



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV FYZIKY

INSTITUTE OF PHYSICS

# VYUŽITÍ AKUSTICKÝCH METOD PRO ANALÝZU BETONU A ŽELEZOBETONU NAMÁHANÉHO ZVÝŠENOU TEPLOTOU

THE USE OF ACOUSTIC METHODS FOR THE ANALYSIS OF CONCRETE AND  
REINFORCED CONCRETE STRESSED BY HIGH TEMPERATURE

## DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Daniela Kysilková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. ZDENĚK CHOBOLA, CSc.

BRNO 2024

Listinná verze disertační práce je uložena v Knihovnickém informačním centru Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně.

Elektronická verze disertační práce je uložena v Digitální knihovně VUT v Brně – institucionálním repozitáři provozovaném Ústřední knihovnou na systému DSpace, dostupném online na adrese: <https://dspace.vutbr.cz>

## **ABSTRAKT**

Disertační práce je zaměřena na ověření vhodnosti použití akustických metod pro analýzu betonových a železobetonových konstrukcí, které byly vystaveny tepelné degradaci.

Pomocí nedestruktivních i destruktivních metod testování byl sledován průběh a vliv tepelné degradace na vlastnosti zkušebních těles.

Pro testování bylo využito takových akustických metod, u kterých je systém měření rychlý a snadno dostupný. Hlavní metodou testování byla metoda Impact – Echo. Dalšími ověřovacími metodami nedestruktivního testování byly metody nelineární akustická spektroskopie, ultrazvuková impulsová metoda, metoda impedanční spektroskopie a metoda MLS. Výsledky vybraných zkušebních metod byly porovnávány s běžnými destruktivními zkouškami, a to pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu. Pro sledování změn, které nastaly vlivem tepelné degradace na povrchu zkušebních těles, byl použit konfokální mikroskop.

Parametry získané měřeními daných metod byly vyhodnoceny a byla posuzována jejich vzájemná korelace. Na základě získaných výsledků byly vybrány ty parametry, které nejlépe popisovaly vliv tepelné degradace na strukturu a míru poškození testovaných těles.

Závěrem byla vybrána nejvhodnější a nejdostupnější akustická metoda nedestruktivního testování, která byla vyhodnocena jako nástroj pro spolehlivou a rychlou inspekci stavu a změn ve struktuře betonových a železobetonových konstrukcí, které byly namáhány vysokou teplotou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tepelná degradace, Beton, Teplota, Železobeton, Metoda Impact-Echo, Diagnostika, Nedestruktivní metody testování

## **ABSTRACT**

The dissertation thesis is focused on verifying the appropriateness of using acoustic methods for the analysis of concrete and reinforced concrete structures that have been exposed to high - temperature degradation. Using non-destructive and destructive testing methods, the progress and effect of high-temperature degradation on the properties of the test specimens was observed. Acoustic methods were used for testing, where the measurement system is fast and easily accessible. The main testing method was the Impact-Echo method. Other verification methods of non-destructive testing were non-linear acoustic spectroscopy methods, ultrasonic pulse method, impedance spectroscopy method and MLS method. The results of the selected test methods were compared with conventional destructive tests, namely compressive strength and tensile strength after bending. A confocal microscope was used to monitor the changes that occurred due to thermal degradation on the surface of the test specimens. The parameters obtained by measuring the given methods were evaluated and their mutual correlation was assessed. Based on the obtained results, the parameters that best described the effect of thermal degradation on the structure and degree of damage of the tested bodies were selected. In conclusion, the most appropriate and affordable acoustic method of non-destructive testing was selected, which was evaluated as a tool for reliable and quick inspection of the condition and changes in the structure of concrete and reinforced concrete structures that were stressed by high temperature.

## **KEYWORDS**

Thermal degradation, Concrete, Temperature, Reinforced concrete, Impact-Echo method, Diagnostics, Nondestructive testing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Ing. Daniela Kysilková, *Využití akustických metod pro analýzu betonu a železobetonu namáhaného zvýšenou teplotou*. Brno, 2024, 108 s., 110 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Zdeněk Chobola, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem „Využití akustických metod pro analýzu betonu a železobetonu namáhaného zvýšenou teplotou“ je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Daniela Kysilková  
autorka práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem svoji disertační práci na téma „Využití akustických metod pro analýzu betonu a železobetonu namáhaného zvýšenou teplotou“ zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Daniela Kysilková  
autorka práce

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala v první řadě své rodině, která mne po celou dobu mého studia vždy podporovala. Velké díky patří také mému odbornému školiteli prof. RNDr. Zdeňku Chobolovi, CSc. za jeho odborné vedení a jeho podporu jak při řešení vědeckých činností, tak i při řešení situací v osobní rovině. Dále bych chtěla poděkovat paní Lence Kalové za její ochotu, laskavost a pochopení. Nemalé poděkování patří i všem mým kolegům z ústavu fyziky a Ing. Michaelovi Tupému, Ph.D. z ústavu THD, každý z nich byl pro mne inspirací a jsem vděčná za jejich pomoc a cenné rady, kterými mne posouvali dál. Děkuji kolegovi Ing. Richardovi Dvořákovi, Ph.D. za jeho věcné rady a za to, že ve mne zase probudil ten zapál pro vědu. Děkuji Mgr. Ivě Staňkové za gramatickou korekci mé práce.

Moje osobní poděkování patří mému muži Michalovi, mé mamince Aničce a mým dvěma dcerám Josefínce a Valentýnce za jejich trpělivost, pomoc a podporu v průběhu dokončování této práce. Svým dvěma dcerám z celého srdce děkuji, že společně s tátou a babičkou zvládly období, kdy jsem na ně neměla tolik času.

Děkuji všem, kteří byli součástí mého studia na Fakultě stavební. Absolvováním VUT FAST jsem získala nejen cenné vědomosti a kvalitní průpravu do praxe, ale také pevná přátelství a vzácné vzpomínky.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>12</b>
2.1	POŽADAVKY POŽÁRNÍ ODOLNOSTI NA STAVEBNÍ KONSTRUKCE .....	12
2.1.1	<i>Legislativní ustanovení požární ochrany</i> .....	12
2.1.2	<i>Parametry požární odolnosti</i> .....	13
2.2	VLIV TEPELNÉ DEGRADACE NA BETONOVÉ A ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE .....	14
2.2.1	<i>Charakteristické vlastnosti betonu a železobetonu</i> .....	14
2.2.1	<i>Tepelné zatížení betonu</i> .....	15
2.2.2	<i>Mechanické vlastnosti zahřívaného betonu</i> .....	18
2.2.3	<i>Vliv vysokých teplot na jednotlivé složky betonu</i> .....	21
2.2.4	<i>Průběh tepelného zatížení</i> .....	24
2.2.5	<i>Hodnocení betonové konstrukce po požáru</i> .....	26
2.3	NEDESTRUKTIVNÍ METODY TESTOVÁNÍ .....	27
2.4	AKUSTIKA .....	28
2.4.1	<i>Vlnění</i> .....	28
2.4.2	<i>Mechanické kmitání</i> .....	29
2.5	VYBRANÉ AKUSTICKÉ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ .....	29
2.5.1	<i>Metoda akustické emise</i> .....	29
2.5.2	<i>Kladívková rezonanční metoda – Metoda Impact-Echo</i> .....	33
2.5.3	<i>Metoda nelineární akustické (ultrazvukové) spektroskopie</i> .....	40
2.6	SROVNÁVACÍ METODY POUŽITÉ PRO DANOU PROBLEMATIKU .....	43
2.6.1	<i>Ultrazvuková impulzová metoda</i> .....	43
2.6.2	<i>Metoda impedanční spektroskopie</i> .....	45
2.6.3	<i>Metoda MLS – buzení pseudonáhodným signálem</i> .....	46
2.6.4	<i>Konfokální mikroskop</i> .....	47
2.6.5	<i>Destruktivní metody zkoušení</i> .....	48
<b>3</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>POUŽITÉ METODY TESTOVÁNÍ</b> .....	<b>50</b>
4.1	PLÁN VÝZKUMU .....	50
4.2	ZVOLENÉ METODY TESTOVÁNÍ.....	51
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>52</b>
5.1	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	52
5.2	DEGRADAČNÍ PROCESY .....	53
5.3	APLIKACE VYBRANÝCH METOD TESTOVÁNÍ .....	54
5.3.1	<i>Výsledky metody Impact-Echo</i> .....	54
5.3.2	<i>Výsledky měření pomocí ultrazvukové impulzové metody</i> .....	61
5.3.3	<i>Výsledky měření metodou impedanční spektroskopie</i> .....	64
5.3.4	<i>Výsledky sledování povrchu konfokálním mikroskopem</i> .....	67
5.3.5	<i>Výsledky metody nelineární akustické spektroskopie</i> .....	70
5.3.6	<i>Výsledky měření metodou MLS (Buzení pseudonáhodným signálem)</i> .....	72
5.3.7	<i>Pevnost v tahu za ohybu</i> .....	75
5.3.8	<i>Pevnost v tlaku</i> .....	76
5.3.9	<i>Změna objemové hmotnosti</i> .....	77



---

5.3.10	Vzájemná korelace naměřených hodnot .....	78
5.3.11	Testování zkušebních těles s výztuží .....	81
5.3.12	Využití akustických metod pro testování stavebních materiálů obsahujících pryžové částice a polymerová pojiva vystavených tepelné degradaci.....	86
5.3.13	Diskuse k výsledkům .....	90
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>91</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>94</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>104</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>105</b>
<b>11</b>	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>108</b>
11.1	PODÉLNÁ REZONANČNÍ FREKVENCE CYKlicky ZATĚŽOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	108
11.2	RELATIVNÍ AMPLITUDA SIGNÁLŮ A VÝKONOVÉ SPEKTRUM .....	109
11.3	KORELAČNÍ DIAGRAM VYZTUŽENÝCH TĚLES .....	110

## 1 ÚVOD

V současné době, kdy stále vzrůstá trend rozvoje infrastruktury a díky tomu vzrůstá i vývoj stavebního průmyslu, jsou na stavební materiály i celé konstrukce kladeny stále větší požadavky. Beton jako takový se řadí mezi hlavní materiály téměř u všech druhů stavebních konstrukcí. Jeho vývoj prochází širokým spektrem výzkumů [1].

Nárůst automobilové dopravy a s ním spojený větší výskyt nehod s přítomností požáru v místech betonových konstrukcí je jedním z dalších kritérií, které ovlivňují životnost a funkčnost některých staveb. Působením požáru dochází k intenzivnímu teplotnímu zatížení betonových ploch konstrukcí, teploty dosahují mnohdy i více než 1350 °C za velmi krátký časový úsek. Intenzita takového zatížení je ovlivněna vzdáleností a velikostí ložiska požáru [2;3]. Ovšem u všech staveb je požár stále se zvyšujícím problémem, který ovlivňuje další chování konstrukcí.

Dnešním jedním z důležitých faktorů při výstavbě stavebních konstrukcí je požadavek na požární odolnost těchto konstrukcí. Požární odolností se rozumí schopnost stavební konstrukce odolávat účinku plně rozvinutého požáru, aniž by došlo k narušení jejich únosnosti, stability, celistvosti a izolační schopnosti [4]. V případě výskytu požáru je ale potřeba ověřit stav konstrukce po této teplotní degradaci.

Monitorování stavu a kvality konstrukcí je důležité ve více fázích jejich životnosti. Proto je také vývoj nedestruktivního testování v oblasti diagnostiky stále aktuálním tématem a studium těchto metod je stále více žádoucí. Díky nejnovějším poznatkům vědy a techniky se tyto metody neustále rozvíjí a zdokonalují. Zdokonalují se také způsoby a struktura pro vyhodnocování výsledků a využívá se stále dokonalejší výpočetní technika [5]. Vývojem nedestruktivních metod se zabývají odborníci po celém světě a existuje celá řada publikací věnující se téhle problematice [5;18;19].

Cílem a výstupem obecně nedestruktivních metod testování (NDT), také nazývaných defektoskopie, je predikce životnosti či rizika spojená s dalším využíváním testovaného objektu. Jednou z výhod těchto metod je, že testovaný objekt zůstává po zkoušce v neporušeném stavu pro další jeho využití.

Nedestruktivní metody jsou metody diagnostické, jejich předností je především kontrola výrobku či struktury konstrukce v provozní fázi, ale také v oblasti výzkumu a vývoje. V dnešní době by bez defektoskopie nebyla zajištěna spolehlivost, bezporuchovost a bezpečnost v mnoha odvětvích průmyslu (chemický, letecký, jaderná energetika, strojírenství, aj.). Zajišťují také bezpečnost ve stavebnictví, a to u mostů, přehrad, dálnic a dalších stavebních konstrukcí. Díky technickému vývoji těchto metod se dá stále více využívat kontinuální monitorování dopravních i stavebních konstrukcí a díky tomu získat velké množství dat o historickém průběhu vlastností těchto konstrukcí a tím provádět jak jejich kontrolu, tak i predikci možných defektů, změnu materiálových vlastností způsobenou okolními vlivy. Výsledná vyhodnocení mají významnější charakter pro určení degradace, pokud bylo získáno dostatečné množství měření již v počátku životnosti konstrukce.

Žádná defektoskopická metoda ovšem není použitelná tak, aby splnila všechny požadavky pro kontrolu za všech okolností, kterým může být konstrukce vystavena.

Nedestruktivní metody už dnes odhalí nejen vady v konstrukci, ale také typ této vady, její rozměry a lokalizaci ve zkoumaném objektu. Jsou schopny přispět k popisu chování technických struktur a to vše, jak bylo již zmíněno, bez nutnosti destruktivního zásahu do konstrukce.

Metod nedestruktivního testování je velké množství, ovšem jejich rozvoj ve stavebnictví není snadný. Metody se navzájem doplňují a napomáhají tak k lepšímu a přesnějšímu odhalení vzniklých materiálových změn a tím odhalení pravděpodobných defektů konstrukcí či materiálů.

Aktuálním tématem jsou bezpodmínečně i akustické metody testování. Diagnostika rozsahu poškození materiálu akustickými metodami je závislá na změně parametrů, které ovlivňují akustickou odezvu. Parametry, které se mohou vlivem degradace měnit, jsou například rychlost šíření zvuku v materiálu, objemová hmotnost, modul pružnosti a další. V případě, že při degradaci dochází ke změnám zmíněných parametrů, akustickými metodami lze tyto změny zaznamenat [6].

Tato práce se zaměřuje na ověření schopnosti akustických metod analyzovat míru poškození tepelně degradovaného betonu. Princip těchto metod, jejich výhody a vhodnost použití, a také porovnání parametrů získaných z jejich měření se srovnávacími metodami jsou popsány v další části této práce.

## 2 Současný stav poznání

### 2.1 Požadavky požární odolnosti na stavební konstrukce

V minulosti ve stavebnictví dominovaly převážně dřevěné konstrukce a na požadavky požární bezpečnosti nebyl kladen takový důraz. To mělo mnohdy za následek, že byl poškozen nejen objekt, ve kterém požár vznikl, ale i velká část okolních objektů.

V současné době, kdy jsou budovány stále vyšší, rozmanitější a provozně náročnější objekty, je také zvýšen požadavek na stavební prevenci těchto konstrukcí a tou je posuzování projektové dokumentace staveb, tzv. Požárně bezpečnostní řešení stavby (PBŘ), které je součástí všech stupňů projektové dokumentace objektu [7].

Projektová opatření požárně bezpečnostního řešení stavby mají za úkol zajištění únosnosti a stability nosných konstrukcí, jejich kompaktnost a izolaci požárně dělících konstrukcí po daný čas. Dále zahrnují zajištění bezpečného úniku osob, případně zvířat a majetku. Aby bylo zamezeno šíření požáru, je objekt již v návrhu dělen na požární úseky s navrženými zařízeními pro požární ochranu. Projektová příprava také uvažuje s odstupovými vzdálenostmi objektu od okolních staveb. Tímto opatřením se zamezí šíření požáru na okolní objekty. Další podstatnou částí projektové přípravy je návrh dostatečných přístupových cest, nástupních ploch a zajištění přístupu k požárním hydrantům, případně vodě určené pro hasební účely jednotek protipožárního zásahu [2].

#### 2.1.1 Legislativní ustanovení požární ochrany

Právní úpravu požární ochrany představuje především zákon o požární ochraně č. 133/1985 Sb. Zákon byl několikrát novelizován, poslední verzí je zákon č. 284/2021 Sb. v platném znění. A na něj navazující prováděcí předpisy [8].

Od 1. července nabylo plné účinnosti nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 305/2011, kterým se ruší směrnice Rady 89/108/EHS.

Požadavky na stavební výrobky s označením CE podle nařízení (EU) č. 305/2011, o stavebních výrobcích.

Základní charakteristiky stavebních výrobků jsou stanovené v harmonizovaných technických specifikacích s ohledem na obecné požadavky na stavby.

Těchto požadavků je uvedeno sedm [9]:

1. Mechanická pevnost a stabilita
2. Požární bezpečnost
3. Hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí
4. Bezpečnost a přístupnost při užívání
5. Ochrana proti hluku
6. Úspora energie a ochrana tepla
7. Udržitelné využívání přírodních zdrojů

V České republice je požární bezpečnost řešena souborem norem, také označovaných jako kodex norem požární bezpečnosti.

Normativními dokumenty požární ochrany jsou například [8]:

- Kmenové normy:
  - ČSN 73 0802 - Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty
  - ČSN 73 0804 - Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty
- Projektové normy:
  - ČSN 73 0810 - Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení
  - ČSN 73 0831 - Požární bezpečnost staveb – Shromažďovací prostory
  - ČSN 73 0833 - Požární bezpečnost staveb – Budovy pro bydlení a ubytování
  - ČSN 73 0834 - Požární bezpečnost staveb – Změny staveb
  - ČSN 73 0835 - Požární bezpečnost staveb – Budovy zdravotnických zařízení a sociální péče
  - ČSN 73 0842 - Požární bezpečnost staveb – Objekty pro zemědělskou výrobu
  - ČSN 73 0843 - Požární bezpečnost staveb – Objekty spojů a poštovních provozů
  - ČSN 73 0845 - Požární bezpečnost staveb – Sklady
- Klasifikační normy:
  - ČSN EN 13 501-1 až 5 + A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1. Až 5
- Zkušební normy:
  - ČSN EN 1363-1 - Zkoušení požární odolnosti – Část 1- 3
  - ČSN 73 0863 - Požární bezpečnost staveb – Stanovení šíření plamene po povrchu stavebních hmot

### 2.1.2 Parametry požární odolnosti

Mezi parametry požární odolnosti můžeme zahrnout například [7]:

- pravděpodobnost vzniku požáru, šíření, délka a charakter požáru
- podmínky ventilace
- typ, velikost a geometrie požárního úseku
- typ konstrukčních prvků
- podmínky evakuace

Požární odolnost staveb musí být dodržena po celou dobu životnosti stavby.

Pro posouzení chování konstrukce při požáru je nutné stanovit rozložení teplot v konstrukci a mechanická zatížení působící na konstrukci v průběhu požáru. Ke zhroucení konstrukce dojde, pokud je překročena kritická teplota.

## 2.2 Vliv tepelné degradace na betonové a železobetonové konstrukce

### 2.2.1 Charakteristické vlastnosti betonu a železobetonu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, beton se řadí mezi hlavní materiály téměř u všech druhů stavebních konstrukcí. Jedná se o velmi odolný kompozitní materiál, který je vyrobený ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody s dalším použitím širokého spektra přísad, příměsí nebo vláken. Svě vlastnosti získá hydratací cementu [10].

Pro své schopnosti odolávat různým přírodním i uměle vytvořeným podmínkám je navrhován do mnoha konstrukčních forem a prostředí.

Beton má stejně jako každý přírodní kámen malou pevnost v tahu a patří tak ke kompozitům s velmi rozdílnou pevností v tahu a tlaku. Pevnost v tahu je většinou pouze okolo 1/7 až 1/10 pevnosti v tlaku. Tato skutečnost je nedostatečná pro některé druhy konstrukcí, jako jsou například trámy a stropy. Pevnost v tahu se u betonu zvyšuje přidáním železné výztuže. Vložená výztuž je schopna zachytit tahové síly, a tak se konstrukce v tahové zóně zesílí [11]. Beton vyztužením železnou výztuží získá odolnost v tlaku i v tahu.

Pro výrobu železobetonu se obvykle používá ocelová výztuž kruhového průřezu s povrchem opatřeným příčnými žebírky nebo vtisky a je do betonu vkládána ve formě vzájemně provázaných tyčí nebo svařovaných sítí. Další variantou je tzv. drátkobeton.

Aby železobeton dobře fungoval, musí být splněny následující technické předpoklady:

- beton by měl řádným zpracováním vytvořit pro ocel vynikající korozní ochranu v důsledku dobré těsnosti a chemických vlastností (alkalické reakce)
- zda – li je dobrá přídržnost mezi ocelí a betonem, pak lze přenášet velké tahové síly
- součinitel tepelné roztažnosti betonu a oceli je přibližně stejný, tepelné změny tak neovlivňují chování únosnosti
- ocelová výztuž se při namáhání protahuje méně než beton a je při zatížení dříve namáhána než beton (omezení vzniku trhlin) [11].

Výztuž do betonu se v základu dělí na:

- betonářskou výztuž (měkká výztuž) - železobeton
- předpínací výztuž
- tuhé vložky
- vlákna do betonu – vláknobeton
- uhlíkové lamely

Díky přidání železné výztuže do betonu je dosaženo jeho požadovaných vlastností a variability aplikace. Využitím kombinace betonu a výztuže jsou u staveb a konstrukcí splněny požadavky na větší rozpětí, výšku a zatížení. Hloubka uložení výztuže v betonové směsi má nejen krycí, ale také statický charakter [12;13].

### 2.2.1 Tepelné zatížení betonu

Používáním betonu u budov a konstrukcí dosahujeme velkého stupně ochrany. Beton sám o sobě není hořlavý a svojí vysokou požární odolností nepřispívá k požárnímu zatížení, má nízkou tepelnou vodivost. Naopak je účinnou požární clonou a vytváří bezpečné únikové cesty. Čistý beton, bez hořlavých příměsí, neprodukuje při hoření kouř ani toxické plyny, neodkapávají z něj roztavené části, které by vedly k šíření požáru. Tepelně akumulativní vlastnost prostého betonu je vysoká, jeho měrná tepelná kapacita  $c = 1020 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [14;16].

Teplotní zásah do betonu není považován za degradační mechanismus, ale za stav, který je ovlivněn přímými vlivy z vnějšího okolí konstrukce. Ovšem působení vysokých teplot na betonové konstrukce má za následek fyzikálně chemické změny, a tím degradaci materiálu spojenou se snížením jeho mechanických vlastností [15].

Chování konstrukce při požáru je ovlivněno nejen kvalitou provedení a způsobu tepelné degradace, ale také:

- zvyšující se teplotou v závislosti na vývoji tepelné degradace a teploty plynů v požárním úseku
- rychlostí, délkou a rozložením tepelné zátěže
- vzdáleností konstrukce od zdroje tepelné zátěže
- rychlostí a typu chlazení tepelně zatížených konstrukcí
- teplotní roztažností materiálu a tím způsobenou deformací konstrukce
- vysokou teplotou jsou ovlivněny u železobetonových konstrukcí i vlastnosti oceli, pokles pevnosti a tuhosti konstrukce je tak výrazný, že konstrukce není schopna přenášet působící zatížení a může dojít k poškození konstrukce
- v případě velmi vysoké teploty působící na konstrukci je pokles pevnosti a tuhosti konstrukce tak velký, že konstrukce není schopna přenášet působící zatížení a může dojít ke zřícení [17].

Jak již bylo zmíněno, působením vysokých teplot na beton je jeho kvalita postupně zhoršena. Stejně jako při jiných degradačních mechanismech dochází i při tepelném zatížení betonových prvků ke změně mikrostruktury a transportním mechanismům cementového pojiva, jediným rozdílem je, že při degradaci zvýšenou teplotou dochází k poškození za kratší časový úsek. Beton, vystavený vysokým teplotám, podléhá degradaci vlivem rozkladu hydratační složky betonu a vlivem rozpadu kameniva. Tím dochází ke zhroucení struktury cementového gelu a s tím spojené ztrátě nosné kapacity. Důležitou roli hraje i rychlost zahřívání betonu, maximální dosažené teploty a doba působení teploty. Betonové konstrukce se v důsledku této tepelné zátěže způsobené požárem mohou zhroutit. To může být způsobeno ztrátou pevnosti a ztrátou jednotlivých částí betonu. Proto je jedním z hlavních problémů betonových konstrukcí vystavených tepelné zátěži tzv. Spalling.

Změny v mikrostrukturu betonu v závislosti na rozsahu teploty jsou patrné z Tab. 1.

Tab.1 Změny v mikrostruktuře betonu při zahřívání [2]

Rozsah teplot	Změny v mikrostruktuře betonu
20 – 200 °C	Pomalá ztráta fyzikálně vázané a volné vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. <ul style="list-style-type: none"> <li>- 80 °C – 150 °C dehydratace ettringitu</li> <li>- 150 °C – 170 °C rozklad sádrovce <math>\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math></li> </ul> Počátek dehydratace CSH gelu. Ztráta fyzikálně vázané vody.
300 - 400 °C	Praskání křemičitého kameniva (350 °C). Kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody.
400 - 500 °C	Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
500 – 600 °C	Přeměna křemene z fáze $\beta$ na $\alpha$ (573 °C) v kamenivu a písku.
600 – 800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$ .
800 – 1 000 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 840 °C – rozklad dolomitického vápence</li> <li>- 930 °C – 960 °C – rozklad kalcitu – <math>\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2</math></li> </ul> Začátek vzniku keramické vazby, která nahrazuje hydraulické vazby, doprovázeno uvolňováním oxidu uhličitého.
1 000 – 1 200 °C	Tvorba Wollastonitu $\beta$ ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1050 °C – tavení čediče</li> </ul>
$\geq 1\ 300$ °C	Celkový rozklad betonu, tavení některých složek.

Z Tab.1 je zřejmé, že z počátku tepelného zatížení dochází k odpařování volné vody, následuje odpaření fyzikálně vázané vody, a nakonec nastává proces odstraňování chemicky vázané vody a dochází ke snížení soudržných sil a rozpadu hydrátů. Můžou vznikat povrchové mikrotrhliny. Při teplotě okolo 80 - 150 °C dochází k rozpadu ettringitu. Současně probíhá rozkládání gelové struktury CSH sloučenin a sádrovce. Další výrazná změna ve struktuře betonu nastává po zahřátí na teplotu v rozmezí 400 °C – 500 °C. Při této teplotě dochází k výraznému rozpadu portlanditu. Díky tomuto procesu se snižují pevnostní vlastnosti cementového tmelu. Zahřátím nad teplotu 800 °C je pevnost mezi kamenivem a cementovým tmelem dána keramickými vazbami, které nahrazují vazby hydraulické. Od teploty 1000 °C nastává tvorba Wollastonitu [18]. Při dosažení teploty vyšší než 1300 °C přechází některé složky betonu do taveniny a začíná částečné slinování. Beton ztrácí své mechanické vlastnosti a nastává jeho degradace.

Publikace, zaměřující se na problematiku tepelné degradace betonů, uvádí další změny v mikrostruktuře betonu při dosažení určité tepelné degradace [2;19;20;21;22].

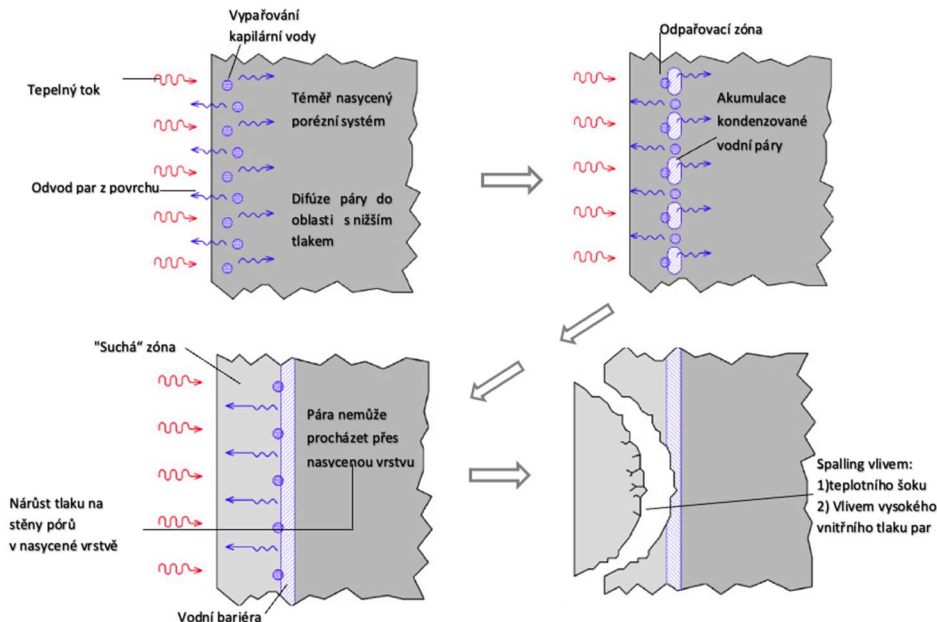


### 2.2.1.1 Spalling – Explosivní odprýskávání

Explosivní odprýskávání („Explosive spalling“) je jedním z nejvíce nebezpečných jevů při působení vysokých teplot. Při požáru se teplota může pohybovat až na hodnotě 1200 °C, tj. teplota, při které dochází k poškození betonové konstrukce. K explosivnímu odprýskávání může dojít ovšem i při nižších teplotách, a to i při 200 °C. Kritickým bodem spallingu je teplota 374 °C (kritická teplota vody), při této teplotě dochází k rychlému nárůstu tlaku vlivem přechodu kapalně vody do plynné fáze. Pravděpodobnost vzniku spallingu v průběhu požáru je vyšší u betonu s vysokou hustotou a nízkou pórovitostí a s vyšší mírou vnitřní vlhkosti.

Povrch betonové konstrukce se při požáru velmi rychle zahřívá. Důsledkem vzrůstu teploty je odpaření části vody. Vlhkost se tak přemísťuje pórovitou strukturou betonu do části s nižší teplotou. V těchto místech pak část vodních par kondenzuje a tím vzroste vlhkost a zamezí se tak dalšímu přesunu zbytkové vlhkosti. V této části pórů se ale stále odpařuje vodní pára, která má oproti vodě v kapalném stavu podstatně vyšší objem a tím jsou pórové tlaky vyšší. Důsledkem tohoto procesu může nastat již zmíněné odštěpování povrchových vrstev betonu [24]. Tento jev je ovšem těžko předvídatelný a je závislý na více faktorech, jako je složení betonu, pevnostní charakteristiky betonu, míra tepelného zatížení a nárůst teploty, distribuce a velikost pórů, stupeň nasycení materiálu vodou a na přítomnosti mikroskopických vad ve struktuře pojiva [25].

Spalling ohrožuje nejen okolí a osoby zasahující při likvidaci požáru, ale porušuje konstrukce samotné. U železobetonových konstrukcí může dojít vlivem spallingu k odhalení ocelové výztuže, která není většinou odolná proti působení vysokých teplot. Tato a další poškození vlivem spallingu značně komplikují sanační procesy těchto konstrukcí.



Obr. 1 Vznik spallingu v betonu [25;26]

## 2.2.2 Mechanické vlastnosti zahříváného betonu

Pevnost betonu při tepelné zátěži, či jeho ochlazování při hasících zákrocích, má velký vliv na bezpečnost a životnost konstrukcí. Odolnost železobetonové konstrukce vůči vysokým teplotám může být definována jako schopnost uchovat v případě požáru svoji původní funkci.

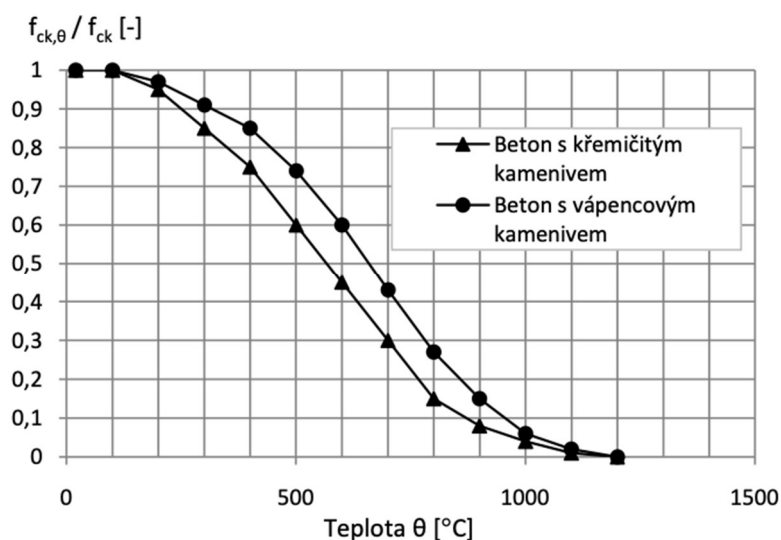
Analýza tepelného vlivu na beton je komplikovaná, a to z toho důvodu, že je beton složený ze dvou odlišných složek, cementového pojiva a kameniva. Nehledě na to, že druhy kameniva se liší svým mineralogickým složením. Výsledné změny, probíhající v betonu vystavenému ohni, jsou fyzikálními, tepelnými a mechanickými změnami vlastností betonu.

Zahřátím betonové konstrukce dojde v prvé řadě k poklesu jeho pevností v tlaku i tahu [2].

### 2.2.2.1 Pevnostní změny

#### Pevnost v tlaku

Změny pevnosti betonu v tlaku při působení vysokých teplot jsou patrné z Obr. 2. Relativní pevnost betonu vyjadřuje poměr pevností při běžných teplotách ku pevnostem při tepelném zatížení. Na obrázku jsou podle Eurokódu 2 (EC 2) vyznačeny hodnoty relativní pevnosti pro beton s křemičitým kamenivem a vápencovým kamenivem. Z grafu je zřejmé, že při působení teplot na betonovou konstrukci dochází k pevnostním změnám od teploty 300 °C. Beton s křemičitým kamenivem ztrácí svoji pevnost výrazněji oproti betonu s vápencovým kamenivem. Ztráty pevnosti v tlaku jsou při tepelné degradaci ve většině případů nevratné. Fyzikálně mechanické změny betonu, které ovlivňují změny pevnosti v tlaku, jsou při tepelné zátěži ovlivněny dalšími okolnostmi. Těmi jsou např. rychlost zahřívání, maximální dosažená teplota a délka jejího trvání, zatížení materiálu při tepelné degradaci atd.



Obr. 2 Relativní pevnost v tlaku betonu s rozdílným kamenivem v závislosti na působení vysokých teplot podle EC2 [34]

### Pevnost v tahu

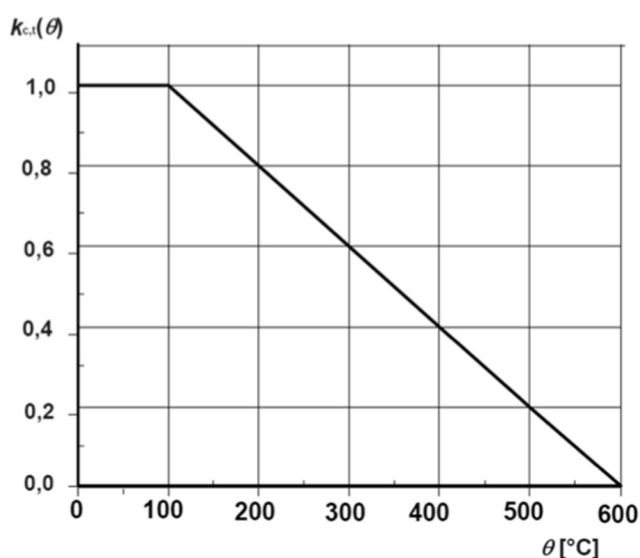
Pevnost v tahu povrchových vrstev betonu lze z fyzikálně mechanického hlediska považovat za nejdůležitější. Působení vysokých teplot na beton výrazně ovlivňuje zejména tahové pevnosti betonu a s tím spojený proces odštěpování. To je způsobeno vznikem mikrotrhlin v cementové matrici a vznik poruch v oblasti ztvrdlé cementové pasty a kameniva. Pevnost v tahu hraje významnou roli při tepelné degradaci betonu, její parametry mohou omezit počátek procesu odštěpování.

Diagnostika stavu betonové konstrukce zasažené požárem je z velké části pomocí fyzikálně chemické analýzy, jenž významně doplňuje fyzikálně mechanické parametry, které by měly ověřit míru poškození cementové matrice betonu, zejména stav kameniva v betonu. Z důvodů technických problémů při měření pevnosti v tahu je většina výsledků vztahujících se k pevnosti v tahu získána až po ochlazení konstrukce. Dostupné výzkumy ukázaly, že hodnoty pevnosti v tahu při tepelné zátěži mají vyšší hodnoty, než pevnosti v tahu získané po vychladnutí [30;32]. Ovšem norma ve většině případů doporučuje pevnost betonu v tahu zanedbat zcela. A v případě, že by do výpočetního vztahu bylo nutné uvažovat s pevností betonu v tahu, uvažuje se s charakteristickou pevností v tahu sníženou součinitelem  $k_{c,t}(\theta)$ . Redukce pevnosti betonu v tahu je dána dle následujícího vzorce:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) \cdot f_{ck,t} \quad (1)$$

Kde součinitel  $k_{c,t}(\theta)$  (Obr.3) má hodnotu 1,0 pro teploty v rozsahu 0-100°C a pro teploty nad 100°C do teploty 600°C je  $k_{c,t}(\theta)$  dáno:  $k_{c,t}(\theta)=1,0-1,0(\theta-100)/500$  [°C] [34].

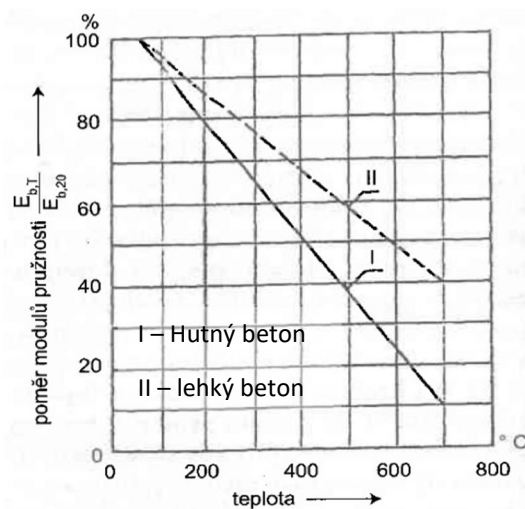
Jak už bylo zmíněno, při výskytu spallingu bývá významně ohrožena i ocelová výztuž konstrukce. Její stav je důležité sledovat, a je důležité také ověřit její vlastnosti, jako je pevnost v tahu a mez pevnosti v kluzu.



Obr. 3 Součinitel  $k_{c,t}(\theta)$  pro redukci pevnosti betonu v tahu  $f_{ck,t}$  v závislosti na teplotě [34]

### 2.2.2.2 Změna modulu pružnosti

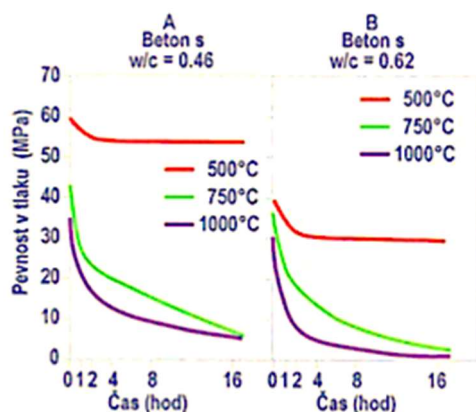
Modul pružnosti „E“ je jednou ze základních charakteristik betonu. Udává, do jaké míry bude beton deformován vlivem zatížení. Dělí se na statický a dynamický. Používá se jako základní charakteristika betonu pro výpočet deformací. Působením vysokých teplot je hodnota modulu pružnosti ovlivněna obdobně jako je vysokou teplotou ovlivněna pevnost v tlaku. Největší vliv na změnu modulu pružnosti působením vysokých teplot má druh kameniva, oproti tomu druh cementu má na hodnoty modulu pružnosti vliv minimální. Z Obr. 4 je patrné, že betony s křemičitým kamenivem mají výrazně větší pokles modulu pružnosti než betony s lehkým kamenivem, kde je pokles hodnot nižší [37].



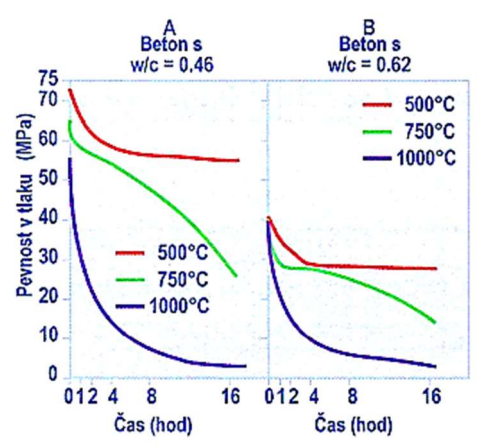
Obr. 4 Modul pružnosti betonů v závislosti na teplotě [37]

### 2.2.2.3 Vliv vlhkosti a vodního součinitele

Jak bylo již zmíněno, vlhkost je jedním z vlivů podílejícím se na destruktivním odprýskáváním povrchu betonu. Voda, kterou beton obsahuje, se při zahřívání mění na páru a tím roste v betonu tlak vodní páry. Při vysokém vodním součiniteli, kdy je beton pórovitější, uniká pára rychleji a tlak vodní páry je tak nižší. Ovšem při hutnější struktuře betonu může tlak vodní páry dosáhnout vysokých hodnot a tím dochází k explozivnímu odprýskávání povrchu betonu [28]. Vodní součinitel (w/c) při vysokých teplotách nemá v obvyklém poměru patrný vliv na chování betonu. Ovšem u některých publikací bylo dokázáno, že betony s nižším vodním součinitelem dosahují po tepelném zatížení vyšších pevností, to ale jiné výzkumy vylučují [2;64].



Obr. 5 Vliv teploty na pevnost v tlaku betonu obsahujících křemičité kamenivo [64]

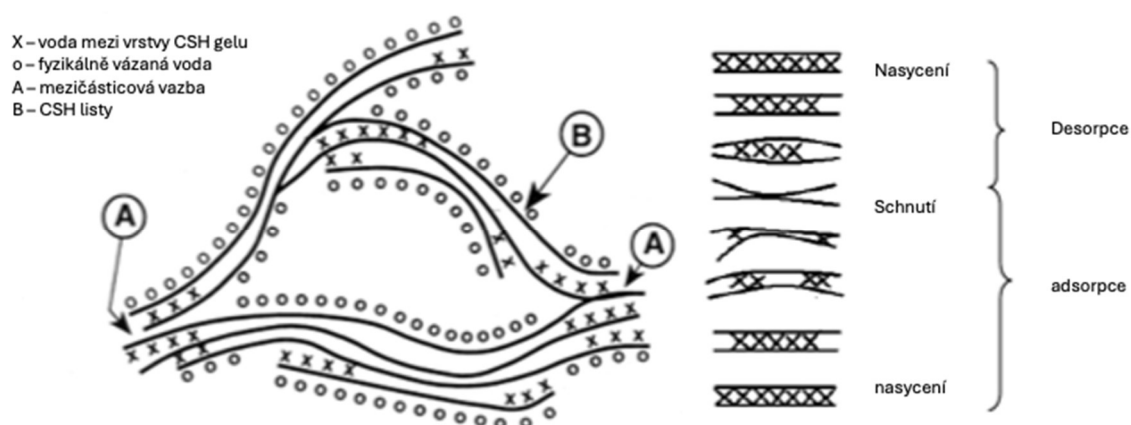


Obr. 6 Vliv teploty na pevnost v tlaku betonu obsahujících vápenaté kamenivo [64]

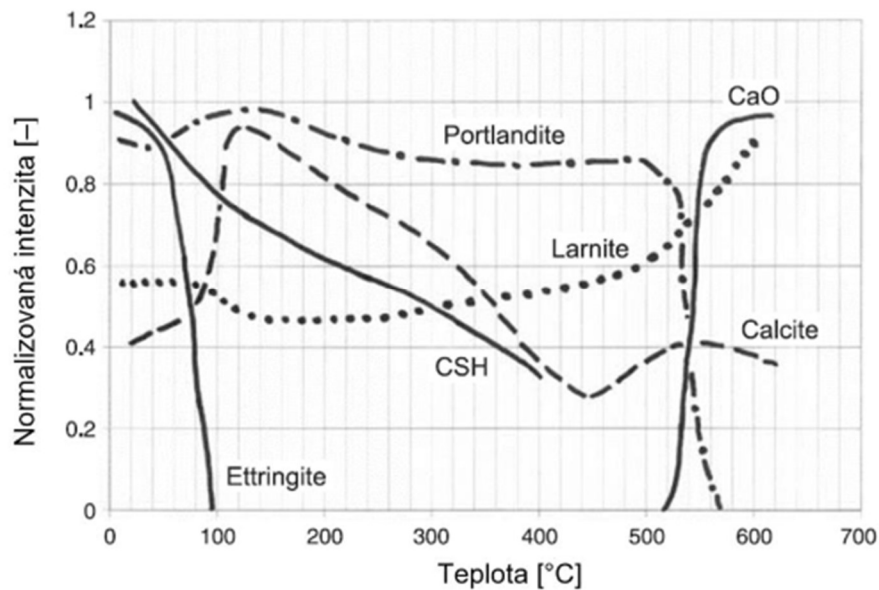
## 2.2.3 Vliv vysokých teplot na jednotlivé složky betonu

### 2.2.3.1 Vliv vysokých teplot na vlastnosti cementové pasty

Při vysokých teplotách požáru nastává u cementových past jako první úbytek vody. Nejprve se odpařuje volná voda (její změna nemá podstatný vliv na mechanicko fyzikální parametry betonu), následně se odpaří voda obsažená v kapilárách (její ztráta se projevuje smršťováním cementové pasty) a poté voda absorbovaná na povrchu jemných minerálů (při vysušování betonu se projevuje smršťováním). Poslední fází je proces odstraňování chemicky vázané vody, tzv. dehydratace. Důsledkem úbytku vody jsou ovlivňovány mechanické vlastnosti cementové pasty. Dehydratací CSH gelu se zvyšuje pórovitost cementové matrice a celkový objem průměrné velikosti pórů [31].



Obr. 7 Model struktury CSH gelu s částicemi vody ve volné nebo absorbované formě [10]



Obr. 8 Fáze dehydratace cementové pasty [32;33]

Z obrázku (Obr. 8) jsou patrné změny základních minerálů cementové pasty, portlanditu, CSH gelu, ettringitu, larnitu, kalcitu ( $\text{CaCO}_3$ ) a oxidu vápenatého ( $\text{CaO}$ ). Nejdříve dochází k rozpadu ettringitu při postupném dosažení teploty  $100^\circ\text{C}$ . Dehydratace CSH gelu, při pozvolném zahřívání nastává již od počátku tohoto zahřívání, tzn. že již při sušení na  $105^\circ\text{C}$ , které obvykle používáme na odstranění volné vody z materiálu, je způsobena dehydratace CSH gelu. U Portlanditu nastává významná dehydratace od  $500^\circ\text{C}$  a je přirozeně doprovázena zvýšeným množstvím  $\text{CaO}$  v cementové pastě. Zbytkové  $\text{CaO}$ , obsažené v cementové pastě po ochlazení, nemá v této struktuře další význam. Uhlíčan vápenatý  $\text{CaCO}_3$  (Kalcit) se rozkládá při teplotě nad  $650^\circ\text{C}$ . Změny larnitu jsou do teploty  $500^\circ\text{C}$  nepatrné.

Při pohledu na materiálové změny můžeme pozorovat, jak důležitou roli voda v materiálu plní [32].

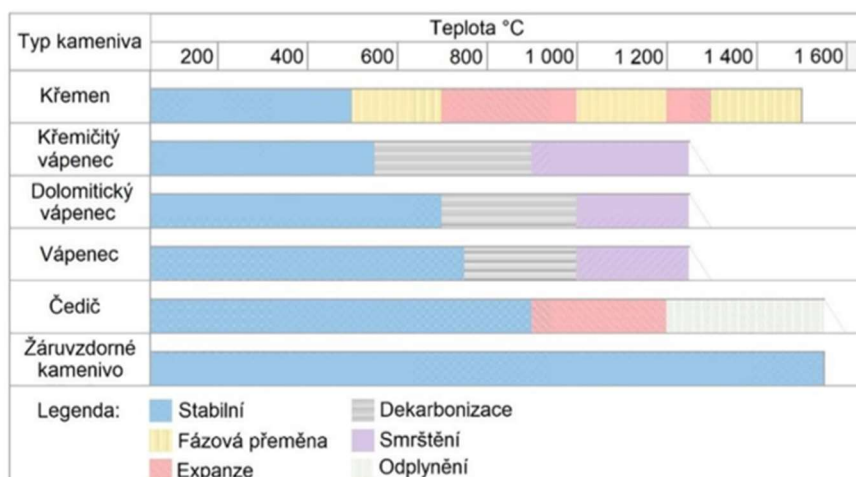
#### 2.2.3.2 Vliv vysokých teplot na vlastnosti kameniva

Kamenivo je zásadní složkou betonu, na kterou má působení vysokých teplot velký vliv. Kamenivo tvoří až 80 % objemu betonu a jeho volba má velký význam na odolnost a tepelnou stabilitu betonu při tepelném zatěžování. Kameniva různého mineralogického složení mají rozdílná chování při tepelném zatěžování, viz. Obr. 9 [36].

Běžně používaná kameniva jsou tepelně stabilní do teplot  $300^\circ\text{C}$ – $350^\circ\text{C}$ . Zahříváním betonu na vysoké teploty se objem kameniva ve většině případech zvětší. Ovšem reakce cementové pasty je opačná a její objem se smršťuje. Díky těmto změnám může docházet ke vzniku negativních materiálových přeměn a tím praskání betonové směsi.

Betony, obsahující kamenivo převážně s křemenem, mají výrazněji snížené pevnosti než betony s vápenatým kamenivem. U betonů s křemičitým kamenivem je nižší pevnost při teplotě okolo  $570^\circ\text{C}$ . V této fázi dochází k přeměně křemene z fáze  $\beta$  na  $\alpha$ . Viz. Tab 1.

Fyzikální a chemické změny složek, které v betonu nastávají důsledkem tepelné degradace, mají vliv na jeho únosnost a mohou vést také ke změnám v barvě zahřívaného betonu. Barevné změny jsou způsobené postupným odstraňováním vody a dehydratací cementové pasty a také vzniklými přeměnami v kamenivu. Křemičitá kameniva se při teplotě okolo 250 °C – 300 °C zbarví do červena, při teplotě 450 °C - 500 °C nastává béžové zbarvení, které může vést do šedé až bílé barvy. U vápenitého kameniva nastává okolo teploty 800 °C – 1000 °C zbarvení do bílé barvy [33;35].



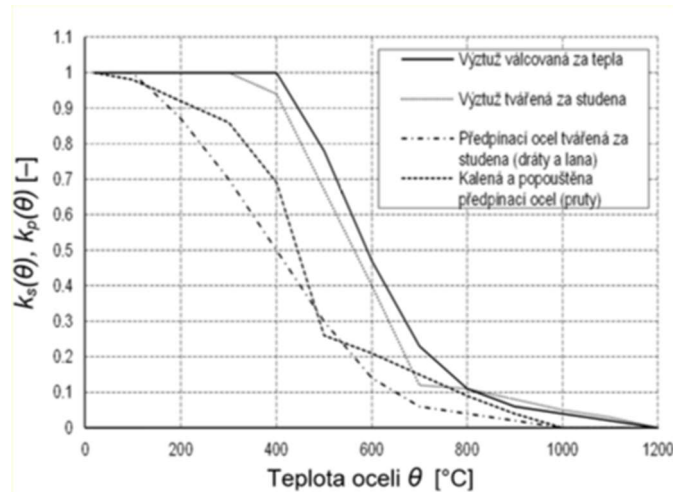
Obr. 9 Vliv vysoké teploty na chování kameniva [36]

### 2.2.3.3 Vliv vysokých teplot na ocelovou výztuž

Ocelová výztuž jako taková není příliš odolná proti požáru. Její požární odolnost závisí v první řadě na tloušťce krycí vrstvy, která udržuje výztuž pod teplotou 500 °C. Na hranici této teploty je mez kluzu výztuže snížena o 50 % oproti běžným hodnotám [34]. Vznikem sebemenších trhlin ve vrstvě betonu, chránícího ocelovou výztuž, vzniká riziko ohrožení chování celé vyztužené betonové konstrukce. Odhalená ocelová výztuž, zahřátá na vysokou teplotu, je podrobena v této fázi postupné degradaci a ztrátě základních mechanických vlastností a pevností. Při tepelné degradaci je zásadní, aby beton ochránil výztuž co nejdéle tak, aby se teplota výztuže udržela pod teplotou okolo 450 °C. Jakékoliv nedostatky v krycí betonové vrstvě mohou ohrozit chování železobetonové konstrukce. Rozdílem tepelné vodivosti dochází po čas požáru k odlišným teplotám v betonu a v oceli. Tento jev má za následek ztrátu soudržnosti mezi ocelí a betonem. Tím ztrácí konstrukce krycí betonovou vrstvu a odolnost zvyšujícímu se tahovému napětí [2].

Pevnostní charakteristiky oceli mají definováno několik oblastí. Do 400 °C je oblast beze změn pevnosti a charakteristiky oceli. V rozmezí teplot 450 °C – 650 °C se projevují první změny oceli. Od teploty 750 °C dochází k rekrystalizaci a redukcii pevnosti oceli a nad teplotou 900 °C dochází ke změknutí výztuže [2].

Změny vlastností oceli při tepelném namáhání mají pro konstrukci značný význam. Stejně jako při tepelné degradaci betonu mohou vést tyto změny vlastností oceli k destrukci konstrukce. Snížení parametrů pevnosti je patrné z Obr. 10 [34].



Obr. 10 Součinitel  $k_s(\vartheta)$  pro redukci pevnosti betonářské výztuže a součinitel  $k_p(\vartheta)$  pro redukci pevnosti předpínací výztuže při zvýšených teplotách podle Eurokódu 2 [34]

#### 2.2.4 Průběh tepelného zatížení

Při návrhu stavebních konstrukcí je nutné postupovat tak, aby byly splněny veškeré požadavky, které jsou pro danou stavbu vyžadovány. Metodika se při stanovení požární odolnosti opírá o hodnoty na základě výpočtů dle eurokódu, tabulkových hodnot a výsledků požární zkoušky [37;38].

Požárními zkouškami získáme nejpresnějších výsledků. Při zkoušení konstrukcí lze simulovat okrajové podmínky, které co nejvíce vystihují reálné působení požáru v objektu. Při neustálém vývoji stavebních materiálů a konstrukcí je mnohdy požární zkouška jedinou možnou variantou z výše uvedených postupů. Nevýhodou je však její pracnost a časová a finanční náročnost její realizace dle normových postupů [23].

Parametry získané z požárních zkoušek jsou popsány pomocí požárních křivek. Pro popis vývoje teploty plynů při požáru jsou nejpoužívanějšími křivkami tyto teplotní křivky: Normová teplotní/časová křivka dle ISO 834, uhlovodíková křivka, křivka vnějšího požáru, křivka pomalého zahřívání, tunelová křivka RABT, tunelová křivka Rijkswaterstaat.

Normová teplotní/časová křivka (ISO 834) vyjadřuje normová namáhání pro stanovení doby požární odolnosti částí stavby, zatímco ostatní typy zatížení jsou omezeny na určité případy použití. Tato křivka je nejčastěji používaná a odpovídá tzv. celulóznímu hoření (hoření dřeva, papíru, oděvů apod.) [14]. Většina výpočtů a zkoušek je vztažena k této křivce. Byla odvozena zejména pro požár v podzemních stavbách.

Normová teplotní křivka je základní nominální křivka a je dána vztahem:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (2)$$

Kde  $\theta_g$  je teplota plynů v požárním úseku ve [°C] a  $t$  je čas trvání požáru v [min.]



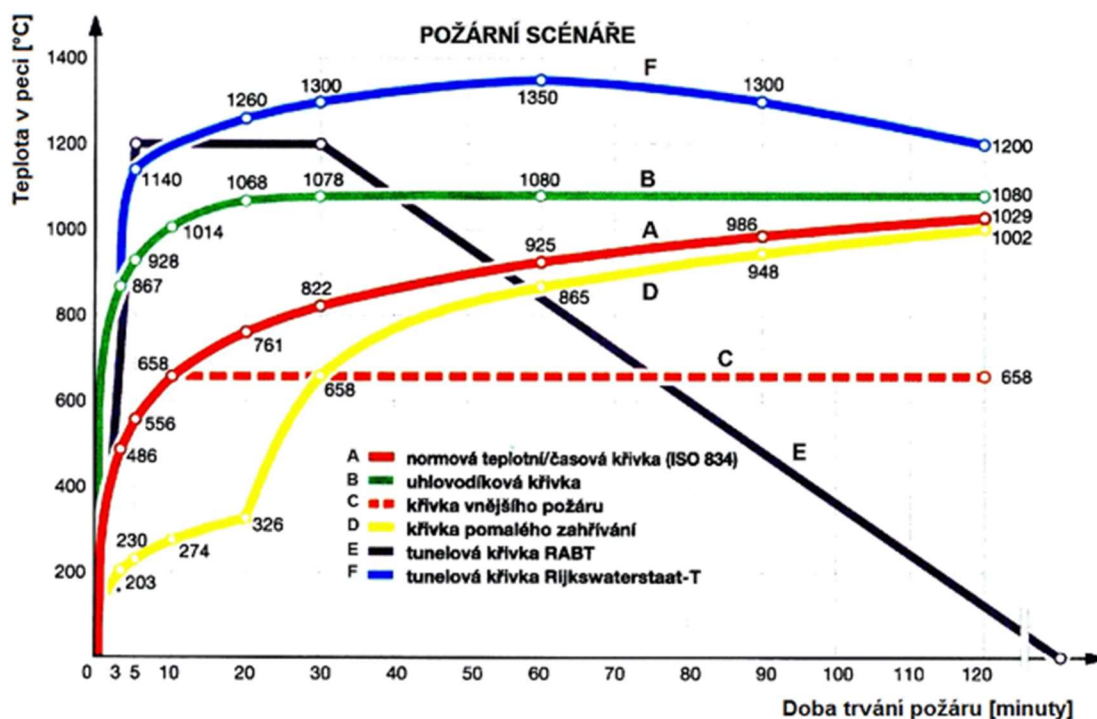
Uhlovodíková křivka se používá převážně pro oblast „offshore“, kde při dostatečném přívodu kyslíku mohou vysoká požární zatížení zapříčinit rychlejší vzrůst teploty. Používá se k popisu požárů ovlivněných hořeními, např. nádrže s benzínem, ropou a ropných produktů, nebo chemikáliemi, také se používá například pro simulaci požárů v garážích.

Křivka vnějšího požáru platí pouze pro požární zatížení zvenjšku (vnější líc obvodové stěny nebo volně hořícímu vnějšímu požáru) a zohledňuje současně obecně nižší teploty ve srovnání s požárem uvnitř budovy.

Křivka pomalého zahřívání se použije na prvky protipožární vrstvy (např. zpevňující výrobky, podhledy či zateplené fasády), jejichž vlastnosti závisí na vysoce intenzivním zahříváním cca pod 500 °C. Užitím této křivky se má zabránit tomu, aby výrobky byly klasifikovány na základě nižšího zatížení, než ISO 834, které v praxi při možném pomalém vzestupu teploty bývá podstatně nižší.

RABT křivka je odvozena v Německu v rámci několika výzkumů. Představuje méně závažné scénáře požárů v tunelech oproti křivce RWS. Odpovídá požáru jednoho kamionu.

Pro zkoušení tepelného zatížení betonů určených pro silniční tunely, podle evropských norem, se nejčastěji používá „nejpřísnější“ teplotní křivka RWS. Tato křivka byla odvozena v Holandsku. Odpovídá velkému požáru nákladního automobilu. Tato křivka se velmi blíží teplotám zaznamenaným při zkušebních požárech různých materiálů v tunelu, teploty mohou dosahovat až 1370 °C, a to už po 5 minutách od počátku požáru (viz. Obr. 11) [37;39].



Obr. 11 Požární scénáře [37]

### 2.2.5 Hodnocení betonové konstrukce po požáru

Působení vysokých teplot na beton má za následek fyzikálně chemické změny, které vedou k degradaci materiálu spojenou se snížením mechanických vlastností betonu. Průzkumem konstrukce zasažené požárem bychom měli stanovit, zda je možné poškozený objekt, konstrukci, opravit a zrekonstruovat, nebo je nutná její demolice.

Potřebné informace o zatížené konstrukci získáme pomocí stavebně technického průzkumu. Ten se dělí na základě svého obsahu, rozsahu a stavu a charakteru zkoumané konstrukce na tři typy:

- předběžný
- podrobný
- doplňkový

Stavebně technický průzkum konstrukce poškozené vlivem vysokých teplot se provádí následujícím postupem [40]:

- shrnutí dostupných dat (množství vody a způsob hašení požáru, výše dosažené teploty požáru a délka trvání požáru a předpokládané požární zatížení)
- určení poškození (vlivem požáru a hasební činnosti)
- vyhodnocení a zatřídění míry poškození
- výběr vhodné metody opravy

Charakteristické vlastnosti konstrukcí zasažených požárem se monitorují následně pomocí:

- Vizuální defektoskopické prohlídky – zkoumá se vzhled konstrukce po tepelné degradaci, změna barvy, vzniklé trhliny, odštěpené části, odhalená výztuž.
- Metody akustické odezvy – spočívá v poklepání povrchu posuzované konstrukce tvrdým kovovým předmětem a vyhodnocuje se následná zvuková odezva. V případě, že je beton nedegradovaný, odezva je čistá zvonivá, v případě degradace může být odezva tlumenější, až dunivá.
- Stanovení pevnosti v tlaku – jedná se o základní parametr nutný ke stanovení stavu konstrukce. Stanovuje se několika metodami, např.: nedestruktivní – odrazová metoda (metoda Schmidtova tvrdoměru), ultrazvuková impulzová metoda (modul pružnosti), destruktivní – z jádrových vrtů.
- Stanovení pevnosti v prostém tahu – destruktivní – z jádrových vrtů
- Stanovení vlastností výztuže – zkoušení výztuže tahem, stanovení meze kluzu, stanovení meze pevnosti, aj.)
- Chemického rozboru – rentgenová difrakční analýza (stanovení mineralogického složení), diferenční termická analýza (identifikace složení fází tvořící betonovou matici) [41].

## 2.3 Nedestruktivní metody testování

Nedestruktivní metody testování (NDT), také nazývané defektoskopie, jsou procesem testování, kontroly nebo hodnocení provozního stavu materiálů, konstrukčních částí nebo sestav. Jedná se o kontrolu bez poškození zkoumaného prvku, to znamená, že když je kontrola nebo testování dokončeno, materiál nebo konstrukce jsou stále použitelné. Pomocí NDT ve stavebnictví zjišťujeme množství parametrů, zejména fyzikálně mechanické parametry, pevnosti materiálu, modul pružnosti, defekty v konstrukcích a rozmístění výtzuže.

Výhodou nedestruktivních metod testování je nejen to, že je materiál při procesu testování neporušen, ale také možnost opětovného testování bez omezení a možnost testování vlastností materiálu přímo v dané konstrukci. U těchto metod je ovšem nutná tvorba kalibračních vztahů.

NDT metody se dělí podle fyzikálních principů na:

- Tvrdoměrné metody – jedná se o povrchové zkoušení tělesa, prvku, konstrukce.
    - Odrazové – měří se velikost odrazu tělesa (s pružinou, volným pádem).
    - Vrypové – hodnotí se rozměr vrypu, který byl vytvořen např. diamantovým tělískem určitého tvaru a zatížení na rovný a hladký povrch tělesa.
    - Vtiskové a vnikací – fungují na principu vtlačování, hodnota tvrdosti se stanovuje na základě vyhodnocení rozměru a tvaru vzniklého vtisku [42;43].
  - Dynamické metody – k určení mechanicko fyzikálních vlastností materiálu a konstrukce z rychlosti šíření akustického vlnění. Naměřené rychlosti odvozují dynamický modul pružnosti, Poissonovo číslo, pevnosti atd.) Jedná se o:
    - Ultrazvukové (pulzní) metody
    - Rezonanční (modální analýza) metody
    - Metoda akustické emise
    - Impact-echo metoda
    - Metoda fázových rychlostí a Metoda tlumeného rázu [44]
  - Elektromagnetické metody – jsou založeny na principu definování magnetických a elektrických vlastností testovaných těles nebo konstrukcí [44].
  - Elektrické metody – k měření vlastností materiálu využívají elektrický odpor, kapacitu, aj.
  - Radiační metody – měření je založeno na principu zeslabení ionizujícího záření po průchodu materiálem. Využívají se pro stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti stavebních konstrukcí a materiálů. Zjišťování uložení výtzuže. Měří také přírodní radiaci a radon v objektech.
  - Metody místního porušení – umožňují zkoušení i ve špatně přístupných částech konstrukce. Mají sice destruktivní charakter, protože dochází k místnímu porušení zkoušené konstrukce, ale jeho rozsah je z celkového objemu konstrukce obvykle zanedbatelný a vzniklé porušení neovlivní její funkci [45].
- Mezi metody místního porušení patří např.: jádrové vrty, odtrhové zkoušky, tvrdoměrné vnikací a vstřelovací zkoušky, brusné, nebo vrtné metody, naříznutí konstrukce a vložení plochého lisu [44].

## 2.4 Akustika

Nauka o mechanickém vlnění se nazývá akustika. Zabývá se ději, které probíhají při vzniku, šíření a vjemu zvuku. Fyzikální akustika se zabývá vznikem zvuku v různých zdrojích, jeho šíření, odraz a pohlcování. Kmitající předmět rozpohybuje nárazem okolní částice, ty naráží dál do okolních vzdálenějších částic. Tento děj nazýváme šíření zvuku. Zvukem nazýváme mechanické vlnění, které vnímáme sluchem, jeho frekvence je v rozmezí 16 Hz do 16 kHz. V podstatě zahrnuje i zvukové vlny, které jsou mimo slyšitelné frekvence (ultrazvuk nad 26 kHz, infrazvuk pod 16kHz) [47]. Akustické vlny jsou elastické (pružné) kmity šířící se daným prostředím, jejich rychlost je závislá na mechanických vlastnostech daného prostředí [48].

### 2.4.1 Vlnění

Energie zvuku, která se šíří v podobě různých vln, je vyvolaná mechanickým úderem, tlakovým impulzem, vybuzením kmitajícím tělesem a dalšími způsoby. Tato energie zvuku se používá při detekci vad a šíří se formou různých vln v závislosti na směru šíření vlny a odpovídajícímu pohybu částic ve zkoušeném prvku. Nejčastěji využívané jsou podélné vlny, příčné vlny a povrchové (Rayleighovy) vlny [46].

#### 2.4.1.1 Podélné vlny

U podélného vlnění dochází k pohybu částic v médiu (plynném, kapalném, pevném) rovnoběžně s pohybem vlnoplochy. Během šíření vlnění dochází postupně ke zhušťování a rozestupování částic. Podélné vlny lze převést na příčné vlny lomem nebo odrazem, šíří se nejrychleji ze všech typů vln běžně používaných při ultrazvukovém nedestruktivním testování [44;46;48].

#### 2.4.1.2 Příčné vlny

U příčných vln je pohyb částic kolmý ke směru šíření vlny. Toto vlnění je dáno postupným střídáním amplitud vlny nad osou a pod osou vlnění. Příčné vlny mají nižší rychlost a kratší vlnovou délku než podélné vlny stejné frekvence a používají se u většiny ultrazvukového testování pro vyhledávání vad s použitím úhlové sondy. Příčné vlnění vzniká pouze v pevných látkách [44;46].

#### 2.4.1.3 Povrchové vlny

Povrchové vlny, nazývané také jako Rayleighovy vlny, jsou mechanické vlny šířící se kmitavým pohybem po povrchu tuhého tělesa v hloubce jedné vlnové délky. Jejich amplituda rychle klesá se vzdáleností od povrchu. Je to obdobný princip jako vlny na vodní hladině. Rychlost a vlnová délka jsou podobné jako u příčných vln. Povrchové vlny lze aplikovat pro detekci trhlin v materiálech [44;46].

## 2.4.2 Mechanické kmitání

Pro mechanické kmitání je charakteristické, že se těleso při pohybu neustále vrací do tzv. rovnovážné polohy. V případě, že těleso tento pohyb dělá pravidelně, jedná se o pohyb periodický (např. struny na kytarě, kyvadlo hodin, závaží na pružině apod.) [47].

### 2.4.2.1 Netlumené kmitání

Netlumené kmitání probíhá neomezeně dlouho beze ztráty energie [47].

### 2.4.2.2 Tlumené kmitání

U tlumeného kmitání dochází k tlumení kmitů důsledkem ztráty energie například vlivem tření, nebo odporem prostředí. Amplituda pohybů se postupně zmenšuje [47;48].

### 2.4.2.3 Nucené kmitání

U nuceného kmitání je nutné dodávat energii do kmitající soustavy z vnějšího zdroje. U tohoto druhu kmitání můžeme dosahovat různého průběhu, závisí to na způsobu, jakým je energie do soustavy dodávána. Pokud je průběh vnější síly harmonický, je i kmitání harmonické. Pokud je úhlová frekvence zdroje energie stejná jako jsou kmity soustavy (oscilátoru), dojde k maximálnímu vlivu dodané energie a amplituda kmitů se výrazně zvětší, nastane tzv. rezonance [47;48].

## 2.5 Vybrané akustické metody nedestruktivního testování

### 2.5.1 Metoda akustické emise

Akustická emise (AE) je jednou z defektoskopických metod, zařazených do skupiny nedestruktivního testování. Její uplatnění se rozšířilo od sedmdesátých let 20. století, ovšem první zmínky sahají ještě před padesátá léta 20. století. Oproti jiným nedestruktivním metodám je metoda akustické emise metodou pasivní kontroly, která může prověřovat strukturu konstrukce po celém jejím objemu.

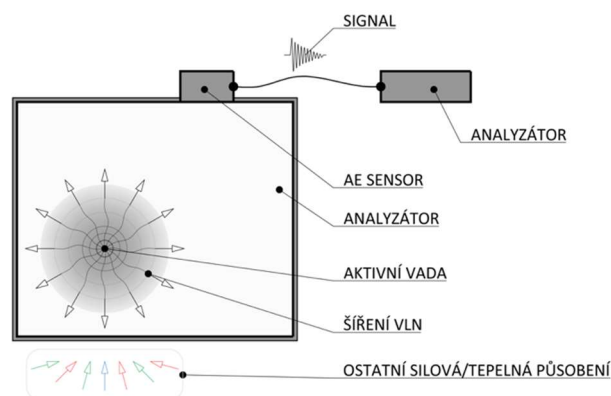
Výhodou této metody v porovnání s jinými defektoskopickými metodami je nepřetržité monitorování konstrukce, které může zaznamenat časový okamžik vzniku defektu a jeho následný vývoj. Avšak metoda akustické emise detekuje pouze aktivní poruchy probíhající uvnitř monitorované struktury. Tyto poruchy vznikají při zatížení sledované struktury, jsou tedy nestabilní a nebezpečné. Pasivní poškození nemají na akustickou emisi zásadní vliv. Jde o metodu, kterou lze aplikovat pro velké spektrum materiálů. Umožňuje sledovat plastické deformace, iniciaci a šíření trhlin, různé fázové děje a proudění tekutin. Dále monitoruje stav, stupeň a kumulaci poškození struktury konstrukcí, namáhaných vnějším mechanickým zatížením, změnou teploty, aj. [46;49;14].

### 2.5.1.1 Fyzikální jev akustické emise a metody měření

Metoda akustické emise je fyzikální jev, který je založen na snímání elastického příčného nebo podélného vlnění, které vzniká v důsledku dynamických procesů vyskytujících se v materiálu při jeho zatěžování vnitřními nebo vnějšími silami.

Akumulovaná potenciální energie se překročením mezní pevnosti struktury materiálu impulzně uvolňuje, a to v podobě tepelného a akustického vyzařování. Tak vzniká primární zdroj akustické emise vyzařující energii. Tato uvolněná energie se transformuje na napěťový impulz, který se po dosažení povrchu materiálu šíří ve formě napěťových elastických vln, které je možné detekovat piezoelektrickými snímači akustické emise. Tento snímač následně transformuje napěťovou vlnu na elektrický signál (emisní signál). Základní vyhodnocení signálu analogově provádí měřící a vyhodnocovací systém akustické emise.

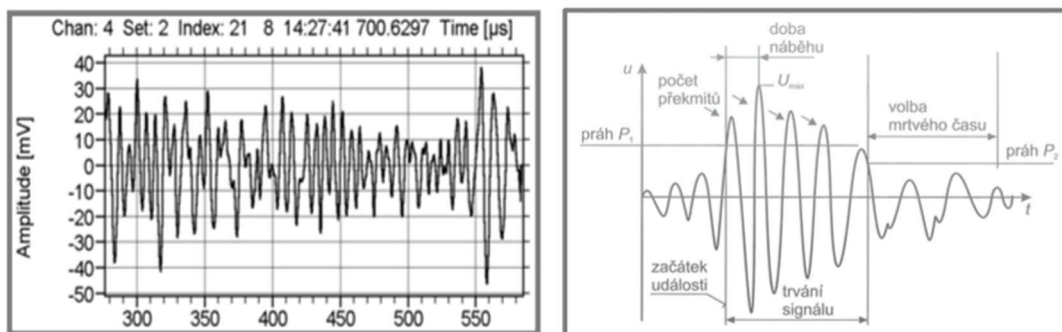
Analýza signálu pomocí metody akustické emise je závislá především na znalosti charakteru signálu, způsobu jeho detekce a na jeho vyhodnocení. Obvyklý frekvenční rozsah metody akustické emise se pohybuje cca od 100 kHz do 4 MHz v závislosti na měřící technice. Detekcí napěťové vlny jedné události akustické emise vzniká v detekovaném signálu izolovaný hit elektrického signálu akustické emise.



Obr. 12 Vznik a detekce elastických vln v materiálu – schéma

Podle charakteru signálu se emise dělí na:

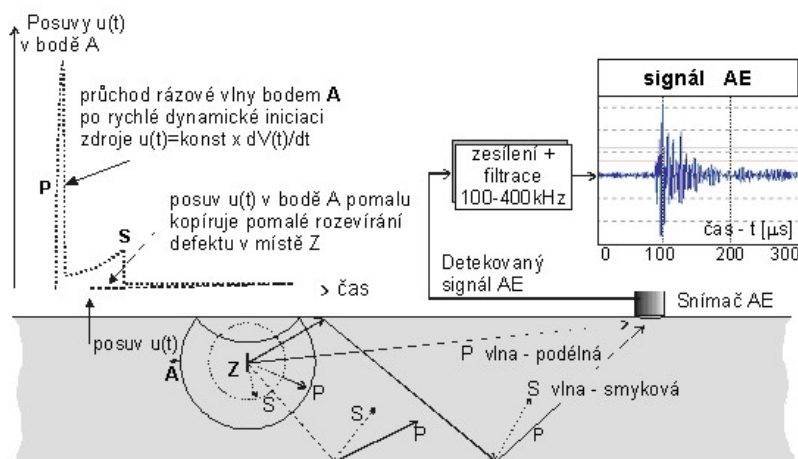
- spojitou emisi (kvazispojité emise) tj. signál po delší dobu neklesá pod nastavenou prahovou hodnotu, jedná se o soustavu rychle po sobě jdoucích nespojitých signálů. Akustické vlny jednotlivých událostí se časově překrývají, sčítají (např. analogové šумы při provozu, únik médií, mechanismy při plastické deformaci). Dochází tak k jednomu komplexnímu signálu, který obsahuje měření i v době, kdy nedocházelo v měřeném médiu k žádné aktivitě. Parametry spojitého signálu vyhodnocujeme jako střední parametry ze zvoleného časového úseku.
- nespojitou (impulzní) emisi, kde má signál charakter jednotlivých, časově oddělených událostí a doba těchto událostí se pohybuje v řádech nanosekund až mikrosekund (např. projevy aktivního vzniku trhlin, probíhající korozní jevy apod.). Tyto části signálu vyhodnocujeme samostatně [51,52].



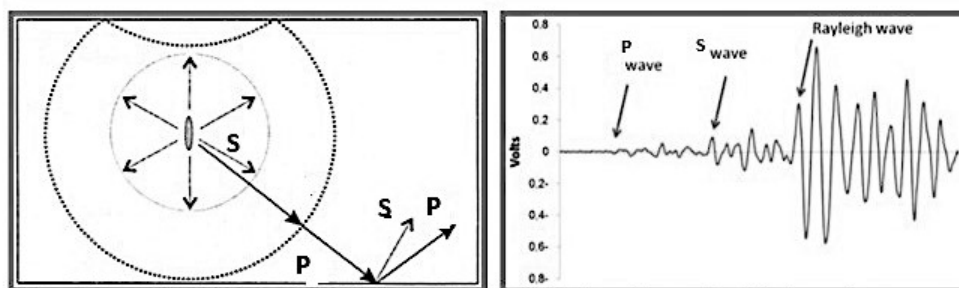
a) Spojitý signál AE

b) Nespojité (praskavý) signál AE

Obr. 13 Parametry spojitého a nespojitého signálu akustické emise [49]



Obr. 14 Princip akustické emise, citlivost detekce [46]



a) Vlnoplochy podélných "P" a příčných "S" vln v tělese b) Rayleighova vlna na povrchu tělesa

Obr. 15 Akustické emise [49;50]

Signál se ze zdroje akustické emise se šíří ve formě kulových vln, které se na povrchu transformují do podélných P, příčných S a obecně povrchových vln (Rayleighovy vlny, viz Obr. 15 b)). Ve speciálních případech, například u velkých tenkých ploch vznikají deskové vlny (Lamb vlny). Vlny se následně v tělese šíří, odrážejí a rozpadají, vytvářejí tak výslednou odezvu zdroje. Jednotlivé typy vln se ovšem šíří různou rychlostí.

Signál napěťových vln, které zdroj vyzařuje napovrch, může být ovlivněn mnoha okolnostmi, jimiž jsou například charakter materiálu, povrchové svary, vzduchové dutiny, aj. Těmito vlivy může slábnout intenzita signálu a může tím dojít k jeho utlumení. I přes nespojitost se vlny v materiálu jednotného složení šíří přibližně stejnou rychlostí, díky tomu lze využít lokalizace zdroje poruchy za použití více snímačů.

Výhodou akustické emise, oproti jiným nedestruktivním metodám, je její velká citlivost, téměř nedosažitelná jinými metodami, což je zároveň i její značnou nevýhodou. Komplikace nastává v nalezení požadovaných informací, ty jsou často ovlivněny šumem z okolních podmínek. Proto se využívá filtrace těchto šumů.

Mezi nevýhody patří také obtížnost při nastavení totožných podmínek měření. Akustické emise, jak je již výše zmíněno, nedetekuje statické, neaktivní defekty a defekty s "tichou" aktivitou, což je její další nevýhodou. Nesmíme také opomenout, že akustická emise není opakovatelná a tím pádem je aktivita defektů jevem nevratným [46;53].

Spojitost či nespojitost, doba trvání hitů, doba náběhu signálu hitů do maximálních hodnot, útlumový koeficient jsou základními časovými parametry signálu akustické emise. K časovým průběhům lze také provést frekvenční analýzu signálu. Vyhodnocení signálu akustické emise se stále vyvíjí a dává vzniknout novým metodám řešení.

#### 2.5.1.2 Měřicí technika akustické emise

- Snímače akustické emise

Typy nejčastěji používaných snímačů jsou elektromagnetické, tenzometrické, mechanické, laserové, kapacitní, piezoelektrické, aj.

Pro snímání akustické emise se jeví jako nejvhodnější piezoelektrické snímače z důvodu jejich vysoké citlivosti v širokém frekvenčním pásmu, stálosti frekvenčních charakteristik a jednoduchosti a spolehlivosti.

- Měřicí sestava

Osciloskop, snímač, PC



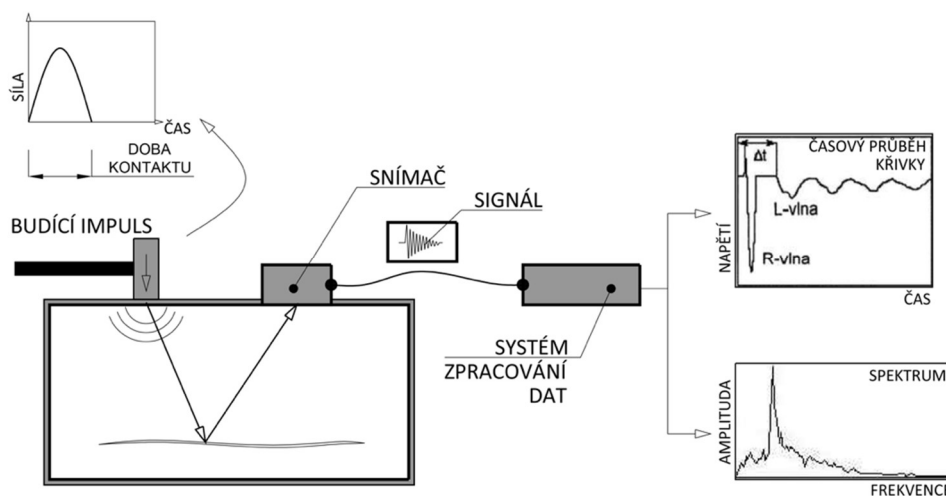
### 2.5.2 Kladívková rezonanční metoda – Metoda Impact-Echo

Metoda Impact – Echo (IE) je další akustickou metodou nedestruktivního testování betonových a zděných konstrukcí. Byla vyvinuta v USA v National Institute of Standards and Technology (NIST, dříve NBS) v druhé polovině osmdesátých let 20. století. Americká společnost pro testování materiálů – ASTM International (American Society of Testing Materials) vydala v roce 1998 normu ASTM C1383-98a Standard test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, která obsahuje postupy provádění měření, definice a vyhodnocení. Tato norma byla v roce 2010 aktualizována normou ASTM C1383 – 04 [77].

Studie zaměřené k odhalování vnitřních vad v betonu prokázaly, že technika zvaná jako metoda Impact - Echo je vhodnou metodou k rychlé detekci, lokalizaci nespojitostí uvnitř betonu, detekci dutin, trhlin a měření tloušťky betonových prvků, zjišťování vad ve struktuře zdíva, železobetonových, betonových a předpjatých konstrukcí. Nalezení dutin, testování spojů prvků konstrukce, poloha výztuže v železobetonových konstrukcích a s ní spojené koroze výztuže [46;54].

U nedestruktivního testování se často pro metodu Impact – Echo používá definice “nepřímá” nebo pasivní metoda akustické emise nebo metoda odezvy. Tato metoda je také nazývána frekvenční inspekcí či rezonanční metoda s mechanickým buzením pomocí kladívka (Kladívková metoda).

Metoda je založena na zkoumání odezvy (šíření, odrazu a rozptylu elastických vln) po mechanickém impulzu. Budícím signálem je obvykle krátký mechanický impulz, vytvořený rázem kladívka, případně ocelové kuličky na povrchu materiálu. Vnější napěťový impulz přivedený na povrch vybudí ve vzorku mechanické vlny na vlastní frekvenci a na vyšších harmonických frekvencích (od 1 do 80kHz), které se šíří uvnitř struktury a jsou odrazeny od trhlin a vnějšího povrchu zkoumaného vzorku. Ty však závisí na rozměrech a materiálových vlastnostech zkoumaného vzorku. Povrchové změny způsobené odrazy těchto vln se zaznamenávají na povrchu pomocí snímačů akustické emise. Ty převádějí odražené vlny na napěťový signál. Povrchové vlny zaznamenané snímači jsou nazývány také jako Rayleighovy či Lambovy vlny.



Obr. 16 Princip metody Impact-Echo

Signál snímaný na povrchu vzorku je nejprve analyzován jako záznam napětí v závislosti čase a poté je frekvenčně analyzován v řídicím počítači a následně zpracován a vyhodnocen. Dominantní frekvence toho signálu jsou zobrazeny jako lokální maxima ve frekvenčním spektru. Mají spojitost s několikanásobnými odrazy uvnitř struktury. Tyto frekvence informují o tloušťce, celistvosti struktury a lokalizaci defektů. Frekvenční analýza je pro vyhodnocení metody Impact-Echo nejběžnější a nejjednodušší a tím i rychlejší. Transformace z časové do frekvenční oblasti jsou zpravidla realizovány pomocí Fourierovy transformace.

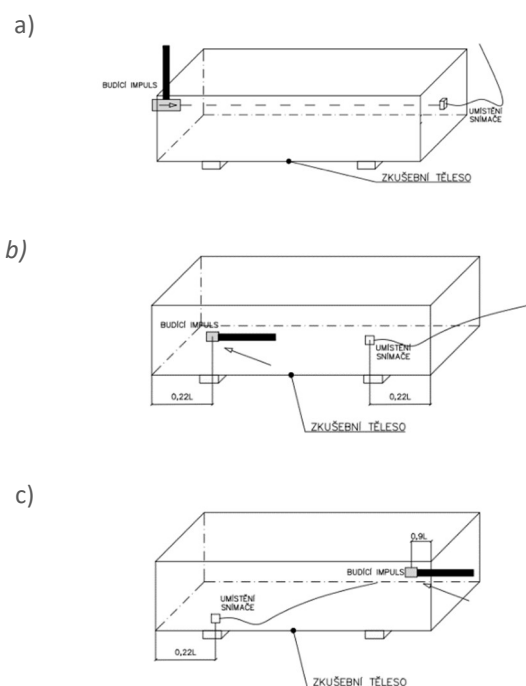
Fourierova transformace rozloží signál do sinusových vln o různých frekvencích a převádí signál z časové oblasti do oblasti frekvenční a tím vytváří spektrum amplitud v závislosti na frekvenci [46]. Velikost amplitud dominantních frekvencí charakterizují hloubku rozhraní na povrchu trhlin, dutin nebo mezi dvěma materiály s odlišnou hodnotou akustické impedance.

Pokud jsou materiálové vlastnosti testovaných výrobků jiné než srovnávacího standardu (tj. jiná tuhost, jiný obsah příměsí atd.), potom jsou také tyto frekvence posunuty ve srovnání s etalonem. Jedná se o porovnávací metodu, která předpokládá znalost frekvenčních spekter „dobrých“ výrobků (etalonů) a jejich porovnání se spektrem testovaného výrobku. Pokud jsou patrné rozdíly ve vlastních frekvencích, je třeba soustředit pozornost na tyto frekvence, analyzovat rozdíly mezi „dobrým“ a „vadným“ výrobkem [46].

Metoda Impact-Echo je využívána zejména jako metoda monitorování a průběžné kontroly stavu a charakteru materiálu konstrukcí. Má široké uplatnění ve stavebnictví, je jednoduchou metodou, která nevyžaduje velké náklady na její aplikaci. V praxi se využívá při diagnostice stavu betonových konstrukcí, detekci prasklin monolitických konstrukcí apod. Je jednou z metod impulz-echo techniky.

Zkoušení pomocí rezonanční kladívkové metody je popsáno normou ČSN EN 73 1372 [77].

Normou je definován postup zkoušení pro zjištění rezonanční frekvence podélných vln  $f_L$ , poloha sond při podélném kmitání, zkušební postup pro první a druhou rezonanční frekvenci ohybových (příčných) vln  $f_t$  a první dominantní frekvenci kroutivých vln  $f_t$ . Na Obr. 17 je znázorněna poloha sond a umístění zkušební tělesa na podložce.



Obr. 17 Poloha sond při měření rezonanční frekvence podélného kmitání (a), měření první a druhé rezonanční frekvence příčné kmitání (b), měření rezonanční frekvence krouživého kmitání (c)

Norma také uvádí výpočetní vztahy pro stanovení modulu pružnosti betonu  $E_{crL}$  [MPa] z podélné rezonanční frekvence, hodnotu dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku  $G_{cr}$  [MPa], který lze získat z rezonanční frekvence krouživého kmitání. Dále také výpočetní vztah pro Poissonův koeficient betonu  $\nu_{cr}$  a to buď pomocí měřených rezonančních frekvencí  $f_L$  a  $f_t$ , nebo pomocí vypočtených dynamických modulů pružnosti  $E_{crL}$  a  $G_{cr}$ .

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (3)$$

Kde  $L$  je délka zkušebního tělesa [m],  $f_L$  je rezonanční frekvence podélného kmitání [kHz] a  $\rho$  objemová hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

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

Kde  $f_t$  je rezonanční frekvence krouživého kmitání [kHz],  $k_r$  je součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušebního tělesa.

$$k_r = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \cdot \left(\frac{b}{h}\right) - 2,52 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^6} \quad (5)$$

Kde b je délka kratší strany průřezu hranolu [m] a h délka delší strany hranolu [m].

$$\vartheta_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{k_r} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (6)$$

$$\vartheta_{cr} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{k_r} \cdot \frac{E_{crL}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (7)$$

Rezonanční kladívková metoda je určena zejména pro testování zkušebních těles a výpočet nedestruktivních dynamických modulů pružnosti v tlaku a ve smyku dle rezonančních frekvencí. Zkušební tělesa mají definovaný tvar válců či trámů. Oproti tomu metodu Impact-Echo lze aplikovat na celých konstrukcích (dle již zmíněného standardu ASTM C1383-4). Pro české prostředí lze metodu IE přirovnat právě k rezonanční kladívkové metodě dle ČSN 73 1372. Ovšem její aplikace je využitelná doposud pouze pro testování samotných zkušebních těles s použitím jednodušších měřících zařízení, které je pro použití v praxi limitováno. Metoda IE je vhodná pro testování konstrukce přístupné pouze z jedné strany, např. ostění tunelů, betonové podlahy, mosty, aj. [6].

Pro určení vlastní dominantní frekvence časové analýzy signálu se porovnává budící signál (úder kladívka) a snímaný signál (snímače). Z rozdílu počátku signálu lze určit rychlost šíření mechanické vlny v materiálu [6, 54,77].

$$f = \frac{C_p \cdot k_c}{L \cdot 2} \quad (8)$$

Kde f je vlastní rezonanční frekvence [Hz],  $C_p$  je rychlost šíření vlny v prvku [m/s],  $k_c$  je koeficient zohledňující vliv materiálu (0,93-0,96 prostý beton) [-] a L je délka zkušebního tělesa v podélném směru [m].

Součástí metody IE je i kontrola poměru rezonančních frekvencí, pro kontrolu správnosti naměřených frekvencí a kontrolu, zda byla vybrána správná dominantní frekvence [77].

Jedním z ověřovacích způsobů jsou: Teoretické poměry frekvencí podélného, příčného a kroutivého kmitání stejného zkušebního tělesa a jsou dány pro ideální krychli z homogenního a izotropního materiálu. Teoretické poměry těchto hodnot frekvencí jsou přibližně:  $f_L : f_t : f_f = 1 : 1,34 : 1,538$ .

Díky těmto poměrům lze vyhodnotit, zda byla pro dané měření zvolena správná dominantní frekvence a nebyla tak zaměněna za její harmonické složky [6,80,77].

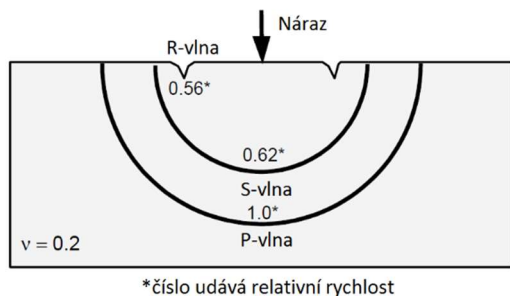
## 2.5.2.1 Šíření mechanických vln

U metody Impact-Echo se dopadem kladívka na testovaný materiál šíří mechanická vlna v podobě podélného vlnění, které se skládá ze tří složek vlnění, P – vlna (podélné vlnění spojené s tahovým a tlakovým napětím), S – vlna (smykové vlnění spojené se smykovým napětím) a R-vlna (povrchové vlnění, též Rayleighova vlna).

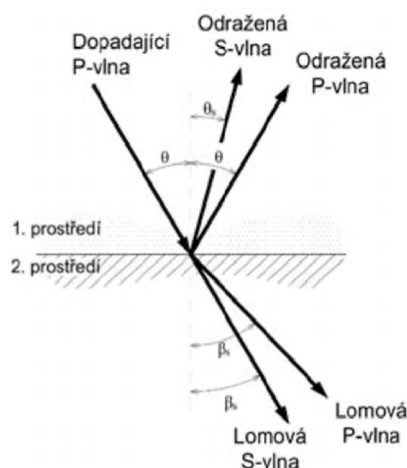
Na Obr.18 jsou znázorněny různé druhy vln, které prochází testovaným materiálem s odlišnou rychlostí a odrážejí se od stěn a defektů. V případě nárazu mechanické vlny na rozhraní materiálu s různou akustickou impedancí, dojde buď k částečnému pohlcení, odrazení nebo lámání vlny. Taková rozhraní slouží jako další zdroj mechanického vlnění [63]. Čím větší je rozdíl akustických impedancí, tím větší je odraz vlny, viz. Obr. 19. Poměr mezi intenzitou odražené vlny a intenzitou dopadající vlny na rozhraní je dán rovnicí:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (9)$$

Kde  $Z_1$  je akustická impedance prvního prostředí,  $Z_2$  je akustická impedance druhého prostředí a  $R$  je poměr intenzit odražené vlny vůči vlně dopadající. Tímto výpočtem můžeme definovat, jak se mechanické vlnění v daném místě zachová.



Obr. 18 Relativní rychlost šíření vln v betonu [62]



Obr. 19 Odraz a lom vlny na rozhraní dvou materiálů [63]

Akustická impedance ( $Z$ ) [ $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ ] popisuje vlastnost prostředí, zahrnuje hustotu materiálu  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ] a rychlost průchodu mechanické vlny [ $\text{m/s}$ ] [63]. Je dána vzorcem:

$$Z = \rho * v_L \quad (10)$$

U pevných materiálů s vysokou hodnotou akustické impedance (např. beton  $Z=7\text{-}10 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ , ocel  $47 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ ) se mechanické vlnění snadno šíří, naopak je zcela či částečně pohlceno v materiálech s hodnotou akustické impedance blízké se nule (např. vzduch  $Z=0,4 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ , voda  $0,4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ ).

#### 2.5.2.2 Fourierova transformace

Fourierova transformace je matematická metoda, která se využívá k analýze signálů.

Je to integrální transformace, která slouží k převodu signálu z časové do frekvenční domény a naopak. Ve frekvenční oblasti se zobrazí složky vlnění vytvářející signál a jejich intenzity.

K vyhodnocení akustického signálu je často využívána spektrální analýza, která definuje signál pomocí jeho složek ve frekvenční oblasti. Transformace je vyjádřena pomocí harmonických funkcí sinus a cosinus. Toto spektrum není závislé na čase a lze jej definovat jako pole všech možných frekvencí, kde každý index odpovídá intervalu určité frekvenční oblasti. Tyto jednotlivé oblasti obsahují informaci o tom, jak moc je daná frekvence v hodnoceném signálu zastoupena. Fourierova transformace (FT) je definována dvěma typy, a to spojitou a diskrétní. Spojitá FT pracuje se spojitým časem, a tedy se spojitou časovou doménou, kterou převádí do spojitého spektra. Diskrétní FT oproti tomu pracuje s diskrétním časem a diskrétním spektrem [67].

Většina metod je, pro převod z časové do frekvenční oblasti, založena na diskrétní Fourierově transformaci, zvané také jako rychlá Fourierova transformace („Fast Fourier Transform“) označené jako FFT, nebo její modifikaci [48;66].

Převážná část akustických metod nedestruktivního testování pracuje s naměřenými hodnotami signálů, které jsou tvořeny změnami napětí  $U$  na čase  $t$ .

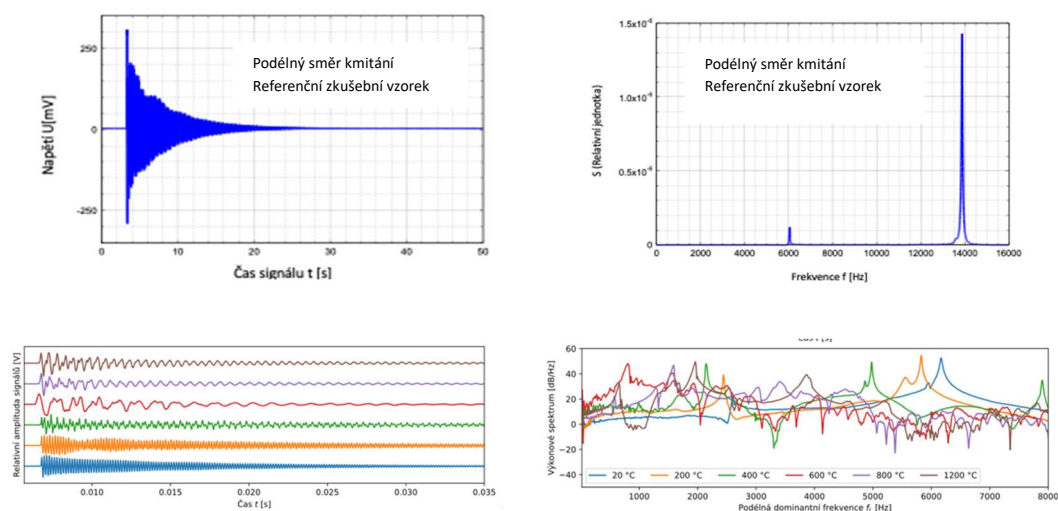
V praxi je při práci s digitálním signálem softwarově často využívána rychlá Fourierova transformace, a to pro její nižší nárok na výpočetní výkon. Definice algoritmu FFT je popsána vztahem  $f(t)$  [6;55;67]:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (11)$$

Pomocí této transformace je signál rozložen do jednotlivých frekvencí, které tento signál tvoří. Jde o přibližný odhad jednotlivých frekvencí  $\omega$  krátkého časového signálu  $t_0$  [6].

Na Obr. 20 je zobrazen vztah mezi signálem jednotlivých částí v časové doméně a signálem jednotlivých částí získaných analýzou FFT ve frekvenční doméně. Tento signál byl naměřen metodou IE. Taková analýza signálu je pro metodu IE nejběžnější [66].

U metody IE je nejčastěji posuzovaná první dominantní frekvence a v některých případech i její další harmonické frekvence. V případě výskytu vady, vzduchové dutiny, praskliny, nebo jiného materiálového rozhraní s odlišnou akustickou impedancí  $Z$  (viz. kap. 2.5.2.1), je charakter výsledného frekvenčního spektra ovlivněn, a to posunem dominantních frekvencí do vyšších či nižších hodnot [6].



Obr. 20 Zobrazení signálu, jednotlivých částí v časové doméně a jeho frekvenční spektrum získané pomocí FFT

### 2.5.2.3 Piezoelektrický snímač

#### Piezoelektrický snímač

Piezoelektrické snímače jsou jedny z nejpoužívanějších zařízení, jsou schopné měřit sílu, tlak, zrychlení a mechanické napětí. Pracují na základě piezoelektrického jevu.

Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí, které vzniklo jako odezva při jeho deformaci. Buňka krystalů, které nemají střed symetrie, je základní periodicky se opakující částí krystalové mřížky, která je složena z nábojů krystalu. Náboje buněk, které nevytváří střed symetrie, se vlivem mechanického zatížení přeskupí, krystal tak přestane být elektricky neutrální a dojde ke vzniku elektrického napětí. Tento jev je nazýván jako přímý piezoelektrický jev. Tento piezoelektrický účinek je však reverzní, tudíž napětí přivedené na piezoelektrický materiál má za následek deformaci. Tento jev je pak nazýván jako nepřímý piezoelektrický jev [69].

Piezoelektrické materiály využívané jako senzory můžeme rozdělit do tří skupin, a to: keramiky, polymery a kompozity. V praxi jsou nejrozšířenější piezokeramické materiály, které se rozlišují na nízkofrekvenční (0 - 1000 Hz), středofrekvenční (1 - 100 kHz) a snímače pro vysoké frekvence (100 - 2000 Hz) např. snímače akustické emise [6].

Vyhodnocení dat je pomocí programového vybavení (software) dodaného přímo od výrobce měřicí aparatury, případně software poskytnutý na základě placené licence.

### 2.5.3 Metoda nelineární akustické (ultrazvukové) spektroskopie

Nelineární ultrazvuková spektroskopie je novější nedestruktivní metoda testování (označovaná zkratkou NEWS – Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy – nelineární spektroskopie pomocí elastických vln), která je založená na aktivním akustickém zkoušení materiálu [56]. Obsahuje řadu různých technik a možností a tím je vhodnou metodou pro velkou řadu aplikací.

Vlnové procesy se vyskytují nejen v přírodě, ale mají velké uplatnění i v oblasti vědy a techniky. Pomocí vln lze přenášet energii nebo informace na velké vzdálenosti. Pro větší možnost využití a uplatnění vlnových procesů v oblasti techniky a obecně diagnostiky materiálů bylo zapotřebí generování vln o vyšších intenzitách.

Při popisu vln o vysokých intenzitách již není možné uplatnit lineární vlnovou teorii, a tak došlo k vypracování obecné teorie nelineárních vln [57].

U nelineární vlnové teorie není možné využít princip superpozice, jak tomu je u lineární vlnové teorie, ta ovšem v řadě případů významně zjednodušuje popis vlnových procesů. Popis nelineárních zvukových vln (vln konečných amplitud) byl specifikován pomocí nelineárních parciálních diferenciálních rovnic, které však nemají obecné analytické řešení. Obecné analytické řešení bylo nalezeno v možnosti popisu nelineárních zvukových vln pomocí Burgesovy modelové rovnice. Tím se zvýšil vývoj nelineární akustiky, ke kterému také přispěl rozvoj výpočetní techniky, který umožnil použití složitějších numerických metod k řešení nelineárních modelových rovnic. Poznatky nově získané v oblasti teorie byly realizovány ve vývoji zdrojů nelineárních zvukových vln a následně široce uplatněny v praxi, a to v medicíně (terapie, chirurgie, diagnostika), průmyslu (ultrazvukové čištění, řezání, aj.), diagnostice, v měřicí technice a ve spoustě dalších odvětví.

Metoda nelineární akustické spektroskopie je aktivní metoda detekce vad v materiálu elastickým vlněním. K vytvoření elastického napětí je zkoumané těleso akusticky buzeno, pomocí elektroakustických měničů nebo pulzního buzení (radiových pulsů) či rázového mechanického buzení tak, aby bylo dosaženo zvýšeného napětí uvnitř hmoty a bylo tak možno sledovat jeho nelineární odezvu. Nelineární jevy jsou pozorovatelné už v počátcích degradace materiálu. U pozorování nelineárních jevů sledujeme jejich parametry, např. posuv rezonanční frekvence, generování harmonických a subharmonických frekvencí, zvýraznění lichých harmonických frekvencí, nebo útlum závislý na amplitudě, aj.)

Existují dvě skupiny metod zaměřených na akustickou nelinearitu odezvy materiálu, metoda rezonanční a nerezonanční.

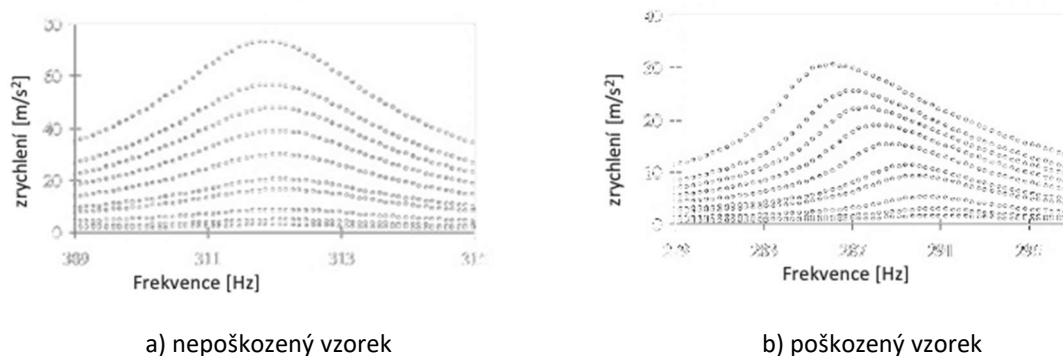


### 2.5.3.1 Metody rezonanční

Tyto metody jsou u těles s vysoce rezonančními projevy. Využívá se především měření nelineárního efektu frekvenčního posunu rezonančního kmitočtu v závislosti na intenzitě budícího signálu. V odezvě vzorku je podrobněji zkoumán frekvenční posun rezonančního maxima v závislosti na změnách amplitudy buzení. U poškozených vzorků se s amplitudou mění tvar rezonanční křivky a posouvá se vrchol rezonančního maxima. U vzorků nepoškozených se rezonanční frekvence s amplitudou nemění [56].

### 2.5.3.2 Metody nerezonanční

Nerezonanční metody vyhodnocují vliv nelinearity procházejícího akustického signálu, ten je ovlivněn nelinearitami způsobenými poškozením struktury materiálu. Metoda je vhodná pro tělesa s potlačenými rezonančními vlivy.



Obr. 21 Posun rezonančního maxima s rostoucí amplitudou [55]

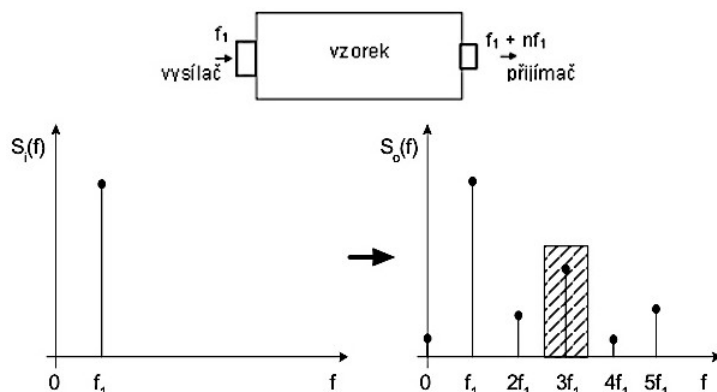
Metody lze rozdělit do dvou skupin:

- a) měření s jedním budícím signálem (jeden kmitočet  $f_1$ )
- b) měření s více budícími signály s odlišnými frekvencemi (obvykle dva kmitočty  $f_1$  a  $f_2$ ).

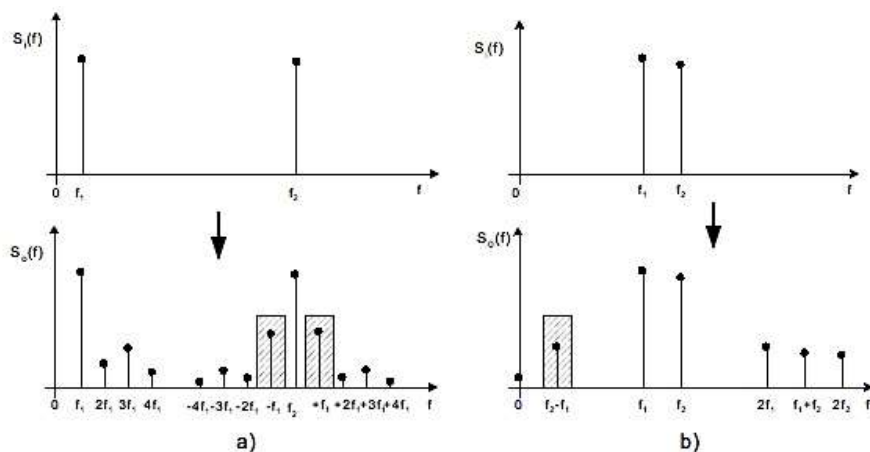
V prvním případě, kdy je využíváno měření s jedním budícím signálem, (Obr. 22) způsobuje nelinearita vznik dalších harmonických signálů v důsledku přítomnosti defektů. Amplitudy na harmonických frekvencích obecně klesají. Ovšem sudé složky mohou být vlivem malé nesymetrie nelinearity potlačeny. Důležitý je tedy projev třetí harmonické složky mezi nově vzniklými frekvencemi a je nejčastěji sledována její amplituda [56,57].

Při měření s více budícími signály vzniká vlivem nelinearit (defektů) podstatně vyšší počet harmonických složek, a kromě těchto složek od obou harmonických budících signálů vznikají součtové a rozdílové složky. V tomto případě jsou nejvýraznější první součtové a rozdílové složky. (Obr. 23a). Kmitočty jednotlivých budících signálů mohou mít řádově odlišné hodnoty, jeden je nízkofrekvenční a druhý vysokofrekvenční. V případě, kdy se jedná o kmitočty s blízkými frekvencemi, objeví se tzv. postranní složky (Obr. 23b).

Pokud ale využijeme signálu s velkými frekvenčními rozdíly, má první rozdílová složka poměrně nízkou hodnotu kmitočtu [46].



Obr. 22 Frekvenční spektrum odezvy jednoho budícího signálu [46]



Obr. 23 Frekvenční spektrum odezvy při průchodu dvou signálů [46]

Materiály mají většinou lineární chování. Případný výskyt nelinearity je způsoben změnami v materiálu, jako jsou např. trhliny a strukturální odlišnosti. Existuje několik druhů nelinearit, které vykazují různé příznaky, na základě nichž lze odborně odhadnout charakter vady.

Výhodou nelineární akustické spektroskopie je vysoká citlivost, citlivost metody je podstatně vyšší, než při práci s ultrazvukovými metodami využívajícími kratších vlnových délek (Phased array, Pulse - echo atd.), což umožňuje odhalit velmi malé vady a trhliny ve stadiu iniciace.

Metoda je schopna vyšetřovat velmi objemné struktury materiálu. Je schopna diagnostikovat obtížně diagnostikovatelné materiály, jimiž jsou např. betony, plasty, dřevo, kompozit atd. Další výhodou metody je rychlé odhalení vady a umožňuje díky typu nalezených nelinearit identifikaci druhu vady. Uplatnění metody je poměrně široké.

## 2.6 Srovnávací metody použité pro danou problematiku

### 2.6.1 Ultrazvuková impulzová metoda

Ultrazvuková metoda je jednou z metod pro nedestruktivní testování. Je založena na principu opakovaného vysílání ultrazvukových impulzů do testovaného materiálu a tím měření impulzové rychlosti daným materiálem.

Impulzovou rychlost šíření ultrazvukového podélného impulzu  $v_L$  [km/s] získáme z výpočtu doby průchodu ultrazvukového impulzu  $T$  [ $\mu$ s] a dráhy  $L$  [mm], po které se impulz ultrazvuku šíří. Ultrazvukový impulz se každým materiálem šíří různou rychlostí, jeho změny souvisí s vlastnostmi materiálu [44;75].

$$v_L = \frac{L}{T_l - T_{kor}} \quad (12)$$

$T_L$  ... měřený čas šíření impulzů v betonu [ $\mu$ s]

$T_{kor}$  ... korekce, tzv, mrtvý čas přístroje a rozdílů času šíření impulzu ultrazvukových vln pro zajištění kalibrace přístroje [ $\mu$ s]

Ultrazvuk je podélné mechanické vlnění, jeho frekvence leží nad slyšitelnou oblastí lidského sluchu (v technice je hranice určena hodnotou 20 kHz, ve stavebnictví je v rozsahu od 20 kHz do 500 kHz). Vlnová délka ultrazvuku je menší než u zvukového vlnění. Díky tomu není signál tolik pohlcován prostředím a má větší odraz od případných vad. Impulz tohoto mechanického vlnění je vyvolán elektroakustickým budičem. Tento budič je umístěn na povrchu zkoumaného materiálu ve třech měřících pozicích (v horní, prostřední a dolní části vzorku), rovnoběžně s podélnou osou vzorku.

Pro správné měření ultrazvukové impulzové metody je třeba zajistit vhodný přenos vlnění z budiče (sondy) do zkoušeného materiálu a ze zkoušeného materiálu do snímače. Abychom docílili správné akustické vazby, umístíme mezi sondu a povrch zkoumaného materiálu vazebný prostředek. Použitím vazebného prostředku se zamezí výskytu vzduchové mezery mezi sondou a vzorkem a snižuje se tak nežádoucí odraz vln a zvýší se tím průchod ultrazvuku ze sondy do testovaného tělesa. Nejčastěji se využívá gelů na vodní bázi, pro porézní, nasákový materiál je vhodnější například plastelína.

Sondy s akustickým vazebním prostředkem se umístí na měřící body na protilehlých hranách zkoumaného tělesa. Tenká vrstva vazebního prostředku zaručí dobrý akustický kontakt mezi sondou a vzorkem. Impulz vibrací je snímačem přeměněn po průchodu danou délkou dráhy v materiálu na elektrický signál a tím elektronický časový okruh umožní změřit dobu průchodu impulzu.

### 2.6.1.1 Mrtvý čas

Ultrazvukové vlnění prochází při měření doby průchodu po určité době i vrstvou akustického vazebního prostředku a konstrukcí sondy. Tato doba je proto označována jako mrtvý čas. Tento čas můžeme zjistit pomocí kalibračních vzorků, u kterých známe jejich časovou charakteristiku. Následně je nutné o tuto dobu změnit naměřené hodnoty.

Hodnotu mrtvého času udává většinou výrobce přístroje a jeho hodnota závisí na systému přístroje, frekvenci budiče a intenzitě vysílání impulzů [44].

Vzorec pro výpočet mrtvého času  $t_{kor}$ :

$$t_{kor} = t_{ME} - t_E \quad (13)$$

$t_{ME}$  ... doba průchodu ultrazvukového vlnění kalibračním vzorkem [s]

$t_E$  ... časová charakteristika kalibračního vzorku [s]

Tato metoda má velkou výhodu, že při zkoušení materiálu nedochází k jeho porušení a díky tomu můžeme zkoušky provádět opakovaně na stejném místě a tím docílit vyšší přesnosti měření. Naopak nevýhodou této metody je vliv vlhkosti a nehomogenity při zkoušení betonových vzorků na rychlost šíření ultrazvukové vlny.

Ultrazvukovou impulzovou metodu můžeme použít zejména pro zjištění jakosti zkoušeného materiálu, jeho fyzikálních a mechanických charakteristik, a to pomocí rychlosti šíření ultrazvukového vlnění materiálem. Z impulzové rychlosti lze také stanovit rovnoměrnost betonu, modul pružnosti a pevnost v tlaku, změny vlastností v čase (v průběhu zrání či degradace) a přítomnost trhlin v betonu a jejich hloubku apod. [50;44;46;75].

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu  $E_{cu}$  [MPa] se stanoví:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (14)$$

Kde  $\rho$  je objemová hmotnost materiálu [ $\text{kg/m}^3$ ],  $v_L^2$  [m/s] je impulzní průchodová rychlost a  $k$  [-] je bezrozměrný koeficient rozměrnosti prostředí pro zkušební těleso a je dán [75]:

$$\begin{aligned} \text{Pro 1D: } k_1 &= 1 & a &\leq 0,2 \cdot \lambda_L \\ \text{Pro 2D: } k_2 &= \sqrt{\frac{1}{(1-\nu_{cu}^2)}} & t &\leq 0,2 \cdot \lambda_L & (15) \\ \text{Pro 3D: } k_3 &= \sqrt{\frac{1-\nu_{cu}}{(1+\nu_{cu}) \cdot (1-2\nu_{cu})}} & a &\geq 0,2\lambda_L \\ & & b &\geq 0,2\lambda_L & (16) \end{aligned}$$

Kde  $\nu_{cu}$  je Poissonův koeficient [-] (hodna podle daného materiálu),  $\lambda_L$  je délka vlny ultrazvukového impulzu [m],  $a$ ,  $b$  jsou rozměry kolmé na směr prozvučování [m],  $t$  je tloušťka desky [m].

Délka podélné vlny impulzu  $\lambda_L$  [m] se stanoví z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$  [m/s] a vlastní frekvence ultrazvukového budiče  $f_u$  [Hz].

$$\lambda_L = \frac{v_L}{f_u} \quad (17)$$

Rychlost šíření ultrazvukových impulzů lze z jednorozměrného prostředí převést na hodnoty v trojrozměrném a dvojrozměrném prostředí [75].

### 2.6.2 Metoda impedanční spektroskopie

Metoda impedanční spektroskopie je vhodnou metodou pro nedestruktivní testování kvality stavebních materiálů s nízkou vodivostí (plasty, skla, keramika, cement, kompozity, aj.) Metoda využívá frekvenční závislosti impedančních charakteristik k analýze vlastností materiálu. Podstata impedanční spektroskopie je v elektrickém měření, které vyšetřuje elektrochemické chování systému. Systém je složený ze vzorku a dvou totožných elektrod umístěných na povrchu vzorku. Na vzorek je prostřednictvím elektrod přiváděn budící elektrický signál a následně je pozorována odezva (výsledný el. proud nebo napětí). Při měření je předpokládáno s neměnnými vlastnostmi systému.

Buzení elektrického signálu je možné třemi způsoby.

1. V prvním případě je napětí konstantní po celou dobu periody budícího signálu. Je zaznamenán průběh el. proudu. Tím se získají změny impedance v časové závislosti. Tento typ buzení není ovšem běžně používán. Pro zjištění průběhu impedance lze aplikovat Fourierovu transformaci.
2. Druhý způsob buzení je definován stavem, kdy budící elektrické napětí má náhodné malé hodnoty a náhodné frekvence, tento signál je podobný bílému šumu. U tohoto způsobu měříme výsledný elektrický proud. Pro zjištění průběhu impedance lze opět aplikovat Fourierovu transformaci, její řešení je však složitější.
3. Třetí způsob má neměnnou efektivní hodnotu a konstantní frekvenci. V tomto případě je měřen elektrický proud, fázový posun mezi napětím a proudem a amplitudou signálu. Vyhodnocuje se reálná a imaginární část neznámé impedance pro zvolenou frekvenci. Jedná se o nejpoužívanější způsob, který je jednoduše dostupný pro laboratorní použití a použití v praxi.

Zmíněné principy buzení impedanční spektroskopie lze kombinovat.

Výsledky analýzy jsou ovlivněny materiálovými vlastnostmi (vodivost, dielektrická konstanta, pohyblivost nosičů náboje, aj.) a vlastnostmi rozhraní materiál-elektroda (rychlost absorpčních reakcí, kapacita oblasti rozhraní, difúzní koeficienty elektrodového systému). Z výsledků impedanční spektroskopie lze odhalit například změnu struktury a vlhkosti testovaného materiálu [59].

### 2.6.3 Metoda MLS – buzení pseudonáhodným signálem

Testování ultrazvukovou metodou je dostatečné pro kovové materiály, není ovšem dostatečné u materiálu s vysokým útlumem. Metoda Impact-echo (kladívková metoda) poskytuje důležité informace pouze v rozhraní nízkých frekvencí (do 80 kHz) a poté je signál ztracen v šumu. Jediným způsobem, jak překonat útlum v materiálu je použít signál, který vnese více energie do testovaného materiálu (vzorku). Metoda MLS („Maximum lenght sequence“) generuje tzv. bílý šum do zkoušeného tělesa a díky tomu přenesení do tělesa podstatně více energie než např. metoda Impact - Echo. Přenesením většího množství energie vzniká potenciál dosáhnout vyšší přesnosti a eliminovat problém mnohonásobných odrazů, které snižují přesnost běžných pulzních metod. Díky generování signálu s vysokou energií je možné jako vazebný materiál použít vzduch [62].

Bílým šumem se rozumí takový signál či funkce, který zahrnuje všechny frekvence ve stejné hodnotě. Má plochá frekvenční spektra, z toho je odvozen obecný název „Bílý šum“. Harmonické složky takového signálu mají stejnou amplitudu [62].

U metody MLS odpovídá doba trvání signálu vnesené energii, která se přemění ve vibrace tělesa. Čím větších vibrací těleso dosáhne, tím více jsou jejich hodnoty měřitelné. Tomu odpovídá lepší rozlišovací frekvence, tj. lepší poměr signálu k šumu (SNR).

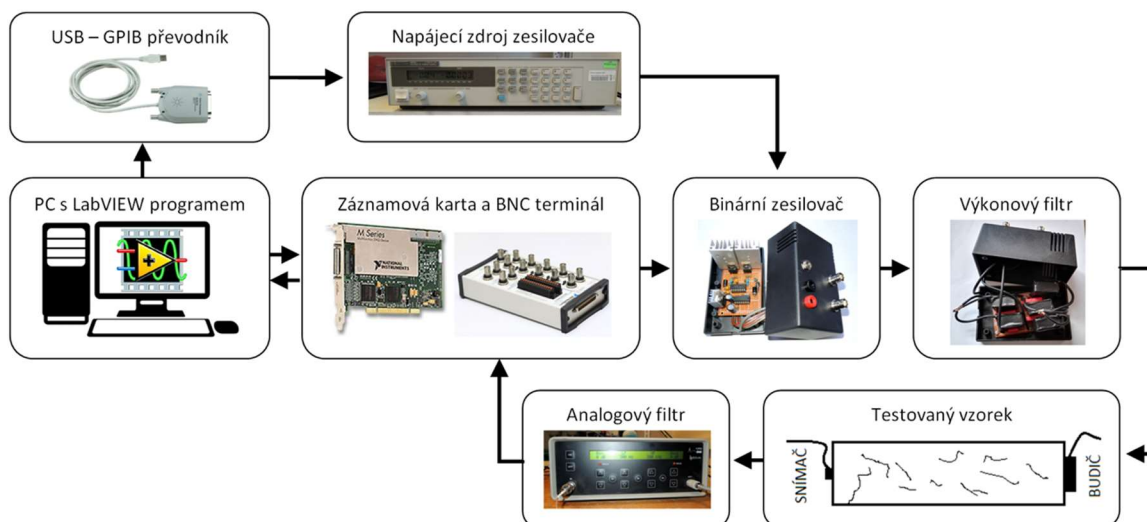
MLS patří do skupiny nelineární spektroskopie, protože intenzita budícího signálu se mění a materiál, který je poškozený, se chová nelineárně, tzn. že s rostoucí intenzitou budícího signálu se mění harmonické frekvence zkoušeného vzorku.

Metoda MLS je porovnávací metoda, ale díky posunu základní frekvence a vyšší harmonické frekvence v závislosti na intenzitě signálu, není tato metoda závislá na geometrii tělesa.

#### 2.6.3.1 Měřící technika MLS

Pro měření této metody byla použita automatizovaná měřící sestava, která je znázorněna na Obr. 24. Klíčovým prvkem sestavy je záznamová PCI karta, která je ovládána počítačem, který pomocí převodníku USB na GPIB program komunikuje s laboratorním zdrojem. Tento zdroj slouží pro napájení binárního zesilovače, ze kterého je získán signál, který je zesilovačem zesílen a poté ořezán na požadované hodnoty pomocí výkonného filtru. Akustický měnič přenesení do vzorku požadované mechanické vibrace pomocí vhodného vazebného prostředku. Signál zachycený snímačem v protilehlém konci testovaného vzorku je upraven a poté následuje digitalizace záznamovou kartou a signálová analýza.

Uvedená testovací aparatura umožňuje pouze průchodný režim, tzn. budič a snímač jsou umístěny v protilehlých koncích, případně umístěných na stejné straně testovaného vzorku [62].



Obr. 24 Blokové schéma uvažované měřicí sestavy MLS [62]

## 2.6.4 Konfokální mikroskop

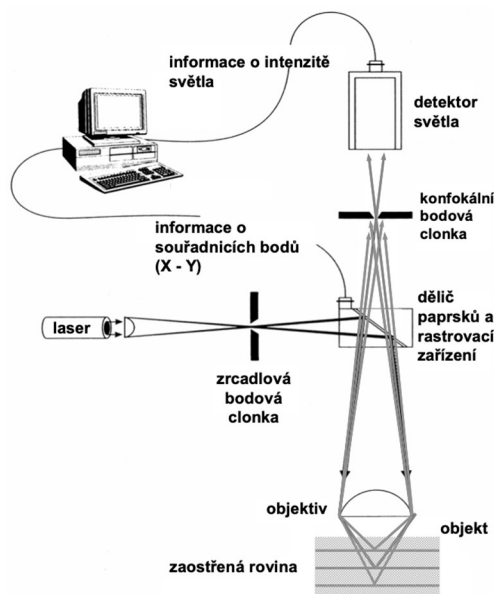
Konfokální mikroskop se řadí mezi optické mikroskopy. Má vyšší rozlišovací schopnosti dané detekcí světla pouze z ohniskové roviny mikroskopu. Základním prvkem konfokálního mikroskopu je skenovací mechanismus, který skenuje laserové záření po vzorku a umožňuje tak přesné trojrozměrné měření při vysokém rozlišení.

### 2.6.4.1 Rastrovací konfokální mikroskop – princip

Základním principem rastrového konfokálního mikroskopu je to, že netvoří obraz vcelku, nanejvýš, ale bod po bodu, řádkováním. Pomocí řádkování jsou tedy snímány optické body v rovině „XY“ a díky přesnému definovanému posuvu objektivu v ose „Z“ i jednotlivé řezy. Existují tři různé způsoby rastrování, a to cestou rozmítání laserového paprsku, příčným posouváním vzorku před objektivem, nebo posouváním objektivu před vzorkem.

Konfokální obrazy představují jednotlivé optické řezy vzorkem, tyto obrazy jsou vždy zaostřené, kontrastní, velmi informativní s vysokým rozlišením. Hloubka ostrosti je vždy minimální. Postupným snímáním desítek až stovek optických řezů v ose „Z“ do počítače získáváme možnost trojrozměrných obrazů [60].

Objekt pozorovaný konfokálním mikroskopem je osvětlen bodovým zdrojem, laserovým paprskem fokusovaným na clonku s využitím klasických metod světelné mikroskopie. Tím je umožněno zobrazování povrchů ve skutečných barvách, a to dává možnost využití při sledování změn v textuře povrchů.



Obr. 25 Princip konfokálního mikroskopu [60]

Konfokální mikroskop je využíván pro jeho unikátní schopnosti zobrazovat preparáty v trojrozměrném, vysoce kvalitním rozlišení. To nám otevírá možnosti pro zkoumání textury a složení povrchů a eroze materiálů. Vyhodnocují se jím výsledky mikro testů tvrdosti kovů i plastických materiálů. Pro jeho nedestruktivní a neinvazivní charakter je využíván také v oblasti biologie a lékařského výzkumu. Výhodou konfokálního mikroskopu je možnost pozorování nevodivých materiálů, poréznych materiálů, u kterých není potřeba vytvoření vakua, možnosti snímání obrazu ve skutečných barvách, aj.

## 2.6.5 Destruktivní metody zkoušení

Pro ověření skutečných materiálových vlastností, byly v rámci této práce, provedeny vybrané destruktivní zkoušky. Hodnoty získané z destruktivních zkoušek, blíže definují změny, které vlivem degradace v materiálech a konstrukcích nastávají.

### 2.6.5.1 Pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu ohybem byla stanovena dle metodiky ČSN EN 12 390-5 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [72].

### 2.6.5.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla stanovena dle ČSN EN 12 390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [73].

### 2.6.5.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost zkušebních těles byla stanovena dle ČSN EN 12 390-7 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost zatvrdlého betonu [74].



### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním tématem této práce je ověření vhodnosti použití nedestruktivních akustických metod pro analýzu betonových a železobetonových konstrukcí, které byly namáhány vysokými teplotami.

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, u požárem zasažených betonových konstrukcí dochází k narušení jejich vlastností, díky změnám v mikrostruktuře betonu dochází k pozvolnému snižování únosnosti konstrukce a tím ke snížení pevnosti. Ovšem degradace způsobená požárem, či například explozí s následkem požáru, nepoškozuje konstrukci lokálně, ale má postupný průběh. V místě ohniska požáru vznikne nejvíce zatížené místo. Směrem od zdroje požáru klesá teplota zatížení a tím se snižuje míra poškození.

Nedestruktivní akustické metody se jeví při k současnému stavu poznání jako vhodný nástroj pro analýzu stupně tepelné degradace. Klasické způsoby testování únosnosti poškozených konstrukcí mají destruktivní charakter, jejich princip spočívá v odebrání zkušebních vzorků, které se dále analyzují a nezajistí tak posouzení míry poškození ve více bodech konstrukce. Tento postup je tedy finančně i časově náročný. Při použití nedestruktivních akustických metod testování bychom mohli dosáhnout nejen lokalizace místa poškození, ale také určit stupeň degradace a tím predikovat možné změny vlastností materiálu a s tím spojené pevnostní změny.

**Cíle této disertační práce lze na základě současných teoretických poznatků shrnout do následujících bodů:**

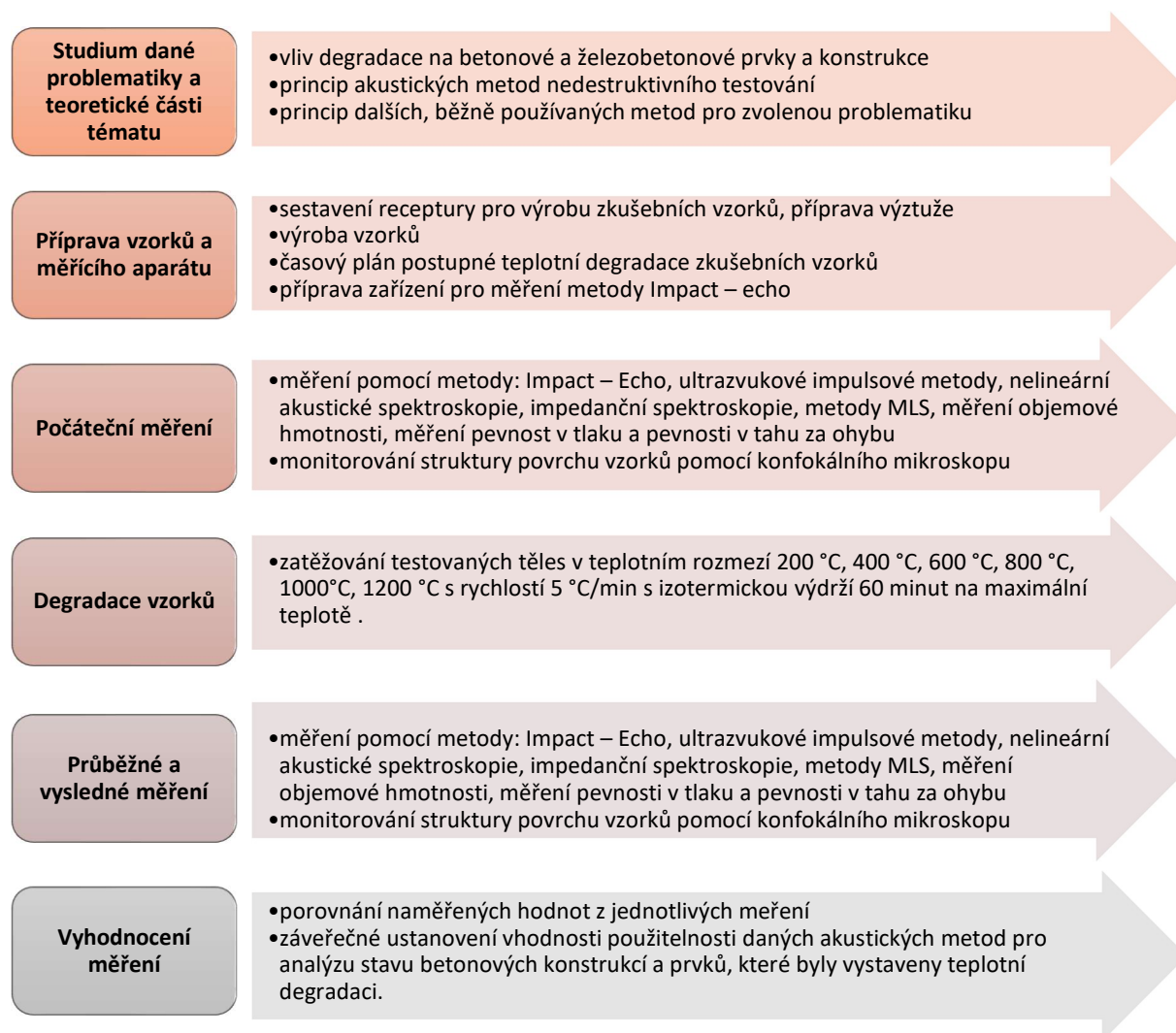
- 1) **Sledování průběhu a vlivu tepelné degradace** na vlastnosti zkušebních těles **pomocí akustických NDT metod.**
- 2) **Srovnání akustických metod s běžnými metodami testování.** Pro testování bude využito zejména takových metod, u kterých je systém měření rychlý a snadno dostupný. Jako hlavní akustická metoda bude použita metoda Impact – Echo.
- 3) **Vyhodnocení parametrů** získaných měření vybraných testovacích metod **a sledování změn těchto parametrů v důsledku tepelné degradace.**
- 4) **Posouzení vzájemné korelace** mezi parametry získanými použitím NDT metod testování s parametry získanými z běžných metod testování vhodných pro daný typ těles.
- 5) **Stanovení nejvhodnější a nejdostupnější akustické metody NDT** jako nástroje pro spolehlivou a rychlou detekci míry poškození a změn ve struktuře betonových materiálů, které prošly tepelnou degradací.

## 4 POUŽITÉ METODY TESTOVÁNÍ

### 4.1 Plán výzkumu

Pro naplnění cílů disertační práce byl sestaven plán výzkumu rozdělený do na sebe navazujících částí, Obr. 26. V první části byla na základě teoretického nastudování dané problematiky navržena receptura pro výrobu zkušebních těles. Byl navržen časový plán postupné tepelné degradace zkušebních těles a byla sestavena aparatura pro měření zvolené metody testování, metody Impact – Echo. Na základě navržené receptury byla vyrobena zkušební tělesa, na kterých byla provedena počáteční měření zvolených nedestruktivních i destruktivních metod testování a byla monitorována struktura povrchu zkušebních těles pomocí konfokálního mikroskopu.

Zkušební tělesa byla následně tepelně zatěžována a poté připravena k další fázi měření. Výsledná data vybraných metod nedestruktivního a destruktivního testování byla zpracována a vyhodnocena. Ze získaných parametrů byla posuzována vzájemná souvislost mezi jednotlivými zkušebními metodami. Závěrem bylo ustanovení vhodnosti použití vybraných nedestruktivních zkušebních metod pro analýzu míry degradace zkušebních těles, které byly vystaveny působení vysokých teplot.



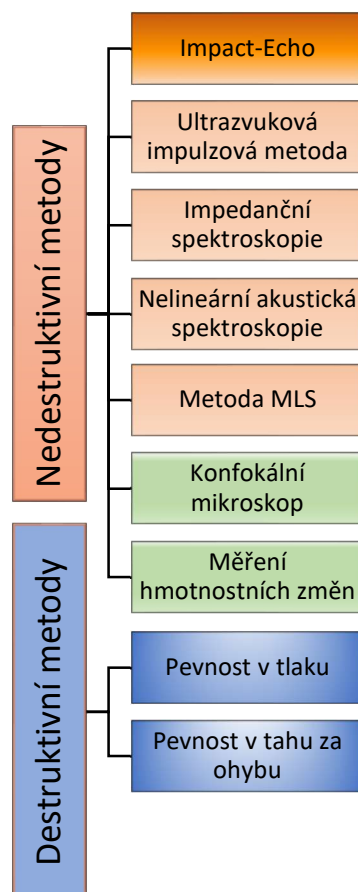
Obr. 26 Schéma postupu práce

## 4.2 Zvolené metody testování

Principy zvolených metod testování byly popsány v předchozích kapitolách. Na Obr. 27 je souhrn vybraných nedestruktivních a destruktivních metod testování, které byly v experimentální části této práce použity a jejich výsledky byly vyhodnoceny a vzájemně posuzovány.

Hlavní zvolenou metodou této práce byla metoda Impact-Echo, která byla porovnáována s dalšími metodami testování. Zároveň byla, na základě získaných výsledků, posuzována vhodnost použití této nedestruktivní metody pro danou problematiku.

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, tepelnou degradací dochází u zkušebních těles k fyzikálně chemickým změnám. Této problematice se věnují vědecké týmy téměř po celém světě a je na toto téma napsáno několik zahraničních i tuzemských publikací a o tyto poznatky se opírá i tato práce. Cílem zvolených metod testování je zaznamenat a popsat změny, ke kterým vlivem tepelné degradace dochází.



Obr. 27 Schéma zvolených metod testování

## 5 Experimentální část

Experimentální část této práce byla započata výrobou zkušebních těles (viz. kapitola 5.1) které byly vyrobeny v několika sadách a rozděleny na dvě části, tělesa s výztuží a bez výztuže. Následovalo testování a tepelné namáhání zkušebních těles dle zvolené metodiky. Veškeré postupy při výrobě i testování zkušebních těles byly aplikovány dle platných českých a evropských norem.

### 5.1 Výroba zkušebních těles

Pro účely měření byla vyrobena zkušební tělesa z cementové malty s vodním součinitelem  $w/c = 0,46$  o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm. Polovina výrobní sady byla opatřena jedním kusem hladké betonářské výztuže o průměru 8 mm a délce 240 mm, uložené v podélné neutrální ose vzorku. Druhá polovina vzorků byla formována bez vyztužení. Směs pro výrobu malty obsahovala cement CEM I 42,5R z Českomoravského cementu, a.s. v Mokrém a zkušební křemenný písek pro přípravu malt z Filtrační písky, s.r.o. v poměru 1:3 a v souladu s normou ČSN 72 1200, kdy byly použity vždy 3 frakce písku o velikosti zrn 0-1, 1-3, a 3-4 mm, které byly míchány v hmotnostním poměru 1:1:1. Pro vyztužení zkušebních těles byla použita výztuž do betonu třídy 10 216.0 o průměru 8 mm. Do formy pro výrobu vzorků s výztuží, byly vloženy do okrajů distanční tělesa pro zajištění centrování výztuže. Metodika výroby zkušebních těles je popsána normou ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu, část 1: Stanovení pevnosti.

Směs malty byla míchána mechanicky za pomoci míchačky v etapách míchání dle metodiky přístroje. Záměs pro tři zkušební tělesa obsahovala  $(450 \pm 2)$  g cementu,  $(1350 \pm 5)$  g písku a  $(225 \pm 1)$  g vody (v hmotnostním poměru 1: 3:  $\frac{1}{2}$ ). Po míchání byla směs umístěna do formy. V první vrstvě byla zhutněna 60 rázy na zhutňovacím stolku, následně s druhou vrstvou dalšími 60 rázy. Všechna tělesa byla odformována po 24 hodinách zrání při teplotě  $22 \pm 2$  °C a  $55 \pm 5$  % relativní vlhkosti. Dále byla tělesa uložena na dalších 60 dní do vodní lázně, po vyjmutí z vodní lázně byla tělesa sušena v sušící peci po dobu 48 hodin při teplotě 60 °C.



Obr. 28 Výroba zkušebních těles

## 5.2 Degradací procesy

Zkušební tělesa byla rozdělena do několika sad, dle teploty výpalu, z nichž první sada byla referenční, tedy bez tepelné degradace. Před zahájením degradačních procesů byla zkušební tělesa zvážena a byla na nich provedena počáteční měření nedestruktivních metod testování. Posléze byla tělesa vložena do laboratorní pece CLASIC (Obr. 29) a tím bylo docíleno postupného tepelného zatěžování. Jednotlivé sady vzorků (po 5 ks zkušebních těles) byly zatěžovány teplotami 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C a 1200 °C. Nárůst teploty byl s rychlostí 5 °C/min s izotermickou výdrží na maximální teplotě po dobu 60 minut. Po výpalu byly vzorky samovolně ochlazeny na laboratorní teplotu. Po vychladnutí byly degradované vzorky v laboratoři (při teplotě  $22 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti  $55 \pm 5$  %) znovu podrobeny sadě nedestruktivních měření a vážení. Po veškerých měřeních byla vybrána zkušební tělesa z každé teplotní sady a na těchto tělesech byly provedeny destruktivní zkoušky.



Obr. 29 Laboratorní pec se vzorky po tepelné degradaci

Pro prezentaci výsledků průběžného měření byl vybrán z každé sady, která byla podrobena řízené degradaci, vždy jeden vzorek.



Obr. 30 Zkušební tělesa po tepelné degradaci

## 5.3 Aplikace vybraných metod testování

### 5.3.1 Výsledky metody Impact-Echo

Jak je již zmíněno v kapitole 2.5, metoda spočívá ve zkoumání odezvy mechanického impulzu. Vnější mechanický impulz vybudí ve zkušebním vzorku harmonické vlnění, které se šíří uvnitř struktury a je odraženo od vad zkoumaného tělesa, jeho trhlin a mikrotrhlin. Odražené vlny, snímané na povrchu tělesa piezoelektrickými snímači, poskytují záznam o výskytu strukturálních vad ve vzorku pomocí analogového signálu v podobě napětí  $U$  v čase  $t$ . V případě poškození je zvýšen útlum signálu a dochází ke změně tvaru kmitů.

Pomocí speciálního vyhlazovacího algoritmu FFT (rychlé Fourierovy transformace) byly určeny z každého výstupního signálu dominantní frekvence  $f$  v závislosti na napětí  $U$ .

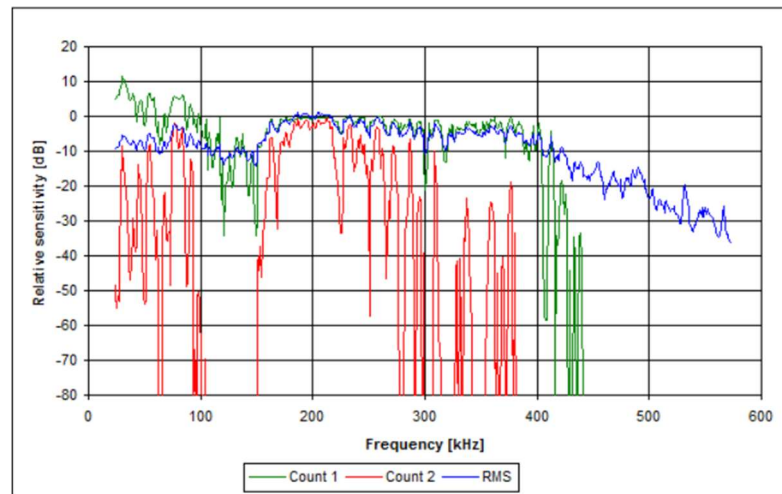
Signál byl vyvoláván úderem ocelového kladívka o hmotnosti 12 g, umístěného na závěsu, kde bylo spouštěno ze stanovené výšky. Aparatura pro měření metody Impact-Echo byla sestavena tak, aby docílila konstantních podmínek měření (Obr.32).

Úderem kladívka byla vyvolána nízkofrekvenční napěťová vlna, která se odráží od vnitřních vad a povrchu tělesa. Odezva, vyvolaná úderem kladívka ve formě povrchových vln, byla snímána piezoelektrickým snímačem DAKEL typu MIDI-04 přes dvoukanálový osciloskop Handyscope HS3AWG - 5 firmy TiePie engineering s rozlišením 16 bitů a s maximální frekvencí sběrnice 195 kHz při daném rozlišení. Vybraný osciloskop lze připojit pomocí USB konektoru a dá se využít jako multimetr nebo jako generátor signálu [6]. Snímač byl připevněn k povrchu vzorku pomocí včelího vosku.

Signál zaznamenaný osciloskopem byl poté digitalizován, uložen a vyhodnocen na řídicím počítači pomocí softwarového balíčku TiePie Multi Channel software. Pomocí speciálního vyhlazovacího algoritmu (Fourierovy transformace) byly určeny z každého výstupního signálu dominantní frekvence. Měření probíhala vždy na daném vzorku a teplotní sadě v pěti opakováních a byly vyhodnoceny průměrné hodnoty z těchto měření [66].

#### Piezoelektrický snímač MIDI

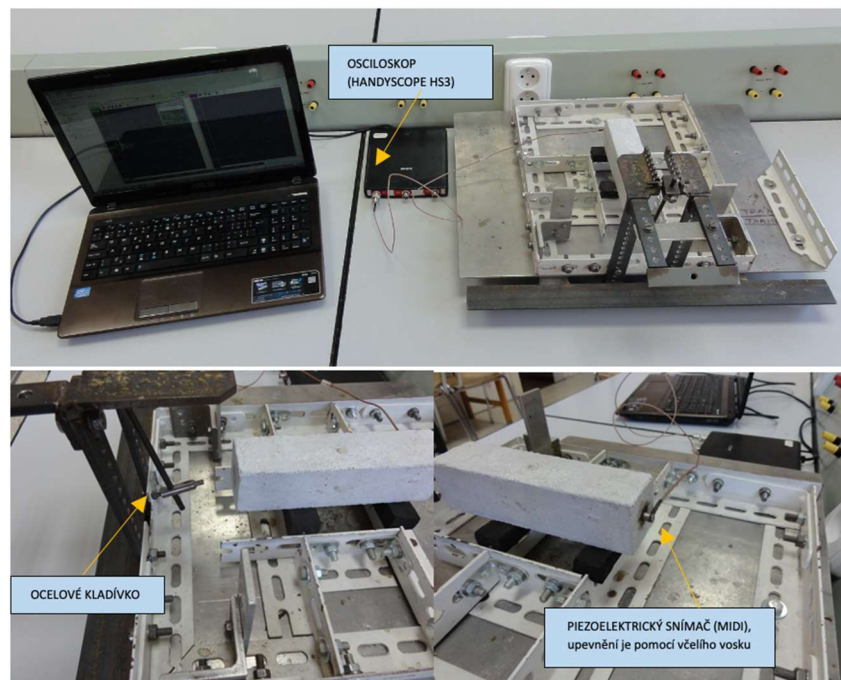
Pro aplikaci metody Impact-Echo byl použit snímač DAKEL MIDI-04, který se skládá z piezoelektrického jádra vyrobeného ze sloučeniny olova, zirkonia a titanu (tzv. PZT) a z pouzdra z nerezové oceli s dotykovou plochou o průměru 5 mm, která je také z nerezové oceli. Tento piezoelektrický snímač má nízkou hodnotu šumu a vyšší mechanickou odolnost [71].



Obr. 31 Relativní srovnávací charakteristika snímače typu MIDI [71]

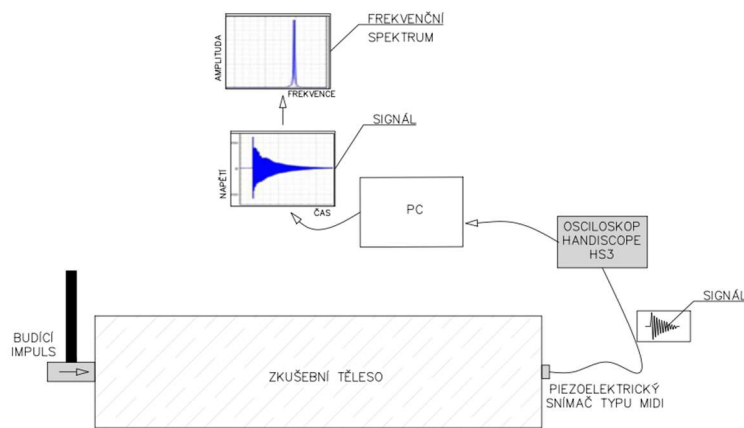
### Osciloskop Handyscope HS3

Pro účely měření byl použit dvoukanálový multifunkční osciloskop Handyscope HS3AWG-5 firmy TiePie engineering s rozlišením 16 bitů a s maximální frekvencí sběrnice 195 kHz při daném rozlišení. Vybraný osciloskop lze připojit pomocí USB konektoru a dá se využít jako multimetr nebo jako generátor signálu. Osciloskop byl připojen přes USB konektor k řídicímu počítači a ovládán pomocí softwaru dodaného výrobcem.



Obr. 32 Měřící sestava metody Impact-Echo





Obr. 33 Princip testování metody Impact-Echo

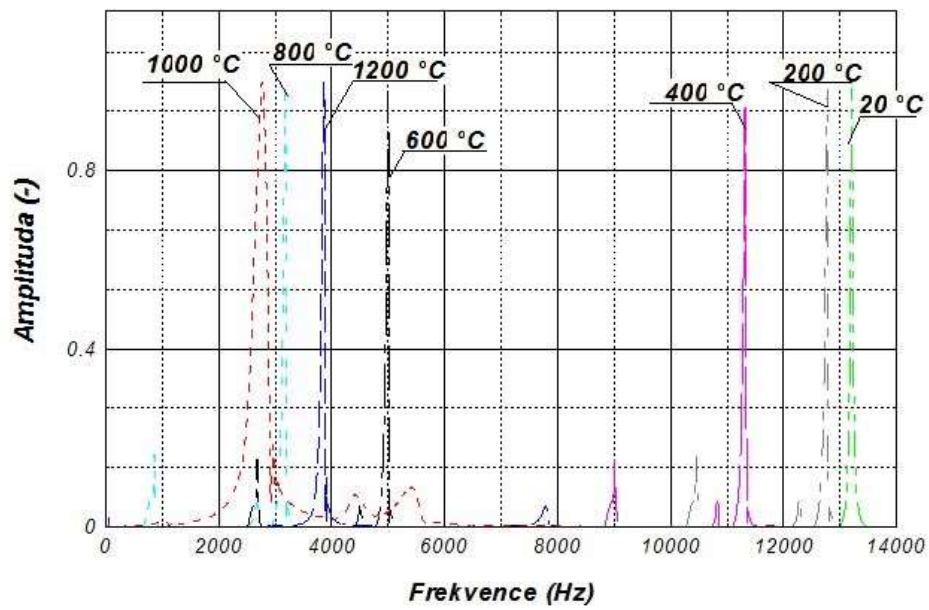
Princip testování zkušebních těles metodou IE je znázorněn na Obr. 33. Tato měření probíhala v laboratoři při teplotě  $22 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti  $55 \pm 5$  %.

Rezonanční frekvence byly na zkušebních tělesech zjišťovány ve třech směrech kmitání, v podélném směru (první dominantní frekvence  $f_l$ ), v příčném směru (první dominantní frekvence  $f_{t,1}$  a druhá dominantní frekvence  $f_{t,2}$ ) a kroutivém směru kmitání (první dominantní frekvence  $f_f$ ) viz. Obr. 17 (kap. 2.5.2).

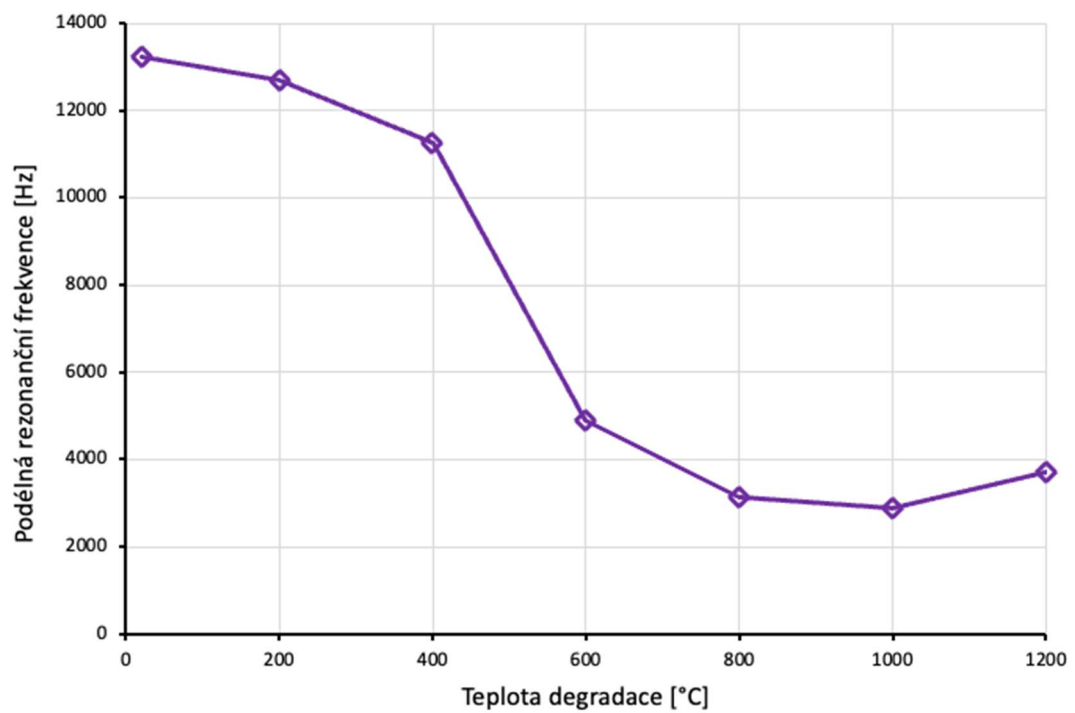
Úderem kladívka byl do tělesa vnesen mechanický impulz, který byl přes snímač veden do řídicí jednotky, ze které je následně vyhodnocena maximální amplituda, která odpovídá rezonanční frekvenci. Pro potlačení nežádoucích rušivých kmitů byl zkušební vzorek částečně podložen měkkou podložkou z pórovité gummy. Každý úder kladívkem byl na zkušebním tělese opakován 5x. Z naměřených parametrů byla vyhodnocena průměrná hodnota měření, která je uvedena v následujících grafech na Obr. 34 – Obr. 38.

Na Obr. 34 a Obr. 36 je záznam frekvenčního spektra rezonančních frekvencí podélného (Obr. 34) a příčného (Obr. 36) směru vlnění pro dané teploty degradace. Trend všech výsledných hodnot dominantních frekvencí daného směru kmitání v závislosti na teplotě degradace je znázorněn na Obr. 35 a Obr. 37.





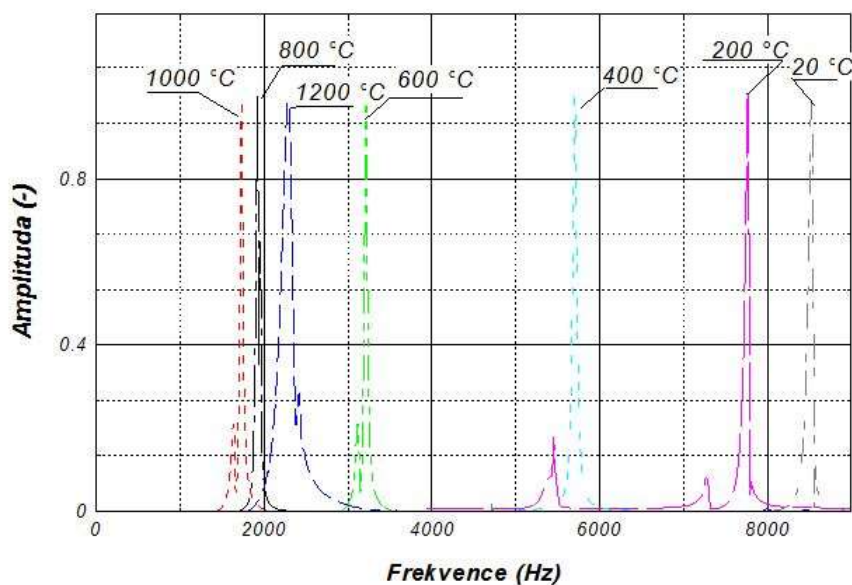
Obr. 34 Frekvenční spektrum podélného směru vlnění



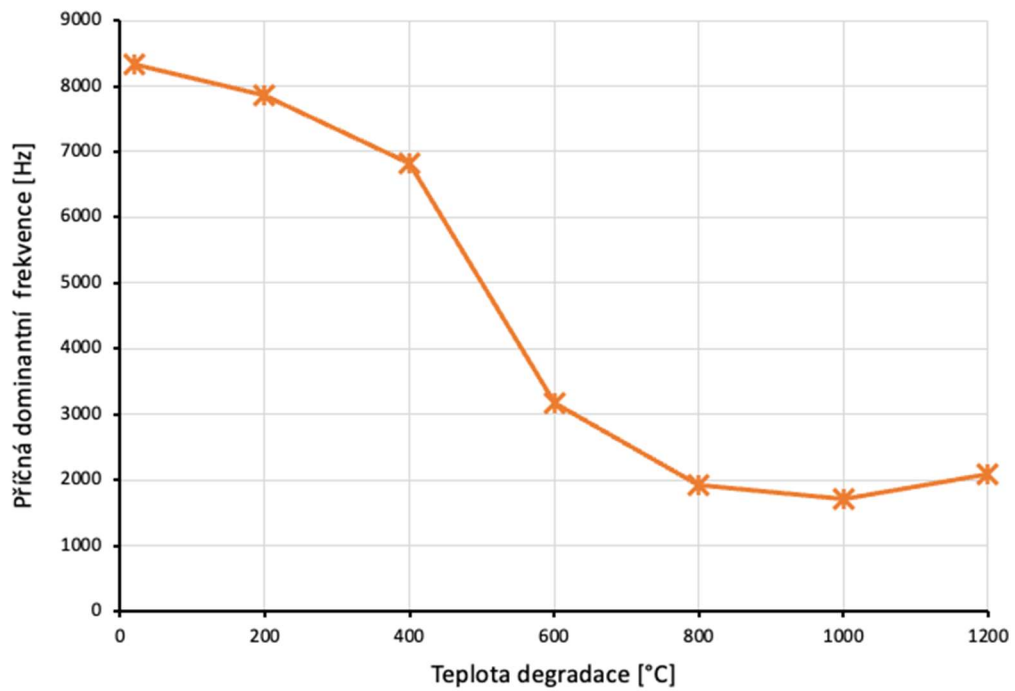
Obr. 35 Posun podélných dominantních frekvencí vlivem tepelné degradace

V Grafu na Obr. 35 a Obr.37 je znázorněn posun dominantních frekvencí v podélném (Obr. 35) a příčném (Obr. 37) směru vlnění. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, vlivem tepelné degradace dochází ke změnám v mikrostruktuře betonu. Fyzikálně mechanickými a fyzikálně chemickými fázovými změnami způsobenými degradací vysokými teplotami tak dochází ke změně mechanických vlastností zkušebních těles.

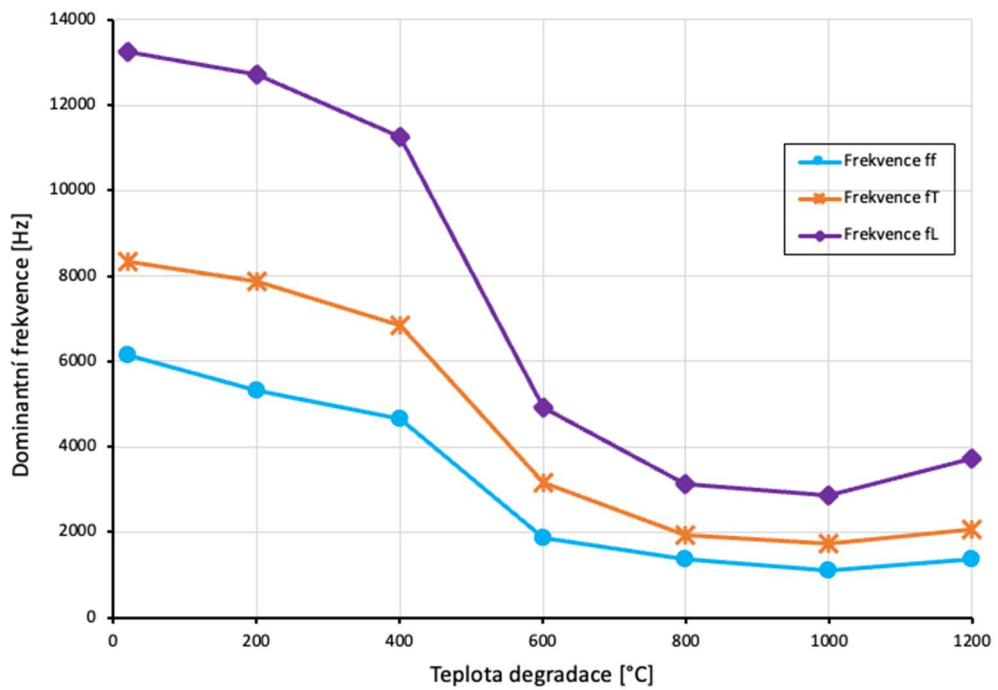
Na Obr. 38 jsou vyhodnoceny křivky dominantních frekvencí ve všech třech směrech kmitání. Z grafu můžeme vypočítat, že trend poklesu dominantních frekvencí má u všech třech směrů testování podobný průběh. Z počátku zahřívání je patrný mírný pokles naměřených hodnot dominantních frekvencí, tento jev souvisí se ztrátou fyzikálně vázané vody a počátkem dehydratace CSH gelu. Při teplotách 400 °C, klesla hodnota rezonanční frekvence u podélného směru kmitání o necelých 2000 Hz (pokles o 15%), v případě příčného a kroutivého směru kmitání byl pokles rezonanční frekvence o přibližně 1500 Hz (pokles o cca 20%). Při této teplotě dochází v betonu k rozkladu Portlanditu  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ . V případě dosažení teploty 600°C nastalo výrazné snížení dominantní frekvence, a to o více, jak 60% u všech směrů kmitu. To je ovlivněno dehydratací cementového tmele a fázové přeměny křemene z fáze  $\beta$  na  $\alpha$ , dochází také k další fázi rozkladu CSH gelů. Rozklad CSH gelu způsobuje tlakovou deformaci cementového tmele a tím dochází k nárůstu porozity a ke změně objemu. S tím souvisí vznik trhlinek a celková ztráta soudržnosti materiálu. Tyhle změny ovlivňují průchod mechanické vlny, a to je patrné z výsledných hodnot rezonančních frekvencí. Při teplotě 1000 °C dochází k tvorbě Wollastonitu  $\beta$  a nastává počátek tavení čediče, v tomto případě dochází jak ze strany rezonanční frekvence, tak z výsledných parametrů pevností k dosažení minimálních hodnot. U teploty 1200 °C došlo k mírnému nárůstu dominantních frekvencí, to je způsobeno tvorbou nových krystalických fází a vznikem keramických vazem, tím dochází k mírnému zpevnění struktury zkušebních těles. Dochází také k postupné přeměně některých složek betonu v taveniny a počátku částečného slinování.



Obr. 36 Frekvenční spektrum příčného směru vlnění



Obr. 37 Posun příčných dominantních frekvencí vlivem tepelné degradace



Obr. 38 Porovnání posunu jednotlivých dominantních frekvencí vlivem tepelné degradace

Namáhání zkušebních těles působením vysokých teplot v laboratorní peci umožnilo napodobení reálných termických degradací za jasně definovaných okrajových podmínek.

Z výsledků měření pomocí metody IE jsou patrné změny mezi stavem před degradací a stavem po tepelné degradaci. Vývoj rezonančních frekvencí poskytl relativně přesné informace o míře poškození zkušebních těles pro daný stupeň tepelné degradace.

Parametry získané měřením metodou IE budou dále porovnány s výslednými parametry vybraných nedestruktivních a destruktivních metod testování. V kapitole 5.3.10 je popsána vzájemná korelace mezi těmito hodnotami.

#### 5.3.1.1 Frekvenční poměry naměřených rezonančních frekvencí

Dalším vyhodnocením rezonančních metod je srovnání poměrů naměřených rezonančních frekvencí. Porovnáván je poměr frekvence krouživého, příčného a podélného kmitání. Dle normy ČSN 73 1372 [77] je uvažováno z příkladu na ideální krychli z homogenního a izotropního materiálu v ideálních podmínkách. Porovnány byly frekvence naměřené na zkušebních tělesech s různým stupněm tepelné degradace.

Výsledky poměrů referenčních hodnot a hodnot naměřených po tepelné degradaci jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab.2 Frekvenční poměry rezonančních frekvencí  $f_L$ ,  $f_t$ ,  $f_f$  naměřených metodou IE v závislosti na teplotě degradace

Teplota degradace [°C]	$f_f : f_L$	$f_t : f_L$
20	0,464	0,630
200	0,417	0,619
400	0,412	0,606
600	0,380	0,644
800	0,434	0,614
1000	0,381	0,599
1200	0,369	0,561

Z výsledků frekvenčních poměrů uvedených v tabulce 2 můžeme vidět, jak poměry  $f_f : f_L$  se zvyšující se hodnotou tepelné degradace klesaly. Pro poměr  $f_t : f_L$  byla maximální hodnota u teploty 600 °C. Ovšem vztah mezi výslednými hodnotami frekvenčních poměrů v závislosti na tepelné degradaci není zcela zřejmý. Tyto poměry jsou proto směrodatné zejména pro referenční zkušební tělesa. Hodnoty naměřených frekvencí pro referenční zkušební tělesa dosahovaly dle teoretických hodnot velmi podobných výsledků.

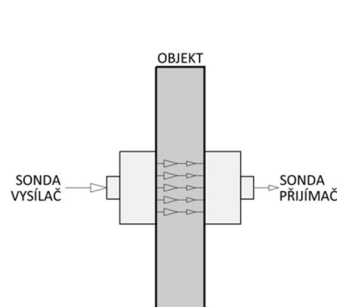
### 5.3.2 Výsledky měření pomocí ultrazvukové impulzové metody

Ultrazvuková impulzová metoda je jednou z metod pro nedestruktivní testování. Je založena na principu opakovaného vysílání ultrazvukových impulzů do testovaného materiálu a tím měření impulzové rychlosti daným materiálem viz. kapitola 2.6.1.

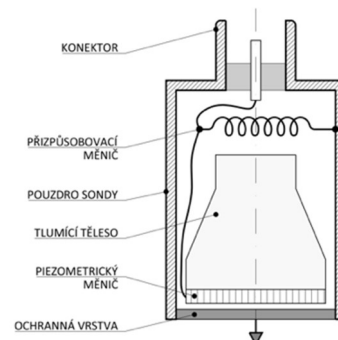
Rychlost průchodu ultrazvuku byla na zkušebních tělesech měřena v podélném směru testování. Tělesa byla položena na měkkou podložku z pórovité gumy. Pro testování byl použit ultrazvukový přístroj PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) od společnosti Proceq. Pro dané měření byly zvoleny sondy o kmitočtu 82 kHz.

Použita byla ultrazvuková aparatura (Obr.41) se dvěma sondami (vysílací a přijímací). Sondy měří s dostatečnou přesností čas, za který vysílaný impulz projde k přijímací sondě přes měřící základnu [75].

Pro dosažení dobrého akustického spojení mezi testovaným vzorkem a plochami sond (budiče a snímače) byl použit SONO indiferentní gel. Použitím indiferentního gelu se zamezilo výskytu vzduchové mezery mezi sondou a vzorkem a snížil se tak nežádoucí odraz vln a zvýšil se průchod ultrazvuku ze sondy do testovaného tělesa. Po aplikaci gelu mezi sondu a povrch testovaného tělesa následovalo přitlačení tohoto budiče a přijímače k povrchu na protilehlých hranách tělesa.



Obr. 39 Schéma ultrazvukové impulzové metody – průchodové [49]



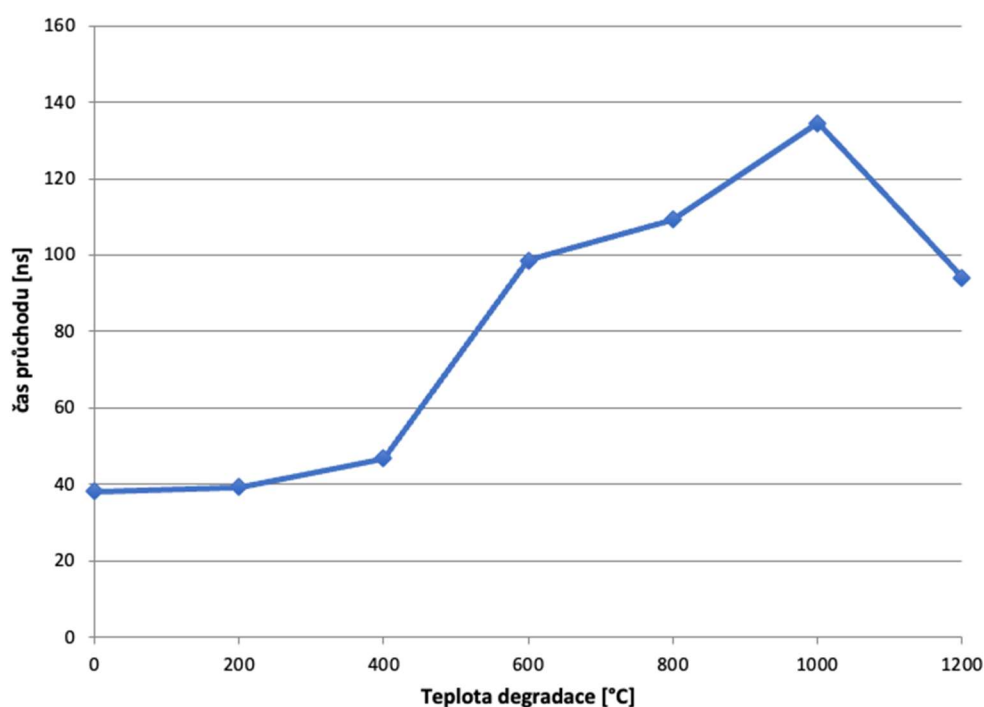
Obr. 40 Ultrazvuková piezoelektrická sonda – přímá [50]



Obr. 41 Aparatura pro měření ultrazvukové impulzové metody

Jak již bylo zmíněno, rychlost šíření průchodu ultrazvuku byla měřena na zkušebních tělesech v podélném směru testování. Těleso bylo posazeno na pružné podložce ve směru hutnění. Výsledkem měření je stanovení doby, za kterou je schopen ultrazvukový signál ve zkušebním tělese urazit danou vzdálenost. Kalibrace ultrazvukového signálu byla provedena na měřeném etalonu, u kterého byl definován čas průchodu ultrazvuku. Od každého měření času průchodu ultrazvuku byla odečtena korekce času průchodu, tzv. mrtvý čas přístroje.

Na Obr. 42 je znázorněn vliv teploty zatěžování na čas průchodu ultrazvukového vlnění. Ten byl nejnižší u referenčních vzorků (0)  $T = 38,1 \mu s$ . Při tepelné degradaci měly hodnoty měření času průchodu na zkušebních vzorcích pozvolnou lineární tendenci zvyšování do teploty 400 °C. U teploty 600 °C se doba průchodu výrazně zvýšila na hodnotu 98,6  $\mu s$ . To vypovídá o fázi rozkladu CSH gelů a přeměně křemene z fáze  $\beta$  na  $\alpha$ . Nejdelší doba průchodu 134,5  $\mu s$  byla naměřena pro vzorky u kterých proběhla tepelná degradace při teplotě 1000 °C, což odpovídá počátku vzniku keramické vazby. Při teplotě 1200 °C byl čas průchodu snížen na hodnotu 94,14  $\mu s$ . To je nejspíše způsobeno zpevněním struktury testovaného tělesa díky přechodu některých složek betonu do taveniny a částečnému vniknutí slinování.

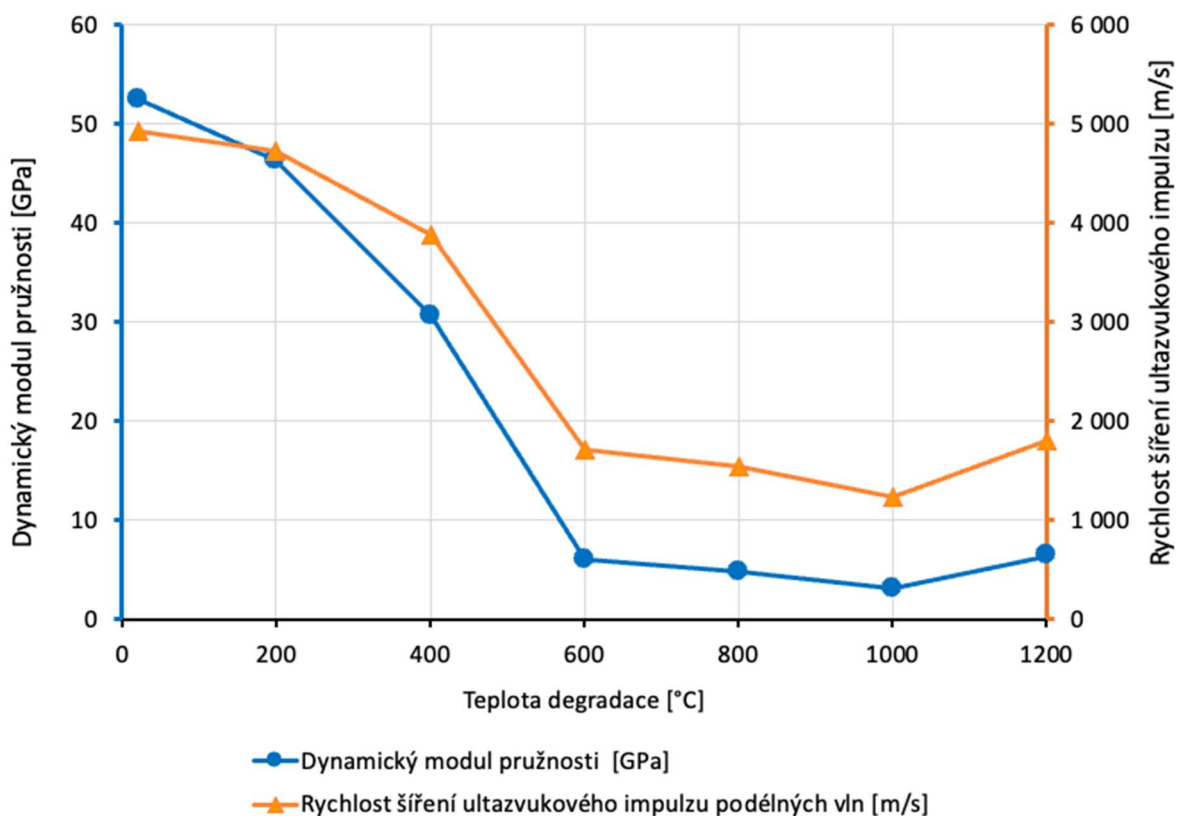


Obr. 42 Graf změny časového průchodu ultrazvuku v závislosti na teplotě

Z naměřených časů doby průchodu ultrazvukového vlnění byla stanovena rychlost šíření průchodu ultrazvuku v závislosti na tepelné degradaci, která je znázorněna v grafu na Obr. 43. Z grafu je patrné, že s rostoucí teplotou klesá rychlost šíření ultrazvukového vlnění, to potvrzuje fyzikálně chemické změny ve struktuře betonu.

Z rychlosti průchodu ultrazvuku byl dále stanoven dynamický modul pružnosti (Obr. 43). U referenčního vzorku se dynamický modul pružnosti pohybuje na hodnotě 52 GPa. Naměřené hodnoty mírně klesají až do teploty 400 °C (30 GPa). Při dosažení teploty 600°C nastává výrazný pokles dynamického modulu pružnosti, a to na hodnotu (6 GPa), tento pokles dosahuje svého minima při teplotě degradace 1000 °C (3 GPa). U teploty 1200 °C dochází ke slinutí kameniva a tím se mírně zvýší hodnota zpevnění, proto dochází k mírnému nárůstu hodnot dynamického modulu pružnosti.

Výsledky dynamického modulu pružnosti vypovídají o fyzikálně chemických a fyzikálně mechanických změnách, které vlivem tepelné degradace v testovaných tělesech nastaly. Parametry získané z měření ultrazvukovou impulzovou metodou vykazují velmi podobný trend jako naměřené hodnoty podélné rezonanční frekvence metodou IE.



Obr. 43 Graf dynamického modulu pružnosti  $E_{cu}$  z měření rychlosti průchodu ultrazvuku v závislosti na teplotě a Graf změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu v závislosti na teplotě

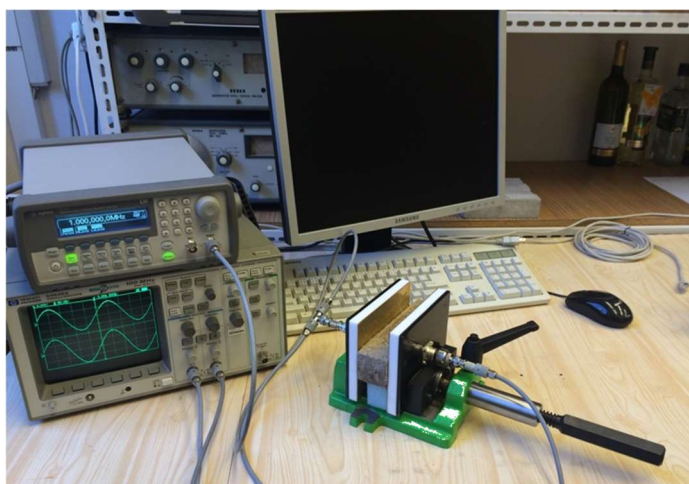


### 5.3.3 Výsledky měření metodou impedanční spektroskopie

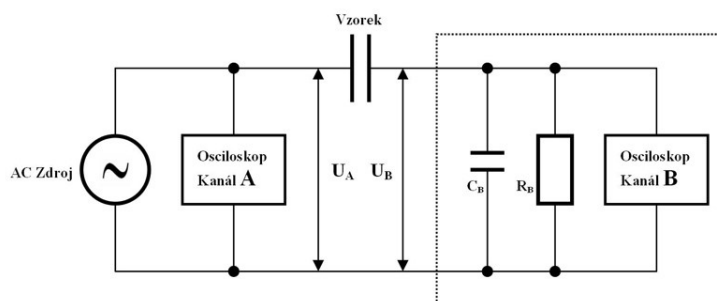
Další nedestruktivní metodou testování byla zvolena metoda impedanční spektroskopie, viz. kapitola 2.6.2. Tato metoda využívá závislost impedančních charakteristik k analýze vlastností látky. Pro experimentální měření bylo použito uspořádání soustavy kov – zkoumaný materiál – kov. Měřicí aparatura je sestavena z generátoru sinusového signálu Agilent 33220A a osciloskopu Agilent 54645A (Obr. 44). Pro měření impedance byly vzorky postupně umístěny mezi dvě elektrody s mosazným povrchem (7 x 3,5 cm) a přitlačeny pomocí šroubového mechanismu. Poté byly podrobeny impedanční analýze. Pro výsledné parametry byl použit software, který je určený k obsluze aparatury a zpracování dat. Výstupem ze softwaru byla získána spektra ztrátového činitele v závislosti na frekvenci  $\tan \delta (f)$ , závislost imaginární složky měrné impedance  $\text{Im } Z (f)$  na reálné složce měrné impedance  $\text{Re } Z (f)$  a elektrická kapacita  $c(f)$ .

Ztrátový činitel  $\tan \delta$  jako parametr nesouvisí nijak s rozměry vzorku, ani jeho geometrií. Jedná se o materiálovou konstantu.

Hodnoty složek měrné impedance každého zkušební vzorku byly spočteny z experimentálně zjištěných hodnot reálné a imaginární složky impedance, dělením dané složky impedance tloušťkou vzorku a vynásobením plochou elektrod [76].



Obr. 44 Měřicí sestava metody impedanční spektroskopie

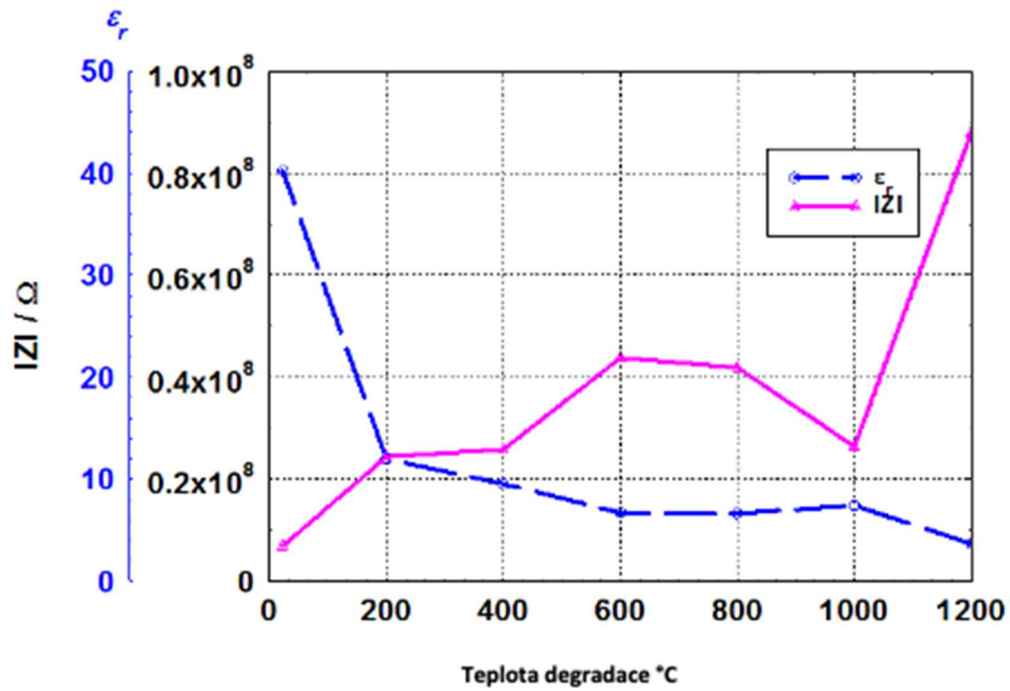


Obr. 45 Schéma zapojení měřicí aparatury Impedanční spektroskopie (zdroj střídavého napětí, testování vzorek, dvoukanálový osciloskop) [76]

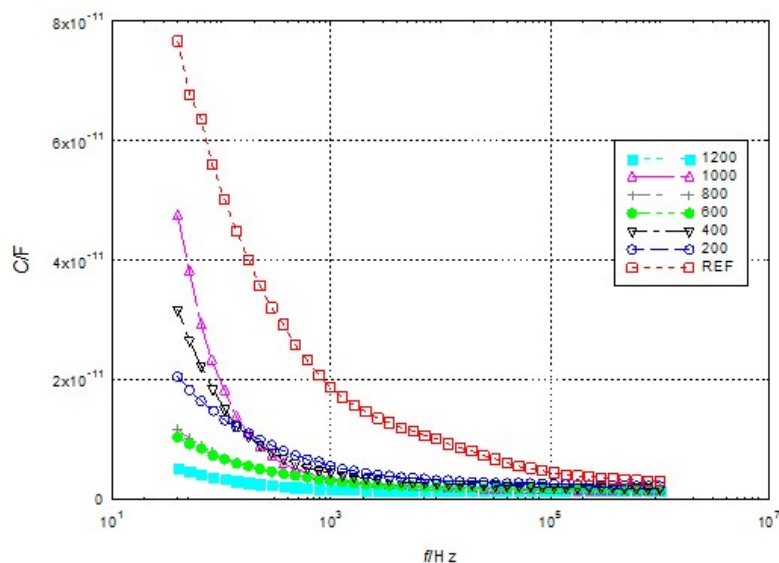


Tab.3 Elektrické parametry zkušebních vzorků měřených při referenční frekvenci 1 kHz

Teplota	20 °C (REF)	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C
Z  (MΩ)	1,87	5,57	4,44	3,12	3,09	3,44	1,70
C (pF)	6,89	2,44	2,58	4,38	4,19	2,54	8,8
$\epsilon_r$ (-)	40,22	11,98	9,55	6,71	6,66	7,39	3,67



Obr. 46 Graf závislosti relativní permitivity a absolutní hodnoty impedance vzorků podrobených tepelné degradaci



Obr. 47 Závislost elektrické kapacity vzorku  $c(f)$  na výši tepelné degradace

Na Obr. 46 je popsána změna relativní permitivity  $\epsilon_r$  materiálu při referenční frekvenci budícího elektrického pole 1 kHz, pro různé fáze tepelné degradace. Při zvyšující se teplotě degradace klesají hodnoty permitivity materiálu. Pro teploty 600 °C a 1000 °C jsou hodnoty relativní permitivity velmi blízké. Naopak absolutní hodnota impedance  $|Z|$  má stoupající trend až do teploty 600 °C. S navýšením teploty degradace nad 600 °C dochází k poklesu naměřených hodnot. U vzorku degradovaného na teplotu 1000 °C dosahovala hodnota absolutní impedance minimálních hodnot blízkých hodnotám absolutní impedance naměřené u teploty 400 °C, viz. Tab. 3. Pro teplotu 1200 °C dosáhla absolutní impedance maximálních hodnot, a naopak hodnota relativní permitivity dosáhla hodnot minimálních. Tento jev je zřejmě spojený se zpevněním struktury testovaného tělesa z důvodu počátku slinutí kameniva.

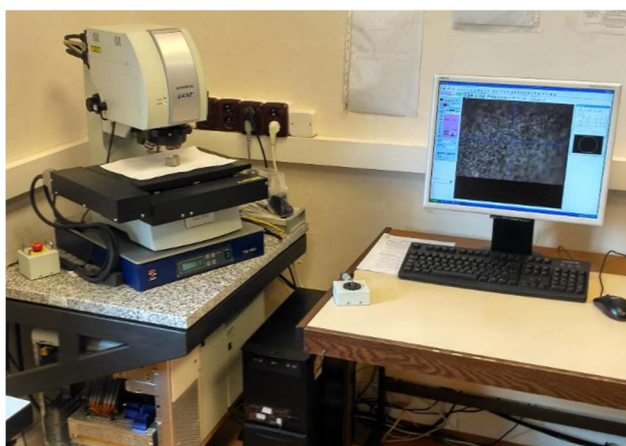
Graf na Obr. 47 znázorňuje křivku elektrické kapacity vzorku v závislosti na tepelné degradaci. Nad frekvencí 1 kHz nabývají hodnoty elektrické kapacity podobných hodnot pro všechny vzorky odlišné tepelné degradace. Schopnost polarizace se snižuje se zvyšující se hodnotou degradace ve vyšších frekvencích. Měření probíhalo ve frekvenčním rozsahu 40 Hz až 1 MHz.

Obecně polarizační mechanismy charakterizují v materiálu vlhkost, změnu pružnosti, vadu apod. Výsledky měření jsou ovlivněny materiálovými vlastnostmi. Průběh změn jednotlivých veličin monitoruje změny v mikrostruktuře testovaného vzorku.

Výsledné hodnoty relativní permitivity reagují na změny v mikrostruktuře materiálu, které jsou způsobeny vlivem tepelné degradace. Průběh hodnot v závislosti na tepelné degradaci má mírně podobný průběh jako je tomu u rezonančních frekvencí naměřených metodou IE.

### 5.3.4 Výsledky sledování povrchu konfokálním mikroskopem

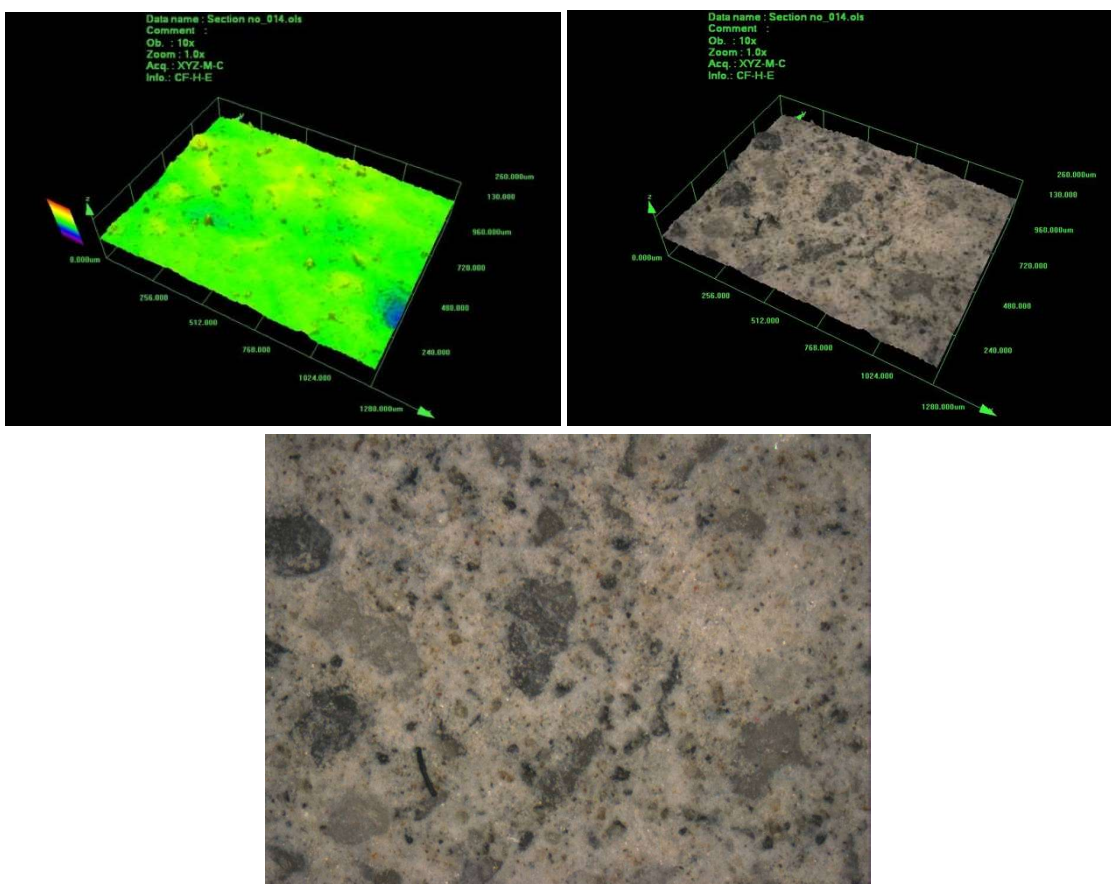
Pomocí konfokálního mikroskopu značky Olympus LEXT 3100 (Obr. 48) byla sledována textura povrchu testovaných těles degradovaných působením vysokých teplot. Testování bylo nastaveno s rozlišením 120 nm a schopností přesného trojrozměrného měření. Rozsah zvětšení tohoto mikroskopu je v rozmezí 120x až 14 400x. Mikroskop využívá laserový svazek o vlnové délce 408 nm s optickými prvky uzpůsobenými pro tuto krátkou vlnovou délku tak, aby se optimalizovala kvalita zobrazení a omezily se případné odchylky. Mikroskop včetně mikroskopického stolku ovládá jednoduchý softwarem s uživatelsky příjemným rozhraním a pokročilou analýzou obrazu. Výstupy z měření byly ukládány do počítače [60]. Pro zobrazení bylo použito desetinásobné zvětšení. Princip konfokálního mikroskopu popisuje kapitola 2.6.4.



Obr. 48 Konfokální mikroskop Olympus LEXT 3100 [60]

Snímky z měření konfokálním mikroskopem na Obr. 49 – Obr. 52 ukazují, jak se mění struktura povrchu testovaných těles po zahřátí na vysoké teploty. U referenčního vzorku (Obr. 49) je patrná kompaktní struktura povrchu, změna nastala až při zahřátí na teplotu 600 °C (Obr. 50), kde jsou patrné změny povrchu materiálu a vznik drobných trhlin, které souvisí jak s dehydratací a rozkladem CSH gelu, tak s fázovou přeměnou křemene z fáze  $\beta$  na  $\alpha$  (573 °C) a tím dochází k nárůstu porozity materiálu. Z důvodu uložení špatné kvality trojosého záznamu je u teploty 600 °C uveden pouze 2D záznam.

U vzorků zahřátých na teplotu 1000 °C a 1200 °C (Obr.51 a Obr.52) dochází především k barevným změnám, ty souvisí se změnami struktury pojiva a vzniku nových krystalických fází, které vedou ke zvýšení porozity a tím i snížení mechanických vlastností materiálu. U teploty 1200 °C je patrný vznik taveniny a počátek slinování. Snížení mechanických vlastností materiálu potvrzují v kap. 5.3.7 pevnostní zkoušky ve vzájemné korelaci s akustickými metodami.

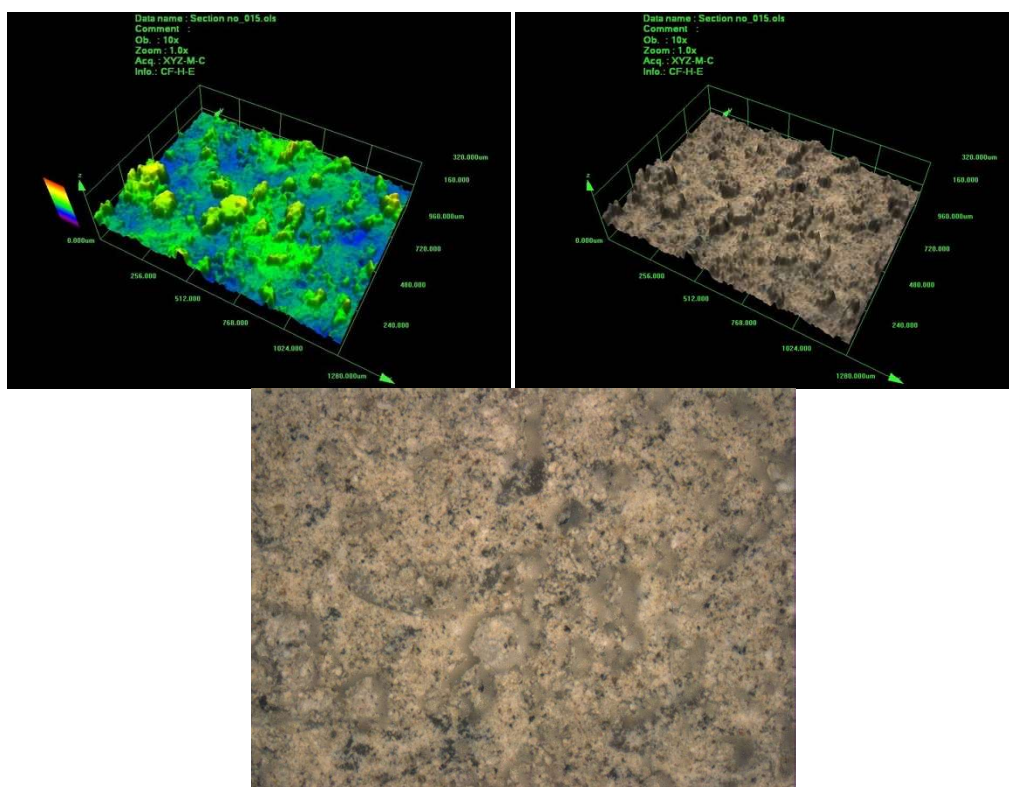


Obr. 49 Zobrazení struktury povrchu referenčního vzorku pomocí konfokálního mikroskopu

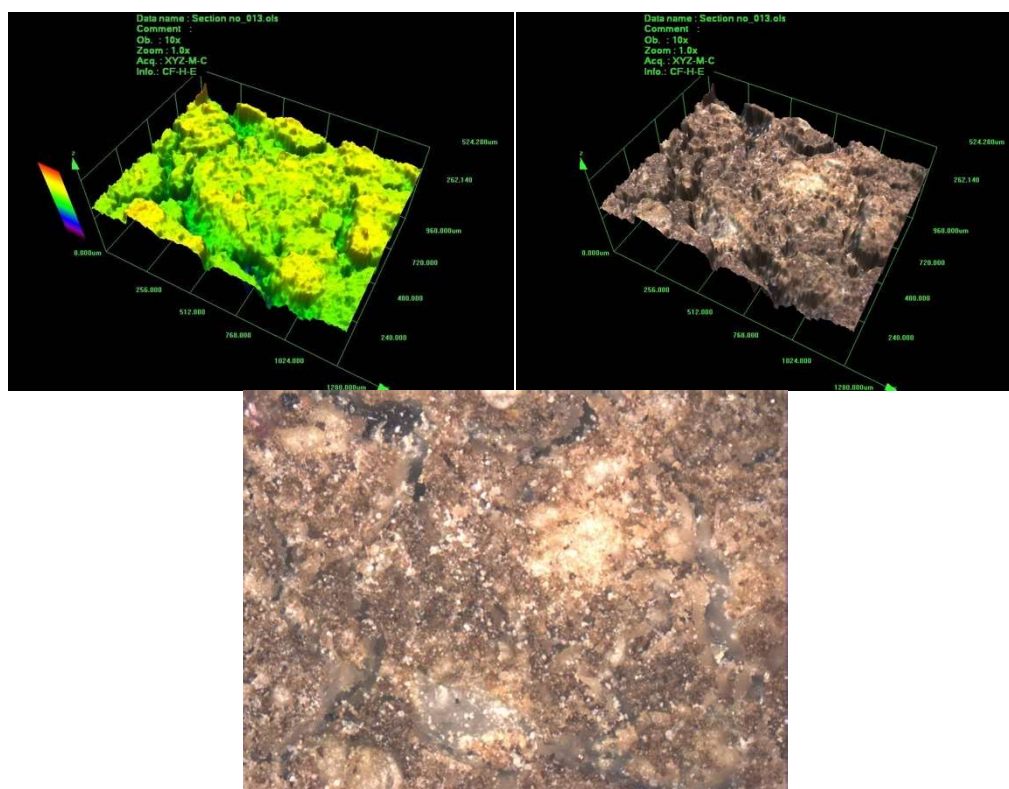


Obr. 50 Zobrazení struktury povrchu vzorku s teplotou výpalu 600 °C pomocí konfokálního mikroskopu





Obr. 51 Zobrazení struktury povrchu vzorku s teplotou výpalu 1000 °C pomocí konfokálního mikroskopu



Obr. 52 Zobrazení struktury povrchu vzorku s teplotou výpalu 1200 °C pomocí konfokálního mikroskopu

### 5.3.5 Výsledky metody nelineární akustické spektroskopie

Nelineární akustická (ultrazvuková) spektroskopie je založená na aktivním akustickém zkoušení materiálu, viz. kapitola 2.5.3. Při měření byla použita nerezonanční metoda nelineární akustické spektroskopie s jedním budícím signálem.

Aparatura pro měření byla sestavena z: Vysílací části, kterou tvořil čtyři hlavní bloky: 1. generátor harmonického signálu Agilent 33220A, 2. vysokofrekvenční výkonový zesilovač WPD100, 3. výstupní filtr typu dolní propust, 4. piezoelektrický vysílač (budič, vhodný pro buzení ultrazvukem).

Přijímací část měřící sestavy tvořil: 1. Piezoelektrický snímač (DAKEL typu MIDI), 2. paměťový osciloskop Handyscope HS3 s rozlišením 16 bitů firmy TiePei engineering, 3. Řídící počítač se softwarovým balíčkem TiePie Channel software.



Obr. 53 Měřící aparatura metody nelineární ultrazvukové spektroskopie

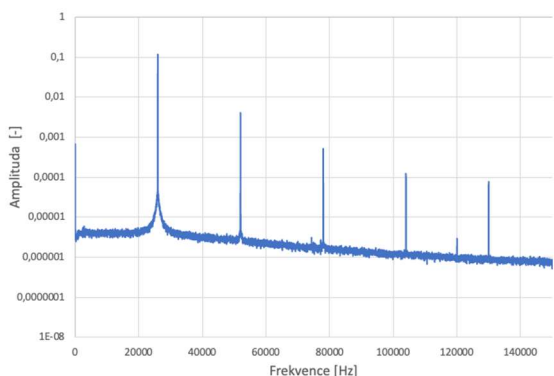
Měření bylo prováděno v podélném směru vzorku s budičem umístěným na středu kratší strany vzorku a se snímačem umístěným na protilehlém konci. Budič i snímač byl k testovanému tělesu připevněn pomocí včelího vosku.

Při měření je důležité vhodné nastavení frekvenční charakteristiky vysokofrekvenčního budícího měniče. V případě testovaných těles byla budící frekvence nastavena na hodnotu 26 kHz.

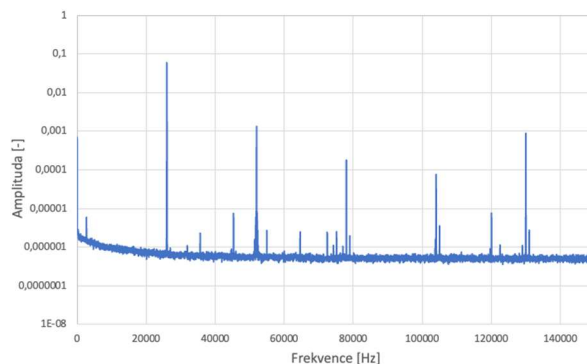
Testování bylo aplikováno na referenčních zkušebních tělesech a následně byla provedena měření na zkušebních tělesech po tepelné degradaci. Naměřená data byla vyhodnocena a převedena do podoby frekvenčního spektra pomocí rychlé Fourierovy transformace. Frekvenční spektrum naměřené před degradací materiálu je porovnáno s frekvenčním spektrem zkušebních vzorků po tepelné degradaci.

Z frekvenčního spektra naměřeného na referenčních vzorcích je zřejmý pokles amplitud v porovnání s rostoucím číslem  $n$ . Tyto amplitudy odpovídají vyšším harmonickým frekvencím (Obr. 54). U vzorku s teplotou výpalu 400 °C (Obr.55) nastal mírný pokles amplitud vyšších harmonických frekvencí. Je také patrný vznik dalších harmonických signálů, ty mohou být způsobeny výskytem vad a změn v mikrostruktuře testovaného tělesa. Při teplotě výpalu 600 °C (Obr. 56) došlo k výraznému poklesu amplitud vyšších harmonických frekvencí, to je způsobeno změnami v mikrostruktuře testovaného tělesa. U vzorku s teplotou výpalu 1000 °C a 1200 °C (Obr. 58 a Obr. 59) došlo k navýšení hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí. Amplituda druhé harmonické složky je v tomto případě mírně potlačena. Tyto změny jsou nejspíše způsobeny počátkem vzniku

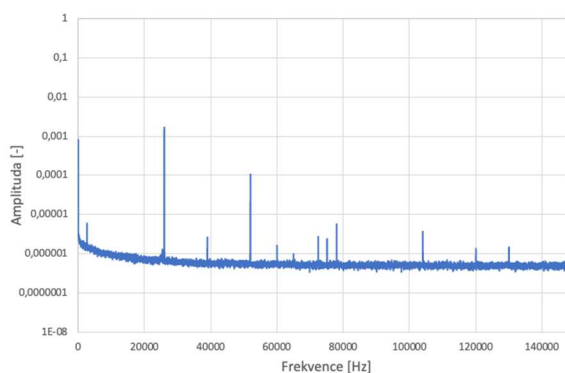
keramických vazeb a tavení některých složek betonu a částečným slinováním. Výhodou této metody je, že lze z naměřených hodnot přímo definovat, zda je či není testovaný vzorek poškozen, aniž bychom museli měření opakovat či porovnávat.



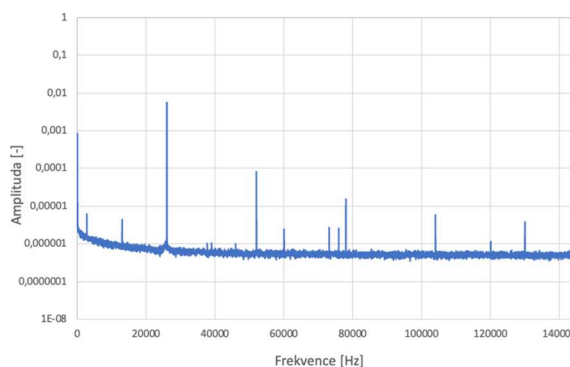
Obr. 54 Frekvenční spektrum referenčního zkušebního tělesa



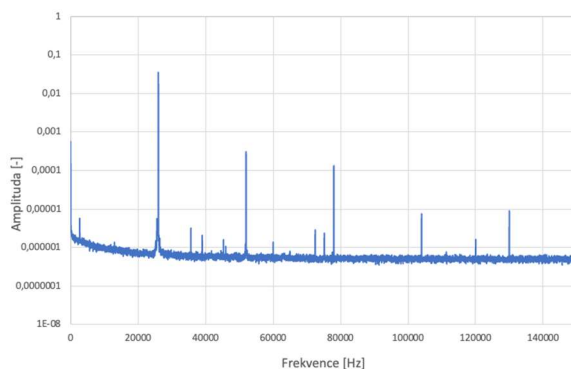
Obr. 55 Frekvenční spektrum vzorku po degradaci (400 °C)



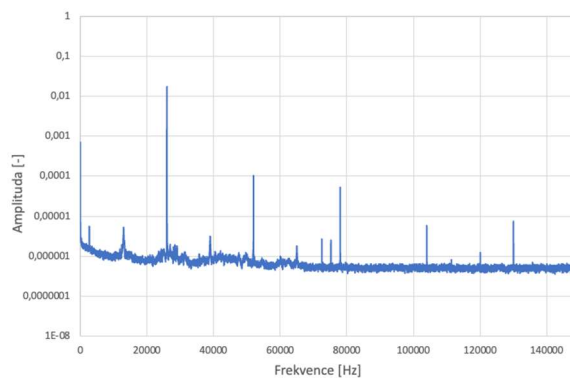
Obr. 56 Frekvenční spektrum vzorku po degradaci (600 °C)



Obr. 57 Frekvenční spektrum vzorku po degradaci (800 °C)



Obr. 58 Frekvenční spektrum vzorku po degradaci (1000 °C)



Obr. 59 Frekvenční spektrum vzorku po degradaci (1200 °C)

### 5.3.6 Výsledky měření metodou MLS (Buzení pseudonáhodným signálem)

Další srovnávací metodou byla v této práci zvolena metoda MLS, tj. buzení pseudonáhodným signálem. Metoda generuje tzv. bílý šum do zkoušeného tělesa a díky tomu přeneše do tělesa energii, viz. kapitole 2.6.3.

Metoda MLS vzhledem k posunu základní frekvence a vyšší harmonické frekvence v závislosti na intenzitě signálu není závislá na geometrii tělesa.

Pro měření této metody bylo použita automatizovaná měřící sestava, která byla sestavena v rámci disertační práce (L. Carbola) [62]. Tato sestava je znázorněna v kapitole 2.6.3. na Obr. 24.

Uvedená testovací aparatura umožňuje pouze průchodný režim, tzn. budič a snímač jsou umístěny v protilehlých koncích, případně umístěny na stejné straně testovaného vzorku [62].

Jak již bylo v této práci zmíněno, metoda MLS patří do skupiny nelineární spektroskopie. Intenzita budícího signálu se mění a materiál, který je poškozený, se chová nelineárně, tzn. že s rostoucí intenzitou budícího signálu se mění harmonické frekvence zkoušeného vzorku.

Měření testovaných těles probíhalo ve frekvenční oblasti 16 až 30 Hz. Byl použit budič CONE a snímač MIDI. Budič i snímač byly k tělesu připevněny pomocí včelího vosku.

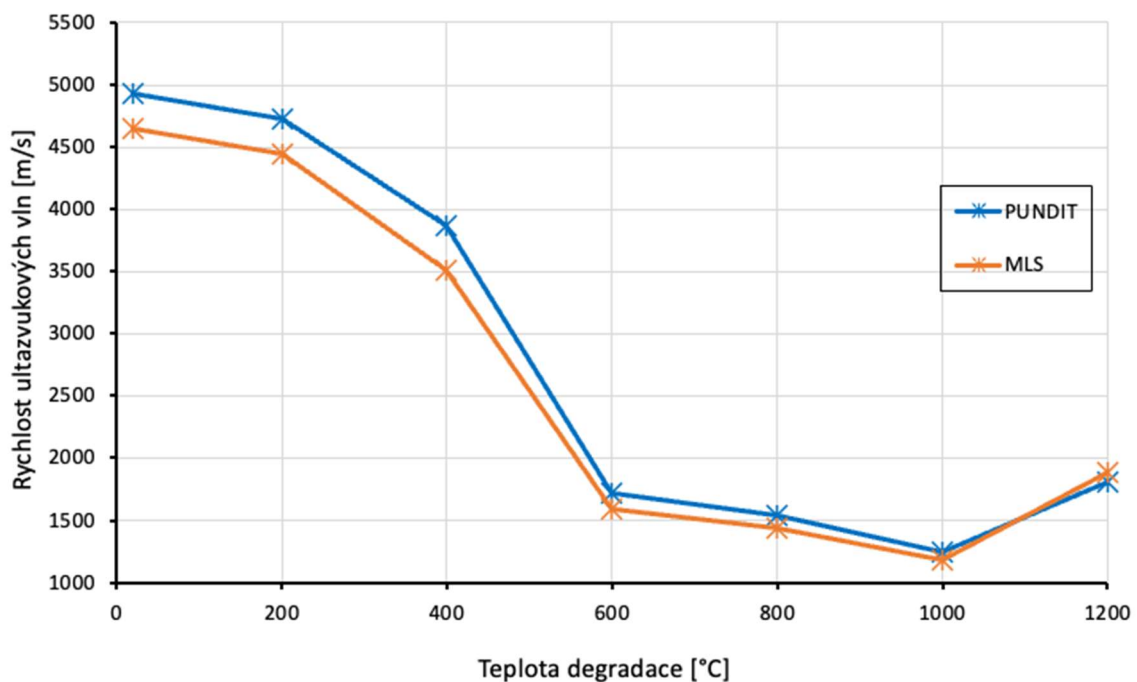
Testovacím signálem zkušebních těles byla sekvence maximální délky 17 bitů, o frekvenci 100 kHz. Měřicí signál měl amplitudu 10–90 V. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí rychlé Fourierovi transformace (FFT).

Mrtvý čas měřící aparatury byl získán z kalibračního vzorku a jeho hodnota byla odečtena z naměřených hodnot času průchodu.

Jedním ze získaných parametrů měření je rychlost šíření podélných vln v testovaném tělese. Dalším parametrem je maximální frekvence signálu v lineární závislosti na amplitudě. Signál je z časové domény do frekvenční převeden pomocí FFT.

Výsledky této metody byly porovnávány s výsledky metody Impact-Echo a také s výsledky měření ultrazvukové impulzové metody a jejich vzájemná korelace je popsána v kapitole 5.3.10.



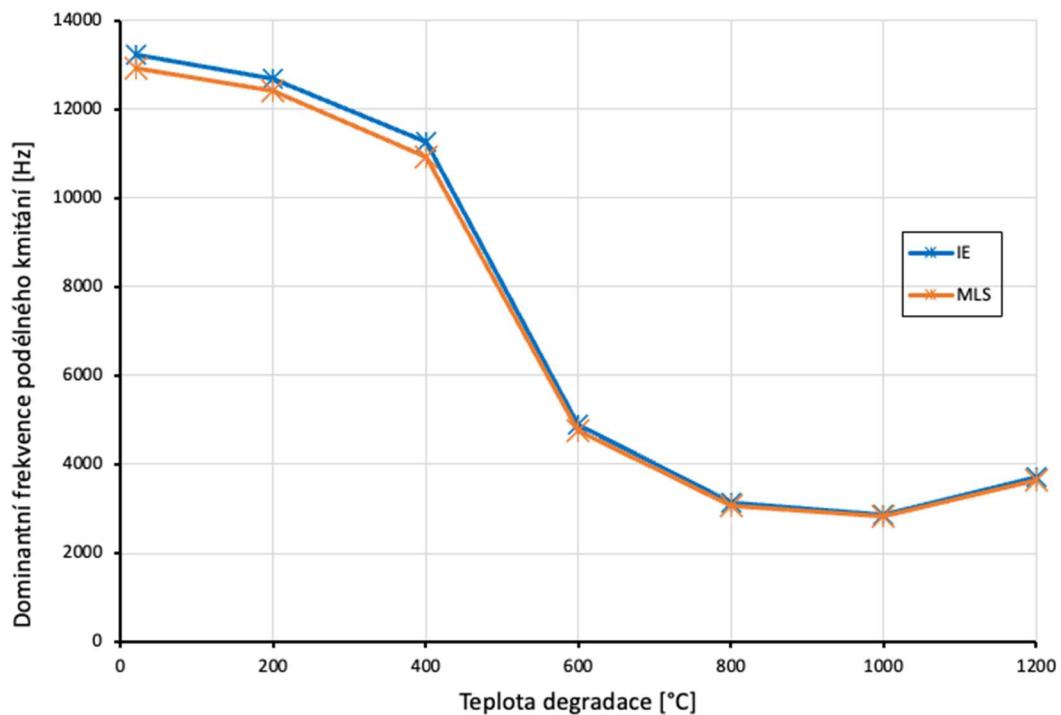


Obr. 60 Graf porovnání měření rychlosti ultrazvukových vln měřených ultrazvukovou impulzovou metodou (přístroj PUNDIT) a měřící aparaturou metody MLS

V grafu na Obr. 60 jsou porovnány rozdíly v měření rychlosti průchodu ultrazvukových vln, modrá křivka znázorňuje měření pomocí ultrazvukové impulzové metody, u které byl pro měření použit ultrazvukový přístroj PUNDIT, oranžová křivka znázorňuje výsledné hodnoty měření metodou MLS.

Naměřené hodnoty mají s mírnou odchylkou klesající tendenci rychlostí šíření ultrazvukových vln se zvyšující se teplotou degradace. Mírné navýšení hodnot nastává u teploty 1200 °C. Z grafu je patrný rozdíl naměřených hodnot u obou metod v počátku degradace až do teploty 400 °C. Zbylé hodnoty měření u tepelně degradovaných vzorků jsou s minimálními rozdíly.

Výsledné hodnoty získané z měření metodou MLS dosahují podobných hodnot jako výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou. Z výsledných hodnot je zřejmý vliv tepelné degradace na změny v mikrostruktuře zkušebních těles. Tyto změny jsou popsány v Tab.1 kapitoly 2.2.1.



Obr. 61 Graf porovnání měření rezonanční frekvence podélných vln  $f_L$  metodou IE a MLS

Na Obr. 61 je znázorněno podélné kmitání dominantní rezonanční frekvence  $f_L$  naměřené metodou Impact-Echo a metodou MLS. Z tohoto grafu můžeme jasně konstatovat, že metoda MLS je vhodnou srovnávací rezonanční metodou k metodě IE. Výsledky obou metod mají téměř shodné hodnoty a opět jsou jimi potvrzeny změny v mikrostruktuře zkušebních těles, které vznikly důsledkem tepelné degradace. Obě metody dosahují velmi vysoké vzájemné korelace  $R^2$ , viz. Tab.4, kapitoly 5.3.10.

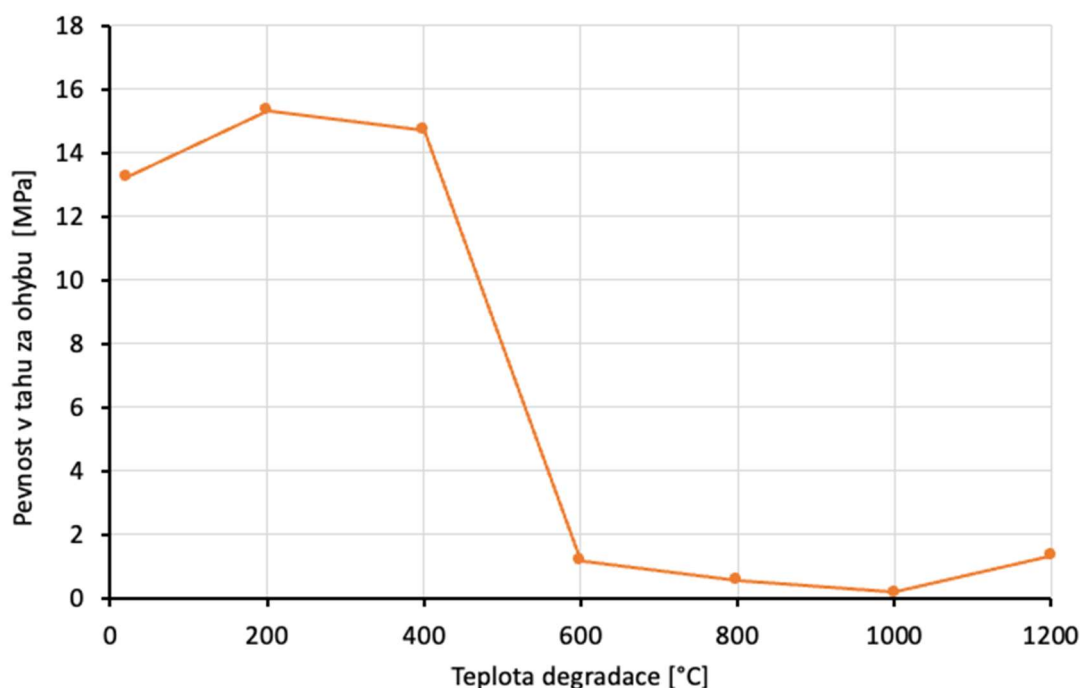
### 5.3.7 Pevnost v tahu za ohybu

Pro účely měření pevnosti v tahu byla vybrána tři zkušební tělesa. Každé zkušební těleso bylo podepřeno ve dvou místech a uprostřed zatěžováno až do porušení. Výsledná pevnost v tahu za ohybu  $f_c$  [MPa] je dána vzorcem:

$$f_{cf} = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (18)$$

Kde  $F_f$  je zatěžovací síla při porušení zkušební tělesa [N],  $l$  je vzdálenost mezi podporami [mm] a  $b$  je strana čtvercového průřezu zkušební tělesa [mm] [72].

Vliv působení vysokých teplot na pevnosti v tahu ohybem u zkušebních těles je znázorněn v grafu na Obr. 62. Z počátku došlo po zahřátí na teplotu 200 °C k mírnému nárůstu naměřených hodnot. Tento stav není neobvyklý, ale jeho definice není jednoznačná [25]. Mezi teplotou 200 °C – 400 °C nastal mírný pokles pevnosti, ten je spojený s počátkem dehydratace CSH gelu. Při dosažení teploty 600 °C nastalo již výrazné snížení pevnosti, zřejmě důsledkem další fáze rozkladu CSH gelu a přeměny křemene v písku a kamenivu. Při teplotě 1000 °C dosahovala pevnost svého minima. Tento jev je přisuzován vzniku keramické vazby, která nahrazuje vazby hydraulické. Mírný nárůst nastal při teplotě výpalu na 1200 °C, to je spojeno s novými fázovými přeměnami a částečným slinutím některých složek betonu.



Obr. 62 Vliv teploty degradace na pevnost v tahu za ohybu  $f_f$

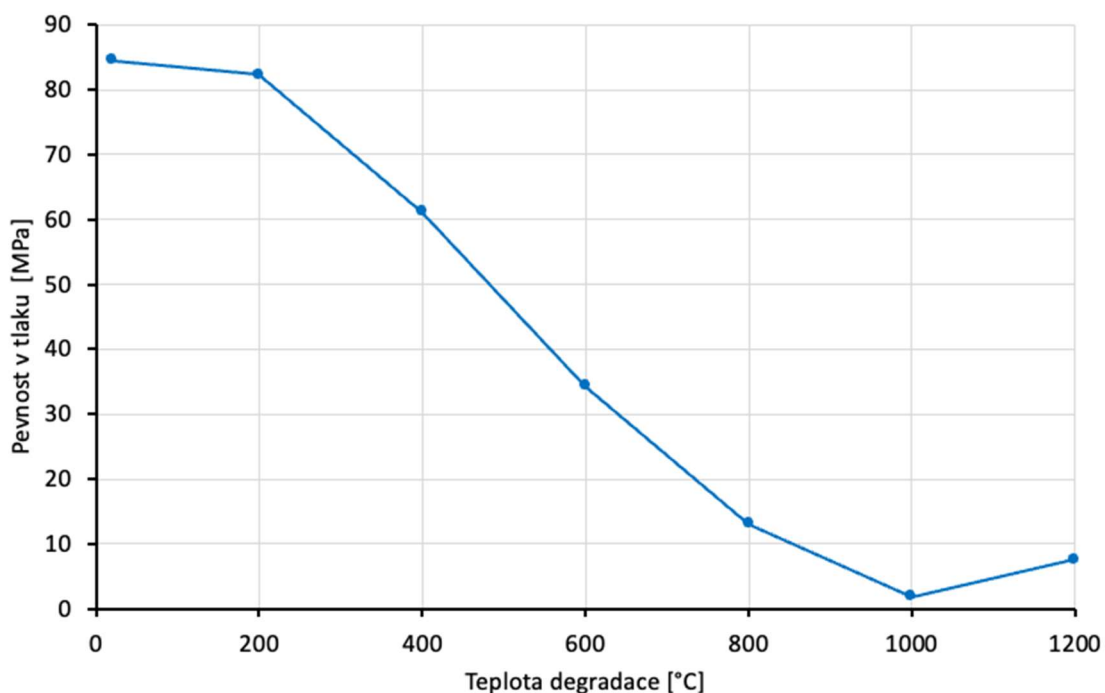
### 5.3.8 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku se provádí na polovinách testovaného tělesa, které vzniknou při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Výsledná pevnost  $f_c$  [MPa] je stanoví ze vztahu:

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (19)$$

Kde  $F_c$  je maximální síla působící na zkušební těleso [N],  $A$  je plocha kolmého průřezu zkušební tělesa [mm<sup>2</sup>] [73].

Vliv tepelné zátěže na pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr.63. V počátku zahřívání nastal mírný pokles pevnosti v tlaku. V rozmezí teplot 200 °C – 1000 °C je již patrný téměř lineární pokles naměřených hodnot. Tento jev souvisí s dehydratací betonové složky, rozkladem CSH gelu, fázovou přeměnou křemene a přechodu z hydraulických vazeb na vazby keramické (viz. Tab.1 kapitoly 2.2.1). Při teplotě 1000 °C je dosaženo pevnostního minima (1,9 GPa), v této fázi dochází k tvorbě Wollastonitu  $\beta$  a nastává počátek tavení čediče. Mírné navýšení hodnot pevnosti nastává při teplotě 1200 °C (7,6 GPa), to je spojeno se vznikem keramické vazby v mikrostruktuře betonu a postupnému přechodu některých složek betonu do taveniny a počátku částečného slinování.

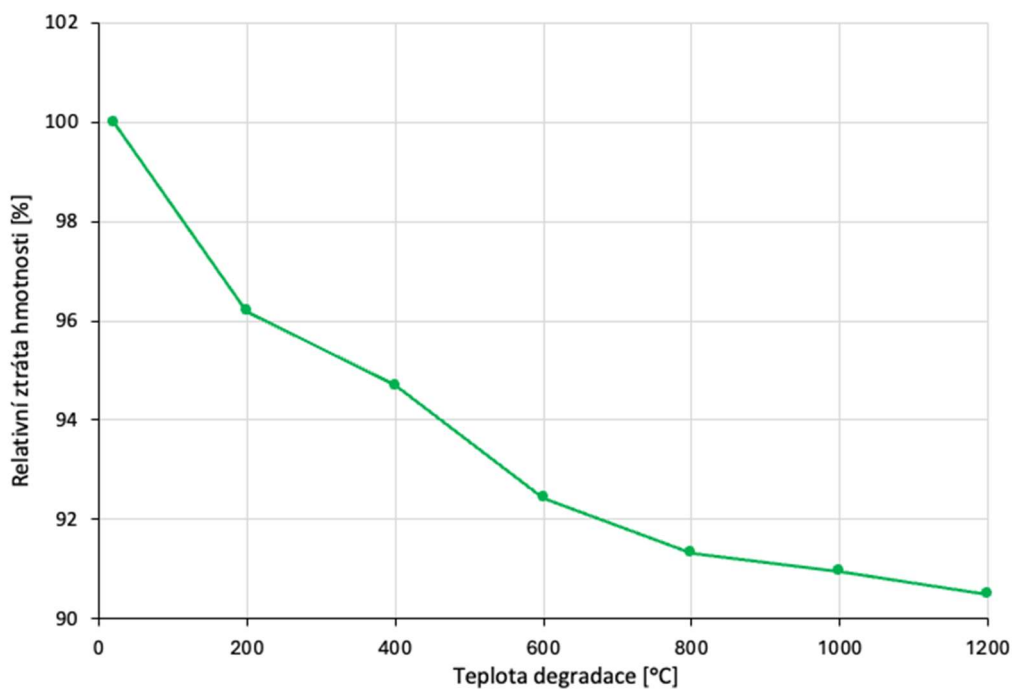


Obr. 63 Vliv teploty degradace na pevnost v tlaku  $f_c$

### 5.3.9 Změna objemové hmotnosti

Během zatěžování zkušebních těles tepelnou degradací, byla změřena hmotnost těles před a po výpalu. Z hodnot naměřených před a po tepelné zátěži byla stanovena relativní ztráta hmotnosti  $\Delta m$  po degradaci, která je zobrazena v grafu na Obr. 64. Tyto hodnoty byly stanoveny v procentech na základě poměru hmotnosti po degradaci ku hmotnosti před degradací.

Pokles hmotnosti při teplotě 200 °C byl 3,8 %, což odpovídá ztrátě fyzikálně vázané vody. Ovšem při teplotě 1200 °C bylo dosaženo nejnižší hmotnosti, ztráta dosahovala hodnoty 9,5%.



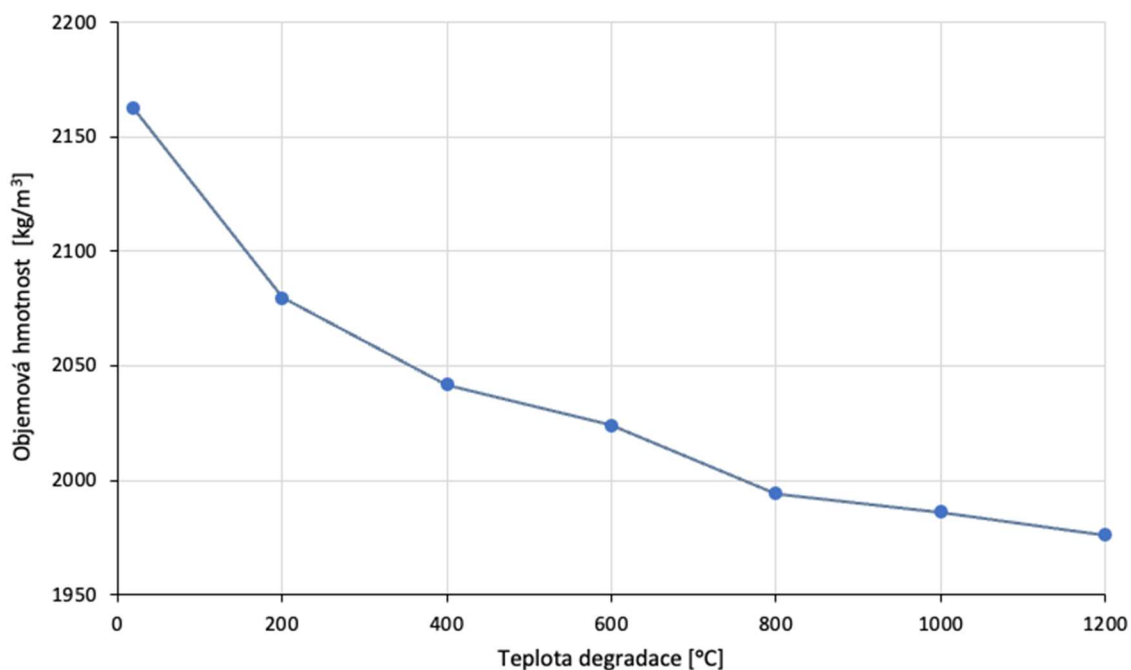
Obr. 64 Relativní ztráta hmotnosti po výpalu

Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlého betonu  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je dán vztahem:

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot c} \quad (20)$$

Kde  $m$  je hmotnost zkušebního tělesa [kg];  $a, b, c$ , jsou rozměry zkušebního tělesa [mm] [74].

Na Obr. 65 je znázorněna objemová hmotnost zkušebních těles po výpalu. K nejvýraznějšímu poklesu objemové hmotnosti dochází v počáteční fázi degradace, v tomto případě dosahovala objemová hmotnost hodnoty 2080 kg/m<sup>3</sup>. Tento jev vypovídá o dehydrataci cementového tmelu, rozkladu jeho některých složek a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. Se zvyšující se teplotou již nebyly úbytky objemové hmotnosti tak výrazné. Při teplotě 1200 °C byla objemová hmotnost 1976 kg/m<sup>3</sup>.



±

Obr. 65 Objemová hmotnost po výpalu

### 5.3.10 Vzájemná korelace naměřených hodnot

Koeficient korelace popisuje závislost mezi výsledky měřených veličin  $x$  a  $y$  u vybraných metod. Vyhodnocení vzájemné korelace se zabývá mírou závislosti obecně náhodných dat. Výstupem je korelační koeficient  $R_{cor}$ , jeho hodnoty jsou v rozmezí od -1 do +1 a je dán vztahem [6]:

$$R_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{S_x S_y (n-1)} \quad (21)$$

$$R_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (22)$$

Kde  $x_i$  ...  $i$ -tá hodnota měřené veličiny  $x$ ,  
 $\bar{x}$  ... průměrná hodnota veličiny  $x$ ,  
 $y_i$  ...  $i$ -tá hodnota měřené veličiny  $y$ ,  
 $\bar{y}$  ... průměrná hodnota veličiny  $y$ ,  
 $S_x$  ... směrodatná odchylka veličiny  $x$ ,  
 $S_y$  ... směrodatná odchylka veličiny  $y$ ,  
 $n$  ... počet měřených veličin.

V případě vyjádření koeficientu  $R_{cor}^2$  získáme koeficient determinace (běžně označovaný  $R^2$ ). Popisuje těsnost korelace mezi proměnnými  $x$  a  $y$ . Jeho hodnoty jsou v rozsahu 0 až + 1, vyjádřeno v procentech [6].  $R_{cor} = 1$  vyjadřuje kladnou korelaci,  $R_{cor} = 0$  znamená, že mezi veličinami není žádná spojitost, tzn. žádná korelace,  $R_{cor} = -1$  je záporná korelace.

Vzájemný vztah mezi zkušebními metodami, které byly v této práci použity, je vyjádřen pomocí korelační tabulky. Pro vyhodnocení korelační tabulky byly uvažovány výsledky měření zkušebních metod, které lze pro danou teplotu degradace vyjádřit jedním číslem. Z tohoto důvodu není v korelační tabulce zahrnuto měření metodou nelineární akustické spektroskopie a měření konfokálním mikroskopem.

Korelační koeficienty  $R^2$  jednotlivých metod pro všechny stupně tepelné degradace jsou uvedeny v Tab.4. Každá hodnota koeficientu korelace  $R_{cor}^2$  vypovídá o korelaci mezi všemi použitými metodami testování a všemi teplotami degradace. V tabulce jsou mezi sebou vzájemně porovnávány metody měření s koeficienty korelace jejich naměřených výsledků. Stupeň korelace je označen dle barevného rozhraní.

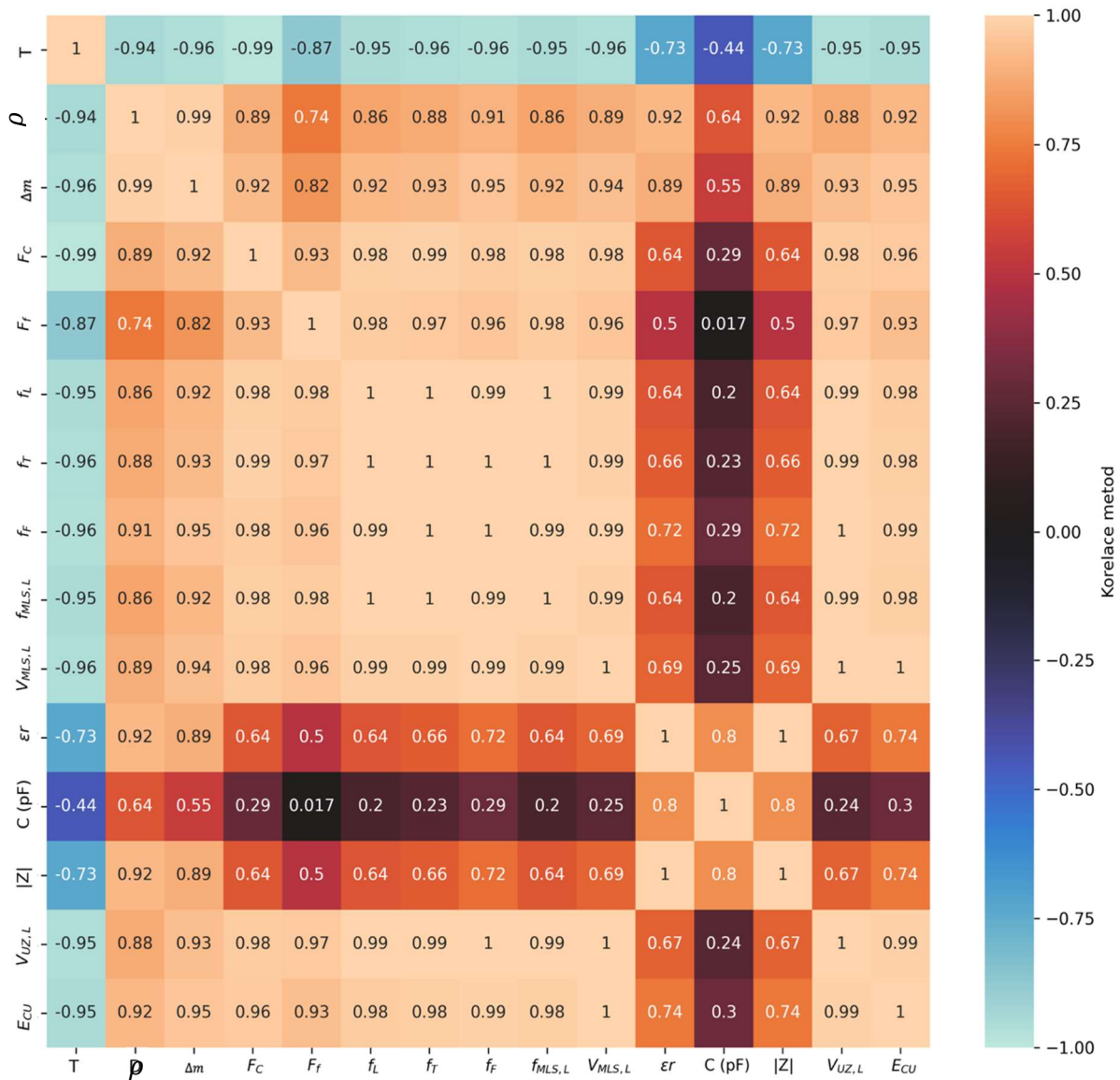
Nejnižších hodnot dosahují korelační koeficienty mezi elektrickou kapacitou vzorku  $C$  (pF) a pevností v tahu za ohybu  $F_t$ , kdy  $R_{cor}^2 = 0,017$ . Z toho je patrné, že výsledky měření obou zmíněných metod na sobě nejsou závislé v případě měření tepelně degradovaných těles.

Stejně tak na sobě nejsou závislé ani výsledky měření metody impedanční spektroskopie s výsledky měření metodou IE ( $f_f, f_t, f_L$ ) a s výsledky měření metodou ultrazvukového impulzu ( $v_L$ ). Parametry získané z měření metody impedanční spektroskopie jsou v tomto případě ne příliš vhodným nástrojem pro odhalení míry poškození testovaného tělesa tepelnou degradací. Naopak velmi pozitivních výsledků dosahují například korelace mezi rezonančními frekvencemi metody IE ( $f_f, f_t, f_L$ ) a korelačními koeficienty výsledků měření metodou MLS ( $f_{L,MLS}, v_{L,MLS}$ ),  $R_{cor}^2 > 0,98$ .

Pro vyhodnocení míry poškození materiálu vlivem tepelné degradace je z pohledu technické diagnostiky vhodné sledovat vzájemnou korelaci mezi akustickými metodami a parametry měření pevností. Výsledky měření pevnosti v tlaku  $F_c$  a pevnosti v tahu za ohybu  $F_t$  dokazují velmi dobrou vzájemnou korelaci ( $R_{cor}^2 > 0,9$ ) s výsledky měření metodou Impact-Echo pro všechny rezonanční frekvence ( $f_f, f_t, f_L$ ), metodou MLS pro všechny parametry měření ( $f_{L,MLS}, v_{L,MLS}$ ) a metodou šíření ultrazvukového impulzu ( $v_L$ ) a dynamickým modulem pružnosti ( $E_{cu}$ ).

Vzhledem k výsledným hodnotám korelačních koeficientů je, právě z pohledu technické diagnostiky a z pohledu odhalení změny ve struktuře materiálu vlivem tepelné degradace, použití akustických metod, zejména metody Impact-Echo, vyhodnoceno jako vhodný nástroj pro analýzu míry poškození zkušebních těles vystavených vysokým teplotám.

Tab.4 Korelační koeficienty  $R_{cor}^2$  parametrů měření mezi jednotlivými metodami pro dané teploty





### 5.3.11 Testování zkušebních těles s výztuží

Dle současného stavu poznání, kdy jsou požárem zasažené zejména železobetonové konstrukce, bylo součástí experimentální části této práce také měření zkušebních tělesek vyztužených hladkou betonářskou výztuží o průměru 8 mm a délce 240 mm, uložené v neutrální ose. Zkušební tělesa opatřená výztuží byla podrobena tepelné degradaci.

Před zahájením degradačních procesů byla zkušební tělesa zvážena a byla na nich provedena počáteční měření metodou Impact-Echo.

Vyztužená zkušební tělesa byla, stejně jako zkušební tělesa z prostého betonu, podrobena tepelné degradaci teplotami 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C a 1200 °C s nárůstem teploty rychlostí 5 °C/min s izotermickou výdrží na maximální teplotě po dobu 60 minut. Po výpalu byly vzorky samovolně ochlazeny na laboratorní teplotu.

Degradované vzorky byly v laboratoři (při teplotě  $22 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti  $55 \pm 5$  %) znovu zváženy a byla na nich aplikována měření metodou Impact-Echo.



Obr. 66 Uložení výztuže v neutrální ose



Obr. 67 Zkušební tělesa s výztuží i bez výztuže vypálené na teplotu 1200 °C

#### 5.3.11.1 Výsledky měření metodou Impact-Echo

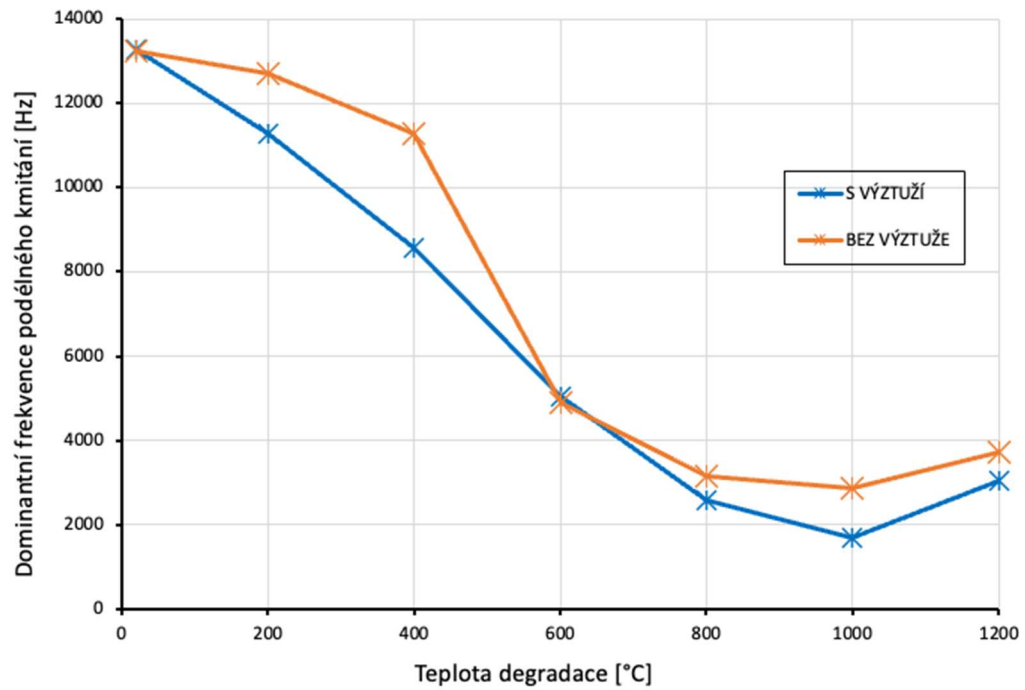
Jak již bylo popsáno v předchozí části experimentu, u prostého betonu se vlivem tepelné degradace snižuje vlastní dominantní frekvence oproti betonu nedegradovanému.

Pro měření vyztužených zkušebních těles byla zvolena metoda Impact-Echo. Měření metodou IE se již v předchozí části experimentu ukázalo jako spolehlivé, jednoduché a rychlé. Výsledky získané měřením metodou IE dosahovaly u prostého betonu velmi vysokých hodnot korelace s konvenčními metodami testování.

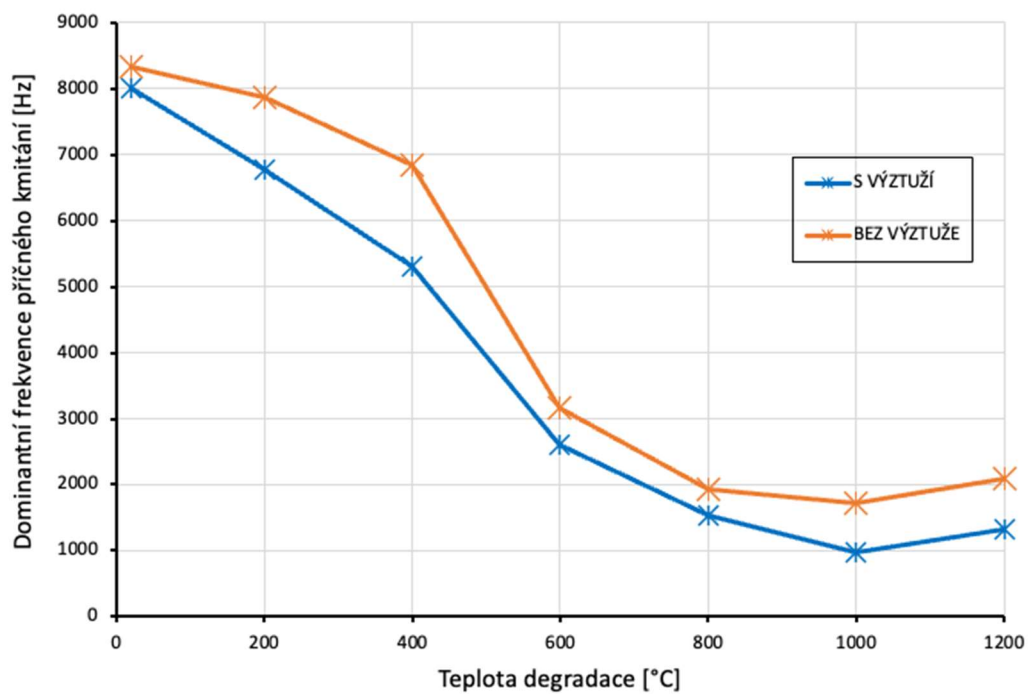
Rozdíl naměřených hodnot dominantních frekvencí v podélném, příčném a kroutivém směru kmitání u zkušebních těles z prostého betonu a zkušebních těles z jednoduše vyztuženého betonu je znázorněn na Obr. 68 - Obr.70.

Na obr. 68 můžeme pozorovat, že beton s integrovanou výztuží měl do teploty 800 °C v podstatě lineární pokles hodnot podélné dominantní frekvence v závislosti na stupni tepelné degradace. To je zřejmě způsobeno menším podílem porézního prostoru a tím pozvolnějším změnami v mikrostruktuře betonu. Oproti prostému betonu dosahovaly dominantní frekvence u vyztužených zkušebních těles nižších hodnot. To je způsobeno jak rozdíly v materiálových vlastnostech, tak možnou přítomností kaveren a trhlin ve struktuře betonové vrstvy. Dominantní frekvence v podélném směru kmitání dosahovaly u teploty 600 °C téměř totožných hodnot s hodnotami frekvence prostého betonu. U těles vypálených na teplotu 1000 °C a 1200 °C byly patrné na povrchu betonové vrstvy testovaných těles mírné trhlinky.

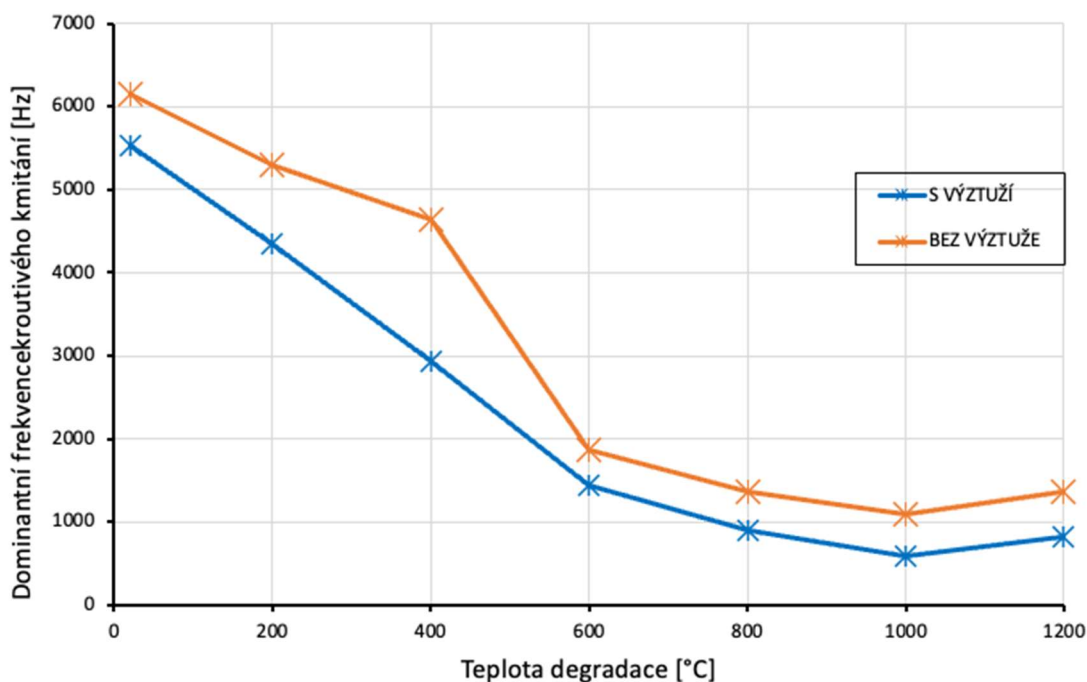
Výsledky dominantní frekvence vyztužených zkušebních těles měly v příčném směru kmitání (Obr. 69) velmi podobný trend jako u betonu bez vyztužení, ovšem v nižších hodnotách frekvencí. V kroutivém směru kmitání (Obr. 70) měla křivka výsledných hodnot dominantních frekvencí podobný trend jako tomu bylo u podélné dominantní frekvence.



Obr. 68 Dominantní frekvence podélného kmitání zkušební vzorku s výztuží a bez výztuže



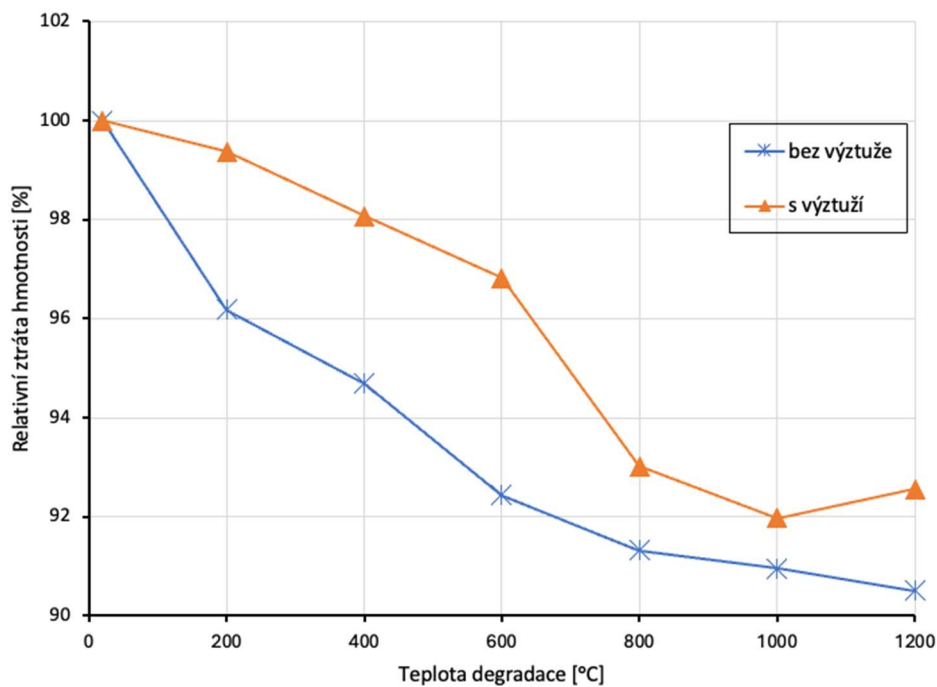
Obr. 69 Dominantní frekvence příčného kmitání zkušební vzorku s výztuží a bez výztuže



Obr. 70 Dominantní frekvence krouživého kmitání zkušební vzorku s výztuží a bez výztuže

#### 5.3.11.2 Výsledky relativní ztráty hmotnosti

Z hmotností naměřených před a po tepelné degradaci byla stanovena relativní ztráta hmotnosti  $\Delta m$ , která je zobrazena v grafu na Obr. 71. Ztráta hmotnosti u vyztužených těles dosahovala menších změn oproti tělesům bez vyztužení. Tělesa opatřená výztuží mají menší podíl porézního prostoru a tím může dojít k menšímu úbytku hmotnosti vlivem degradace. Průměrná hmotnost referenčních těles bez výztuže byla okolo 556 g a u těles opatřených betonářskou výztuží byla průměrná referenční hmotnost okolo 605 g. Největší rozdíl hodnot relativní ztráty hmotnosti mezi zkušebními tělesy s a bez vyztužení nastává při teplotě 600 °C, kdy hmotnost betonových těles bez výztuže dosahovala rozdílu 42 g ( $\Delta m = 92 \%$ ), kdežto u těles s výztuží byl rozdíl hmotností pro danou teplotu před a po výpalu okolo 18 g ( $\Delta m = 97\%$ ). U teploty 1200 °C došlo u vyztužených těles mírně k navýšení hmotnosti, to je způsobeno vznikem tavenin a celkovému zpevnění struktury betonové vrstvy a také možnou oxidací oceli a tím zvýšení její hmotnosti.



Obr. 71 Relativní ztráta hmotnosti vypálených zkušebních těles s výztuží a bez výztuže

Při tepelné degradaci může dojít k poškození vazby mezi betonem a ocelovou výztuží. Tímto jevem by mohlo dojít k výraznému snížení požární odolnosti železobetonových konstrukcí [30]. Důsledky požáru na poškození vazby mezi krycí vrstvou a výztuží jsou stále předmětem mnoha vědeckých diskusí. Měřením metodou IE byly zaznamenány změny ve struktuře vyztužených těles v závislosti na tepelné degradaci. Použití metody IE se pro stanovení míry poškození vazby mezi krycí vrstvou z různých druhů betonových směsí a výztuží různých povrchových úprav nabízí jako možný další směr experimentu.

### 5.3.12 Využití akustických metod pro testování stavebních materiálů obsahujících pryžové částice a polymerová pojiva vystavených tepelné degradaci

Ve spolupráci s kolegy M. Tupým a K. Sotiriadisem (té doby z ústavu THD, VUT FAST Brno), byla testována pomocí nedestruktivních metod zkušební tělesa vyrobená z cementové malty modifikována pryžovým plnivem a polymerními pojivy. Vzorky byly degradovány vysokými teplotami v rozsahu teplot 200 °C, 300 °C a 400 °C.

Pro účely experimentu byla vyrobena tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Tělesa byla po namíchání nejdříve ponechána ve formách po dobu 24 hodin, následně byla podrobena procesu zrání ve vodní lázni po dobu 27 dnů, a nakonec byla přirozeně sušena na vzduchu po dobu 32 dnů při laboratorní teplotě (25 ± 2 °C).

Zkušební tělesa byla vyrobena z cementové malty s vodním součinitelem (w/c) 0,55. Směs pro výrobu malty obsahovala cement CEM I Portlandský cement (Českomoravský cement – Heidelberg Cement Group); (složky cementu byly použity ve 2 poměrech), křemenný písek (maximální velikost 2 mm) a drcené automobilové pneumatiky (velikost v rozmezí od 1-2 mm), které byly využity jako plnivo. Jako polymerní pojiva byly použity dva různé polymery: (a) Acronal S400 (BASF), což je vodná aniontová disperze kopolymeru esteru kyseliny akrylové a styrenu, přičemž složení polymeru ve vodě je přibližně 1:1; (b) Vinnapas 7220 E (WACKER), což je vinylacetát, etylen a ester kyseliny akrylové (EVA), polymerní prášek redispersovatelný ve vodě. Každé polymerní pojivo bylo použito ve dvou procentech; 5 % a 10 % suché hmoty přídatku cementové hmoty. Částice polymeru EVA byly rozpuštěny ve vodě, polymerní pojivo bylo použito ve dvou procentuálních poměrech (5% a 10% hmotnosti cementu). Složení vzorků a hodnoty jeho plasticity jsou uvedeny v Tab. 7 [81].

Tab.5 Složení a plasticita maltových kompozitů [82]

Označení*	Cement [g]	Písek [g]	Pryžový agregát[g]	Polymerní pojivo [g]	Voda[g]	w/c	Plasticita [cm]
H1 (REF)	500	1000	-	-	275	0.55	13.0
H2 (PAG)		750	250	-	275	0.55	13.0
H4 (PAG-20A)				50*	275	0.55	15.0
H6 (PAG-10V)				50**	275	0.55	17.5

\* složení polymerní disperze (50 g vody + 50 g akrylové pojivo ACRONAL S400)

\*\* práškový polymer EVA (50 g – neobsahuje vodu)

U zkušební vzorku s označením H1 se jedná o referenční maltový vzorek bez pryžového agregátu a přidaných pojiv. Vzorek H2 (PAG) neobsahuje žádné polymerní pojivo, pouze pneumatiky (PAG = polymer aggregates). Vzorek H4 (PAG-20A) pak 20% této disperze. Vzorek H6 (PAG - 10V) obsahuje 10% polymeru Vinnapasu 7220 E.

Drcené odpadní pneumatiky se mohou využívat jako přísada do betonu a přispět tak k hospodárnému řešení likvidace pneumatik. Z výsledků mnoha výzkumů vyplývá, že přidavek pryžového granulátu může nejen zlepšit pružnost a houževnatost betonu, ale i překonat nevýhodu betonu v křehkosti. Ovšem přidáním pryže do betonu se sníží jeho pevnost. Použití polymeru (Acronal či Eva) jako přídavku do pórobetonu se zvýší pevnost a také odolnost vůči kyselinám CO<sub>2</sub> [81]. Ovšem tato organická pojiva jsou citlivá na působení vysokých teplot a při teplotě nad 200 °C začíná jejich termická destrukce.

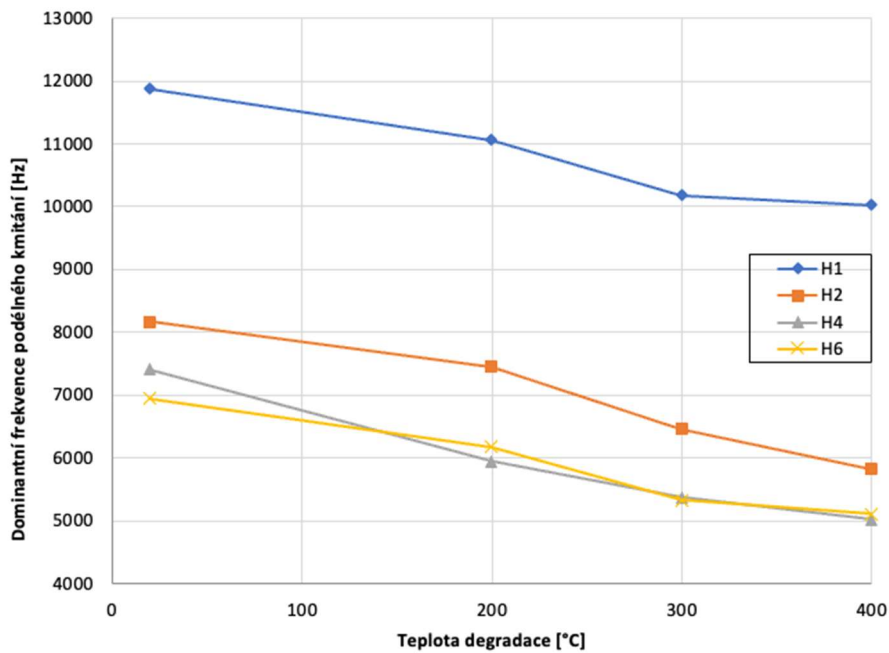
#### 5.3.12.1 Výsledky měření metodou Impact-Echo

Z výsledků měření metodou IE byl zaznamenán pokles dominantních frekvencí. Na Obr. 72 je patrný pozvolný pokles rezonančních frekvencí v podélném směru kmitání důsledkem tepelné degradace, tento jev nastal u všech směsí zkušebních těles.

U referenčních vzorků H1 dosahovaly dominantní frekvence vyšších hodnot. Přidáním pryžového agregátu došlo k útlumu akustického signálu oproti referenčnímu vzorku. Nejnižších hodnot dosahovaly zkušební vzorky H4, tj. směs s obsahem pryžového agregátu a 10 % polymeru Vinnapas 7220 E. Jak je patrné z grafu u referenčních těles H1 došlo k většímu poklesu frekvencí důsledkem tepelné degradace. Oproti tomu pryž vytvořila při tepelné degradaci lepší propojení se složkami betonu a zaplnila tak volné póry ve vzorku. Důsledkem toho u těles H2, H4 a H6 nedošlo u teploty 200 °C k tak významnému poklesu dominantních frekvencí jako je tomu u maltových zkušebních těles. Ovšem u teploty 300 °C a 400 °C došlo k degradaci pryže a jejího propojení s částicemi betonu a částečně k vytečení části pryže ze vzorku. Vzorek se stal více porézním, na povrchu ulpěly uhlíkové složky pryže.

Vzorky obsahující polymerní pojiva dosahovaly velmi blízkých hodnot podélné rezonanční frekvence a pokles těchto hodnot se zvyšující se teplotou výpalu byl velmi mírný. Z výsledků měření metodou IE můžeme říct, že přidáním pryže a polymeru do směsi betonu dochází sice k nižším hodnotám pevnosti (Obr. 73 a Obr. 74), ovšem při tepelné zátěži nedochází k tak výraznému poklesu pevnosti ve srovnání s referenčním vzorkem.

Výsledky měření metodou IE poměrně detailně popsaly změny, které vlivem tepelné zátěže ve zkušebních vzorcích nastaly. Resonanční frekvence charakterizovaly vliv tepelné degradace na rozdílná složení směsí zkušebních těles.

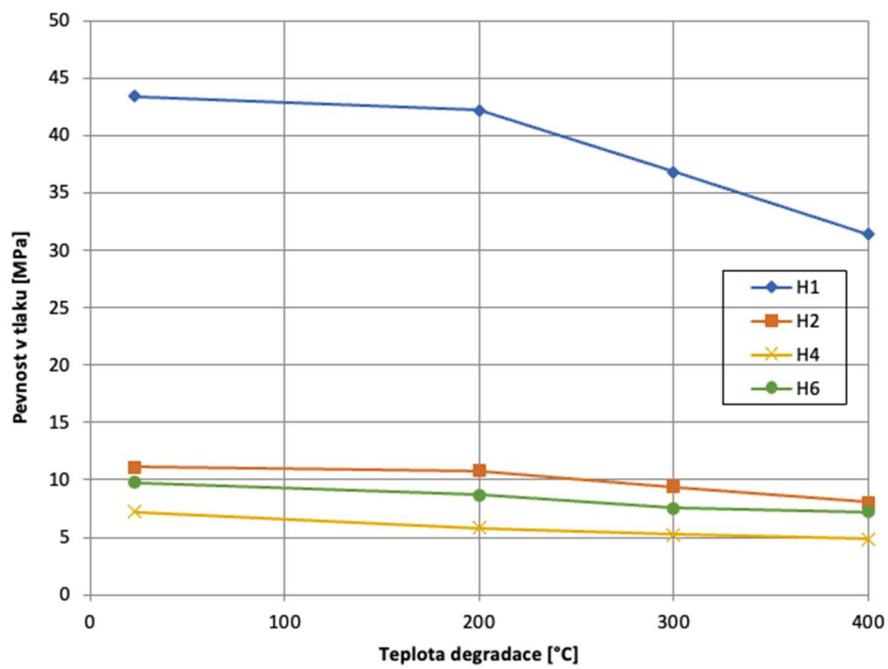


Obr. 72 Dominantní frekvence podélného kmitání tepelně degradovaných vzorků obsahujících pryžové částice a polymerová pojiva

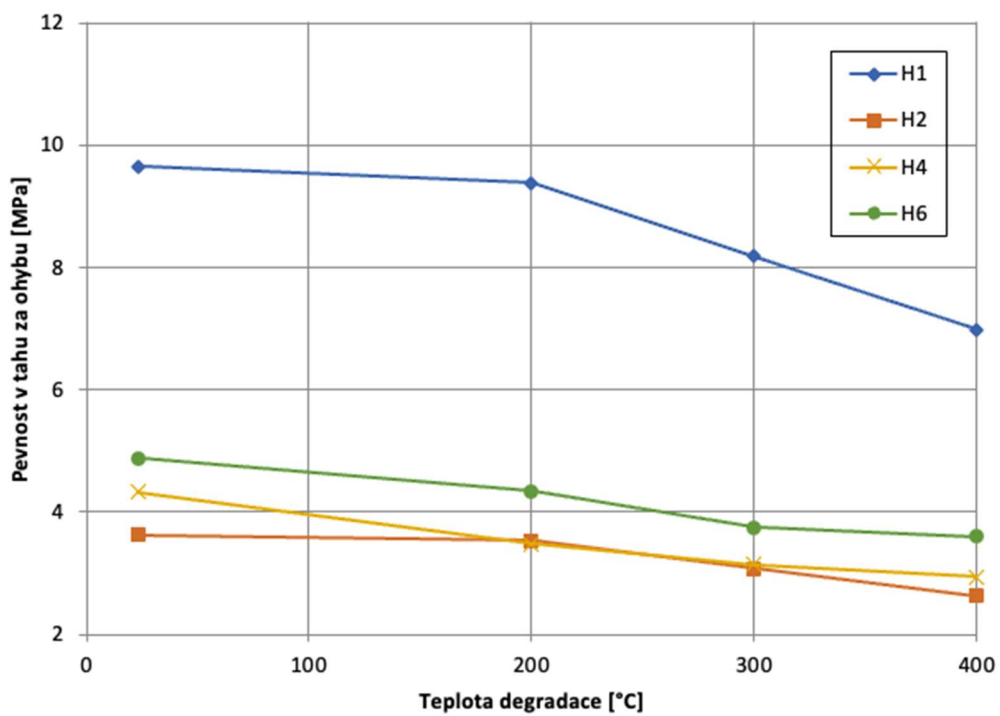
#### 5.3.12.1 Výsledky měření pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu

Výsledky metody IE také potvrzují pevnostní zkoušky, které jsou znázorněné v grafu na Obr. 73 a Obr. 74. Pokles pevnosti u prostých maltových zkušebních těles byl popsán již v kapitole 5.3.7 a 5.3.8. U zkušebních těles obsahujících příměs pryžového granulátu a polymerů klesá pevnost a všechny mechanické vlastnosti karbonizují a křehnou od teploty 200 °C.





Obr. 73 Pevnost v tlaku tepelně degradovaných vzorků obsahujících pryžové částice a polymerová pojiva



Obr. 74 Pevnost v tahu za ohybu tepelně degradovaných vzorků obsahujících pryžové částice a polymerová pojiva

### 5.3.13 Diskuse k výsledkům

Disertační práce byla vypracována s cílem ověřit využití akustických metod NDT jako vhodného nástroje pro analýzu betonových a železobetonových konstrukcí, které byly vystaveny účinku požáru. Pro účely testování byly vyrobeny dvě sady zkušebních těles. První sada obsahovala tělesa z prostého betonu bez vyztužení a druhá sada obsahovala betonová tělesa s výztuží. Tyto sady byly doplněny nad rámec cílů disertační práce o další zkušební tělesa vyrobená z prostého betonu s přidavkem pryžového agregátu a různých druhů polymerních pojiv.

Z vyhodnocených parametrů získaných z měření vybraných metod byly potvrzeny změny, které důsledkem tepelné degradace ve zkušebních tělesech nastaly.

Z výsledků vzájemných korelací lze vyhodnotit, které z parametrů jsou pro analýzu tepelně degradovaných zkušebních těles nejvíce vhodné a dokáží přesně analyzovat míru vzniklého poškození.

Zkušební tělesa byla zatěžována pomocí řízené tepelné degradace v laboratorní peci. Tím bylo dosaženo podobných jevů, které by v praxi vlivem požáru mohly nastat. Předpokládané parametry reálného požáru jsou popsány požárními křivkami. Při experimentu bylo dosaženo teplot, které se přibližují účinkům požáru popsané tunelovou požární křivkou.

V rámci experimentální části bylo také vyzkoušeno opakované zatěžování zkušebních těles maximální teplotou. U těles, které prošly opakovaně tepelnou degradací, byly zaznamenány největší změny po druhém cyklu výpalu. S dalšími přibývajícými cykly již nebyly změny tak výrazné. Tento experiment byl ovšem pouze doplňkový, a tak nebyl rozšířen o získání dalších parametrů. Jeho výsledky jsou zahrnuty v kapitole 11.1 přílohy této práce.

Výsledkem celého experimentu bylo zjištění, že nejpřesněji a nejjednodušeji popisovaly míru poškození těles vlivem působení vysokých teplot tyto parametry: rezonanční frekvence ve všech směrech kmitání ( $f_t$ ,  $f_L$ ,  $f_f$ ) a dynamický modul pružnosti  $E_{cu}$  v podélném směru kmitání. Tyto parametry byly ve vysoké korelaci s pevností v tlaku  $f_c$  a pevností v tahu  $f_{ct}$ . Lze tedy konstatovat, že akustické metody NDT jsou vhodným nástrojem z pohledu diagnostiky stupně a míry poškození tepelně degradovaných betonových a železobetonových prvků.

## 6 ZÁVĚR

Beton je nejpoužívanějším stavebním materiálem na světě. Ve snaze realizovat větší a subtilnější konstrukce se neustále zdokonaluje. Betonové konstrukce ovšem s časem stárnou a jistým způsobem degradují. Na degradaci má vliv nejen okolí, ale také nepředvídatelné události, mezi které patří například i zátěž vysokými teplotami. S touto problematikou úzce souvisí diagnostika a zkoušení materiálů a konstrukcí.

Cílem diagnostických metod je hodnocení kvality materiálů a konstrukcí jako nástroje pro predikci kvality, životnosti a využitelnosti navržených konstrukcí. Takovéto metody by měly být co nejjednodušší, cenově přijatelné, rychlé a spolehlivé s reprodukovatelnými výsledky. Nedestruktivní metody testování se jeví jako účinný nástroj pro diagnostiku materiálů a konstrukcí. Při jejich aplikaci nedojde k poškození konstrukce a potřebná měření lze opakovat.

Hlavním cílem této disertační práce bylo ověřit možnosti využití akustických metod nedestruktivního testování, zejména metody Impact-Echo, jako vhodného nástroje pro analýzu betonových a železobetonových konstrukcí zatížených tepelnou degradací.

Tématu využití akustických metod nedestruktivního testování pro analýzu materiálů, které byly degradovány vysokými teplotami, se již věnovala spousta publikací a tyto metody jsou popsány jako vhodný nástroj pro odhalení míry poškození konstrukcí zatížených vysokou teplotou [2, 3, 5, 15, 30]. Ovšem použitelnost některých metod v praxi, tj. na reálných konstrukcích, bez nutnosti odebrání vzorku, není stále normovými předpisy stanovena.

**V první fázi** mé disertační práce byla pro potřeby měření vyrobena sada vzorků prostého betonu. Ta byla doplněna sadou vzorků vyztužených v podélném směru neutrální osy hladkou betonářskou výztuží. Zkušební tělesa byla postupně zatěžována teplotami 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.

**Ve druhé fázi** byla na zkušebních tělesech realizována měření pomocí akustických metod. Ta byla doplněna dalšími metodami nedestruktivního testování a klasickými destruktivními zkouškami jakými jsou pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Celkem byla zkušební tělesa testována devíti různými měřicími postupy, a to metodou Impact-Echo, ultrazvukovou impulzovou metodou, metodou impedanční spektroskopie, metodou nelineární akustické spektroskopie a metodou MLS. Tyto metody byly doplněny měřením hmotnostních změn, pozorováním povrchu zkušebního tělesa pomocí konfokálního mikroskopu a měřením pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Získané výsledky byly vyhodnoceny a bylo provedeno porovnání vzájemného vztahu mezi použitými metodami s ohledem na rozdílné postupy a okrajové podmínky.

Mezi vybranými akustickými metodami testování byla v této práci jako hlavní metoda použita **metoda Impact-Echo**. U této metody byla sledovaným parametrem vlastní rezonanční frekvence  $f$ . Změna této frekvence v závislosti na teplotě zaznamenala vývoj degradace od prvotních změn, které v mikrostruktuře materiálu nastaly. Hodnoty dominantních frekvencí byly měřeny ve třech směrech kmitání, tj. v podélném směru, příčném směru a kroutivém směru. Výsledky prokazovaly velkou citlivost na změny v mikrostruktuře materiálu, které jsou způsobeny vlivem tepelné degradace.

Další vybranou metodou byla **ultrazvuková impulzová metoda**. Z rychlosti šíření ultrazvukových vln byl definován parametr dynamického modulu pružnosti, který úzce koreloval s podélnou rezonanční frekvencí metody IE.

Výsledky získané **měřením metodou impedanční spektroskopie** popisovaly změny, které vlivem působení vysokých teplot v materiálu nastaly. Získanými parametry této metody byla relativní permitivita  $\varepsilon_r$ . Tato hodnota klesala se zvyšující se hodnotou tepelné degradace. Dalším měřeným parametrem byla absolutní hodnota impedance IZI, u které se zvyšoval trend v závislosti na stupni tepelné degradace. Dalším sledovaným parametrem byla elektrická kapacita C. Porovnáním vzájemné korelace dosahovala metoda impedanční spektroskopie nejvyšších hodnot korelace (0,3 - 0,74) s výsledky dynamického modulu pružnosti  $E_{cu}$ ,

**Metoda nelineární akustické spektroskopie** charakterizovala degradaci materiálu v závislosti na teplotě sledováním hodnot amplitud vyšších harmonických frekvencí. Výsledky získané z měření této metody ukázaly schopnost odhalit změny ve struktuře betonu, které byly vlivem tepelné degradace způsobeny.

Jedním ze získaných parametrů měření **metodou MLS (Buzení pseudonáhodným signálem)** byla rychlost šíření podélných vln v testovaném tělese. Dalším parametrem byla maximální frekvence signálu v lineární závislosti na amplitudě. Výsledky této metody byly porovnávány s výsledky metody Impact-Echo a s výsledky měření ultrazvukové impulzové metody. Vzájemná korelace mezi těmito metodami dosahovala vysokých hodnot (0,98 -1).

Měření **hmotnostních změn**, pozorování vzorků pomocí **konfokálního mikroskopu** a **pevnostní zkoušky** potvrdily charakter změn, které v materiálu vlivem tepelné degradace nastaly.

**Třetí fáze** této práce se zabývala výsledky všech použitých metod testování. **Výsledné hodnoty jednotlivých parametrů definovaly téměř detailně změny v mikrostruktuře materiálu, které nastaly vlivem působení vysokých teplot. Akustické metody testování jsou v tomto případě velmi vhodným nástrojem pro stanovení míry poškození takto namáhaných betonových konstrukcí.**

Metoda IE prokázala velice dobrou korelaci (0,96-1) ve všech hodnocených frekvencích ( $f_t$ ,  $f_L$ ,  $f_f$ ) s výsledky měření pevnosti v tlaku  $f_c$  a v tahu  $f_{ct}$ .

Posuvem rezonančních frekvencí naměřených metodou Impact-Echo, byla jednoznačně prokázána souvislost se zvyšujícími stupni tepelné degradace. Sledováním změn dominantních frekvencí bylo umožněno odhalit nejen míru poškození betonu a železobetonu v důsledku působení vysokých teplot, ale také sledovat změny v pevnostech prostého betonu i betonu opatřeného výztuží.

Na základě vyhodnocení všech parametrů se jeví metoda Impact-Echo jako nejvhodnější diagnostická metoda pro posuzování tepelně degradovaných betonových a železobetonových konstrukcí.

Použití metody IE v praxi, například při lokalizaci požáru v silničních tunelech, umožní rychlé detekování místa a stupně poškození zasažené oblasti. To vede ke zkrácení doby potřebné na opravu poškozené konstrukce a tím i snížení ceny nákladů na její rekonstrukci. Použití metody IE v praxi je tak velmi aktuálním předmětem dalšího vývoje.

### **Vědecký a praktický přínos práce**

Vědecký přínos je dán výsledky, které jsou součástí nejen této práce, ale také publikační činnosti. V počátku práce byla vyrobena zkušební tělesa z prostého betonu a z betonu vyztuženého jednoduchou betonářskou ocelí.

Tato zkušební tělesa byla namáhána působením vysokých teplot a podrobena testováním celkem devíti zkušebními metodami a postupy pro všechny stupně tepelné degradace.

Výsledné parametry měření byly vyhodnoceny a byla mezi nimi porovnávána vzájemná korelace. Z výsledků korelace jsou pro stanovení stupně tepelné degradace nejvhodnějšími parametry rezonanční frekvence ( $f_t$ ,  $f_L$ ,  $f_f$ ), pevnost v tlaku  $f_c$  a pevnost v tahu  $f_{ct}$ , a také dynamický modul pružnosti  $E_{cu}$ . U hodnot relativní permitivity  $\epsilon_r$  a absolutní hodnoty impedance IZI bylo dosaženo nižších hodnot korelace, ovšem tendence naměřených veličin prokázala souvislost s mírou poškození vlivem tepelné degradace, a tak lze tyto veličiny do jisté míry využít k odhalení vzniklých defektů.

Mimo cíle mé disertační práce byla experimentální část doplněna o další čtyři receptury zkušebních těles, které byly namáhány vysokými teplotami. Tělesa byla podrobena měření metodou Impact - Echo a měření pevnosti v tahu a pevnosti v tlaku. Testování probíhalo v rámci spolupráce s ústavem THD, VUT Fakulty stavební. Výsledné hodnoty rezonančních frekvencí detailně popsaly změny, které nastaly vlivem tepelného zatížení u jednotlivých směsí.

Měřením metodou Impact-Echo bylo jasně prokázáno, že je vhodným a spolehlivým nástrojem pro odhalení míry poškození a s tím spojené změny pevností betonových a železobetonových konstrukcí, které byly zasaženy tepelnou degradací.

Jako další možný směr experimentu je použití metody IE pro stanovení míry poškození vazby mezi krycí vrstvou z různých druhů betonových směsí a výztuží různých povrchových úprav u železobetonových konstrukcí.

Metoda IE se prokázala také jako spolehlivý nástroj pro zaznamenání změny při degradaci zkušebních těles modifikovaných prýžovým plnivem a polymerními pojivy. Metodou IE by mohl být při dalších experimentech sledován vliv modifikací betonu pro dosažení lepších parametrů pro odolnost betonu vůči působení tepelného zatížení.

## 7 Bibliografie

- [1] DAMTOFT, J.S., J. LUKASIK, D. HERFORT, D. SORRENTINO a E.M. GARTNER. *Sustainable development and climate change initiatives*. Cement and Concrete Research. 2008, 38(2), 115-127. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008. ISSN 00088846.  
Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884607002153>
- [2] VÁLEK, J., *Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot*, disertační práce. Brno 2014. 186 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie hmot a stavebních dílců. Vedoucí práce: Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [3] ODOLNOST BETONŮ PROTI PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLŮT, RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D., Prof.RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc. a Ing. Patrik Bayer, CSs.; VUT v Brně
- [4] HEJTMÁNEK, P., NAJMANOVÁ, H., POKORNÁ, M., *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. [cit.2024-02-01] <<https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>>
- [5] KRZEMIEN, K. a I. HAGER. *Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method*. Construction and Building Materials. 2015, 96, 155-163. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815302245>
- [6] DVOŘÁK, R., *Využití akustických metod pro posouzení vlivu složení cementových kompozitů na průběh degradace vyvolané zvýšenou teplotou*. Brno, 2020, 162 s., disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Zdeněk Chobola, CSc.
- [7] POKORNÝ, M., HEJTMÁNEK P., NAJMANOVÁ, H., *Požární bezpečnost staveb*. [cit.2024-01-31] < <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13648-pozarni-bezpecnost-staveb>>
- [8] *Právní úprava požární ochrany*. [cit.2024-03-01]. < <https://zsbozp.vubp.cz/pravni-uprava-pozarni-ochrany>>
- [9] *Požadavky na stavební výrobky s označením CE*. [cit.2024-02-01] <[https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/stavebni-vyrobky/pozadavky-na-stavebni-vyrobky-s-oznaceni-ce--157746/\\_](https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/stavebni-vyrobky/pozadavky-na-stavebni-vyrobky-s-oznaceni-ce--157746/_)>
- [10] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [11] *Železobeton – Železový beton*. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/zelezobeton-zelezovy-beton/> [cit.2024-02-12]
- [12] SUCHARDA, O., MATEČKOVÁ, P., ŽÍDEK, L., *Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu drátkobetonu*. tzbinfo. 2016 Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18133-zkouseni-a-stanoveni-pevnosti-v-tahu-u-dratkobetonu>. [cit.2024-02-18]
- [13] ZAPLETAL, M., *Železobetonové konstrukce: jaké jsou jejich přednosti?* Dostupné z: <https://www.folza.cz/2021/09/07/zelezobetonove-konstrukce-jake-jsou-jejich-prednosti/> [cit.2024-02-23]

- [14] PROCHÁZKA, J., ŠTEFAN, R., VAŠKOVÁ, J., *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*, Vyd. 1., Praha: České vysoké učení technické, 2010, 189 s, ISBN 978 - 01- 04613-5.
- [15] ROZSYPALOVÁ, I.; SCHMID, P.; DANĚK, P. *Diagnostika stropní konstrukce poškozené požárem*. TZB- info, 2016, roč. 2016, č. 9, s. 1-12. ISSN: 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stropy/14725-diagnostika-stropni-konstrukce-poskozene-pozarem>. [cit.2024-02-18]
- [16] ASBL, *Komplexní požární ochrana a bezpečnost s využitím betonu*, European Concrete Platform ASBL, 2007. Dostupné také z: [https://www.concreteurope.eu/images/ECP\\_Documents/FireSafety\\_CZ.pdf](https://www.concreteurope.eu/images/ECP_Documents/FireSafety_CZ.pdf)
- [17] ZHAO, B., SOKOL, Z., *Návrh ocelových a ocelobetonových konstrukcí vystavených požáru DIFISEK<sup>+</sup>*. Část 3. Analýza konstrukce. 2008. Praha. Dostupné z: <http://fire.fsv.cvut.cz/difisek/>, [cit.2024-01-10]
- [18] PIMIENTA, P., ALONSO, M., JANSOON MCNAMEE, R. a MINDEGUIA, J. CH., *Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights*. RILEM Technical Letters [online]. 2017, 2, 45-52. ISSN 2518-0231.
- [19] HAGER, I. *Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties*. French, 2004. PhD thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [20] CHEN, X., J. BU, W. ZHOU a Q. WANG. *Effect of pre-cyclic damage and high temperature on residual tensile behavior of concrete*. Fire Safety Journal. 2019, 108. ISSN 03797112. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711217302485>
- [21] YÜZER, NABI, FEVZIYE AKÖZ A LEYLA ÖZTÜRK. *Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature* [online]. b.r. [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000389>
- [22] KRZEMIEN, K. a I. HAGER. *Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method*. Construction and Building Materials. 2015, 96, 155-163.. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815302245>
- [23] ŽAJDLÍK, T.; ŠUHAIJA, K. *Zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí*. TZB-info, 2021, roč. 23, č. 36, s. 1-5. ISSN: 1801-4399. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/22759-zkouseni-pozarni-odolnosti-stavebnich-konstrukci>
- [24] ZHAO, J., ZHENG, J. J., GAI-FEI PENG G. A VAN BREUGEL, K., *A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure*. Cement and Concrete Research. 2014, 65, 64-75. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.010>
- [25] ROVNANÍK, P., *Vliv působení vysokých teplot na stavební materiály na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátových pojiv*, habilitační práce, Brno, 2012, 150 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

- [26] ZEIML, M., LACKNER, R. & MANG, H.A. *Experimental insight into spalling behavior of concrete tunnel linings under fire loading*. Acta Geotech. 3, 295–308 (2008).  
<https://doi.org/10.1007/s11440-008-0069-9>
- [27] FAN, K., D. LI, L. LI a Jiayu WU. *Effect of temperature gradient on transient thermal creep of heated and stressed concrete in transient state tests*. Construction and Building Materials. 2019, 222, 839-851. ISSN 09500618. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819316265>
- [28] MIKULINEC, D., *Betony s vyšší odolností vůči působení vysokých teplot*. Brno, 2011. 83 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D..
- [29] V.K.R. KODUR, ANKIT AGRAWAL. *Effect of temperature induced bond degradation on fire response of reinforced concrete beams*. Engineering Structures, Volume 142, 2017, Pages 98- 109, ISSN 0141-0296
- [30] GAWESKA, I., *Thermal behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties*. Engineering Sciences [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. English. NNT: pastel-0000114. TAKÉ DOSTUPNÉ Z:  
<https://pastel.hal.science/pastel-00001147>
- [31] FELDMAN, R.F., SEREDA, P.J., *A new model for hydrated portland cement and its practical implications*, National Research Council of Canada, Materials Section, Division of Building Research. Ottawa, 1970. NRCC: 11604. Také dostupné z:  
<https://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/rp454.pdf>
- [32] PIMIENTAA, P., ALONSOB, M., C., McNAMEEC, J., R., MINDEGUIAD, J., CH., *Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights*, RILEM Technical Letters(2017) 2: 45-52, Také dostupné z: <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2017.53>
- [33] HAGER, I., *Colour Change in Heated Concrete*. Fire Technology [online]. 2014, 50(4), 945-958 [cit. 2017-10-24]. DOI: 10.1007/s10694-012-0320-7. ISSN 0015- 2684. Dostupné z:  
<http://link.springer.com/10.1007/s10694-012-0320-7>
- [34] ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, Praha, ÚNMZ. (2015).
- [35] ROZSYPALOVÁ, I., *Hodnocení vyztužených betonových konstrukcí vystavených zvýšeným teplotám*. Brno, 2021. 376 s., z toho 146 s. příloh. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Daněk, Ph.D., Školitel-specialista Ing. Jan Prokeš, Ph.D.
- [36] KASSIR, M., BANDYOPADHYAY, K., a REICH, M., *Thermal degradation of concrete in the temperature range from ambient to 315 °C (600 °F)*. New York: Brookhaven National Laboratory, 1996.
- [37] KUPILÍK, V., *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. 1. vyd. Praha: Grada, 2006. Stavitel. ISBN 80 - 247- 1329 <https://books.google.cz/books?id=0nzSihUFstgC&printsec=frontcover&key=AlzaSyDIPfI89JdFhWBVsMVsavVo6aNh057xITc#v=onepage&q&f=false> a nebo kniha REICHEL, V., *Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí*, VÚPS, Praha, 1971



- [38] ČSN EN 1992-1-1 (Eurocode 1) *Zatížení konstrukcí, – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*, vyhlášením ve Věstníku, Praha, ÚNMZ. (2004).
- [39] PROCHÁZKA, J., ŠTEFAN, R., VAŠKOVÁ, J., *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*, Vyd. 1., Praha: České vysoké učení technické, 2010, 189 s, ISBN 978-80-01-04613-5.
- [40] *Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment 1 st publ.* Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2008, p. 214, Bulletin no. 46. ISBN 978-2-88394-086-4. State-of-art report (214 pages, ISBN 978-2-88394-086-4, July 2008) Dostupné také z: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/fire-design-of-concrete-structures-structural-behaviour-and-detail.html>
- [41] HOBST, L., ADÁMEK, J., CIKRLÉ P., a P. SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: průvodce předmětem*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [42] CIKRLÉ, P.; KOCÁB, D.; ČERVENKA, J. *Tvrdoměrné metody zkoušení betonu – část II. Beton TKS*, 2019, roč. 19, č. 2, s. 14-18. ISSN: 1213-3116.
- [43] KOCÁB, D.; CIKRLÉ, P.; MISÁK, P. *Tvrdoměrné metody zkoušení betonu – část III. Beton TKS*, 2019, roč. 19, č. 5, s. 42-47. ISSN: 1213-3116.
- [44] DVORSKÝ, P., *Využití ultrazvukové impulsové metody – nástroj pro stanovení pevností cementů: diplomová práce*. Brno, 2012. 72 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [45] BROŽOVSKÝ, J., *Nedestruktivní zkušební metody - nástroj pro hodnocení pevnosti stavebních materiálů a výrobků: Nondestructive testing methods - testing tool of building material/product strength : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2005. ISBN 80-214-3056-7.
- [46] KOŘENSKÁ, M.: *Aplikace akustických metod ve stavebnictví*, zkrácená verze habilitační práce. Brno 2006. 30s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. ISBN 80-214-3276-4 ISSN 1213-418
- [47] VLACHOVÁ, M., *Mechanické kmitání a vlnění*. MFWEB: Mechanické kmitání a vlnění. [cit.2024- 02- 20] <<https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/F1141/um/superzabavnejucebnitext.pdf> >
- [48] TIMČAKOVÁ, K., *Monitorování a analýza koroze výztužné oceli v železobetonových prvcích a konstrukcích akustickými metodami*. Brno, 2018. 161 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky. Vedoucí práce prof. RNDr. Zdeněk Chobola, CSc.
- [49] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika 4. díl*. 1. vydání. Praha: BEN, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [50] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.

- [51] PAZDERA, L. SMUTNÝ, J. MAZAL, P.: *Využití akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2004, ISBN 80-214-2802-3.
- [52] *Akustická emise obecně*. [cit. 2023-03-10], <<http://www.preditest.cz>>
- [53] VLAŠIC, F.: *Hodnocení cyklického poškození slitin na bázi hliníku a hořčíku s využitím metody akustické emise*, disertační práce. Brno 2011. 132 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování/Odbor metodiky konstruování. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [54] NICHOLAS J. EPASO, MEMBER, ASCE: *The Impact-Echo method: an overview*. Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington, D. C. 2011, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2011. 18 s.
- [55] PO-LIANG Y., PEI-LING, L., *Application of the wavelet transform and the enhanced Fourier spectrum in the impact echo test*. *NDT&E international* 41 (2008) s. 282-394, *ScienceDirect*.
- [56] VAN DEN ABEELE K. E., CARMELIET J.: *Single Mode Nonlinear Resonant Acoustic Spectroscopy (SIMONRAS) for Damage Detection in Quasi-brittle Materials*. [online] Dostupný z WWW: <<http://herodes.feld.cvut.cz/index.php?obsah=7>><http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwk/sr99/bwf.htm#bf1.1>>
- [57] KAZAKOV, V., JOHNSON, P. A.: *Modulation Acoustic Method of Crack Location*. In: 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscow, Russia, August, 2002
- [58] MATYSÍK, M.: *Výzkum nelineární akustické spektroskopie pro defektoskopii ve stavebnictví*, disertační práce. Brno, 2008. 131 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, Ústav fyziky. Vedoucí práce Doc. Ing. Marta Kořenská, CSc.
- [59] LUŇÁK, M., *Model a interpretace impedanční spektroskopie stavebních materiálů*, disertační práce. Brno, 2007. 122 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, Ústav fyziky. Vedoucí práce Doc. RNDr, Pavel Schauer, CSc.
- [60] *Confocal Scanning Laser Microscope OLS3000/3100*, Users manual, Ver. 5.0, 2007, Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni\\_mikroskopie.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf)
- [61] *Phased Array Tutorial – Table of Contents*, A review of Conventional Beam Characteristics. [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com) [online]. [cit. 2024-03-10]. <<http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>>
- [62] CARBOL, L., *Měření akustických vlastností stavebních materiálů pomocí pseudonáhodné sekvence: disertační práce*. Brno, 2016, 131 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav fyziky. Vedoucí disertační práce Mgr. Jan Martinek, Ph.D.
- [63] CARINO, N., THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW. *Proceedings of the 2001 structures Congress & Exposition*. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology, 2001, 18, 1 19. Dostupné také z: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=860355](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860355)

- [64] DVOŘÁK, R., *Akustické nedestruktivní testování betonu degradovaného vysokými teplotami s porovnáním akustické impedance*, NDE for Safety / DEFECTOSKOPIE 2018, November 6 - 8, 2018 - City Conference Center, Prague, Czech Republic, Dostupné také z: <http://old.konstrukce.cz/UserFiles/file/K/2019/defe09.pdf>
- [65] COLLEPARDI, M., *Moderní beton*. Přeložil Vlastimil BÍLEK, přeložila Halina SZKLORZOVÁ. Betonové stavitelství. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost (ČBS) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [66] PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., KOŘENSKÁ, M., BÍLEK, V., TOPOLÁŘ, L., MARTÍNEK, H., LUŇÁK, M., KUSÁK, I., *Využití metod nedestruktivního testování pro sledované betonu při tuhnutí*. The e- Journal of Nondestructive Testing. 2008. 2008(1) 173-176 s. ISSN 1435-4934
- [67] MALHOTRA, V. a Nicholas CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0.
- [68] HANČ, D. *Mapování podpovrchových defektů robotickým ramenem se speciální koncovkou*. Praha, 2020. 61 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav mechaniky a materiálů. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.
- [69] *Frekvenční doména*. [Cit. 2024-03-01] <https://www.ifm.com/cz/cs/shared/technologies/real-time-maintenance/vibration/technology/frekvencni-domena>
- [70] SVOBODA, L., *Monitorování dynamických soustav s využitím piezoelektrických senzorů vibrací* [online]. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124620>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Filip Kšica.
- [71] *Snímač AE, typ MIDY*, [Cit. 5.3.2024] <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/midi>
- [72] ČSN EN 12390-5 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Český normalizační institut, 2009
- [73] ČSN EN 12390-4 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Český normalizační institut, 2001.
- [74] ČSN EN 12390-7 (73 1302) – *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Český normalizační institut, 2020.
- [75] ČSN 73 1371: *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Český normalizační institut, 2011.
- [76] LUŇÁK, M., KUSÁK, I.: *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124 s., Politechnika Poznan, Polsko, 2008, ISBN: 978-83-926896-0-7
- [77] ČSN 73 1372- *Nedestruktivní zkoušení betonu-Rezonanční metoda zkoušení betonu*

- [78] ASTM C1383 – 04 (2010) *Standard test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*
- [79] EPASTO, G., E. PROVERBIO a V. VENTURI. *Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method*. Materials and Structures [online]. 2010, 43(1-2), 235-245 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/225389216\\_Evaluation\\_of\\_fire-damaged\\_concrete\\_using\\_impact-echo\\_method](https://www.researchgate.net/publication/225389216_Evaluation_of_fire-damaged_concrete_using_impact-echo_method)
- [80] Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 11/06. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2006.
- [81] TUPÝ, M., SOTIRIADIS, K., KUSÁK, I., ŠTEFKOVÁ, D., LUŇÁK, M., PETRÁNEK, V.,. *Exposure of Mortars Modified with Rubber Aggregates and Polymer Admixtures to Acid Environments and Elevated Temperature Conditions*. Journal of Materials in Civil Engineering Volume 28, Issue 4. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001433)

## 8 Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
NDT	Nedestruktivní testování (angl. překlad „Non-destructive testing“)
PBŘ	Požárně bezpečnostní řešení stavby
CSH	Kalcium-silikát-hydrát (hlavní produkt hydratace portlandského cementu)
EC 2	Eurokód 2 - Soustava evropských technických norem, které se zabývají navrhováním a posuzováním stavebních konstrukcí
RABT	Směrnice o konfiguraci a provozu silničních tunelů (angl. překlad „Directives on the Configuration and Operation of Road Tunnels“)
RWS	Tunelová křivka Rijkswaterstaat
AE	Akustická emise
IE	Zkušební metoda Impact-Echo
FT	Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace („Fast Fourier Transform“)
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
MLS	Sekvence maximální délky (Maximum length sequence)
GPIO	Rozhraní pro měřicí přístroje (General Purpose Interface Bus)
PCI	Počítačová sběrnice pro připojení periférií k základní desce
PZT	Materiál piezobudičů: olovo-zirkonát-titanát
NEWS	Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy – nelineární spektroskopie pomocí elastických vln
1D	Jednorozměrný prvek
2D	Dvourozměrný prvek
3D	Trojrozměrný prvek
PC	Osobní počítač
PUNDIT	Komerční výrobek pro testování
NEWS	Nelineární ultrazvuková spektroskopie (angl. překlad „Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy“)
P-vlna	Podélná tlaková vlna (angl. překlad „pressure wave“)
S-vlna	Smyková ohybová vlna (angl. překlad „shear wave“)
R-vlna	Povrchová Rayleighova vlna (angl. překlad „Rayleigh wave“)
ŽB	Železobeton
SNR	Odstup signálu od šumu (Signal to Noise Ratio)

Symbol	Jednotka	Význam
c	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita
λ	[m]	Vlnová délka
T	[s]	Celkový čas průchodu
E	[MPa]	Modul pružnosti
k <sub>c,t</sub> (θ)	[-]	Součinitel pro redukci pevnosti betonu v tahu
θ <sub>g</sub>	[°C]	je teplota plynů v požárním úseku
t	[min.]	je čas trvání požáru
G <sub>cr</sub>	[MPa]	modulu pružnosti betonu ve smyku
L	[m]	délka zkušební tělesa
f <sub>L</sub>	[Hz]	První rezonanční frekvence podélného vlnění
f <sub>t</sub>	[Hz]	První rezonanční frekvence krouživého vlnění
f <sub>t,1</sub>	[Hz]	První rezonanční frekvence ohybového vlnění
f <sub>t,2</sub>	[Hz]	Druhá rezonanční frekvence ohybového vlnění
f	[Hz]	vlastní rezonanční frekvence
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	objemová hmotnost
k <sub>r</sub>	[Hz]	součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušební tělesa
b	[m]	délka kratší strany průřezu hranolu
h	[m]	délka delší strany hranolu
ν <sub>cr</sub>	[-]	Poissonův koeficient betonu
C <sub>p</sub>	[m/s]	rychlost šíření vlny v prvku
k <sub>c</sub>	[-]	koeficient zohledňující vliv materiálu
Z <sub>1</sub>	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	akustická impedance prvního prostředí
Z <sub>2</sub>	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	akustická impedance druhého prostředí
Z	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	Akustická impedance
T <sub>L</sub>	[μs]	měřený čas šíření impulzů v betonu
SNR		
T <sub>kor</sub>	[μs]	korekce, tzv. mrtvého času přístroje a rozdílu času šíření impulzu ultrazvukových vln pro zajištění kalibrace přístroje
t <sub>kor</sub>	[s]	„mrtvý čas“
t <sub>ME</sub>	[s]	doba průchodu ultrazvukového vlnění kalibračním vzorkem
t <sub>E</sub>	[s]	časová charakteristika kalibračního vzorku
E <sub>cu</sub>	[MPa]	Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu
v <sub>L</sub> <sup>2</sup>	[m/s]	impulzní průchodová rychlost
k	[-]	bezrozměrný koeficient rozměrnosti prostředí pro zkušební těleso
λ <sub>L</sub>	[m]	Délka podélné vlny impulzu
U	[V]	napětí
tan δ (f)	[-]	ztrátový činitel v závislosti na frekvenci
C	[f]	elektrická kapacita
α	[K <sup>-1</sup> ]	Koeficient lineární tepelné roztažnosti
m	[kg]	Hmotnost tělesa
R <sub>cor</sub>	[-]	Koeficient korelace

---

$f_c$	[MPa]	Krychelná pevnost v tlaku
$f_{ct}$	[MPa]	Pevnost v tahu za ohybu
$\varepsilon_r$	[-]	Relativní permitivita
$x_i$	[-]	i-tá hodnota měřené veličiny x
$\bar{x}$	[-]	Průměrná hodnota veličiny x
$S_x$	[-]	Směrodatná odchylka veličiny x
$n$	[-]	Počet měření veličiny x
$T$	[°C]	Teplota tepelné degradace

## 9 Seznam tabulek

TAB.1	ZMĚNY V MIKROSTRUKTUŘE BETONU PŘI ZAHŘÍVÁNÍ [2] .....	16
TAB.2	FREKVENČNÍ POMĚRY REZONANČNÍCH FREKVENCÍ $f_L, f_T, f_F$ NAMĚŘENÝCH METODOU IE V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ DEGRADACE .....	60
TAB.3	ELEKTRICKÉ PARAMETRY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ MĚŘENÝCH PŘI REFERENČNÍ FREKVENCI 1 KHZ .....	65
TAB.4	KORELAČNÍ KOEFICIENTY $R_{COR}^2$ PARAMETRŮ MĚŘENÍ MEZI JEDNOTLIVÝMI METODAMI PRO DANÉ TEPLoty .....	80
TAB.5	SLOŽENÍ A PLASTICITA MALTOVÝCH KOMPOZITŮ [82] .....	86
TAB.6	KORELAČNÍ KOEFICIENTY $R_{COR}^2$ PARAMETRŮ MĚŘENÍ MEZI JEDNOTLIVÝMI METODAMI PRO DANÉ TEPLoty .....	110



## 10 Seznam obrázků

OBR. 1	VZNIK SPALLINGU V BETONU [25;26] .....	17
OBR. 2	RELATIVNÍ PEVNOST V TLAKU BETONU S ROZDÍLNÝM KAMENIVEM V ZÁVISLOSTI NA PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLOT PODLE EC2 [34] .....	18
OBR. 3	SOUČINITELEL $K_{c,t}(\theta)$ PRO REDUKCI PEVNOSTI BETONU V TAHU $f_{ck}, t$ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ [34] .....	19
OBR. 4	MODUL PRUŽNOSTI BETONŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ [37] .....	20
OBR. 5	Vliv teploty na pevnost v tlaku betonu obsahujících křemičité kamenivo [64] .....	21
OBR. 6	Vliv teploty na pevnost v tlaku betonu obsahujících vápenaté kamenivo [64] .....	21
OBR. 7	MODEL STRUKTURY CSH GELU S ČÁSTICEMI VODY VE VOLNÉ NEBO ABSORBOVANÉ FORMĚ [10] .....	21
OBR. 8	FÁZE DEHYDRATACE CEMENTOVÉ PASTY [32;33] .....	22
OBR. 9	Vliv vysoké teploty na chování kameniva [36] .....	23
OBR. 10	SOUČINITELEL $K_s(\theta)$ PRO REDUKCI PEVNOSTI BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE A SOUČINITELEL $K_p(\theta)$ PRO REDUKCI PEVNOSTI PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE PŘI ZVÝŠENÝCH TEPLOTÁCH PODLE EUROKÓDU 2 [34] .....	24
OBR. 11	POŽÁRNÍ SCÉNÁŘE [37] .....	25
OBR. 12	VZNIK A DETEKCE ELASTICKÝCH VLN V MATERIÁLU – SCHÉMA .....	30
OBR. 13	PARAMETRY SPOJITÉHO A NESPOJITÉHO SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE [49] .....	31
OBR. 14	PRINCIP AKUSTICKÉ EMISE, CITLIVOST DETEKCE [46] .....	31
OBR. 15	AKUSTICKÉ EMISE [49;50] .....	31
OBR. 16	PRINCIP METODY IMPACT-ECHO .....	33
OBR. 17	POLOHA SOND PŘI MĚŘENÍ REZONANČNÍ FREKVENCE PODÉLNÉHO KMITÁNÍ (A), MĚŘENÍ PRVNÍ A DRUHÉ REZONANČNÍ FREKVENCE PŘÍČNÉ KMITÁNÍ (B), MĚŘENÍ REZONANČNÍ FREKVENCE KROUTIVÉHO KMITÁNÍ (C) .....	35
OBR. 18	RELATIVNÍ RYCHLOST ŠÍŘENÍ VLN V BETONU [62] .....	37
OBR. 19	ODRAZ A LOM VLN NA ROZHRAŇÍ DVOU MATERIÁLŮ [63] .....	37
OBR. 20	ZOBRAZENÍ SIGNÁLU, JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ V ČASOVÉ DOMÉNĚ A JEHO FREKVENČNÍ SPEKTRUM ZÍSKANÉ POMOCÍ FFT .....	39
OBR. 21	POSUN REZONANČNÍHO MAXIMA S ROSTOUCÍ AMPLITUDOU [55] .....	41
OBR. 22	FREKVENČNÍ SPEKTRUM ODEZVY JEDNOHO BUDÍČÍHO SIGNÁLU [46] .....	42
OBR. 23	FREKVENČNÍ SPEKTRUM ODEZVY PŘI PRŮCHODU DVOU SIGNÁLŮ [46] .....	42
OBR. 24	BLOKOVÉ SCHÉMA UVAŽOVANÉ MĚŘÍČÍ SESTAVY MLS [62] .....	47
OBR. 25	PRINCIP KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU [60] .....	48
OBR. 26	SCHÉMA POSTUPU PRÁCE .....	50
OBR. 27	SCHÉMA ZVOLENÝCH METOD TESTOVÁNÍ .....	51
OBR. 28	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	52
OBR. 29	LABORATORNÍ PEC SE VZORKY PO TEPELNÉ DEGRADACI .....	53
OBR. 30	ZKUŠEBNÍ TĚLESA PO TEPELNÉ DEGRADACI .....	53

## Využití akustických metod pro analýzu betonu a železobetonu namáhaného zvýšenou teplotou

### Seznam obrázků

---

OBR. 31	RELATIVNÍ SROVNÁVACÍ CHARAKTERISTIKA SNÍMAČE TYPU MIDI [71].....	55
OBR. 32	MĚŘÍCÍ SESTAVA METODY IMPACT-ECHO .....	55
OBR. 33	PRINCIP TESTOVÁNÍ METODY IMPACT-ECHO .....	56
OBR. 34	FREKVENČNÍ SPEKTRUM PODÉLNÉHO SMĚRU VLNĚNÍ .....	57
OBR. 35	POSUN PODÉLNÝCH DOMINANTNÍCH FREKVENCÍ VLIVEM TEPELNÉ DEGRADACE.....	57
OBR. 36	FREKVENČNÍ SPEKTRUM PŘÍČNÉHO SMĚRU VLNĚNÍ .....	58
OBR. 37	POSUN PŘÍČNÝCH DOMINANTNÍCH FREKVENCÍ VLIVEM TEPELNÉ DEGRADACE .....	59
OBR. 38	POROVNÁNÍ POSUNU JEDNOTLIVÝCH DOMINANTNÍCH FREKVENCÍ VLIVEM TEPELNÉ DEGRADACE .....	59
OBR. 39	SCHÉMA ULTRAZVUKOVÉ IMPULZOVÉ METODY – PRŮCHODOVÉ [49] .....	61
OBR. 40	ULTRAZVUKOVÁ PIEZOELEKTRICKÁ SONDA – PŘÍMÁ [50] .....	61
OBR. 41	APARATURA PRO MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVÉ IMPULZOVÉ METODY .....	61
OBR. 42	GRAF ZMĚNY ČASOVÉHO PRŮCHODU ULTRAZVUKU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ .....	62
OBR. 43	GRAF DYNAMICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI $E_{CU}$ Z MĚŘENÍ RYCHLOSTI PRŮCHODU ULTRAZVUKU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ A GRAF ZMĚNY RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÉHO IMPULZU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ .....	63
OBR. 44	MĚŘÍCÍ SESTAVA METODY IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE .....	64
OBR. 45	SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚŘÍCÍ APARATURY IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE (ZDROJ STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ, TESTOVÁNÍ VZOREK, DVOUKANÁLOVÝ OSCILOSKOP) [76] .....	64
OBR. 46	GRAF ZÁVISLOSTI RELATIVNÍ PERMITIVITY A ABSOLUTNÍ HODNOTY IMPEDANCE VZORKŮ PODROBENÝCH TEPELNÉ DEGRADACI .....	65
OBR. 47	ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ KAPACITY VZORKU $C(F)$ NA VÝŠI TEPELNÉ DEGRADACE .....	66
OBR. 48	KONFOKÁLNÍ MIKROSKOP OLYMPUS LEXT 3100 [60] .....	67
OBR. 49	ZOBRAZENÍ STRUKTURY POVRCHU REFERENČNÍHO VZORKU POMOCÍ KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU .....	68
OBR. 50	ZOBRAZENÍ STRUKTURY POVRCHU VZORKU S TEPLOTOU VÝPALU 600 °C POMOCÍ KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU ..	68
OBR. 51	ZOBRAZENÍ STRUKTURY POVRCHU VZORKU S TEPLOTOU VÝPALU 1000 °C POMOCÍ KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU	69
OBR. 52	ZOBRAZENÍ STRUKTURY POVRCHU VZORKU S TEPLOTOU VÝPALU 1200 °C POMOCÍ KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU	69
OBR. 53	MĚŘÍCÍ APARATURA METODY NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE .....	70
OBR. 54	FREKVENČNÍ SPEKTRUM REFERENČNÍHO ZKUŠEBNÍHO TĚLESA.....	71
OBR. 55	FREKVENČNÍ SPEKTRUM VZORKU PO DEGRADACI (400 °C).....	71
OBR. 56	FREKVENČNÍ SPEKTRUM VZORKU PO DEGRADACI (600 °C).....	71
OBR. 57	FREKVENČNÍ SPEKTRUM VZORKU PO DEGRADACI (800 °C).....	71
OBR. 58	FREKVENČNÍ SPEKTRUM VZORKU PO DEGRADACI (1000 °C).....	71
OBR. 59	FREKVENČNÍ SPEKTRUM VZORKU PO DEGRADACI (1200 °C).....	71
OBR. 60	GRAF POROVNÁNÍ MĚŘENÍ RYCHLOSTI ULTRAZVUKOVÝCH VLN MĚŘENÝCH ULTRAZVUKOVOU IMPULZOVOU METODOU (PŘÍSTROJ PUNDIT) A MĚŘÍCÍ APARATUROU METODY MLS .....	73
OBR. 61	GRAF POROVNÁNÍ MĚŘENÍ REZONANČNÍ FREKVENCE PODÉLNÝCH VLN $F_L$ METODOU IE A MLS .....	74

---

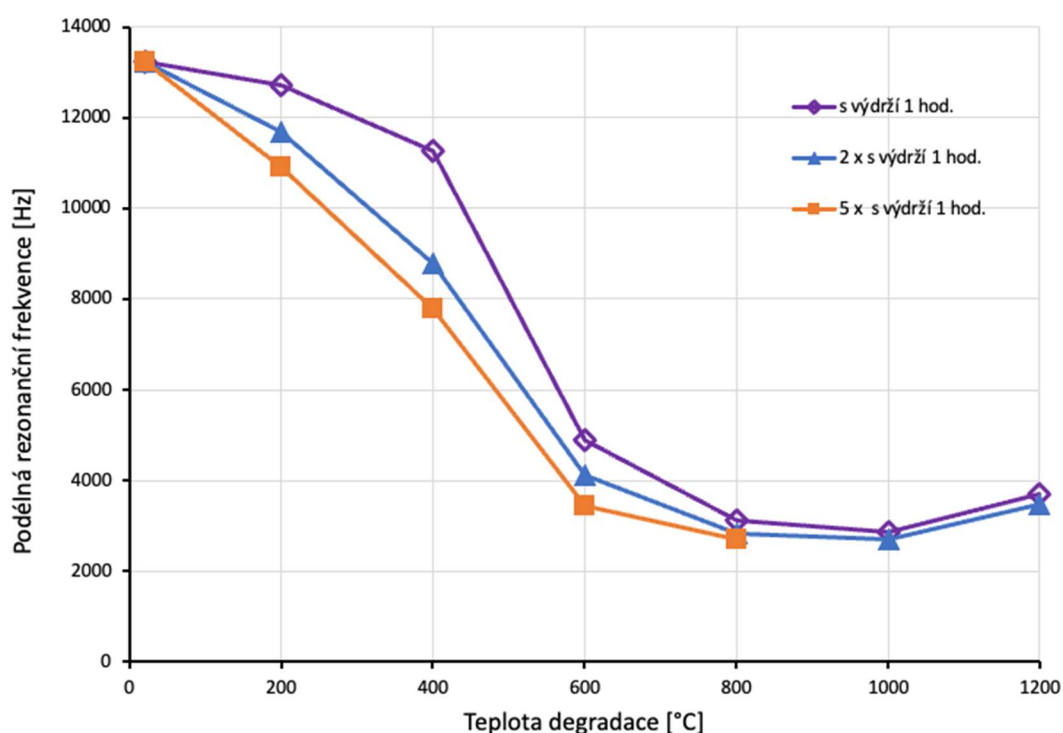
OBR. 62	VLIV TEPLoty DEGRADACE NA PEVNOST V TAHU ZA OHYBU $F_f$ .....	75
OBR. 63	VLIV TEPLoty DEGRADACE NA PEVNOST V TLAKU $F_c$ .....	76
OBR. 64	RELATIVNÍ ZTRÁTA HMOTNOSTI PO VÝPALU .....	77
OBR. 65	OBJEMOVÁ HMOTNOST PO VÝPALU .....	78
OBR. 66	ULOŽENÍ VÝZTUŽE V NEUTRÁLNÍ OSE .....	81
OBR. 67	ZKUŠEBNÍ TĚLESA S VÝZTUŽÍ I BEZ VÝZTUŽE VYPÁLENÉ NA TEPLotu 1200 °C .....	81
OBR. 68	DOMINANTNÍ FREKVENCE PODÉLNÉHO KMITÁNÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU S VÝZTUŽÍ A BEZ VÝZTUŽE .....	83
OBR. 69	DOMINANTNÍ FREKVENCE PŘÍČNÉHO KMITÁNÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU S VÝZTUŽÍ A BEZ VÝZTUŽE .....	83
OBR. 70	DOMINANTNÍ FREKVENCE KROUTIVÉHO KMITÁNÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU S VÝZTUŽÍ A BEZ VÝZTUŽE .....	84
OBR. 71	RELATIVNÍ ZTRÁTA HMOTNOSTI VYPÁLENÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES S VÝZTUŽÍ A BEZ VÝZTUŽE .....	85
OBR. 72	DOMINANTNÍ FREKVENCE PODÉLNÉHO KMITÁNÍ TEPELNĚ DEGRADOVANÝCH VZORKŮ OBSAHUJÍCÍCH PRYŽOVÉ ČÁSTICE A POLYMEROVÁ POJIVA .....	88
OBR. 73	PEVNOST V TLAKU TEPELNĚ DEGRADOVANÝCH VZORKŮ OBSAHUJÍCÍCH PRYŽOVÉ ČÁSTICE A POLYMEROVÁ POJIVA .....	89
OBR. 74	PEVNOST V TAHU ZA OHYBU TEPELNĚ DEGRADOVANÝCH VZORKŮ OBSAHUJÍCÍCH PRYŽOVÉ ČÁSTICE A POLYMEROVÁ POJIVA .....	89
OBR. 75	PODÉLNÁ REZONANČNÍ FREKVENCE CYKLICKY NAMÁHANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	108
OBR. 76	RELATIVNÍ AMPLITUDA SIGNÁLŮ A VÝKONOVÉ SPEKTRUM PRO PODÉLNou DOMINANTNÍ FREKVENCÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA Z PROSTÉHO BETONU .....	109
OBR. 77	RELATIVNÍ AMPLITUDA SIGNÁLŮ A VÝKONOVÉ SPEKTRUM PRO OHYBOVOU (PŘÍČNOU) DOMINANTNÍ FREKVENCÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA Z PROSTÉHO BETONU .....	109

## 11 Přílohy

### 11.1 Podélná rezonanční frekvence cyklicky zatěžovaných zkušebních těles

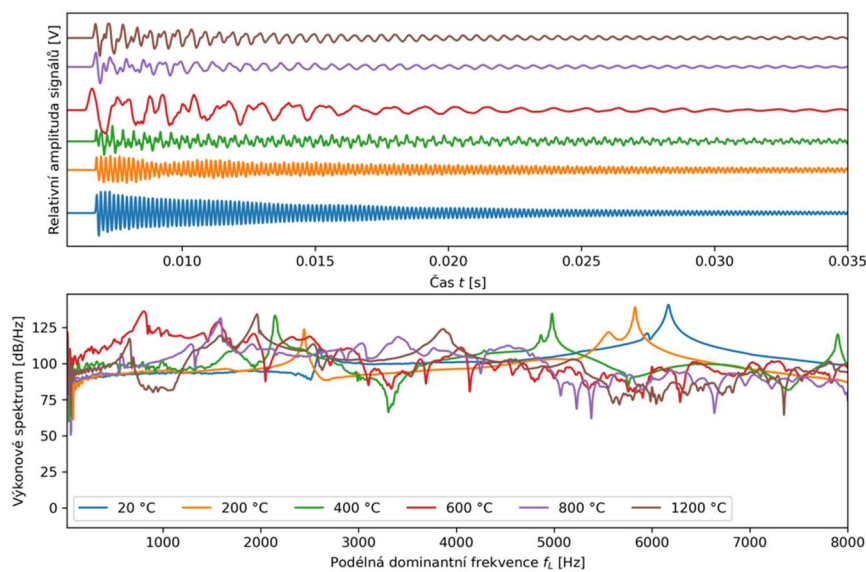
Zkušební tělesa z prostého betonu byla podrobena opakovanému zatěžování vysokými teplotami. V první fázi byla tělesa vystavena vysoké teplotě ve dvou cyklech. V další fázi byla tělesa vystavena vysoké teplotě v pěti po sobě jdoucích cyklech. Vždy bylo dosaženo teploty rychlostí 5 °C/min s izotermickou výdrží na maximální teplotě po dobu 60 minut. Po každé tepelné zátěži byly vzorky samovolně ochlazeny na laboratorní teplotu a poté byly znovu degradovány v laboratorní peci.

Po druhém degradačním cyklu musela být sada vzorků zatěžovaných teplotami 1000 °C a 1200 °C z testu vyřazena. Tělesa vlivem opakující se degradace ztratila soudržnost a rozpadla se.

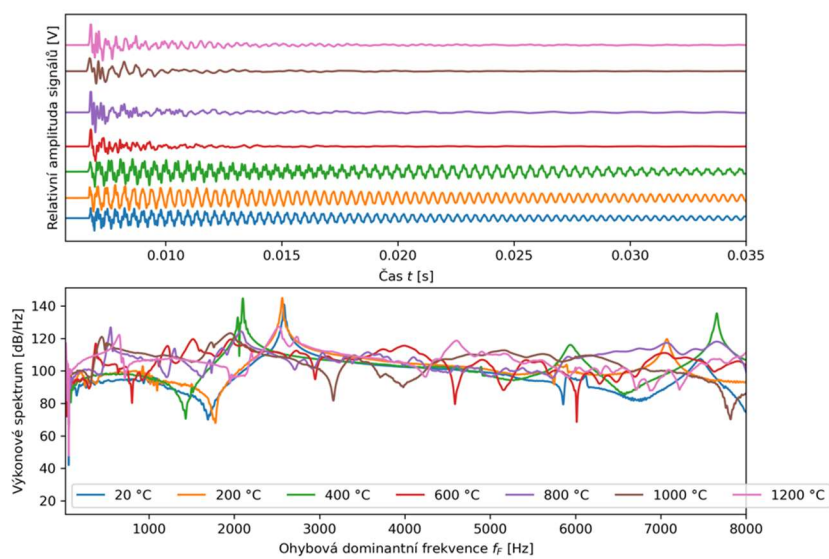


Obr. 75 Podélná rezonanční frekvence cyklicky namáhaných zkušebních těles

## 11.2 Relativní amplituda signálů a výkonové spektrum



Obr. 76 Relativní amplituda signálů a výkonové spektrum pro podélnou dominantní frekvenci zkušebního tělesa z prostého betonu



Obr. 77 Relativní amplituda signálů a výkonové spektrum pro ohybovou (příčnou) dominantní frekvenci zkušebního tělesa z prostého betonu

### 11.3 Korelační diagram vyztužených těles

Tab.6 Korelační koeficienty  $R_{cor}^2$  parametrů měření mezi jednotlivými metodami pro dané teploty

