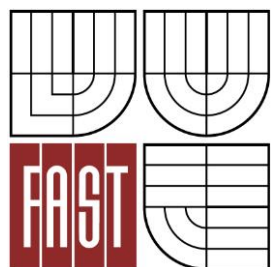




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# POROVNÁNÍ DYNAMICKÝCH MODULŮ PRUŽNOSTI SPRÁVKOVÝCH HMOT VYSTAVENÝCH TEPLOTNÍMU ZATÍŽENÍ

COMPARISON OF DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY REPAIR MATERIALS EXPOSED TO  
THERMAL STRESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARKÉTA MUNDUCHOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BROŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Markéta Munduchová
<b>Název</b>	Porovnání dynamických modulů pružnosti správkových hmot vystavených teplotnímu zatížení
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2015
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

G. Martinček: Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií, Vydavateľstvo SAV, 1962  
R.T.L.ALLEN, S.C.EDWARDS, J.D.N.SHAW: The Repair of Concrete Structures, 1993  
S. Bechyně: . Technologie betonu. Svazek čtvrtý: Pružnost betonu. Praha: SNTL, 1959,  
P. Pytlík: Technologie betonu, VUT v Brně, 2002  
V. Kodur: Properties of Concrete at Elevated Temperatures, 2014  
M. Bastami<sup>1</sup>, F. Aslani, M. Esmaeilnia Omran: High-Temperature Mechanical Properties of Concrete, 2010  
Články v odborných časopisech a z konferencí zahraniční a tuzemské. Příslušné technické normy.

## Zásady pro vypracování

Při působení teplot na správkové hmoty dochází ke změnám v jejich mikrostruktúře, které závisí na teplotě a době působení. Tyto změny se projevují mj. i na fyzikálně –mechanických charakteristikách správkových hmot.

Cílem práce je sledování změn dynamických modulů pružnosti správkových hmot v závislosti na působícím teplotním zatížení. Pro naplnění zadání diplomové práce je třeba v teoretické části popsat účinky teplot betonu z hlediska změn ve struktuře a jejich vliv na fyzikálně-mechanické charakteristiky. Uvést modely využívané k simulaci působení teplot na beton. Popsat nedeštruktivní dynamické metody využitelné ke zjišťování dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu. Experimentální část-pro experimentální práce bude využita jednak komerčně vyráběná správková hmota, jednak správková hmoty se složením vycházejících z vybraných receptur vypracovaných na UTHD v rámci řešení výzkumných projektů. Z každé správkové hmoty budou vyrobeny zkušební tělesa-trámečky 40x40x160mm. Srovnávací vzorky budou zkoušeny ve stáří 7 a 28 dní. Vzorky pro sledování vlivu teplot na dynamický modul pružnosti budou exponovány po době zrání 28 dní v prostředí s teplotami od 200oC do 800oC. Dynamický modul pružnosti bude zjišťován z měření ultrazvukovou impulsovou metodou před a po expozici teplotním zatížením. U srovnávacích vzorků a vzorků po teplotním zatížení bude zjištěna pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Vyhodnocení výsledků zkoušek a zhodnocení vlivu teplotního zatížení na dynamický modul pružnosti správkových hmot. Rozsah práce cca 60 stran.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....  
doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Diplomová práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části jsou uvedeny poznatky týkající se změny struktury betonu, který je vystaven teplotnímu zatížení. Dále jsou v práci popsány modely, které se využívají k simulaci působení teplot na beton. Hodnocení narušení vnitřní struktury je vhodné pomocí nedestruktivních dynamických metod, kterými se zjistí dynamický modulu pružnosti v tlaku a v tahu. Mezi tyto metody patří ultrazvuková impulzová a rezonanční metoda, a proto byla provedena rešerše článků zabývajících se těmito metodami.

V experimentální části diplomové práce byla vyrobena zkušební tělesa ze správkových hmot vypracovaných na ÚTHD a komerčně vyráběných správkových hmot. Zkušební tělesa byla vystavena teplotnímu zatížení: 200, 400, 600, 800 °C. Narušení vnitřní struktury bylo sledováno pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody.

## **Klíčová slova**

Správková hmota, beton, teplotní zatížení, ultrazvuková impulzová metoda, rezonanční metoda.

## **Abstract**

Diploma thesis is composed of theoretical and practical part. In theoretical part there are findings related to structure changes of concrete exposed to high temperatures. Models used to simulate high temperature exposure of concrete are described in this thesis. Evaluation of internal structure damage is appropriate by using non-destructive methods, which determine dynamic modulus of elasticity in compression and tension. These methods includes ultrasonic impulse method and resonance method and therefore research was made of articles contains these methods.

In experimental part of diploma thesis the test specimens was made from repair materials from UTHD and commercially produced repair materials. The test specimens were subjected to thermal load: 200, 400, 600, 800 °C. Damage of internal structure was examined by ultrasonic impulse method and resonance method.

## **Keywords**

Repair materials, concrete, thermal load, ultrasonic impulse method, resonance method

## **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Markéta Munduchová *Porovnání dynamických modulů pružnosti správkových hmot vystavených teplotnímu zatížení*. Brno, 2016. 126 s., 10 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 12.1.2016

.....  
podpis autora

Bc. Markéta Munduchová

**Poděkování:**

Ráda bych poděkovala panu doc. Ing. Jiřímu Brožovskému, CSc. za přístup, cenné rady, odborné vedení a čas, který mi věnoval při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině, že mi umožnila studium na této škole a podporovala mě. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

## Obsah

1 ÚVOD .....	11
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 Požadavky na požární odolnost stavebních hmot a konstrukcí.....	12
2.1.1 Požární odolnost.....	12
2.1.2 Základní požadavky požární odolnosti staveb .....	12
2.1.3 Způsoby zajištění požární odolnosti staveb .....	13
2.1.4 Třídění stavebních výrobků a konstrukcí dle požární odolnosti .....	14
2.1.5 Modely požáru.....	16
2.1.6 Nominální teplotní křivky .....	17
2.2 Základní požadavky na betony vystavené působení vysokých teplot.....	18
2.2.1 Hodnoticí kritéria .....	18
2.2.2 Vyšetřování konstrukce.....	19
2.2.3 Návrhové hodnoty .....	20
2.2.4 Vliv krytí na odolnost betonu proti účinkům teplotního zatížení.....	21
2.3 Důsledky působení vysokých teplot na beton .....	21
2.3.1 Změny ve struktuře betonu.....	22
2.3.1.1 Chování cementového tmele při působení vysokých teplot.....	23
2.3.1.2 Chování kameniva při působení vysokých teplot .....	24
2.3.1.3 Interakce cementového tmele a kameniva při působení vysokých teplot .....	25
2.3.1.4 Odprýskávání betonu.....	25
2.3.2 Vliv na mechanické charakteristiky betonu .....	26
2.3.2.1 Pevnost betonu v tlaku .....	26
2.3.2.2 Modul pružnosti betonu .....	27
2.4 Dynamický modulu pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou.....	28
2.4.1 Dynamický modulu pružnosti v tlaku a v tahu .....	28
2.4.2 Ultrazvuková impulzová metoda .....	29
2.4.2.1 Princip metody .....	29
2.4.2.2 Faktory ovlivňující výsledky měření.....	30
2.4.2.3 Způsoby měření.....	34
2.4.2.4 Stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu.....	35
2.4.3 Rezananční metoda .....	36



2.4.3.1 Princip metody .....	36
2.4.3.2 Faktory ovlivňující výsledky měření.....	37
2.4.3.3 Metodika měření .....	38
2.4.3.4 Stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu, ve smyku a dynamického Poissonova koeficientu .....	39
2.5 Zjišťování porušení vnitřní struktury .....	41
3 CÍLE PRÁCE .....	43
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	44
4.1 Metodika zkoušek .....	44
4.1.1 Zkoušky vstupních surovin .....	44
4.1.1.1 Cement pro obecné použití.....	44
4.1.1.2 Hlinitanový cement .....	45
4.1.1.3 Kamenivo .....	46
4.1.2 Zkoušky správkových hmot .....	47
4.1.2.1 Teplotní zatěžování zkušebních těles.....	48
4.1.2.2 Objemová hmotnost .....	48
4.1.2.3 Pevnost v tahu za ohybu.....	48
4.1.2.4 Pevnost v tlaku .....	48
4.1.2.5 Měření ultrazvukovou impulzovou metodou .....	49
4.1.2.6 Měření kladívkovou rezonanční metodou.....	49
4.2 Základní parametry složek správkových hmot.....	51
4.2.1 Složky správkových hmot .....	51
4.2.2 Výsledky zkoušek složek správkových hmot.....	52
4.2.2.1 Cementy .....	52
4.2.2.2 Kamenivo .....	52
4.3 Složení správkových hmot .....	53
4.4 Výsledky zkoušek správkových hmot.....	55
4.4.1 Výsledky zkoušek správkových hmot – srovnávací vzorky .....	55
4.4.2 Výsledky zkoušek správkových hmot po expozici při různých teplotách .....	60
4.5 Diskuze k výsledkům experimentálních prací .....	81
4.5.1 Změny sledovaných parametrů správkových hmot v závislosti na teplotním zatížení .....	81

4.5.2 Vyhodnocení výsledků měření nedestruktivními metodami a pevností jednotlivých správkových hmot .....	83
4.5.2.1 Správková hmota SH 1 (CEM I 42,5 R, křemičitý-normalizovaný písek) .....	89
4.5.2.2 Správková hmota SH 2 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, křemičitý-normalizovaný písek) .....	90
4.5.2.3 Správková hmota SH 3 (hlinitanový cement, křemičitý-normalizovaný písek) ..	92
4.5.2.4 Správková hmota SH 4 (hlinitanový cement, DDK 0/4 mm Želešice) .....	94
4.5.2.5 Správková hmota SH 5 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DDK 0/2 mm Želešice) ..	95
4.5.2.6 Správková hmota SH 6 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DDK 0/4 mm Želešice) ..	97
4.5.2.7 Správková hmota SH 7 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DTK 0/4 mm Žabčice) ...	99
4.5.2.8 Správková hmota SH 8 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DDK 0/4 mm Bílčice) ..	101
4.5.2.9 Správková hmota SH 9 (SikaTop – 122 SP) .....	102
4.5.2.10 Správková hmota SH 10 (Sika MonoTop – 612) .....	104
4.5.2.11 Zhodnocení výsledků měření nedestruktivními metodami a pevností jednotlivých správkových hmot .....	106
4.5.3 Porovnání rozdílů dynamických a relativních dynamických modulů pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou .....	107
4.5.4 Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevnostmi při teplotním namáhání správkových hmot .....	108
4.5.5 Porovnání změn dynamických modulů pružnosti s normovou křivkou pro betony uvedenou v ČSN EN 1992-1-2 [31] .....	111
5 ZÁVĚR .....	114
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	116
7 SEZNAM OBRÁZKŮ .....	120
8 SEZNAM TABULEK .....	122
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	123
10 SEZNAM PŘÍLOH .....	126

# 1 ÚVOD

Betonové a železobetonové konstrukce jsou během svého užívání vystaveny klimatickým účinkům a působení různých provozních médií v důsledku čeho dochází k porušení povrchových vrstev betonu, ale i k obnažení a korozi výztužné oceli. Pro prodloužení životnosti a zachování jejich provozní způsobilosti je nutné provádět sanace. K tomuto účelu jsou využívány různé typy správkových materiálů a nátěrových systémů.

Pro sanaci jsou používány správkové malty a betony, které mohou být na bázi cementu, cementu a modifikované polymerní přísady a na bázi polymerních pryskyřic.

Betonové a železobetonové konstrukce mohou být během svého užívání vystaveny působení vysokých teplot např. v důsledku požáru včetně správkových hmot, byla-li konstrukce sanována. Při vzniku požáru jsou správkové hmoty vystaveny účinkům zvýšené teploty stejně jako betonová konstrukce.

V průběhu vystavení betonu teplotnímu zatížení se jeho vlastnosti z hlediska transportu tepla a vlhkosti výrazně mění v důsledku teplotní roztažnosti a změny struktury betonu spojené s chemickým rozkladem cementové pasty a dalších složek společně s fázovou přeměnou křemene. Tyto probíhající procesy v betonu vedou ke snížení objemové hmotnosti, zvýšení pórovitosti a zvýšení propustnosti z hlediska migrace vodní páry, ale i k snížení pevností a modulů pružnosti.

Jedním z důležitých parametrů betonu a správkových hmot je modul pružnosti v tlaku a v tahu. Modul pružnosti se zjišťuje jednak z měření deformací při zatěžování v lise, ale pro jeho zjišťování lze využít i dynamických nedestruktivních metod zkoušení, konkrétně ultrazvukové impulzové a rezonanční metody. Těmito metodami se zjišťuje tzv. dynamický modul pružnosti. Do jeho výpočtu vstupuje parametr z nedestruktivního zkoušení a objemová hmotnost vyšetřovaného materiálu. Pro hodnocení změn ve struktuře betonu při zkoušce mrazuvzdornosti je využíván relativní dynamický modul pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou.

Cílem diplomové práce je zhodnocení vlivu teplotního zatížení na dynamický modul pružnosti v tlaku nebo v tahu, relativní dynamický modul pružnosti a na pevnost v tlaku a tahu za ohybu správkových hmot.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Požadavky na požární odolnost stavebních hmot a konstrukcí

#### 2.1.1 Požární odolnost

Požární bezpečnost stavebních objektů je schopnost objektů co nejvíce omezit riziko vzniku požáru, následné šíření požáru a zabránění ztrátám na životech a poškození zdraví osob, zvířat a ztrátám na majetku v případě požáru. Požární odolnosti lze dosáhnout vhodným urbanistickým začleněním stavby, vhodným dispozičním, konstrukčním a materiálovým řešením. Lze také využít požárně-bezpečnostní opatření a zařízení požární ochrany. Mezi tato zařízení patří například stabilní hasicí zařízení.

Požární odolnost je doba, která je vyjádřena v minutách. Během této doby je konstrukce schopna odolávat teplotám vzniklým od požáru, aniž by došlo ke ztrátě funkce konstrukce. Požární odolnost se udává třídou požární odolnosti dle ČSN 73 0810 [25] v platném znění.

Požární odolnost stavebních konstrukcí lze určit zkouškou, normovou hodnotou, výpočtem nebo kombinací možností (zkouška a výpočet). Při prokazování vlastností stavebních hmot na účinky požáru musí být splněna podmínka:

- požadovaná požární odolnost  $\leq$  zjištěná požární odolnost [1].

#### 2.1.2 Základní požadavky požární odolnosti staveb

Dne 9.11. 2011 byl přímo přejet překladem všemi státy Evropské unie dokument nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011. Dokument pojednává o sblížení zákonů a dalších právních a správních předpisů členských států týkajících se výrobků. V dokumentu jsou dále uvedeny základní požadavky na stavby a výrobky, které jsou rozříděny do sedmi skupin. Požární ochrana se týká druhé skupiny tohoto dokumentu. Mezi základní požadavky patří:

- mechanická odolnost a stabilita,
- požární bezpečnost,
- hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí,
- bezpečnost a přístupnost při užívání,

- ochrana proti hluku,
- úspora energie a tepla,
- udržitelné využívání přírodních zdrojů.

Opatření proti vzniku a šíření požáru jsou navrhována v projektové dokumentaci. Mezi tato opatření patří:

- únosnost a stabilita objektu po určitou dobu,
- zajištění bezpečného úniku osob, evakuace zvířat a majetku; tomuto požadavku je zapotřebí přizpůsobit dispoziční řešení, a to zejména návrh komunikací v objektu,
- zamezení šíření požáru uvnitř objektu; toho lze dosáhnout dělením objektu na menší celky (požární úseky) nebo vybavováním objektů aktivním zařízením požární ochrany (samočinné hasicí zařízení),
- zamezení přenosu požáru z hořícího objektu na objekt nehořící, který je přilehlý nebo protilehlý; tento požadavek lze zohlednit při urbanistickém návrhu,
- umožnění zasahujícím záchranným jednotkám účinný protipožární zásah; toto lze zohlednit v projektové dokumentaci vhodným návrhem přístupových komunikací a nástupních ploch [1].

### **2.1.3 Způsoby zajištění požární odolnosti staveb**

Mezi důležité požárně-bezpečnostní řešení objektů patří zhodnocení požární odolnosti navržené konstrukce. Při tomto řešení je třeba využít spolupráce projektanta stavební činnosti, projektanta požární bezpečnosti a statika. Mezi základní požadavky, které se kladou na stavby, patří požární odolnost společně s mechanickou odolností a stabilitou [2].

Zajištění požadavků na požární bezpečnost stavebních objektů lze provést pomocí pasivní požární ochrany, aktivními prostředky požární ochrany nebo kombinací těchto dvou metod. Je nutné zabývat se pasivní ochranou, protože do této skupiny patří odolnost konstrukce při požáru. Vhodně navržená nosná konstrukce z hlediska pasivní ochrany při požáru neztrácí stabilitu ani nosnou funkci.

Pasivní požární ochrana je zajištěna dispozičním řešením objektu, vhodným návrhem stavebních konstrukcí a rozumí se tím:

- dělení objektu na požární úseky,

- požární odolnost nosné konstrukce,
- požární odolnost požárně dělicích konstrukcí,
- bezpečné únikové cesty uvnitř objektu,
- omezení šíření požáru na přilehlé a protilehlé objekty.

Aktivní požární ochrana je zajištěna pomocí technických požárně-bezpečnostních zařízení a lze do této skupiny zařadit blízkost profesionální zásahové jednotky. Požárně-bezpečnostní zařízení a opatření mají tyto funkce:

- samočinná stabilní hasicí zařízení,
- zařízení dálkového přenosu,
- zařízení pro odvod kouře a tepla,
- elektrická požární signalizace,
- účinný zásah bezpečnostních jednotek,
- vhodné podmínky pro evakuaci osob, zvířat, majetku [4].

#### **2.1.4 Třídění stavebních výrobků a konstrukcí dle požární odolnosti**

Při hodnocení požárně-technických vlastností a účinků hasicích látek musíme rozlišit, jestli se jedná o výrobek, který bude teprve zabudován do stavby, nebo o výrobek, který je již součástí konstrukční části stavby. Stavební výrobky a hmoty se dle požární odolnosti hodnotí třídou reakce na oheň. Stavební konstrukce se hodnotí třídou požární odolnosti. Stavební výrobek není možné posoudit z hlediska požární odolnosti, protože ta souvisí se způsobem zabudování výrobku, jeho upevnění, úpravy spár a s dalšími faktory.

Stavební hmoty a výrobky se klasifikují dle třídy reakce na oheň podle normy ČSN EN 13501-1 [26]:

- A1: nehořlavé (beton),
- A2: téměř nehořlavé (minerální vlna s vysokou objemovou hmotností),
- B: velmi omezeně přispívá k vývinu požáru (některé fenolové pěny),
- C: omezeně, ale postřehnutelně přispívá k vývinu požáru (některé pěny PU),
- D: podstatně přispívá k vývinu požáru (většina pěn PU),

- E: značně přispívá k vývinu požáru (EPS, PUR),
- F: jako E nebo chybějící informace (EPS bez přídavku retardérů).

Třída reakce výrobků na oheň určuje, jestli a jakým způsobem přispívá výrobek k vývinu požáru (rychlost hoření, množství vyvinuté energie). Pro zařazení do jednotlivých tříd jsou určeny zkoušky a hodnocení parametrů: množství a rychlost uvolněného tepla, doba od vzplanutí, rychlost šíření plamene. V normě ČSN EN 13501-1 [26] jsou uvedeny i doplňkové klasifikace stavebních výrobků:

- $s_1, s_2, s_3$  – dle tvorby kouře; od stavu téměř bez kouře po intenzivní kouř,
- $d_0, d_1, d_2$  – dle plamenně hořících kapek; od žádných plamenně hořících kapek po mnoho plamenně hořících kapek.

Stavební konstrukce mohou být vytvořeny z jednovrstvých nebo vícevrstvých výrobků (sendvičové zdivo) stejných nebo rozdílných tříd reakce na oheň. Tyto výrobky nelze zahrnout do třídy reakce na oheň, a proto se dle požární bezpečnosti zařadí do skupin (DP1, DP2, DP3) dle konstrukčních částí a dílců. Tyto konstrukční části se vymezují podle toho, zda konstrukční část během hoření přispívá k požáru a zda je, nebo není nosná část z hořlavého materiálu.

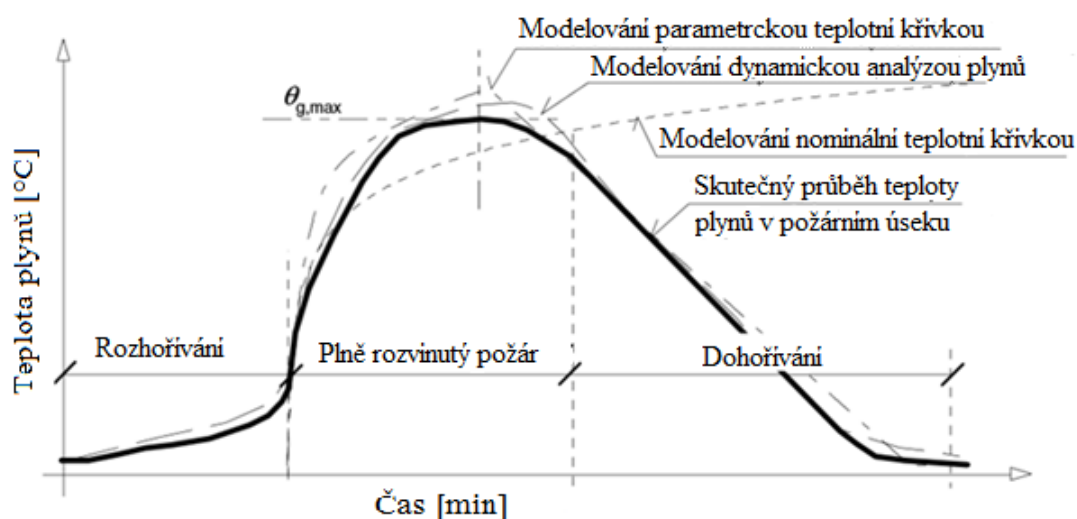
Konstrukční části skupiny DP1 nezvyšují intenzitu požáru a do této skupiny patří výrobky s třídou reakce na oheň A1 a A2. Spadají sem také výrobky s třídou reakce na oheň B až F (tepelná a zvuková izolace), ale tyto výrobky musí být uvnitř konstrukční části a během hoření nesmí teplota výrobku dosáhnout hodnoty jejich vzplanutí. Na výrobcích skupiny B až F není závislá stabilita a únosnost. Do skupiny DP1 patří převážně konstrukce zděné, kovové a železobetonové.

Konstrukční části skupiny DP2 nezvyšují intenzitu požáru a do této skupiny patří výrobky s třídou reakce na oheň A1 nebo A2, které tvoří povrchové vrstvy konstrukčních částí a jejichž tloušťka je alespoň 12 mm. Do této skupiny také patří výrobky s třídou reakce na oheň A1 až D (dřevěné sloupky). Tyto výrobky musí být uvnitř konstrukční části a je na nich závislá stabilita výrobku. Do skupiny DP2 lze zařadit i výrobky kterékoliv třídy reakce na oheň, ale musí být umístěny uvnitř konstrukční části a nezávisí na nich stabilita výrobku. Do této skupiny patří např. dřevěné trémové stropy se záklopem a s podhledem s omítkou na pletivu či obvodové stěny s vnější tepelnou izolací.

Konstrukční části skupiny DP3 zvyšují intenzitu požáru v požadované době, vznítí se a následně hoří. Do této skupiny lze zařadit dřevěné konstrukce, které jsou opláštěny výrobky s třídou reakce na oheň B až F nebo dřevěné nechráněné konstrukce [1].

### 2.1.5 Modely požáru

Požár lze charakterizovat časovým průběhem teplot, tlaku a složením plynů hořících produktů v prostoru. Prostor, kde se vyvíjí požár, je obvykle tvořen požárními úseky stavebního objektu a je ohraničen požárně odolnými konstrukcemi nebo konstrukcemi, které požáru odolné nejsou. Požár se rozděluje do tří časových úseků (obrázek 1), které jsou rozhořívání, plně rozvinutý požár a dohořívání. Ve fázi rozhořívání požár roste a šíří se od místa vzniku dál. Fáze plně rozvinutého požáru začíná při tepelném výkonu okolo 1 MW a je charakterizována intenzivním hořením v celém požárním úseku. Poslední fáze je dohořívání a chladnutí požárního úseku. Při dohořívání teplota klesá rychlostí 200 až 600 °C za hodinu. Pro posouzení požární odolnosti stavebních konstrukcí, které jsou namáhány požárem, byly vytvořeny modely, jež stanovují časový průběh teplot v hořícím úseku. Rozhodující je modelování plně rozvinutého požáru v celém požárním úseku.



Obr. 1: Modelování teploty plynů během požáru [3]

Modely požáru se rozdělují na zjednodušené a zdokonalené. Zjednodušené modely simulují požár v celém požárním úseku s rovnoměrným rozdělením teploty v čase a při lokálním požáru je rozdělení teplot nerovnoměrné. Teplotu plynů při požáru v požárním úseku můžeme stanovit na základě fyzikálních parametrů, které zohlední hustotu požárního zatížení a podmínky větrání. Pro určení teplotních podmínek konstrukčních prvků v požárním úseku lze vycházet z teploty plynu podle nominální teplotní křivky, parametrické teplotní



křivky a dynamické analýzy plynu (obrázek 1). Nominální teplotní křivky jsou vhodné pro klasifikaci nebo ověření požární odolnosti (křivky nemají klesající větev). Parametrické teplotní křivky jsou odvozeny od požárních modelů a daných fyzikálních parametrů, které popisují podmínky požárního úseku. Lokální požáry, které se vyskytují na malé ploše požárního úseku, se modelují samostatně podle ČSN EN 1991-1-2 [27].

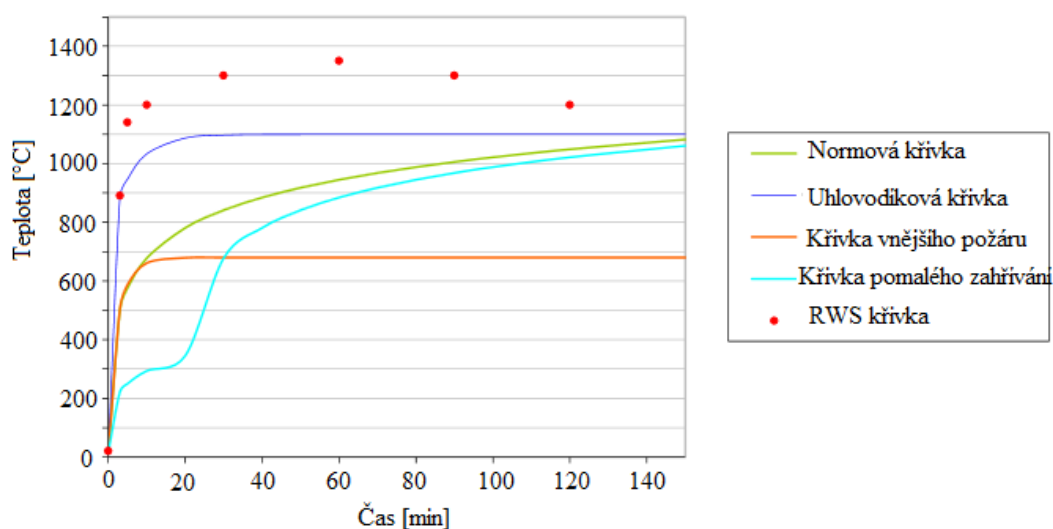
Zdokonalené modely požáru zohledňují vlastnosti plynu, výměnu hustoty a energii. Mezi zdokonalené modely patří jednozónový, dvouzónový model a dynamické modely kapalin a plynů. Jednozónový model odpovídá rovnoměrnému, časově závislému rozdělení teplot v celém požárním úseku a je modelován pro celkové prostorové vzplanutí. Dvouzónový model uvažuje rozdělení požárního úseku na horní vrstvu (místo pod stropní konstrukcí), kde se hromadí zplodiny, a na dolní vrstvu (místo nad podlahou) s nižší teplotou plynů. Mezi těmito vrstvami se nachází neutrální plocha, která vzniká v důsledku rozdílných hustot teplých a chladných plynů. Tloušťka horní a spodní vrstvy se mění v čase. Dynamické modely kapalin a plynů stanovují vývoj teplot v čase i prostoru. Výpočet těchto modelů je náročný a používají se rovnice zachování a přenosu energie, hybnosti a hmoty mezi velkým množstvím objemů, které tvoří požární prostor [3].

### 2.1.6 Nominální teplotní křivky

Pro popis vývoje teploty plynů během požáru se používají teplotní křivky podle druhu požáru, které jsou popsány v normě ČSN EN 1991-1-2 [27]. Nominální teplotní křivky udávají závislost teploty v požárním úseku na čase požáru. Křivky popisují plně rozvinutý požár a každá křivka je definována rovnicí. Nominální teplotní křivky se rozdělují:

- *normová křivka (celulózového typu)*: uplatňuje se pro daný čas a podle ní jsou konstrukce navrhovány při dodržení předepsaných pravidel; nezahrnuje vliv požárního zatížení ani okrajové podmínky při hoření (vlastnosti povrchů),
- *uhlovodíková křivka*: charakter požáru je ovlivněn povrchem hořícího paliva (hoření kapaliny v nádržích); prudký požár s rychlým nárůstem intenzity,
- *křivka vnějšího požáru*: pro posuzování objektu nebo jeho části; nachází-li se v požárně nebezpečném prostoru jiného objektu; pro namáhání obvodových stěn,
- *křivka pomalého zahřívání*: pro posuzování např. požáru v dutinách zdvojených podlah,
- *RWS křivka*: pro posuzování požáru v tunelu, kde požár dosahuje vyšší teploty [1][3].

Průběh nominálních teplotních křivek je znázorněn na obrázku 2.



Obr. 2: Teplotní křivky podle ČSN EN 1363-1[28] a ČSN EN 1363-2[29] [1]

## 2.2 Základní požadavky na betony vystavené působení vysokých teplot

Stavební hmoty a konstrukce z betonu se řadí mezi nehořlavé stavební materiály s třídou reakce na oheň A1. Tyto hmoty nesnižují stupeň hořlavosti, ale zajišťují požární odolnost. Beton je nehořlavý materiál, ale při vysokých teplotách dochází ke změnám ve struktuře betonu, klesání mechanických a fyzikálních vlastností [1].

Požáry ve stavebním objektu způsobují ztráty na majetku a ohrožují zdraví a životy lidí. Proto stavební konstrukce, které mohou být vystaveny teplotnímu zatížení, musí být navrženy na účinky zatížení od běžné teploty dle ČSN EN 1992-1-1 [30] a na účinky zatížení od vysokých teplot dle ČSN EN 1992-1-2 [31]. V objektu vzniká požár, který se rozvíjí a dohořívá podle uvolněné energie během hoření a charakteru požárního úseku [4]. Požární odolnost betonových konstrukcí je ovlivněna zatížením, rozměry (stěna, trám), vyztužením konstrukce, polohou nosné výztuže vzhledem k ohřivanému povrchu betonu. Zvětšením krycí vrstvy betonu zvýšíme požární odolnost betonové konstrukce [1].

### 2.2.1 Hodnoticí kritéria

Požární odolnost se vyžaduje u konstrukcí, které mohou být vystaveny účinkům požáru. Požární odolnost je schopnost konstrukce, prvku odolávat požáru po určitou dobu při zachování požadovaných vlastností (nosnost, dělicí funkce). Z hlediska požární odolnosti se vyžadují kritéria:

- R: mechanická odolnost (únosnost),

- E: dělicí funkce (celistvost),
- I: tepelně-izolační funkce.

Je-li vyžadována mechanická odolnost (kritérium R), musí betonová konstrukce po dobu vystavení požáru zachovat svoji nosnou funkci. Pokud je vyžadována požárně dělicí funkce, musí betonový prvek tvořící hranici požárního úseku zajistit oddělovací funkci po dobu vystavení požáru. Nesmí nastat porušení dělicí funkce, protože musí být dodržena celistvost (kritérium E) a omezena tepelná radiace na povrchu, jenž není přímo vystaven požáru, a tím dojde k zachování tepelně izolační funkce (kritérium I). Kritéria R, E, I se používají společně s číslem vyjadřujícím normovou požární odolnost v minutách [4].

### 2.2.2 Vyšetřování konstrukce

Při návrhu konstrukce na zatížení požárem se musí vycházet z návrhových modelů požáru a musí být zohledněny modely vývoje teplot v konstrukci a chování konstrukce během požáru. Návrh konstrukce zohledňující účinky požáru je uveden v tabulce 1.

*Tab. 1: Návrh konstrukce zohledňující účinky požáru*

Postup návrhu	Vstupy	Normy
Teplovní analýza požárního úseku	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zatížení požárem</li> <li>- geometrický tvar úseku</li> <li>- charakter hoření</li> </ul>	ČSN EN 1991-1-2 [27]
Přestup a vedení tepla konstrukcí	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geometrický tvar prvku</li> <li>- součinitel přestupu tepla</li> <li>- termální vlastnosti</li> </ul>	ČSN EN 199x-1-2
Návrh konstrukce na teplovní zatížení	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geometrický tvar prvku</li> <li>- uložení prvku</li> <li>- mechanické vlastnosti</li> </ul>	

Výpočetní model má vystihovat chování betonové konstrukce při působení teplotního zatížení. S ohledem na účinky teplotního zatížení lze navrhovat jednotlivé požární úseky nebo jednotlivé betonové prvky. Betonové konstrukce se v souvislosti s účinky požáru navrhují pomocí výpočtu nebo na základě zkoušky požární odolnosti. Tyto dvě metody je možné kombinovat. Při zatížení konstrukce požárem se uvažuje mimořádná návrhová situace [4].

### 2.2.3 Návrhové hodnoty

a) Mechanické materiálové vlastnosti  $X_{d,fi}$  se stanoví dle vztahu:

$$X_{d,fi} = \frac{k_{\theta} \cdot X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

kde  $k_{\theta}$  ... redukční součinitel závislý na teplotě materiálu,

$X_k$  ... charakteristická hodnota za normální teploty,

$\gamma_{M,fi}$  ... součinitel spolehlivosti při požární situaci.

b) Teplotní vlastnosti s přihlédnutím k jejich vlivu z hlediska bezpečnosti se stanoví dle vztahu:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

kde  $X_{k,\theta}$  ... charakteristická hodnota závislá na teplotě,

$\gamma_{M,fi}$  ... součinitel spolehlivosti při požární situaci.

c) Spolehlivost konstrukce po dobu vystavení požáru  $t$  se stanoví dle vztahu:

$$E_{D,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (3)$$

kde  $E_{D,fi}$  ... návrhový účinek zatížení vlivem teplotní roztažnosti a deformace,

$R_{d,t,fi}$  ... požadovaná návrhová únosnost při požáru.

Návrhový účinek zatížení požárem  $E_{D,fi}$  se stanoví dle vztahu při běžné teplotě:

$$E_{D,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (4)$$

kde  $E_d$  ... návrhová hodnota síly (momentu) při běžné teplotě (20 °C),

$\eta_{fi}$  ... redukční součinitel pro úroveň zatížení.

d) Spolehlivost konstrukce podle času se stanoví dle vztahu:

$$t_{d,fi} \geq t_{fi,req} \quad (5)$$

kde  $t_{d,fi}$  ... normová požární odolnost; tj. doba, po kterou je konstrukce schopna plnit nosnou funkci,

$t_{fi,req}$  ... požadovaná požární odolnost (např. R30) [4].

## 2.2.4 Vliv krytí na odolnost betonu proti účinkům teplotního zatížení

Vysoká teplota výrazně ovlivní vlastnosti betonu i výztuže. Výztuž při teplotách okolo 450–500 °C ztrácí své mechanické vlastnosti a hrozí její kolaps. Prostý beton vydrží vyšší teploty, až do 650 °C.

Beton musí při požáru chránit výztuž, která by neměla mít teplotu vyšší než 450°C. Proto má zde zcela zásadní význam tloušťka krycí betonové vrstvy. Beton musí být v krycí vrstvě dostatečně zhutněn, protože i malé defekty ve formě trhlin mohou ovlivnit chování železobetonové konstrukce během požáru. V případě výskytu požáru mohou horké plyny trhlinami v krycí vrstvě pronikat až k výztuži a ohřívat ji. Ocelová výztuž má vysokou hodnotu tepelné vodivosti (125–195 kJ/m<sup>2</sup>h°C) a při teplotách do 600 °C je tepelný tok rychle přenášen do prutů výztuže. Výztuž se vlivem náhlého zvýšení teploty rozpíná a odlupuje krycí vrstvu betonu, protože beton má nižší hodnotu tepelné vodivosti (6–8 kJ/m<sup>2</sup>h°C) a zahřívá se pomaleji než ocelové výztuž.

Vlivem vysoké hodnoty tepelné vodivosti výztuže může její teplota snadno dosáhnout kritické teploty 500 °C a přivodit kolaps. Tento typ porušení může být výrazně ovlivněn tloušťkou krycí vrstvy. Je-li krycí vrstva silnější, snižuje se riziko toho, že lokální trhliny dosáhnou až k výztuži a nastane kolaps. V dobře zhutněném betonu je dosaženo teploty 500 °C ve výztuži za 50–70 min, jestliže je tloušťka krycí vrstvy 20 mm, po 80–110 min pro tloušťku krycí vrstvy 30 mm. Kvalitu krycí vrstvy ovlivňují dva faktory, a to: dostatečně vlhké ošetření a kvalitní zhutnění betonu [19].

## 2.3 Důsledky působení vysokých teplot na beton

Beton se řadí do skupiny nehořlavých materiálů a v porovnání s ostatními stavebními materiály má vynikající vlastnosti při působení teplotního zatížení. Ale přesto působí zvýšená teplota na betonové konstrukce nepříznivě [2]. Účinek působení teplotního zatížení na beton závisí na:

- složení betonu (w/c, typu a druhu kameniva, typu cementu),
- hutnosti a homogenitě betonu v konstrukci,
- zatížení betonové konstrukce během působení požáru [19].

V betonu vystavenému teplotnímu zatížení probíhají fyzikální a chemické změny. Při požáru může teplota vzrůst až na 1200 °C, což vede k celkové destrukci betonové konstrukce. Beton je kompozit, který se skládá ze dvou různých složek: cementového tmele

a kameniva. Probíhající změny v betonu budou různé podle složení cementu a druhu kameniva. Navíc, různé druhy kameniva mají různé mineralogické složení a každý druh kameniva má jiné chování při vysoké teplotě. Dále změny v betonu ovlivní teplota požáru a délka jeho trvání. Výsledný efekt působení vysokých teplot na betonovou konstrukci je změna fyzikálních, tepelných a mechanických vlastností betonu [13].

### 2.3.1 Změny ve struktuře betonu

V betonu vystaveném teplotám nad 150 °C začnou probíhat změny, které jsou způsobeny rozdílnou teplotní roztažností cementového tmele, kameniva a oceli. Celistvost betonové konstrukce je také narušena probíhajícími chemickými změnami. K uvolňování chemicky vázané vody v hydratovaných minerálech dochází při teplotách nad 300 °C a tím dochází k smršťování cementového tmele. Toto smrštění je z části vykompenzováno teplotní roztažností. Při teplotě 573 °C dochází k modifikační přeměně křemene, která je doprovázena nárůstem objemu křemene. Vlivem vzrůstající teploty neustále klesá pevnost betonu. Betonu vystavenému teplotě 500 °C po dobu 8 hodin klesne pevnost na 80 % původní pevnosti. Při působení teploty 800 °C klesne pevnost betonu až na 10 až 20 % původní pevnosti. V železobetonové konstrukci vystavené teplotnímu zatížení se projeví pokles pevnosti ocelové výztuže, dochází tedy k deformacím a od zatížené konstrukce odprýskávají vrstvy betonu, které kryjí ocelovou výztuž [13]. V tabulce 2 jsou popsány změny v betonu, ke kterým dochází v důsledku působení teplot.

Tab. 2: Probíhající změny v betonu během vysokých teplot [14]

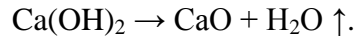
Teplota	Probíhající změny v betonu
20 – 80 °C	- pomalé odpařování kapilární vody
100 °C	- 80 – 150 °C dehydratace ettringitu - 150 – 170 °C rozklad sádky $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - 171 °C roztavení polypropylenových vláken - začátek dehydratace hydrosilikátu vápenatého (CSH)
200 °C	- uvolňování vázané vody - dochází k vývinu tlaku uvnitř struktury betonu
300 °C	- porušení křemičitého kameniva (350 °C) - 374 °C nevyskytuje se v betonu žádná volně vázaná voda
400 °C	- rozklad portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$

Teplota	Probíhající změny v betonu
500 °C	- 573°C fázová přeměna křemene v písku a v kamenivu $\beta$ -křemen $\rightarrow$ $\alpha$ -křemen (z triklinické soustavy na soustavu hexagonální)
600 °C	- druhá fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého, tvorba $\beta$ -C <sub>2</sub> S
700 °C	- rozklad uhličitanu vápenatého: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ , silně endotermická reakce, která je doprovázena uvolněním oxidu uhličitého
800 °C	- začátek tvorby keramické vazby, která nahradí hydraulické vazby v cementovém tmele
1100 – 1200 °C	- tvorba wollastonitu $\beta$ (CaO·SiO <sub>2</sub> )
1300 °C	- rozklad betonu, tavení složek betonu

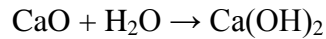
### 2.3.1.1 Chování cementového tmele při působení vysokých teplot

Při vystavení cementového tmele teplotnímu zatížení dochází k odpaření různých druhů vod z materiálu. Voda se z materiálu odpaří postupně s narůstající teplotou. Pořadí odpařování vody z betonu závisí na energii, která se váže na pevnou hmotu. Nejprve se z betonu odpaří voda volná, následně voda kapilární a poté se odpaří voda absorbovaná na povrchu minerálů. Nakonec se při dalším zvýšení teploty odpaří voda, která je chemicky vázána na cementové hydráty (proces dehydratace). CSH gely, které tvoří tzv. listy. Chemické vazby a kohezní síly mezi těmito listy ovlivní mechanické vlastnosti cementového tmele. Asi 50 % pevnosti cementového tmele vychází z kohezních sil. Při odpaření vody obsažené mezi listy CSH gelu dochází k ovlivnění mechanických vlastností cementového tmele. Při dehydratačním procesu CSH gelu zmenšují hydráty svůj objem a to vede k zvyšující se pórovitosti cementového tmele. Celkový objem a průměr pórů narůstá [14].

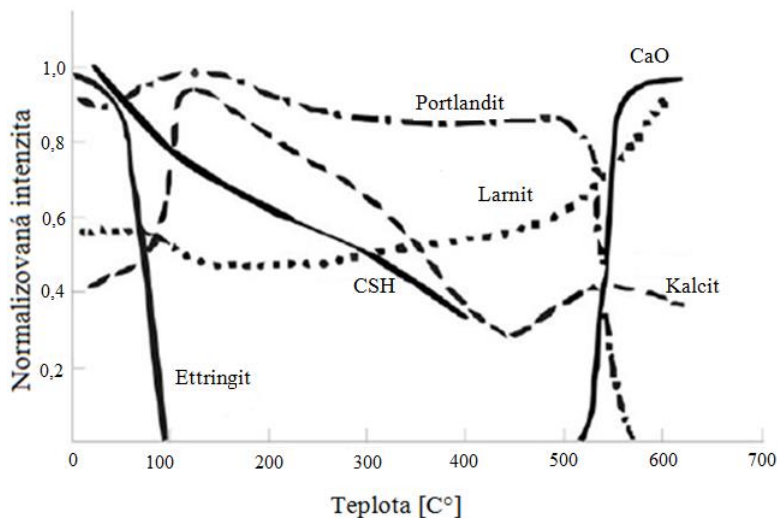
Na obrázku 3 jsou znázorněny změny v zastoupení jednotlivých minerálů v cementovém tmele z portlandského cementu při zahřívání na teplotu 700 °C s nárůstem teploty 1 °C/min. Bylo pozorováno šest minerálů cementového tmele, konkrétně: ettringit, CSH gel, portlandit, larnit, kalcit a oxid vápenatý. Nejprve se rozloží ettringit při teplotě do 100 °C. CSH gel dehydratuje postupně už od počátku samotného zahřívání betonu. Už při teplotě 105 °C dochází k částečnému narušení cementového tmele (tato teplota se běžně využívá při sušení materiálu). Při zahřátí cementového tmele na teploty 500–550 °C začne výrazně klesat obsah portlanditu, protože se rozkládá podle reakce:



Rozkladem portlanditu se vysvětluje nárůst obsahu oxidu vápenatého v cementovém tmelu při teplotě okolo 550 °C [14]. Při hašení požáru je na betonovou konstrukci stříkána voda. Vlivem této vody probíhá rozpínavá reakce (hašení vápna), která narušuje beton:



Dochází tedy k nárůstu objemu betonu a k jeho porušení během hašení požáru. Betony s pucolánovými látkami nebo se struskou vykazují vyšší odolnost proti požáru než betony pouze s portlandským cementem, protože v nich vzniká méně  $\text{Ca(OH)}_2$  [19].



Obr. 3: Vývoj normalizované intenzity minerálů portlandského cementového tmele [15]

### 2.3.1.2 Chování kameniva při působení vysokých teplot

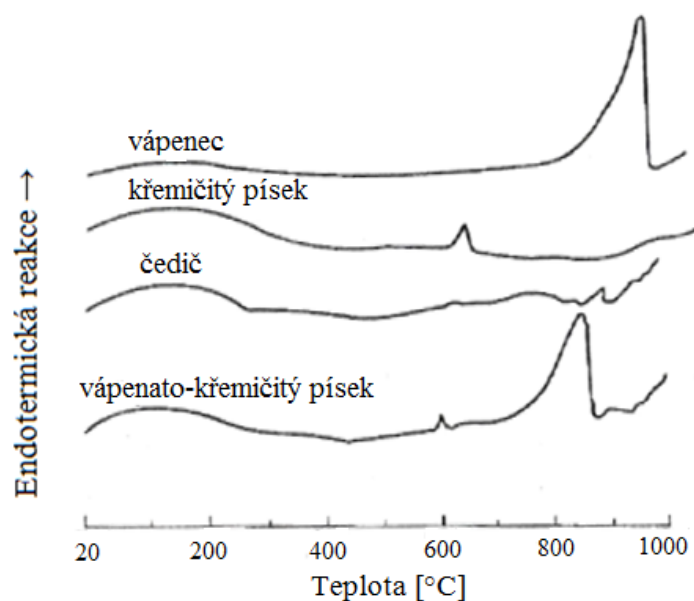
Stejně jako většina pevných látek, tak i kamenivo s narůstající teplotou zvětšuje svůj objem. Proto je důležitou charakteristikou koeficient tepelné roztažnosti kameniva z hlediska jeho reakce na vysokou teplotu. V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty koeficientů lineární tepelné roztažnosti pro různé druhy kameniva.

Tab. 3: Koeficienty lineární tepelné roztažnosti pro různé druhy kameniva [14]

Typ kameniva	Koeficient lineární tepelné roztažnosti [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]
Žula	1,8 – 11,9
Čedič	3,6 – 9,7
Pískovec	4,3 – 13,9
Vápenec	0,9 – 12,2
Dolomit	6,7 – 8,6



Mineralogické složení kameniva rozhoduje o jeho chování při teplotním zatížení, protože obsažené minerály mají rozlišné hodnoty tepelné roztažnosti. V křemičitém kamenivu probíhají metamorfní přeměny při teplotě 573 °C, které jsou doprovázeny nárůstem objemu o 0,84 % a poklesem pevnosti v tlaku křemičitého kameniva. Vápenec je teplotně nestabilní při zahřátí na teplotu 600 °C. A navíc se uhličitánové kamenivo rozkládá na CaO a CO<sub>2</sub> při teplotě okolo 700 °C. Při ochlazení vápence může vytvořený CaO hydratovat s výslednou expanzí 40 %. Kamenivo, které vykazuje tepelnou stabilitu, nemá žádné vrcholy podél DTA a TGA křivky (obrázek 4) [14].



Obr. 4: Křivky DTA jednotlivých kameniv při nárůstu teploty 10 °C/min v dusíku [16]

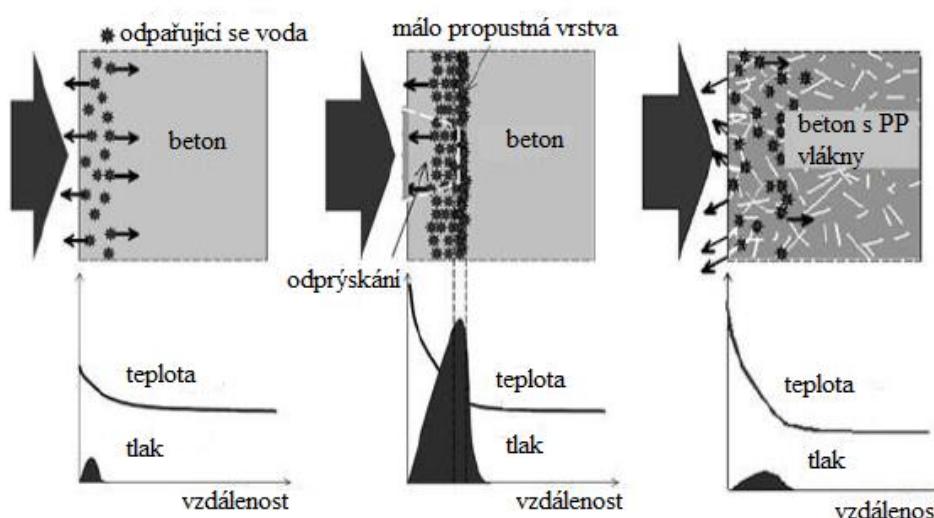
### 2.3.1.3 Interakce cementového tmele a kameniva při působení vysokých teplot

V betonu, který je vystaven teplotnímu zatížení, dochází k nárůstu objemu kameniva. Cementový tmel, jenž kamenivo obklopuje, se smršťuje. Destrukce betonu je způsobena praskáním, ke kterému dochází v důsledku rozdílného tepelného přetvoření mezi smršťujícím se cementovým tmelem a expandujícím kamenivem [14].

### 2.3.1.4 Odprýskávání betonu

Odprýskávání betonu je uvolňování velkých nebo malých kusů betonu z jeho povrchu při působení vysoké teploty. V případě požáru může dojít na povrchu betonu k explozivnímu odprýskávání a tím může nastat nežádoucí odkrytí nosné výztuže v betonové konstrukci a následné zahřátí výztuže. Toto může mít za následek snížení či ztrátu únosnosti betonové konstrukce.

Zahřívání betonu způsobuje migraci vody směrem do chladnější zóny. Tento transport je obtížný v betonu s vysokou hutností cementové matrice. S rostoucí teplotou se přemění voda obsažená v betonu na vodní páru, která nemůže unikat, a v betonu nastává zvyšování tlaku vodní páry. Pokud má beton pórovitější strukturu, vodní pára může lépe unikat a její tlak se sníží. Má-li beton hutnější strukturu, vodní pára z betonu hůře uniká a tím v betonu vzniká vysoký tlak. Navíc dochází k omezení tepelné roztažnosti zahřívávaného betonu. Tyto dva faktory způsobí nepříznivý stav v betonové konstrukci. Je-li tlak vodní páry vyšší než pevnost betonu, nastane explozivní odprýskávání [14]. Na obrázku 5 je znázorněno explozivní odprýskání betonu v závislosti na hutnosti betonu a přítomnosti polypropylenových vláken.

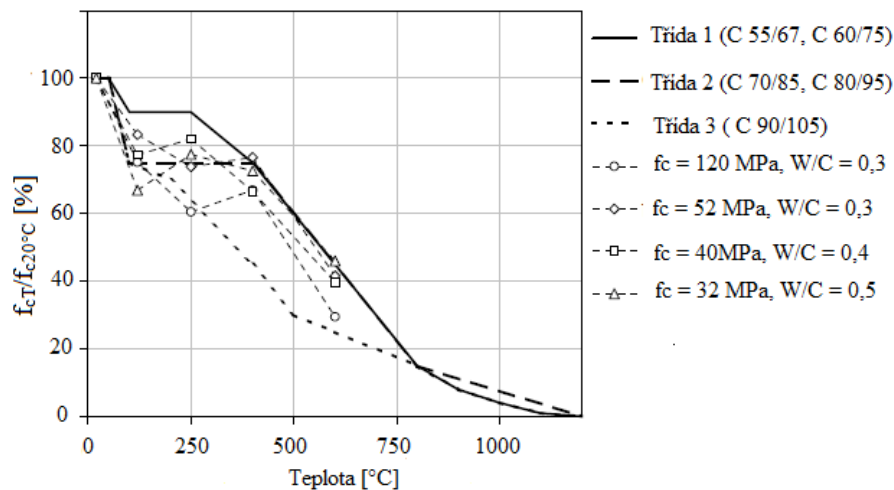


Obr. 5: Schéma výskytu explozivního odprýskávání v důsledku zvýšení nárůstu vnitřního tlaku v ohříváném prvku [17]

## 2.3.2 Vliv na mechanické charakteristiky betonu

### 2.3.2.1 Pevnost betonu v tlaku

Změny pevnosti v tlaku jsou způsobeny probíhajícími změnami v betonu během zahřívání. Metoda, která se nejčastěji používá pro vyhodnocení vlivu teploty na beton, zahrnuje určení hodnoty pevnosti v tlaku po zahřátí betonu na teplotu  $T$  a porovnání s pevností v tlaku stanovenou při teplotě 20 °C. Výsledkem metody je změna pevnosti betonu v tlaku vyjádřená v procentech v závislosti na dané teplotě. Na obrázku 6 jsou znázorněny procentuální změny pevnosti v tlaku při daných teplotách podle EUROKÓDU 2 (Třída 1–3) a pro beton na bázi vápencového kameniva s odlišným vodním součinitelem betonu. [14].

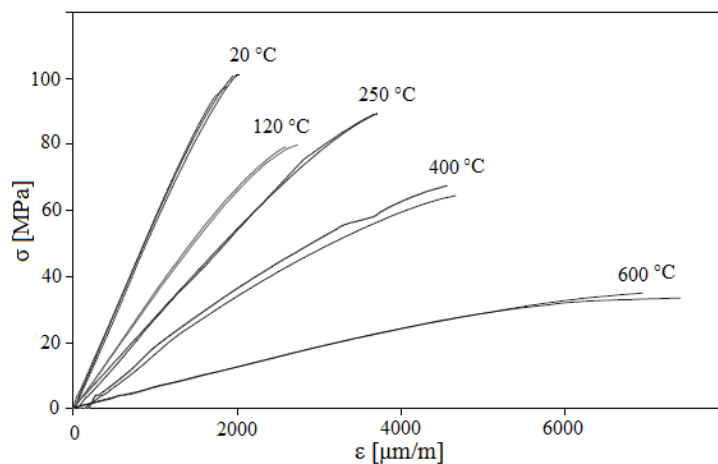


Obr. 6: Změny pevnosti betonu v tlaku při zahřívání, dle EUROKÓDU 2 (Třída 1-3) a výsledky betonů na bázi vápencového kameniva [17]

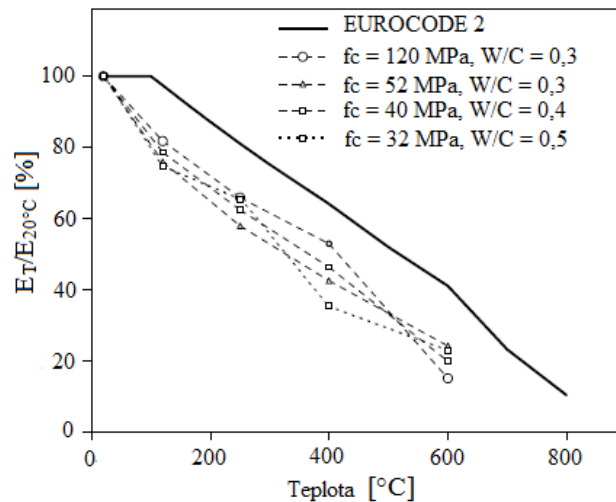
Analýza křivek na obrázku 6 ukazuje, že pevnost v tlaku klesá pro většinu druhů betonu při zahřátí na teplotu 120 °C. Okolo teploty 250 °C lze pozorovat částečné navrácení pevnosti, což je způsobeno odpařováním volné vody z betonu. Při dalším zvyšování teploty dochází k poklesu pevnosti v tlaku, což je způsobeno: dehydratací CSH gelu, rozkladem portlanditu a narušením tranzitní zóny mezi cementovým tmelem a kamenivem v důsledku rozdílného tepelného přetvoření.

### 2.3.2.2 Modul pružnosti betonu

Na obrázku 7 je znázorněn deformační diagram betonu zahřívávaného na různé teploty. S narůstající teplotou zahřívání betonu výrazně klesá napětí a zvyšuje se hodnota poměrného přetvoření. Analýza křivek na obrázku 8 ukazuje, že hodnota modul pružnosti pro většinu druhů betonů s narůstající teplotou klesá [14].



Obr. 7: Deformační diagram pro beton  $R_c = 100 \text{ MPa}$  [18]



Obr. 8: Změny modulu pružnosti betonu na bázi vápencového kameniva při zahřívání [17]

## 2.4 Dynamický modul pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou

### 2.4.1 Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu

Modul pružnosti betonu se dle typu zkoušení rozděluje na dynamický modul pružnosti, který se zjišťuje nedestruktivními metodami a statický modul pružnosti, který se zjišťuje zatěžováním zkušebních těles ve zkušebním lisu. Zjišťované pružné charakteristiky betonu (modul pružnosti v tlaku nebo v tahu  $E$ , modul pružnosti ve smyku  $G$  a Poissonův koeficient  $\nu$ ) pomocí dynamických nedestruktivních metod se označují jako dynamické hodnoty.

Při stanovení dynamického modulu pružnosti nedestruktivními metodami není beton vystaven reálnému zatížení. Ve zkušebním tělese tedy nevzniká žádné napětí a netvoří se mikrotrhliny na rozhraní kameniva a cementového tmele, a proto dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu odpovídá přibližně počátečnímu tečnovému modulu pružnosti ze zkoušení zatěžováním ve zkušebním lisu. Z tohoto důvodu je dynamický modul pružnosti vyšší než sečný modul pružnosti (statický modul pružnosti), který se určí ze zatížení tlakovým napětím, jež působí na zkušební těleso. Vzhledem k tomu, že beton je nehomogenní materiál a moduly pružnosti se stanovují různými metodami, nelze určit jednoznačný vztah mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti.

Dynamické vlastnosti nehomogenního materiálu (betonu) jsou závislé na těchto faktorech:

- vlastnosti cementu,

- množství záměsové vody,
- frakce kameniva,
- stáří betonu,
- mikrotrhliny.

Dynamické zkoušky jsou založeny na principu šíření vlnění v tuhém tělese v závislosti na pružných vlastnostech betonu. Nejčastější metody využívané k zjišťování dynamických charakteristik betonu jsou ultrazvuková impulzová a rezonanční metoda.

Mezi výhody nedestruktivního stanovení dynamického modulu pružnosti patří rychlost a v případě ultrazvukové impulzové metody i jednoduchost jeho stanovení; rezonanční metoda je náročnější na teoretickou přípravu měření a jeho vyhodnocení. Mezi nevýhody lze zařadit nižší přesnost a spolehlivost naměřených hodnot v porovnání se statickým modulem pružnosti [12].

Správkové hmoty pro sanace betonových a železobetonových konstrukcí jsou svou strukturou a složením podobné betonu, a proto se pro zjišťování jejich dynamických modulů vycházelo z norem určených pro betony. Pro správkové hmoty nejsou v systému českých technických norem žádné normy, které by se samostatně zabývaly touto problematikou.

## **2.4.2 Ultrazvuková impulzová metoda**

Ultrazvuková impulzová metoda se využívá pro určení mechanicko-fyzikálních vlastností materiálů nebo pro lokalizaci vad či porušení vnitřní struktury. Pro měření ultrazvukovou impulzovou metodou je postup uveden v ČSN EN 12504-4 [36]; postupy uvedené v této normě se omezují pouze na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Při stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu se postupuje podle ČSN 73 1371 [32].

### **2.4.2.1 Princip metody**

Podstata metody spočívá ve vysílání krátkých svazků mechanického tlumeného kmitání, jež vzniká v budiči účinkem pravidelně se opakujících elektrických impulsů. Tyto impulsy mají svoji vlnovou délku  $\lambda$ . Ultrazvukový přístroj se skládá z ultrazvukového impulzního generátoru, na který je napojen budič ultrazvukových vln. Generátor je připojen na vlastní měřicí zařízení, které je sestaveno z časoměrného obvodu a osciloskopu nebo digitálního sčítače. Celá soustava je propojena se snímací sondou. Budič, který je zdrojem

ultrazvukových impulzů, je magnetostrikční nebo piezoelektrický. Při zkoušení betonu a podobných materiálů se využívá frekvence 20 až 150 kHz. Snímač impulzů je vybaven piezoelektrickou vložkou, která mění mechanické kmity na elektrické [5].

Z měření ultrazvukovou impulzovou metodou je možné stanovit:

- rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$ ,
- dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu  $E_{dyn}$ ,
- pevnost betonu (v případě, že jsou k dispozici potřebné kalibrační vztahy mezi pevností a parametrem nedestruktivního zkoušení),
- míru narušení materiálu,
- další vlastnosti (např. statický modul pružnosti, objemovou hmotnost).

Při měření ultrazvukovou impulzovou metodou se měří doba průchodu ultrazvukového impulzu z jednoho bodu do druhého s přesností na 0,1  $\mu\text{s}$  pro kratší základny a s přesností na 1  $\mu\text{s}$  pro delší základny. Ze vzdálenosti měřicí základny (vzdálenost mezi budičem a snímačem) a z doby průchodu ultrazvukového impulzu se dle ČSN 73 1371 [32] vypočítá rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$  materiálem dle vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (6)$$

kde  $v_L$  ... rychlost šíření podélného ultrazvukového impulzu [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$L$  ... délka měřicí základny [mm],

$T$  ... čas, který uplyne při průběhu impulzu základnou  $T = T_L + t_{kor}$  [ $\mu\text{s}$ ],

$t_{kor}$  ... korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření ultrazvukových impulzů, který se zjistí případně při kalibraci přístroje [ $\mu\text{s}$ ].

#### 2.4.2.2 Faktory ovlivňující výsledky měření

Mezi základní faktory, které ovlivňují výsledky měření, patří:

- vlhkost,
- složení a složky materiálu,
- rozměry a tvar zkušebních těles a prvků,
- frekvence sond,

- defekty ve vyšetřovaném materiálu,
- vnitřní napětí,
- akustická vazba mezi sondami a povrchem měřicího místa.

#### a) Vlhkost

Různá vlhkost zkoušeného materiálu při měření ovlivňuje výsledky měření. Kapalná vlhkost v pórech, kapilárách a dutinách zvyšuje hutnost betonu a tím i zvyšuje rychlost šíření ultrazvukového impulsu (rychlost šíření ultrazvukového impulsu ve vzduchu je cca 3,5× nižší než ve vodě). U betonů při změně vlhkosti o 1 % hmotnostní se rychlost šíření ultrazvukového impulsu změní o 120 m·s<sup>-1</sup> [5]. Pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků je nezbytné zajistit při měření stejný vlhkostní stav těles.

#### b) Složení a složky materiálu

V případě správkových hmot jsou výsledky měření ovlivňovány druhem kameniva, velikost maximálního zrna, množstvím a zrnitostí kameniva, druhem a množstvím cementu, vodním součinitelem, přísadami a příměsemi.

Kamenivo tvoří majoritní podíl ve správkové hmotě. Druh horniny ovlivní výslednou rychlost šíření ultrazvukového impulsu v kompozitu. Pro ilustraci jsou v tabulce 4 uvedeny hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu pro vybrané horniny.

Množství cementu v betonu může ovlivnit rychlost šíření ultrazvukového impulsu, protože toto množství určuje míru hutnosti (pórovitosti) betonu; hutnost je významný faktor, který tuto rychlost ovlivní. Se zvyšující se pórovitostí betonu se snižuje rychlost šíření ultrazvukového impulsu. Druh cementu ovlivní měření jen nepatrně. Je-li využit cement na bázi portlandského slínku, jeho vliv je možno zanedbat.

Tab. 4: Rychlost šíření UZ impulsů v hornině a v betonu z dané horniny [5]

Druh horniny	Rychlost šíření UZ impulsů v dané hornině [m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost šíření UZ impulsů v betonu s danou horninou [m·s <sup>-1</sup> ]
Žula	4300	4200
Droba	3700	3700
Čedič	4400	4200
Vápenec	3400	3500

Druh horniny	Rychlost šíření UZ impulzů v dané hornině [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Rychlost šíření UZ impulzů v betonu s danou horninou [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
Diabas	4900	4300
Pískovec	3300	3500

### c) Tvar a rozměry zkušebních těles

Betonové konstrukce, dílce a tělesa mají různé geometrické tvary a při měření jsou proto rozdílné velikosti základů. Příčné rozměry tělesa ve směru kolmém na směr prozvučování jsou rozdílné, proto je nutné při zjišťování rychlosti šíření ultrazvukového impulzu přihlížet k rozměrnosti prostředí. Jedná se o závislost poměru rozměru tělesa (rozměrnost prostředí) a délky ultrazvukové vlny  $\lambda_L$ . ČSN 73 1371 [32] zavádí pro ultrazvukovou impulzovou metodu zkoušení betonu tyto podmínky pro stanovení rozměrnosti prostředí:

– trojrozměrné prostředí:

a) kostky, kvádry, válce, nosníky - kde jejich rozměry příčného řezu  $a$ ,  $b$  kolmého na směr prozvučování jsou větší než dvojnásobek velikosti vlny  $\lambda_L$

$$a \geq 2 \cdot \lambda_L, b \geq 2 \cdot \lambda_L$$

b) desky s tloušťkou  $h$  větší než  $0,9 \lambda_L$

$$h \geq 0,9 \cdot \lambda_L$$

– dvojrozměrné prostředí: desky a další plošné konstrukce - kde jejich tloušťka  $h$  je menší než  $0,2 \lambda_L$

$$h \leq 0,2 \cdot \lambda_L$$

– jednorozměrné prostředí: pruty, hranoly, válce, nosníky - kde jejich rozměr příčného řezu  $a$  je menší než  $0,2 \lambda_L$

$$a \leq 0,2 \cdot \lambda_L,$$

kde  $a, b$  ... rozměry příčného řezu kolmého na směr prozvučování,

$h$  ... tloušťka desky,

$\lambda_L$  ... délka podélné vlny v měřeném betonu, která se určí  $\lambda_L = \frac{v_L}{f_u}$  ve kterém je  $v_L$  rychlost šíření ultrazvukových impulzů a  $f_u$  vlastní frekvence ultrazvukového budiče.



Rychlost šíření ultrazvukových impulzů v jednorozměrném prostředí lze převést na hodnotu v trojrozměrném prostředí pomocí vztahu:

$$v_{L3} = v_{L1} \sqrt{\frac{1 - \nu_d}{(1 + \nu_d) \cdot (1 - 2\nu_d)}} \quad (7)$$

a rychlost šíření ultrazvukových impulzů v dvojrozměrném prostředí lze převést na hodnotu v trojrozměrném prostředí pomocí vztahu:

$$v_{L3} = v_{L2} \frac{1 - \nu_d}{\sqrt{1 - 2\nu_d}} \quad (8)$$

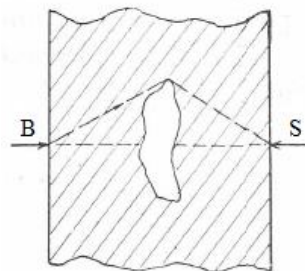
kde  $\nu_d$  ... dynamický Poissonův koeficient dle zkoušeného materiálu [6].

#### d) Frekvence sond

Beton je heterogenní pórovitá hmota. Každá surovina betonu (kamenivo, ztvrdlý cement, voda) má jinou pružnost. Frakce kameniva v betonu je poměrně velká a tato velikost má vliv na šíření vlnění vzhledem k velikosti ultrazvukové vlny  $\lambda_L$ . Při velkém zrnu kameniva a malé  $\lambda_L$  jsou odlišné hodnoty modulu pružnosti kameniva a ztvrdlého betonu. Větší zrno tvoří pro vlnu  $\lambda_L$  překážku, a proto vlnění nepostupuje spontánně a má značný útlum. Proto by velikost vlny měla být dostatečně velká, a to alespoň jako největší zrno kameniva. Vhodnější je, když je  $\lambda_L$  velká jako dvojnásobek největší velikosti zrna [5]. Splnění požadavků na délku vlny se dosáhne vhodnou volbou frekvence sond.

#### e) Defekty ve vyšetřovaném materiálu

Defekty ve struktuře betonu ovlivní výsledky měření pomocí ultrazvukové impulzové metody. Při prozvučování přes nedokonalé zhutnění, dutiny a šterková hnízda, místa poškozená plamenem nebo chemicky agresivním prostředím dojde ke snížení rychlosti šíření ultrazvukového impulzu. Existence větších dutin v betonu se projeví tím, že dojde k prodloužení doby průchodu ultrazvukového impulzu materiálem. Toto prodloužení času je způsobeno tím, že impulzy obcházejí dutinu a dráha impulzů se tímto prodlouží (obrázek 9) [6].



Obr. 9: Průchod ultrazvukových impulzů při defektu v betonu [6]

Ocelová výztuž v betonu také ovlivňuje výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou. Při měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu ve vzdálenosti 5 cm od výztuže se rychlost zvýší asi o 3,2 % a ve vzdálenosti 3 cm od výztuže je rychlost šíření ultrazvukového impulsu vyšší o 6,3 %. Výztuž s průměrem menším než 10 mm výrazně neovlivní rychlost šíření ultrazvukového impulsu. K ovlivnění rychlosti dojde při měření v blízkosti výztuže profilu většího než 10 mm nebo při měření přímo ve směru výztuže [6].

#### **f) Vnitřní napětí**

Betonové prvky a konstrukce, které jsou zatížené, se nachází v různém stavu napětí. Proto je důležité znát vliv napětí na rychlost šíření ultrazvukového impulsu. Zřetelný pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu nastane při tahovém nebo tlakovém napětí na betonových tělesech různého tvaru [9], kde napětí dosahují průměrně 50 % pevnosti. Pokles rychlosti nastane v důsledku vzniku mikrotrhlin v betonu. Tento pokles je odlišný v závislosti na druhu betonu, způsobu ošetřování, rychlosti zatěžování a také uspořádáním měření (prozvučování ve směru nebo kolmo na směr tlakového zatížení). Nenastanou-li v betonové konstrukci výraznější poruchy, nemění se rychlost šíření ultrazvukového impulsu a není potřeba uvažovat s účinkem napětí [6].

#### **g) Akustická vazba mezi sondami a povrchem měřícího místa**

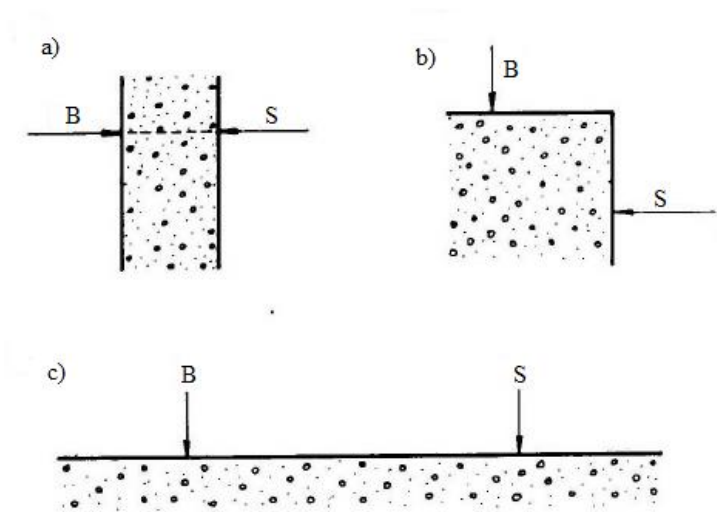
Při měření ultrazvukovou impulzovou metodou je důležité docílit akustické vazby mezi plochou sondy a povrchem měřeného vzorku. Mezery mezi sondami a povrchem betonu se eliminují akustickým vazebným prostředkem. Tento prostředek snižuje míru odrazu vln a difrakci ultrazvukových vln v kontaktní zóně betonu a sondy. Pokud je povrch nerovný, tyto nerovnosti se obrušují. Jako akustický vazebný prostředek lze využít tenkou vrstvu plastelíny, vazelíny nebo mazlavého mýdla [7].

#### **2.4.2.3 Způsoby měření**

Způsob prozvučování těles, prvků či konstrukce záleží na její přístupnosti. Podle polohy sond při měření rozlišujeme tři způsoby prozvučování:

- přímé prozvučování (budič a snímač přiloženy na protilehlé straně tělesa), obrázek 10 a),
- polopřímé - šikmé prozvučování (budič a snímač umístěny na přilehlých stranách tělesa), obrázek 10 b),

- nepřímé – povrchové prozvučování (budič a snímač umístěny na stejné straně tělesa), obrázek 10 c).



Obr. 10: Poloha sond při měření: a) přímá, b) šikmá, c) na povrchu [7]

Nejvhodnějším způsobem prozvučování je přímé, protože je možné nejpřesněji zjistit délku měřicí základny. Poloha sond by se měla volit taková, aby nedocházelo k ovlivnění doby průchodu ultrazvukových impulzů okrajem zkušebního tělesa, nehomogenitou betonu nebo přítomností trhlin. Toto však neplatí, pokud je účelem měření zjistit narušení betonu. Měření na povrchu prvku se provádí jen v případech, jde-li o zjišťování vlastností betonu v povrchových vrstvách nebo není-li přístup ke konstrukci ze všech stran [8].

#### 2.4.2.4 Stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu

Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu  $E_{cu}$  [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ] se stanoví dle vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (9)$$

kde  $\rho$  ... objemová hmotnost betonu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$v_L$  ... rychlost šíření podélného ultrazvukového impulzu [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$k$  ... součinitel rozměrnosti prostředí [-].

Součinitel rozměrnosti prostředí  $k$  je určen vztahy pro jednotlivá prostředí:

- trojrozměrné prostředí:  $k_3 = \sqrt{\frac{1-v_d}{(1+v_d)\cdot(1-2v_d)}}$  (10)

- dvojrozměrné prostředí:  $k_2 = \sqrt{\frac{1}{1-v_d^2}}$  (11)

- jednorozměrné prostředí:  $k_I = I$  (12)

kde  $\nu_d$  ... dynamický Poissonův koeficient [-] [6].

### 2.4.3 Rezonanční metoda

Rezonanční dynamická metoda se zkouší podle normy ČSN 73 1372 [33]. Mezi výhody této metody lze zařadit především nedestruktivnost zkoušky, velmi dobrá přesnost metody, rychlost zkoušky a přesnost měřicího zařízení [6].

Rezonanční metoda zkoušení materiálů je nedestruktivní zkušební metoda a je založená na měření některých z vlastních frekvencí kmitání zkušební tělesa. Zpravidla se zjišťuje první vlastní frekvence z podélného, příčného a kroutivého kmitání tělesa. Ze zjištěných vlastních frekvencí lze vypočítat dynamické moduly pružnosti a dynamické Poissonovy koeficienty.

Pro měření rezonanční metodou lze využít dva postupy:

- postup měření ČSN 73 1372 [33] – vlastní rezonanční kmitočet se vyvozuje pomocí budiče postupnou změnou kmitočtu budícího oscilátoru,
- postup měření ASTM C215-08 [37] – vlastní rezonanční kmitočet se vyvozuje úderem kladívka na zkoušené těleso v místě odpovídající příslušnému typu kmitání.

#### 2.4.3.1 Princip metody

Pomocí rezonanční metody se určují hodnoty vlastního rezonančního kmitání tělesa, které má určitý geometrický tvar. Nejvíce jsou využívány zkušební hranoly podle ČSN ISO 1920-10 [34] nebo válce podle ČSN EN 12390-1 [35] s délkou odpovídající nejméně dvojnásobku rozměru delší strany základny, pro které dovedeme odvodit vztah mezi vlastní frekvencí a odpovídajícími pružnými charakteristikami betonu. Z naměřených hodnot pomocí rezonanční metody je možné stanovit tyto pružné dynamické hodnoty betonu:

- dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu  $E_{cr}$ ,
- dynamický modul pružnosti betonu ve smyku  $G_{cr}$ ,
- dynamický Poissonův koeficient betonu  $\nu_{cr}$  [8].

Princip rezonanční metody spočívá v tom, že se měří vlastní frekvence kmitání zkušební tělesa. Zkušební těleso se umístí na podklad (gumová podložka), který nebude omezovat pohyb kmitání tělesa a jeho vlastní kmitočet bude mimo kmitočet zkoušeného

tělesa. Budič a snímač se na těleso umístí dle toho, jaký druh kmitání chceme měřit. Plynulou změnou frekvence oscilátoru (rozsah 100 až 20000 Hz) se těleso pomocí budiče přivede do stavu kmitání. Na indikačním zařízení pozorujeme amplitudu kmitání, a pokud je amplituda maximální, kmitání tělesa se shoduje s frekvencí budícího oscilátoru. Následně se odečte hodnota frekvence vlastního kmitání tělesa [6]. V případě kladívkové rezonanční metody se na tělese vyznačí body, ve kterých se provede úder kladívkem a na definovaná místa pro daný typ kmitání se osadí akcelerometr.

#### **2.4.3.2 Faktory ovlivňující výsledky měření**

##### **a) Stupeň hydratace cementu**

Stupeň hydratace cementu ovlivní hodnotu dynamického modulu pružnosti betonu vypočítaného z naměřených hodnot pomocí rezonanční metody. V prvních dnech hydratace cementu hodnota dynamického modulu pružnosti prudce stoupá. V následujících dnech hydratace cementu je nárůst hodnoty dále pozvolný.

##### **b) Stav vnitřní struktury**

Hodnota dynamického modulu pružnosti závisí na stavu vnitřní struktury materiálu. Při narušení vnitřní struktury mrazem či agresivními látkami, kdy dojde k tvorbě trhlin, se hodnota dynamického modulu pružnosti snižuje. Se snižujícím se dynamickým modulem klesá pevnost. Z naměřených hodnot lze tedy posoudit změny kvality materiálu v důsledku působení mrazu, agresivních látek či jiných faktorů. Pro některé materiály např. kámen je rezonanční metoda využívána pro hodnocení mrazuvzdornosti – viz ČSN EN 14146 [48], ČSN EN 12371 [49].

##### **c) Vliv zvýšené teploty**

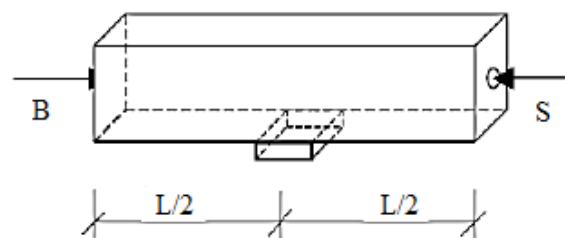
Ovlivnění hodnoty dynamického modulu pružnosti nastane, působí-li na beton zvýšená teplota. Už při působení teploty 80 °C na beton dochází k jejímu snížení. Se zvyšující se teplotou tento proces snižování hodnoty pokračuje. Vlivem různého koeficientu tepelné roztažnosti složek betonu v něm vzniká velké napětí, a dochází tedy k tvorbě trhliny. Trhliny v betonu způsobují rapidní snížení hodnoty dynamického modulu pružnosti [6].

### 2.4.3.3 Metodika měření

Zkušební tělesa, která jsou jako prostý nosník s převislými konci uložena na gumové podložce, můžeme pomocí budicího zařízení s plynulou frekvencí rozkmitat třemi základními druhy jejich vlastních rezonančních kmitočtů (frekvencí):

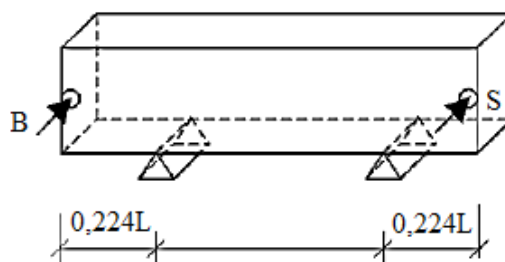
- podélné kmitání  $f_L$ ,
- příčné kmitání  $f_f$ ,
- kroutivé kmitání  $f_t$  [8].

Při měření podélného kmitání se hranolová nebo válcová tělesa uloží na měkkou pružnou podložku umístěnou uprostřed jejich rozpětí nebo jiným způsobem tak, aby nebyla vlastní frekvence podélného kmitání tělesa ovlivněna. Obě čela zkušebního tělesa kmitají v protifázi ve směru délky tělesa (tento jev je zobrazen na obrázku 12 šipkami). Umístění budicí (B) a snímací (S) sondy je také znázorněno na obrázku 12. Změří se první (nejnižší) vlastní kmitočet podélného kmitání zkušebního tělesa [6]. V případě kladívkové rezonanční metody se provádí úder kladívkem v místě označením pro osazení budiče.



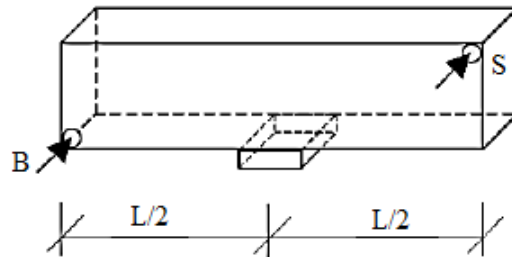
Obr. 12: Umístění sond při měření vlastního podélného kmitání tělesa [10]

Při měření příčného kmitání se hranolová nebo válcová tělesa uloží na podložky v místě uzlů, které leží ve vzdálenosti  $0,224 L$  od volných konců těles. Uložení tělesa na podložky a umístění budicí (B) a snímací (S) sondy je znázorněno na obrázku 13. Opět se změří první (nejnižší) vlastní kmitočet příčného (ohybového) kmitání zkušebního tělesa.



Obr. 13: Umístění sond při měření vlastního příčného kmitání tělesa [10]

Při měření krouživého kmitání se hranolová nebo válcová tělesa uloží na měkkou pružnou podložku uprostřed jejich rozpětí. Uložení tělesa na podložku a umístění budicí (B) a snímací (S) sondy je znázorněno na obrázku 14. Změří se, stejně jako v případě podélného a příčného kmitání, první (nejnižší) vlastní kmitočty krouživého kmitání zkušební tělesa [6].



Obr. 14: Umístění sond při měření vlastního krouživého kmitání tělesa [10]

#### 2.4.3.4 Stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu, ve smyku a dynamického Poissonova koeficientu

Z naměřených hodnot prvních vlastních kmitočtů lze určit pružné dynamické charakteristiky betonu. Mezi tyto charakteristiky patří dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu  $E_{cr}$ , dynamický modul pružnosti betonu ve smyku  $G_{cr}$  a dynamický Poissonův koeficient betonu  $\nu_{cr}$ .

- a) Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu  $E_{crL}$  [N·mm<sup>-2</sup>] z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání zkušební tělesa se vypočítá ze vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (13)$$

kde  $L$  ... délka tělesa [m],

$f_L$  ... první vlastní kmitočet podélného kmitání tělesa [Hz],

$\rho$  ... objemová hmotnost betonu [kg·m<sup>-3</sup>].

- b) Dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu  $E_{crf}$  [N·mm<sup>-2</sup>] z vlastního kmitočtu příčného kmitání zkušební tělesa se stanoví dle vztahu:

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (14)$$

kde  $c_1$  ... korekční součinitel, který zahrnuje vliv smyku a setrvačných momentů při kmitání tělesa, závisí na poměru poloměru setrvačnosti k délce tělesa  $i/L$ , hodnoty koeficientu jsou také závislé na Poissonově koeficientu,

$L$  ... délka tělesa [m],

$f_f$  ... první vlastní kmitočet příčného kmitání tělesa [Hz],

$\rho$  ... objemová hmotnost betonu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$i^2$  ... poloměr setrvačnosti příčného řezu tělesa k ose kolmé na rovinu kmitání [m] (pro hranoly  $i = \frac{h}{\sqrt{12}}$ , pro válce  $i = \frac{d}{4}$ ).

c) Dynamický modul pružnosti betonu ve smyku  $G_{cr}$  [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ] z krouživého kmitání zkušebního tělesa se stanoví dle vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (15)$$

kde  $L$  ... délka tělesa [m],

$f_t$  ... první vlastní kmitočet krouživého kmitání tělesa [Hz],

$\rho$  ... objemová hmotnost betonu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$k$  ... koeficient závislý na tvaru příčného řezu tělesa vyjadřující poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení.

Koeficient  $k$ , který se dosadí do vztahu (15), má tyto hodnoty:

- pro válce  $k = 1$ ,
- pro hranoly s čtvercovou základnou  $k = 1,183$ ,
- pro hranoly s obdélníkovým průřezem vypočítáme hodnotu  $k$  ze vztahu:

$$k = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \left(\frac{b}{h}\right)^{-2,52} + 0,21 \left(\frac{b}{h}\right)^6} \quad (16)$$

kde  $b$  ... délka kratší strany průřezu tělesa,

$h$  ... délka delší strany průřezu tělesa.

d) Dynamický Poissonův koeficient  $\nu_{cr}$  pro beton se stanoví dle vztahu:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (17)$$

nebo lze Poissonův koeficient vypočítat z naměřených hodnot vlastních kmitočetů tělesa dle vztahu:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{k} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (18)$$



kde  $E_{cr}$ ,  $G_{cr}$  ... dynamické moduly pružnosti betonu zjištěné z hodnot vlastního kmitočtu podélného a krouživého kmitání tělesa [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ],

$k$  ... koeficient, který je závislý na tvaru průřezu a vyjadřuje poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení, je dán vztahem (16),

$f_L, f_t$  ... hodnota prvního vlastního kmitočtu podélného a příčného kmitání tělesa [Hz].

e) Správnost zjištěných hodnot prvních vlastních kmitočtů kmitání těles se kontroluje způsoby:

- kontrola polohy uzlových míst při kmitání tělesa,
- poměr kmitočtů podélného, příčného a krouživého kmitání tělesa,
- zjištění vyšších vlastních kmitočtů tělesa, které jsou při podélném a krouživém kmitání celým násobkem jejich prvního vlastního kmitočtu [6].

Poměry prvních vlastních kmitočtů podélného, příčného a krouživého kmitání hranolů se čtvercovou základnou jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5: Poměr vlastních kmitočtů podélného, příčného a krouživého kmitání hranolů[6]

Hranoly [mm]	Poměr kmitočtů $f_L : f_t : f_f$
40×40×160	1 : 0,59 : 0,43
100×100×500	1 : 0,59 : 0,36
150×150×700	1 : 0,59 : 0,38
200×200×600	1 : 0,59 : 0,52

## 2.5 Zjišťování porušení vnitřní struktury

Pro zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování jsou v ČSN 73 1380 [38] uvedeny postupy pro zjišťování porušení vnitřní struktury. Při cyklickém zmrazování a rozmrazování betonu dochází ke vzniku trhlinek uvnitř betonu, které nejsou viditelné na povrchu, ale které vedou ke změně jeho vlastností např. snížení dynamického modulu pružnosti.

Vzhledem k tomu, že působení vysokých teplot na beton má obdobný efekt, byly metody uvedené v této normě aplikovány na zkoušené správkové hmoty vystavené účinkům teplotního zatížení.

Porušení vnitřní struktury je charakterizováno relativním dynamickým modulem pružnosti, který lze zjišťovat na zkušebních tělesech různého tvaru, mj. i na trámcích. Relativní dynamický modul pružnosti se vypočítá z výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou nebo kladívkovou rezonanční metodou.

Ultrazvuková impulzová metoda: zkušební těleso – trámec je zkoušeno přímým prozvučováním; relativní modul pružnosti se vypočítá z hodnot doby průchodu ultrazvukových impulzů zjištěných na tělese před a po vystavení působení v daném případě vysokých teplot; vyjadřuje se v %.

Kladívková rezonanční metoda: na zkušebním tělese – trámci se měří první vlastní příčná frekvence; relativní modul pružnosti se vypočítá z hodnot první vlastní příčné frekvence zjištěné na tělese před a po vystavení působení v daném případě vysokých teplot; vyjadřuje se v %.

### 3 CÍLE PRÁCE

Ve správkových hmotách, které jsou vystaveny teplotnímu zatížení, dochází ke změně mikrostruktury a fyzikálně-mechanických vlastností. Tyto změny jsou závislé na teplotě a době působení.

Cílem diplomové práce bylo sledovat změny dynamických modulů pružnosti správkových hmot v závislosti na teplotním zatížení. Pro naplnění cílů diplomové práce bylo provedeno:

- Rešerše odborné literatury a norem se zaměřením na změny mikrostruktury a fyzikálně-mechanické vlastností betonu vystaveného teplotnímu zatížení, popis modelů k simulaci působení teplot na beton, principů a zásad měření dynamickými nedestruktivními metodami.
- Příprava vzorků z jednotlivých správkových hmot – výroba zkušebních těles 40×40×160 mm a jejich výpal při různých teplotách (200 až 800 °C).
- Měření parametrů nedestruktivního zkoušení (doba průchodu ultrazvukového impulzu, první vlastní kmitočet podélného kmitání), stanovení objemové hmotnosti a pevností na tělesech před a po teplotním zatížení.
- Stanovení dynamických modulů pružnost v tlaku a v tahu a relativních dynamických modulů pružnosti správkových hmot před a po vystavení působení vysokých teplot.
- Zhodnocení změn dynamických modulů pružnosti a dalších sledovaných parametrů správkových hmot v závislosti na teplotním zatížení.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Metodika zkoušek

Měření dynamických modulů pružnosti, stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku správkových hmot bylo prováděno na zkušebních tělesech – trámečcích 40×40×160 mm.

Srovnávací tělesa (tělesa nevystavená teplotnímu zatížení) byla zkoušena ve stáří 7 a 28 dní. Na tělesech určených pro zjišťování vlivu teplotního namáhání na fyzikálně-mechanické charakteristiky správkových hmot byly měřeny dynamické moduly před a po teplotním zatížení a u těles po teplotním zatížení byla zjišťována pevnost v tahu za ohybu a v tlaku.

Zkušební tělesa pro teplotní namáhání byla uložena 7 dní ve vlhkém uložení a následně v laboratorním prostředí při relativní vlhkosti 40 % a teplotě 20-22 °C. Tělesa byla vystavena působení teplotního zatížení při teplotách 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C ve stáří 35 dnů.

#### 4.1.1 Zkoušky vstupních surovin

##### 4.1.1.1 Cement pro obecné použití

Zkušební tělesa tvaru hranolu o rozměrech 40×40×160 mm byla připravena podle normy ČSN EN 196-1 [39]. Zkušební tělesa byla zhotovena ze záměsi obsahující tři hmotnostní díly normalizovaného písku CEN, jeden hmotnostní díl cementu a půl dílu vody (vodní součinitel voda/cement 0,50). Malta se připravila mechanickým mícháním a zhutnila ve formě na setřásacím stolku. Zkušební tělesa byla ve formě uložena 24 hodin ve vlhkém prostředí a poté vyjmuta a uložena ve vodní lázni. Pevnosti zkušebních těles v tahu za ohybu a v tlaku byly stanoveny po 2, 7 a 28 dnech.

##### a) Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 196-1 [39]. Při této zkoušce je zkušební těleso – trámeček 40×40×160 mm zatěžováno uprostřed jedním břemenem až do porušení. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  [MPa] se vypočítá dle vzorce:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (19)$$

kde  $F_f$  ... zatěžovací síla při zlomení zkušební tělesa [N],  
 $l$  ... vzdálenost mezi podporami [mm],  
 $b$  ... strana čtvercového průřezu zkušební tělesa [mm].

#### **b) Pevnost v tlaku**

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 196-1 [39]. Zkouška se provádí na dvou zlomených zkušebních tělesech po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Zkušební těleso se umístí do zkušební přípravku a zatěžuje se ve zkušebním lisu do porušení. Pevnost v tlaku  $R_c$  [MPa] se vypočítá dle vzorce:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (20)$$

Kde  $F_c$  ... nejvyšší zatěžovací síla při porušení zkušební tělesa [N],  
1600 ... plocha destiček (40×40 mm) [mm<sup>2</sup>].

#### **4.1.1.2 Hlinitanový cement**

Zkušební tělesa tvaru hranolu o rozměrech 40×40×60 mm byla připravena podle normy ČSN EN 14647 [40]. Zkušební tělesa byla zhotovena ze záměsi obsahující 1350 g normalizovaného písku CEN, 500 g hlinitanového cementu a 200 g vody (vodní součinitel voda/cement 0,40). Malta se připravila mechanickým mícháním a zhutnila ve formě na setřásacím stolku. Zkušební tělesa byla vyjmuta po 6 hodinách z forem a uložena do vodní lázně. Pevnosti zkušebních těles v tahu za ohybu a v tlaku byly stanoveny po 6 a 24 hodinách (požadavek ČSN EN 14647 [40]), 7 a 28 dnech (pro srovnání s ostatními správkovými hmotami).

#### **a) Pevnost v tahu za ohybu**

Pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 196-1 [39]. Postup měření a vyhodnocení výsledků je uveden v kapitole 4.1.1.1.

#### **b) Pevnost v tlaku**

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 196-1 [39]. Postup měření a vyhodnocení výsledků je uveden v kapitole 4.1.1.1.

### 4.1.1.3 Kamenivo

#### a) Sítový rozbor

Sítový rozbor kameniva se prováděl podle ČSN EN 933-1 [41]. Zkouška spočívá v prosévání vzorku sadou kontrolních sít, vážením zbytků na sítěch a určením jejich hmotnostních podílů v procentech. Následně se vypočítá procento jemných částic  $f$  [%] pro suché třídění dle vzorce:

$$f = \frac{100P}{M_1} \quad (21)$$

kde  $M_1$  ... suchá hmotnost zkušební navážky [kg],

$P$  ... hmotnost vytříděného materiálu zbylého na dně [kg].

#### b) Sypná hmotnost volně sypaného kameniva

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva se stanovila podle ČSN EN 1097-3 [42]. Podstata zkoušky spočívá ve zjištění hmotnosti kameniva, které je nasypáno předepsaným způsobem do nádoby o známém objemu. Při zkoušce se zváží prázdná nádoba o známém objemu ( $m_1$ ). Do ní se lopatkou z výšky max. 50 mm nad horním okrajem nádoby sype vzorek vysušeného kameniva rovnoměrně po půdorysné ploše tak, aby nad horním okrajem nádoby vznikl komolý kužel. Přebytečné kamenivo se odstraní otáčivým pohybem ocelové tyče podle okraje nádoby. Po urovnání povrchu nádobu s kamenivem zvážíme ( $m_2$ ). Sypná hmotnost volně sypaného kameniva  $\rho_b$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] se vypočítá dle vzorce:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (22)$$

kde  $m_1$  ... hmotnost prázdné nádoby [g],

$m_2$  ... hmotnost nádoby s navážkou [g],

$V$  ... objem nádoby [l].

#### c) Sypná hmotnost setřeseného kameniva

Sypná hmotnost setřeseného kameniva byla stanovena podle již neplatné normy ČSN 72 1171 [43] (zkoušení dle již neplatné normy bylo zvoleno z důvodu, že ČSN EN 1097-3 [42] nezahrnuje stanovení sypné hmotnosti v setřeseném stavu). Kamenivo se vsypalo na nádoby, která byla přichycena k vibračnímu stolu. Vibrace trvala 3 minuty a během této doby se kamenivo doplňovalo do nádoby pomocí nástavce. Po setřesení se nástavec sejmul

a povrch se zarovnal. Zvážíla se prázdná nádoba a nádoba naplněná kamenivem. Výsledkem zkoušky je průměrná hodnota ze tří měření, která se neliší o více než  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Sypná hmotnost setřeseného kameniva  $\rho_t$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] se vypočítá dle vzorce:

$$\rho_t = \frac{m_{2t} - m_1}{V} \quad (23)$$

kde  $m_1$  ... hmotnost prázdné odměrné nádoby [g],

$m_{2t}$  ... hmotnost nádoby naplněná setřeseným kamenivem [g],

$V$  ... objem nádoby [l].

#### d) Objemová hmotnost zrn kameniva

Stanovení objemové hmotnosti zrn kameniva bylo prováděno postupem dle ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti [44]. Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně  $\rho_{rd}$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] byla vypočítána ze vztahu:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (24)$$

kde  $\rho_w$  ... hustota vody při zkušební teplotě [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$M_1$  ... hmotnost vodou nasáklého a povrchově osušeného kameniva na vzduchu [g],

$M_2$  ... hmotnost pyknometru obsahujícího vzorek nasáklého kameniva a vodu [g],

$M_3$  ... hmotnost pyknometru naplněného vodou [g],

$M_4$  ... hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky na vzduchu [g].

#### 4.1.2 Zkoušky správkových hmot

Zkušební tělesa tvaru hranolu o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm byla připravena podle normy ČSE EN 12190 [45]. Ošetřování zkušebních těles vycházelo z postupů uvedených v této normě. Pevnost srovnávacích zkušebních těles v tahu za ohybu a v tlaku byly stanoveny po 7 a 28 dnech. Na tělesech určených pro zjišťování vlivu teplotního namáhání na fyzikálně-mechanické charakteristiky správkových hmot byly měřeny dynamické moduly před a po teplotním zatížení a po teplotním zatížení byly zjišťovány pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku.

#### 4.1.2.1 Teplotní zatěžování zkušebních těles

Teplotní zatěžování bylo provedeno v peci s elektrickým vytápěním. Teplota v peci byla kontrolována a zaznamenávána pomocí soustavy termočlánků. Teplotní zatěžování těles vycházelo z doporučení uvedeného v [20] a postup byl následující:

Tělesa byla zatěžována s nárůstem teploty 10 °C/min. Teplotní zatížení probíhalo do dosažení požadované teploty (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C). Po dosažení požadované teploty následovala izotermická výdrž po dobu 90 min a poté pozvolné chlazení na laboratorní teplotu.

Byly sledovány parametry správkových hmot před teplotním zatížením (20 – 22 °C) a po teplotním zatížení na teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C.

#### 4.1.2.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost správkové malty se stanovila měřením a vážením třech zkušebních těles podle normy ČSE EN 12190 [45]. Objemová hmotnost  $\rho$  [kg·m<sup>-3</sup>] se stanovila dle vztahu:

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (25)$$

kde:  $W$  ... hmotnost hranolu [kg],

$V$  ... objem hranolu [m<sup>3</sup>].

#### 4.1.2.3 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles vyrobených ze správkové malty byla stanovena podle EN 196-1 [39]. Postup měření a vyhodnocení výsledků je uveden v kapitole 4.1.1.1.

#### 4.1.2.4 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku správkové malty se stanovila na šesti zkušebních tělesech ve tvaru hranolu pro požadované stáří vzorku 7 dní a 28 dní podle normy ČSE EN 12190 [45]. Pevnost v tlaku  $R_c$  [N·mm<sup>-2</sup>] se stanovila dle vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (26)$$

kde  $F_c$  ... maximální zatěžovací síla v okamžiku porušení [N],

$A$  ... zkoušená plocha 1600 mm<sup>2</sup>.



#### 4.1.2.5 Měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Měření ultrazvukovou impulzovou metodou bylo prováděno v souladu s ustanovením ČSN 73 1371 [32] pomocí přístroje TICO (frekvence sond byla 150 KHz). Měření doby průchodu ultrazvukového impulsu bylo prováděno přímým prozvučováním – obrázek 15. Postup měření a vyhodnocení výsledků je uveden v kapitole 2.4.2.



Obr. 15: Měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Z výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou byly vypočítány:

- rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$  (vztah 6 – kap. 2.4.2.1)
- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$  (vztah 9 – kap. 2.4.2.4)
- relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT,i}$

Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT,i}$  [%] se vypočítá dle vztahu:

$$RDM_{UPPT,i} = \left( \frac{T_{S,0}}{T_{S,i}} \right)^2 \cdot 100 \quad (27)$$

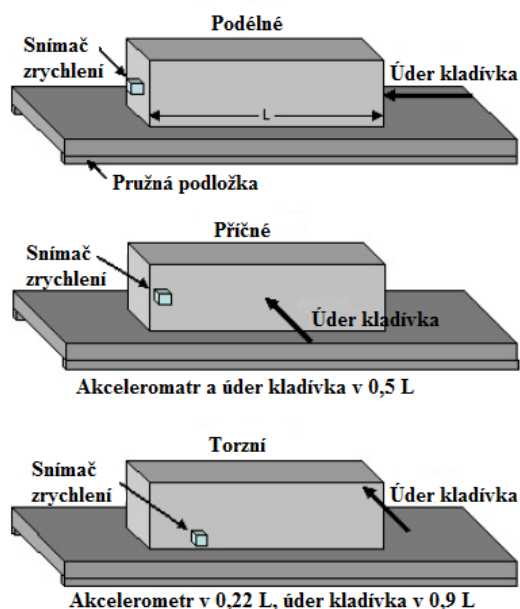
kde  $T_{S,0}$  ... počáteční doba průchodu ultrazvukových impulsů ve zkušebním tělese [ $\mu$ s],

$T_{S,i}$  ... doba průchodu ultrazvukových impulsů po teplotním zatížení při teplotě  $t_i$  ( $i = 200, 400, 600$  a  $800$  °C) [ $\mu$ s].

#### 4.1.2.6 Měření kladívkovou rezonanční metodou

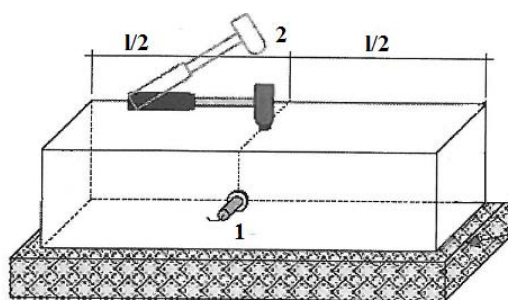
Měření vlastní frekvence kmitání zkušebního tělesa vyrobeného ze správkové hmoty bylo prováděno kladívkovou rezonanční metodou dle ASTM C215-14 [37]. Měření bylo prováděno přístrojem RT-1 Resonant Frequency Test. Na zkušebních tělesech byla pro jednotlivé typy kmitání vyznačena místa pro provedení úderu kladívkem a místa pro osazení

akcelerometru – obrázek 16. Na zkušební tělese byl na příslušné místo osazen snímač dle typu daného kmitání a následně byl v příslušném bodě proveden úder kladívkem. Na displeji přístroje byla odečtena hodnota prvního vlastní kmitočtu. Měření každé vlastní frekvence bylo opakováno dvakrát. Postup měření a vyhodnocení výsledků je uveden v kapitole 2.4.3.



Obr. 16: Označení míst pro osazení snímače zrychlení a úder kladívka

Pomocí přístroje RT-1 byla zjišťována i vlastní příčná frekvence postupem uvedeným v ČSN 73 1380 [38]. Na obrázku 17 je znázorněno schéma měření. Na vyznačeném místě zkušební tělesa byl umístěn snímač zrychlení pro snímání vlastní frekvence (bod 1) a na druhém vyznačeném místě (bod 2) byl proveden lehký úder impulzním kladívkem.



Obr. 17: Umístění sondy a kladívka při zjišťování vlastní příčné frekvence postupem dle ČSN 73 1380 [38]

Z výsledků měření kladívkovou rezonanční metodou byly vypočítány:

- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastní kmitočtu podélného kmitání  $E_{crL}$  (vztah 13 – kap. 2.4.3.4),

- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání  $E_{crf}$  (vztah 14 – kap. 2.4.3.4),
- dynamický modul pružnosti ve smyku  $G_{cr}$  (vztah 15 – kap. 2.4.3.4),
- dynamický Poissonův koeficient  $\nu_{cr}$  (vztah 17 – kap. 2.4.3.4),
- relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF,T}$  (vztah 28 – kap. 4.1.2.6).

Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF,ti}$  [%] se vypočítá dle vztahu:

$$RDM_{FF,ti} = \left(\frac{f_{ti}}{f_0}\right)^2 \cdot 100 \quad (28)$$

kde  $f_{ti}$  ... vlastní frekvence měřená po teplotním zatížení při teplotě  $t_i$  ( $i = 200, 400, 600$  a  $800$  °C) [Hz],

$f_0$  ... počáteční vlastní frekvence [Hz].

## 4.2 Základní parametry složek správkových hmot

### 4.2.1 Složky správkových hmot

#### a) Cement

- *cement pro obecné použití* - CEM I 42,5 R a CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R – cementárna Mokrá (Českomoravský cement, a.s.),
- *hlinitanový cement* – CIMENT FONDU od firmy Kerneos.

#### b) Kamenivo

Pro výrobu správkových hmot bylo použito následující kamenivo:

- normalizovaný písek CEN 0/2mm (křemičitý písek),
- DDK frakce 0/2 mm a 0/4 mm z lomu Želešice (mateční hornina amfibolit),
- DDK frakce 0/4 mm z lomu Bílčice (mateční hornina čedič),
- DTK frakce 0/4 mm z lokality Žabčice (vysoký podíl živců).

#### c) Přísady a vlákna

- Polymerní přísada Vinnapas – jedná se o disperzní prášek kopolymeru vinylacetátu a etylenu s dobrou odolností vzhledem k zmýdlení [21].

- Polypropylenová vlákna FIBRIN 3/15 – vlákna od společnosti KrampeHarex, průměr vláken je 15  $\mu\text{m}$ , pevnost v tahu vláken 300  $\text{N/m}^2$ , bod tání 160  $^\circ\text{C}$  [22].

#### d) Záměsová voda

Voda z vodovodního řadu splňující požadavky ČSN EN 1008 [46].

### 4.2.2 Výsledky zkoušek složek správkových hmot

#### 4.2.2.1 Cementy

Výsledky zkoušek pevností cementů jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6: Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku cementů

CEM I 42,5 R			CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R			HLINITANOVÝ CEMENT		
<i>Stáří</i>	$R_f$	$R_c$	<i>Stáří</i>	$R_f$	$R_c$	<i>Stáří</i>	$R_f$	$R_c$
[dny]	[MPa]	[MPa]	[dny]	[MPa]	[MPa]	[hodiny]	[MPa]	[MPa]
2	6,3	23,8	2	3,9	12,0	6	3,5	18,6
28	9,3	50,3	28	8,2	39,5	24	7,3	56,9

#### 4.2.2.2 Kamenivo

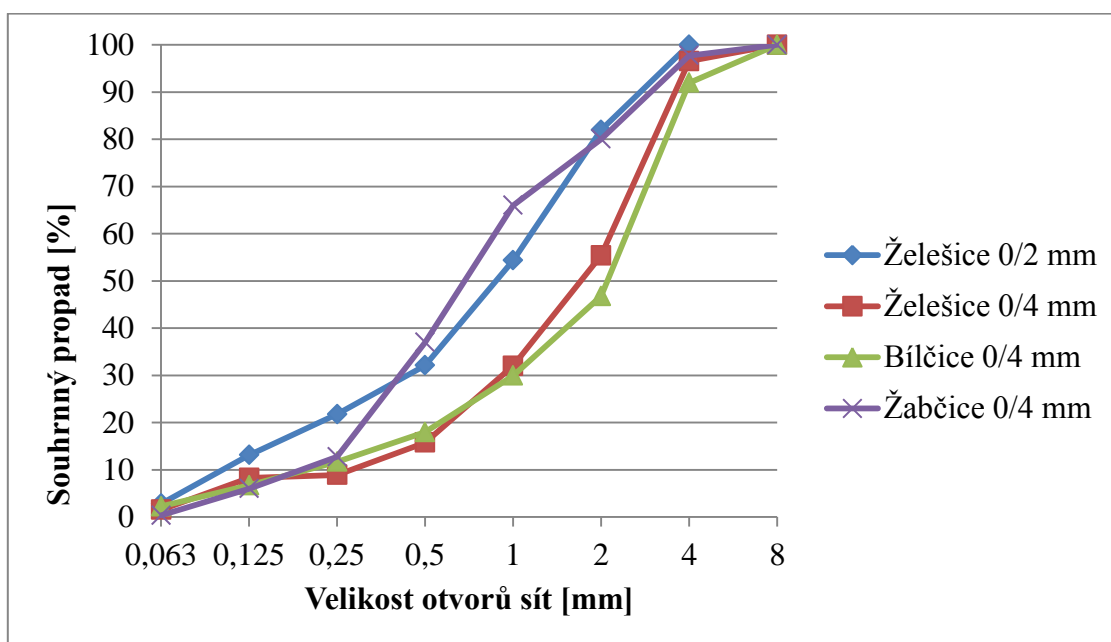
Výsledky zkoušek kameniva jsou uvedeny v tabulce 7.1 a 7.2. Křivky zrnitosti jsou znázorněny na obrázku 18.

Tab. 7.1: Výsledky stanovení sypné hmotnosti volně sypaného a setřeseného kameniva a objemové hmotnosti zrn kameniva

Parametr	0/2 mm Želešice	0/4 mm Želešice	0/4 mm Bílčice	0/4 mm Žabčice
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1570	1510	1650	1190
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1850	1820	1920	1630
Objemová hmotnost zrn kameniva [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2840	2780	2870	2500

Tab. 7.2: Výsledky síťového rozboru kameniva

Velikost otvorů sít [mm]	Frakce 0/2 mm Želešice	Frakce 0/4 mm Želešice	Frakce 0/4 mm Bílčice	Frakce 0/4 mm Žabčice
	Souhrnné procento propadu [% hm]			
8	100	100	100	100
4	100	96,54	91,96	97,71
2	81,96	55,37	46,76	80,04
1	54,33	32,01	29,94	66,00
0,5	32,11	15,78	17,96	36,97
0,25	21,77	8,93	11,69	12,75
0,125	13,11	8,29	6,71	6,01
0,063	2,81	1,53	2,24	0,34
f [%]	2,73	1,47	2,10	0,30



Obr. 18: Křivky zrnitosti kameniva

### 4.3 Složení správkových hmot

Složení správkových hmot vycházelo jednak, z navržených receptur v rámci řešení výzkumného úkolu (projekt MPO FR-TI4/369 nové správkové hmoty pro sanace železobetonových konstrukcí s vyšší odolností proti požárům), které byly doplněny

o správkové hmoty s hlinitanovým cementem, jednak byly použity dvě půmyslově vyráběné správkové hmoty od společnosti Sika CZ, konkrétně SikaTop - 122SP a Sika MonoTop – 612.

*SikaTop - 122SP* je 1-komponentní reprofilační malta s cementovým pojivem, která je zušlechtěná umělými hmotami a umělými vlákny a splňuje požadavky třídy R4 dle normy ČSN EN 1504-3 [47] (podrobně viz technický list v příloze č. 1)[23].

*Sika MonoTop – 612* je reprofilační malta s cementovým pojivem, která je zušlechtěná umělými hmotami a přísadou Silicafume. Správková hmota je určena pro sanace betonových konstrukcí, zejména dynamicky zatěžovaných s nebezpečím tvorby trhlin. Splňuje požadavky třídy R4 dle normy ČSN EN 1504-3 [47] (podrobně viz technický list v příloze č. 2)[24].

Složení správkových hmot pro experimentální práce je uvedeno v tabulce 8.

Tab. 8: Složení správkových hmot na  $1m^3$

Složka správkové hmoty	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6	SH7	SH8
	Množství v kg na $1m^3$							
CEM I 42,5 R	492	–	–	–	–	–	–	–
CEM II/B-M(S-LL) 32,5 R	–	492	–	–	669	586	586	586
Hlinitanový cement	–	–	517	586	–	–	–	–
Normalizovaný písek EN 196-1	1476	1476	1551	–	–	–	–	–
DDK 0/2 Želešice	–	–	–	–	1674	–	–	–
DDK 0/4 Želešice	–	–	–	1758	–	1758	–	–
DDK 0/4 Bílčice	–	–	–	–	–	–	–	1758
DTK 0/4 Žabčice	–	–	–	–	–	–	1758	–
Voda	246	246	207	257	341	257	252	252
w/c	0,50	0,50	0,40	0,44	0,51	0,44	0,43	0,43
Polymerní přísada Vinnapas - 3% z $m_c$	–	–	–	–	20	17,6	17,6	17,6
Polypropylenová vlákna Fibrin 315	–	–	–	1	1	1	1	1
SH9	SikaTop – 122 SP		3,7 kg vody na 25 kg správkové hmoty					
SH10	Sika MonoTop - 612		3,5 kg vody na 25 kg správkové hmoty					

## 4.4 Výsledky zkoušek správkových hmot

Výsledky zkoušek správkových hmot jsou uvedeny v kapitole 4.4.1 (srovnávací vzorky) a kapitole 4.4.2 (vzorky po vystavení působení teplotního zatížení).

V kapitole 4.4.1 jsou uvedeny výsledky zkoušek srovnávacích těles správkových hmot (objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a tlaku, parametry z měření dynamickými nedestruktivními metodami).

V kapitole 4.4.2 jsou uvedeny výsledky měření dynamickými nedestruktivními metodami, stanovení objemové hmotnosti na tělesech před a po teplotním zatížení, popis stavu správkových hmot pro expozici při jednotlivých teplotách vč. fotodokumentace a pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku zjišťované na zkušebních tělesech po teplotním zatížení.

*Vyjadřování výsledků měření* – hodnoty objemové hmotnosti, rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti nebyly vyjadřovány v souladu s požadavky příslušných technických norem z důvodu snížit vlivu zaokrouhlování hodnot jednotlivých parametrů na prováděné analýzy a porovnání.

### 4.4.1 Výsledky zkoušek správkových hmot – srovnávací vzorky

Výsledky měření provedených na srovnávacích vzorcích správkových hmot jsou uvedeny v tabulce 9.1 a 9.2.

*Tab. 9.1: Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku srovnávacích vzorků správkových hmot*

Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 1</b>					<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 2</b>				
7-1	9,1	37,5	38,1	37,8	7-1	8,1	26,9	28,8	27,8
7-2	8,2	38,8	38,1	38,4	7-2	7,2	28,8	28,1	28,4
7-3	7,7	38,8	38,8	38,8	7-3	6,4	25,0	25,6	25,3
∅	<b>8,3</b>			<b>38,3</b>	∅	<b>7,2</b>			<b>27,2</b>
28-1	8,5	62,5	57,5	60,0	28-1	8,8	46,9	46,3	46,6
28-2	8,0	58,1	61,9	60,0	28-2	9,6	51,3	51,3	51,3
28-3	8,8	59,4	55,6	57,5	28-3	8,8	47,5	50,0	48,8
∅	<b>8,4</b>			<b>59,2</b>	∅	<b>9,1</b>			<b>48,9</b>

Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 3</b>					<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 4</b>				
7-1	9,7	66,3	78,1	72,2	7-1	10,3	59,4	60,0	59,7
7-2	9,6	70,0	73,8	71,9	7-2	9,5	58,1	62,5	60,3
7-3	9,8	67,5	75,6	71,6	7-3	9,5	61,9	60,6	61,3
∅	9,7			71,9	∅	9,8			60,4
28-1	9,7	72,2	75,0	73,6	28-1	9,4	58,8	63,1	60,9
28-2	9,2	76,9	83,4	80,2	28-2	9,5	61,3	61,3	61,3
28-3	9,1	79,7	78,1	78,9	28-3	9,9	60,6	63,1	61,9
∅	9,3			77,6	∅	9,6			61,4
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 5</b>					<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 6</b>				
7-1	7,9	33,8	34,4	34,1	7-1	7,9	40,6	40,6	40,6
7-2	7,2	31,3	32,5	31,9	7-2	8,1	38,8	40,6	39,7
7-3	7,6	33,8	34,4	34,1	7-3	7,8	39,4	40,6	40,0
∅	7,6			33,3	∅	7,9			40,1
28-1	11,6	50,0	47,5	48,8	28-1	11,8	56,9	56,9	56,9
28-2	9,7	48,8	47,5	48,1	28-2	11,9	54,4	57,5	55,9
28-3	9,4	46,9	49,4	48,1	28-3	13,2	58,8	51,3	55,0
∅	10,2			48,3	∅	12,3			55,9
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 7</b>					<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 8</b>				
7-1	5,8	27,5	26,3	26,9	7-1	7,7	44,4	46,9	45,6
7-2	5,8	27,5	27,5	27,5	7-2	8,5	43,8	44,4	44,1
7-3	5,3	26,9	25,6	26,3	7-3	8,8	45,0	45,0	45,0
∅	5,6			26,9	∅	8,3			44,9
28-1	6,7	40,6	41,9	41,3	28-1	9,0	53,8	56,3	55,0
28-2	7,4	39,4	40,6	40,0	28-2	10,7	59,4	58,8	59,1
28-3	8,4	41,3	37,5	39,4	28-3	10,5	60,0	59,4	59,7
∅	7,5			40,2	∅	10,1			57,9



Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 9</b>					<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 10</b>				
7-1	7,2	45,0	43,8	44,4	7-1	8,5	44,4	46,9	45,6
7-2	7,6	43,1	41,3	42,2	7-2	8,0	44,4	43,8	44,1
7-3	6,8	44,4	35,6	40,0	7-3	7,6	46,3	43,8	45,0
Ø	7,2			42,2	Ø	8,0			44,9
28-1	6,0	59,4	63,1	61,3	28-1	9,7	63,1	64,4	63,8
28-2	9,0	61,3	60,6	60,9	28-2	10,7	63,1	58,8	60,9
28-3	7,5	61,3	60,0	60,6	28-3	9,6	64,4	65,6	65,0
Ø	7,5			60,9	Ø	10,0			63,2

Tab. 9.2: Výsledky měření srovnávacích vzorků správkových hmot ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou

Ozn.	ρ	T <sub>uz</sub>	v <sub>L</sub>	E <sub>cu</sub>	f <sub>L</sub>	f <sub>f</sub>	f <sub>t</sub>	f <sub>fR</sub>	E <sub>crL</sub>	E <sub>crf</sub>	G <sub>cr</sub>	v <sub>cr</sub>
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[μs]	[km/s]	[MPa]	[kHz]			[MPa]		[-]		
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 1</b>												
7-1	2250	36,2	4,429	44132	13,144	5,565	7,685	5,671	39965	39002	16163	0,24
7-2	2245	36,4	4,411	43681	13,144	5,512	7,632	5,618	39922	38347	15926	0,25
7-3	2241	36,6	4,384	43067	13,091	5,512	7,632	5,618	39547	38214	15911	0,24
Ø	2245	36,4	4,408	43627	13,126	5,530	7,650	5,636	39811	38521	16000	0,24
28-1	2222	36,3	4,438	43761	13,238	5,512	7,844	5,512	40495	38355	16841	0,20
28-2	2229	36,3	4,443	43992	13,356	5,512	7,791	5,618	41438	39020	16730	0,24
28-3	2220	36,4	4,428	43545	13,197	5,512	7,738	5,512	40267	38626	16413	0,23
Ø	2224	36,3	4,436	43766	13,264	5,512	7,791	5,547	40733	38667	16661	0,22
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 2</b>												
7-1	2217	38,2	4,207	39244	12,296	5,141	7,208	5,247	34693	33090	14137	0,23
7-2	2205	38,1	4,226	39384	12,349	5,247	7,208	5,247	34812	33585	14040	0,24
7-3	2209	38,1	4,215	39250	12,402	5,300	7,261	5,247	35115	35075	14263	0,23
Ø	2210	38,1	4,216	39293	12,349	5,229	7,226	5,247	34873	33917	14147	0,23
28-1	2191	38,0	4,225	39106	12,826	5,406	7,526	5,406	37093	35807	15157	0,22

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 2</b>												
<b>28-2</b>	2194	37,9	4,231	39269	12,803	5,406	7,526	5,459	36984	36000	15175	0,22
<b>28-3</b>	2190	38,0	4,218	38965	12,773	5,406	7,526	5,406	36783	35677	15145	0,21
<b>Ø</b>	<b>2192</b>	<b>38,0</b>	<b>4,224</b>	<b>39113</b>	<b>12,801</b>	<b>5,406</b>	<b>7,526</b>	<b>5,424</b>	<b>36953</b>	<b>35828</b>	<b>15159</b>	<b>0,22</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 3</b>												
<b>7-1</b>	2306	35,0	4,604	48883	13,939	5,830	8,321	5,936	46628	44488	19689	0,18
<b>7-2</b>	2310	34,9	4,625	49416	13,939	5,830	8,215	5,936	46868	45150	19285	0,22
<b>7-3</b>	2299	35,1	4,601	48673	13,833	5,989	8,268	5,883	45898	47044	19442	0,18
<b>Ø</b>	<b>2305</b>	<b>35,0</b>	<b>4,610</b>	<b>48991</b>	<b>13,904</b>	<b>5,883</b>	<b>8,268</b>	<b>5,918</b>	<b>46465</b>	<b>45561</b>	<b>19472</b>	<b>0,19</b>
<b>28-1</b>	2275	34,0	4,711	50738	14,098	5,989	8,321	5,989	46623	45730	19241	0,21
<b>28-2</b>	2274	34,1	4,703	50948	14,098	5,989	8,303	5,989	46531	45582	19111	0,22
<b>28-3</b>	2263	34,1	4,703	51186	14,102	5,989	8,321	5,989	46330	45358	19137	0,21
<b>Ø</b>	<b>2271</b>	<b>34,1</b>	<b>4,706</b>	<b>50957</b>	<b>14,099</b>	<b>5,989</b>	<b>8,315</b>	<b>5,989</b>	<b>46495</b>	<b>45557</b>	<b>19163</b>	<b>0,21</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 4</b>												
<b>7-1</b>	2451	35,5	4,511	49884	12,879	5,363	7,367	5,512	41788	39651	16225	0,29
<b>7-2</b>	2432	35,6	4,515	49591	12,349	5,459	7,367	5,459	38266	40325	16161	0,18
<b>7-3</b>	2455	35,5	4,515	50046	12,349	5,300	7,314	5,406	38545	38413	16035	0,20
<b>Ø</b>	<b>2446</b>	<b>35,5</b>	<b>4,514</b>	<b>49840</b>	<b>12,526</b>	<b>5,374</b>	<b>7,349</b>	<b>5,459</b>	<b>39533</b>	<b>39463</b>	<b>16140</b>	<b>0,22</b>
<b>28-1</b>	2401	35,8	4,439	47310	12,643	5,406	7,420	5,406	38768	38073	15864	0,22
<b>28-2</b>	2400	35,4	4,493	48455	12,659	5,427	7,420	5,427	38848	38252	15818	0,23
<b>28-3</b>	2408	35,6	4,465	48008	12,643	5,406	7,386	5,406	38828	38072	15726	0,24
<b>Ø</b>	<b>2403</b>	<b>35,6</b>	<b>4,466</b>	<b>47924</b>	<b>12,648</b>	<b>5,413</b>	<b>7,409</b>	<b>5,413</b>	<b>38815</b>	<b>38132</b>	<b>15803</b>	<b>0,23</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 5</b>												
<b>7-1</b>	2290	40,8	3,905	34921	10,971	4,717	6,360	4,770	27987	28030	11168	0,25
<b>7-2</b>	2285	40,7	3,915	35022	11,024	4,770	6,466	4,876	28155	28504	11509	0,22
<b>7-3</b>	2274	40,6	3,910	34762	10,971	4,823	6,360	4,876	27633	28767	11037	0,25
<b>Ø</b>	<b>2283</b>	<b>40,7</b>	<b>3,910</b>	<b>34902</b>	<b>10,989</b>	<b>4,770</b>	<b>6,395</b>	<b>4,841</b>	<b>27925</b>	<b>28434</b>	<b>11238</b>	<b>0,24</b>
<b>28-1</b>	2240	40,1	4,008	35995	11,607	4,876	6,678	4,929	31191	30176	12254	0,27
<b>28-2</b>	2271	39,7	4,046	37182	11,819	4,876	6,678	4,876	32774	30872	12415	0,32

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 5</b>												
<b>28-3</b>	2274	39,7	4,052	37334	11,554	4,929	6,731	4,929	31298	31036	12614	0,24
<b>Ø</b>	<b>2262</b>	<b>39,8</b>	<b>4,035</b>	<b>36837</b>	<b>11,660</b>	<b>4,894</b>	<b>6,696</b>	<b>4,911</b>	<b>31754</b>	<b>30695</b>	<b>12428</b>	<b>0,28</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 6</b>												
<b>7-1</b>	2380	38,1	4,198	41957	11,925	5,035	6,890	5,194	34705	33820	13764	0,26
<b>7-2</b>	2378	38,1	4,204	42029	11,978	5,088	6,943	5,035	35074	34710	13996	0,25
<b>7-3</b>	2352	38,6	4,162	40736	11,819	4,982	6,890	5,035	33855	32963	13647	0,24
<b>Ø</b>	<b>2370</b>	<b>38,3</b>	<b>4,188</b>	<b>41574</b>	<b>11,907</b>	<b>5,035</b>	<b>6,908</b>	<b>5,088</b>	<b>34545</b>	<b>33831</b>	<b>13802</b>	<b>0,25</b>
<b>28-1</b>	2349	37,2	4,327	43975	12,296	5,247	7,208	5,353	36802	36560	15039	0,22
<b>28-2</b>	2348	37,2	4,328	43988	12,084	5,194	7,115	5,300	35555	35943	14664	0,21
<b>28-3</b>	2322	37,4	4,300	42933	12,402	5,141	7,049	5,247	37012	35010	14190	0,30
<b>Ø</b>	<b>2340</b>	<b>37,3</b>	<b>4,318</b>	<b>43632</b>	<b>12,261</b>	<b>5,194</b>	<b>7,124</b>	<b>5,300</b>	<b>36456</b>	<b>35838</b>	<b>14631</b>	<b>0,24</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 7</b>												
<b>7-1</b>	2184	41,9	3,825	31959	11,130	4,664	6,466	4,823	27846	26737	11142	0,25
<b>7-2</b>	2194	42,1	3,810	31843	11,130	4,664	6,519	4,770	27894	26707	11353	0,23
<b>7-3</b>	2150	42,4	3,780	30713	11,024	4,611	6,413	4,717	26887	25627	10788	0,25
<b>Ø</b>	<b>2176</b>	<b>42,1</b>	<b>3,805</b>	<b>31505</b>	<b>11,095</b>	<b>4,646</b>	<b>6,466</b>	<b>4,770</b>	<b>27542</b>	<b>26357</b>	<b>11094</b>	<b>0,24</b>
<b>28-1</b>	2160	40,2	4,003	34613	11,766	4,982	6,890	5,035	30975	30282	12604	0,23
<b>28-2</b>	2143	40,2	3,990	34109	11,819	4,982	6,890	4,982	30850	29849	12435	0,24
<b>28-3</b>	2146	41,0	3,916	32903	11,554	4,876	6,784	4,876	29582	28657	12097	0,22
<b>Ø</b>	<b>2150</b>	<b>40,5</b>	<b>3,970</b>	<b>33875</b>	<b>11,713</b>	<b>4,947</b>	<b>6,855</b>	<b>4,964</b>	<b>30469</b>	<b>29596</b>	<b>12379</b>	<b>0,23</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 8</b>												
<b>7-1</b>	2432	37,8	4,264	44208	11,819	4,982	6,890	5,088	35294	34519	14223	0,24
<b>7-2</b>	2449	38,0	4,239	43999	11,872	4,982	6,890	5,141	35882	34999	14362	0,25
<b>7-3</b>	2455	38,0	4,250	44338	11,872	4,982	6,943	5,088	36031	34832	14613	0,23
<b>Ø</b>	<b>2445</b>	<b>37,9</b>	<b>4,251</b>	<b>44182</b>	<b>11,854</b>	<b>4,982</b>	<b>6,908</b>	<b>5,106</b>	<b>35736</b>	<b>34783</b>	<b>14399</b>	<b>0,24</b>
<b>28-1</b>	2411	37,5	4,302	44634	12,137	5,088	7,049	5,194	36918	35870	14770	0,25
<b>28-2</b>	2401	37,0	4,357	45576	12,402	5,247	7,208	5,247	38386	37986	15408	0,25
<b>28-3</b>	2434	37,1	4,350	46060	12,190	5,194	7,155	5,247	37614	37611	15376	0,22

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 8</b>												
Ø	2415	37,2	4,336	45423	12,243	5,176	7,137	5,229	37639	37156	15185	0,24
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 9</b>												
7-1	2144	38,5	4,169	37272	12,296	5,141	7,208	5,247	33469	31983	13648	0,23
7-2	2142	38,8	4,141	36735	12,243	5,141	7,155	5,141	33157	31768	13407	0,24
7-3	2156	38,7	4,157	37249	12,455	5,247	7,261	5,247	34557	33494	13923	0,24
Ø	2147	38,7	4,156	37085	12,331	5,176	7,208	5,212	33728	32415	13659	0,24
28-1	2117	37,5	4,270	38595	12,667	5,353	7,473	5,406	34895	33833	14425	0,21
28-2	2119	37,5	4,278	38770	12,561	5,353	7,420	5,353	34469	33899	14260	0,21
28-3	2139	37,5	4,279	39170	12,561	5,353	7,420	5,406	34702	34056	14366	0,21
Ø	2125	37,5	4,276	38845	12,596	5,353	7,438	5,388	34689	33929	14350	0,21
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 10</b>												
7-1	2166	39,0	4,120	36779	12,031	4,929	6,943	5,141	32333	29749	12757	0,27
7-2	2142	39,1	4,109	36167	11,554	4,982	6,837	5,035	29475	29564	12230	0,21
7-3	2156	39,4	4,081	35916	11,925	4,982	6,996	5,035	31660	30080	12914	0,23
Ø	2155	39,2	4,103	36287	11,837	4,964	6,925	5,070	31156	29798	12634	0,24
28-1	2123	37,8	4,247	38294	12,031	5,141	7,155	5,141	31679	31275	13285	0,19
28-2	2154	37,7	4,254	38980	12,349	5,300	7,261	5,300	33854	34013	13866	0,22
28-3	2130	37,7	4,255	38552	12,190	5,194	7,155	5,194	32569	32266	13317	0,22
Ø	2136	37,7	4,252	38609	12,190	5,212	7,190	5,212	32701	32518	13489	0,21

#### 4.4.2 Výsledky zkoušek správkových hmot po expozici při různých teplotách

Výsledky měření provedených na vzorcích správkových hmot vystavených působení teplotního zatížení jsou uvedeny v tabulce 10.1 a 10.2. Popis stavu správkových hmot po expozici při různém teplotním zatížení je uveden v tabulce 11.

Tab. 10.1: Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku správkových hmot po teplotním zatížení

Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 1</b>									
200-1	12,0	52,5	54,4	53,4	600-7	2,6	24,1	27,5	25,8
200-2	11,4	51,9	47,5	49,7	600-8	3,0	28,1	30,3	29,2
200-3	11,4	51,3	57,5	54,4	600-9	2,5	28,8	28,1	28,4
∅	11,6			52,5	∅	2,7			27,8
400-4	7,3	43,1	45,9	44,5	800-10	0,3	7,8	7,1	7,5
400-5	6,8	42,8	43,8	43,3	800-11	0,6	8,1	8,6	8,4
400-6	7,2	41,9	42,8	42,3	800-12	0,5	5,9	8,6	7,3
∅	7,1			43,4	∅	0,5			7,7
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 2</b>									
200-1	9,7	39,4	38,8	39,1	600-7	2,2	20,9	21,3	21,1
200-2	10,1	40,0	40,6	40,3	600-8	1,7	22,1	22,9	22,5
200-3	10,1	41,9	38,8	40,3	600-9	1,9	22,4	21,1	21,8
∅	10,0			39,9	∅	1,9			21,8
400-4	6,2	32,8	33,4	33,1	800-10	0,3	5,7	5,3	5,5
400-5	6,3	32,5	34,4	33,4	800-11	0,5	6,5	5,9	6,2
400-6	6,8	32,8	33,8	33,3	800-12	0,6	5,6	6,3	6,0
∅	6,4			33,0	∅	0,5			5,9
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 3</b>									
200-1	6,6	38,8	40,6	39,7	600-7	1,4	24,4	23,4	23,9
200-2	6,6	38,1	37,5	37,8	600-8	1,5	23,4	25,3	24,4
200-3	7,6	42,5	39,4	40,9	600-9	1,7	22,5	25,9	24,2
∅	6,9			39,5	∅	1,5			24,2
400-4	2,7	22,9	24,3	23,6	800-10	1,2	21,7	22,3	22,0
400-5	2,9	21,9	22,2	22,0	800-11	1,5	20,0	21,0	20,5
400-6	2,5	20,6	23,1	21,9	800-12	1,2	22,3	18,5	20,4
∅	2,7			22,5	∅	1,3			21,0

Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 4</b>									
200-1	6,6	33,8	34,4	34,1	600-7	4,7	23,5	24,4	24,0
200-2	6,3	33,8	33,1	33,4	600-8	4,5	24,1	24,1	24,1
200-3	5,9	33,8	35,0	34,4	600-9	4,9	24,4	23,1	23,8
∅	6,3			34,0	∅	4,7			24,0
400-4	4,7	25,9	24,4	25,2	800-10	2,9	18,5	19,1	18,8
400-5	4,5	24,4	25,3	24,8	800-11	3,1	18,7	17,8	18,3
400-6	4,3	25,6	25,0	25,3	800-12	2,8	18,9	17,9	18,4
∅	4,5			25,1	∅	2,9			18,5
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 5</b>									
200-1	12,0	50,6	51,9	51,3	600-7	10,0	47,5	46,3	46,9
200-2	11,2	53,8	56,3	55,0	600-8	10,0	49,4	50,0	49,7
200-3	11,1	56,3	55,6	55,9	600-9	10,2	48,1	46,3	47,2
∅	11,4			54,1	∅	10,1			47,9
400-4	11,3	50,0	49,4	49,7	800-10	4,2	19,8	19,4	19,6
400-5	11,2	50,0	51,9	50,9	800-11	4,2	20,5	19,6	20,1
400-6	10,5	53,1	51,3	52,2	800-12	4,8	21,1	20,0	20,6
∅	11,0			50,9	∅	4,4			20,1
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 6</b>									
200-1	10,9	55,6	55,0	55,3	600-7	8,2	46,9	46,3	46,6
200-2	10,6	55,0	56,3	55,6	600-8	7,8	47,5	50,6	49,1
200-3	11,1	48,1	52,5	50,3	600-9	8,0	44,4	38,8	41,6
∅	10,9			53,8	∅	8,0			45,7
400-4	9,1	53,1	53,1	53,1	800-10	3,3	20,6	19,0	19,8
400-5	8,6	51,3	52,5	51,9	800-11	2,7	18,7	19,1	18,9
400-6	9,2	50,0	51,3	50,6	800-12	3,7	18,4	19,1	18,7
∅	9,0			51,9	∅	3,2			19,1

Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 7</b>									
200-1	8,2	51,9	52,5	52,2	600-7	2,2	25,0	23,8	24,4
200-2	8,5	48,8	48,1	48,4	600-8	2,2	25,0	26,6	25,8
200-3	6,6	43,1	44,4	43,8	600-9	1,8	23,1	24,1	23,6
∅	7,8			48,1	∅	2,1			24,6
400-4	4,3	35,9	37,5	36,7	800-10	0,7	9,5	10,4	9,9
400-5	4,2	35,6	36,3	35,9	800-11	0,8	10,9	10,4	10,7
400-6	4,5	31,9	35,0	33,4	800-12	1,0	9,9	9,8	9,8
∅	4,3			35,4	∅	0,8			10,1
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 8</b>									
200-1	10,6	56,3	58,8	57,5	600-7	9,6	44,4	45,0	44,7
200-2	11,2	61,9	63,1	62,5	600-8	8,5	46,3	49,4	47,8
200-3	11,2	67,5	65,0	66,3	600-9	9,2	51,9	53,8	52,8
∅	11,0			62,1	∅	9,1			48,4
400-4	9,3	56,9	53,8	55,3	800-10	3,8	18,9	18,8	18,8
400-5	8,7	57,5	61,3	59,4	800-11	3,2	18,3	20,4	19,3
400-6	9,5	63,1	62,5	62,8	800-12	2,8	20,4	20,4	20,4
∅	9,2			59,2	∅	3,3			19,5
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 9</b>									
200-1	11,2	63,8	65,6	64,7	600-7	3,7	31,3	29,4	30,3
200-2	10,7	64,4	63,1	63,8	600-8	3,6	29,4	31,3	30,3
200-3	10,2	62,5	62,5	62,5	600-9	3,8	30,6	30,0	30,3
∅	10,7			63,7	∅	3,7			30,3
400-4	6,7	53,1	55,0	54,1	800-10	1,5	15,8	15,6	15,7
400-5	7,4	52,5	51,9	52,2	800-11	1,0	15,6	14,9	15,3
400-6	6,2	53,8	49,4	51,6	800-12	1,1	14,0	14,7	14,3
∅	6,8			52,6	∅	1,2			15,1

Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>	Ozn.	R <sub>f</sub>	R <sub>c1</sub>	R <sub>c2</sub>	R <sub>c,pr</sub>
	[MPa]					[MPa]			
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 10</b>									
200-1	12,7	60,0	60,6	60,3	600-7	2,9	34,4	31,9	33,1
200-2	11,7	56,3	63,1	59,7	600-8	3,0	35,0	34,4	34,7
200-3	11,5	61,3	57,5	59,4	600-9	3,1	33,1	36,3	34,7
∅	<b>12,0</b>			<b>59,8</b>	∅	<b>3,0</b>			<b>34,2</b>
400-4	7,0	55,0	55,6	55,3	800-10	1,0	10,9	11,0	11,0
400-5	6,7	50,0	56,3	53,1	800-11	1,0	12,4	12,3	12,3
400-6	6,7	60,0	59,4	59,7	800-12	0,8	10,4	10,6	10,5
∅	<b>6,8</b>			<b>56,0</b>	∅	<b>1,0</b>			<b>11,3</b>

Tab. 10.2: Výsledky měření těles ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou na správkových hmotách před a po teplotním zatížení

Ozn.	ρ	T <sub>uz</sub>	v <sub>L</sub>	E <sub>cu</sub>	f <sub>L</sub>	f <sub>f</sub>	f <sub>t</sub>	f <sub>fR</sub>	E <sub>crL</sub>	E <sub>crf</sub>	G <sub>cr</sub>	v <sub>cr</sub>
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[μs]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]		[-]	
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 1</b>												
P-1	2222	35,7	4,488	44762	13,409	5,512	7,950	5,618	40953	37440	17010	0,20
P-2	2222	35,9	4,465	44295	13,462	5,565	7,844	5,671	41306	38483	16568	0,25
P-3	2242	35,7	4,491	45219	13,621	5,671	7,897	5,724	42689	40888	16986	0,26
∅	<b>2229</b>	<b>35,8</b>	<b>4,481</b>	<b>44759</b>	<b>13,497</b>	<b>5,583</b>	<b>7,897</b>	<b>5,671</b>	<b>41649</b>	<b>38937</b>	<b>16855</b>	<b>0,24</b>
200-1	2099	39,3	4,070	34758	12,243	4,982	7,208	4,982	32241	28955	13202	0,22
200-2	2098	39,8	4,024	33972	12,243	4,876	7,208	4,876	32264	27785	13210	0,22
200-3	2122	39,6	4,048	34771	12,508	5,035	7,261	5,088	34065	30480	13590	0,25
∅	<b>2106</b>	<b>39,6</b>	<b>4,047</b>	<b>34500</b>	<b>12,331</b>	<b>4,964</b>	<b>7,226</b>	<b>4,982</b>	<b>32857</b>	<b>29073</b>	<b>13334</b>	<b>0,23</b>
P-4	2238	36,2	4,399	43296	13,586	5,618	7,897	5,777	41966	38599	16763	0,25
P-5	2221	36,5	4,382	42656	13,197	5,565	7,844	5,565	39517	37571	16511	0,20
P-6	2235	35,9	4,455	44372	13,409	5,671	7,950	5,724	41053	39606	17076	0,20
∅	<b>2231</b>	<b>36,2</b>	<b>4,412</b>	<b>43441</b>	<b>13,397</b>	<b>5,618</b>	<b>7,897</b>	<b>5,689</b>	<b>40845</b>	<b>38592</b>	<b>16783</b>	<b>0,22</b>
400-4	2079	50,1	3,179	21008	9,752	4,134	6,042	4,134	20085	18878	9115	0,10
400-5	2057	50,9	3,142	20305	9,752	4,134	6,042	4,134	19985	18863	9073	0,10



Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 1</b>												
<b>400-6</b>	2074	49,0	3,261	22059	9,752	4,081	6,095	4,081	20147	18610	9313	0,08
$\emptyset$	<b>2070</b>	<b>50,0</b>	<b>3,194</b>	<b>21124</b>	<b>9,752</b>	<b>4,116</b>	<b>6,060</b>	<b>4,116</b>	<b>20072</b>	<b>18784</b>	<b>9167</b>	<b>0,10</b>
<b>P-7</b>	2222	36,4	4,356	42160	13,674	5,836	7,950	5,830	41778	40821	16686	0,25
<b>P-8</b>	2233	35,7	4,452	44242	13,780	5,671	8,003	5,830	42748	39158	17051	0,25
<b>P-9</b>	2241	35,7	4,450	44371	13,421	5,565	7,723	5,565	40667	37497	15893	0,28
$\emptyset$	<b>2232</b>	<b>35,9</b>	<b>4,419</b>	<b>43591</b>	<b>13,625</b>	<b>5,691</b>	<b>7,892</b>	<b>5,742</b>	<b>41731</b>	<b>39159</b>	<b>16543</b>	<b>0,26</b>
<b>600-7</b>	2031	86,1	1,841	6888	5,459	2,385	3,457	2,385	6087	6006	2884	0,06
<b>600-8</b>	2046	84,6	1,877	7213	5,459	2,332	3,457	2,385	6149	5848	2916	0,05
<b>600-9</b>	2050	82,9	1,914	7508	5,512	2,332	3,457	2,385	6276	5799	2913	0,08
$\emptyset$	<b>2042</b>	<b>84,5</b>	<b>1,877</b>	<b>7203</b>	<b>5,477</b>	<b>2,350</b>	<b>3,457</b>	<b>2,385</b>	<b>6171</b>	<b>5884</b>	<b>2904</b>	<b>0,06</b>
<b>P-10</b>	2223	36,5	4,385	42749	13,515	5,724	7,950	5,671	41686	40348	17068	0,22
<b>P-11</b>	2234	36,6	4,377	42805	13,586	5,512	7,897	5,671	42335	38051	16909	0,25
<b>P-12</b>	2220	36,3	4,420	43375	13,515	5,574	7,844	5,618	41757	38819	16652	0,25
$\emptyset$	<b>2226</b>	<b>36,5</b>	<b>4,394</b>	<b>42976</b>	<b>13,539</b>	<b>5,603</b>	<b>7,897</b>	<b>5,653</b>	<b>41926</b>	<b>39073</b>	<b>16876</b>	<b>0,24</b>
<b>800-10</b>	2019	105	1,526	4699	4,081	1,643	2,601	1,643	3451	2926	1659	0,04
<b>800-11</b>	2020	109	1,470	4367	4,028	1,537	2,544	1,537	3363	2577	1586	0,06
<b>800-12</b>	2009	111	1,443	4184	3,857	1,537	2,438	1,431	3071	2567	1453	0,06
$\emptyset$	<b>2016</b>	<b>108</b>	<b>1,480</b>	<b>4417</b>	<b>3,989</b>	<b>1,572</b>	<b>2,528</b>	<b>1,537</b>	<b>3295</b>	<b>2690</b>	<b>1566</b>	<b>0,05</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 2</b>												
<b>P-1</b>	2182	37,5	4,240	39234	12,879	5,406	7,526	5,459	36671	34804	14850	0,24
<b>P-2</b>	2176	37,4	4,249	39292	12,879	5,406	7,526	5,512	36400	34420	14740	0,24
<b>P-3</b>	2196	37,6	4,222	39145	13,091	5,459	7,632	5,565	37869	35384	15256	0,24
$\emptyset$	<b>2185</b>	<b>37,5</b>	<b>4,237</b>	<b>39224</b>	<b>12,950</b>	<b>5,424</b>	<b>7,561</b>	<b>5,512</b>	<b>36980</b>	<b>34869</b>	<b>14948</b>	<b>0,24</b>
<b>200-1</b>	2059	42,0	3,787	29528	11,448	4,876	6,837	4,929	27306	26388	11548	0,18
<b>200-2</b>	2042	42,0	3,780	29179	11,607	4,876	6,837	4,982	27782	26250	11430	0,22
<b>200-3</b>	2067	41,9	3,785	29605	11,713	4,929	6,943	5,035	28568	27001	11897	0,20
$\emptyset$	<b>2056</b>	<b>42,0</b>	<b>3,784</b>	<b>29437</b>	<b>11,589</b>	<b>4,894</b>	<b>6,872</b>	<b>4,982</b>	<b>27885</b>	<b>26546</b>	<b>11625</b>	<b>0,20</b>
<b>P-4</b>	2197	37,8	4,230	39312	12,720	5,300	7,420	5,406	36417	34518	14694	0,24

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 2</b>												
P-5	2197	37,9	4,229	39287	12,932	5,300	7,406	5,300	37749	34853	14672	0,29
P-6	2182	37,9	4,232	39080	12,879	5,353	7,473	5,353	37309	35302	14894	0,25
Ø	<b>2192</b>	<b>37,9</b>	<b>4,230</b>	<b>39226</b>	<b>12,844</b>	<b>5,318</b>	<b>7,433</b>	<b>5,353</b>	<b>37159</b>	<b>34891</b>	<b>14753</b>	<b>0,26</b>
400-4	2049	50,2	3,188	20827	9,275	3,975	5,724	4,081	18060	17676	8156	0,11
400-5	2044	50,1	3,201	20944	9,275	3,975	5,724	4,081	18066	17652	8154	0,11
400-6	2031	49,7	3,228	21160	9,434	4,028	5,830	4,081	18632	18105	8437	0,10
Ø	<b>2041</b>	<b>50,0</b>	<b>3,206</b>	<b>20977</b>	<b>9,328</b>	<b>3,993</b>	<b>5,759</b>	<b>4,081</b>	<b>18253</b>	<b>17811</b>	<b>8249</b>	<b>0,11</b>
P-7	2200	37,4	4,278	40254	13,091	5,512	7,632	5,512	38528	37066	15523	0,24
P-8	2183	37,5	4,263	39673	12,932	5,406	7,579	5,406	37386	35337	15216	0,23
P-9	2192	37,7	4,240	39400	12,773	5,300	7,473	5,300	36609	34263	14841	0,23
Ø	<b>2191</b>	<b>37,5</b>	<b>4,260</b>	<b>39776</b>	<b>12,932</b>	<b>5,406</b>	<b>7,561</b>	<b>5,406</b>	<b>37508</b>	<b>35556</b>	<b>15193</b>	<b>0,23</b>
600-7	2035	96,1	1,663	5625	4,452	1,961	2,825	2,067	4121	4186	1967	0,05
600-8	2020	96,4	1,660	5570	4,452	1,961	2,825	1,961	4101	4162	1957	0,05
600-9	2028	95,0	1,684	5748	4,475	1,934	2,825	1,961	4158	4088	1963	0,06
Ø	<b>2028</b>	<b>95,8</b>	<b>1,669</b>	<b>5648</b>	<b>4,460</b>	<b>1,952</b>	<b>2,825</b>	<b>1,996</b>	<b>4127</b>	<b>4145</b>	<b>1962</b>	<b>0,05</b>
P-10	2189	37,8	4,239	39330	12,826	5,512	7,526	5,565	37044	37231	15103	0,23
P-11	2192	37,6	4,269	39947	12,932	5,353	7,526	5,353	37779	35385	15171	0,25
P-12	2184	37,5	4,282	40046	12,826	5,300	7,473	5,353	37056	34496	14911	0,24
Ø	<b>2188</b>	<b>37,6</b>	<b>4,263</b>	<b>39775</b>	<b>12,861</b>	<b>5,388</b>	<b>7,508</b>	<b>5,424</b>	<b>37293</b>	<b>35704</b>	<b>15062</b>	<b>0,24</b>
800-10	1973	115	1,394	3835	3,816	1,590	2,438	1,643	2956	2693	1429	0,04
800-11	1976	114	1,404	3893	3,869	1,590	2,438	1,590	3045	2717	1434	0,06
800-12	1975	114	1,410	3925	3,816	1,537	2,438	1,590	2967	2530	1436	0,03
Ø	<b>1974</b>	<b>114</b>	<b>1,403</b>	<b>3885</b>	<b>3,834</b>	<b>1,572</b>	<b>2,438</b>	<b>1,608</b>	<b>2990</b>	<b>2647</b>	<b>1433</b>	<b>0,04</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 3</b>												
P-1	2265	35,1	4,582	47549	13,621	5,830	8,215	5,830	43392	42465	18664	0,16
P-2	2275	35,1	4,572	47541	13,727	5,830	8,215	5,830	44146	42151	18676	0,18
P-3	2275	35,1	4,570	47515	14,098	5,883	8,321	5,883	46540	43171	19160	0,22
Ø	<b>2272</b>	<b>35,1</b>	<b>4,574</b>	<b>47535</b>	<b>13,815</b>	<b>5,848</b>	<b>8,250</b>	<b>5,848</b>	<b>44692</b>	<b>42595</b>	<b>18833</b>	<b>0,19</b>

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 3</b>												
<b>200-1</b>	2166	40,7	3,943	33680	11,766	4,876	7,049	4,982	30945	28455	13134	0,19
<b>200-2</b>	2183	41,1	3,902	33235	11,872	4,876	6,996	4,876	31702	28698	13012	0,22
<b>200-3</b>	2185	40,8	3,935	33838	11,713	4,876	6,996	5,035	30861	28397	13013	0,17
<b>Ø</b>	<b>2178</b>	<b>40,9</b>	<b>3,927</b>	<b>33584</b>	<b>11,784</b>	<b>4,876</b>	<b>7,014</b>	<b>4,964</b>	<b>31169</b>	<b>28516</b>	<b>13053</b>	<b>0,19</b>
<b>P-4</b>	2253	35,5	4,515	45940	13,992	5,883	8,268	5,936	45423	42480	18719	0,21
<b>P-5</b>	2245	35,1	4,572	46944	13,674	5,830	8,056	5,883	43256	42181	17753	0,22
<b>P-6</b>	2249	35,4	4,538	46317	13,409	5,777	8,056	5,777	41665	41232	17782	0,17
<b>Ø</b>	<b>2249</b>	<b>35,3</b>	<b>4,542</b>	<b>46400</b>	<b>13,692</b>	<b>5,830</b>	<b>8,127</b>	<b>5,865</b>	<b>43448</b>	<b>41965</b>	<b>18085</b>	<b>0,20</b>
<b>400-4</b>	2075	72,0	2,227	10294	6,784	2,968	4,293	3,074	9833	9668	4647	0,06
<b>400-5</b>	2064	73,5	2,183	9830	6,784	2,915	4,293	3,021	9784	9401	4633	0,06
<b>400-6</b>	2070	73,9	2,171	9754	6,784	2,915	4,293	2,915	9815	9454	4647	0,06
<b>Ø</b>	<b>2070</b>	<b>73,2</b>	<b>2,194</b>	<b>9959</b>	<b>6,784</b>	<b>2,933</b>	<b>4,293</b>	<b>3,003</b>	<b>9811</b>	<b>9508</b>	<b>4643</b>	<b>0,06</b>
<b>P-7</b>	2267	35,3	4,574	47439	13,553	5,830	8,162	5,883	43432	42756	18609	0,17
<b>P-8</b>	2264	35,3	4,570	47284	13,568	5,724	8,109	5,724	43387	41532	18318	0,18
<b>P-9</b>	2266	35,3	4,564	47201	13,350	5,724	8,056	5,777	42009	41319	18085	0,16
<b>Ø</b>	<b>2266</b>	<b>35,3</b>	<b>4,569</b>	<b>47308</b>	<b>13,490</b>	<b>5,759</b>	<b>8,109</b>	<b>5,795</b>	<b>42943</b>	<b>41869</b>	<b>18337</b>	<b>0,17</b>
<b>600-7</b>	2068	94,1	1,716	6088	4,976	2,226	3,152	2,226	5339	5566	2531	0,06
<b>600-8</b>	2067	95,2	1,695	5941	4,951	2,226	3,139	2,226	5275	5596	2507	0,05
<b>600-9</b>	2071	96,6	1,669	5766	4,951	2,120	3,139	2,226	5279	5074	2509	0,05
<b>Ø</b>	<b>2069</b>	<b>95,3</b>	<b>1,693</b>	<b>5931</b>	<b>4,959</b>	<b>2,191</b>	<b>3,143</b>	<b>2,226</b>	<b>5298</b>	<b>5412</b>	<b>2515</b>	<b>0,05</b>
<b>P-10</b>	2266	35,1	4,573	47386	13,727	5,883	8,162	5,883	44086	43437	18430	0,20
<b>P-11</b>	2256	35,4	4,533	46364	13,409	5,724	8,003	5,777	41865	40201	17601	0,19
<b>P-12</b>	2261	35,4	4,544	46669	13,409	5,777	8,056	5,777	41982	41448	17907	0,17
<b>Ø</b>	<b>2261</b>	<b>35,3</b>	<b>4,550</b>	<b>46806</b>	<b>13,515</b>	<b>5,795</b>	<b>8,074</b>	<b>5,812</b>	<b>42644</b>	<b>41696</b>	<b>17979</b>	<b>0,19</b>
<b>800-10</b>	2065	119	1,355	3789	3,704	1,643	2,357	1,643	2929	3050	1405	0,04
<b>800-11</b>	2051	119	1,353	3757	3,704	1,649	2,357	1,696	2904	3042	1396	0,04
<b>800-12</b>	2051	125	1,286	3391	3,869	1,643	2,432	1,643	3174	3036	1486	0,07
<b>Ø</b>	<b>2056</b>	<b>121</b>	<b>1,331</b>	<b>3645</b>	<b>3,759</b>	<b>1,645</b>	<b>2,382</b>	<b>1,661</b>	<b>3002</b>	<b>3043</b>	<b>1429</b>	<b>0,05</b>

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 4</b>												
P-1	2397	35,9	4,470	47887	12,349	5,353	7,314	5,406	37577	37988	15650	0,20
P-2	2412	35,9	4,465	48093	12,296	5,300	7,261	5,406	37485	37734	15507	0,21
P-3	2404	35,9	4,472	48086	12,402	5,300	7,261	5,300	38058	37841	15497	0,23
Ø	<b>2405</b>	<b>35,9</b>	<b>4,469</b>	<b>48022</b>	<b>12,349</b>	<b>5,318</b>	<b>7,279</b>	<b>5,371</b>	<b>37707</b>	<b>37854</b>	<b>15552</b>	<b>0,21</b>
200-1	2288	41,3	3,881	34475	9,858	4,240	5,883	4,346	22857	22704	9666	0,18
200-2	2300	41,3	3,881	34631	9,858	4,240	5,830	4,293	22961	22987	9526	0,21
200-3	2291	41,2	3,890	34657	9,953	4,293	5,936	4,293	23348	23445	9865	0,18
Ø	<b>2293</b>	<b>41,3</b>	<b>3,884</b>	<b>34587</b>	<b>9,890</b>	<b>4,258</b>	<b>5,883</b>	<b>4,311</b>	<b>23055</b>	<b>23045</b>	<b>9686</b>	<b>0,19</b>
P-4	2415	36,0	4,448	47792	12,349	5,300	7,314	5,353	37852	37778	15752	0,20
P-5	2401	36,1	4,435	47228	12,349	5,247	7,261	5,353	37613	36912	15430	0,22
P-6	2406	36,0	4,454	47723	12,402	5,300	7,314	5,353	37981	37553	15679	0,21
Ø	<b>2407</b>	<b>36,0</b>	<b>4,446</b>	<b>47581</b>	<b>12,367</b>	<b>5,282</b>	<b>7,296</b>	<b>5,353</b>	<b>37815</b>	<b>37414</b>	<b>15620</b>	<b>0,21</b>
400-4	2209	65,0	2,467	13447	7,367	3,127	4,399	3,127	12321	11985	5212	0,18
400-5	2197	65,0	2,465	13356	7,261	3,074	4,293	3,074	11900	11566	4936	0,21
400-6	2202	65,4	2,449	13213	7,261	3,074	4,293	3,127	11918	11552	4945	0,21
Ø	<b>2203</b>	<b>65,1</b>	<b>2,461</b>	<b>13339</b>	<b>7,296</b>	<b>3,092</b>	<b>4,328</b>	<b>3,109</b>	<b>12047</b>	<b>11701</b>	<b>5031</b>	<b>0,20</b>
P-7	2415	35,7	4,480	48471	12,614	5,459	7,473	5,565	39390	39221	16410	0,20
P-8	2407	35,8	4,474	48175	12,614	5,406	7,420	5,120	39223	37653	16075	0,22
P-9	2412	35,9	4,457	47914	12,561	5,353	7,367	5,512	38900	37608	15869	0,23
Ø	<b>2411</b>	<b>35,8</b>	<b>4,470</b>	<b>48187</b>	<b>12,596</b>	<b>5,406</b>	<b>7,420</b>	<b>5,399</b>	<b>39171</b>	<b>38161</b>	<b>16118</b>	<b>0,22</b>
600-7	2195	71,9	2,226	10871	6,519	2,756	3,869	2,862	9562	9078	3998	0,20
600-8	2179	73,5	2,178	10337	6,460	2,756	3,869	2,809	9313	8787	3957	0,18
600-9	2184	73,5	2,175	10333	6,438	2,756	3,816	2,809	9255	8985	3856	0,20
Ø	<b>2186</b>	<b>73,0</b>	<b>2,193</b>	<b>10514</b>	<b>6,472</b>	<b>2,756</b>	<b>3,851</b>	<b>2,827</b>	<b>9377</b>	<b>8950</b>	<b>3937</b>	<b>0,19</b>
P-10	2401	35,7	4,457	47699	12,402	5,300	7,261	5,353	37331	36635	15179	0,23
P-11	2401	35,8	4,433	47196	12,349	5,353	7,314	5,459	36966	37137	15400	0,20
P-12	2415	35,7	4,446	47727	12,561	5,406	7,420	5,512	38389	37935	15880	0,21
Ø	<b>2406</b>	<b>35,7</b>	<b>4,445</b>	<b>47541</b>	<b>12,437</b>	<b>5,353</b>	<b>7,332</b>	<b>5,441</b>	<b>37562</b>	<b>37236</b>	<b>15486</b>	<b>0,21</b>

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 4</b>												
800-10	2150	92,0	1,727	6414	4,829	2,120	2,968	2,120	5068	5143	2271	0,12
800-11	2138	94,7	1,677	6017	4,770	2,120	2,968	2,120	4907	5066	2256	0,09
800-12	2155	92,8	1,710	6301	4,770	2,173	2,968	2,173	4939	5348	2267	0,09
Ø	<b>2148</b>	<b>93,2</b>	<b>1,705</b>	<b>6244</b>	<b>4,790</b>	<b>2,138</b>	<b>2,968</b>	<b>2,138</b>	<b>4971</b>	<b>5186</b>	<b>2265</b>	<b>0,10</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 5</b>												
P-1	2247	41,0	3,913	34406	11,130	4,823	6,572	4,823	28705	29199	11879	0,21
P-2	2240	41,0	3,914	34306	11,183	4,929	6,678	4,929	28895	30226	12244	0,18
P-3	2249	41,0	3,916	34477	11,342	4,823	6,625	4,823	29870	29194	12092	0,24
Ø	<b>2245</b>	<b>41,0</b>	<b>3,914</b>	<b>34396</b>	<b>11,218</b>	<b>4,858</b>	<b>6,625</b>	<b>4,858</b>	<b>29157</b>	<b>29540</b>	<b>12072</b>	<b>0,21</b>
200-1	2086	45,0	3,571	26596	10,388	4,399	6,148	4,452	23212	22526	9651	0,20
200-2	2061	44,7	3,590	26559	10,456	4,505	6,307	4,558	23242	23134	10049	0,16
200-3	2060	44,9	3,581	26416	10,229	4,399	6,095	4,452	22256	22056	9379	0,19
Ø	<b>2069</b>	<b>44,9</b>	<b>3,581</b>	<b>26524</b>	<b>10,358</b>	<b>4,434</b>	<b>6,183</b>	<b>4,487</b>	<b>22903</b>	<b>22572</b>	<b>9693</b>	<b>0,18</b>
P-4	2248	40,0	4,017	36267	11,024	4,717	6,572	4,770	28161	27838	11853	0,19
P-5	2271	39,9	4,015	36610	11,130	4,876	6,678	4,929	28928	29768	12335	0,17
P-6	2277	40,0	4,013	36672	11,501	4,929	6,731	4,929	30924	30823	12572	0,23
Ø	<b>2265</b>	<b>40,0</b>	<b>4,015</b>	<b>36516</b>	<b>11,218</b>	<b>4,841</b>	<b>6,660</b>	<b>4,876</b>	<b>29338</b>	<b>29477</b>	<b>12254</b>	<b>0,20</b>
400-4	2030	47,2	3,403	23516	9,858	4,187	5,830	4,293	20336	19878	8424	0,21
400-5	2027	47,8	3,357	22843	9,752	4,187	5,830	4,187	19826	19626	8393	0,18
400-6	2029	47,1	3,403	23495	10,017	4,240	5,936	4,293	20949	20277	8731	0,20
Ø	<b>2029</b>	<b>47,4</b>	<b>3,388</b>	<b>23285</b>	<b>9,876</b>	<b>4,205</b>	<b>5,865</b>	<b>4,258</b>	<b>20371</b>	<b>19927</b>	<b>8516</b>	<b>0,20</b>
P-7	2255	39,9	4,022	36469	11,607	4,876	6,678	4,982	31339	30420	12297	0,27
P-8	2272	39,8	4,029	36879	11,395	4,929	6,784	4,982	30341	30748	12768	0,19
P-9	2274	39,4	4,075	37752	11,660	4,876	6,678	4,929	31870	30768	12416	0,28
Ø	<b>2267</b>	<b>39,7</b>	<b>4,042</b>	<b>37033</b>	<b>11,554</b>	<b>4,894</b>	<b>6,713</b>	<b>4,964</b>	<b>31184</b>	<b>30645</b>	<b>12493</b>	<b>0,25</b>
600-7	2000	52,0	3,090	19098	9,268	3,922	5,512	3,922	17720	17197	7429	0,19
600-8	1989	52,1	3,076	18817	9,287	3,922	5,512	4,028	17644	17066	7379	0,20
600-9	1986	51,7	3,107	19174	9,268	3,922	5,512	4,081	17586	17094	7388	0,19

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 5</b>												
Ø	<b>1991</b>	<b>51,9</b>	<b>3,091</b>	<b>19030</b>	<b>9,274</b>	<b>3,922</b>	<b>5,512</b>	<b>4,010</b>	<b>17650</b>	<b>17119</b>	<b>7399</b>	<b>0,19</b>
P-10	2238	40,0	3,979	35429	11,501	4,929	6,678	4,929	29942	29579	11968	0,25
P-11	2260	39,0	4,078	37596	11,448	4,929	6,731	4,982	30028	29970	12327	0,22
P-12	2266	39,1	4,078	37682	11,713	4,982	6,784	5,035	31561	30913	12563	0,26
Ø	<b>2255</b>	<b>39,4</b>	<b>4,045</b>	<b>36903</b>	<b>11,554</b>	<b>4,947</b>	<b>6,731</b>	<b>4,982</b>	<b>30510</b>	<b>30154</b>	<b>12286</b>	<b>0,24</b>
800-10	1945	68,2	2,333	10584	7,102	3,021	4,240	3,127	9922	9535	4193	0,18
800-11	1928	66,7	2,387	10984	7,102	3,021	4,240	3,021	9859	9540	4173	0,18
800-12	1932	67,6	2,358	10739	7,102	3,021	4,240	3,021	9892	9559	4184	0,18
Ø	<b>1935</b>	<b>67,5</b>	<b>2,359</b>	<b>10769</b>	<b>7,102</b>	<b>3,021</b>	<b>4,240</b>	<b>3,056</b>	<b>9891</b>	<b>9545</b>	<b>4183</b>	<b>0,18</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 6</b>												
P-1	2337	37,2	4,310	43410	12,234	5,141	7,102	5,247	35900	34402	14362	0,25
P-2	2325	37,6	4,252	42042	12,031	5,088	6,996	5,247	34474	33518	13841	0,25
P-3	2321	37,6	4,257	42060	11,713	5,088	6,996	5,141	32689	33185	13847	0,18
Ø	<b>2328</b>	<b>37,5</b>	<b>4,273</b>	<b>42504</b>	<b>11,993</b>	<b>5,106</b>	<b>7,031</b>	<b>5,212</b>	<b>34354</b>	<b>33702</b>	<b>14017</b>	<b>0,23</b>
200-1	2187	41,3	3,875	32841	11,024	4,770	6,572	4,823	27274	27380	11508	0,19
200-2	2180	42,0	3,811	31652	11,024	4,717	6,466	4,770	27141	26923	11087	0,22
200-3	2185	42,0	3,817	31835	11,024	4,664	6,466	4,664	27255	26365	11130	0,22
Ø	<b>2184</b>	<b>41,8</b>	<b>3,834</b>	<b>32109</b>	<b>11,024</b>	<b>4,717</b>	<b>6,501</b>	<b>4,752</b>	<b>27224</b>	<b>26889</b>	<b>11242</b>	<b>0,21</b>
P-4	2331	36,9	4,322	43541	12,561	5,300	7,261	5,406	37484	35941	14875	0,26
P-5	2333	36,9	4,311	43358	12,349	5,300	7,261	5,459	36077	35394	14808	0,22
P-6	2328	37,1	4,294	42917	12,190	5,141	7,155	5,300	35174	33702	14370	0,22
Ø	<b>2331</b>	<b>37,0</b>	<b>4,309</b>	<b>43272</b>	<b>12,367</b>	<b>5,247</b>	<b>7,226</b>	<b>5,388</b>	<b>36245</b>	<b>35012</b>	<b>14684</b>	<b>0,23</b>
400-4	2134	46,8	3,408	24787	9,987	4,240	5,936	4,346	21690	20791	9100	0,19
400-5	2132	47,2	3,373	24257	9,987	4,240	5,883	4,346	21560	20680	8882	0,21
400-6	2145	47,1	3,385	24586	9,959	4,240	5,883	4,364	21638	21068	8954	0,21
Ø	<b>2137</b>	<b>47,0</b>	<b>3,389</b>	<b>24543</b>	<b>9,978</b>	<b>4,240</b>	<b>5,901</b>	<b>4,352</b>	<b>21629</b>	<b>20846</b>	<b>8979</b>	<b>0,21</b>
P-7	2356	37,2	4,309	43742	12,243	5,194	7,155	5,247	36358	35813	14762	0,23
P-8	2353	37,3	4,300	43517	12,349	5,247	7,208	5,247	36955	36466	14966	0,24

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 6</b>												
P-9	2328	37,6	4,264	42316	12,243	5,141	7,155	5,247	35869	34358	14541	0,23
Ø	<b>2346</b>	<b>37,4</b>	<b>4,291</b>	<b>43192</b>	<b>12,278</b>	<b>5,194</b>	<b>7,173</b>	<b>5,247</b>	<b>36394</b>	<b>35546</b>	<b>14757</b>	<b>0,23</b>
600-7	2121	53,5	2,997	19052	8,854	3,816	5,247	3,816	17120	17298	7148	0,20
600-8	2121	55,0	2,914	18009	8,894	3,816	5,353	3,816	17237	17111	7425	0,16
600-9	2120	55,2	2,906	17902	8,876	3,816	5,353	3,869	17169	17003	7412	0,16
Ø	<b>2121</b>	<b>54,6</b>	<b>2,939</b>	<b>18321</b>	<b>8,875</b>	<b>3,816</b>	<b>5,318</b>	<b>3,834</b>	<b>17176</b>	<b>17137</b>	<b>7328</b>	<b>0,17</b>
P-10	2338	37,0	4,316	43559	12,614	5,300	7,261	5,353	38021	36079	14955	0,27
P-11	2347	37,1	4,311	43624	12,402	5,300	7,261	5,300	36941	35502	15001	0,23
P-12	2344	37,6	4,252	42364	12,084	5,194	7,102	5,353	34921	34286	14316	0,22
Ø	<b>2343</b>	<b>37,2</b>	<b>4,293</b>	<b>43182</b>	<b>12,367</b>	<b>5,265</b>	<b>7,208</b>	<b>5,335</b>	<b>36628</b>	<b>35289</b>	<b>14757</b>	<b>0,24</b>
800-10	2048	69,8	2,291	10750	6,698	2,915	4,187	2,915	9390	9219	4355	0,08
800-11	2062	70,0	2,285	10761	6,678	2,862	4,134	2,915	9406	8870	4271	0,10
800-12	2081	71,0	2,249	10522	6,625	2,862	4,081	2,915	9321	9056	4198	0,11
Ø	<b>2064</b>	<b>70,3</b>	<b>2,275</b>	<b>10678</b>	<b>6,667</b>	<b>2,880</b>	<b>4,134</b>	<b>2,915</b>	<b>9372</b>	<b>9048</b>	<b>4275</b>	<b>0,10</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 7</b>												
P-1	2181	39,7	4,031	35445	11,925	5,088	6,996	5,088	31777	30748	12961	0,23
P-2	2176	39,8	4,024	35233	11,660	4,982	6,890	5,088	30299	29220	12534	0,21
P-3	2143	40,2	3,981	33975	11,501	4,770	6,731	4,770	29050	26432	11763	0,24
Ø	<b>2167</b>	<b>39,9</b>	<b>4,012</b>	<b>34885</b>	<b>11,695</b>	<b>4,947</b>	<b>6,872</b>	<b>4,982</b>	<b>30375</b>	<b>28800</b>	<b>12419</b>	<b>0,22</b>
200-1	2041	44,1	3,632	26913	10,918	4,558	6,360	4,664	24919	23150	10019	0,24
200-2	2048	44,4	3,601	26564	10,600	4,558	6,307	4,664	23572	22952	9886	0,19
200-3	2029	45,0	3,556	25655	10,388	4,293	6,095	4,293	22425	20231	9127	0,23
Ø	<b>2039</b>	<b>44,5</b>	<b>3,596</b>	<b>26377</b>	<b>10,635</b>	<b>4,470</b>	<b>6,254</b>	<b>4,540</b>	<b>23638</b>	<b>22111</b>	<b>9677</b>	<b>0,22</b>
P-4	2177	39,9	3,986	34582	11,925	5,088	6,943	5,088	31264	30513	12583	0,24
P-5	2178	39,9	3,982	34528	11,872	4,929	6,837	5,088	30990	29081	12211	0,27
P-6	2152	40,4	3,938	33373	11,554	4,876	6,784	4,876	29038	27786	11878	0,22
Ø	<b>2169</b>	<b>40,0</b>	<b>3,968</b>	<b>34161</b>	<b>11,784</b>	<b>4,964</b>	<b>6,855</b>	<b>5,017</b>	<b>30430</b>	<b>29127</b>	<b>12224</b>	<b>0,25</b>
400-4	1995	58,0	2,740	14970	8,215	3,392	4,876	3,498	13594	12317	5686	0,20

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 7</b>												
<b>400-5</b>	1991	58,2	2,728	14816	8,003	3,286	4,717	3,286	12871	11690	5312	0,21
<b>400-6</b>	1994	59,5	2,670	14216	7,897	3,233	4,717	3,233	12568	11232	5321	0,18
<b>Ø</b>	<b>1993</b>	<b>58,6</b>	<b>2,713</b>	<b>14667</b>	<b>8,038</b>	<b>3,304</b>	<b>4,770</b>	<b>3,339</b>	<b>13011</b>	<b>11746</b>	<b>5440</b>	<b>0,20</b>
<b>P-7</b>	2178	39,8	4,029	35348	11,925	4,982	6,943	4,982	31903	30343	12824	0,24
<b>P-8</b>	2180	39,8	4,034	35477	11,872	4,982	6,890	5,088	31683	30455	12675	0,25
<b>P-9</b>	2144	39,9	4,025	34742	11,554	4,876	6,784	4,823	29534	28605	12073	0,22
<b>Ø</b>	<b>2167</b>	<b>39,8</b>	<b>4,030</b>	<b>35189</b>	<b>11,784</b>	<b>4,947</b>	<b>6,872</b>	<b>4,964</b>	<b>31040</b>	<b>29801</b>	<b>12524</b>	<b>0,24</b>
<b>600-7</b>	1969	114	1,408	3902	3,922	1,696	2,450	1,696	3120	3085	1444	0,08
<b>600-8</b>	1971	110	1,461	4204	3,975	1,749	2,463	1,749	3211	3299	1464	0,10
<b>600-9</b>	1967	112	1,436	4056	3,922	1,696	2,450	1,696	3122	3092	1444	0,08
<b>Ø</b>	<b>1969</b>	<b>112</b>	<b>1,435</b>	<b>4054</b>	<b>3,940</b>	<b>1,714</b>	<b>2,454</b>	<b>1,714</b>	<b>3151</b>	<b>3158</b>	<b>1451</b>	<b>0,09</b>
<b>P-10</b>	2139	40,2	3,989	34026	11,660	4,929	6,784	5,035	29953	29183	12044	0,24
<b>P-11</b>	2153	40,1	3,998	34424	11,607	4,876	6,837	4,876	29879	28695	12285	0,22
<b>P-12</b>	2144	40,7	3,945	33369	11,554	4,823	6,731	4,929	29457	27981	11861	0,24
<b>Ø</b>	<b>2145</b>	<b>40,3</b>	<b>3,978</b>	<b>33940</b>	<b>11,607</b>	<b>4,876</b>	<b>6,784</b>	<b>4,947</b>	<b>29763</b>	<b>28620</b>	<b>12063</b>	<b>0,23</b>
<b>800-10</b>	1889	166	0,967	1767	2,703	1,166	1,698	1,166	1425	1401	668	0,08
<b>800-11</b>	1903	167	0,962	1763	2,703	1,113	1,698	1,166	1436	1285	671	0,07
<b>800-12</b>	1916	166	0,971	1806	2,869	1,219	1,795	1,219	1631	1562	757	0,08
<b>Ø</b>	<b>1903</b>	<b>166</b>	<b>0,967</b>	<b>1779</b>	<b>2,758</b>	<b>1,166</b>	<b>1,730</b>	<b>1,184</b>	<b>1497</b>	<b>1416</b>	<b>699</b>	<b>0,07</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 8</b>												
<b>P-1</b>	2415	37,3	4,311	44879	11,925	5,141	7,049	5,247	35453	35811	14717	0,20
<b>P-2</b>	2414	36,8	4,367	46030	12,137	5,247	7,261	5,300	36730	37000	15611	0,18
<b>P-3</b>	2440	36,8	4,371	46617	12,402	5,300	7,261	5,300	38770	38667	15772	0,23
<b>Ø</b>	<b>2423</b>	<b>36,9</b>	<b>4,350</b>	<b>45842</b>	<b>12,155</b>	<b>5,229</b>	<b>7,190</b>	<b>5,282</b>	<b>36984</b>	<b>37160</b>	<b>15367</b>	<b>0,20</b>
<b>200-1</b>	2268	40,9	3,931	35034	10,706	4,664	6,466	4,717	26825	27401	11624	0,15
<b>200-2</b>	2252	40,2	4,001	36035	11,183	4,823	6,731	4,823	29083	29091	12512	0,16
<b>200-3</b>	2268	40,1	4,004	36369	11,313	4,823	6,784	4,823	29989	29439	12799	0,17
<b>Ø</b>	<b>2263</b>	<b>40,4</b>	<b>3,978</b>	<b>35813</b>	<b>11,067</b>	<b>4,770</b>	<b>6,660</b>	<b>4,788</b>	<b>28632</b>	<b>28644</b>	<b>12312</b>	<b>0,16</b>







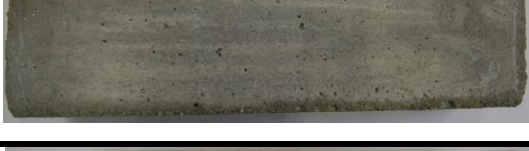

Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 8</b>												
P-4	2395	37,5	4,286	43991	11,819	5,088	7,049	5,194	34566	34585	14579	0,19
P-5	2421	37,4	4,297	44697	11,766	5,088	7,049	5,141	34683	35001	14755	0,18
P-6	2431	37,1	4,326	45489	12,349	5,247	7,208	5,353	38192	37492	15431	0,24
Ø	<b>2415</b>	<b>37,3</b>	<b>4,303</b>	<b>44726</b>	<b>11,978</b>	<b>5,141</b>	<b>7,102</b>	<b>5,229</b>	<b>35814</b>	<b>35693</b>	<b>14922</b>	<b>0,20</b>
400-4	2225	46,6	3,447	26433	9,858	4,187	5,989	4,399	22345	21591	9779	0,14
400-5	2227	45,9	3,502	27314	9,805	4,187	5,883	4,293	22162	21795	9456	0,17
400-6	2223	45,7	3,515	27465	9,858	4,240	5,936	4,240	22265	22091	9574	0,16
Ø	<b>2225</b>	<b>46,1</b>	<b>3,488</b>	<b>27071</b>	<b>9,840</b>	<b>4,205</b>	<b>5,936</b>	<b>4,311</b>	<b>22257</b>	<b>21826</b>	<b>9603</b>	<b>0,16</b>
P-7	2406	37,6	4,272	43911	12,190	5,141	7,102	5,194	36833	35747	14834	0,24
P-8	2431	37,3	4,305	45053	12,137	5,194	7,155	5,247	36929	36673	15226	0,21
P-9	2440	36,8	4,358	46338	12,296	5,300	7,261	5,353	37950	38296	15709	0,21
Ø	<b>2425</b>	<b>37,2</b>	<b>4,312</b>	<b>45100</b>	<b>12,208</b>	<b>5,212</b>	<b>7,173</b>	<b>5,265</b>	<b>37237</b>	<b>36906</b>	<b>15257</b>	<b>0,22</b>
600-7	2215	50,1	3,206	22756	9,116	3,975	5,618	3,975	18961	19200	8544	0,11
600-8	2216	50,8	3,163	22172	9,116	3,922	5,618	3,975	18995	18707	8559	0,11
600-9	2216	50,6	3,167	22237	9,275	3,975	5,671	4,034	19617	19280	8705	0,13
Ø	<b>2216</b>	<b>50,5</b>	<b>3,179</b>	<b>22388</b>	<b>9,169</b>	<b>3,957</b>	<b>5,636</b>	<b>3,995</b>	<b>19191</b>	<b>19062</b>	<b>8603</b>	<b>0,12</b>
P-10	2418	37,5	4,278	44265	12,137	5,194	7,155	5,300	36678	36656	15118	0,21
P-11	2437	36,9	4,351	46142	12,243	5,247	7,261	5,353	37669	37590	15718	0,20
P-12	2439	37,0	4,342	45983	12,243	5,247	7,208	5,247	37675	37780	15483	0,22
Ø	<b>2431</b>	<b>37,1</b>	<b>4,324</b>	<b>45464</b>	<b>12,208</b>	<b>5,229</b>	<b>7,208</b>	<b>5,300</b>	<b>37341</b>	<b>37342</b>	<b>15439</b>	<b>0,21</b>
800-10	2187	64,0	2,507	13742	7,102	3,021	4,346	3,021	11356	11035	5043	0,13
800-11	2173	64,0	2,510	13693	7,102	3,021	4,346	3,074	11304	10965	5022	0,13
800-12	2184	64,2	2,500	13649	7,161	3,074	4,358	3,074	11539	11444	5067	0,14
Ø	<b>2181</b>	<b>64,1</b>	<b>2,506</b>	<b>13695</b>	<b>7,122</b>	<b>3,039</b>	<b>4,350</b>	<b>3,056</b>	<b>11400</b>	<b>11148</b>	<b>5044</b>	<b>0,13</b>
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 9</b>												
P-1	2142	37,3	4,311	39806	12,667	5,353	7,473	5,459	35481	34371	14647	0,21
P-2	2125	37,3	4,305	39386	12,667	5,353	7,420	5,406	35106	34051	14302	0,23
P-3	2123	37,4	4,296	39180	12,402	5,300	7,367	5,300	33657	33340	14087	0,20












Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 9</b>												
$\emptyset$	<b>2130</b>	<b>37,3</b>	<b>4,304</b>	<b>39457</b>	<b>12,579</b>	<b>5,335</b>	<b>7,420</b>	<b>5,388</b>	<b>34748</b>	<b>33921</b>	<b>14345</b>	<b>0,21</b>
<b>200-1</b>	1966	41,4	3,877	29552	11,342	4,770	6,678	4,770	26105	25066	10734	0,22
<b>200-2</b>	1946	41,3	3,880	29293	11,036	4,717	6,519	4,717	24380	24093	10099	0,21
<b>200-3</b>	1947	41,4	3,881	29323	11,130	4,664	6,572	4,717	24863	23735	10283	0,21
$\emptyset$	<b>1953</b>	<b>41,4</b>	<b>3,879</b>	<b>29389</b>	<b>11,169</b>	<b>4,717</b>	<b>6,590</b>	<b>4,735</b>	<b>25116</b>	<b>24298</b>	<b>10372</b>	<b>0,21</b>
<b>P-4</b>	2127	37,6	4,274	38857	12,296	5,353	7,367	5,353	33164	34186	14141	0,17
<b>P-5</b>	2114	37,6	4,271	38577	12,508	5,353	7,367	5,300	34070	33803	14021	0,22
<b>P-6</b>	2123	37,5	4,284	38946	12,508	5,300	7,420	5,300	34213	33249	14287	0,20
$\emptyset$	<b>2121</b>	<b>37,5</b>	<b>4,276</b>	<b>38794</b>	<b>12,437</b>	<b>5,335</b>	<b>7,385</b>	<b>5,318</b>	<b>33816</b>	<b>33746</b>	<b>14150</b>	<b>0,20</b>
<b>400-4</b>	1916	49,5	3,242	20132	8,692	3,710	5,247	3,816	14928	14745	6462	0,16
<b>400-5</b>	1897	49,1	3,268	20259	8,480	3,640	5,141	3,710	14048	13846	6125	0,15
<b>400-6</b>	1907	48,5	3,307	20857	8,643	3,710	5,247	3,710	14680	14495	6420	0,14
$\emptyset$	<b>1907</b>	<b>49,1</b>	<b>3,272</b>	<b>20416</b>	<b>8,605</b>	<b>3,687</b>	<b>5,212</b>	<b>3,745</b>	<b>14552</b>	<b>14362</b>	<b>6336</b>	<b>0,15</b>
<b>P-7</b>	2123	37,6	4,293	39131	12,402	5,247	7,367	5,300	34096	33537	14276	0,19
<b>P-8</b>	2138	37,4	4,320	39909	12,508	5,406	7,420	5,459	34872	35507	14533	0,20
<b>P-9</b>	2139	37,4	4,319	39899	12,296	5,300	7,367	5,300	33692	34225	14362	0,17
$\emptyset$	<b>2133</b>	<b>37,5</b>	<b>4,311</b>	<b>39646</b>	<b>12,402</b>	<b>5,318</b>	<b>7,385</b>	<b>5,353</b>	<b>34220</b>	<b>34423</b>	<b>14390</b>	<b>0,19</b>
<b>600-7</b>	1883	77,1	2,095	8268	5,641	2,385	3,351	2,385	6256	6145	2619	0,19
<b>600-8</b>	1886	77,2	2,090	8238	5,623	2,385	3,339	2,385	6215	6092	2595	0,20
<b>600-9</b>	1885	77,0	2,096	8280	5,623	2,385	3,351	2,385	6209	6122	2619	0,19
$\emptyset$	<b>1884</b>	<b>77,1</b>	<b>2,094</b>	<b>8262</b>	<b>5,629</b>	<b>2,385</b>	<b>3,347</b>	<b>2,385</b>	<b>6227</b>	<b>6119</b>	<b>2611</b>	<b>0,19</b>
<b>P-10</b>	2143	37,4	4,316	39915	12,561	5,353	7,420	5,459	35173	34762	14547	0,21
<b>P-11</b>	2135	37,5	4,310	39668	12,667	5,353	7,473	5,353	35802	35226	14785	0,21
<b>P-12</b>	2130	37,4	4,318	39716	12,508	5,353	7,420	5,406	34765	34703	14510	0,20
$\emptyset$	<b>2136</b>	<b>37,4</b>	<b>4,315</b>	<b>39766</b>	<b>12,579</b>	<b>5,353</b>	<b>7,438</b>	<b>5,406</b>	<b>35247</b>	<b>34897</b>	<b>14614</b>	<b>0,21</b>
<b>800-10</b>	1856	90,5	1,783	5896	4,339	1,855	2,597	1,855	3634	3594	1543	0,18
<b>800-11</b>	1851	92,7	1,744	5627	4,134	1,749	2,438	1,749	3305	3260	1364	0,21
<b>800-12</b>	1857	91,5	1,765	5783	4,436	1,855	2,650	1,855	3811	3621	1613	0,18












Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 9</b>												
$\emptyset$	1854	91,6	1,764	5769	4,303	1,820	2,562	1,820	3583	3492	1507	0,19
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 10</b>												
P-1	2136	37,6	4,231	38246	12,296	5,247	7,208	5,353	32642	31795	13284	0,23
P-2	2140	37,6	4,220	38120	12,243	5,300	7,314	5,300	32369	32159	13682	0,18
P-3	2146	37,4	4,247	38702	12,190	5,247	7,261	5,300	32177	31619	13524	0,19
$\emptyset$	2141	37,5	4,233	38356	12,243	5,265	7,261	5,318	32396	31858	13496	0,20
200-1	1962	41,8	3,806	28424	11,079	4,770	6,678	4,929	24345	23844	10475	0,16
200-2	1962	41,9	3,791	28205	11,079	4,770	6,678	4,876	24312	23813	10462	0,16
200-3	1972	41,7	3,806	28564	10,965	4,717	6,678	4,717	23925	23257	10513	0,14
$\emptyset$	1965	41,8	3,801	28398	11,041	4,752	6,678	4,841	24194	23638	10483	0,15
P-4	2137	37,6	4,256	38718	12,243	5,247	7,261	5,247	32818	31770	13661	0,20
P-5	2138	37,7	4,245	38529	12,243	5,194	7,208	5,194	32833	30928	13465	0,22
P-6	2157	37,6	4,255	39064	12,296	5,194	7,208	5,300	33399	31827	13590	0,23
$\emptyset$	2144	37,6	4,252	38770	12,261	5,212	7,226	5,247	33017	31508	13572	0,22
400-4	1927	46,7	3,425	22598	9,063	3,810	5,353	3,810	16215	15131	6694	0,21
400-5	1929	46,7	3,429	22690	8,957	3,763	5,300	3,763	15857	14614	6569	0,21
400-6	1943	46,8	3,416	22682	8,957	3,810	5,353	3,810	15965	15294	6752	0,18
$\emptyset$	1933	46,7	3,423	22657	8,992	3,794	5,335	3,794	16012	15013	6672	0,20
P-7	2136	37,6	4,261	38792	12,243	5,194	7,208	5,247	32940	32167	13540	0,22
P-8	2154	37,7	4,257	39034	12,243	5,194	7,208	5,247	33263	32612	13688	0,22
P-9	2122	37,8	4,238	38102	12,406	5,194	7,261	5,194	33575	32010	13650	0,23
$\emptyset$	2137	37,7	4,252	38643	12,297	5,194	7,226	5,229	33260	32263	13626	0,22
600-7	1898	85,2	1,882	6725	5,135	2,161	3,121	2,161	5149	4880	2256	0,14
600-8	1904	81,1	1,979	7454	5,194	2,204	3,168	2,279	5291	5111	2337	0,13
600-9	1888	83,4	1,922	6971	5,194	2,204	3,186	2,224	5236	5026	2338	0,12
$\emptyset$	1897	83,2	1,928	7050	5,174	2,190	3,158	2,221	5225	5005	2310	0,13
P-10	2154	37,7	4,238	38699	12,349	5,247	7,236	5,353	33551	32767	13673	0,23
P-11	2143	37,7	4,239	38508	12,349	5,300	7,314	5,300	33385	32803	13891	0,20




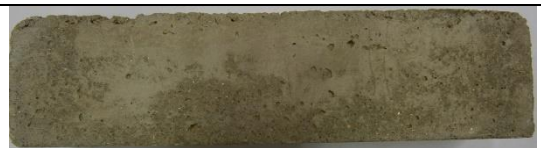



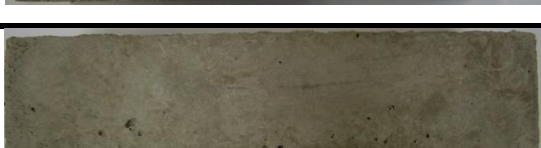

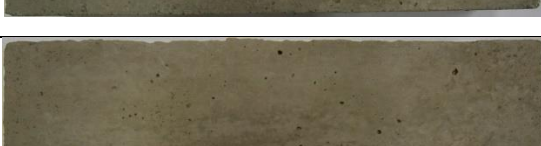
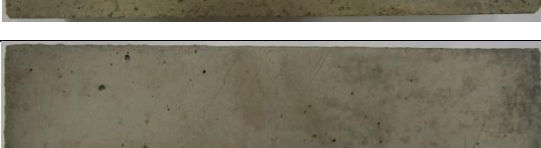
Ozn.	$\rho$	$T_{uz}$	$v_L$	$E_{cu}$	$f_L$	$f_f$	$f_t$	$f_{fR}$	$E_{crL}$	$E_{crf}$	$G_{cr}$	$v_{cr}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[ $\mu$ s]	[km/s]	[MPa]	[kHz]				[MPa]			[-]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA SH 10</b>												
<b>P-12</b>	2141	37,7	4,241	38504	12,455	5,300	7,261	5,300	34017	33390	13702	0,24
$\emptyset$	<b>2146</b>	<b>37,7</b>	<b>4,239</b>	<b>38570</b>	<b>12,384</b>	<b>5,282</b>	<b>7,270</b>	<b>5,318</b>	<b>33651</b>	<b>32986</b>	<b>13755</b>	<b>0,22</b>
<b>800-10</b>	1864	104	1,536	4397	3,975	1,749	2,491	1,749	3007	3061	1402	0,07
<b>800-11</b>	1862	109	1,467	4009	4,081	1,749	2,544	1,802	3167	3036	1460	0,08
<b>800-12</b>	1864	105	1,523	4325	4,081	1,749	2,544	1,749	3180	3076	1465	0,09
$\emptyset$	<b>1863</b>	<b>106</b>	<b>1,509</b>	<b>4243</b>	<b>4,046</b>	<b>1,749</b>	<b>2,526</b>	<b>1,767</b>	<b>3118</b>	<b>3058</b>	<b>1442</b>	<b>0,08</b>










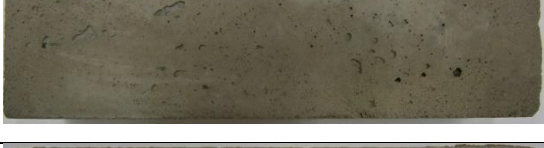

Tab. 11: Popis zkušebních těles před a po teplotním zatížení

Ozn.	Popis zkušebních těles	Foto
SH1 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH1 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH1 - 400 °C	bez viditelných trhlin, drolení spodního okraje	
SH1 - 600 °C	bez viditelných trhlin, drolení spodního okraje	
SH1 - 800 °C	příčné trhliny, drolení spodního okraje, změna barevného odstínu	
SH2 - 20 °C	před teplotním zatížením	

SH2 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH2 - 400 °C	bez viditelných trhlin, drolení spodního okraje	
SH2 - 600 °C	jemné příčné trhliny, drolení spodního okraje	
SH2 - 800 °C	příčné trhliny, drolení spodního okraje, změna barevného odstínu	
SH3 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH3 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH3 - 400 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH3 - 600 °C	drolení spodního okraje, změna barevného odstínu	
SH3 - 800 °C	příčné trhliny, drolení spodního okraje, změna barevného odstínu	
SH4 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH4 - 200 °C	bez zjevného poškození	

SH4 - 400 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH4 - 600 °C	drobné příčné trhliny, změna barevného odstínu	
SH4 - 800 °C	drobné příčné trhliny, změna barevného odstínu	
SH5 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH5 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH5 - 400 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH5 - 600 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH5 - 800 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH6 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH6 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH6 - 400 °C	bez zjevného poškození	

SH6 - 600 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH6 - 800 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH7 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH7 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH7 - 400 °C	bez zjevného poškození	
SH7 - 600 °C	bez zjevného poškození	
SH7 - 800 °C	bez viditelných trhlin, drolení spodního okraje	
SH8 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH8 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH8 - 400 °C	bez zjevného poškození	
SH8 - 600 °C	drobné příčné trhliny, změna barevného odstínu	

SH8 - 800 °C	příčné trhliny, ulomený roh, změna barevného odstínu	
SH9 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH9 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH9 - 400 °C	bez zjevného poškození	
SH9 - 600 °C	bez zjevného poškození	
SH9 - 800 °C	příčné trhliny	
SH10 - 20 °C	před teplotním zatížením	
SH 10 - 200 °C	bez zjevného poškození	
SH10 - 400 °C	bez zjevného poškození, změna barevného odstínu	
SH10 - 600 °C	drobné příčné trhliny	
SH10 - 800 °C	příčné trhliny	



## 4.5 Diskuze k výsledkům experimentálních prací

V této části jsou shrnuty poznatky o vlivu teplotního zatížení na dynamické moduly pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou, na rychlost šíření ultrazvukového impulzu a na pevnosti správkových hmot.

### 4.5.1 Změny sledovaných parametrů správkových hmot v závislosti na teplotním zatížení

Pro posouzení vlivu teplotního zatížení na parametry měření nedestruktivními metodami a pevnosti byly vypočítány rozdíly mezi hodnotou parametru srovnávacího tělesa (nevystaveného teplotnímu zatížení) a hodnotou parametru po daném teplotním zatížení. Změny sledovaných parametrů jsou uváděny jako rozdíl v příslušných jednotkách sledovaného parametru a dále jsou vyjádřeny v procentech (srovnávací hodnotou je hodnota sledovaného parametru správkové hmoty před teplotním zatížením).

Změna sledovaného parametru v závislosti na teplotě se vypočítá ze vztahu:

$$\Delta P_{ti} = \frac{p_{ti} - p_0}{p_0} \cdot 100 \quad (29)$$

kde  $\Delta P_{ti}$  ... změna sledovaného parametru (dynamický modul pružnosti, rychlost šíření ultrazvukového impulzu, pevnosti, objemová hmotnost) při teplotě zatěžování  $T_i$  [%];

$T_i = 200, 400, 600, 800^\circ\text{C}$ ,

$p_{ti}$  ... hodnota sledovaného parametru při teplotě zatěžování  $T_i$ ,

$p_0$  ... hodnota sledovaného parametru před teplotním zatěžováním.

Pro hodnocení změn ve struktuře v důsledku teplotního zatížení byly vypočítány relativní dynamické moduly pružnosti postupem dle ČSN 73 1380 (využívané k hodnocení porušení vnitřní struktury betonu při zkoušení mrazuvzdornosti).

V tabulce 12 jsou uvedeny rozdíly pro sledované parametry správkových hmot v závislosti na působící teplotě.

Tab. 12: Rozdíly sledovaných parametrů v závislosti na působící teplotě

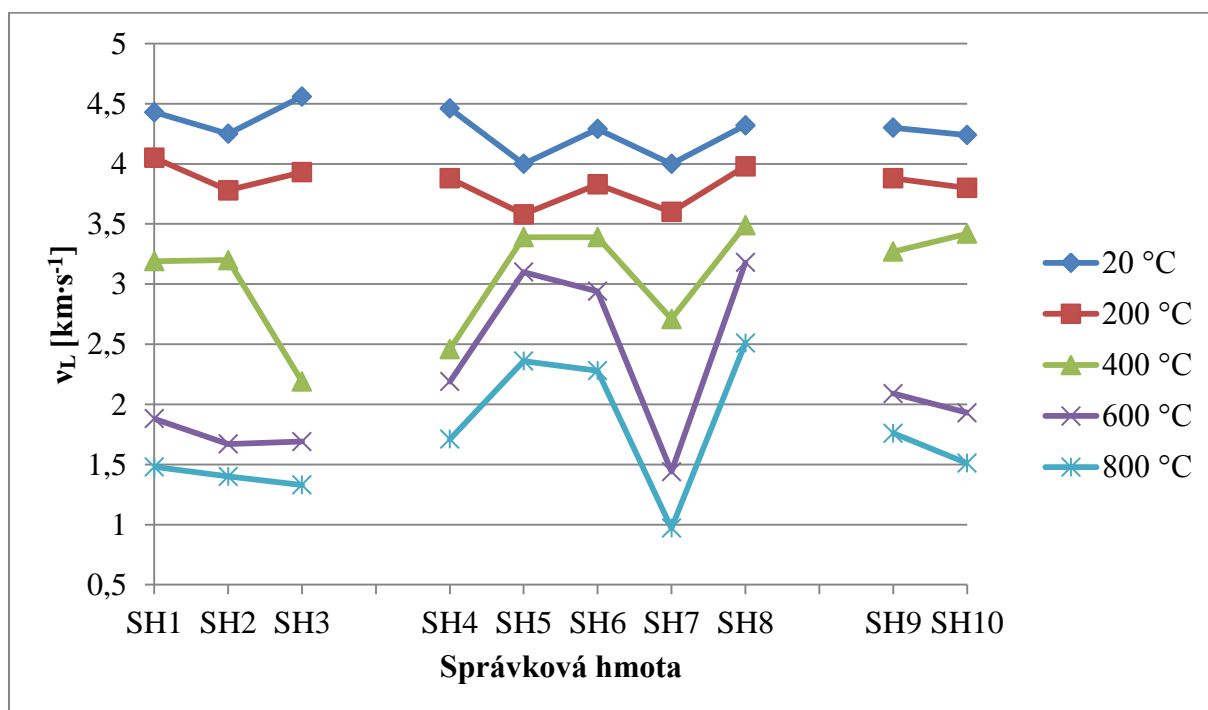
SLEDOVANÝ PARAMETR	TEPLOTA [°C]	SH 1 (CEM I, KŘEM. PÍSEK 0/4 mm)	SH 2 (CEM II, KŘEM. PÍSEK 0/4 mm)	SH 3 (HLINIT.CEM., KŘEM. PÍSEK 0/4 mm)	SH 4 (HLINIT. CEM, AMFIBOLIT 0/4 mm)	SH 5 (CEM II, AMFIBOLIT 0/2 mm)	SH 6 (CEM II, AMFIBOLIT 0/4 mm)	SH 7 (CEM II, ŽIVCE 0/4 mm)	SH 8 (CEM II, ČEDIČ 0/4 mm)	SH 9 (SikaTop – 122 SP)	SH 10 (Sika MonoTop – 612)
<b>ULTRAZVUKOVÁ IMPULZOVÁ METODA</b>											
$\Delta v_{L,ti}$ [%]	200	-9,7	-10,7	-14,2	-13,1	-8,5	-10,3	-10,4	-8,5	-9,9	-10,2
	400	-27,6	-24,2	-51,7	-44,7	-15,6	-21,3	-31,6	-18,9	-23,5	-19,5
	600	-57,5	-60,8	-62,9	-50,9	-23,5	-31,5	-64,4	-26,3	-51,4	-54,7
	800	-66,3	-67,1	-70,7	-61,7	-41,7	-47,0	-75,7	-42,0	-59,1	-64,4
$\Delta E_{cu,ti}$ [%]	200	-22,9	-24,9	-29,3	-28,0	-22,9	-24,5	-24,4	-21,9	-25,5	-26,0
	400	-51,4	-46,5	-78,5	-72,0	-36,2	-43,3	-57,1	-39,5	-47,4	-41,6
	600	-83,5	-85,8	-87,5	-78,2	-48,6	-57,6	-88,5	-50,3	-79,2	-81,8
	800	-89,7	-90,2	-92,2	-86,9	-70,8	-75,3	-94,8	-69,9	-85,5	-89,0
$RDM_{UPPT,ti}$ [%]	200	81,6	79,7	73,7	75,5	83,7	80,5	80,4	83,7	81,3	80,6
	400	52,4	57,4	23,3	30,6	71,2	61,9	46,7	65,7	58,6	64,8
	600	18,1	15,3	13,7	24,1	58,5	46,9	12,7	54,4	23,6	20,6
	800	11,4	10,8	8,6	14,7	34,0	28,1	5,9	33,6	16,7	12,7
<b>REZONANČNÍ METODA</b>											
$\Delta E_{crL,ti}$ [%]	200	-21,1	-24,6	-30,2	-38,9	-21,4	-20,6	-22,2	-22,6	-27,7	-25,3
	400	-50,8	-50,9	-77,4	-68,1	-30,5	-40,3	-57,2	-37,7	-56,9	-51,5
	600	-85,2	-89,0	-87,7	-76,1	-43,4	-52,8	-89,8	-48,5	-81,8	-84,3
	800	-96,3	-92,0	-93,0	-86,8	-67,6	-74,4	-95,0	-69,5	-89,8	-90,7
$\Delta E_{crf,ti}$ [%]	200	-25,3	-23,9	-33,0	-39,1	-23,6	-20,2	-23,2	-22,9	-28,4	-25,8
	400	-51,3	-49,0	-77,3	-68,7	-32,3	-40,4	-59,7	-38,8	-57,4	-52,4
	600	-85,0	-88,3	-87,1	-76,5	-44,1	-51,8	-89,4	-48,3	-82,2	-84,5
	800	-93,1	-92,6	-92,8	-86,1	-68,3	-74,4	-95,1	-70,1	-90,0	-90,7

SLEDOVANÝ PARAMETR	TEPLOTA [°C]	SH 1 (CEM I, KŘEM. PÍSEK 0/4 mm)	SH 2 (CEM II, KŘEM. PÍSEK 0/4 mm)	SH 3 (HLINIT. CEM., KŘEM. PÍSEK 0/4 mm)	SH 4 (HLINIT. CEM., AMFIBOLIT 0/4 mm)	SH 5 (CEM II, AMFIBOLIT 0/2 mm)	SH 6 (CEM II, AMFIBOLIT 0/4 mm)	SH 7 (CEM II, ŽIVCE 0/4 mm)	SH 8 (CEM II, ČEDIČ 0/4 mm)	SH 9 (SikaTop – 122 SP)	SH 10 (Sika MonoTop – 612)
<b>REZONANČNÍ METODA</b>											
<b>RDM<sub>FF,ti</sub></b> [%]	200	77,2	81,7	72,1	64,4	85,3	83,1	83,0	82,1	77,2	82,9
	400	52,4	58,1	26,2	33,7	76,3	65,3	44,3	68,1	49,6	52,3
	600	17,3	13,6	14,8	27,5	65,3	53,4	11,9	57,6	19,9	18,1
	800	7,4	8,8	8,2	15,4	37,7	29,9	5,7	33,3	11,3	11,0
<b>PEVNOSTI, OBJEMOVÁ HMOTNOST</b>											
<b>ΔR<sub>f</sub></b> [%]	200	38,1	9,6	-25,4	-34,7	1,8	-11,5	3,5	9,9	42,9	19,6
	400	-15,3	-29,4	-70,9	-50,9	-1,8	-26,9	-42,6	-8,3	-9,2	-32,0
	600	-68,1	-78,8	-83,6	-53,0	-9,8	-35,1	-72,6	-9,3	-50,6	-70,0
	800	-94,0	-95,2	-86,3	-69,7	-60,4	-73,7	-88,8	-67,2	-83,6	-90,5
<b>ΔR<sub>c</sub></b> [%]	200	-11,3	-18,4	-49,1	-44,7	12,0	-3,8	19,7	7,2	4,4	-5,4
	400	-26,7	-31,9	-68,8	-59,1	5,4	-7,2	-12,0	2,2	-13,7	-11,4
	600	-53,0	-55,5	-71,0	-60,9	-2,3	-18,3	-38,9	-16,9	-50,3	-45,9
	800	-87,0	-88,0	-73,0	-69,9	-58,5	-65,8	-74,8	-66,3	-75,2	-82,2
<b>Δρ</b> [%]	200	-5,5	-5,9	-4,1	-4,6	-7,9	-6,2	-5,9	-6,6	-8,3	-8,2
	400	-7,2	-6,9	-8,0	-8,5	-10,4	-8,3	-8,1	-7,9	-10,1	-9,8
	600	-8,5	-7,5	-8,7	-9,3	-12,1	-9,7	-9,2	-8,6	-11,7	-11,3
	800	-9,4	-9,8	-9,1	-10,7	-14,2	-11,9	-11,3	-10,3	-13,2	-13,2

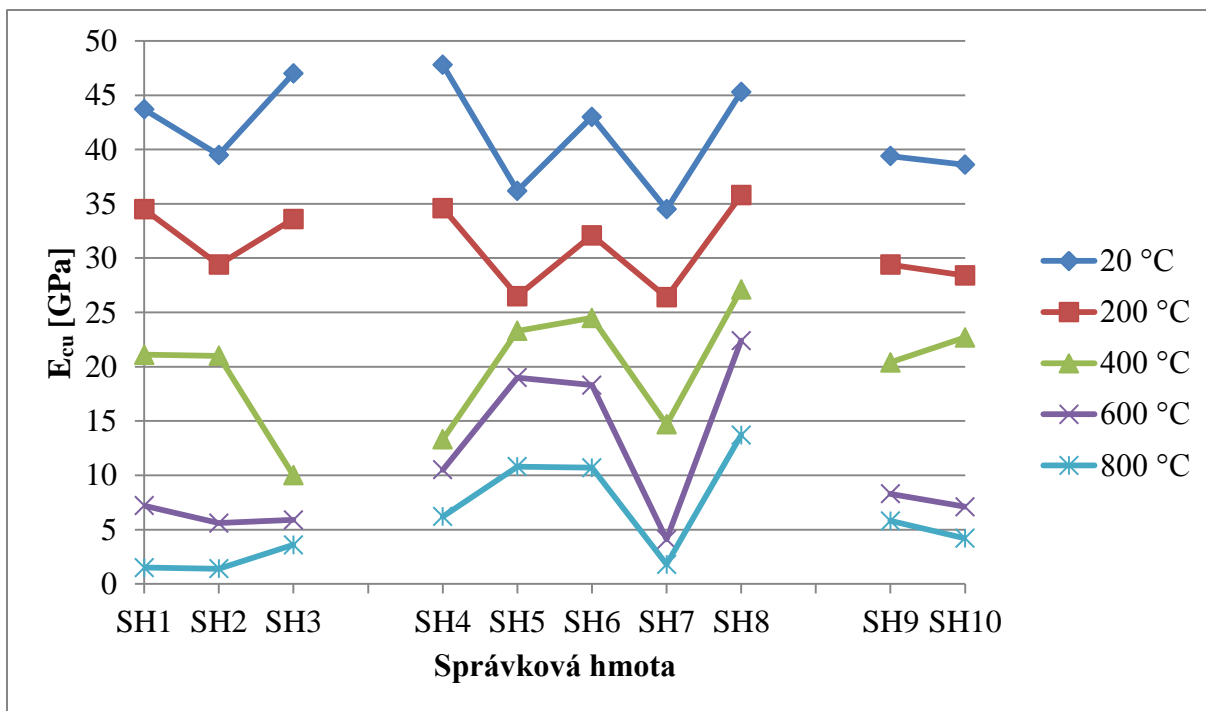
#### 4.5.2 Vyhodnocení výsledků měření nedestruktivními metodami a pevností jednotlivých správkových hmot

Na obrázku 19 až 27 jsou znázorněny změny sledovaných parametrů správkových hmot v závislosti na teplotě, konkrétně:

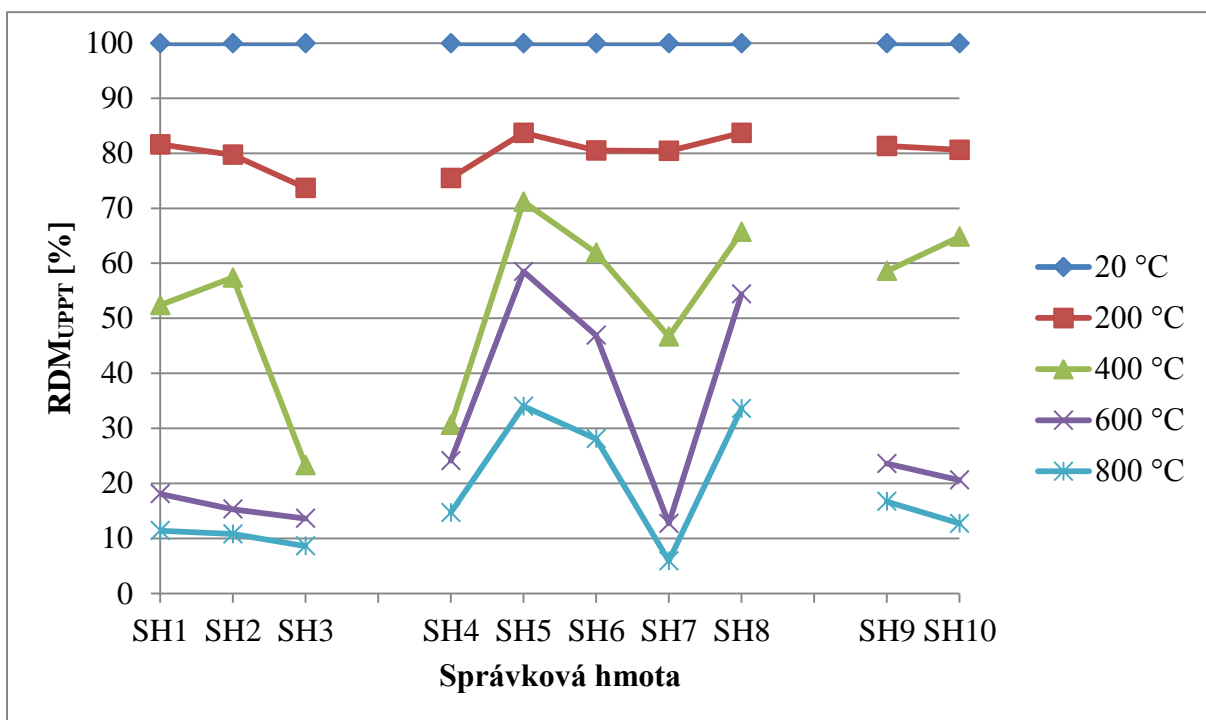
- Obr. 19 – změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na působící teplotě,
- Obr. 20 – změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulzovou metodou,
- Obr. 21 – změna relativního dynamického modulu pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulzovou metodou,
- Obr. 22 – změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání v závislosti na působící teplotě,
- Obr. 23 - změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání v závislosti na působící teplotě,
- Obr. 24 – změna relativního dynamického modulu pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření rezonanční metodou,
- Obr. 25 – změna pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na působící teplotě,
- Obr. 26 – změna pevnosti v tlaku v závislosti na působící teplotě,
- Obr. 27 – změna objemové hmotnosti v závislosti na působící teplotě.



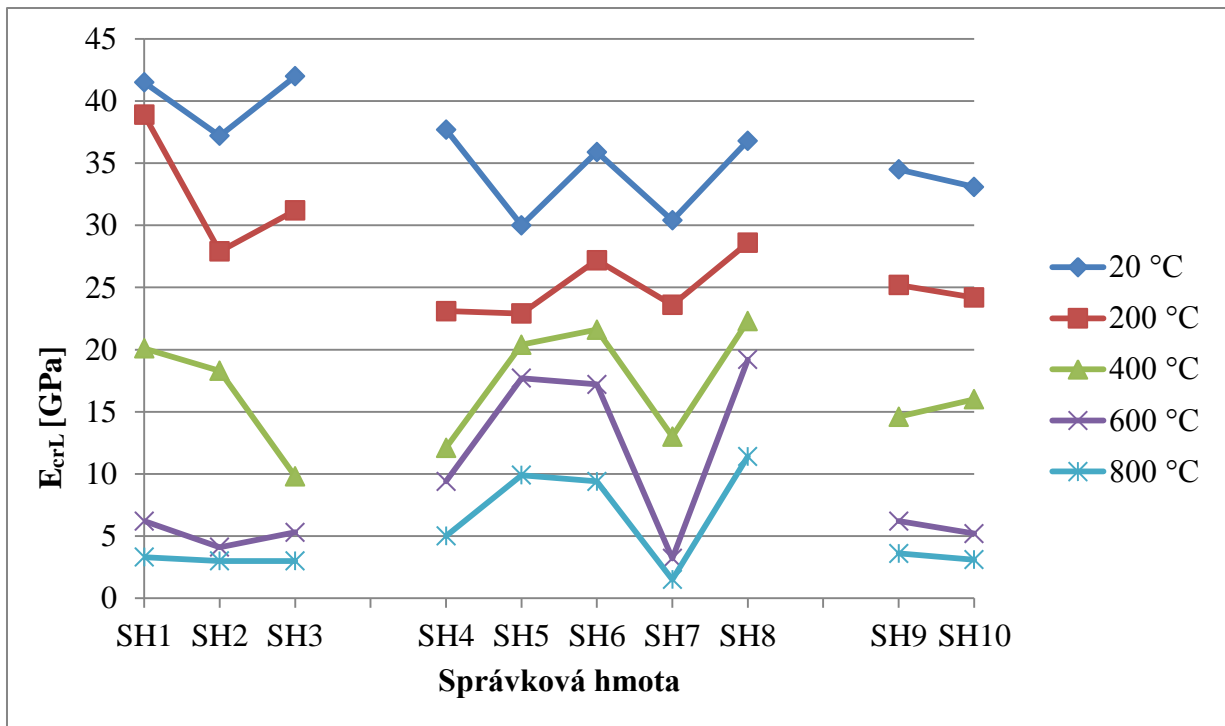
Obr. 19: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na působící teplotě



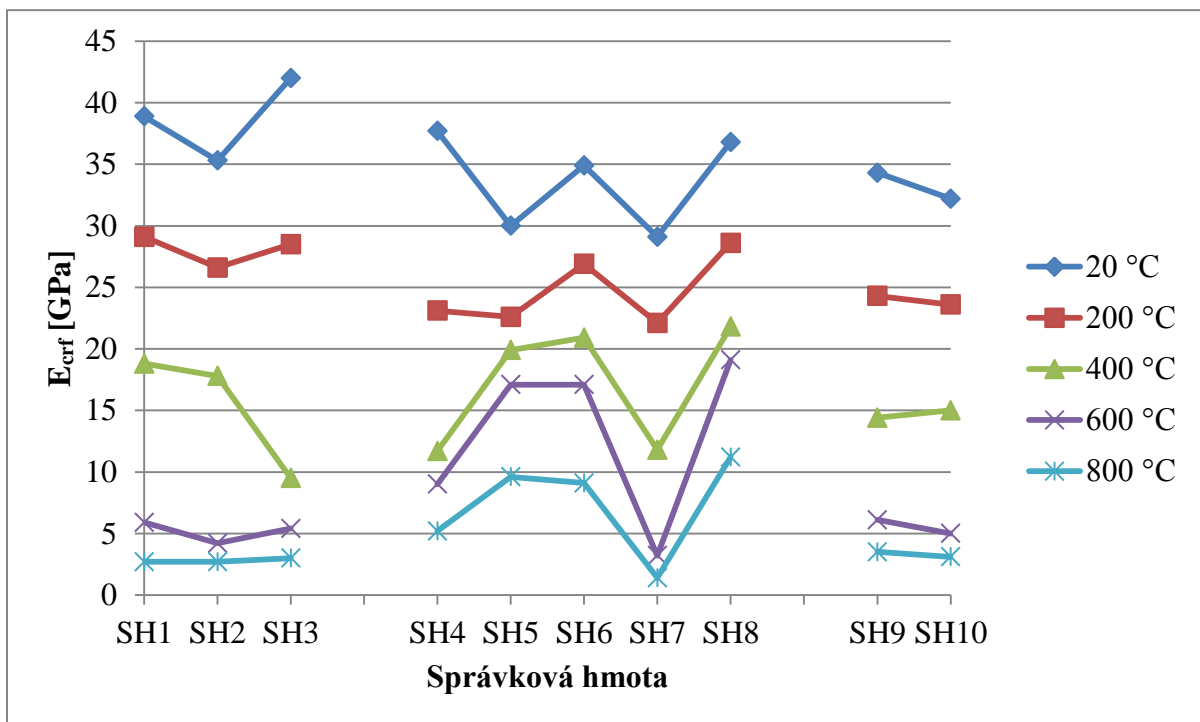
Obr. 20: Změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulsovou metodou



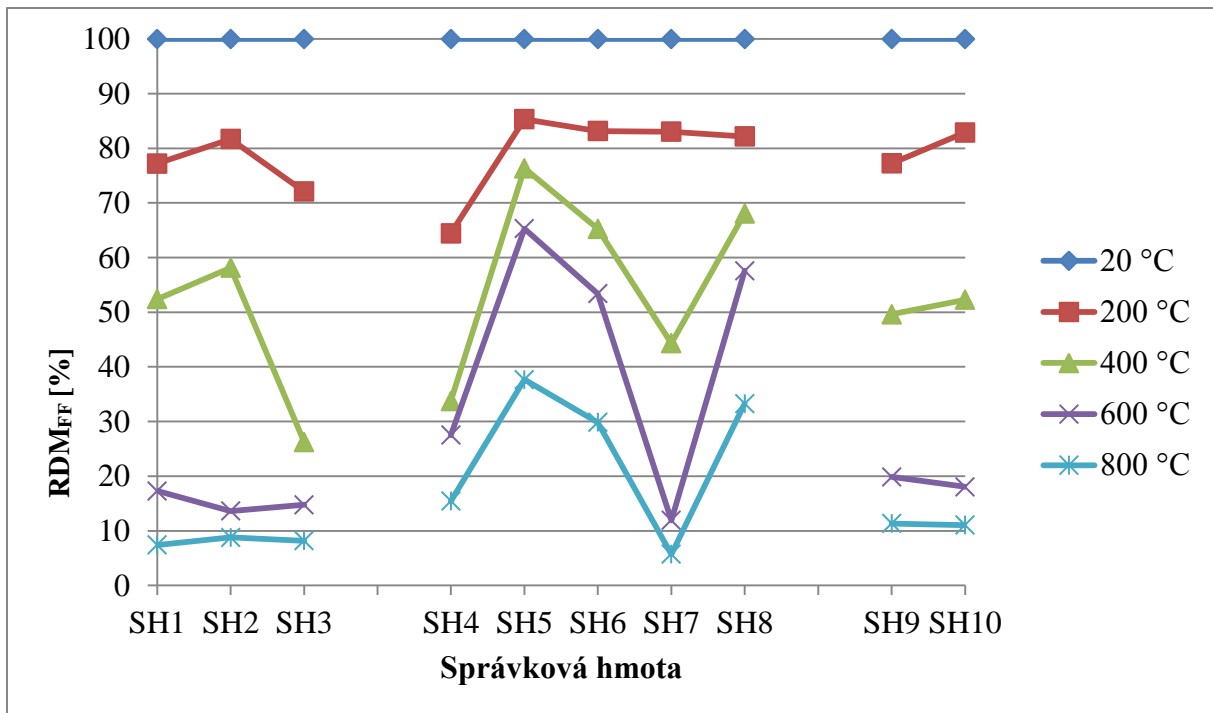
Obr. 21: Změna relativního dynamického modulu pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulsovou metodou



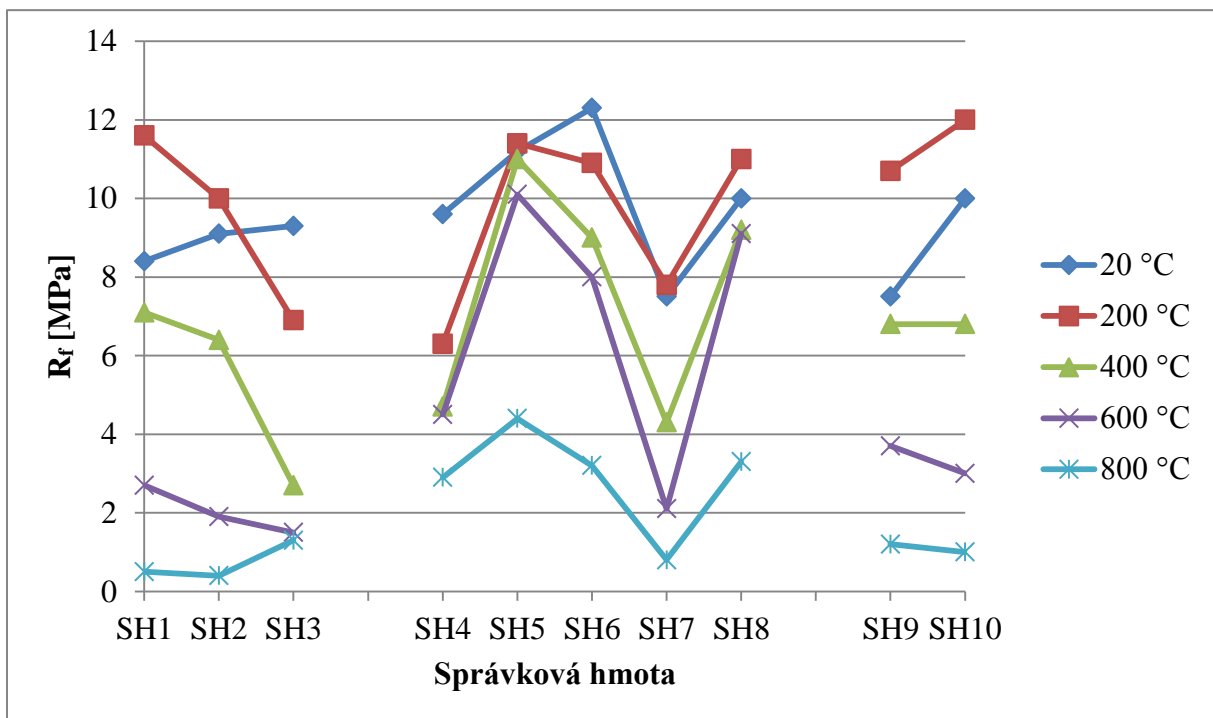
Obr. 22: Změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání v závislosti na působící teplotě



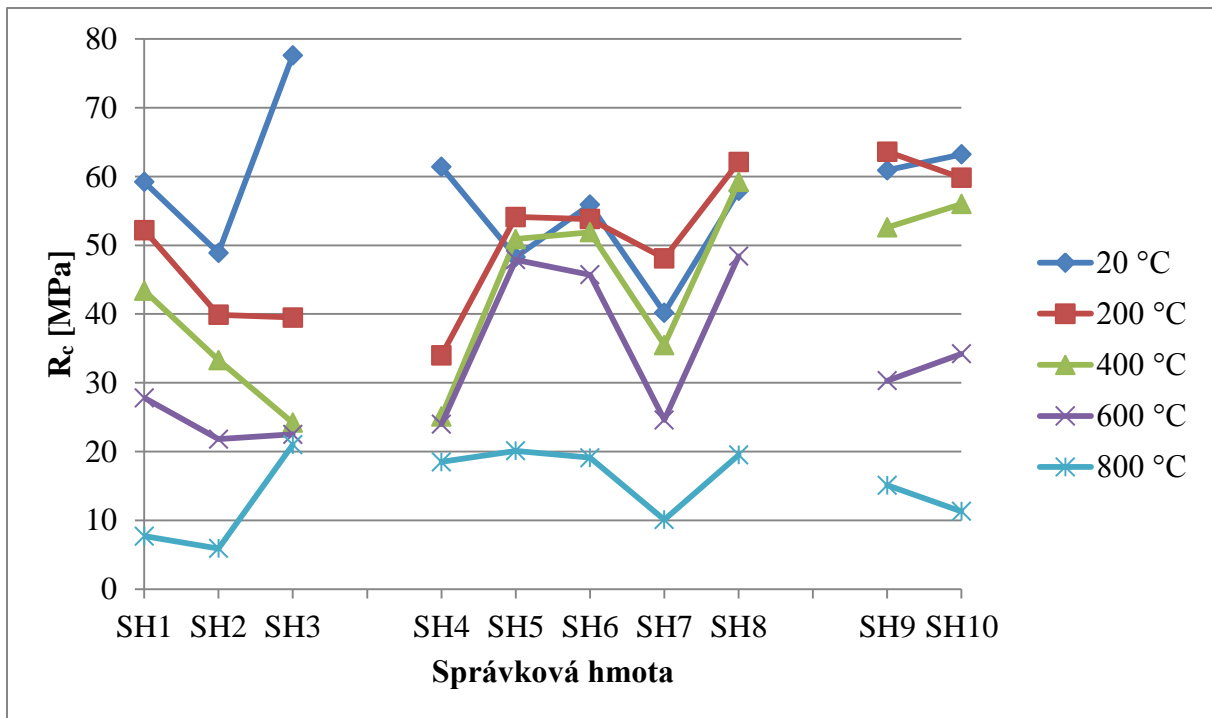
Obr. 23: Změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání v závislosti na působící teplotě



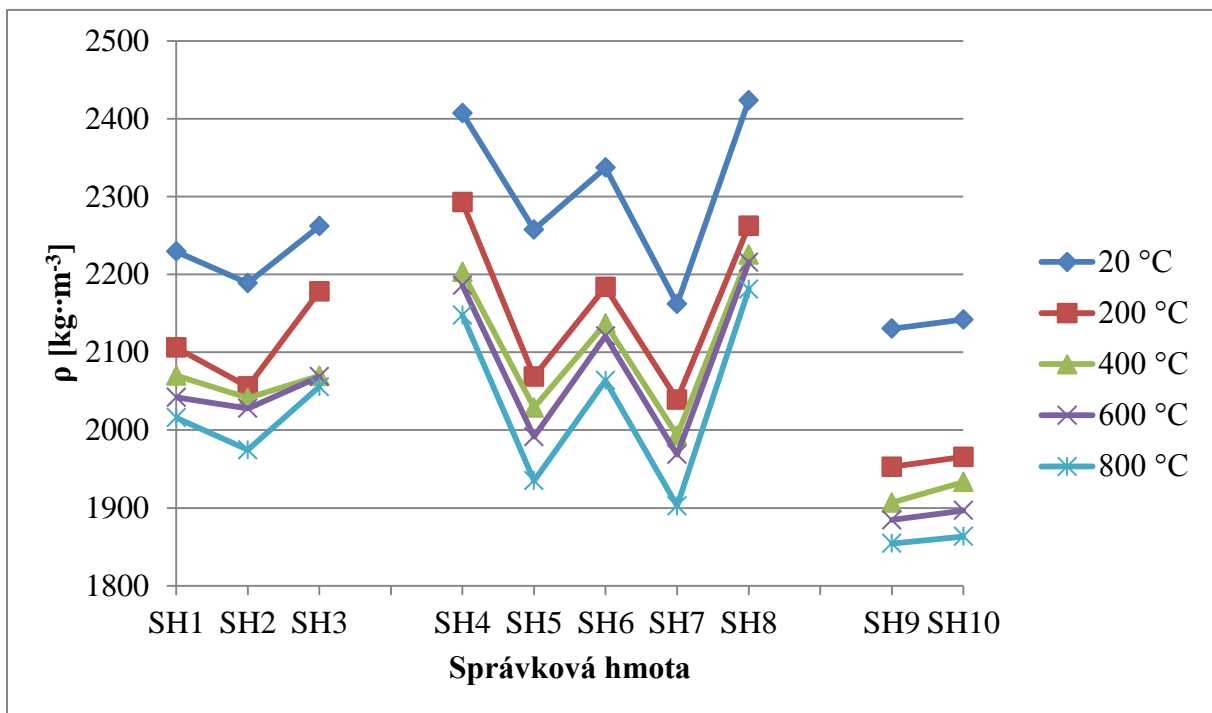
Obr. 24: Změna relativního dynamického modulu pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření rezonanční metodou



Obr. 25: Změna pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na působící teplotě



Obr. 26: Změna pevnosti v tlaku v závislosti na působící teplotě



Obr. 27: Změna objemové hmotnosti v závislosti na působící teplotě

Zhodnocení vlivu teplotního zatížení na fyzikálně-mechanické charakteristiky správkových hmot jsou uvedeny v kap. 4.5.2.1 až 4.5.2.10.



#### 4.5.2.1 Správková hmota SH 1 (CEM I 42,5 R, křemičitý-normalizovaný písek)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $4,43 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $4,05$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $1,48 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $66,3 \%$ .
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $43,7 \text{ GPa}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $34,5$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $4,4 \text{ GPa}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $89,7 \%$ .
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od  $81,6$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $11,4 \%$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cFL}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $41,5 \text{ GPa}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $32,3$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $3,3 \text{ GPa}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $92,1 \%$ .
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cTF}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $38,9 \text{ GPa}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $29,1$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $2,7 \text{ GPa}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $93,1 \%$ .

- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 77,2 (200 °C) do 7,4 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 8,4 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C byly hodnoty pevnosti v tahu za ohybu vyšší než u srovnávacích vzorků o 38 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty byly v rozmezí od 7,1 (400 °C) do 0,5 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 94,0 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 59,2 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tlaku klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 52,5 (200 °C) do 7,7 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 87,0 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2229 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2106 (200 °C) do 2016 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 9,4 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: vzorky vystaveny působení teplot 400 a 600 °C vykazovaly mírné odrolení na spodní hraně a při působení teploty 800 °C došlo ještě ke změně barevného odstínu a vyskytovaly se příčné trhliny.

#### **4.5.1.2 Správková hmota SH 2 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, křemičitý-normalizovaný písek)**

*a) Parametry z nedestruktivního zkoušení*

- Rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 4,25 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,78 (200 °C) do 1,40 km·s<sup>-1</sup>

(800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 67,1 %.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 39,5 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 29,4 (200 °C) do 3,9 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 90,2 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 79,9 (200 °C) do 10,8 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crl}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 37,2 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 27,9 (200 °C) do 3,0 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 92,0 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crlf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 35,3 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 26,5 (200 °C) do 2,6 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 92,6 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 81,7 (200 °C) do 8,8 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 9,1 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C byly hodnoty pevnosti v tahu za ohybu vyšší než u srovnávacích vzorků o 9,6 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty byly v rozmezí od 6,4

(400 °C) do 0,4 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 95,2 %.

- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 48,9 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tlaku klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 39,9 (200 °C) do 5,9 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 88,0 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2189 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2056 (200 °C) do 1974 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 9,8 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: vzorky vystaveny působení teplot 400 a 600 °C vykazovaly mírné odrolení na spodní hraně a po působení teploty 800 °C došlo ještě ke změně barevného odstínu a vyskytovaly se příčné trhliny.

#### 4.5.2.3 Správková hmota SH 3 (hlinitanový cement, křemičitý-normalizovaný písek)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 4,56 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,93 (200 °C) do 1,33 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 70,7 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 47,0 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 33,6 (200 °C) do 3,6 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 92,2 %.

- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 73,7 (200 °C) do 8,6 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crl}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 43,4 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 31,2 (200 °C) do 3,0 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 93,0 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crlf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 42,0 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 28,5 (200 °C) do 3,0 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 92,8 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 72,1 (200 °C) do 8,2 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 9,3 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tahu za ohybu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 6,9 (200 °C) do 1,3 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 86,3 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnoty na srovnávacích vzorcích byla 77,6 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tlaku klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 39,5 (200 °C) do 21,0 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 73,0 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2262 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové

hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2178 (200 °C) do 2056 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 9,1 %.

- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 400 °C došlo ke změně barevného odstínu, při teplotě 600 °C nastalo i drolení na spodní hraně a při teplotě 800 °C se vyskytovaly příčné trhliny.

#### 4.5.2.4 Správková hmota SH 4 (hlinitanový cement, DDK 0/4 mm Želešice)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 4,46 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,88 (200 °C) do 1,70 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 61,7 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 47,8 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 34,6 (200 °C) do 6,2 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 86,9 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 75,5 (200 °C) do 14,7 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crl}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 38,1 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 23,1 (200 °C) do 5,0 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 86,8 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crlf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích

vzorcích byla 37,7 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 23,0 (200 °C) do 5,2 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 86,1 %.

- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 64,4 (200 °C) do 15,4 % (800 °C).

#### *b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 9,6 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tahu za ohybu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 6,3 (200 °C) do 2,9 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 69,7 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 61,4 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tlaku klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 34,0 (200 °C) do 18,5 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 69,9 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2407 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2293 (200 °C) do 2148 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 10,7 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 400 °C nastala změna barevného odstínu, při teplotě 600 a 800 °C došlo ještě ke vzniku příčných trhlin.

#### **4.5.2.5 Správková hmota SH 5 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DDK 0/2 mm Želešice)**

##### *a) Parametry z nedestructivního zkoušení*

- Rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 4,00 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C

do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,58 (200 °C) do 2,36 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 41,7 %.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 36,2 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 26,5 (200 °C) do 10,8 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 70,8 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 83,7 (200 °C) do 34,0 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crL}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 30,0 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 22,9 (200 °C) do 9,9 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 67,6 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 29,9 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 22,6 (200 °C) do 9,5 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 68,3 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 85,3 (200 °C) do 33,7 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 11,2 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti



v tahu za ohybu byly vyšší než u srovnávacích vzorků o 1,8 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 11,0 (400 °C) do 4,4 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 60,4 %.

- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 48,3 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C a 400 °C byly hodnoty pevnosti v tlaku vyšší než u srovnávacích vzorků o 12,0 % (teplota 200 °C) a o 5,4 % (teplota 400 °C). I v tomto případě docházelo k poklesu pevnosti v tlaku se zvyšující se teplotou, ale hodnoty pevnosti v tlaku teplotně namáhaných vzorků byly vyšší než u srovnávacích vzorků. Při teplotě 600 °C a 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 47,2 (600 °C) do 20,1 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 58,5 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2258 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2069 (200 °C) do 1935 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 14,2 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 400 až 800 °C došlo ke změně barevného odstínu.

#### 4.5.2.6 Správková hmota SH 6 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DDK 0/4 mm Želešice)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulzu  $v_I$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 4,29 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,83 (200 °C) do 2,28 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 47,0 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 43,0 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou;

průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 32,1 (200 °C) do 10,7 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 75,3 %.

- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 80,5 (200 °C) do 28,1 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cFL}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 35,9 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 27,2 (200 °C) do 9,4 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 74,4 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cTF}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 34,9 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly od 26,9 (200 °C) do 9,0 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 74,4 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 83,1 (200 °C) do 29,9 % (800 °C).

#### *b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 12,3 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tahu za ohybu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 10,9 (200 °C) do 3,2 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 73,7 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnoty na srovnávacích vzorcích byla 55,9 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tlaku klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí

od 53,8 (200 °C) do 19,1 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 65,8 %.

- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2337 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2184 (200 °C) do 2064 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 11,9 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 600 a 800 °C došlo ke změně barevného odstínu.

#### 4.5.2.7 Správková hmota SH 7 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DTK 0/4 mm Žabčice)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 3,99 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,60 (200 °C) do 0,97 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 75,7 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 34,5 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 26,4 (200 °C) do 1,8 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 94,8 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 81,2 (200 °C) do 5,8 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crL}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 30,4 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly

v rozmezí od 23,6 (200 °C) do 1,5 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 95,0 %.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 29,1 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 22,1 (200 °C) do 1,4 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 95,1 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 83,0 (200 °C) do 5,7 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 7,5 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly vyšší než u srovnávacích vzorků o 3,5 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 4,3 (400 °C) do 0,8 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 88,8 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 40,2 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti v tlaku byly vyšší než u srovnávacích vzorků o 19,7 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 35,4 (400 °C) do 10,1 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 74,8 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2162 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2039 (200 °C) do 1903 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 11,3 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 800 °C nastalo drolení na spodní hraně tělesa.

#### 4.5.2.8 Správková hmota SH 8 (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DDK 0/4 mm Bílčice)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $4,32 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $3,98$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $2,51 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $42,0 \%$ .
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $45,3 \text{ GPa}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $35,8$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $13,7 \text{ GPa}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $69,9 \%$ .
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od  $83,7$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $33,6 \%$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cFL}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $36,8 \text{ GPa}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $28,6$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $11,4 \text{ GPa}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $69,5 \%$ .
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crl}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $36,7 \text{ GPa}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $28,6$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) do  $11,1 \text{ GPa}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $70,1 \%$ .

- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 82,1 (200 °C) do 33,3 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 10,0 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly vyšší než u srovnávacího tělesa o 9,9 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 9,2 (400 °C) do 3,3 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 67,2 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 57,9 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C a 400 °C byly hodnoty pevnosti v tlaku vyšší než u srovnávacích vzorků o 7,2 % (200 °C) a o 2,2 % (400 °C). I v tomto případě docházelo k poklesu pevnosti v tlaku se zvyšující se teplotou, ale hodnoty pevnosti v tlaku teplotně namáhaných vzorků byly vyšší než u vzorků srovnávacích. Při teplotě 600 °C a 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 48,1 (600 °C) do 19,5 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 66,3 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $2424 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2263 (200 °C) do  $2181 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (900 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 10,3 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 600 °C došlo ke změně barevného odstínu a drobení na spodní hraně a při teplotě 800 °C se vyskytovaly i příčné trhliny a u jednoho zkušební vzorku došlo k odlomení rohu.

#### **4.5.2.9 Správková hmota SH 9 (SikaTop – 122 SP)**

*a) Parametry z nedestruktivního zkoušení*

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $4,30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C

do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,88 (200 °C) do 1,76 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulzu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 59,1 %.

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 39,4 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 29,4 (200 °C) do 5,8 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 85,5 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 83,1 (200 °C) do 16,7 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crL}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 34,5 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 25,1 (200 °C) do 3,6 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 89,8 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 34,2 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí 24,3 (200 °C) do 3,5 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 90,0 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 77,2 (200 °C) do 11,3 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 7,5 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti v tahu

za ohybu byly vyšší než u srovnávacích vzorků o 42,9 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 6,8 (400 °C) do 1,2 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 83,6 %.

- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 60,9 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti v tlaku byly vyšší než u srovnávacích vzorků o 4,4 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 52,6 (400 °C) do 15,1 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 75,2 %.
- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 2130 kg·m<sup>-3</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 1953 (200 °C) do 1854 kg·m<sup>-3</sup> (800 °C). Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 13,2 %.
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě 800 °C se vyskytovaly příčné trhliny.

#### 4.5.2.10 Správková hmota SH 10 (Sika MonoTop – 612)

##### a) Parametry z nedestruktivního zkoušení

- Rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $v_L$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 4,24 km·s<sup>-1</sup> a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 3,80 (200 °C) do 1,51 km·s<sup>-1</sup> (800 °C). Pokles rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 64,4 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 38,6 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 28,4 (200 °C) do 4,2 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 89,0 %.



- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 80,6 (200 °C) do 12,7 % (800 °C).
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crl}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 33,1 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 24,2 (200 °C) do 3,1 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 90,7 %.
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{crlf}$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 32,2 GPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty dynamického modulu pružnosti z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 23,6 (200 °C) do 3,1 GPa (800 °C). Pokles dynamického modulu pružnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 90,7 %.
- Relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF}$ : hodnoty relativního modulu pružnosti klesaly se zvyšující se teplotou a v závislosti na teplotním zatížení se pohybovaly v rozmezí od 82,9 (200 °C) do 11,0 % (800 °C).

*b) Pevnosti, objemová hmotnost a stav vzorků*

- Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla 10,0 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení 200 °C hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly vyšší než u srovnávacích vzorků o 19,6 %. Při teplotě 400 °C až 800 °C pevnost klesala se zvyšujícím se teplotním zatížením a hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 6,8 (400 °C) do 1,0 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tahu za ohybu při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 90,5 %.
- Pevnost v tlaku  $R_c$ : průměrné hodnota na srovnávacích vzorcích byla 63,2 MPa a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od 200 °C do 800 °C hodnoty pevnosti v tlaku klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 59,8 (200 °C) do 11,3 MPa (800 °C). Pokles pevnosti v tlaku při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o 82,2 %.

- Objemová hmotnost  $\rho$ : průměrná hodnota na srovnávacích vzorcích byla  $2142 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení od  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  hodnoty objemové hmotnosti klesaly se zvyšující se teplotou; průměrné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od  $1965 \text{ (}200 \text{ }^\circ\text{C)}$  do  $1863 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \text{ (}800 \text{ }^\circ\text{C)}$ . Pokles objemové hmotnosti při maximální hodnotě teplotního zatížení byl o  $13,2 \%$ .
- Stav vzorků po teplotním zatížení: při vystavení vzorků teplotě  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  došlo ke změně barevného odstínu, při teplotě  $600$  a  $800^\circ\text{C}$  se vyskytovaly příčné trhliny.

#### **4.5.2.11 Zhodnocení výsledků měření nedestruktivními metodami a pevností jednotlivých správkových hmot**

Ze zhodnocení výsledků měření vyplynulo:

- Působení vysokých teplot na správkové hmoty způsobuje nevratné změny v mikrostruktuře; míra změn závisí na výši teploty a doby jejího působení a na složkách správkových hmot.
- Parametry z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou se snižující úměrně se změnami v mikrostruktuře betonu (mikrotrhliny, póry a dutiny vzniklé po vyhoření vláken ve správkové hmotě, modifikační přeměna křemene).
- Dynamické moduly pružnosti v tlaku a v tahu i relativní dynamické moduly pružnosti se mění v závislosti na změnách v mikrostruktuře správkových hmot způsobených působením teplotního zatížení, tj. se zvyšující se teplotou dochází k jejich poklesu.
- Obdobnou tendenci vykazují i pevnosti při působení teploty vyšší než  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při teplotě  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  jsou u některých správkových hmot pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku vyšší než u správkových hmot nevystavených působení teplotního zatížení, toto lze vysvětlit tím, že nastává další hydratace při mírně zvýšené teplotě.
- Míra poklesu dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu, ale i ostatních parametrů je ovlivněna složením správkových hmot (druh cementu, kameniva, použití polypropylenových vláken a polymerní přísady). Nejvyšší pokles sledovaných parametrů byl u správkové hmoty SH 7 na bázi CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R a kameniva s vysokým obsahem živců DTK 0/4 mm Žabčice a nejnižší pokles sledovaných parametrů byl zjištěn u správkové hmoty SH 5 na bázi CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R a DDK 0/2 mm Želešice z mateční horniny amfibolit.

### 4.5.3 Porovnání rozdílů dynamických a relativních dynamických modulů pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou

Bylo provedeno porovnání rozdílů dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu a relativních modulů pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou. Relativní dynamický modul pružnosti se vyjadřuje v %, proto pro účel porovnání byly dynamické moduly pružnosti v tlaku a v tahu vyjádřeny v procentech  $\Delta Z$  [%] dle vztahu:

$$\Delta Z = \frac{E_{ti}}{E_{20\text{ }^\circ\text{C}}} \cdot 100 \quad (30)$$

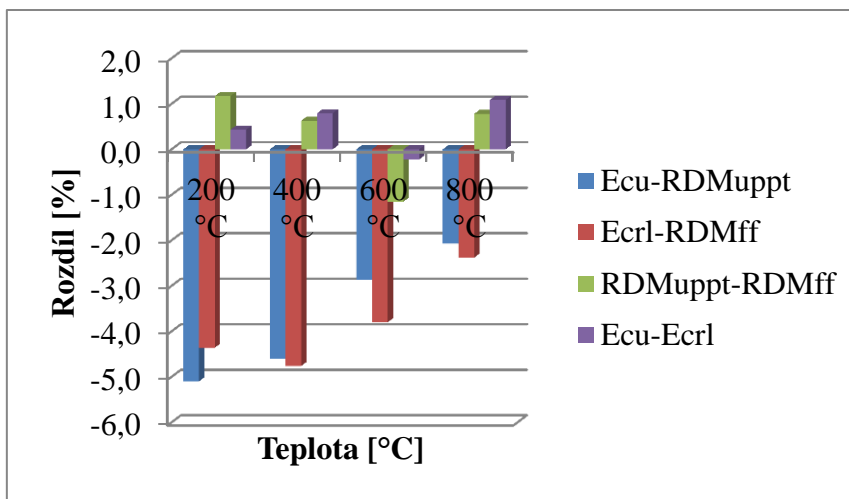
Kde  $E_{ti}$  ... dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu při teplotě  $ti$  ( $i = 200, 400, 600, 800$  °C) [GPa],

$E_{20\text{ }^\circ\text{C}}$  ... dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu při teplotě 20 °C [GPa].

Pro porovnání byly vypočítány rozdíly mezi:

- dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$  a relativním dynamickým modulem pružnosti  $RDM_{UPPT}$  (z měření ultrazvukovou impulzovou metodou),
- dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání  $E_{crL}$  a relativním dynamickým modulem pružnosti  $RDM_{FF}$  (z měření rezonanční metodou),
- relativním dynamickým modulem pružnosti  $RDM_{UPPT}$  (z měření ultrazvukovou impulzovou metodou) a relativním dynamickým modulem pružnosti  $RDM_{FF}$  (z měření rezonanční metodou),
- dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu  $E_{cu}$  (z měření ultrazvukovou impulzovou metodou) a dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání  $E_{crL}$  (z měření rezonanční metodou),

kteřé jsou graficky znázorněny na obrázku 28.



Obr. 28: Rozdíly dynamických modulů pružnosti a relativních dynamických modulů pružnosti při různém teplotním zatížení

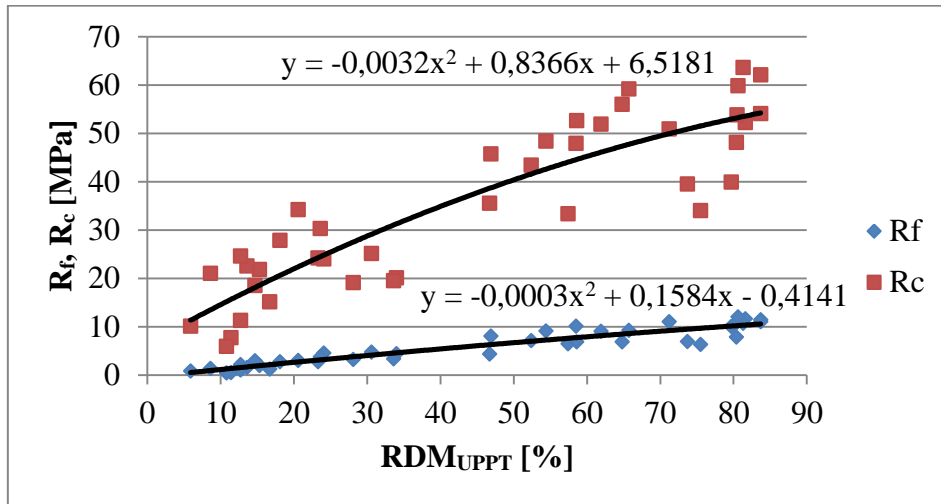
Z porovnání rozdílů dynamických modulů pružnosti vyplynulo:

- Relativní dynamický modul pružnosti je o 2 až 5 % vyšší než dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu.
- Rozdíly mezi dynamickým a relativním dynamickým modulem pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou vykazují klesající tendenci se vzrůstající teplotou.
- Rozdíl mezi relativními dynamickými moduly pružnosti i dynamickými moduly pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou je v rozmezí -1,2 až 1,2 %. Výsledky měření oběma nedestruktivními metodami i vyhodnocované parametry (relativní dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti) jsou srovnatelné; hodnotu rozdílu modulů cca 1% lze považovat za chybu měření.
- Pro hodnocení porušení struktury správkových hmot od teplotního zatížení jsou využitelné obě dynamické nedestruktivní metody společně s výstupy z měření (relativní dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti).

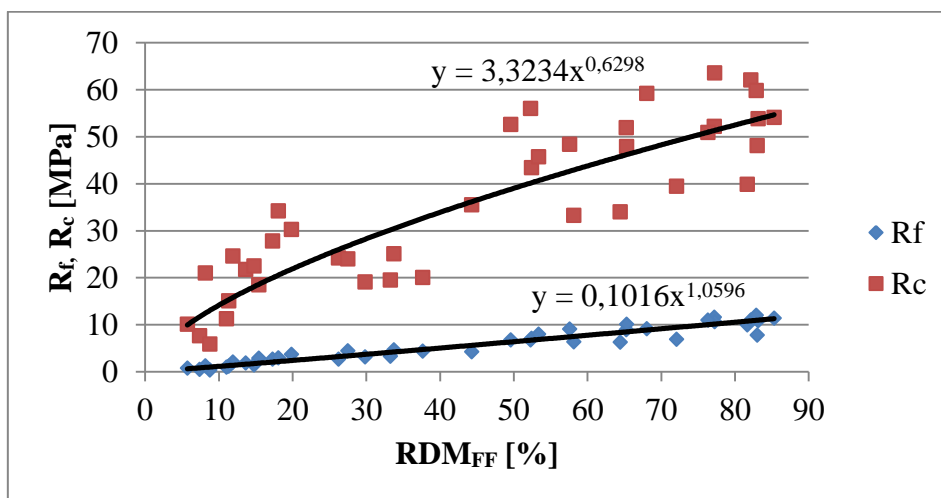
#### 4.5.4 Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a pevnostmi při teplotním namáhání správkových hmot

Na základě výsledků měření při různém teplotním zatížení byly zpracovány závislosti mezi relativním dynamickým resp. dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu

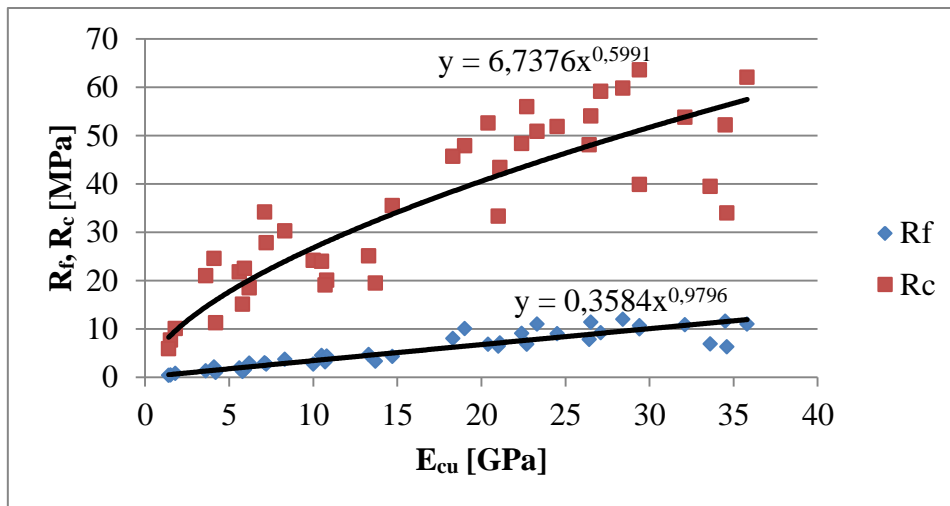
a pevností v tahu za ohybu resp. v tlaku, které jsou znázorněny pro jednotlivé typy dynamických modulů pružnosti na obrázku 29-32.



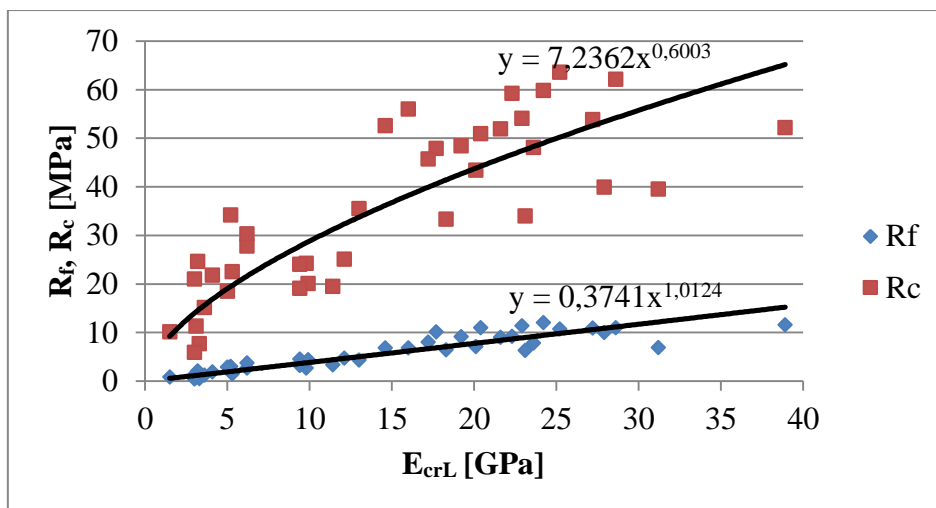
Obr. 29: Závislost mezi relativním dynamickým modulem pružnosti a pevnostmi v tahu za ohybu a v tlaku (ultrazvuková impulzová metoda)



Obr. 30: Závislost mezi relativním dynamickým modulem pružnosti a pevnostmi v tahu za ohybu a v tlaku (rezonanční metoda)



Obr. 31: Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu a pevnostmi v tahu za ohybu a v tlaku (ultrazvuková impulzová metoda)



Obr. 32: Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu a pevnostmi v tahu za ohybu a v tlaku (rezonanční metoda)

- a) Vztah mezi relativním dynamickým modulem pružnosti z měření ultrazvukovou impulzovou metodou a pevností v tahu za ohybu resp. pevností v tlaku:

$$R_C = -0,0032RDM_{UPPT}^2 + 0,8366RDM_{UPPT} + 6,518; r = 0,890$$

$$R_f = -0,0003RDM_{UPPT}^2 + 0,1584RDM_{UPPT} - 0,414; r = 0,939$$

- b) Vztah mezi relativním dynamickým modulem pružnosti z měření rezonanční metodou a pevností v tahu za ohybu resp. pevností v tlaku:

$$R_C = 3,3234RDM_{FF}^{0,6298}; r = 0,875$$

$$R_f = 0,1016RDM_{FF}^{1,0596}; r = 0,955$$

c) Vztah mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu z měření ultrazvukovou impulzovou metodou a pevností v tahu za ohybu resp. pevností v tlaku:

$$R_C = 6,7376E_{cu}^{0,5991}; r = 0,907$$

$$R_f = 0,3584E_{cu}^{0,9796}; r = 0,962$$

d) Vztah mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu z měření rezonanční metodou a pevností v tahu za ohybu resp. pevností v tlaku:

$$R_C = 7,2363E_{crL}^{0,6003}; r = 0,850$$

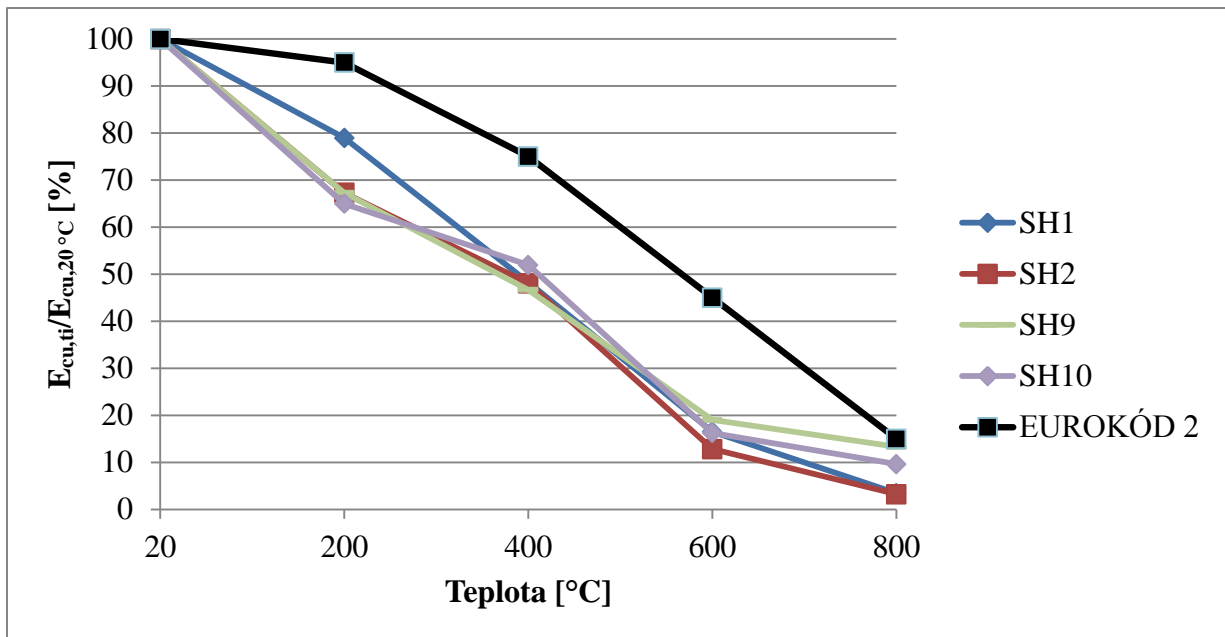
$$R_f = 0,3741E_{crL}^{1,0124}; r = 0,929$$

Ze zhodnocení závislosti mezi dynamickými moduly pružnosti a pevnostmi vyplynulo:

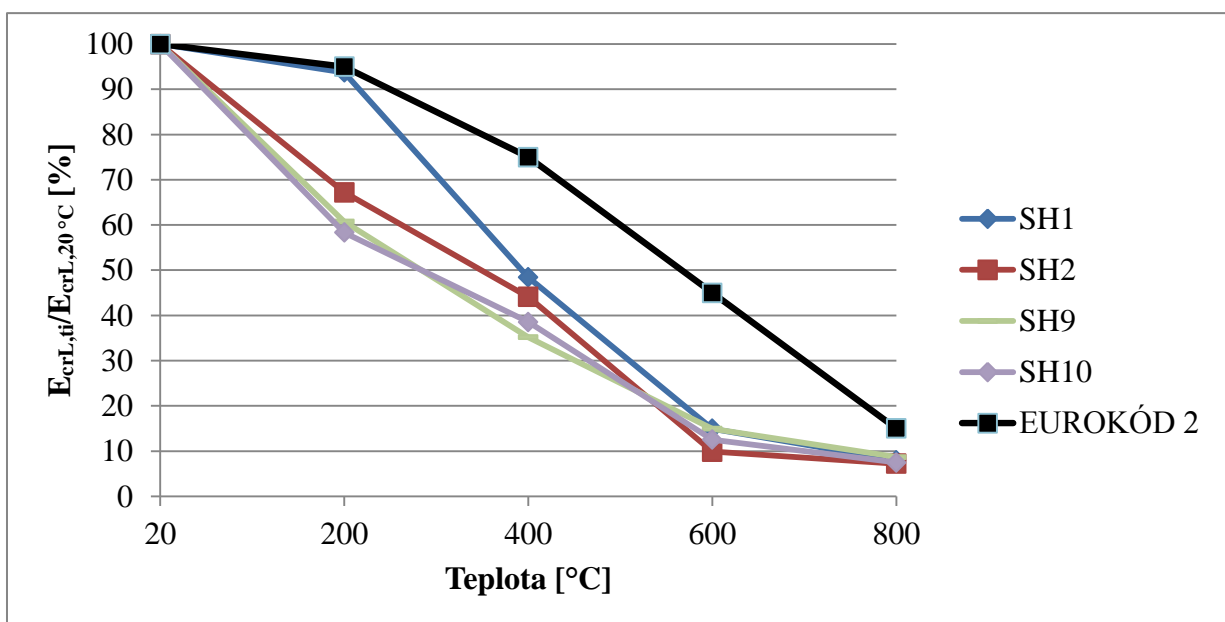
- Vztahy vyjadřující závislost mezi relativním dynamickým modulem pružnosti, dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu a pevností v tlaku vykazují dobrou těsnost mezi proměnnými a koeficient korelace je od 0,850 do 0,907.
- Vztahy vyjadřující závislost mezi relativním dynamickým modulem pružnosti, dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu a pevností v tahu za ohybu vykazují vysokou vázanost mezi proměnnými a koeficient korelace je 0,929 až 0,962.
- Těsnost korelace vztahů mezi dynamickými moduly pružnosti a pevnostmi v tahu za ohybu je vyšší než u vztahů pro pevnost v tlaku. Toto lze vysvětlit tím, že měření dynamickými nedestruktivními metodami i pevnosti v tahu za ohybu více korelují se změnami v mikrostruktuře správkových hmot, které jsou způsobeny teplotním zatížením.

#### **4.5.5 Porovnání změn dynamických modulů pružnosti s normovou křivkou pro betony uvedenu v ČSN EN 1992-1-2 [31]**

Porovnání poklesů dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou v důsledku působení teplotního zatížení s teoretickou křivkou pro beton dle ČSN EN 1992-1-2 [31] (pro betony s křemičitým kamenivem) je znázorněno na obrázku 33 (ultrazvuková impulzová metoda) a 34 (rezonanční metoda). Byly porovnávány správkové hmoty, ve kterých bylo pojivem křemičité kamenivo a cement na bázi portlandského slínku.



Obr. 33: Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu (ultrazvuková impulzová metoda) při daném zatížení s křivkou dle EUROKÓDU 2



Obr. 34: Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu (rezonanční metoda) při daném zatížení s křivkou dle EUROKÓDU 2

Z porovnání průběhu poklesu dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu správkových hmot s teoretickými hodnotami uvedenými v EUROKÓDU 2 pro betony s křemičitým kamenivem v závislosti na teplotním zatížení vyplynulo:



- Průběh poklesu dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu z měření ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou v závislosti na působící teplotě má podobnou tendenci jako průběh poklesů pro beton s křemičitým kamenivem.
- Reálné hodnoty poklesu dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu správkových hmot při teplotách 200 až 600 °C jsou ve srovnání s betony v průměru o 30 % vyšší a při teplotě 800 °C jsou vyšší v průměru o 10 %.

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na sledování změn dynamických modulů pružnosti správkových hmot, které jsou vystaveny teplotnímu zatížení od 200 do 800 °C a skládá se z teoretické a experimentální části.

Na základě rešerše odborné literatury jsou v práci uvedeny poznatky týkající se požadavků na požární odolnost stavebních hmot a konstrukcí, modely požáru, základní požadavky na betony vystavené působení teplotního zatížení. Dále jsou uvedeny poznatky o vlivu působení vysokých teplot na fyzikálně-mechanické charakteristiky betonu a o změnách, které probíhají ve struktuře betonu v důsledku působení teplotního zatížení.

Z oblasti nedestruktivních metod zkoušení jsou v práci uvedeny údaje o nedestruktivních metodách využívaných pro stanovení dynamického modulu pružnosti betonu, které jsou kodifikovány v technických normách a odborné literatuře. Mezi tyto dynamické nedestruktivní metody patří ultrazvuková impulzová a rezonanční metoda. U každé této metody je popsán její princip, způsob měření, faktory ovlivňující měření a je uveden vztah pro stanovení dynamického modulu pružnosti betonu.

V experimentální části diplomové práce byl zkoumán vliv teplotního zatížení na dynamické moduly pružnosti jednotlivých správkových hmot a na pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

Nedestruktivními dynamickými metodami byly zjišťovány jednak dynamické moduly pružnosti správkových hmot v tlaku a v tahu, jednak relativní dynamické moduly pružnosti - tento parametr je využíván při hodnocení změn ve vnitřní struktuře betonu při zkoušce mrazuvzdornosti.

Působení vysokých teplot na správkové hmoty způsobuje nevratné změny v mikrostruktuře, které závisí na teplotě, době působení a na složkách správkových hmot.

Dynamické moduly pružnosti v tlaku a v tahu i relativní dynamické moduly pružnosti se mění v závislosti na změnách v mikrostruktuře správkových hmot způsobených působením teplotního zatížení, tj. se zvyšující se teplotou dochází k jejich poklesu. Míra poklesu je ovlivněna složkami a složením správkových hmot.

Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku správkových hmot při teplotách nad 400°C klesají se zvyšující se teplotou. Při teplotě 200 °C byly u některých správkových hmot pevnosti

v tahu za ohybu i v tlaku vyšší než u správkových hmot nevystavených působení teplotního zatížení, což lze vysvětlit tím, že nastává další hydratace při mírně zvýšené teplotě.

Bylo prokázáno, že pro hodnocení porušení struktury správkových hmot v důsledku působení teplotního zatížení jsou využitelné obě dynamické nedestruktivní metody společně s výstupy z měření (relativní dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti).

Předložená diplomová práce splnila stanovené cíle. V práci jsou uvedeny poznatky o vlivu teplotního zatížení na dynamické moduly pružnosti a pevnosti správkových hmot a poznatky o využitelnosti dynamických nedestruktivních metod, ultrazvukové impulzové a rezonanční, pro hodnocení správkových hmot vystavených působení vysokých teplot.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRADÁČOVÁ, Isabela. *Stavby z hlediska požární bezpečnosti*. 1. vyd. Brno: ERA, 2007, vi, 156 s. Technická knihovna (ERA). ISBN 978-80-7366-090-1.
- [2] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2010, 189 s. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [3] WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 336 s. ISBN 80-010-3157-8.
- [4] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí I*. 1. vyd. Praha: ČBS Servis, 2005, 307 s. ISBN 80-903-5020-8.
- [5] PAVLÍK, Adolf a Jaroslav DOLEŽEL. *Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977, 275 s.
- [6] MARTINČEK, Gustáv. *Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1962, 242 s.
- [7] GALAN, Andrej. *Kombinované ultrazvukové metódy skúšania betónu: vysokoškolská príručka pre stavebné fakulty vysokých škôl*. 1.vyd. Bratislava: Veda, 1984, 149 s.
- [8] SCHMIDT, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: Stavební zkušebnictví*. Brno, 48 s.
- [9] JONES, Ronald a E GATFIELD. *Testing concrete by an ultrasonic pulse technique*. London: H.M. Stationery Off., 1955, 48 s.
- [10] ANTON, Ondřej. *Základy zkušebnictví: návody do cvičení*. Brno: CERM, 2002, 61 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2079-0.
- [11] PIRNER, Miroš. *Dynamika stavebních konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 488 s. Technický průvodce (SNTL). ISBN 80-030-0000-9.
- [12] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. *Modul pružnosti betónu* [online]. In: Trnava, 2008 [cit. 2015-08-25]. Dostupné z:  
[http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul\\_pruznosti.pdf](http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul_pruznosti.pdf)
- [13] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.

- [14] HELA, Rudolf a Lenka BODNÁROVÁ. *New generation cement concretes: ideas, design, technology and applications 2 : LLP - Erasmus 8203-0519/IP/Košice 03/REN*. 2nd, enl. and updated ed. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 2009, 174 s. ISBN 978-80-214-3887-3.
- [15] CASTELLOTEA, M, C ALONSOA, C ANDREDEA, X TURRILLASA a J CAMPOC. *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction*. Cement and Concrete Research 34, 2004.
- [16] KHOURY, G.A. *Design of concrete for better performance in fire*. IMechE, 1992. C438/042.
- [17] HAGER, I. *Behaviour of high performance concretes at high temperature - evolution of mechanical properties*, PhD thesis (of french). Ecole Nationale des Ponts at Chaussées, november 2004.
- [18] HAGER, I, PIMIENTA, P. *Impact of the polypropylene fibres on the mechanical properties of HPC concrete*. Proceesing of Sixth Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC), BEFIR 2004, September 2004, Varenna, Italy.
- [19] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [20] Bodnarova, L. , Valek, J. , Sitek, L. , Foldyna, J. *Effect of High Temperatures on Cement Composite Materials in Concrete Structures*. — *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2013, v. 10, No. 2 (170), s. 173—180.
- [21] [Http://www.radka.cz/cs/produkty](http://www.radka.cz/cs/produkty). *RADKA spol. s r.o.* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://www.radka.cz/cs/produkty/vinnapas-5043-n/>
- [22] [Http://www.krampeharex.com/cz/vlakna.htm](http://www.krampeharex.com/cz/vlakna.htm). *Krampeharex spol. s r.o.* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://www.krampeharex.com/index.php?id=1690&L=3>
- [23] [Http://cze.sika.com/cs/group.html](http://cze.sika.com/cs/group.html). *Sika* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/001aaf50-b027-300f-81d6-24b11249b8d7/SikaTop-122%20SP.pdf>

- [24] [Http://cze.sika.com/cs/group.html](http://cze.sika.com/cs/group.html). *Sika* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://cze.sika.com/dms/getdocument.get/885e2941-2f91-3e4a-8304-3b81396128b7/Sika%20MonoTop-612.pdf>
- [25] ČSN 730810. *Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení*.
- [26] ČSN EN 13501 +A1. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*.
- [27] ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*.
- [28] ČSN EN 1363-1. *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*.
- [29] ČSN EN 1363-2. *Zkoušení požární odolnosti - Část 2: Alternativní a doplňkové postupy*.
- [30] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*.
- [31] ČSN EN 1992-1-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*.
- [32] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2011.
- [33] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*.
- [34] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*.
- [35] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*.
- [36] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 2005.
- [37] ASTM C215-14. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*.
- [38] ČSN 73 1380. *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury*.
- [39] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*.
- [40] ČSN EN 14647. *Hlinitanový cement - Složení, specifikace a kritéria shody*.

- [41] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor.*
- [42] ČSN EN 1097-3. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva.*
- [43] ČSN 72 1171. *Stanovení hmotnosti, pórovitosti a mezerovitosti kameniva.*
- [44] ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti.*
- [45] ČSN EN 12190. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt.*
- [46] ČSN EN 1008. *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.*
- [47] ČSN EN 1504-3. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce.*
- [48] ČSN EN 14146. *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence).*
- [49] ČSN EN 12371. *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení mrazuvzdornosti.*

## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Modelování teploty plynů během požáru [3].....	16
Obr. 2: Teplotní křivky podle ČSN EN 1363-1[28] a ČSN EN 1363-2[29] [1] .....	18
Obr. 3: Vývoj normalizované intenzity minerálů portlandského cementového tmele [15].....	24
Obr. 4: Křivky DTA jednotlivých kameniv při nárůstu teploty 10 °C/min v dusíku [16].....	25
Obr. 5: Schéma výskytu explozivního odprýskávání v důsledku zvýšení nárůstu vnitřního tlaku v ohřívaném prvku [17] .....	26
Obr. 6: Změny pevnosti betonu v tlaku při zahřívání, dle EUROKÓDU 2 (Třída 1-3) a výsledky betonů na bázi vápencového kameniva [17].....	27
Obr. 7: Deformační diagram pro beton $R_c = 100$ MPa [18].....	27
Obr. 8: Změny modulu pružnosti betonu na bázi vápencového kameniva při zahřívání [17] .	28
Obr. 9: Průchod ultrazvukových impulzů při defektu v betonu [6] .....	33
Obr. 10: Poloha sond při měření: a) příčná, b) šikmá, c) na povrchu [7] .....	35
Obr. 12: Umístění sond při měření vlastního podélného kmitání tělesa [10] .....	38
Obr. 13: Umístění sond při měření vlastního příčného kmitání tělesa [10] .....	38
Obr. 14: Umístění sond při měření vlastního krouživého kmitání tělesa [10].....	39
Obr. 15: Měření ultrazvukovou impulzovou metodou.....	49
Obr. 16: Označení míst pro osazení snímače zrychlení a úder kladívka.....	50
Obr. 17: Umístění sondy a kladívka při zjišťování vlastní příčné frekvence postupem dle ČSN 73 1380 [38] .....	50
Obr. 18: Křivky zrnitosti kameniva.....	53
Obr. 19: Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na působící teplotě .....	84
Obr. 20: Změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulzovou metodou.....	85
Obr. 21: Změna relativního dynamického modulu pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření ultrazvukovou impulzovou metodou .....	85



Obr. 22: Změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání v závislosti na působící teplotě .....	86
Obr. 23: Změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání v závislosti na působící teplotě .....	86
Obr. 24: Změna relativního dynamického modulu pružnosti v závislosti na působící teplotě z měření rezonanční metodou .....	87
Obr. 25: Změna pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na působící teplotě .....	87
Obr. 26: Změna pevnosti v tlaku v závislosti na působící teplotě.....	88
Obr. 27: Změna objemové hmotnosti v závislosti na působící teplotě .....	88
Obr. 28: Rozdíly dynamických modulů pružnosti a relativních dynamických modulů pružnosti při různém teplotním zatížení .....	108
Obr. 29: Závislost mezi relativním dynamickým modulem pružnosti a pevnostmi .....	109
v tahu za ohybu a v tlaku (ultrazvuková impulzová metoda).....	109
Obr. 30: Závislost mezi relativním dynamickým modulem pružnosti a pevnostmi .....	109
v tahu za ohybu a v tlaku (rezonanční metoda).....	109
Obr. 31: Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu a pevnostmi v tahu za ohybu a v tlaku (ultrazvuková impulzová metoda) .....	110
Obr. 32: Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti v tlaku a v tahu a pevnostmi v tahu za ohybu a v tlaku (rezonanční metoda) .....	110
Obr. 33: Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu (ultrazvuková impulzová metoda) při daném zatížení s křivkou dle EUKÓDU 2.....	112
Obr. 34: Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu (rezonanční metoda) při daném zatížení s křivkou dle EUKÓDU 2 .....	112

## 8 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Návrh konstrukce zohledňující účinky požáru .....	19
Tab. 2: Probíhající změny v betonu během vysokých teplot [14].....	22
Tab. 3: Koeficienty lineární tepelné roztažnosti pro různé druhy kameniva [14].....	24
Tab. 4: Rychlost šíření UZ impulzů v hornině a v betonu z dané horniny [5].....	31
Tab. 5: Poměr vlastních kmitočtů podélného, příčného a kroutivého kmitání hranolů[6].....	41
Tab. 6: Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku cementů .....	52
Tab. 7.1: Výsledky stanovení sypné hmotnosti volně sypaného a setřeseného kameniva a objemové hmotnosti zrn kameniva .....	52
Tab. 7.2: Výsledky síťového rozboru kameniva.....	53
Tab. 8: Složení správkových hmot na 1m <sup>3</sup> .....	54
Tab. 9.1: Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku srovnávacích vzorků správkových hmot.....	55
Tab. 9.2: Výsledky měření srovnávacích vzorků správkových hmot .....	57
ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou .....	57
Tab. 10.1: Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku správkových hmot po teplotním zatížení.....	61
Tab. 10.2: Výsledky měření těles ultrazvukovou impulzovou a rezonanční metodou na správkových hmotách před a po teplotním zatížení.....	64
Tab. 11: Popis zkušebních těles před a po teplotním zatížení.....	76
Tab. 12: Rozdíly sledovaných parametrů v závislosti na působící teplotě .....	82

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$X_{d,fi}$	mechanické materiálové vlastnosti
$k_{\theta}$	redukční součinitel závislý na teplotě materiálu
$X_k$	charakteristická hodnota za normální teploty
$\gamma_{M,fi}$	součinitel spolehlivosti při požární situaci
$X_{k,\theta}$	charakteristická hodnota závislá na teplotě
$E_{D,fi}$	návrhový účinek zatížení vlivem teplotní roztažnosti a deformace
$R_{d,t,fi}$	požadovaná návrhová únosnost při požáru
$E_d$	návrhová hodnota síly (momentu) při běžné teplotě (20 °C)
$\eta_{fi}$	redukční součinitel pro úroveň zatížení
$t_{d,fi}$	normová požární odolnost
$t_{fi,req}$	požadovaná požární odolnost
$\lambda_L$	délka podélné vlny ultrazvukového vlnění
$E_{dyn}$	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu, zjištěny ultrazvukovou impulzovou metodou
$v_L$	rychlost šíření podélného ultrazvukového impulzu
$L$	délka měřicí základny
$T$	čas, který uplyne při průběhu impulzu základnou
$t_{kor}$	korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření ultrazvukových impulzů, který se zjistí případně při kalibraci přístroje
$f_u$	vlastní frekvence ultrazvukového budiče
$a, b$	rozměry příčného řezu tělesa kolmého na směr prozvučování
$h$	tloušťka desky
$\nu_d$	dynamický Poissonův koeficient dle zkoušeného materiálu
$B, S$	budicí a snímací sonda
$E_{cu}$	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu, zjištěny ultrazvukovou impulzovou metodou

$\rho$	objemová hmotnost betonu
$k$	součinitel rozměrnosti prostředí při ultrazvukové impulzové a rezonanční metodě
$E_{crL}$	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu, zjištěný rezonanční metodou
$f_L$	první vlastní kmitočet podélného kmitání tělesa, zjištěný rezonanční metodou
$E_{crf}$	dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu, zjištěný rezonanční metodou
$c_1$	korekční součinitel, který zahrnuje vliv smyku a setrvačných momentů při kmitání tělesa
$f_f$	první vlastní kmitočet příčného kmitání tělesa, zjištěný rezonanční metodou
$i^2$	poloměr setrvačnosti příčného řezu tělesa k ose kolmé na rovinu kmitání
$G_{cr}$	dynamický modul pružnosti betonu ve smyku, zjištěný rezonanční metodou
$f_t$	první vlastní kmitočet krouživého kmitání tělesa, zjištěný rezonanční metodou
$\nu_{cr}$	dynamický Poissonův koeficient, zjištěný rezonanční metodou
$R_f$	pevnost v tahu za ohybu zkušebních těles
$F_f$	zatěžovací síla při zlomení zkušebního tělesa při stanovení pevnosti v tahu za ohybu
$l$	vzdálenost mezi podporami zkušebního tělesa při stanovení pevnosti v tahu za ohybu
$b$	strana čtvercového průřezu zkušebního tělesa při stanovení pevnosti v tahu za ohybu
$R_c$	pevnost tlaku zkušebních těles
$F_c$	nejvyšší zatěžovací síla při porušení zkušebního tělesa při stanovení pevnosti v tlaku
$A$	zkoušená plocha 1600 mm <sup>2</sup> při stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles
$f$	procento jemných částic při síťovém rozboru
$M_1$	suchá hmotnost zkušební navážky při síťovém rozboru
$P$	hmotnost vytříděného materiálu zbylého na dně při síťovém rozboru
$\rho_b$	sypná hmotnost volně sypaného kameniva
$m_1$	hmotnost prázdné nádoby při stanovení sypné hmotnosti kameniva
$m_2$	hmotnost nádoby s navážkou při stanovení sypné hmotnosti kameniva
$V$	objem nádoby při stanovení sypné hmotnosti kameniva

$\rho_t$	sypaná hmotnost setřeseného kameniva
$m_{2t}$	hmotnost nádoby naplněná setřeseným kamenivem
$\rho_{rd}$	objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně
$\rho_w$	hustota vody při zkušební teplotě
$M_1$	hmotnost vodou nasáklého a povrchově osušeného kameniva na vzduchu
$M_2$	hmotnost pyknometru obsahujícího vzorek nasáklého kameniva a vodu
$M_3$	hmotnost pyknometru naplněného vodou
$M_4$	hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky na vzduchu
$W$	hmotnost zkušebního tělesa při stanovení objemové hmotnosti
$V$	objem zkušebního tělesa při stanovení objemové hmotnosti
$RDM_{UPPT,ti}$	relativní dynamický modul pružnosti, zjištěný ultrazvukovou impulzovou metodou
$T_{S,0}$	počáteční doba průchodu ultrazvukových impulzů ve zkušebním tělese
$T_{S,ti}$	doba průchodu ultrazvukových impulzů po teplotním zatížení při teplotě $t_i$
$RDM_{FF,ti}$	relativní dynamický modul pružnosti, zjištěný rezonanční metodou
$f_{ti}$	vlastní frekvence měřená po teplotním zatížení při teplotě $t_i$ ( $i=200, 400, 600$ a $800$ °C), zjištěná rezonanční metodou
$f_0$	počáteční vlastní frekvence, zjištěná rezonanční metodou
$\Delta Z$	dynamické moduly pružnosti v tlaku a v tahu vyjádřeny v procentech
$E_{ti}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu při teplotě $t_i$ (200, 400, 600, 800°C)
$E_{20\text{ °C}}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu při teplotě 20 °C
$\Delta P_{ti}$	změna sledovaného parametru (dynamický modul pružnosti, rychlost šíření ultrazvukového impulzu, pevnosti, objemová hmotnost) při teplotě zatěžování $T_i$
$p_{ti}$	hodnota sledovaného parametru při teplotě zatěžování $T_i$ ,
$p_0$	hodnota sledovaného parametru před teplotním zatěžováním.

## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Technický list – SikaTop – 122 SP

Příloha 2: Technický list – Sika MonoTop – 612