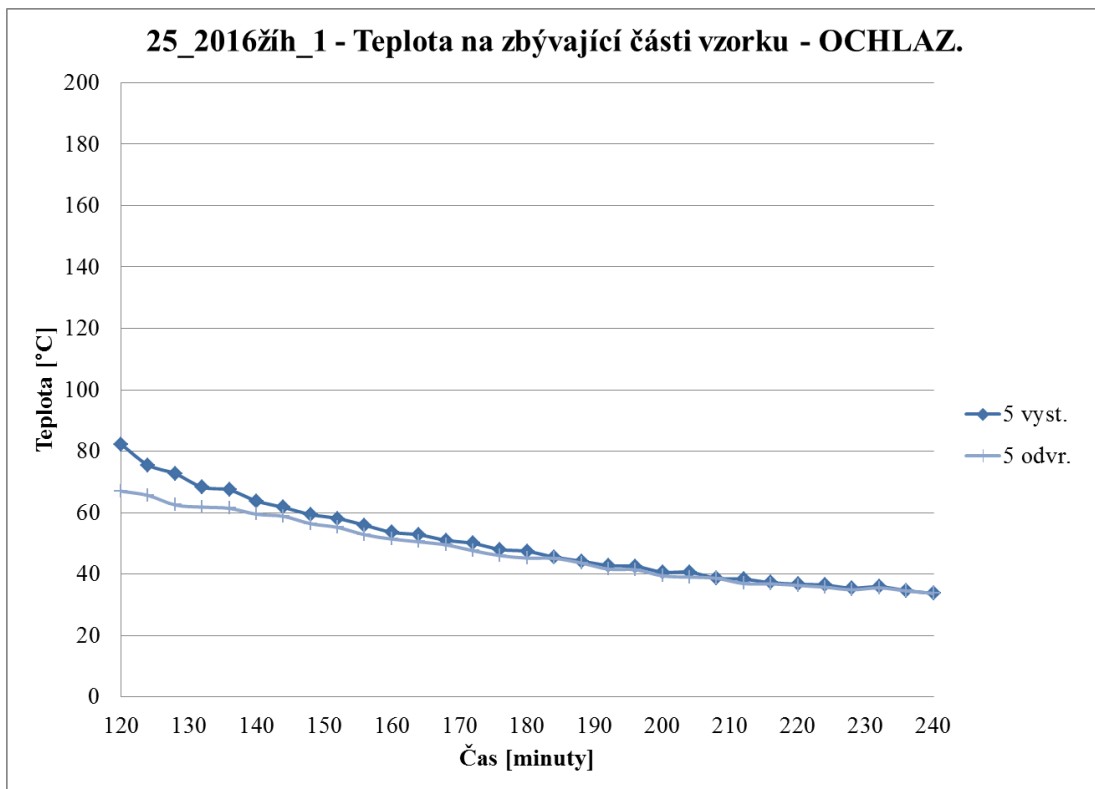
Obrázek B 2 Průběh teploty na povrchu odvrácenému ohni, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce



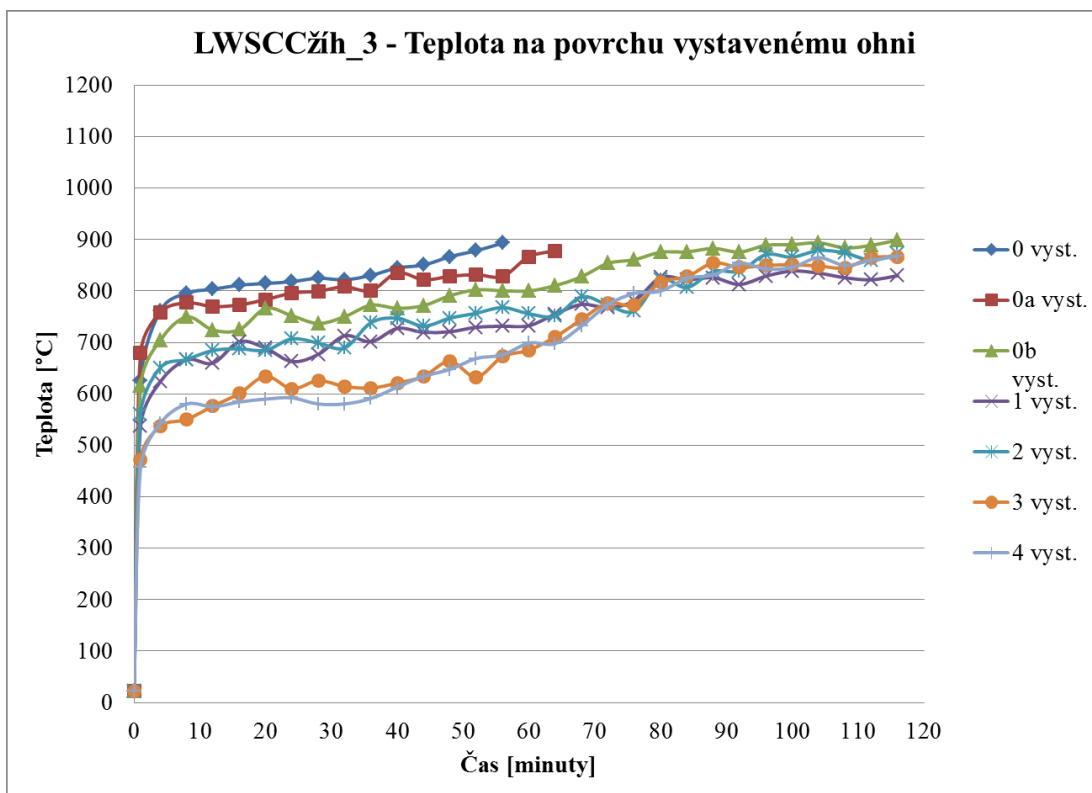
Obrázek B 3 Průběh teploty na povrchu – ochlazování, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce



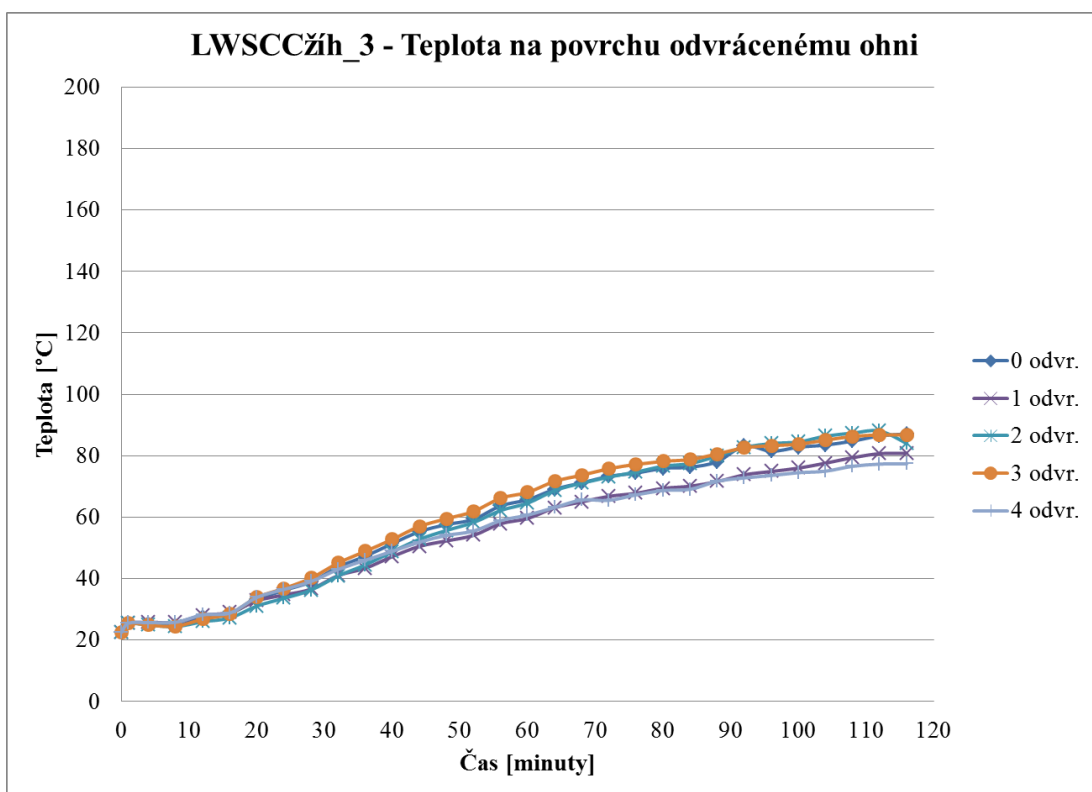
Obrázek B 4 Průběh teploty na zbývající části vzorku, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce



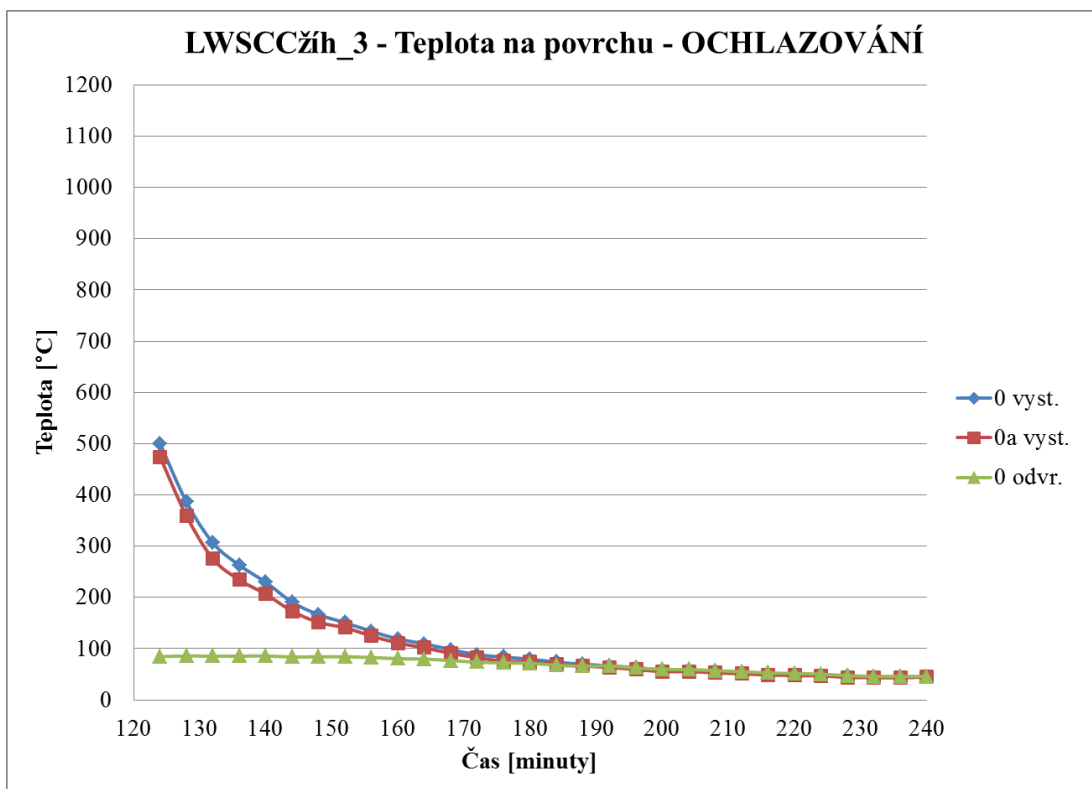
Obrázek B 5 Průběh teploty na zbývající části vzorku – ochlazování, vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce



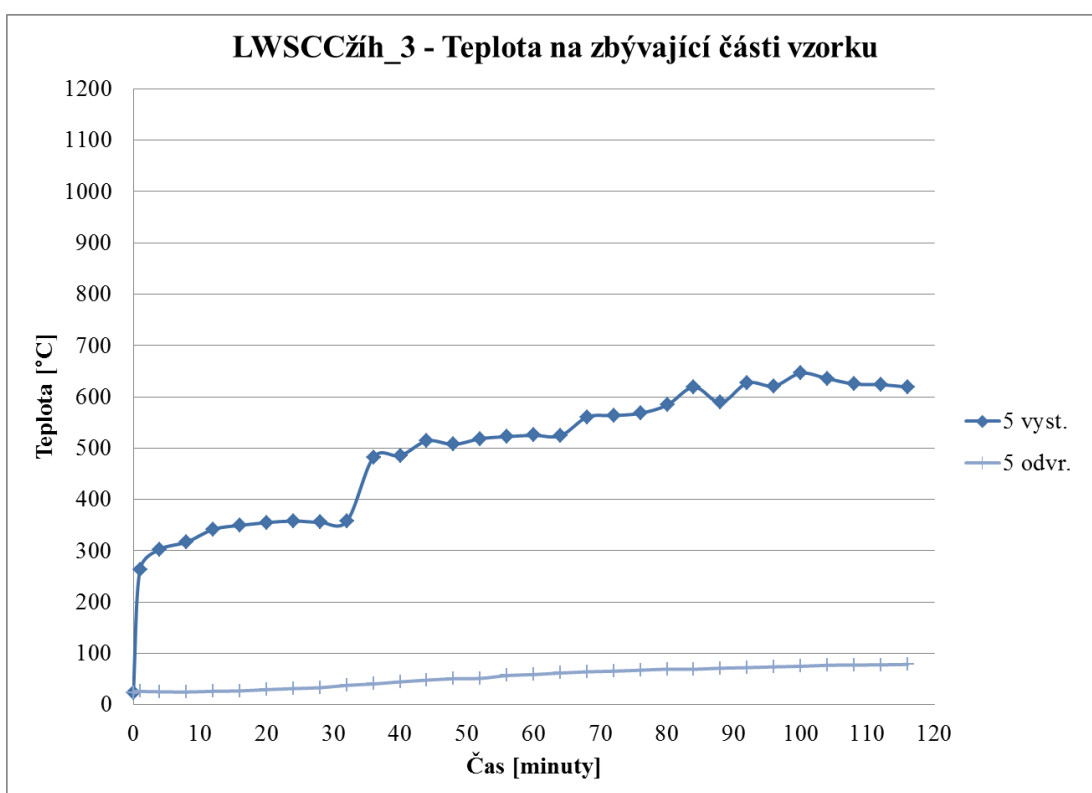
Obrázek B 6 Průběh teploty na povrchu vystavenému ohni, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce



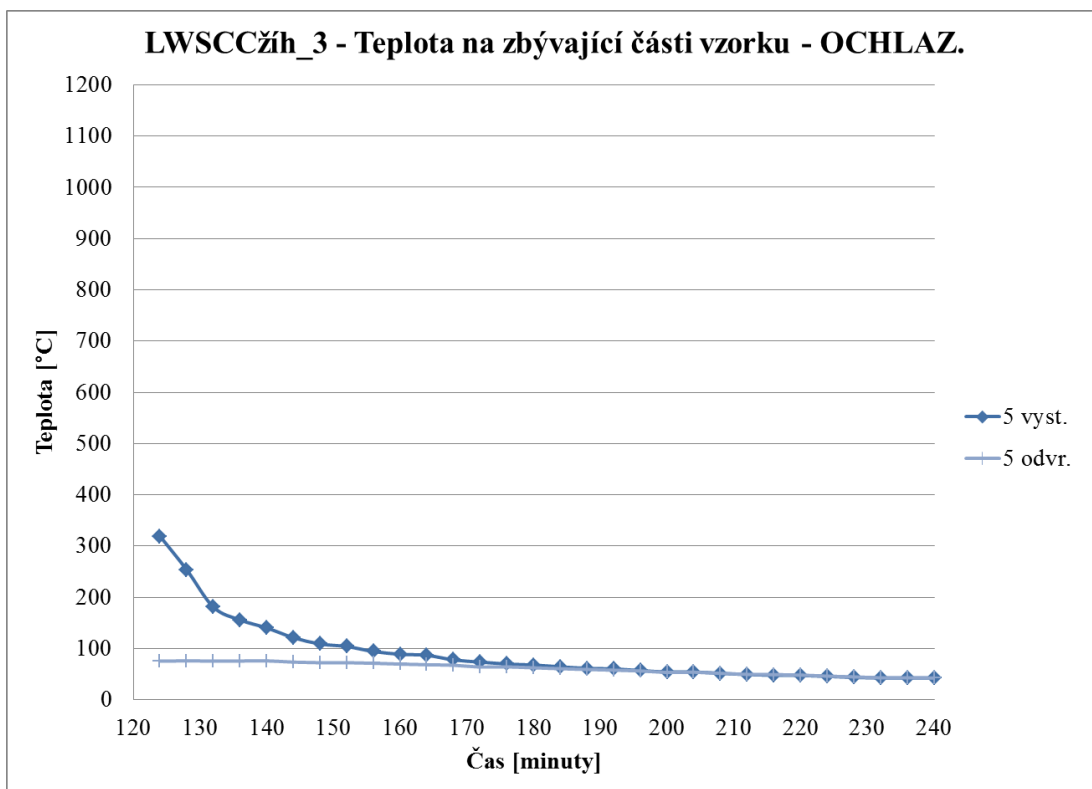
Obrázek B 7 Průběh teploty na povrchu odvrácenému ohni, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce



Obrázek B 8 Průběh teploty na povrchu – ochlazování, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce



Obrázek B 9 Průběh teploty na zbývající části vzorku, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce



Obrázek B 10 Průběh teploty na zbývající části vzorku – ochlazování, vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce

Příloha C Zatěžování lokálním požárem – typické průběhy teploty na povrchu betonu –
naměřená data (vybraná tělesa)

SEZNAM TABULEK

Tabulka C 1 Průběh teploty na povrchu betonu [°C], vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo
na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce193

Tabulka C 2 Průběh teploty na povrchu betonu [°C], vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo
na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce196

Tabulka C 1 Průběh teploty na povrchu betonu [°C], vybrané těleso: 25_2016žih_1, zatíženo na ~ 400 °C, stáří: 1,5 měsíce

Čas [min]	Teplota na povrchu vystavenému ohni							Teplota na povrchu odvrácenému ohni					Druhá část tělesa	
	střed			levý horní	pravý horní	pravý dolní	levý dolní	střed	pravý horní	levý horní	levý dolní	pravý dolní	přední	zadní
	0 vyst.	0a vyst.	0b vyst.	1 vyst.	2 vyst.	3 vyst.	4 vyst.	0 odvr.	1 odvr.	2 odvr.	3 odvr.	4 odvr.	5 vyst.	5 odvr.
0	390,0	400,0	413,0	19,0	19,0	18,7	19,0	18,4						
4				430,0	504,0	240,0	285,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	111,0	20,8
8	480,0	470,0	460,0	390,0	410,0	290,0	250,0	23,7	25,2	23,6	22,3	23,2	111,0	20,8
12	480,0	490,0	483,0	413,0	416,0	220,0	260,0	25,8	27,4	25,8	23,9	24,0	91,1	20,6
16	497,0	520,0	522,0	451,0	416,0	248,0	260,0	31,4	33,5	31,2	28,5	29,7	106,0	24,0
20	529,0	539,0	529,0	470,0	398,0	201,0	270,0	38,7	39,4	39,4	34,7	35,0	89,0	28,4
24	435,0	436,0	455,0	384,0	414,0	162,0	218,0	49,4	54,4	51,0	42,7	44,8	85,1	35,1
28	426,0	460,0	472,0	417,0	376,0	150,0	228,0	53,4	58,4	54,9	45,0	47,3	85,0	36,3
32	423,0	450,0	452,0	416,0	364,0	141,0	224,0	62,3	68,0	63,6	52,0	55,2	85,6	41,0
36	440,0	445,0	451,0	403,0	352,0	156,0	253,0	66,0	73,6	68,0	55,0	58,0	86,8	43,0
40	442,0	454,0	456,0	387,0	377,0	166,0	226,0	71,0	77,0	72,2	59,4	62,4	86,0	45,8
44	419,0	440,0	433,0	423,0	348,0	175,0	319,0	74,1	81,6	76,0	61,0	65,0	83,3	48,9
48	430,0	445,0	431,0	420,0	326,0	160,0	261,0	77,0	83,0	79,8	62,8	67,0	88,5	52,2
52	437,0	441,0	432,0	400,0	367,0	179,0	276,0	78,1	85,7	80,6	64,8	68,0	89,9	51,0
56	430,0	442,0	418,0	429,0	342,0	172,0	301,0	80,0	87,0	83,0	66,6	69,5	89,4	53,4
60	443,0	453,0	439,0	412,0	355,0	178,0	299,0	83,0	89,0	84,7	68,6	70,7	86,2	54,4
64	448,0	461,0	437,0	421,0	352,0	170,0	296,0	84,8	90,0	86,1	69,6	73,0	88,0	55,7
68	442,0	466,0	443,0	424,0	319,0	175,0	273,0	84,6	90,8	86,3	69,7	73,6	86,8	56,5
72	441,0	449,0	417,7	446,0	319,0	146,0	300,0	86,4	93,0	88,3	71,2	76,0	88,4	57,4
76	416,0	429,0	432,0	416,0	320,0	150,0	305,0	88,2	93,8	90,5	72,8	76,8	87,6	58,4
80	417,0	445,0	419,0	429,0	331,0	141,0	286,0	88,5	94,3	90,6	73,2	77,4	88,9	58,6

Čas [min]	Teplota na povrchu vystavenému ohni							Teplota na povrchu odvrácenému ohni					Druhá část tělesa	
	střed			levý horní	pravý horní	pravý dolní	levý dolní	střed	pravý horní	levý horní	levý dolní	pravý dolní	přední	zadní
	0 vyst.	0a vyst.	0b vyst.	1 vyst.	2 vyst.	3 vyst.	4 vyst.	0 odvr.	1 odvr.	2 odvr.	3 odvr.	4 odvr.	5 vyst.	5 odvr.
84	443,0	445,0	427,7	402,0	336,0	141,1	247,6	90,0	95,0	90,5	75,0	79,0	86,3	60,6
88	405,0	422,0	433,0	425,0	317,0	155,0	261,0	90,5	96,0	91,4	73,8	78,7	85,0	59,4
92	421,0	436,0	439,0	403,0	320,0	146,0	274,0	91,4	96,5	93,1	73,6	80,3	84,3	61,3
96	405,0	435,0	396,0	390,0	300,0	138,0	233,0	91,4	97,2	93,0	76,3	80,5	84,2	61,6
100	419,0	445,0	427,0	416,0	307,0	135,0	233,8	92,7	97,3	93,1	75,7	81,4	83,6	61,3
104	416,0	413,0	412,0	429,0	316,0	141,0	265,0	92,7	98,0	94,5	77,0	82,5	84,8	61,6
108	377,0	416,0	407,0	404,0	306,0	159,0	237,0	92,4	99,0	93,2	78,0	82,0	84,4	61,6
112	414,0	415,0	410,0	415,0	286,0	135,0	224,0	93,5	100,0	94,4	78,1	82,0	83,4	63,5
116	398,0	425,0	402,0	426,0	256,0	124,0	238,5	92,6	98,9	94,0	77,7	81,6	84,4	62,7
120	213,0		219,0					94,6					82,3	67,0
124	157,5		181,0					91,7					75,5	65,6
128	131,0		148,0					90,0					72,7	62,5
132	121,5		126,6					88,1					68,3	61,8
136	109,0		107,0					84,7					67,4	61,4
140	96,9		97,7					82,0					63,8	59,5
144	86,2		89,3					78,0					61,7	58,8
148	79,0		79,7					73,8					59,4	56,4
152	74,3		74,3					70,6					58,1	55,2
156	69,5		68,3					66,9					55,9	52,8
160	63,6		63,6					63,5					53,6	51,4
164	61,1		61,2					61,3					52,8	50,5
168	58,7		58,0					59,5					51,0	49,5
172	55,7		54,5					56,4					50,0	47,6

Čas [min]	Teplota na povrchu vystavenému ohni							Teplota na povrchu odvrácenému ohni					Druhá část tělesa	
	střed			levý horní	pravý horní	pravý dolní	levý dolní	střed	pravý horní	levý horní	levý dolní	pravý dolní	přední	zadní
	0 vyst.	0a vyst.	0b vyst.	1 vyst.	2 vyst.	3 vyst.	4 vyst.	0 odvr.	1 odvr.	2 odvr.	3 odvr.	4 odvr.	5 vyst.	5 odvr.
176	53,4		53,4					54,4					48,0	46,0
180	51,3		50,5					52,0					47,4	45,2
184	49,1		48,1					50,5					45,5	45,1
188	48,3		47,7					49,0					44,2	43,6
192	45,3		45,3					46,3					42,8	41,6
196	44,4		44,4					45,4					42,5	41,4
200	42,0		40,6					42,6					40,6	39,4
204	41,8		40,0					42,0					40,6	39,0
208	40,5		40,0					40,6					38,6	38,6
212	38,8		38,1					38,6					38,3	36,9
216	37,4		37,4					38,1					37,2	36,8
220	37,1		37,1					37,8					36,7	36,3
224	37,2		36,7					36,7					36,4	35,7
228	36,2		35,0					36,1					35,4	34,9
232	35,8		35,4					35,5					35,9	35,5
236	34,7		34,7					34,5					34,6	34,5
240	34,4		32,9					34,2					33,7	33,7

Tabulka C 2 Průběh teploty na povrchu betonu [°C], vybrané těleso: LWSCCžih_3, zatíženo na ~ 1049 °C, stáří: 1,5 měsíce

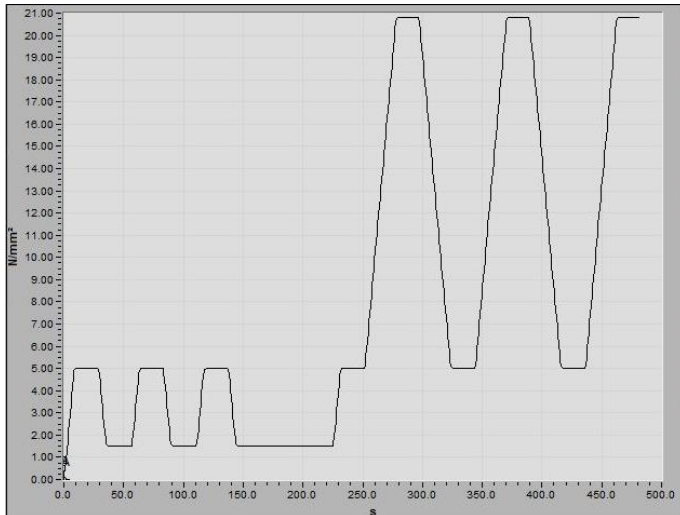
Čas [min]	Teplota na povrchu vystavenému ohni							Teplota na povrchu odvrácenému ohni					Druhá část tělesa	
	střed			levý horní	pravý horní	pravý dolní	levý dolní	střed	pravý horní	levý horní	levý dolní	pravý dolní	přední	zadní
	0 vyst.	0a vyst.	0b vyst.	1 vyst.	2 vyst.	3 vyst.	4 vyst.	0 odvr.	1 odvr.	2 odvr.	3 odvr.	4 odvr.	5 vyst.	5 odvr.
0	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
1	626,4	679,0	616,0	537,0	560,8	471,9	456,6	25,5	25,4	25,4	25,5	25,5	263,2	25,5
4	761,2	758,5	704,3	623,5	651,0	537,0	542,6	25,2	25,8	24,9	24,9	25,7	302,7	25,0
8	795,9	777,1	749,7	666,3	667,1	550,5	580,3	24,6	25,8	24,4	24,5	25,8	316,9	24,6
12	803,5	770,0	724,2	660,0	684,6	576,5	575,3	27,4	28,1	26,0	26,8	28,2	341,7	26,0
16	811,5	773,1	725,0	701,4	687,7	600,8	584,4	28,6	29,0	27,2	28,6	28,8	349,5	26,7
20	814,8	783,5	766,3	689,0	685,0	634,5	590,0	33,2	32,8	31,1	33,9	33,9	354,9	29,3
24	818,4	796,0	752,0	663,0	707,2	610,1	592,4	36,2	34,7	33,6	36,8	36,5	357,9	31,2
28	825,0	799,9	737,0	677,0	699,0	625,8	580,5	39,0	36,6	36,3	40,2	39,1	355,4	33,0
32	822,0	808,4	750,3	713,1	689,6	614,6	580,7	43,8	41,0	40,9	45,1	43,0	357,5	37,6
36	830,6	801,1	772,7	701,6	738,6	611,6	591,2	47,3	43,4	44,5	48,9	46,0	482,4	40,3
40	845,0	835,6	766,5	727,3	747,4	621,2	613,4	51,4	47,2	48,8	52,8	48,9	485,3	44,4
44	850,8	822,0	771,8	719,8	732,0	634,5	634,2	55,3	50,5	52,8	57,0	51,9	514,1	47,9
48	866,9	828,7	791,1	721,0	747,5	663,6	647,8	57,6	52,3	55,7	59,5	54,1	507,1	50,4
52	878,6	832,0	802,4	729,6	756,9	632,9	669,0	59,3	54,1	58,3	61,9	55,5	518,4	51,1
56	893,3	828,5	800,7	731,7	768,0	672,6	676,0	63,7	57,9	62,2	66,2	58,9	522,4	56,7
60		866,9	800,4	732,6	756,0	685,2	698,9	65,7	59,6	64,6	68,1	60,7	525,0	58,6
64		878,0	810,6	755,5	751,6	711,0	697,9	69,1	63,1	68,7	71,7	63,2	524,1	61,6
68			828,0	774,0	789,0	745,0	732,2	71,2	65,0	71,1	73,7	65,6	560,5	64,0
72			854,0	768,0	772,9	777,0	773,6	73,3	66,8	73,1	75,8	65,5	563,4	65,2
76			861,0	781,0	761,0	773,0	795,5	74,4	67,8	74,7	77,2	67,3	568,0	67,0
80			875,6	826,3	822,0	817,0	800,0	75,9	69,4	76,6	78,2	68,7	584,0	69,2

Čas [min]	Teplota na povrchu vystavenému ohni							Teplota na povrchu odvrácenému ohni					Druhá část tělesa	
	střed			levý horní	pravý horní	pravý dolní	levý dolní	střed	pravý horní	levý horní	levý dolní	pravý dolní	přední	zadní
	0 vyst.	0a vyst.	0b vyst.	1 vyst.	2 vyst.	3 vyst.	4 vyst.	0 odvr.	1 odvr.	2 odvr.	3 odvr.	4 odvr.	5 vyst.	5 odvr.
84			876,2	822,0	807,0	828,0	824,9	76,3	70,1	77,5	78,8	69,1	619,0	68,9
88			883,0	826,0	838,0	854,6	831,3	78,1	71,6	79,9	80,6	71,7	589,0	71,0
92			876,0	813,0	839,0	846,0	854,0	83,2	73,8	82,7	82,6	72,8	627,0	72,1
96			889,0	829,0	871,0	850,0	843,0	81,5	74,9	84,0	83,3	73,6	621,0	73,6
100			890,3	839,0	866,0	851,0	846,0	82,8	76,0	84,5	83,8	74,5	646,0	74,7
104			894,0	835,0	879,0	849,0	865,0	83,5	77,6	86,4	85,1	75,0	635,5	76,7
108			884,0	826,0	874,0	845,0	850,0	84,8	79,4	87,4	86,3	76,6	625,1	77,1
112			889,0	822,0	860,0	865,0	859,8	86,5	80,7	88,1	86,8	77,3	623,7	77,5
116			899,4	830,0	872,0	866,0	868,0	87,1	80,8	84,0	86,8	77,4	619,0	78,3
120														
124	500,1	474,0						84,5					319,0	75,4
128	386,4	359,0						85,7					253,6	75,9
132	306,4	275,4						85,3					180,9	75,5
136	262,8	234,2						85,3					155,6	75,6
140	229,6	206,4						85,8					140,2	75,9
144	190,6	173,0						83,7					121,1	73,5
148	166,4	151,5						84,2					108,9	72,2
152	150,7	140,8						84,3					103,9	72,3
156	133,8	124,7						82,7					94,2	71,2
160	118,9	111,0						80,5					88,8	69,6
164	109,5	101,7						79,6					86,6	68,4
168	98,1	90,8						76,9					77,7	67,3
172	88,3	82,4						73,7					73,5	63,9

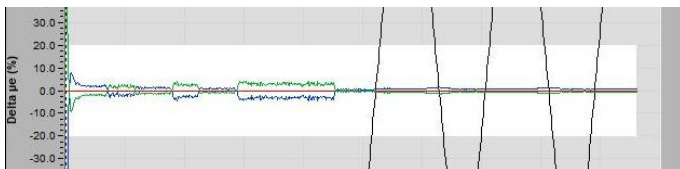
Čas [min]	Teplota na povrchu vystavenému ohni							Teplota na povrchu odvrácenému ohni					Druhá část tělesa	
	střed			levý horní	pravý horní	pravý dolní	levý dolní	střed	pravý horní	levý horní	levý dolní	pravý dolní	přední	zadní
	0 vyst.	0a vyst.	0b vyst.	1 vyst.	2 vyst.	3 vyst.	4 vyst.	0 odvr.	1 odvr.	2 odvr.	3 odvr.	4 odvr.	5 vyst.	5 odvr.
176	83,5	75,6						72,2					69,7	64,2
180	79,6	74,3						71,5					67,7	62,3
184	73,7	68,9						67,6					64,3	60,6
188	69,6	66,2						65,9					61,3	59,1
192	66,5	63,5						66,4					60,2	57,8
196	63,2	59,3						62,3					57,0	56,2
200	58,5	55,3						59,5					54,2	53,4
204	58,1	55,4						59,2					54,3	53,8
208	56,8	52,9						57,1					51,5	51,5
212	53,9	50,9						55,0					49,1	49,6
216	51,5	48,8						52,6					47,8	49,1
220	50,6	47,5						51,4					47,4	48,2
224	49,0	47,1						50,2					45,6	46,0
228	46,8	43,9						47,3					43,6	44,6
232	44,8	43,5						45,8					42,3	42,9
236	44,8	43,2						45,5					42,3	43,0
240	44,7	44,3						45,6					42,3	42,6
244	43,3	41,5						43,5					40,0	41,1
248	40,7	39,0						41,4					37,8	38,9

SEZNAM OBRÁZKŮ

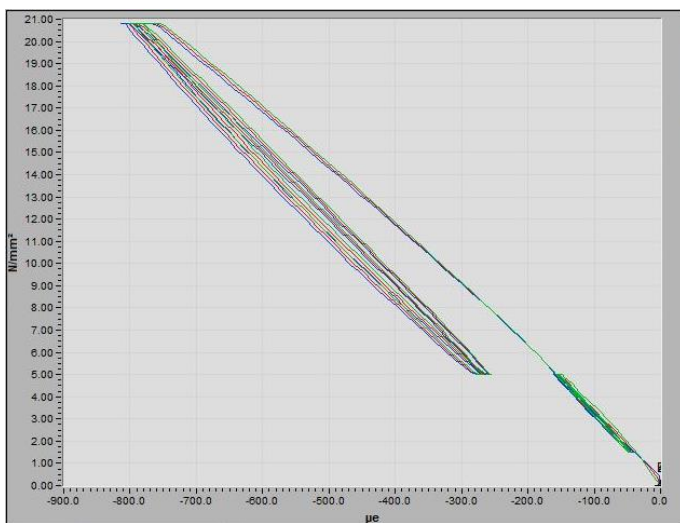
Obrázek D 1 Ilustrační cyklus napětí pro stanovení počátečního a stabilizovaného sečnového modulu pružnosti v tlaku (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E	200
Obrázek D 2 Ilustrační kontrola přetvoření mechanických snímačů (levá / pravá), (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E	200
Obrázek D 3 Ilustrační diagram napětí-deformace, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E	200



Obrázek D 1 Ilustrační cyklus napětí pro stanovení počátečního a stabilizovaného sečnového modulu pružnosti v tlaku (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E



Obrázek D 2 Ilustrační kontrola přetvoření mechanických snímačů (levá / pravá), (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E



Obrázek D 3 Ilustrační diagram napětí-deformace, vybrané těleso: 25_2017_28dní_ref_4E

Příloha E Statický modul pružnosti v tlaku, Poissonův součinitel: stanovené hodnoty na jednotlivých tělesech, (podrobná data)

SEZNAM TABULEK

Tabulka E 1 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (SCC45/55_2013ref; SCC45/55_2016ref; SCC45/55_2017ref; SCC45/55_2016žih, 25_2013ref; 25_2015ref; 25_2016ref; 25_2017ref)	202
Tabulka E 2 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (25_2017ref; 25_2015žih; 25_2016žih; 25_2017žih).....	205
Tabulka E 3 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (50_2013ref; 50_2016ref; 75_2013ref; 2PP_2013ref; 4PP_2013ref; Syn2_2013ref; Syn4_2013ref; C2_2013ref; Syn2_2013žih; Syn4_2013žih; 50_2016žih)...	207
Tabulka E 4 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (SCC30/37/14ref; Syn2_30/37/13ref; 40_30/37/13ref; 25_30/37/14ref; Syn2_30/37/13žih; 40_30/37/13žih; 25_30/37/14žih; SCC30/37/14žih; C25/30ref; 2PP_C25/30ref; FRC_C25/30_2015ref; C25/30žih; FRC_C25/30_2015žih; HSC_2014ref)	210

Tabulka E 1 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (SCC45/55_2013ref; SCC45/55_2016ref; SCC45/55_2017ref; SCC45/55_2016žih; 25_2013ref; 25_2015ref; 25_2016ref; 25_2017ref)

SCC 45/55						25 kg Dramix_ref											
SCC 45/55ref					žih	25_2013	25_2015	25_2016		25_2017_3dny			25_2017				
2013	2016	2017			2016			A	B	1E	2E	3E	4E	5E	6E	13E	
		1E	2E	3E	2016 _žih												
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]																	
ref					400	ref											
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - dle (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A; (válec: d = 150 mm, h = 300 mm)																	
Počáteční $E_{C,0}$ [GPa]																	
34,0	24,0	26,4	26,8	26,5	21,0	31,0	33,2	28,8	26,6	24,4	24,7	24,2	25,5	27,1	27,1	26,2	
Počáteční $E_{C,0,i}$ (levá / pravá) [GPa]																	
35,1 / 33,0	23,3 / 24,7	27,6 / 25,2	26,1 / 27,5	26,6 / 26,3	21,1 / 20,8	33,4 / 28,6	36,4 / 30,0	26,5 / 31,1	24,8 / 28,5	24,6 / 24,2	26,1 / 23,3	25,9 / 22,5	25,7 / 25,3	27,7 / 26,5	28,0 / 26,2	28,1 / 24,3	
Stabilizovaný $E_{C,s}$ [GPa]																	
36,1	28,4	30,2	30,6	30,2	24,2	34,2	36,6	31,0	30,3	29,1	29,4	28,7	29,7	31,1	30,9	30,2	
Stabilizovaný $E_{C,s,j}$ (levá / pravá) [GPa]																	
36,7 / 35,5	27,8 / 29,0	31,2 / 29,3	29,9 / 31,3	30,3 / 30,1	24,3 / 24,1	37,0 / 31,4	38,6 / 34,6	28,9 / 33,1	28,3 / 32,2	29,5 / 28,7	30,5 / 28,3	30,8 / 26,6	29,9 / 29,4	31,4 / 30,8	31,4 / 30,4	32,0 / 28,3	
Horní zatěžovací napětí σ_a [MPa]																	
15	15	18,3			15	15	15	15	13,7			20,8					
Válcová pevnost - jednotlivě [MPa]																	
65,4	56,5	55,7	57,4	55,8	42,3	57,4	53,1	60,4	54,5	47,3	48,0	44,9	57,8	59,6	57,6	58,8	
Porovnání naměř. válcových pev. od f_C: Podmínka < 20 %																	
ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - DIC																	
2D	X	3D			X	X	2D	X	X	3D			3D				
Počáteční $E_{C,0,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	

SCC 45/55						25 kg Dramix_ref											
SCC 45/55ref					žih	25_2013	25_2015	25_2016		25_2017_3dny			25_2017				
2013	2016	2017			2016			A	B	1E	2E	3E	4E	5E	6E	13E	
		1E	2E	3E	2016 _žih												
31,5	X	25,5	26,8	27,3	X	X	39,1	X	X	24,0	24,1	23,8	26,7	28,5	27,8	25,4	
X	X	25,2	27,6	27,3	X	X	X	X	X	23,8	24,5	24,1	26,5	28,2	27,0	25,4	
X	X	26,4	27,7	27,1	X	X	X	X	X	24,9	24,4	24,3	24,4	28,7	28,6	26,0	
Počáteční $E_{C,0,DIC,i}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
33,2 / 29,7 / X	X	25,1 / 25,3 / 26,1	26,9 / 26,5 / 27,1	27,3 / 27,3 / 27,4	X	X	42,7 / 35,3 / 39,4	X	X	23,7 / 24,1 / 24,1	25,3 / 23,8 / 23,3	23,5 / 24,4 / 23,4	27,0 / 26,7 / 26,4	28,2 / 28,4 / 29,0	27,6 / 28,0 / 27,8	25,6 / 25,5 / 24,9	
X	X	24,8 / 25,7 / 25,3	27,9 / 27,4 / 27,5	28,5 / 26,3 / 27,2	X	X	X	X	X	22,9 / 24,0 / 24,5	24,9 / 24,5 / 24,2	24,2 / 24,0 / 24,1	26,7 / 25,6 / 27,1	28,0 / 28,5 / 28,1	27,0 / 27,0 / 27,0	26,5 / 25,4 / 24,6	
X	X	26,3 / 26,4 / 26,6	27,5 / 27,9 / 27,5	27,0 / 26,9 / 27,3	X	X	X	X	X	24,7 / 25,1 / 24,8	25,1 / 24,0 / 24,2	24,4 / 24,3 / 24,1	25,7 / 24,0 / 23,5	29,1 / 28,3 / 28,6	28,4 / 28,3 / 29,2	26,6 / 25,8 / 25,5	
Stabilizovaný $E_{C,S,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
33,6	X	30,3	32,1	31,1	X	X	44,2	X	X	29,0	31,3	28,7	30,5	32,5	32,0	29,7	
X	X	30,4	33,0	30,6	X	X	X	X	X	28,0	29,6	28,7	30,3	32,2	31,2	29,7	
X	X	30,8	32,7	30,9	X	X	X	X	X	29,9	31,2	29,7	29,1	32,4	32,5	31,1	
Stabilizovaný $E_{C,S,j}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
36,3 / 30,9 / X	X	29,9 / 30,3 / 30,6	32,4 / 32,0 / 31,9	31,5 / 31,1 / 30,7	X	X	51,1 / 41,6 / 39,8	X	X	28,8 / 29,7 / 28,5	34,8 / 28,1 / 31,8	28,1 / 28,9 / 29,0	30,9 / 30,4 / 30,3	32,2 / 32,3 / 33,1	31,9 / 32,4 / 31,7	30,4 / 29,1 / 29,6	
X	X	29,9 / 31,2 / 30,2	33,2 / 33,1 / 32,7	31,5 / 29,4 / 30,8	X	X	X	X	X	27,0 / 29,0 / 28,1	33,7 / 32,6 / 24,5	29,3 / 28,4 / 28,5	30,3 / 29,6 / 31,0	32,2 / 32,1 / 32,3	31,3 / 31,0 / 31,3	30,9 / 28,9 / 29,2	
X	X	30,8 / 30,7 / 31,0	32,7 / 32,9 / 32,6	31,0 / 30,7 / 30,9	X	X	X	X	X	29,8 / 30,0 / 29,9	32,8 / 30,5 / 30,4	30,0 / 29,8 / 29,3	30,1 / 28,8 / 28,5	32,8 / 32,1	32,8 / 32,0 / 32,8	31,6 / 30,9 / 30,7	

SCC 45/55						25 kg Dramix_ref											
SCC 45/55ref					žih	25_2013	25_2015	25_2016		25_2017_3dny			25_2017				
2013	2016	2017			2016			A	B	1E	2E	3E	4E	5E	6E	13E	
		1E	2E	3E	2016 _žih												
Poissonův součinitel v (poč. / stabiliz.); v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
X	X	0,21/ 0,25	0,23/ 0,30	0,26/ 0,28	X	X	X	X	0,18/ 0,24	0,21/ 0,35	0,23/ 0,23	0,24/ 0,24	0,25/ 0,27	0,24/ 0,26	0,23/ 0,26		
X	X	0,21/ 0,24	0,24/ 0,31	0,26/ 0,27	X	X	X	X	0,18/ 0,22	0,21/ 0,32	0,23/ 0,23	0,23/ 0,25	0,25/ 0,27	0,24/ 0,25	0,23/ 0,26		
X	X	0,22/ 0,25	0,24/ 0,31	0,26/ 0,27	X	X	X	X	0,20/ 0,24	0,21/ 0,34	0,23/ 0,24	0,22/ 0,23	0,26/ 0,27	0,25/ 0,25	0,23/ 0,28		
Stáří vzorků v době stanovení: E_C, v																	
3,5 roku	28 dní	28 dní			1 měsíc	3,5 roku	1 rok	28 dní	3 dny			28 dní					

Tabulka E 2 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (25_2017ref; 25_2015žih; 25_2016žih; 25_2017žih)

SCC 45/55								
25 kg Dramix_ref			žih					
25_2017_1rok			25_2015_žih	25_2016_žih		25_2017_žih		
10	11	12		A	B	7E	8E	9E
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]								
ref			400	400	400			
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - dle (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A; (válec: d = 150 mm, h = 300 mm)								
Počáteční $E_{C,0}$ [GPa]								
25,4	24,8	25,8	28,8	23,1	23,5	24,8	24,7	23,1
Počáteční $E_{C,0,i}$ (levá / pravá) [GPa]								
26,3 / 24,4	24,3 / 25,3	26,4 / 25,2	27,8 / 29,7	23,4 / 22,7	21,3 / 25,6	24,4 / 25,2	23,8 / 25,6	23,8 / 22,4
Stabilizovaný $E_{C,S}$ [GPa]								
29,1	29,0	29,9	32,3	26,5	26,7	28,0	28,1	27,2
Stabilizovaný $E_{C,S,j}$ (levá / pravá) [GPa]								
29,7 / 28,6	28,6 / 29,4	30,1 / 29,7	31,0 / 33,6	26,8 / 26,3	24,9 / 28,5	27,9 / 28,1	27,4 / 28,7	27,7 / 26,8
Horní zatěžovací napětí σ_a [MPa]								
20,8			15	15	15	20,8		
Válcová pevnost - jednotlivě [MPa]								
54,6	53,9	55,8	62,2	44,3	51,6	51,8	50,4	47,1
Porovnání naměř. válcových pev. od f_c: Podmínka < 20 %								
ano	ano	ano	ne	ano	ano	ano	ano	ano
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - DIC								
X			2D	X	X	3D		
Počáteční $E_{C,0,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm								
X	X	X	29,4	X	X	24,2	24,8	21,1
X	X	X	X	X	X	24,2	24,4	21,4
X	X	X	X	X	X	25,2	25,2	21,6

SCC 45/55								
25 kg Dramix_ref			žih					
25_2017_1rok			25_2015_žih	25_2016_žih		25_2017_žih		
10	11	12		A	B	7E	8E	9E
Počáteční $E_{C,0,DIC,i}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm								
X	X	X	28,8 / 31,6 / 27,8	X	X	23,7 / 24,7 / 24,3	25,3 / 24,1 / 25,0	21,0 / 20,8 / 21,4
X	X	X	X	X	X	24,3 / 24,1 / 24,2	24,7 / 24,5 / 23,9	21,3 / 21,4 / 21,6
X	X	X	X	X	X	25,1 / 25,2 / 25,4	25,2 / 25,3 / 25,2	21,3 / 21,6 / 22,0
Stabilizovaný $E_{C,S,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm								
X	X	X	32,5	X	X	27,4	28,1	25,8
X	X	X	X	X	X	27,6	27,8	26,0
X	X	X	X	X	X	28,7	28,1	26,4
Stabilizovaný $E_{C,S,j}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm								
X	X	X	31,9 / 32,2 / 33,4	X	X	26,7 / 27,7 / 27,7	28,8 / 27,3 / 28,2	25,7 / 26,0 / 25,7
X	X	X	X	X	X	27,6 / 27,6 / 27,7	28,0 / 27,9 / 27,4	25,9 / 25,9 / 26,2
X	X	X	X	X	X	28,6 / 28,7 / 28,8	28,0 / 28,1 / 28,1	26,2 / 26,2 / 26,8
Poissonův součinitel ν (poč. / stabiliz.); v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm								
X	X	X	X	X	X	0,23/	0,21/	0,22/
						0,23	0,23	0,20
X	X	X	X	X	X	0,23/	0,21/	0,23/
						0,24	0,23	0,20
X	X	X	X	X	X	0,24/	0,22/	0,23/
						0,25	0,23	0,21
Stáří vzorků v době stanovení: E_C, v								
1 rok			1 rok	1 měsíc	3 měsíce	1 měsíc		

Tabulka E 3 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (50_2013ref; 50_2016ref; 75_2013ref; 2PP_2013ref; 4PP_2013ref; Syn2_2013ref; Syn4_2013ref; C2_2013ref; Syn2_2013žih; Syn4_2013žih; 50_2016žih)

SCC 45/55ref								SCC45/55žih		
50 kg Dramix		75 kg Dramix	2 kg Texzem	4 kg Texzem	2 kg Synmix	4 kg Synmix	2 kg Carbon	2 kg Synmix	4 kg Synmix	50 kg Dramix
50_2013	50_2016	75_2013	2PP_2013	4PP_2013	Syn2_2013	Syn4_2013	C2_2013	Syn2_2013_žih	Syn4_2013_žih	50_2016_žih
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]										
ref								750	680	400
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - dle (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A; (válec: d = 150 mm, h = 300 mm)										
Počáteční $E_{C,0}$ [GPa]										
37,3	24,7	33,1	32,3	31,4	33,0	33,3	32,0	16,7	12,2	21,4
Počáteční $E_{C,0,i}$ (levá / pravá) [GPa]										
35,5 / 39,1	25,1 / 24,3	34,9 / 31,3	28,6 / 36,0	29,4 / 33,0	33,4 / 32,5	30,1 / 36,6	32,7 / 31,2	17,5 / 15,8	11,8 / 12,7	20,7 / 22,1
Stabilizovaný $E_{C,S}$ [GPa]										
41,2	28,8	34,9	35,0	34,9	36,0	35,8	35,4	23,7	20,7	24,8
Stabilizovaný $E_{C,S,j}$ (levá / pravá) [GPa]										
39,3 / 43,1	29,2 / 28,3	36,3 / 33,6	31,6 / 38,4	33,2 / 36,6	36,2 / 35,7	31,7 / 39,9	35,8 / 35,1	24,5 / 22,8	19,9 / 21,5	24,2 / 25,4
Horní zatěžovací napětí σ_a [MPa]										
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Válcová pevnost - jednotlivě [MPa]										
48,3	54,6	58,4	42,6	58,8	41,9	58,8	58	65,2	21,2	41,6
Porovnání naměř. válcových pev. od f_C: Podmínka < 20 %										
ano	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ne	ne	ne	ano
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - DIC										

SCC 45/55ref							SCC45/55žih			
50 kg Dramix		75 kg Dramix	2 kg Texzem	4 kg Texzem	2 kg Synmix	4 kg Synmix	2 kg Carbon	2 kg Synmix	4 kg Synmix	50 kg Dramix
50_2013	50_2016	75_2013	2PP_2013	4PP_2013	Syn2_2013	Syn4_2013	C2_2013	Syn2_2013_žih	Syn4_2013_žih	50_2016_žih
2D	X	X	X	X	X	2D	X	X	2D	X
Počáteční $E_{C,0,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm										
35,3	X	X	X	X	X	33,6	X	X	9,2	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Počáteční $E_{C,0,DIC,i}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm										
33,4 / 35,4 / 37,0	X	X	X	X	X	22,8 / 43,1 / 34,9	X	X	5,3 / 10,5 / 11,9	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stabilizovaný $E_{C,S,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm										
39,5	X	X	X	X	X	34,2	X	X	15,3	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stabilizovaný $E_{C,S,j}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm										
36,5 / 39,3 / 42,6	X	X	X	X	X	23,0 / 42,7 / 36,9	X	X	8,9 / 18,2 / 18,9	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

SCC 45/55ref								SCC45/55žih		
50 kg Dramix		75 kg Dramix	2 kg Texzem	4 kg Texzem	2 kg Synmix	4 kg Synmix	2 kg Carbon	2 kg Synmix	4 kg Synmix	50 kg Dramix
50_2013	50_2016	75_2013	2PP_2013	4PP_2013	Syn2_2013	Syn4_2013	C2_2013	Syn2_2013_žih	Syn4_2013_žih	50_2016_žih
Poissonův součinitel v (poč. / stabiliz.); v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm										
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stáří vzorků v době stanovení: E _C , v										
3,5 roku	28 dní	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	3,5 roku	1 měsíc

Tabulka E 4 Zjištěné hodnoty (ČSN EN 12390-13, 2014) a pomocí DIC; hodnoty Poissonova souč. (SCC30/37/14ref; Syn2_30/37/13ref; 40_30/37/13ref; 25_30/37/14ref; Syn2_30/37/13žih; 40_30/37/13žih; 25_30/37/14žih; SCC30/37/14žih; C25/30ref; 2PP_C25/30ref; FRC_C25/30_2015ref; C25/30žih; FRC_C25/30_2015žih; HSC_2014ref)

SCC30/37ref				SCC30/37žih				C25/30ref				C25/30žih			HSC_2014ref		
SCC 30/37/14	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix		SCC 30/37/14_žih	C25/30ref	2 kg Texzem	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	2015_žih	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	HSC_2014ref			
SCC30/37/14	Syn2_30/37/13	40_30/37/13	25_30/37/14	Syn2_30/37/13_žih	40_30/37/13_žih	25_30/37/14_žih			C25/30_2015				FRC_C25/30_2015_žih	HSC_I_2014_ref	HSC_II_2014_ref	HSC_III_2014_ref	
						V9	V11	2014_žih	A	B	2PP_2015						
TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ - maximální teplota [°C]																	
ref				400	400	400	400		ref				400	400	ref		
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - dle (ČSN EN 12390-13, 2014), Metoda A; (válec: d = 150 mm, h = 300 mm)																	
Počáteční $E_{C,0}$ [GPa]																	
25,3	30,5	22,5	25,3	23,9	29,7	23,5	22,5	24,2	26,2	23,7	35,3	24,0	19,2	19,5	33,2	33,2	32,5
Počáteční $E_{C,0,i}$ (levá / pravá) [GPa]																	
24,2 / 26,3	29,9 / 31,1	22,0 / 23,1	25,1 / 25,5	23,2 / 24,6	29,5 / 30,0	24,4 / 22,6	23,2 / 21,9	24,9 / 23,4	27,8 / 24,7	23,3 / 24,0	41,1 / 29,5	23,8 / 24,3	19,3 / 19,0	20,4 / 18,6	35,7 / 30,8	37,8 / 28,6	33,2 / 31,8
Stabilizovaný $E_{C,s}$ [GPa]																	
29,3	33,6	26,0	28,8	27,8	31,6	25,1	25,7	27,7	30,1	28,9	40,3	28,8	24,6	24,9	36,6	36,8	36,6
Stabilizovaný $E_{C,s,j}$ (levá / pravá) [GPa]																	
28,9 / 29,7	33,0 / 34,2	25,4 / 26,7	28,7 / 28,8	27,2 / 28,4	31,4 / 31,7	25,8 / 24,3	26,4 / 24,9	28,6 / 26,9	31,9 / 28,4	28,5 / 29,3	47,5 / 33,2	29,1 / 28,5	24,9 / 24,4	25,8 / 24,0	38,3 / 34,9	40,9 / 32,6	37,1 / 36,1
Horní zatěžovací napětí σ_a [MPa]																	
15	15	15	15	15	15	15	15	15	13	13	13	13	13	13	25	25	25
Válcová pevnost - jednotlivě [MPa]																	
30,4	55,6	50,3	32,7	40,3	33,7	27,3	47,6	48	48,0	43,3	42,8	47,0	X	39,9	77,2	66,7	71,2
Porovnání naměř. válcových pev. od f_c: Podmínka < 20 %																	

SCC30/37ref				SCC30/37žih					C25/30ref			C25/30žih			HSC_2014ref		
SCC 30/37/14	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix		SCC 30/37/14 žih	C25/30ref	2 kg Texzem	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	2015_žih	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	HSC_2014ref			
SCC30/37/14	Syn2_30/37/13	40_30/37/13	25_30/37/14	Syn2_30/37/13 žih	40_30/37/13 žih	25_30/37/14 žih			C25/30_2015		2PP_2015		FRC_C25/30_2015	FRC_C25/30_2015žih	HSC_I_2014 ref	HSC_II_2014 ref	HSC_III_2014 ref
ne	ano	ano	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
SEČNOVÝ MODUL PRUŽNOSTI - DIC																	
2D	X	X	2D	X	X	2D	X	2D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D
Počáteční $E_{C,0,DIC}$ [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
25,0	X	X	23,6	X	X	23,9	X	25,9	26,3	24,4	25,1	23,8	18,9	21,0	30,8	28,5	31,7
X	X	X	X	X	X	X	X	X	25,8	25,5	25,3	23,5	18,1	20,0	31,0	29,6	31,3
X	X	X	X	X	X	X	X	X	27,1	26,0	26,5	24,5	19,6	22,0	31,1	28,5	32,7
Počáteční $E_{C,0,DIC,i}$ (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
26,2 / 26,7 / 22,1	X	X	23,1 / 25,0 / 22,7	X	X	24,8 / 22,2 / 24,7	X	28,5 / 25,0 / 24,2	26,3 / 26,0 / 26,8	25,2 / 23,6 / 24,7	27,0 / 25,5 / 23,2	23,2 / 24,0 / 24,2	18,4 / 19,8 / 18,7	19,8 / 22,4 / 21,0	30,4 / 30,7 / 31,3	27,4 / 28,7 / 29,7	31,4 / 31,5 / 32,3
X	X	X	X	X	X	X	X	X	26,5 / 25,1 / 26,0	24,7 / 25,6 / 26,3	28,0 / 25,4 / 23,0	22,4 / 23,9 / 24,2	18,0 / 17,7 / 18,8	19,9 / 20,0 / 20,2	30,6 / 30,8 / 31,4	28,1 / 29,4 / 31,4	30,8 / 31,1 / 31,9
X	X	X	X	X	X	X	X	X	26,9 / 26,9 / 27,7	24,9 / 26,5 / 26,7	29,9 / 27,0 / 23,4	24,2 / 24,6 / 24,8	19,5/19,8/19,6	22,2/21,9/21,9	31,0 / 31,1 / 31,3	28,5 / 27,0 / 30,2	32,5 / 33,0 / 32,7

SCC30/37ref				SCC30/37žih				C25/30ref				C25/30žih		HSC_2014ref			
SCC 30/37/14	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix		SCC 30/37/14_žih	C25/30ref		2 kg Texzem	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	2015_žih	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	HSC_2014ref		
SCC30/37/14	Syn2_30/37/13	40_30/37/13	25_30/37/14	Syn2_30/37/13_žih	40_30/37/13_žih	25_30/37/14_žih			C25/30_2015		2PP_2015	FRC_C25/30_2015		FRC_C25/30_2015žih	HSC_I_2014_ref	HSC_II_2014_ref	HSC_III_2014_ref
						V9	V11	2014_žih	A	B							
Stabilizovaný E_{C,S,DIC} [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
27,5	X	X	27,3	X	X	25,6	X	31,2	29,0	28,2	28,7	29,4	24,9	27,1	33,7	32,3	35,7
X	X	X	X	X	X	X	X	X	28,1	29,6	29,4	29,3	23,9	25,9	33,8	33,1	35,4
X	X	X	X	X	X	X	X	X	29,7	29,8	29,2	30,0	25,3	27,9	34,2	32,2	36,6
Stabilizovaný E_{C,S,j} (levá / střed / pravá) [GPa]; v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
29,2 / 30,4 / 23,0	X	X	27,5 / 28,4 / 26,0	X	X	23,5 / 24,6 / 28,8	X	37,5 / 28,6 / 27,6	28,7 / 28,9 / 29,4	29,0 / 27,0 / 28,8	30,2 / 29,2 / 27,0	29,2 / 29,6 / 29,4	24,6 / 25,8 / 24,5	25,5 / 28,8 / 27,2	33,5 / 33,5 / 34,2	31,2 / 32,4 / 33,6	35,7 / 35,4 / 36,2
X	X	X	X	X	X	X	X	X	28,9 / 26,8 / 28,8	29,2 / 29,5 / 30,1	31,4 / 30,2 / 26,9	28,3 / 29,6 / 30,0	23,0 / 23,9 / 24,8	25,2 / 26,3 / 26,2	33,6 / 33,6 / 34,3	31,6 / 33,0 / 35,0	34,7 / 35,4 / 36,0
X	X	X	X	X	X	X	X	X	29,4 / 29,6 / 30,2	28,8 / 30,2 / 30,6	32,5 / 29,5 / 26,3	29,9 / 30,1 / 29,9	25,1/25,5/25,2	28,1/27,7/27,8	33,9 / 34,2 / 34,5	31,8 / 30,8 / 34,1	36,2 / 36,7 / 36,8
Poissonův součinitel v (poč. / stabiliz.); v řádcích shora dolů 130, 100, 260 mm																	
X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,24/ 0,22	0,25/ 0,24	0,21/ 0,19	0,18/ 0,17	0,22/ 0,23	0,20/ 0,20	0,20/ 0,18	0,21/ 0,18	0,19/ 0,18

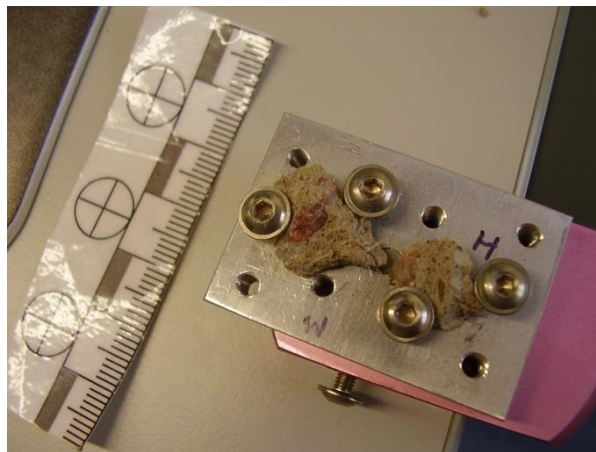
SCC30/37ref				SCC30/37žih					C25/30ref			C25/30žih		HSC_2014ref				
SCC 30/37/ 14	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix	2 kg Synmix	40 kg Dramix	25 kg Dramix		SCC 30/37/14 _žih	C25/30ref		2 kg Texzem	75 kg Dramix, 2 kg Texzem	2015_žih	75 kg Dramix, 2 kg Texzem		HSC_2014ref		
SCC30/37/14	Syn2_30/37/13	40_30/37/13	25_30/37/14	Syn2_30/37/13 _žih	40_30/37/13 _žih	25_30/37/ 14_žih			C25/30_2015		2PP_2015	FRC_C25/30 _2015		FRC_C25/30_ 2015žih	HSC_I_2014 ref	HSC_II_2014 ref	HSC_III_2014 ref	
						V9	V11	2014_žih	A	B								
X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,24/ 0,21	0,27/ 0,25	0,21/ 0,19	0,17/ 0,17	0,21/ 0,23	0,19/ 0,19	0,20/ 0,19	0,21/ 0,19	0,19/ 0,18	
X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,26/ 0,22	0,26/ 0,25	0,22/ 0,19	0,18/ 0,18	0,23/ 0,24	0,21/ 0,21	0,20/ 0,19	0,20/ 0,18	0,19/ 0,19	
Stáří vzorků v době stanovení: E_C, v																		
2 roky	3,33 roku	2,66 roku	2 roky	3,33 roku	2,66 roku	2 roky	2 roky	2 roky	2,5 roku	2,5 roku	2,5 roku	2,5 roku	2,5 roku	2,5 roku	3,33 roku	3,33 roku	3,33 roku	

SEZNAM OBRÁZKŮ

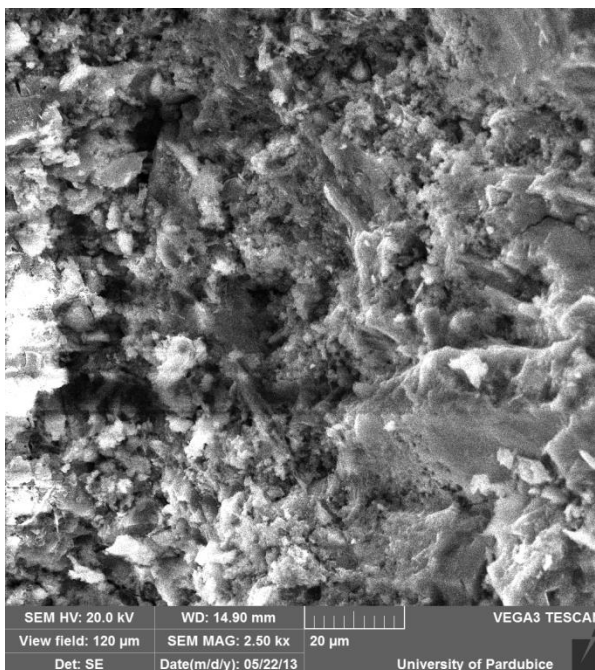
Obrázek F 1 Elektronový mikroskop (TESCAN VEGA 5130SB) s mikroanalyzátozem EDXA (Bruker Quantanax 200)	215
Obrázek F 2 Odštěpek zkušební tělesa (2PP_2013ref)	215
Obrázek F 3 Mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013ref (2,5 kx)	215
Obrázek F 4 Mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013žih na 1049 °C (1 kx).....	215
Obrázek F 5 EDXA – SCC45/55_2013ref	216
Obrázek F 6 EDXA – SCC45/55_2013žih na 1049 °C	216
Obrázek F 7 Mikrostruktura ztvrdlého 25_2013ref, rozhraní cementová matrice–ocelové vlákno (2 kx).....	216
Obrázek F 8 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, rozhraní cementová matrice–syntetické vlákno (700 x).....	216
Obrázek F 9 Mikrostruktura ztvrdlého 25_2013ref (SE vlevo, BSE vpravo), řez přes ocelový drátek (100 x).....	217
Obrázek F 10 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, rozhraní cementová matrice–syntetické vlákno (100 x).....	217
Obrázek F 11 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, „stabilní“ kostra (2,5 kx)	217
Obrázek F 12 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref (SE, BSE), cementová matrice, syntetické vlákno (300 x).....	218
Obrázek F 13 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013žih na 1049 °C, viditelný otisk po vytavení vláken (100 x)	218
Obrázek F 14 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013žih na 1049 °C, (1 kx).....	218
Obrázek F 15 Carbonové (uhlíkové) vlákno (1 kx)	219
Obrázek F 16 Mikrostruktura ztvrdlého C2_2013ref (700 x).....	219
Obrázek F 17 Mikrostruktura kameniva Rugen, žih na 400 °C (2,5 kx)	219
Obrázek F 18 Mikrostruktura kameniva Rugen, žih na 400 °C (1 kx)	219
Obrázek F 19 Binokulární mikroskop (Nikon SMZ 800)	220
Obrázek F 20 Světelná mikroskopie: porovnání ocel. drátků po zatížení na 1049 °C (vlevo) / před teplotním namáhání (vpravo).....	220
Obrázek F 21 Struktura LWSCCref	220
Obrázek F 22 Porušená tranzitní zóna C30/37žih na 1049 °C.....	220



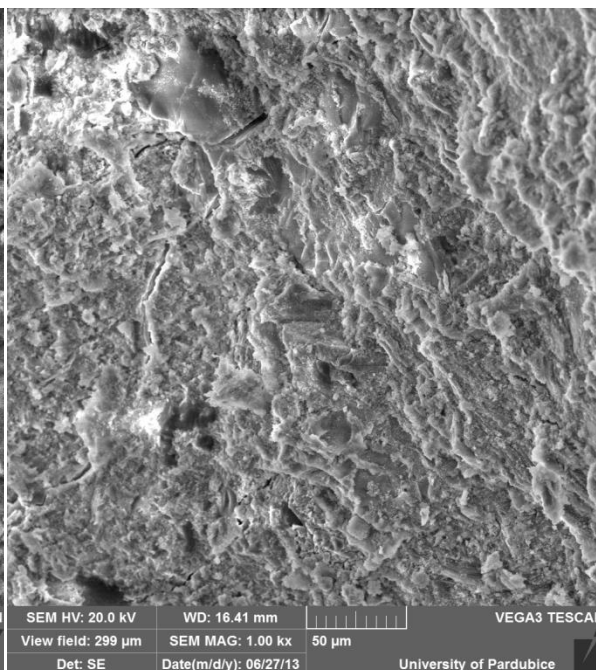
Obrázek F 1 Elektronový mikroskop (TESCAN VEGA 5130SB) s mikroanalyzátozem EDXA (Bruker Quantanox 200)



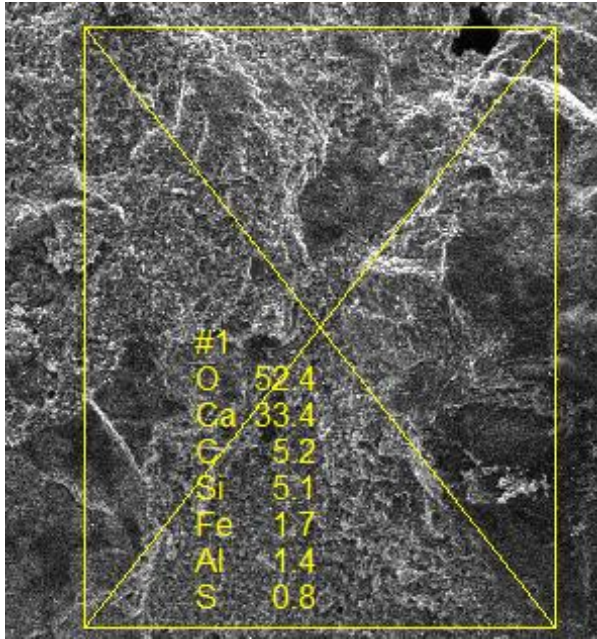
Obrázek F 2 Odštěpek zkušebního tělesa (2PP_2013ref)



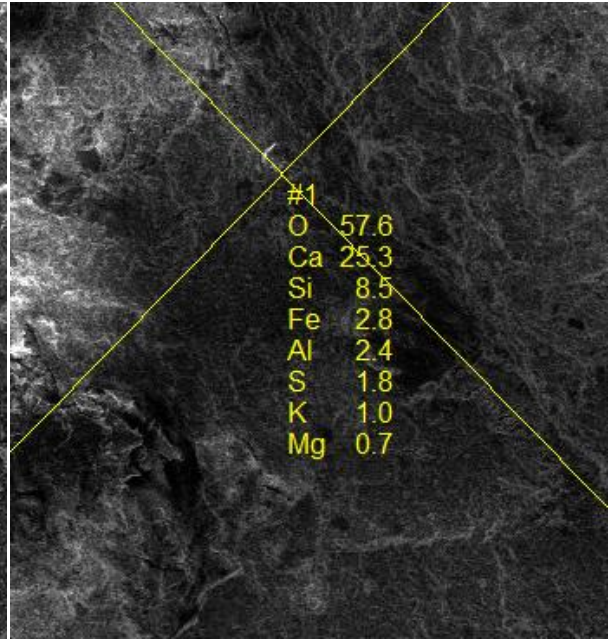
Obrázek F 3 Mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013ref (2,5 kx)



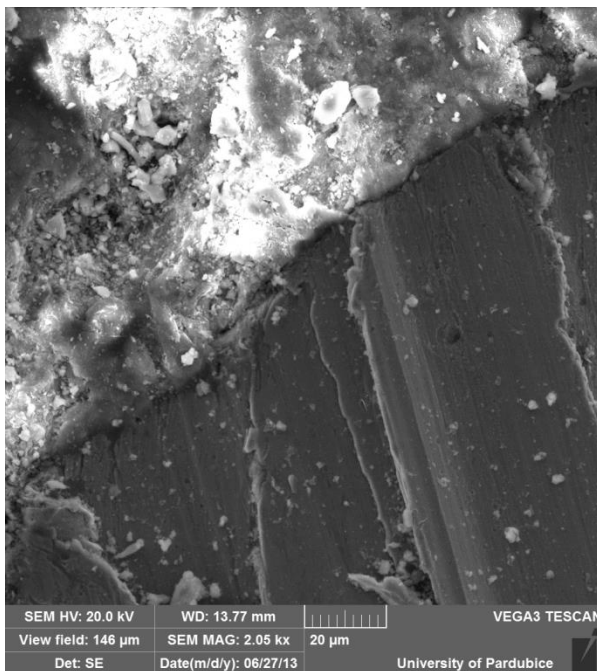
Obrázek F 4 Mikrostruktura ztvrdlého SCC45/55_2013žih na 1049 °C (1 kx)



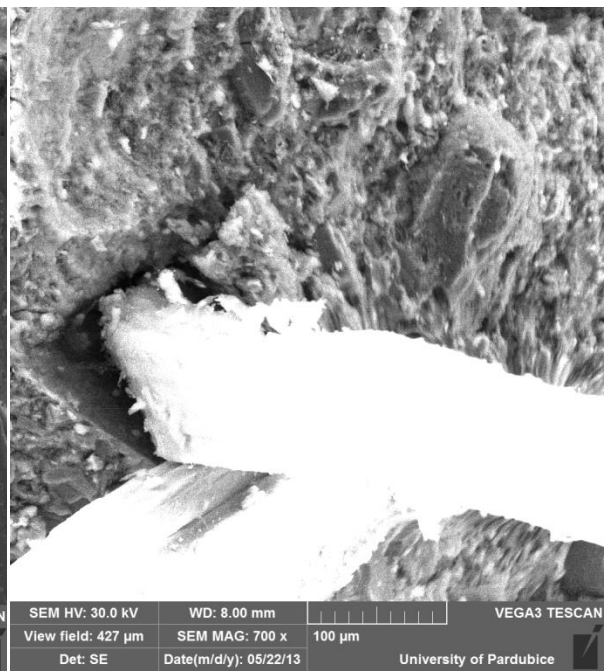
Obrázek F 5 EDXA – SCC45/55_2013ref



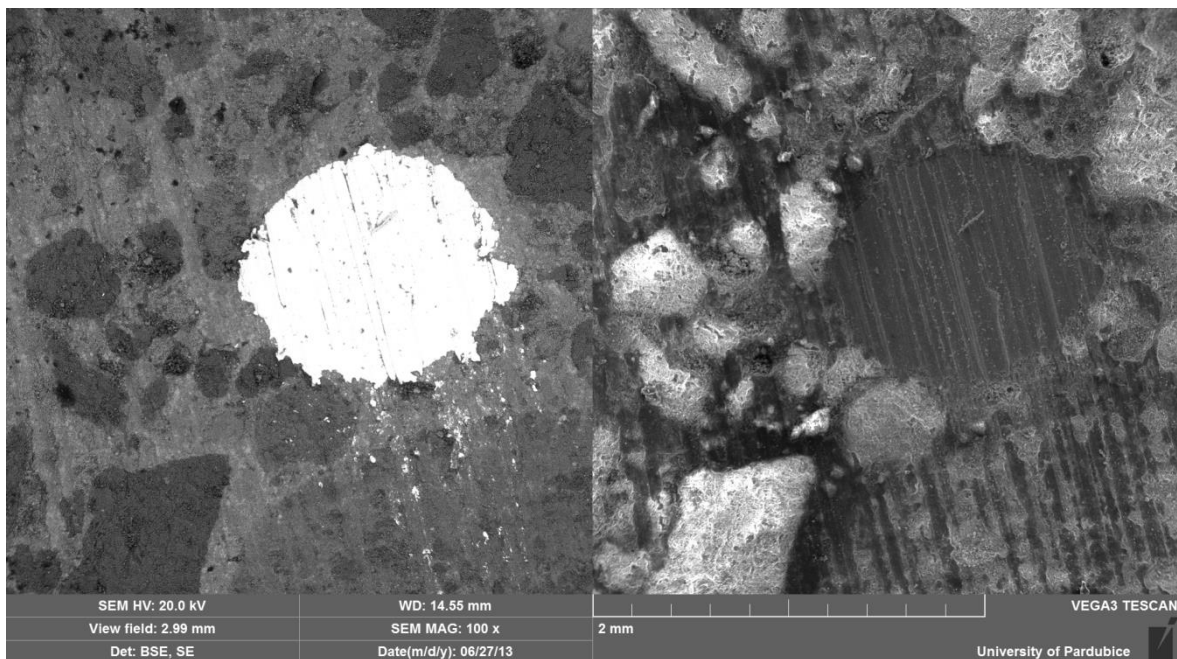
Obrázek F 6 EDXA – SCC45/55_2013žihl na 1049 °C



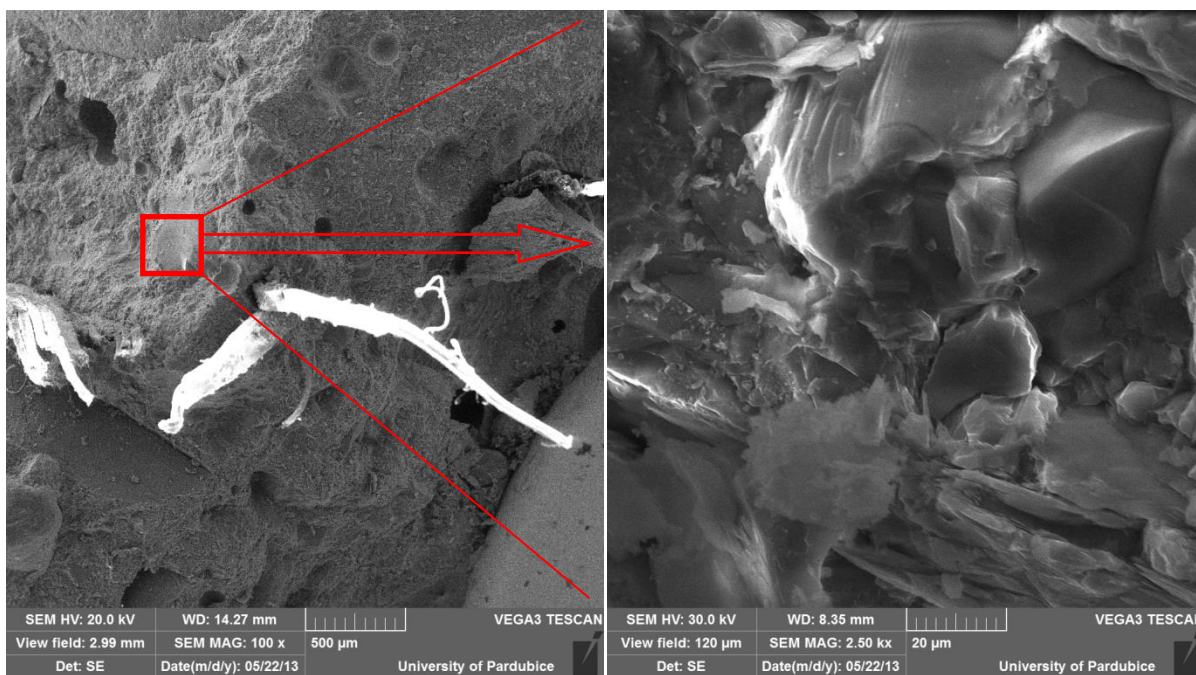
Obrázek F 7 Mikrostruktura ztvrdlého 25_2013ref, rozhraní cementová matrice–ocelové vlákno (2 kx)



Obrázek F 8 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, rozhraní cementová matrice–syntetické vlákno (700 x)

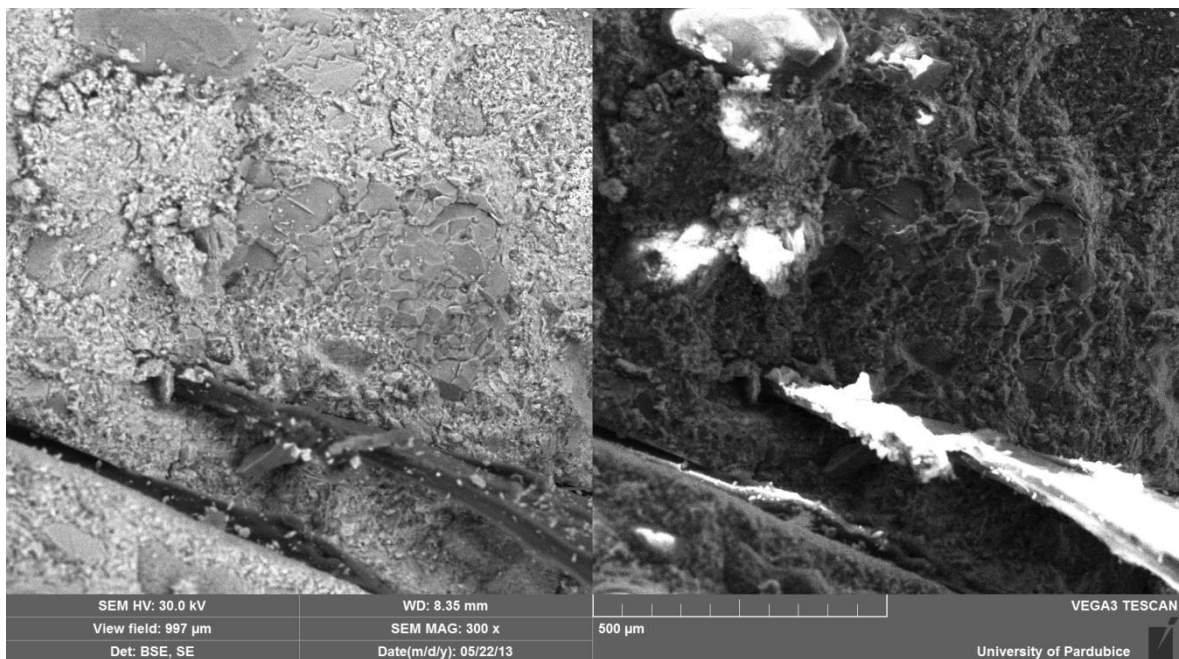


Obrázek F 9 Mikrostruktura ztvrdlého 25_2013ref (SE vlevo, BSE vpravo), řez přes ocelový drátek (100 x)

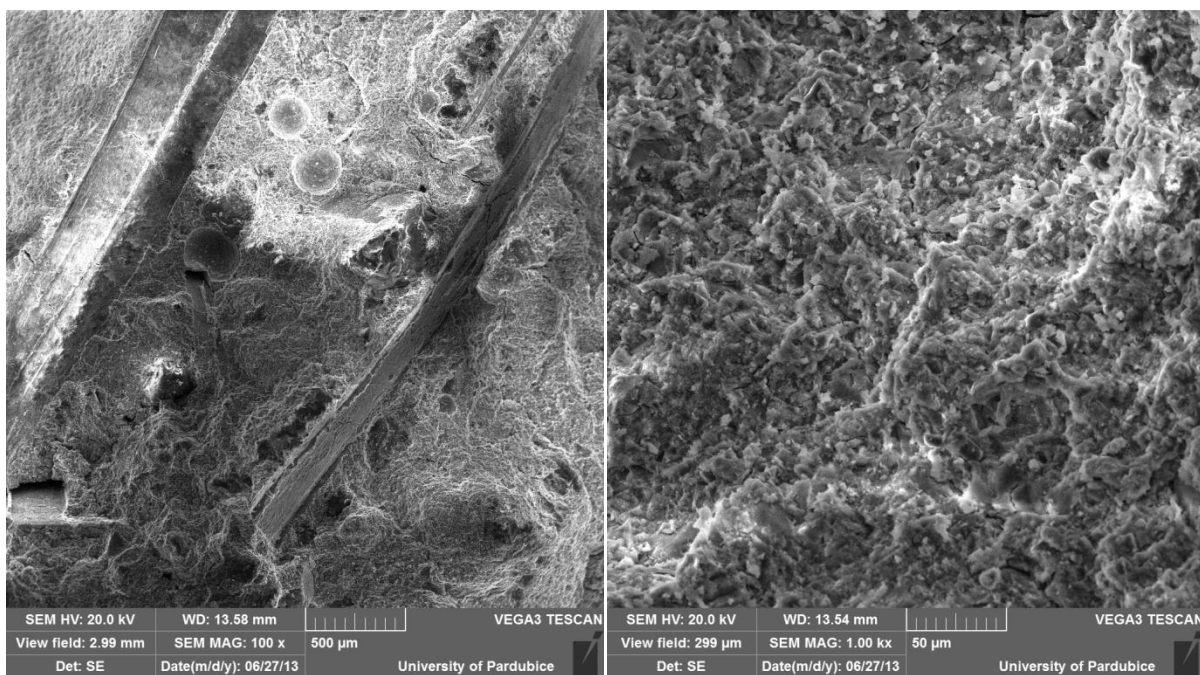


Obrázek F 10 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, rozhraní cementová matrice–syntetické vlákno (100 x)

Obrázek F 11 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref, „stabilní“ kostra (2,5 kx)

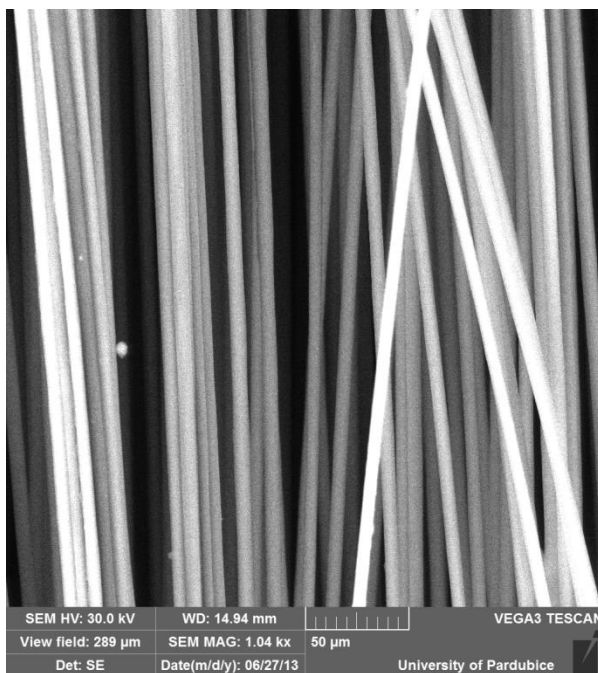


Obrázek F 12 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013ref (SE, BSE), cementová matrice, syntetické vlákno (300 x)

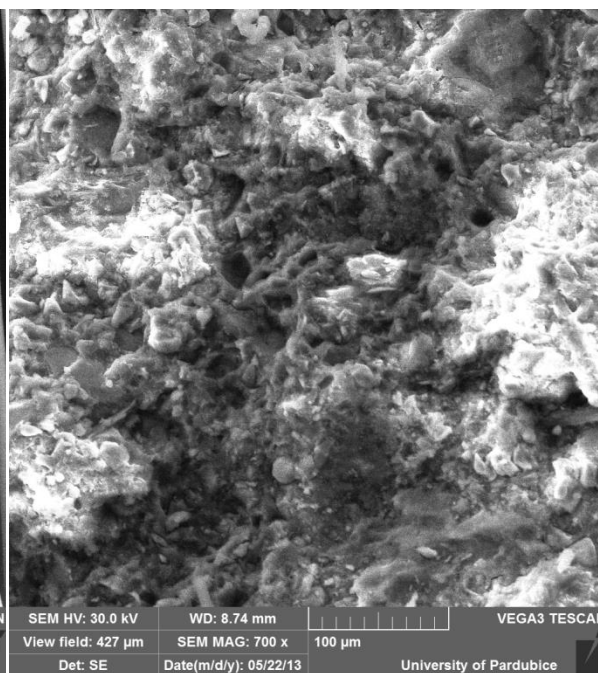


Obrázek F 13 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013žih na 1049 °C, viditelný otisk po vytavení vláken (100 x)

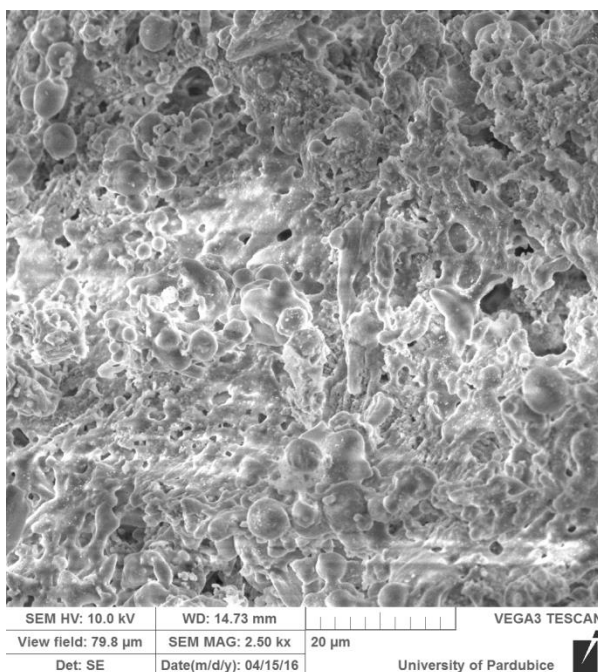
Obrázek F 14 Mikrostruktura ztvrdlého 2PP_2013žih na 1049 °C, (1 kx)



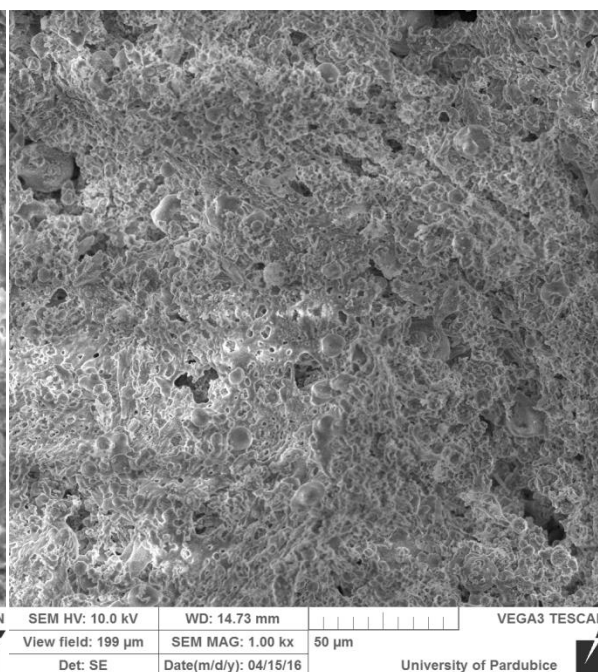
Obrázek F 15 Carbonové (uhlíkové) vlákno (1 kx)



Obrázek F 16 Mikrostruktura ztvrdlého C2_2013ref (700 x)



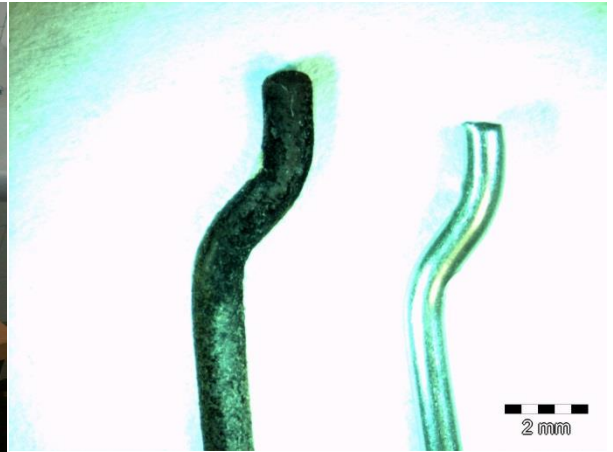
Obrázek F 17 Mikrostruktura kameniva Rügen, žíh na 400 °C (2,5 kx)



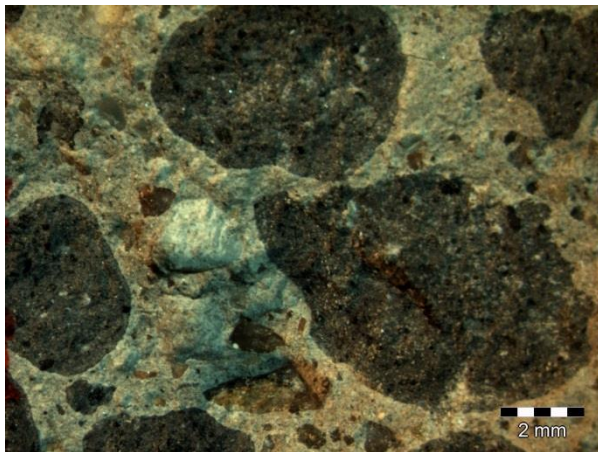
Obrázek F 18 Mikrostruktura kameniva Rügen, žíh na 400 °C (1 kx)



Obrázek F 19 Binokulární mikroskop (Nikon SMZ 800)



Obrázek F 20 Světelná mikroskopie: porovnání ocel. drátků po zatížení na 1049 °C (vlevo) / před teplotním namáháním (vpravo)



Obrázek F 21 Struktura LWSCCref



Obrázek F 22 Porušená tranzitní zóna C30/37žih na 1049 °C