



**Vysoké učení technické v Brně**

Fakulta stavební

HABILITAČNÍ PRÁCE

VYUŽITÍ AKUSTICKÝCH METOD PŘI SLEDOVÁNÍ  
CHOVÁNÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

THE USING ACOUSTIC METHODS FOR MONITORING THE  
BEHAVIOUR OF BUILDING MATERIALS

Mgr. Libor Topolář, Ph.D.

2018

## 1. ÚVOD

## 2. TEORIE, SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ, MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

### 2.1 Teorie vlnění

### 2.2 Nedestruktivní defektoskopie

### 2.3 Metoda akustické emise

### 2.4 Metoda Impact-echo

## 3. VYBRANÉ APLIKACE PŘI POUŽITÍ NA STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

### 3.1 Tuhnutí, tvrdnutí a zrání

### 3.2 Tříbodový ohyb

### 3.3 Ostatní – mechanické zatěžování, degradační procesy

## 4. ZÁVĚRY

## POUŽITÁ LITERATURA

## ABSTRAKT

Cílem habilitační práce je shrnout poznatky autora, které získal v rámci experimentů provedených na stavebních materiálech zejména nedestruktivními akustickými metodami. Tyto poznatky jsou vybrány z autorových publikací a doplněny komentáři. Habilitační práce ukazuje nové využití nedestruktivních akustických metod ve stavebnictví. Stěžejní kapitoly práce se zaměřují na metodu akustické emise a metodu impact-echo. V rámci provedených experimentů autor vytvořil metodiku pro měření a zpracování naměřených dat z jednotlivých aplikací metody akustické emise v průběhu zatěžování kompozitních stavebních materiálů. Na základě autorem provedených experimentů a získaných výsledků lze tedy usuzovat, že větší počet překmitů signálů akustické emise odpovídá vytvoření vyššího počtu nových krystalických fází (v případě tuhnutí a tvrdnutí) nebo mikrotrhlin (v případě namáhání vytvrdlého materiálu). Vyšší hodnoty amplitudy signálů akustické emise nebo uvolněné energie signálů akustické emise odpovídají výraznějším strukturálním změnám, které se objevují ve struktuře materiálu, ať už se jedná o nové produkty hydratačních procesů nebo vznik či růst mikrotrhlin. Hlavním výsledkem tedy je, že detailní hodnocení měření metodou akustické emise mohou významnou měrou přispět k detailnějšímu pohledu na chování kompozitních materiálů a konstrukcí v průběhu jejich životnosti. Metoda akustické emise se jeví jako zajímavá doplňující metoda pro měření chování stavebních kompozitních konstrukcí, struktur či materiálů ať už při jejich výrobě tak i při jejich zatěžování.

## ABSTRACT

The aim of the habilitation thesis is to summarize the author's findings that he has gained from experiments carried out on building materials, in particular using non-destructive acoustic methods. These findings have been selected from the author's publications and are supplemented by comments. The habilitation thesis presents new uses of non-destructive acoustic methods in the building industry. The central chapters of the thesis focus on the acoustic emission method and the impact-echo method. Within the conducted experiments, the author has developed a methodology for measuring and processing the measured data from individual applications of the acoustic emission method during loading of composite building materials. Based on the authors' experiments and their results, it can be assumed that a greater number of acoustic emission signal events correspond to the formation of a higher number of new crystalline phases (in case of setting and hardening) or microcracks (in case of loading of a hardened material). Higher amplitude values of acoustic emission signals or released energy of acoustic emission signals correspond to more significant structural changes that occur in the structure of the material, whether it be new products of the hydration processes or the formation or expansion of microcracks. The main result therefore is that detailed evaluation of measurements using the acoustic emission method can greatly contribute to a more detailed understanding of the behaviour of composite materials and structures during their lifetime. The acoustic emission method seems to be an interesting complementary method for measurements of the behaviour of building composite structures, constructions and materials, both during their production and during their loading.

## 1. ÚVOD

Sledování chování kompozitních stavebních materiálů a konstrukcí je důležitou součástí výrobního procesu (při jejich tuhnutí, tvrdnutí a zrání), ale také při jeho použití během životnosti konstrukce (při namáhání tlakem a ohybem, cyklickém zatěžování apod.). Popis chování kompozitních stavebních materiálů a konstrukcí v laboratorním, pololaboratorním, výrobním a praktickém použití slouží jak pro výzkumné a vývojové úlohy, tak i pro reálné využití. Pro dosažení tohoto cíle je vhodné kromě, vývoje a použití již stávajících metod a rozšiřování jejich pole působnosti a aplikace i nestandardních metod a postupů. Mezi tyto nestandardní metody můžeme u stavebních kompozitů zařadit i akustickou nedestruktivní metodu – metodu akustické emise.

Technologie zkoušení kompozitních materiálů používaných ve stavebnictví má na rozdíl od ostatních technických disciplín (strojírenství, elektrotechniky apod.) své specifické vlastnosti. Většina nedestruktivních akustických měřících metod je dobře zpracována pro homogenní, zejména jednoduché kovové materiály (ocel, litina apod.), avšak u nehomogenních materiálů tyto metody nejsou tak podrobně zpracovány. Mezi tyto nehomogenní materiály samozřejmě patří stavební kompozity ať už na bázi cementu nebo materiály alkalicky aktivované (pasty, malty a betony).

Samotná práce je zaměřena zejména na experimentální detekci poruch (zvláště mikroskopických) ve stavebních materiálech a konstrukcích aplikací metody akustické emise a částečně i metody impact-echo. Klasické či jiné metody jsou uvedeny pouze v nutných případech, neboť nejsou cílem práce. Celá práce je členěna do tří základních tematických celků.

V první tematickém celku je uveden teoretický úvod do obou akustických nedestruktivní metod. S popisem mechanického vlnění a jednotlivých zjišťovaných parametrů signálů akustické emise. V závěru je ke každé metodě uvedeno přístrojové vybavení, které bylo použito v následujících částech práce pro zaznamenání a zpracování jednotlivých signálů.

V druhém tematickém celku je uveden přehled vybraných dosažených výsledků experimentálního studia aplikace metody akustické emise z mnoha oblastí stavebnictví. Výsledky jsou získány z aplikace metod akustické emise a impact-echo během laboratorních a pololaboratorních měření. Tento celek se dále dělí na tři kapitoly, které jsou spojeny aplikací metod. V první kapitole jsou prezentovány ukázky výsledků měření během tuhnutí a tvrdnutí cementových i alkalicky aktivovaných kompozitů s různými přísadami i příměsemi a při různých způsobech ošetřování. V druhé části se práce zaměřuje zejména na parametry signálů akustické emise získané během tříbodového ohybového testu na různých stavebních

kompozitech (cementové a alkalicky aktivované malty, betony s různými přísadami a příměsemi apod.). V závěrečné třetí kapitole tohoto tematického celku se práce zabývá ostatními aplikacemi, např. určováním parametrů signálů akustické emise během stanovení statického modulu pružnosti, nebo v průběhu čtyřbodového ohybového testu a také při testu mrazuvzdornosti, kde je akustická emise doplněná o výsledky z metody impact-echo. Tato část práce vychází z větší části z publikační činnosti autora.

V poslední kapitole jsou uvedeny závěry a shrnutí jednotlivých aplikací metody akustické emise a metody impact-echo.

Tato habilitační práce je koncipována jako vybraný soubor publikovaných prací se zaměřením na omezené oblasti metod akustické emise a impact-echo (třetí kapitola) doplněná obecným úvodem k oběma metodám (druhá kapitola) a shrnutím s možnými doporučeními (čtvrtá kapitola).

## 2. TEORIE, SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ, MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

### 2.1 Teorie vlnění

Vlnění je fyzikální děj, jehož podstatou je šíření určitého rozruchu látkovým prostředím. Rozruch je obecně lokální změna stavu látky tvořící dané prostředí. Je určen změnou některé veličiny charakterizující stav látky (např. její hustoty a tlaku). Těleso, které vyvolá rozruch a od něhož se rozruch šíří, se nazývá zdroj vlnění. Takový rozruch šířící se prostředím obecně označujeme také názvem vlna. Je-li rozruchem mechanické kmitání částic prostředí, které se přenáší působením elastických sil (sil pružnosti) mezi sousedními objemovými elementy prostředí postupně na další a další jeho elementy, jde o elastické vlnění. Toto vlnění je tedy mechanické povahy; objemové elementy prostředí se při jeho šíření vychylují ze svých rovnovážných poloh a zároveň se při tom deformují. Je-li toto kmitání lineární, nedochází při šíření elastického vlnění k přenosu látky, tj. k jejímu přemisťování v určitém směru. To platí tehdy, jsou-li výchylky kmitů částic prostředí dostatečně malé (Mechlová, 2001).

Vlnění rozdělujeme na vlny (Halliday, 2000):

1. **mechanické** – tyto vlny jsou nejznámější, protože se s nimi setkáváme neustále (např. vlny na vodní hladině, zvukové vlny, seizmické vlny apod.). Všechny mechanické vlny mají společné základní rysy: řídí se Newtonovými zákony a mohou existovat pouze v určitém látkovém prostředí (voda, vzduch, pevná látka).

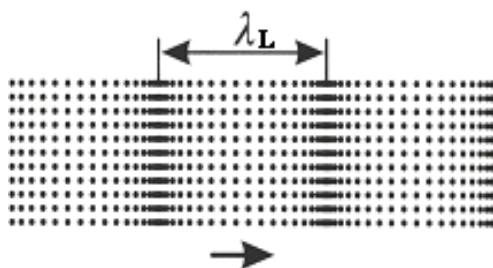
2. **elektromagnetické** – používáme je prakticky neustále (např. viditelné a ultrafialové světlo, rádiové a televizní vlny, RTG záření apod.). Pro svou existenci nevyžadují látkové prostředí.

3. **hmoty (de Broglieho vlny)** – tyto vlny se běžně vyskytují v moderních zařízeních. Elektrony, protony, další elementární částice se projevují jako vlny. Protože předpokládáme, že uvedené objekty jsou stavebními částicemi hmoty, nazýváme tyto vlny vlnami hmoty nebo častěji de Broglieho.

### **Mechanické vlnění**

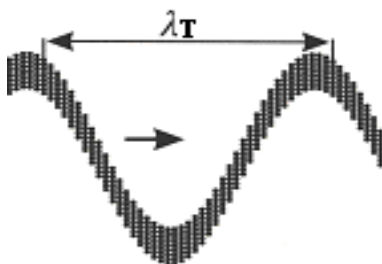
Dle pohybu částic prostředí vzhledem ke směru šíření vlny se mechanické vlnění, kterým se budeme zabývat, dělí na (Kopec, 2000):

**Podélné vlny (longitudální – index L)** – při podélné vlně částice prostředí kmitají po přímkové dráze ve směru šíření vlny (Obr. 2.1.1). Při tomto pohybu se prostředí střídavě zhušťuje a zředňuje, tj. vzniká střídavý tlak a tah. Přitom dochází i ke změně objemu prostředí. Podélné vlny se mohou šířit tuhým, kapalným i plynným prostředím. Proto jde o druh vln, s nímž se nejčastěji setkáme. Jedinou podmínkou, aby se v prostředí mohla šířit čistě podélná vlna, jsou dostatečně velké rozměry prostředí vzhledem k délce vlny.



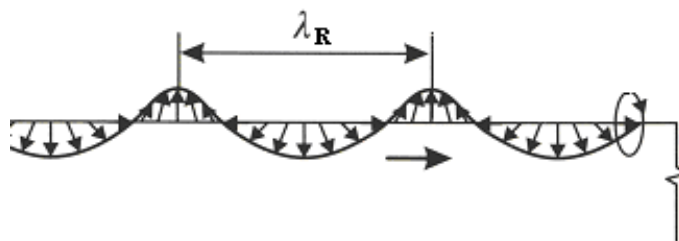
Obr. 2.1.1: Kmitání částic při šíření vlny podélné (Kreidl, 2006)

**Příčné vlny (transverzální – index T)** – pro zkoušení materiálu jsou významné i vlny příčné, které se také mohou šířit jen v prostředí s rozměry mnohem většími, než je délka vlny, avšak pouze v takovém, které klade odpor namáhání ve smyku, tj. v prostředí tuhém. Částice prostředí kmitají po přímkové dráze, avšak kolmo na směr šíření (Obr. 2.1.2). V kapalinách a plynech se příčné vlny nemohou šířit. Pouze některé kapaliny nebo pasty s velkou viskozitou mohou příčné vlny přenášet. Při šíření příčných vln nevzniká zhuštění a zředění, nýbrž částice se pouze vzájemně posunují. Proto se při šíření příčné vlny nemění objem prostředí.



Obr. 2.1.2: Kmitání částic při šíření vlny příčné (Kreidl, 2006)

**Povrchové vlny (Rayleighovy – index R)** – na volném povrchu tuhé látky se mohou šířit povrchové Rayleighovy vlny (Obr. 2.1.3). Jde o zvláštní příčné vlny, jejichž částice kmitají kolem rovnovážné polohy po eliptické dráze, protože na ně působí síla kolmá na směr šíření (příčná), která podstatně převyšuje sílu působící ve směru šíření (podélnou). Proto výsledný pohyb částic, vzniklý složením obou vektorů, probíhá po silně protažené elipse. Rovina kmitání je kolmá k povrchu prostředí. Podélná složka povrchové vlny ubývá s hloubkou rychleji než složka příčná. V hloubce rovnající se délce příčné vlny  $\lambda_T$ , povrchová vlna prakticky zaniká. Na rozhraní tuhého kapalného prostředí se mohou vyskytnout vlny podobné Rayleighovým. Jsou však podstatně více tlumené, a proto poměrně rychle zanikají.



Obr. 2.1.3: Kmitání částic při šíření vlny povrchové (Kreidl, 2006)



Základní popis vlnění je proveden vlnovou rovnicí, která je parciální diferenciální rovnicí, které vyhovují funkce popisující vlnění. Konkrétní tvar této rovnice a konstanty, které se v ní vyskytují, závisí na fyzikální povaze vlnění a na vlastnostech prostředí, jímž se vlnění šíří. Je jistě rozumné předpokládat, že vlnění  $\Psi$ , s nímž se ve fyzice setkáváme, splňují univerzální vlnovou rovnici:

$$\Delta\Psi(\vec{r}, t) - \frac{1}{v_f^2} \cdot \frac{\partial^2\Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.1.1)$$

kde  $\Delta$  je Laplaceův operátor ( $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ),

$v_f$  je fázová rychlost vln,

$t$  je čas

$\vec{r}$  polohový vektor.

## 2.2 Nedestruktivní defektoskopie

Metody nedestruktivní defektoskopie (zobrazení defektů) jsou diagnostické metody, které tvoří nedílnou část kontroly výrobků, struktury či konstrukce jak ve výzkumné, vývojové, předvýrobní a výrobní etapě, tak i v provozu. Bez defektoskopie by nebyla zajištěna bezporuchovost, spolehlivost a bezpečnost v mnoha oblastech jako např. v letectví, v jaderné energetice, v chemickém průmyslu, ale i v bezpečnosti mostů, přehrad apod. Obecně se nedestruktivní defektoskopie zabývá testováním struktury kovových i nekovových materiálů a vnitřních nebo povrchových vad objektů bez zásahu do jejich celistvosti. Za vadu materiálu nebo výrobku považujeme nesprávné chemické složení, vady struktury, odchylky od požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností, necelistvosti (trhliny, praskliny), dutiny (bubliny, póry, sraženiny, řediny), vměstky (struskovitost, nekovové a kovové vměsky), tvarové vady, koroze, opotřebení aj. (Kreidl, 2006)

Metod nedestruktivní defektoskopie je celá řada, mezi hlavní metody patří:

- vizuální kontrola
- průmyslová radiologie
- ultrazvuková defektoskopie
- magnetická defektoskopie
- kapilární defektoskopie
- metoda akustické emise
- vířivé proudy
- ostatní – termografie, měření tvrdosti apod.

Tyto metody jsou založené na různých fyzikálních principech a využívají specifické vlastnosti materiálů. Jednotlivé postupy jsou různě náročné na technické vybavení i

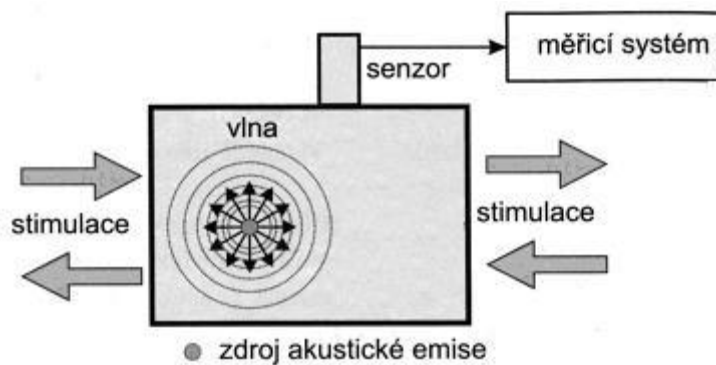
na kvalifikaci personálu a nelze stanovit jeden obecně platný postup pro zjištění defektu. Využití konkrétní metody vždy závisí na dané situaci. Ideální univerzální defektoskopická metoda pro kontrolu konkrétních součástí nebo materiálů neexistuje. Volba optimální metody nebo jejich kombinace závisí na konkrétní aplikaci, materiálu atd. Běžně se proto používá kombinace několika různých metod a postupů, které umožňují zjistit co nejpřesnější informace pro požadovaný případ. V této práci se budu zabývat zejména pasivní a aktivní akustickou emisí.

### 2.3 Metoda akustické emise

(Kreidl, 2006) poznamenává, že akustická emise (AE) se řadí mezi nejmodernější metody pro materiálové inženýrství a únavové aplikace. Zdroj AE může být z mnoha jevů, v závislosti na druhu materiálu viz Tab. 2.3.1. U kovů mohou zdroje akustických emisí pocházet z dislokačních pohybů, prasklin, zlomenin, a dokonce i korozních procesů. V betonu mohou způsobit mikroskopické a makroskopické poškození, jakož i odtržení nebo posunutí výztuže. U kompozitů pochází AE z matricového praskání, delaminace, oddělování matrice z vláken, prasknutí vláken a vytahování vláken (Grosse, 2008). U potrubí může být AE způsobena únikem tekutin, turbulencí a kavitací. Většina zdrojů akustických emisí je spojena s poškozením. Detekce a sledování těchto emisí se běžně používá k předpovědi selhání materiálu. Při technické diagnostice byla použita metoda akustických emisí ke sledování stavu rotačních částí (tření a kavitace ložisek / ozubených kol), detekce mikrotrhlin, defektů tlakových nádob, poruch potrubí, posouzení / zkoušení struktury letadel a diagnostiky stavu mostů. Metoda AE se ukázala jako užitečná v testování únavy a při destrukci.

(Ativitavas, 2002) poznamenává, že výhodou AE je to, že jde spíše o globální metodu než o lokální metodu, což znamená, že technika sleduje spíše prostorovou strukturu než malou místní oblast. V důsledku toho může být monitorování provedeno v krátké době a není náročné na práci. Nevýhodou této technologie je však to, že AE závisí na použitém zatížení. To znamená, že některé nespojitosti nemusí generovat detekovatelnou akustickou emisi za určitých typů nebo úrovně zatížení. Zatím se metoda AE velice úspěšně používá při sledování kovů, kompozitních materiálů, hornin a dalších materiálů.

Metoda AE na rozdíl od většiny ostatních postupů nedestruktivního testování sleduje pouze aktivní defekty probíhající uvnitř sledované struktury. Tyto poruchy mohou vzniknout pouze při zatížení sledované struktury. Pasivní defekty či tvar struktury nemají na lokalizaci AE zásadní vliv. K akustické emisi dochází ve zdroji AE při uvolnění energie vlivem stimulace vnitřním nebo vnějším napětím viz Obr. 2.3.1 (Grosse, 2008; Pollock, 1988).



Obr. 2.3.1: Vznik a šíření vlny při události akustické emise (Kreidl, 2006)

Tab. 2.3.1: Materiály, u kterých je možné sledovat akustickou emisi a mechanismy, které akustickou emisi způsobují (Shull, 2002)

<b>Materiály, u kterých je možné sledovat akustickou emisi</b>
<p style="text-align: center;">Kovy Keramika Sklo Polymery Kompozity (obsahující kovovou, keramickou anebo polymerní matici a široké variace vyztužených materiálů) Dřevo Beton Kameny a geologické materiály</p>
<b>Mechanismy způsobující události akustické emise</b>
<p style="text-align: center;">Zdroje mikrotrhlin jako je intergranulární trhání Zdroje makrotrhlin jako je růst únavových trhlin Dislokační pohyby Fázové transformace Lomy inkluzních částí Lomy vyztužených částí nebo vláken Oddělení inkluzí nebo výztuží Přeskupení magnetických domén Delaminace vrstvených materiálů Důlní otřesy Zemětřesení</p>

Událost AE je emitována nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impuls šířící se materiálem jako elastická podélná anebo příčná vlna. Jakmile vlna dopadne na povrch materiálu, částečně se odrazí a částečně dochází k její transformaci na jeden nebo více módů. U deskových struktur se vlna šíří převážně Rayleighovou, tj. povrchovou vlnou. Kromě povrchové vlny dochází také k

transformaci např. na Lambovy, tj. deskové vlny. Každá z těchto vln se šíří různou rychlostí. Signál detekovaný na snímači AE a převedený na elektrický se označuje jako signál AE.

Některé výhody metody AE v porovnání s jinými nedestruktivními metodami:

- ✓ Jednou z největších výhod metody AE je její vysoká citlivost na šíření trhlin, kdy detekuje trhlinu již ve velmi rané fázi jejího vzniku. Podle (Finlayson, 2001) bylo zjištěno, že metoda AE je velmi citlivá pro detekci nových trhlin s velikostí do několika set čtverečních mikronů.
- ✓ Malé defekty, vyskytující se ve skrytých nebo obtížně přístupných místech, mohou být detekovány, pokud mají signály možnost dostat se do snímače. Následně se dá určit pozice těchto defektů s pomocí časů příchodu signálů u různých senzorů.
- ✓ Metoda AE umožňuje sledování struktury v reálném čase, a zejména to jak signály vznikají při vzniku trhlin. Analýza zaznamenaných signálů v reálném čase pak může poskytnout průběžné informace o chování sledovaného vzorku a zdroji AE.
- ✓ Metodu AE lze použít ke sledování bez přerušování běžné aktivity či používání struktury, např. monitorování mostů lze provést bez zastavení provozu, čímž zvyšuje své praktické použití.
- ✓ Metoda AE je pasivní metoda, v tom smyslu, že není potřeba dodat žádnou vnější energii, ale je použita aktivní energie ze vznikající vady v samotné konstrukci.

Metoda AE se liší od většiny jiných nedestruktivních metod ve dvou hlavních směrech. Za prvé, signály vznikají v materiálu samotném, a ne z vnějšího zdroje. Což je v kontrastu s jinými nedestruktivními metodami, jako je např. ultrazvuk, kdy je studována odezva na signál, který je zavedený do vzorku (Vallen, 2002). Za druhé, AE detekuje vznikající defekty, zatímco většina metod detekuje existující geometrické nespojitosti (Pollock, 1989). Hlavní rozdíly mezi metodou AE a jinými nedestruktivními metodami jsou shrnuty v Tab. 2.3.2.

AE může být chápána jako přirozeně generovaný akustický nebo ultrazvukový signál vytvořený lokálními mechanickými nestabilitami uvnitř struktury. Cílem při vyhodnocování AE jako nedestruktivní metody je odhalit příčinu těchto akustických emisí během měření. Plastická deformace je hlavním zdrojem signálů AE vznikajících při zatěžování materiálů či struktur. Největší množství vznikajících akustických emisí je na mezi kluzu daného materiálu.

Tab. 2.3.2: Charakteristické vlastnosti metody akustické emise v porovnání s ostatními nedestruktivními metodami (Pollock, 1989)

<b>Akustická emise</b>	<b>Ostatní nedestruktivní metody</b>
Detekuje vznik a pohyb poruch	Detekce geometrických tvarů poruch
Při zkoušení vyžaduje zatížení (mechanické, tepelné, chemické apod.)	Při zkoušení nevyžadují zatížení
Každé zatěžování je unikátní	Inspekce je opakovatelná
Více citlivější na typ zkoušeného materiálu	Méně citlivější na typ zkoušeného materiálu
Méně citlivé na geometrii vzorku	Více citlivé na geometrii vzorku
Testování vyžaduje přístup jen pro snímač	Vyžaduje přístup pro celou oblast
Hlavní problém je šum pozadí	Hlavní problém je souvislost s geometrií vzorku

### **Kaiserův jev, Felicity jev**

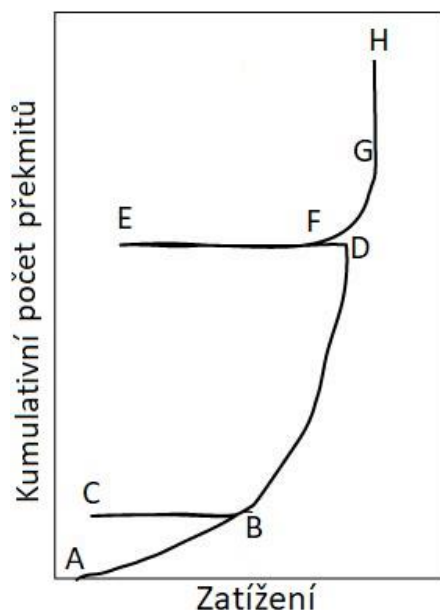
Při opakovaném zatěžování zkoušeného vzorku nevzniká v materiálu AE až do dosažení hodnoty předcházejícího maxima zatížení, pokud mezi těmito dvěma zatíženími nedošlo k přerozdělení zatížení vlivem šíření vad v materiálu, nebo pokud nedošlo ke strukturálním změnám způsobeným jinými mechanismy (Ono, 2008). Tento efekt nemusí být permanentní, např. pro ocel se účinek předchozího zatížení ztrácí přibližně po jednom roce.

Tento fenomén je známý jako Kaiserův jev viz Obr. 2.3.2. Při zatěžování vzorku je vidět rostoucí aktivita AE (úsek AB). Po odstranění a opětovném zatížení (úsek BCB) se aktivita AE neobjeví znovu, dokud není zatížení v bodě B překročeno. Když se zatížení působící na vzorek znovu zvýší (úsek BD), opět začíná aktivita AE, která se zastaví až po odstranění zatížení. U bodu F je však zatížení dostatečně vysoké, tak aby způsobilo významnou aktivitu AE, přestože nebylo dosaženo předchozího maximálního zatížení v bodě D (www.nde-ed.org, 2017). Tento jev je znám jako Felicity jev. Tento jev lze kvantifikovat pomocí Felicity poměru (Chen, 2012):

$$\text{Felicity poměr} = \frac{\text{úroveň zatížení, kdy začíná aktivita AE v zatěžovacím cyklu}}{\text{maximum aktivity AE z předchozího zatížení}}$$

Znalost účinků Kaiserova a Felicity jevu může být použita k určení, zda jsou přítomny velké vady v konstrukci. Toho lze dosáhnout použitím konstantních zatížení (vzhledem ke konstrukčním zatížením vyvíjených v materiálu) a "poslechu", aby se zjistilo, zda se vyskytuje aktivita AE, když je toto zatížení udržováno na konstantní úrovni. Pokud je zachováno konstantní zatížení (úsek GH) a je i nadále detekována

aktivita AE je velmi pravděpodobné, že jsou v materiálu přítomny podstatné vady (www.nde-ed.org, 2017).

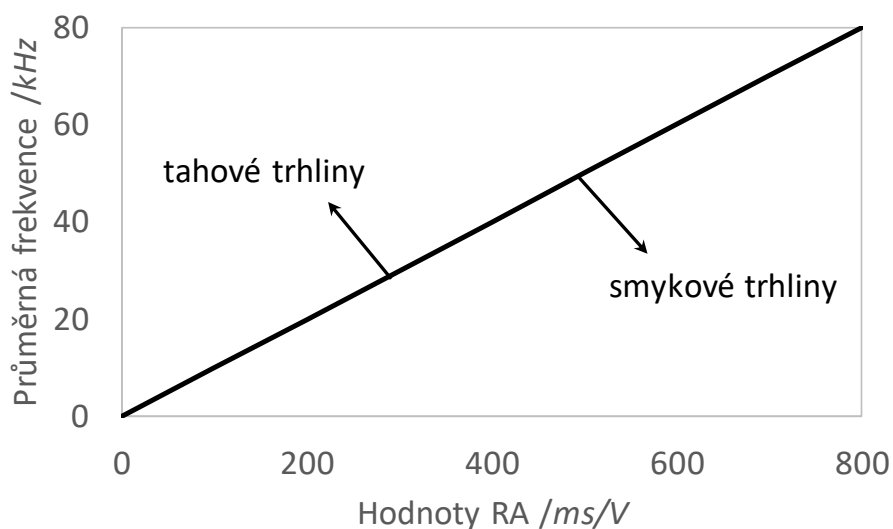


Obr. 2.3.2: Kaiserův a Felicity jev (www.nde-ed.org, 2017)

Z parametrů signálů AE získaných klasickým způsobem lze výpočtem určit hodnotu RA a průměrnou frekvenci podle (JCMS-III, 2003; Ohtsu, 2007) jako:

- hodnota RA = doba nárůstu signálu AE / maximální amplituda signálu AE
- průměrná frekvence = počet překmitů signálu AE / délka trvání signálu AE

Pomocí těchto dvou vypočítaných indexů AE lze pak vznikající trhliny rozřadit na tahové a smykové podle Obr. 2.3.3.

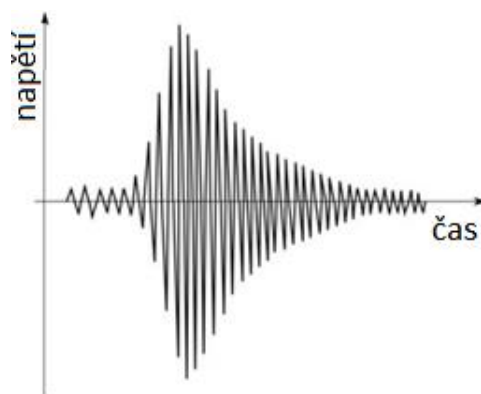


Obr. 2.3.3. Vztah mezi průměrnou frekvencí a hodnotou RA pro klasifikaci trhlín (Ohtsu, 2007)

## Typy signálů akustické emise

Nespojitý (impulzní) signál AE je vyvolán časově oddělenými událostmi, trvajících od několika nanosekund do jednotek milisekund. Spektrum impulsu je teoreticky frekvenčně velmi široké a signál je obvykle typu tlumených kmitů viz Obr. 2.3.4. Typickým zdrojem nespojitě AE je aktivní, tj. měnící se trhlina v materiálu. Při zpracování nespojitě (impulzního) signálu AE, tj. elektrického signálu vyvolaného akustickou emisí na senzoru signálu, se často vyhodnocuje (Kreidl, 2006; Grosse, 2008):

- četnost nespojitě emise, tj. počet událostí AE za časový interval
- počet překmitů nebo četnost překmitů přes zvolenou prahovou úroveň
- čas prvního překročení prahu (čas příchodu)
- maximální hodnota signálu
- doba trvání události
- doba náběhu definovaná jako doba od překročení prahové úrovně do dosažení maximální amplitudy signálu
- amplitudové spektrum signálu
- deformace tvaru impulsu pomocí časově-frekvenčního popisu
- energie impulsu

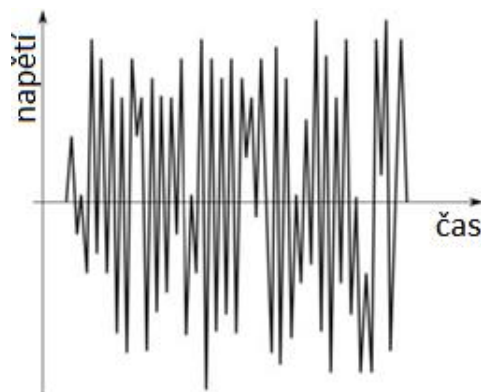


Obr. 2.3.4: Nespojitá (impulzní) akustická emise (Kreidl, 2006)

Spojité signál AE je tvořen událostmi, které nelze časově oddělit, a může být generován řadou fyzikálních jevů viz Obr. 2.3.5. Obecně lze říci, že spojitá AE je vlastně sada nespojitých signálů AE, kterou nelze od sebe, vlivem obrovské četnosti událostí, oddělit. Při spojitě akustické emisi se vyhodnocuje obvykle za jednotku času (Kreidl, 2006):

- střední hodnota, efektivní hodnota, maximální hodnota
- amplitudová distribuční funkce
- standardní odchylka, rozptyl, momenty vyšších řádů
- histogram amplitud

- spektrální hustota výkonu
- četnost překmitů přes prahovou úroveň
- energie AE



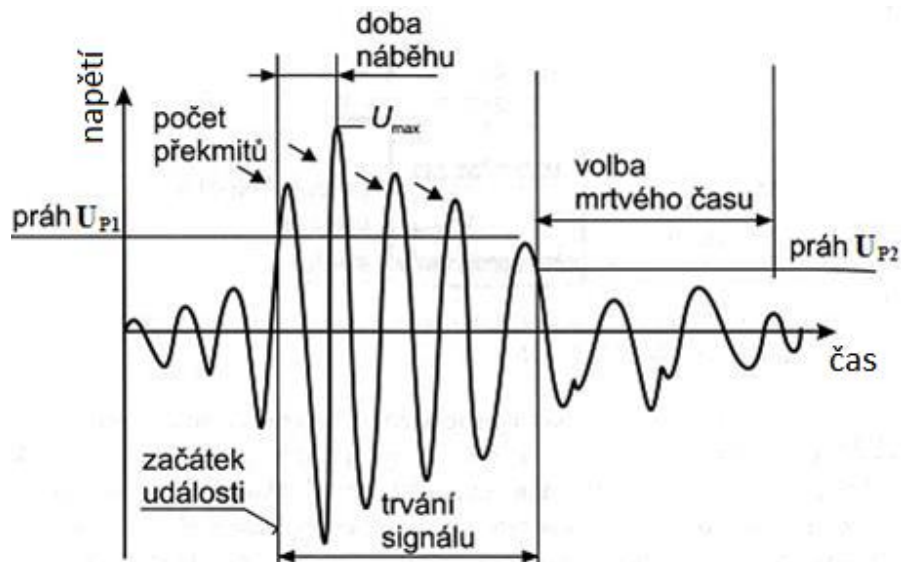
Obr. 2.3.5: Spojitá akustická emise (Kreidl, 2006)

Vyhodnocení četnosti překmitů přes prahovou úroveň se provádí za určitý předem stanovený časový interval. Prahová úroveň napětí je buď pevně stanovená nebo plovoucí. Plovoucí prahová úroveň napětí může být automaticky nastavována podle úrovně šumu v signálu nebo podle střední hodnoty signálu. Je-li diagnostikování akustickou emisí prováděno za proměnných provozních podmínek, lze automatickým nastavováním prahové úrovně dosáhnout podstatně menší závislosti naměřených hodnot na provozu. Při pevně nastavené prahové úrovni je nutno srovnávací měření vždy realizovat za stejných podmínek jak provozních, tak i okolního prostředí (teploty aj.) (Kreidl, 2006; Sikorski, 2013).

### **Měřené parametry nespojitého signálu akustické emise**

Cílem parametrického popisu jednotlivých událostí AE je detekování emisního zdroje a získání co možná nejvíce informací o průběhu signálu AE. Používané měřicí systémy, které zaznamenávají průběhy signálů AE, musí nějakým rozumným způsobem zaznamenat načtená data. Pravidlem bývá, že jsou průběhy událostí AE popsány základními parametry, a to proto že zaznamenání parametrů je nenáročné na paměť toho daného systému. Při ukládání celých průběhů je využití paměti několikanásobně vyšší (Ohtsu, 2015).





Obr. 2.3.6: Parametry nespojitého impulsního signálu akustické emise (Kreidl, 2006)

Norma EN 1330-9 definuje následující parametry signálu AE:

- **hit** – detekce jednoho nespojitého signálu (Obr. 2.3.6) na jednom kanálu AE;
- **práh detekce akustické emise** – úroveň napětí ( $U_{P1}$ ), která musí být překročena pro detekci nespojitého signálu;
- **čas příchodu** – čas kdy nespojitý signál poprvé překročí čas detekce;
- **doba trvání** – časový rozdíl mezi prvními a posledním překročením prahu detekce nespojitým signálem
- **počet překmitů** – počet překmitů nespojitého signálu, který překročí prah detekce v jedné polaritě
- **maximální amplituda** – maximální odchylka napětí během doby trvání nespojitého signálu
- **doba náběhu** – časový rozdíl mezi prvním překročením prahu a maximální amplitudou nespojitého signálu
- **energie** – kvadratický integrál napětí signálu AE během trvání nespojitého signálu; určuje se dle (Sagar, 2009):

$$AE\text{energie}_i = \int_{t_0}^{t_1} V_i(t)^2 dt, \quad (\text{Rce 2.3.1})$$

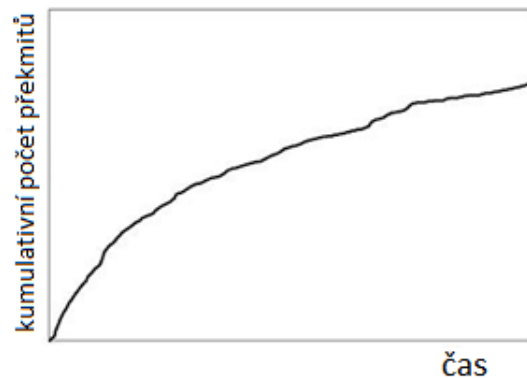
kde  $t_0$  čas příchodu signálu,  $t_1$  čas konce signálu,  $V_i$  okamžitá hodnota amplitudy.

Každá emisní událost má přiřazeny výše uvedené parametry, které ji popisují. Základním způsobem popisu je počet emisních událostí v závislosti na čase (Pollock, 1988). Kromě těchto parametrů je vhodné současně s jednotlivými událostmi AE

zaznamenat hodnoty dalších významných parametrů, popřípadě fyzikálních veličin, které odpovídají vyvolanému vnitřnímu napětí či stresu (např. síla, teplota apod.).

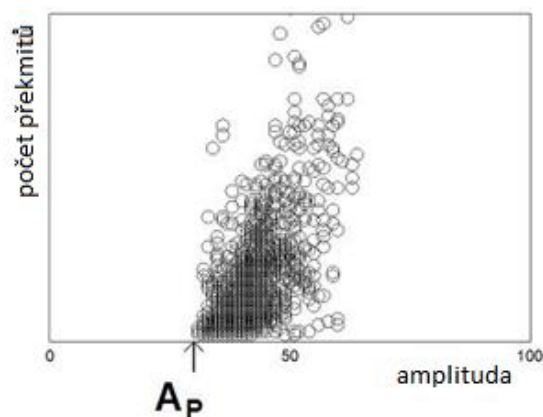
### Hodnocení parametrů

Hodnocení parametrů událostí může být průběžné, nebo k němu lze přistoupit až následně po experimentu. V prvním případě je nutné znát chování parametrů akustické emise, resp. vzorků. Druhý případ je obvyklejší, kdy po skončení měření následuje rozbor a analýza zaznamenaného signálu a případně parametrů popisujících signál. Pro vyhodnocení akustické emise se používají grafická zobrazení historie, kde jsou zobrazeny chronologicky stavy vybraných parametrů při měření. Často bývá nezávislým parametrem fyzikální veličina (čas, zatěžovací síla, teplota atd.) a závislou veličinou parametr akustické emise (počty emisních překmitů, amplituda apod.). Celková aktivita AE od počátku je často zobrazována jako kumulativní hodnota parametru viz Obr. 2.3.7.



Obr. 2.3.7: Grafické zobrazení časové historie kumulativního počtu překmitů (Pollock, 1988)

Graf korelačních závislostí ukazuje statistickou korelaci mezi dvěma veličinami akustické emise (Obr. 2.3.8). Z jejich průběhu lze usuzovat např. na odlišné zdroje akustické emise, nebo na případné „falešné“ signály.



Obr. 2.3.8: Zobrazení korelační závislosti počtu překmitů ( $N$ ) a amplitudy ( $A$ ) ( $A_p$  je prahová amplituda) (Pollock, 1988)

### Zařízení a příslušenství pro monitorování signálů akustické emise

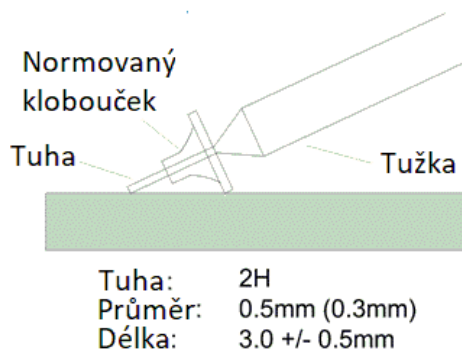
Snímače jsou základním prvkem při detekci AE. Jejich spolehlivost a správná funkčnost hraje významnou roli. Umísťují se na povrch zkoušeného tělesa, kde snímají výchylku povrchu. Tuto výchylku transformují na elektrický signál, který se dále zpracovává. Typy snímačů se dělí podle principu jejich konstrukce. Nejvýznamnějším typem je piezoelektrický snímač, ale mohou být i např. kapacitní, elektromagnetické, piezorezistivní, fotoakustické nebo elektroakustické atd. Charakteristiky a citlivosti jednotlivých typů se samozřejmě liší. Při výběru snímače by se měl brát ohled na kritéria jako je velikost snímací plochy, frekvenční charakteristika (většinou se pohybuje mezi 30kHz až 1MHz) a také citlivost (Scott, 1991).

Pro srovnávání výsledků měření musí být u snímače jednoznačná závislost mezi vstupní veličinou (výchylkou povrchu) a výstupní veličinou (nábojem v piezoelektrickém snímači). Proto musí být snímač kalibrován. Snímač AE převádí elastické vlny z povrchu na elektrický signál. Vlastnosti snímače se tedy definují jako poměr elektrické odezvy výstupního signálu ke vstupnímu mechanickému buzení. Cílem kalibrace je tedy určit pomocí definovaného mechanického buzení (Hsu-Nielsenův zdroj) parametry výstupního elektrického signálu (Miller, 2005).

#### Hsu-Nielsenův zdroj (pentest)

Zařízení je pomůckou pro simulaci události AE s použitím lomu grafitové tuhy o tvrdosti 2H za normových podmínek. Tato zkouška (viz Obr. 2.3.9) spočívá ve zlomení tuhy o průměru 0,5 mm a délce přibližně 3 mm od její špičky stisknutím na povrchu zkoušeného vzorku. Tento lom generuje intenzivní akustický signál, který je podobný přírodnímu zdroji AE, kdy jej snímače AE detekují jako silnou událost AE. Účel tohoto testu je dvojitý. Za prvé zajistí, že snímače jsou v dobrém akustickém kontaktu s kontrolovanou částí vzorku nebo konstrukce. Za druhé, kontroluje správnost nastavení přístrojů a umístění snímačů AE. Tento účel zahrnuje také nepřímé určení

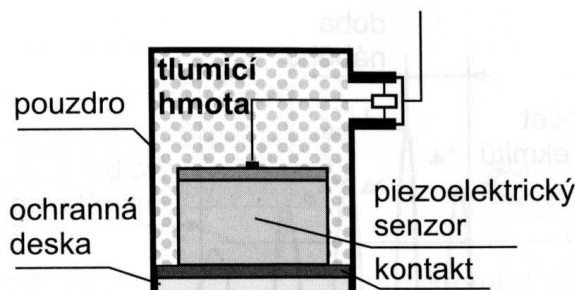
skutečné hodnoty akustické vlnové rychlosti pro sledovaný vzorek či konstrukci (Sause, 2011).



Obr. 2.3.9: Hsu-Nielsenův zdroj (www.ndt.net, 2017)

(Bucur, 2006) popsal hlavní typy snímačů AE:

- a. **Piezoelektrické snímače** se používají pro laboratorní zkoušky a pro testování in situ. Aktivní piezoelektrické komponenty se obvykle vyrábějí z piezoelektrické keramiky<sup>1</sup> (PZT). Hlavním prvkem senzoru, resp. převodníku signálu AE je piezoelektrický prvek viz Obr. 2.3.10. Kovový prvek vhodného rozměru je umístěn v kovovém pouzdře, který je stíněný elektrostatičticky a mechanicky chráněn. Snímač AE je umístěn, pokud je to možné, v přímém kontaktu se vzorkem nebo konstrukcí.



Obr. 2.3.10: Uspořádání piezoelektrického snímače akustické emise bez zabudovaného předzesilovače (Kreidl, 2006)

- b. **Kapacitní snímače** se doporučuje používat pro kvantitativní analýzu, protože mají rovnoměrnou citlivost v širokém frekvenčním pásmu. Díky své jemné konstrukci se používají i pro kalibrační účely. U těchto snímačů elektrický signál kopíruje dynamické vychýlení povrchu. Použití v průmyslových podmínkách je však problematické, protože jejich citlivost bývá nižší, než u piezoelektrických snímačů. Snímač zaznamenává normálovou složku

<sup>1</sup> V současné době se používají materiály na bázi tuhých roztoků zirkoničitanu olovnatého a titaničitanu olovnatého s přidavkem Sr, Ba, Ca, Bi, Sb, W, ... Většina průmyslově vyráběných látek se vyrábí s předem známým účelem použití.

povrchové vlny na povrchu tělesa, kde známe směr šíření. Šířka snímaného pásma je v rozsahu od 10 kHz až do 1 MHz (Breckenridge, 1981).

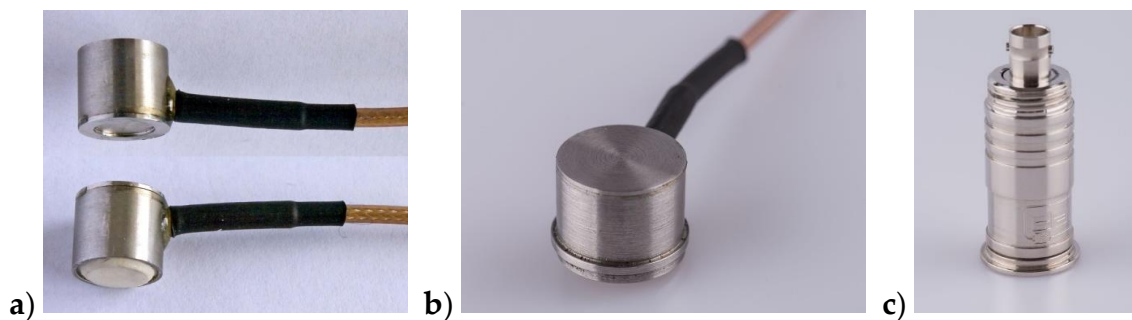
- c. **Elektromagneto-akustické snímače** – jsou to bezkontaktní snímače AE (EMAT). Jejich princip pracuje na mechanických kmitech částic materiálu ve stálém magnetickém poli. V materiálu vytvářejí střídavý proud, který indukuje proud v cívce sondy. Jejich další funkcí může být i samotné buzení. Při použití nemagnetického materiálu je jediným zdrojem kmitů Lorentzova síla. Při magnetickém materiálu je zdrojem (včetně Lorentzovy síly) i magnetostrikčních jevů<sup>2</sup> (Kořakowski, 2011).
- d. Do skupiny **optických snímačů** patří laserová interferometrie. Tento typ generuje vysokofrekvenční signál za pomoci Braggovy mřížky. Paprsek helium-neónového laseru se namíří na pohybující se povrch sledovaného vzorku či konstrukce a odráží se zpět do snímače. Díky Dopplerovu jevu se generuje frekvenční nebo fázová modulace laseru z výchylky povrchu objektu. Výhodou je zejména snadná kalibrace snímače a reprodukovatelnost. Nevýhodou jsou zvláště vysoké pořizovací náklady (Enoki, 2000).

Širokopásmové snímače AE (Obr. 2.3.11) mají rovnoměrnou frekvenční charakteristiku v širokém spektru frekvencí. Rezonanční snímače AE mají v charakteristice jeden dominantní vrchol, v jehož blízkém okolí je jejich citlivost největší. Frekvenční spektra, kde se vyskytují vyšší frekvence, se budou tlumit rychleji, proto vytvořené vlnění může být detekováno pouze u zdroje. Šum v pozadí, například z externích zdrojů (např. přibližující se kamiony, vzduchové hadice apod.) mají nižší frekvence, proto je rezonanční frekvence snímače zvolena tak, aby poskytovala maximální citlivost bez šumu pozadí. V betonu se používají nízkofrekvenční snímače (s rezonanční frekvencí 60 kHz), protože nehomogenita betonu zeslabuje signál (a také šum v pozadí) rychleji než homogenní materiály. U některých kovových aplikací, jako jsou jaderné reaktory, se používají snímače s rezonanční frekvencí 300 kHz kvůli vysokému hluku pozadí z reaktoru. V kompozitech se obvykle používají rezonanční snímače o frekvenci 100–200 kHz.

Piezoelektrický materiál ve snímači AE přeměňuje signál na napětí. Vzhledem k tomu, že velikost napětí je velmi malá, je potřeba použít předzesilovač (Obr. 2.3.12) pro zesílení napětí do vhodnějšího rozsahu. Některé snímače AE jsou vybaveny vnitřním předzesilovačem viz Obr. 2.3.11 c). Akustické předzesilovače mají obvykle frekvenční odezvu mezi 20 kHz a 2 MHz a obecně mají přednastavený zisk v intervalu 30–60 dB. Zesílený signál AE se pak přenáší do zařízení pro sběr dat pomocí vhodného kabelu.

---

<sup>2</sup> Princip magnetostrikce spočívá v tom, že těleso vyrobené z feromagnetického materiálu změní v magnetickém poli svoje rozměry. Princip magnetostrikce de facto vychází ze dvou dalších fyzikálních jevů – z takzvaného Wiedermanna jevu a z Vilariho jevu.



Obr. 2.3.11: Ukázky typů snímačů používaných v této práci od firmy DAKEL  
 a) typ IDK-09; b) typ MDK13 c) MTPA-15 s integrovaným předzesilovačem  
 (www.dakel.cz, 2017)

Zařízení pro sběr dat může dál signál filtrovat (eliminovat nežádoucí signály nebo frekvence), nebo signály opět zesilovat. Zařízení tyto signály může zaznamenávat a popřípadě organizovat. Software v zařízení pro získávání dat je schopen okamžitě zaznamenat grafy a analyzovat data v reálném čase, což je užitečné pro pochopení toho, co se děje během testu.



Obr. 2.3.12: Předzesilovače se zesílením 35 dB (www.dakel.cz, 2017)

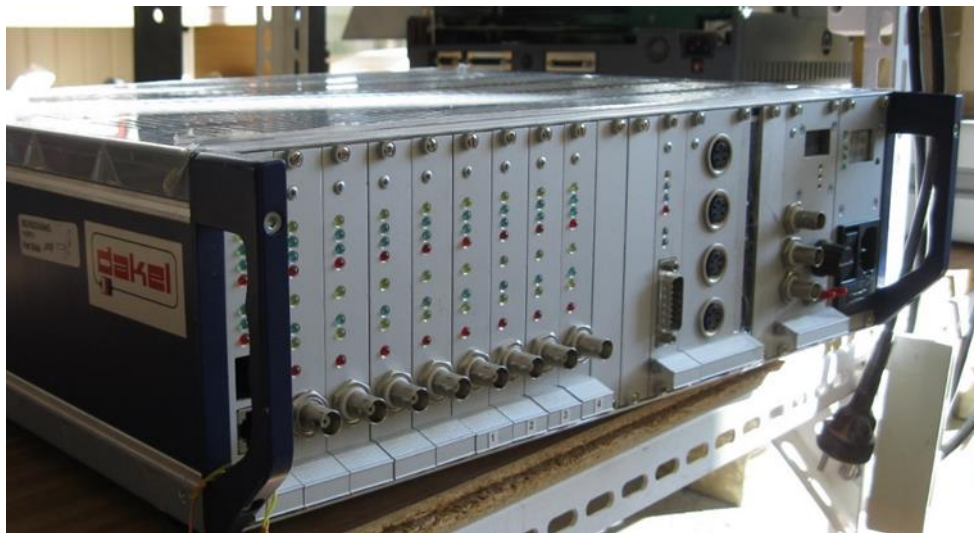
Snímače akustických vln by měly být vždy umístěny přímo na měřeném vzorku či konstrukci. To však není vždy možné. Důvodem je možná nedostupnost sledované součásti z hlediska konstrukce nebo příliš vysoká teplota povrchu, která by vedla k poškození snímače. V takových případech se používají akustické vlnovody viz. Obr. 2.3.13. Rozdělují se na rozebíratelné vlnovody a na vlnovody trvale instalovány na snímači. Například snímač s integrovaným vlnovodem, který slouží k zmenšení dotyku snímače s povrchem součásti. Používá se při malých objektech, kde by velká plocha dotyku způsobovala zhoršování přenášeného signálu. Materiál, ze kterého je vlnovod vyroben, závisí na materiálu pozorované součásti. Oba musí mít stejnou akustickou vodivost z důvodu minimalizace odrazů vlnění a lepšího přechodu vlny z objektu na vlnovod, a potom na snímač. Změna průměru vlnovodu na průměr snímače bývá často řešena kuželovitým zakončením vlnovodu. Velkou nevýhodou je

však ztráta velikosti výsledného signálu. Příčinou je ztráta na přechodu rozhraní a útlum signálu v materiálu. Při snímání vlnovodem jsou rozhraní dvě. Jedno mezi povrchem zkoušeného tělesa a vlnovodem, a druhé mezi vlnovodem a snímačem (Černý, 2008).



Obr. 2.3.13: Ukázka akustických vlnovodů

Během zaznamenání a zpracování signálů AE v rámci této práce byl použit systém Dakel XEDO. Univerzální měřicí a diagnostický systém DAKEL-XEDO® (viz Obr. 2.3.14) byl vyvinut firmou ZD Rpety-Dakel, jejíž produkty jsou již mnoho let úspěšně používány např. v jaderných elektrárnách Jaslovské Bohunice a Mochovce. Systém XEDO byl navržen především pro průmyslové použití, ale již během zkušebních testů (např. v Ústavu termomechaniky AV ČR) se dobře osvědčil i při laboratorních měřeních.



Obr. 2.3.14: Univerzální měřicí a diagnostický systém DAKEL-XEDO©

#### Oblasti použití:

- Veškeré aplikace měření fyzikálních veličin a zpracování měřených dat na počítači. Systém byl navržen tak, aby bylo velmi jednoduše možné připojit k jednomu počítači až několik desítek na samotném počítači nezávislých měřících modulů, a tak centrálně monitorovat stavy i velmi rozsáhlých objektů.

- Měření a digitální zpracování signálů AE. Vyhodnocování AE se běžně používá v oblastech nedestruktivního testování materiálů a jiných diagnostických oborech.

## 2.4 Metoda Impact-echo

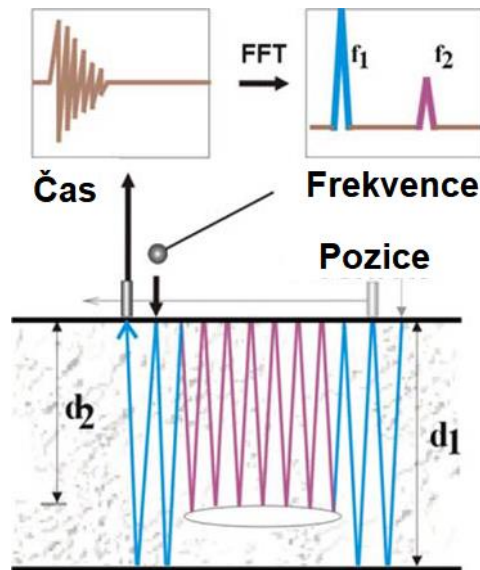
Základy této metody se datují od 2. poloviny 80. let 20. století, kdy byla vynalezena v USA v National Bureau of Standards (NBS) (1983-86) a následně vyvinuta na Cornell Universitě, v Ithace v New Yorku (1987 – současnost) (Sansalone, 1998). Metoda Impact-echo, často nazývaná také jako „nepřímá“ akustická emise, využívá vnějšího zdroje akustického signálu. Setkáme se rovněž s pojmem kladívková metoda, kdy budícím signálem je úder kladívka, či pád ocelové kuličky. Jedná se o metodu odezvy, kdy sledujeme parametry signálu transformovaného průchodem materiálem a sejmutého z povrchu zkoumaného vzorku (Kopec, 2008; Mazal, 2009).

Postup tradičního testu metodou Impact-echo je popsán (Carino, 1986a; Carino, 1986b; Sansalone, 1997) a je uveden na Obr. 2.4.1. Metoda Impact-echo je založena na analýze odezvy mechanického impulsu, který vybudí ve zkoumaném prvku harmonické vlnění na vlastní frekvenci a na vyšších harmonických frekvencích. Tyto frekvence závisejí především na rozměrech a materiálových charakteristikách zkoušeného prvku. Přechodový napěťový impuls přivedený na povrch vyvolá v materiálu elastické vlnění, které se dále šíří materiálem kulovými vlnoplochami jako podélné a příčné vlny a je superponováno odraženými vlnami od vnějších povrchů a také od vnitřních vad (nespojností, nehomogenit, dutin, mikro i makro trhlin atd.). Na povrchu vzorku se tyto vlny transformují na povrchové vlny, nazývané také jako Rayleighovy, popř. Lambovy vlny, které jsou následně snímány a dále vyhodnocovány. Snímaná odezva vypovídá o výskytu strukturních vad, avšak blíže neurčuje, o jaký druh defektu se jedná, ani jeho tvar či velikost (Kořenská, 2006).

U echo metod může být zdrojem napěťového impulsu přivedeného na povrch zkoušeného vzorku mechanický ráz, nebo také generovaný signál, který je vyslán do budiče. Pokud je k testování využito mechanického impulsu, tak mluvíme o metodě Impact-echo, a pokud je k vybuzení mechanického vlnění použit generovaný signál, tak mluvíme o tzv. Puls-echo metodě (Sansalone, 1998). Generovaný signál může mít pulzní charakter nebo se může jednat o spojitý šum či harmonický signál (Mazal, 2009). Ultrazvuková metoda je tedy v podstatě také Impact-echo metodou. Ultrazvuková metoda je propracovanější metodou zejména na kovech.

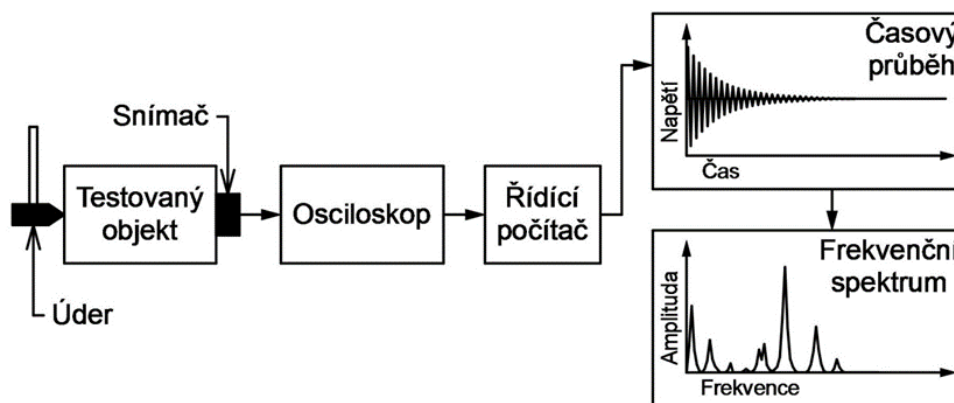
Pro vybuzení mechanického vlnění na povrchu zkoumaného prvku se nejčastěji využívá mechanický impuls. Tento ráz má za následek vznik nízkofrekvenční napěťové vlny (až do 80 kHz), která se dále šíří strukturou materiálu a odráží se od vad a vnějších povrchů.





Obr. 2.4.1: Schématické znázornění použití metody Impact-echo (Schubert, 2008)

Mnohonásobný odraz podélné vlny způsobuje přechodnou rezonanci uvnitř struktury. Výsledná odezva ve formě povrchových vln je snímána piezoelektrickými snímači, které zaznamenávají výsledné povrchové posunutí. Takto zaznamenaný signál je následně digitalizován a uložen pomocí systému pro sběr dat a řídicím počítačem je dále zpracován a vyhodnocen (Kořenská, 2006; Mazal, 2009; Sansalone, 1998).



Obr. 2.4.2 Blokové schéma měřící aparatury metody Impact-echo

Vyhodnocení signálů odezvy zkoumaného prvku na budící impuls může být prováděno ve dvou základních systémech analýzy. V prvním případě vyhodnocujeme výsledné posunutí v závislosti na čase a ve druhém případě jsou signály převedeny do frekvenční oblasti a je provedena frekvenční analýza.

V interpretaci časových realizací zaznamenaného signálu můžeme pomocí známé rychlosti šíření podélných vln v testovaném materiálu a z časového posunu mezi budícím pulsem a příchodem první odražené vlny stanovit vzdálenost povrchu, na kterém se podélná vlna odrazila (Kořenská, 2006). Díky tomu, že v struktuře materiálu dochází k přechodné rezistenci, má skutečný průběh křivky tvar sinusoidy, nebo je

kombinací sinusových vln. Z tohoto časového průběhu zjišťujeme také např. útlum příchozího signálu.

Mnohem častěji je však využíváno frekvenční analýzy, kdy je pomocí Fourierovy transformace, nejčastěji pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier Transform), zkoumaný signál převeden z oblasti časové do oblasti frekvenční. Fourierova transformace je definována pro spojitou funkci následujícími rovnicemi (Uhlíř, 1995). Pro přímou transformaci podle (Randall, 1987) platí vztah:

$$X(f) = k_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{Rce 2.4.1})$$

a pro zpětnou transformaci pak vztah:

$$x(t) = k_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (\text{Rce 2.4.2})$$

kde  $f$  je frekvence,  $t$  čas,  $x(t)$  signál v časové oblasti a  $X(f)$  jeho reprezentace ve frekvenční oblasti,  $k_1$  a  $k_2$  jsou konstanty. V praxi se vyskytují nejčastěji dva druhy zápisů Fourierovy transformace, resp. v jednom se používá jako proměnná frekvence ( $f$ ), zatímco v druhém kruhové frekvence ( $\omega$ ), které jsou určeny vztahem  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ . Při této variantě se samozřejmě změní i koeficienty tak, že  $k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi}$  (Smutný, 2009).

Fourierova transformace rozkládá signál do množství sinusových vln různých frekvencí (Mazal, 2009) a tak vytváří spektrum amplitud v závislosti na frekvenci. Jednotlivé píky odpovídající dominantním frekvencím vypovídají o hloubce hraničních povrchů prvku nebo také o hloubce rozhraní na povrchu trhlin a dutin či hloubce rozhraní mezi dvěma materiály různých akustických impedancí. Hloubku defektů či tloušťku prvku lze následně určit z rovnice:

$$d = \frac{C}{2 \cdot f} \quad (\text{Rce 2.4.3})$$

kde  $d$  je hloubka rozhraní, od kterého jsou napěťové vlny odrazeny, což může být hloubka vad nebo tloušťka zkoumané konstrukce,  $C$  je známá rychlost šíření vln v daném materiálu konstrukce,  $f$  je dominantní frekvence signálu. Rychlost šíření vlny  $C$  lze odvodit dvěma způsoby, buď z doby průchodu vlny mezi dvěma snímači materiálem známé tloušťky, nebo z testu Impact-echo provedeném na prvku z pevné

látky známých rozměrů, kdy určíme dominantní frekvenci  $f$ , upravíme rovnici na tvar (www.impact-echo.com, 2017):

$$C = 2 \cdot d \cdot f \quad (\text{Rce 2.4.4})$$

kde  $d$  je v tomto případě známá tloušťka zkoumaného materiálu.

Zjišťování materiálových vlastností zkoumaných vzorků se zakládá především na porovnávání testovaných prvků se srovnávacím etalonem známých materiálových vlastností. Jedná se o srovnání „dobrých“ a „špatných“ vzorků, kdy je nutná znalost parametrů „dobrých“ prvků (etalonů). Porovnáváme patrné rozdíly ve frekvenčním spektru nebo také rozdíly mezi jednotlivými křivkami časového průběhu signálu. Nejčastěji jsou Impact-echo testy vyhodnocovány ve frekvenční doméně, kdy lze tyto rozdíly jednoduše a rychle analyzovat (Kořenská, 2006).

### **Zařízení a příslušenství pro použití metody Impact-echo**

Za účelem generování signálu bylo použito kladívko, které je zavěšené na konstrukci a díky této konstrukci dopadá na vzorky ze stejné výšky, což zaručuje přibližně stejný generovaný signál viz Obr.2.4.3. Impuls se odráží na povrchu, ale také mikrotrhlinami a vadami zkoumaného vzorku. Signály ze vzorku byly zachycovány piezoelektrickým snímačem typu MIDI (malý snímač i budič, celokovové pouzdro s nízkou hodnotou šumu a vyšší mechanickou odolností; průměr 6 mm, výška 6,3 mm; dotyková plocha z nerezové oceli; PZT třída 200).



Obr. 2.4.3: Kladívko zavěšené na konstrukci

Během zaznamenání a zpracování signálů z metody Impact-echo v rámci této práce byl použit USB osciloskop Handyscope HS3 (viz Obr. 2.4.4). Handyscope HS3 je

výkonný 100 MS/s USB osciloskop, který lze použít i jako multimetr, spektrální analyzátor, záznamník dat nebo protokolový analyzátor. Tento USB osciloskop také obsahuje generátor funkcí / libovolných tvarů vln, který je schopen produkovat každý potřebný signál. Spolu s 2 měřicími kanály je tento osciloskop vynikajícím nástrojem pro měření elektrických obvodů (www.tiepie.com, 2017).



Obr. 2.4.4: USB osciloskop Handyscope HS3 (www.tiepie.com, 2017)

### Oblasti použití

Mezi základní aplikace této metody patří určení tloušťky konstrukcí. Impact-echo je využívána především k měření tloušťky betonových desek, a to s větší přesností než tři procenta. Americká společnost pro testování materiálů – ASTM (American Society of Testing Materials) vydala v roce 1998 normu s názvem „ASTM C1383 – 98a Standard Test Method for Measuring the P Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact Echo Method“, která zahrnuje postupy pro stanovení tloušťky betonových desek, dlažby, mostovek, stěn nebo jiných deskových prvků pomocí metody Impact-echo. Tato metoda byla v roce 2010 nahrazena platnou normou ASTM C1383 - 04(2010) (www.impact-echo, 2017).

Metoda Impact-echo může být také použita pro testování nehomogenit ve vnitřní struktuře, zjišťování trhlin a dutin, či určování hloubky a směru povrchově otevřených trhlin. Touto metodou jsou zjištěitelné vady ve struktuře betonových, železobetonových a předpjatých konstrukcí, ale také ve struktuře zdiva, kde jsou cihelné bloky vázány maltou. Tato metoda byla úspěšně použita k nalezení dutin v injektážní směsi u mnoha typů dodatečně předpjatých konstrukcí (www.impact-echo.com, 2017). Další uplatnění nachází také v testování integrity spojů jednotlivých prvků konstrukce.

K dalším možnostem aplikace této metody patří určování polohy a stavu ocelové výztuže v železobetonových konstrukcích, kdy jsou monitorovány změny vnitřní struktury v důsledku postupující koroze výztuže (Kořenská, 2006).

Metoda Impact-echo je úspěšně využívána především jako metoda průběžné kontroly kvality konstrukcí a monitorování postupného vývoje vad vnitřní struktury materiálu.

Její důležité využití je v prevenci a v následném včasném zásahu při podezření na závažné problémy konstrukce. Při vhodném použití může mít za následek úsporu nákladů na opravy a rekonstrukce staveb ([www.impact-echo.com](http://www.impact-echo.com), 2017).

### 3. VYBRANÉ APLIKACE PŘI POUŽITÍ NA STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

#### 3.1 Tuhnutí, tvrdnutí a zrání

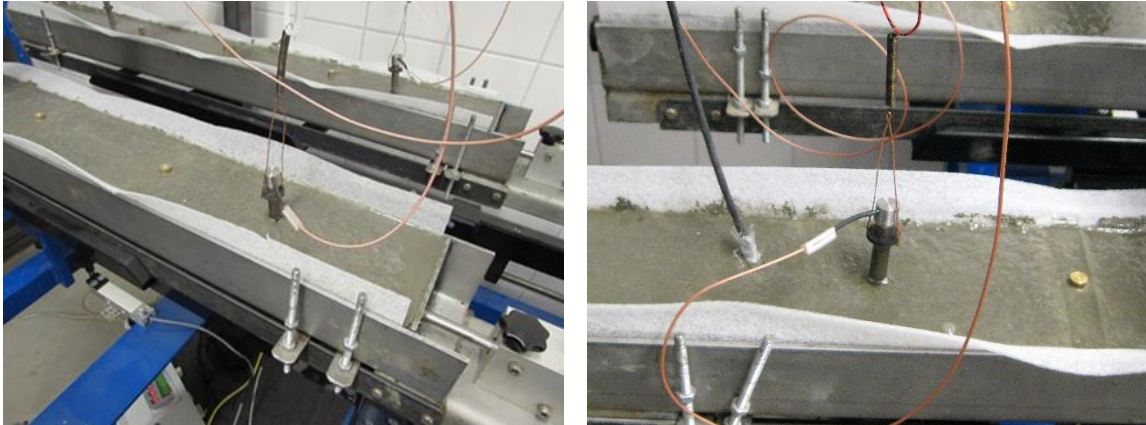
##### Jemnozrný cementový kompozit – metoda akustické emise

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“. Cílem provedených experimentů bylo porovnat parametry signálů akustické emise v rané fázi tuhnutí a vytvrzování jemnozrných cementových kompozitů, které se značně liší ve vývoji hydratačního tepla a v procesu a vývoji smršťování. Za tímto účelem byly vyrobeny dva jemnozrné cementové kompozity (označeny jako A a B), každý s jiným vodním součinitelem a obsahem superplastifikátoru. Směs byla připravena podle ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu. Směs A byla vyrobena z křemičitého písku o frakci 0-2 mm, CEM I 42,5 R Portlandský cement (Cementárna Mokrý, Brno, Česká republika) a vody. Přísady byly smíchány v poměru 3: 1: 0,46. Složení směsi B bylo modifikováno přidáním superplastifikátoru Sika Viscocrete SVC 4035 na bázi polykarboxylátu (Sika Group, Brno, Česká republika), který kromě jiného snížil vodní součinitel na hodnotu 0,35. Ostatní složky byly stejné. Tab. 3.1.1 ukazuje složení jednotlivých směsí (Topolář, 2017a).

Tab. 3.1.1: Složení jednotlivých směsí (Topolář, 2017a)

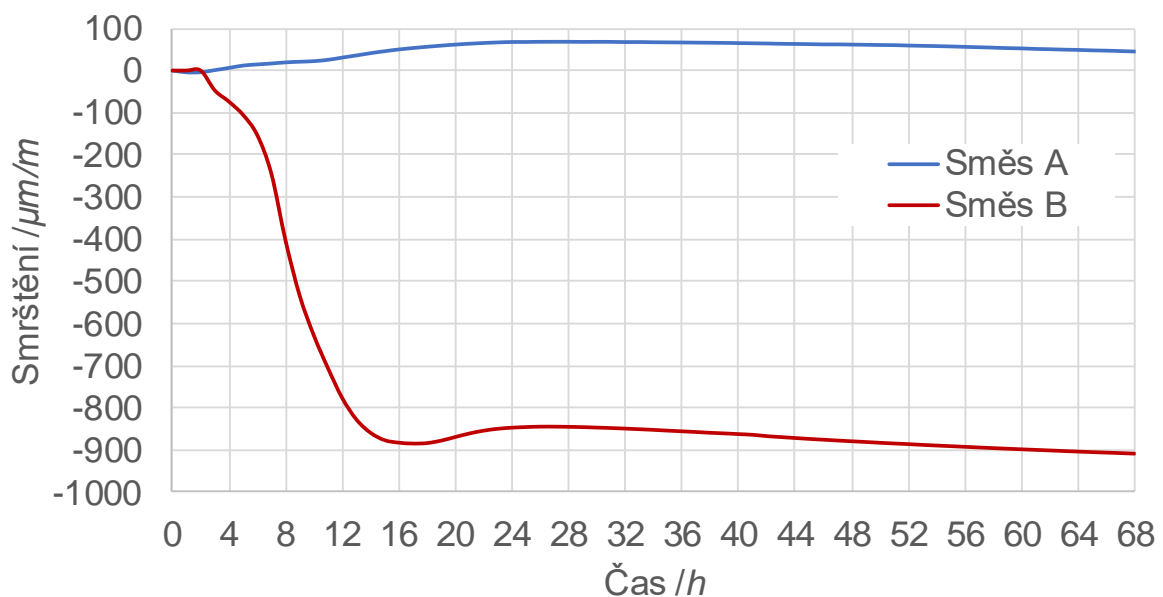
Složka	Jednotka	Označení	
		Směs A	Směs B
písek	díly	3	3
CEM I 42,5 R	díly	1	1
vodní součinitel	–	0,46	0,35
superplastifikátor	% z hmotnosti cementu	–	1,0

Od každé směsi byly vyrobeny tři zkušební vzorky o délce 1000 mm a průřezu 100 mm x 60 mm. Tyto vzorky byly určeny především pro měření smršťování / nabývání. Během těchto měření byla sledována i aktivita akustické emise během rané fáze tuhnutí a tvrdnutí. Vzhledem k tomu, že k mokrému povrchu nelze snímače připevnit, byly použity akustické vlnovody, které byly vsunuty do směsi viz Obr. 3.1.1. K nim byly magneticky připevněny snímače typ MDK13.



Obr. 3.1.1: Ukázka umístění vlnodů a snímačů v čerstvé směsi

Měření AE bylo zahájeno přibližně 1 h po nalití jednotlivých čerstvých směsí do forem. V této době se čerstvé směsi chovaly jako tixotropní tekutina. Vlnodů během první hodiny byly fixovány ve stabilních pozicích, takže výsledky měření AE nebyly ovlivněny pohybem vlnodů. Celkové zesílení předzesilovače a hlavního zesilovače bylo nastaveno od 60 dB do 72 dB. Eliminace šumu byla zajištěna nastavením prahové úrovně (400 mV) a současně i filtrováním naměřených dat během vyhodnocování.



Obr. 3.1.2: Průběh smrštění během prvních 68 h od začátku měření

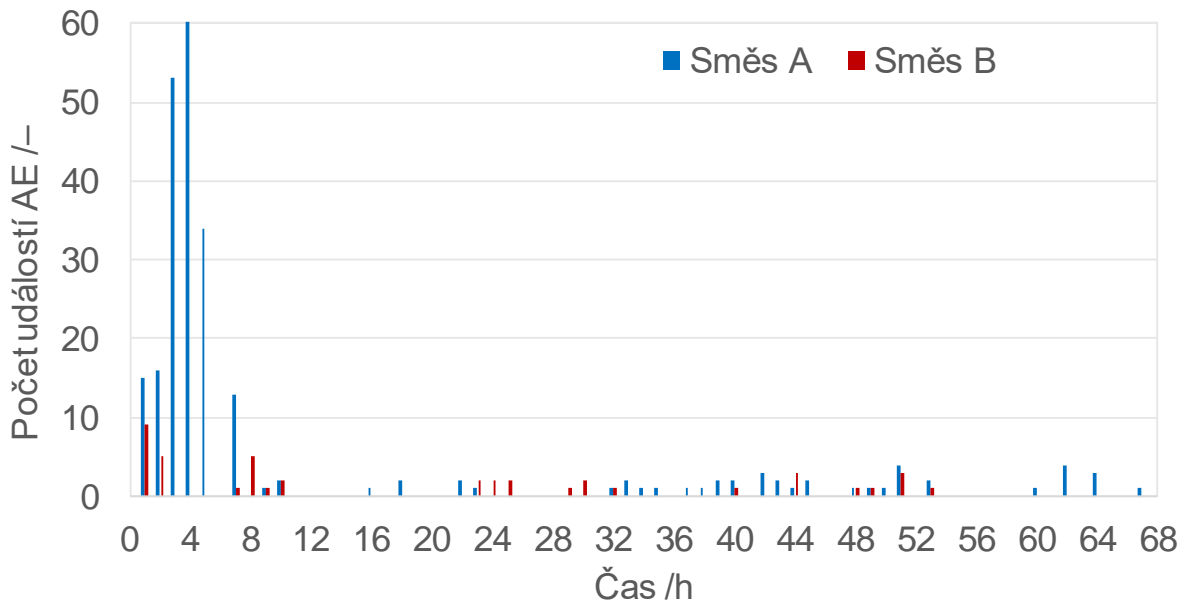
Z průběhu závislosti smrštění na čase (Obr. 3.1.2) je patrný vliv vyššího vodního součinitele u směsi A, což se projevilo nabýváním v počáteční fázi tuhnutí a tvrdnutí kompozitu. Toto počáteční nabýváním je způsobeno částečnou reabsorpcí vody, která vystoupila na povrch vzorků vlivem krvácení<sup>3</sup> čerstvé směsi (Holt, 2001). V odborné

<sup>3</sup> Nežádoucí jev, kdy uniká cement s vodou z čerstvého cementového kompozitu při jeho přepravě, nebo ukládání z bednění či formy. Obvyklou příčinou je špatný návrh složení čerstvého cementového kompozitu.

literatuře se tento jev nazývá autogenním nabýváním a je spojován právě se zvýšenou hodnotou vodního součinitele (Bentur, 2003; Marušić, 2016).

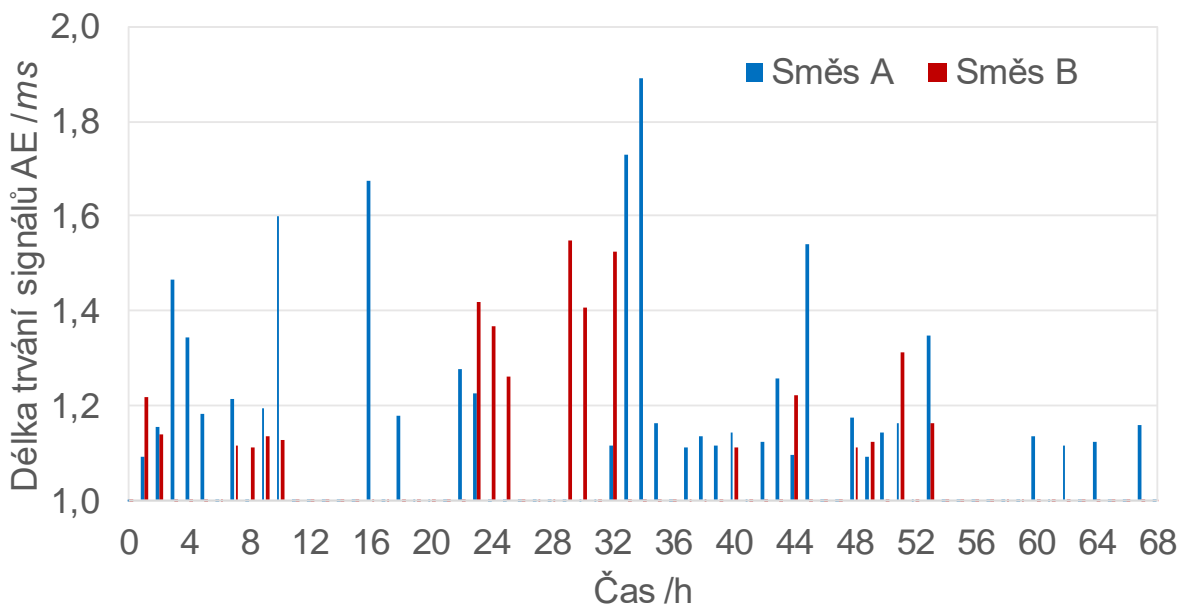
Počet událostí AE zaznamenaných u směsi A během prvních 68 h je vidět na Obr. 3.1.3. Z tohoto grafu je patrné, že většina událostí AE se vyskytuje během prvních šesti hodin tuhnutí. V této velmi rané fázi se objevuje začátek plastického nastavení, tvorba mikrostruktury (hydratační produkty) a postupné zvyšování hydratačního tepla. Zvýšená akustická aktivita směsi A bez superplastifikátoru je způsobena také počáteční resorpcí vody z povrchu zkušebních vzorků. Po této počáteční fázi, přichází do snímače po zbytek sledovaného období menší počet událostí AE. Jakmile směs A začne smršťovat (od asi 32 h), počet událostí AE opět vzroste. Lze předpokládat, že tato aktivita je způsobena vnitřním napětím vyvolaným postupným vyrovnáváním teploty mezi vzorkem a okolním prostředím (Van Den Abeele, 2009). Později zaznamenané události AE mohou být důsledkem jak tvorby struktury, tak i vznikajícími mikroporuchami. Situace se liší v případě směsi B. Přidaný superplastifikátor zpomalil nástup tuhnutí a tvrdnutí, kdy přicházející počet událostí AE je podstatně nižší v porovnání se směsí A. U směsi B nebylo pozorováno krvácení, což znamená, že nebyla znovu absorbována voda z povrchu vzorků. Většina událostí AE ve směsi byla zaznamenána během prvních dvou hodin stárnutí, což souvisí s plastickým nastavením a tvorbou počáteční mikrostruktury. Později byl zaznamenán nárůst smršťování, jehož intenzita vzrostla se stářím vzorků, společně se zvýšením vnitřní teploty vzorků. Během tohoto období bylo opět zaznamenáno vyšší množství událostí AE. V časovém intervalu od 10 do 22 h nebyly zaznamenány žádné události AE. Mezi 14 a 22 h stárnutí dosáhl vývoj smrštění stabilního stavu. Tento jev je pravděpodobně spojen s nárůstem hydratačního tepla, které během tohoto intervalu dosáhlo svého maxima. Další aktivita AE nastává kolem čtyřiašedesáté hodiny tuhnutí, kdy se zkušební vzorky začaly znovu smršťovat (Topolář, 2017a).





Obr. 3.1.3: Počet událostí AE zaznamenaných během prvních 68 h od začátku měření

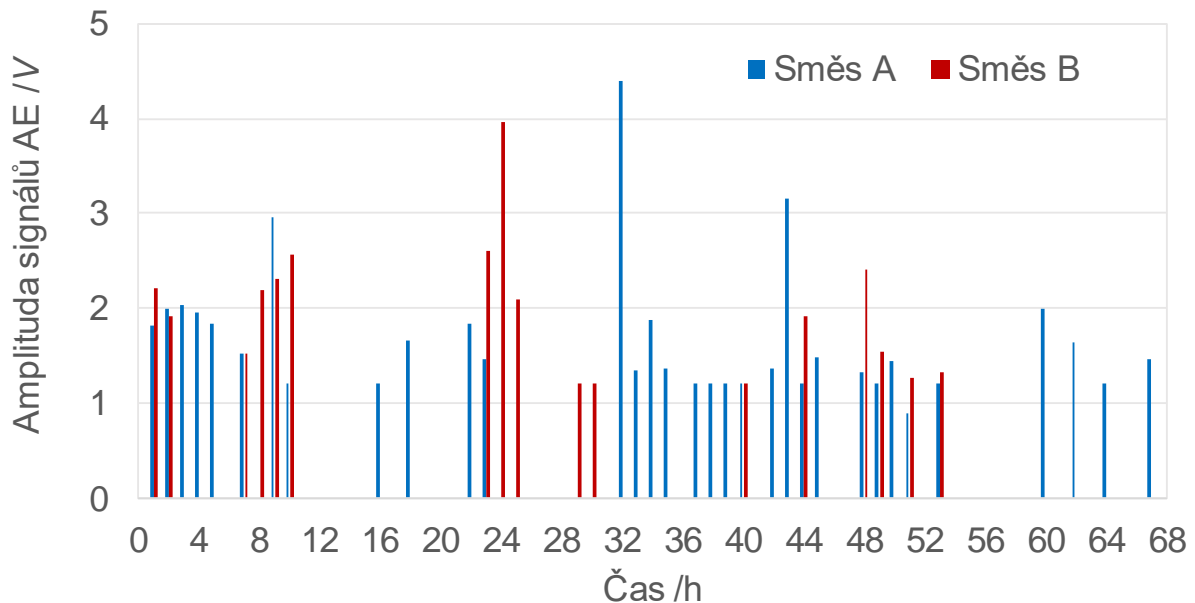
Porovnání délek trvání signálů AE během tuhnutí a tvrdnutí obou směsí je vidět na Obr. 3.1.4. Na grafu je patrné, že mezi směsí A a B jsou v tomto případě pouze malé rozdíly. V prvních 10 hodinách jsou signály ve směsi B více tlumeny, což je opět kvůli pomalejší hydrataci směsi, která je v tomto stádiu mírnější. Délka signálů směsi B je vyšší v období mezi 22-32 h, což pravděpodobně souvisí s již vytvořenou strukturou a lepší vazbou matrice než na počátku tuhnutí (Topolář, 2017a).



Obr. 3.1.4: Délka trvání signálů AE během prvních 68 h od začátku měření

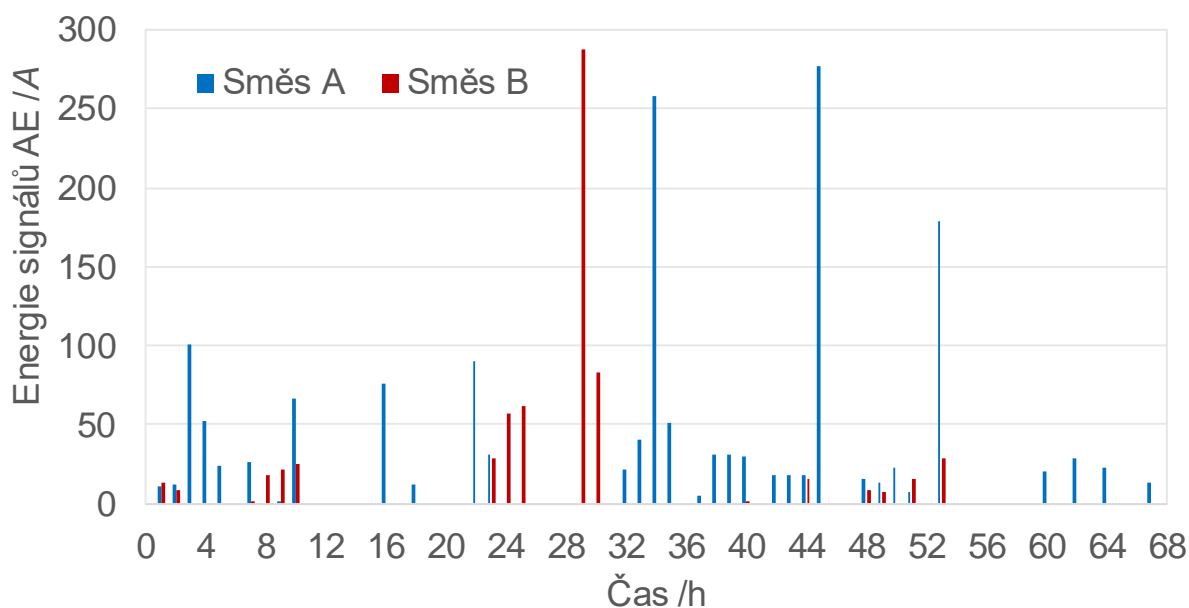
Hodnoty velikosti amplitudy signálů AE viz Obr. 3.1.5 ukazují, že po vytvoření pevné fáze (tj. v okamžiku, kdy obě směsi dosáhly konce doby tuhnutí) jsou hodnoty amplitudy vyšší u směsi B než u směsi A, zejména v době kolem čtyřiaadvacáté hodiny

tuhnutí, kdy směs B začala znovu smršťovat. Podobný efekt lze pozorovat také u směsi A přibližně ve 32. hodině tvrdnutí. Na základě zaznamenaného počtu událostí AE (viz Obr. 3.1.3) lze předpokládat, že navzdory skutečnosti, že počet událostí AE je ve směsi B nižší než ve směsi A, dochází v již vytvořené struktuře směsi B k většímu poškození materiálu (průměrná hodnota amplitudy signálů AE je u směsi B vyšší). Nejvyšší hodnoty amplitudy signálů AE jsou zjištěny v okamžiku vzniku mikrotrhliny. V případě dalšího rozevírání mikrotrhliny jsou zaznamenané signály AE většinou s malými amplitudami (Iwanami, 1997; Li, 1995).



Obr.3.1.5: Velikost amplitudy signálů AE během prvních 68 h od začátku měření

Graf na Obr. 3.1.6 znázorňuje velikost energie signálů AE uvolněných buď při vytvoření nových produktů hydratace (během tuhnutí) nebo při vytvoření vazeb struktury anebo vznikem mikrotrhlin v již vytvořené matici. Hodnoty pro směs A ukazují, že větší množství akustické energie se uvolní po asi 3–4 hodinách po odlití, což pravděpodobně souvisí s plastickým sedáním, které je spojené s reabsorpcí vody a zvýšením vnitřní teploty ve směsi. Další významné množství akustické energie se uvolní, když směs A začne smršťovat díky poklesu vnitřní teploty. Po stabilizaci vnitřní teploty se tvorba mikrotrhlin odráží ve vyšší uvolněné energii signálů AE. Ve směsi B se významná část této energie uvolní v prvních 29 h od začátku měření pravděpodobně v důsledku výše uvedených procesů. Zvláště přechod od nabývání ke smrštění způsobuje napětí v materiálu, což může následně vést k poškození již vytvořených vazeb (Topolář, 2017a).



Obr. 3.1.6: Hodnota energie signálů AE během prvních 68 h od začátku měření

Na základě výsledků prezentovaných na Obr. 3.1.3–3.1.6 lze předpokládat, že nejvýznamnější strukturální změna, v již tuhé směsi B, se objevila přibližně 24 h od začátku měření. Událost AE, která byla v tomto okamžiku zjištěna, se objevila jako puls s vysokou amplitudou s krátkou dobou trvání a nízkou energií AE. Naopak událost, která byla zaznamenána přibližně 29 h od začátku měření, naznačila rozvoj již existujícího mikroporušení (puls s nízkou amplitudou a dlouhou dobou trvání a velkou energií AE). Podobné rozdíly ve strukturálních změnách lze nalézt také u směsi A (Topolář, 2017a).

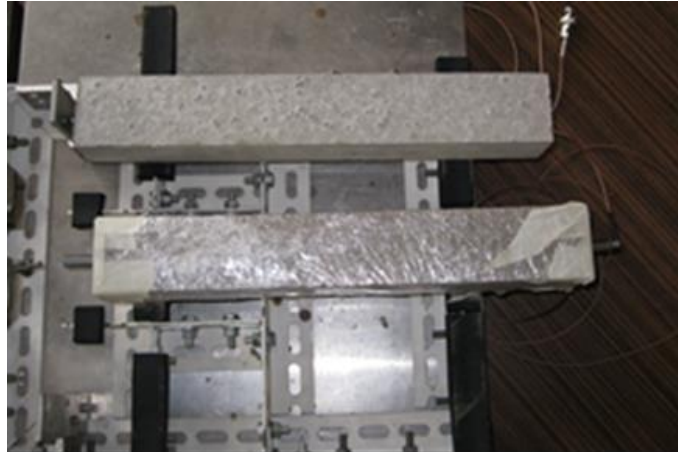
### Jemnozrný cementový kompozit – metoda Impact-echo

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. P104-10-0535 „Výzkum a vývoj vybraných metod měření a analýzy pro sledování chování stavebních směsí při tuhnutí“. Cílem provedených experimentů bylo porovnat rozdíl dominantních frekvencí vyzrávání jemnozrných cementových kompozitů, které se liší ve způsobu ošetřování. Za tímto účelem byly vyrobeny dva jemnozrné cementové kompozity se jmenovitými rozměry 360 mm x 50 mm x 50 mm, které byly označeny jako O – obaleno fólií a N – neobaleno fólií. Složení směsi je v Tab. 3.1.2. Směs byla upravena do forem na vibračním stole (Šamárková, 2012a).

Tab. 3.1.2: Složení směsi (Šamárková, 2012a)

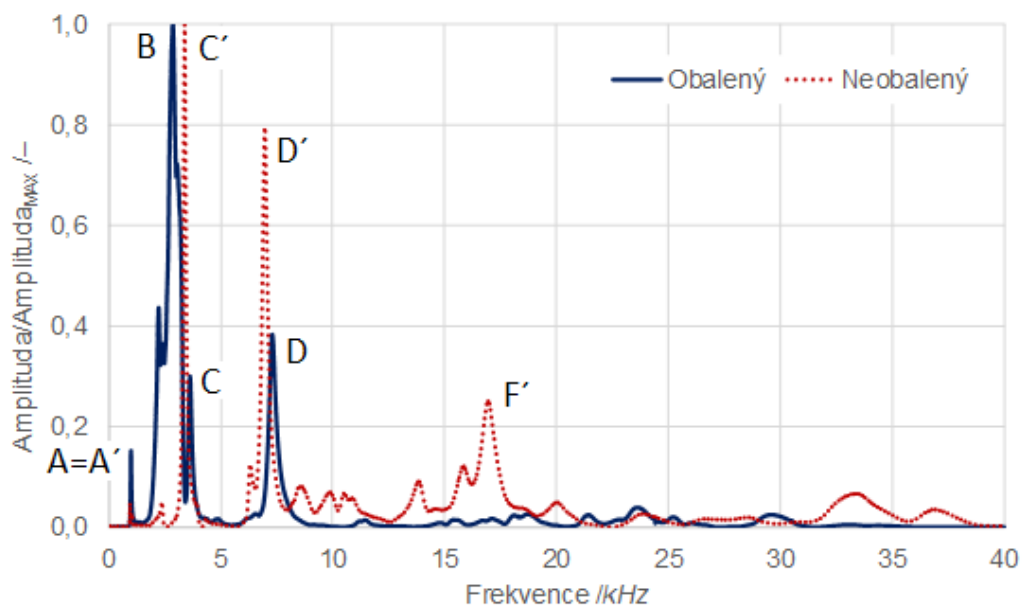
Složka	Množství /kg
CEM II/B–S 32,5 R	400
písek Želešice (0–4 mm)	1400
voda	225

Po odlití byla cementová malta udržována ve formě při pokojové teplotě po dobu 24 hodin před odformováním. Piezoelektrický snímač byl umístěn na jednom konci vzorku v jeho podélné ose a úder kladívka se prováděl na opačný konec vzorku ve směru osy vzorku viz Obr. 3.1.7. Měření začalo po odformování vzorků, tedy po 24 hodinách od namíchání.



Obr. 3.1.7: Fotografie vzorku z experimentu (Šamárková, 2012a)

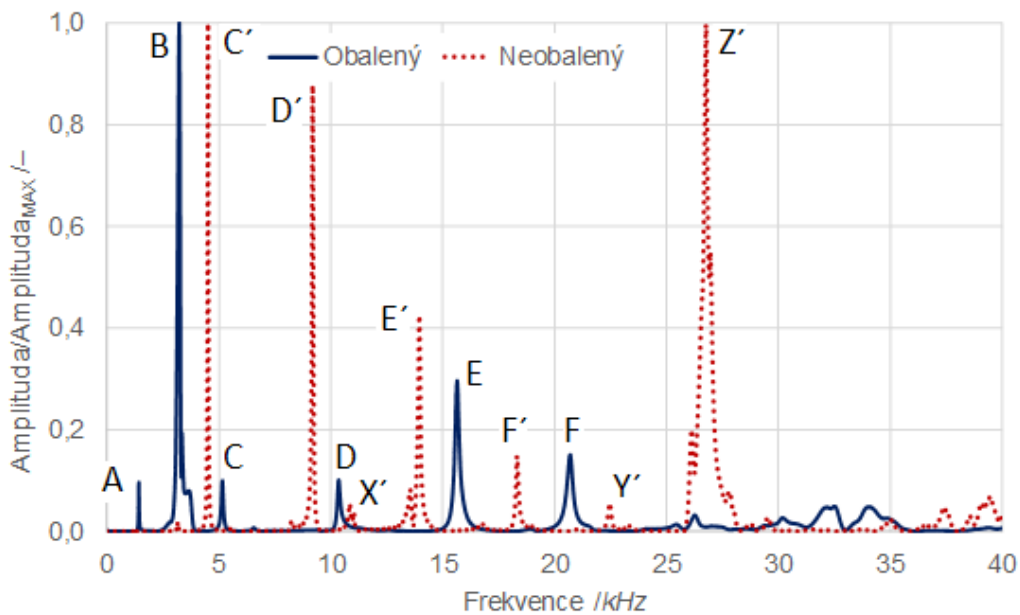
Grafy (Obr. 3.1.8 a Obr. 3.1.9) ukazují frekvenční spektrum. U obaleného i neobaleného vzorku jsou jednotlivé grafy zobrazeny v jiném časovém okamžiku od namíchání.



Obr. 3.1.8: Frekvenční spektrum 24 hodin od namíchání (Šamárková, 2012b)

Obr. 3.1.8 ukazuje frekvenční spektrum pro obalený i neobalený vzorek na počátku tvrdnutí cementové malty (tj. 24 hodin od namíchání). Ve frekvenčním spektru má obalený vzorek frekvenci (označenou A) v poloze 990 Hz. Tato frekvence A je viditelná i u neobaleného vzorku (označena A'). Během tvrdnutí se frekvence A posunula na hodnotu 1430 Hz (po 240 hodinách od namíchání), jak je vidět na Obr. 3.1.9. Další

významná frekvence (označená jako B) se objevuje pouze při sledování obaleného vzorku viz Obr. 3.1.8, kdy měla hodnotu 2870 Hz a po 240 hodinách od namíchání (Obr. 3.1.9) se její pozice posunula na hodnotu 3230 Hz. Frekvence (označená jako C) je přítomna v obou sledovaných časových okamžicích. Frekvence C u obaleného vzorku 24 hodin po namíchání byla na pozici 3630 Hz a na konci sledování, tedy 240 hodin od namíchání byla na pozici 5160 Hz. Odpovídající frekvence C' u neobaleného vzorku, tedy 24 hodin od namíchání byla na pozici 3390 Hz, zatímco na konci monitorování byla její pozice 4510 Hz. Od této frekvence můžeme nalézt frekvence vyšších řádů, které by mohly naznačovat, že jde o vlastní frekvenci vzorku.



Obr. 3.1.9: Frekvenční spektrum 240 h od namíchání (Šamárková, 2012b)

Na konci sledování (tj. 240 h od namíchání) byly v neobaleném vzorku nalezeny tři další významné frekvence (označené X', Y', Z') viz Obr. 3.1.9. Tyto frekvence byly pravděpodobně vytvořeny kvůli vzniklým nelinearitám ve struktuře vzorku. Tyto nelinearity byly způsobeny nedostatkem vody pro hydrataci cementu a velmi pravděpodobně způsobují poškození struktury vzorku.

### Jemnozrnny alkalicky aktivovaný kompozit

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 13-09518S „Vliv uhlíkových nanotrubiček na zlepšení lomového chování materiálů na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátových pojiv (NANOFRAM)“. Cílem experimentů bylo určení vlivu množství mnohostěnných uhlíkových nanotrubiček (multi-walled carbon nanotubes – MWCNT) na průběh tuhnutí a tvrdnutí alkalicky aktivované struskové (AAS) malty pomocí AE a ověření pomocí IE. MWCNT jsou obvykle nerozpustné ve vodě, proto MWCNT obsahovaly 55 % karboxymethylcelulosa jako dispergační činidlo. Uhlíkové nanotrubičky byly použity ve formě 1 % a 5 % disperzí (Rovnaník, 2016a). Pro

experimenty bylo připraveno sedm různých směsí, jejichž složení je v Tab. 3.1.3. Obsah MWCNT byl 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,50 a 1,00 % hmotnosti strusky a výsledky testů byly porovnány s referenční směsí, která byla připravena bez MWCNT.

Tab. 3.1.3: Složení směsí (Rovnaník, 2016a)

Složka Označení	Struska /g	Vodní sklo /g	MWCNT /g	Kamenivo /g	Voda /ml
AAS	450	180	0,0	1350	95,0
AASC 0.05	450	180	22,5*	1350	72,5
AASC 0.10	450	180	45,0*	1350	50,0
AASC 0.15	450	180	67,5*	1350	27,5
AASC 0.20	450	180	90,0*	1350	5,0
AASC 0.50	450	180	45,0**	1350	62,0
AASC 1.00	450	180	90,0**	1350	32,0

\* 1 % disperze MWCNT; \*\* 5 % disperze MWCNT

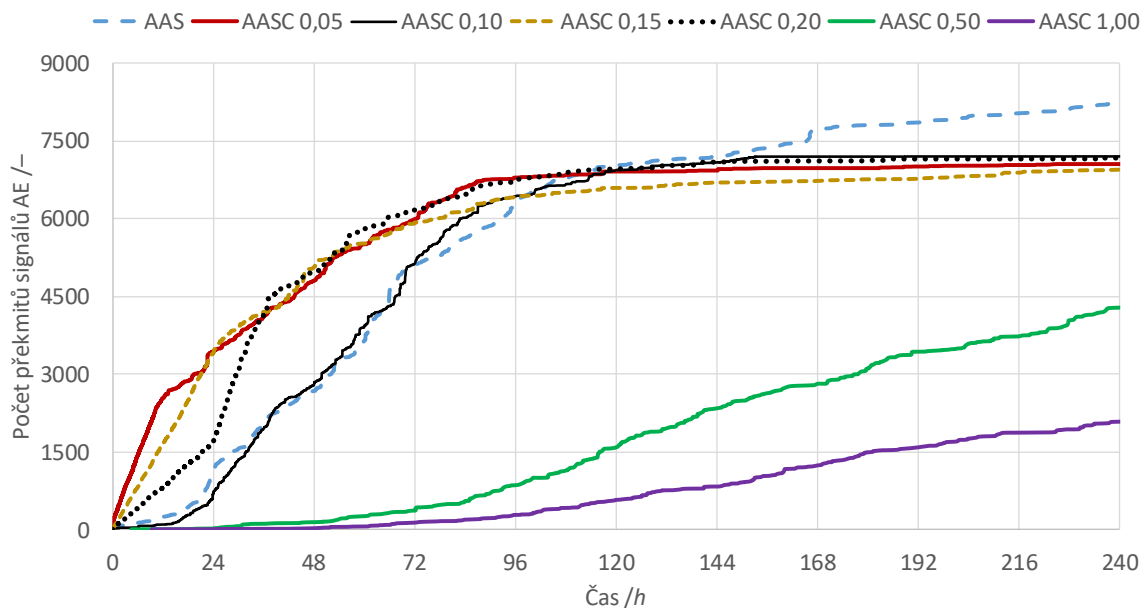
Pro monitorování tendence praskání AAS malty během vytvrzování byla čerstvá suspenze vložena do válcové formy. Potom byl do suspenze vložen ocelový vlnovod a snímač AE byl magneticky přichycen k vlnovodu viz Obr. 3.1.10, jako vazební prostředek byla použita vazelína. Prahová hodnota zjištěných signálů byla nastavena na 800 mV při zesílení 30 dB. To nám umožnilo odstranit případný šum v pozadí a zaznamenat pouze signály AE, které vznikaly přímo v materiálu.



Obr. 3.1.10: Uchycení vlnovodu a snímače AE během tuhnutí a tvrdnutí AAS malty

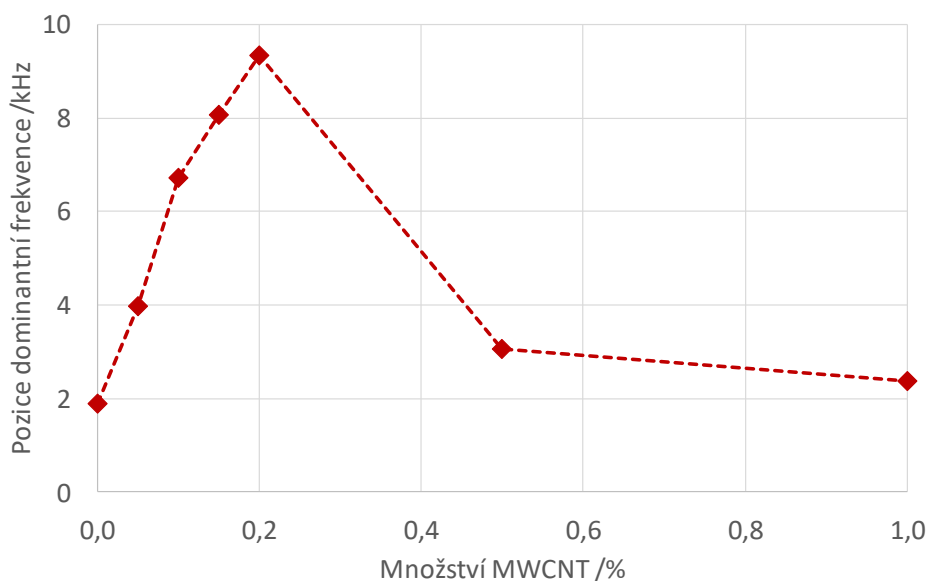
Pro zhodnocení tvorby mikrotrhlin během vytvrzování jsme se zaměřili na nejčastěji používaný parametr AE, což je počet signálů překračujících přednastavenou prahovou hodnotu – počet překmitů. Počet vznikajících mikrotrhlin v materiálu lze odvodit z aktivity AE. Vzhledem k tomu, že nejdůležitější procesy, které se podílejí na tvorbě struktury, jsou na samém počátku tuhnutí AAS malty, tak graf na Obr. 3.1.11 zobrazuje kumulativní počet překmitů signálů AE v průběhu prvních 10 dnů od namíchání. Z grafu je patrné, že referenční směs (označení AAS) vykazuje nejvyšší počet překmitů

signálů AE a že kumulativní křivka stále stoupá až do konce měření. V případě že zvyšujeme množství MWCNT, můžeme pozorovat zvýšený počet překmitů signálů AE během prvních 96 hodin, ale následně se sníží množství zaznamenaných překmitů signálů AE. Vyšší množství MWCNT ve směsích AASC 0,50 a AASC 1,00 razantně snížilo počet překmitů signálů AE v rané fázi hydratace do 96 hodin od namíchání. Obě kumulativní křivky pro směsi AASC 0,50 a AASC 1,00 během celého sledovaného období rostou téměř lineárně, což znamená, že počet překmitů signálů AE, a potažmo počet vzniklých mikrotrhlin, je téměř stejný (Rovnaník, 2016a).



Obr.3.1.11: Závislost počtu překmitů signálů AE na čase u jednotlivých směsí

Jednotlivé vzorky, které byly použity k monitorování metodou AE v průběhu tuhnutí a tvrdnutí, byly následně použity na posouzení metodou IE. Změny ve struktuře a složení materiálu v důsledku přítomnosti zvyšujícího se množství MWCNT se odráží v posunutí jednotlivých rezonančních frekvencí viz Obr. 3.1.12. Posun pozice dominantní frekvence k vyšším hodnotám je velmi strmý z hodnoty na pozici 1,9 kHz až do 9,3 kHz, v případě přidávání MWCNT až do hodnoty 0,2 % z hmotnosti strusky. Naproti tomu s dalším přidáním MWCNT dominantní frekvence opět poklesne na hodnotu 2,4 kHz. Lze tedy předpokládat, že vyšší hodnota dominantní frekvence indikuje méně nelinearit ve struktuře, jako jsou praskliny nebo oblasti s různou hustotou. Z tohoto hlediska má kompozit s obsahem 0,2 % MWCNT z hmotnosti strusky nejkompaktnější strukturu a strukturu s pravděpodobně nejnižším počtem trhlin (Rovnaník, 2016a).



Obr. 3.1.12: Závislost pozice dominantní frekvence na množství MWCNT v materiálu

Monitorování procesu tuhnutí a tvrdnutí AAS malty pomocí metody AE ukázalo, že přidání MWCNT snížilo počet překmitů signálů AE, které byly pozorovány během 10 dnů. Vzhledem k tomu, že počet překmitů signálů AE je pravděpodobně úměrný počtu vznikajících mikrotrhlin, které jsou způsobeny autogenním smrštěním a smrštěním od samo vysychání, lze usoudit, že MWCNT snižují tendenci ke vzniku mikrotrhlin v AAS matici (Rovnaník, 2016a). Z hlediska výsledků metody Impact-echo by bylo zajímavé sledovat oblast mezi obsahem 0,2–0,5 % MWCNT detailněji, a zjistit, kde se vyskytuje zlom z maximální hodnoty pozice dominantní frekvence.

### **Betony – jiné množství provzdušňovací přísady a jiný vodní součinitel**

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“. Cílem experimentů bylo porovnat cementové betony s různým vodním součinitelem a s různým provzdušněním. Pro experiment byly vyrobeny betonové krychle o hraně 150 mm.

Po odlití byl beton v silikonové formě při laboratorních podmínkách (teplota  $(20 \pm 1)$  °C, relativní vlhkost  $(45 \pm 5)$  %), po 24 hodinách byly vzorky odformovány a na dalších 27 dní vloženy do vodní lázně. Vlnovody pro měření AE byly vloženy do čerstvého betonu ihned po odlití formy. Byly testovány tři vzorky od každé směsi. Snímač AE (MTPA-15 s integrovaným předzesilovačem 35 dB) byl připojen k vlnovodům pomocí závitů a vazebním prostředkem byla vazelína viz Obr. 3.1.13.

V Tab. 3.1.4 je uvedeno složení jednotlivých směsí a vlastnosti čerstvých betonových směsí. Hlavním viditelným rozdílem ve složení směsí je použití provzdušňování. Pro vyhodnocení AE jsem se zaměřil na počet překmitů signálů AE a pak i detailněji na



jednotlivé parametry signálů AE u dvou směsí s vodním součinitelem 0,40 a 0,48 (Topolář, 2016a).



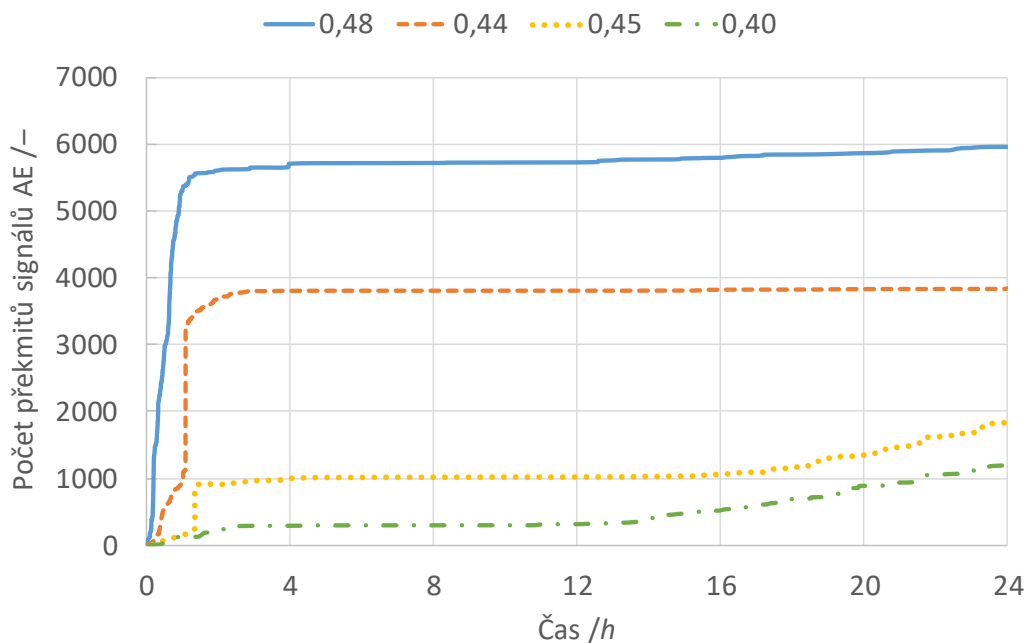
Obr. 3.1.13: Umístění vlnovodů a snímačů AE v čerstvé betonové směsi

Tab. 3.1.4: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> a vlastnosti čerstvé betonové směsi (Topolář, 2016a)

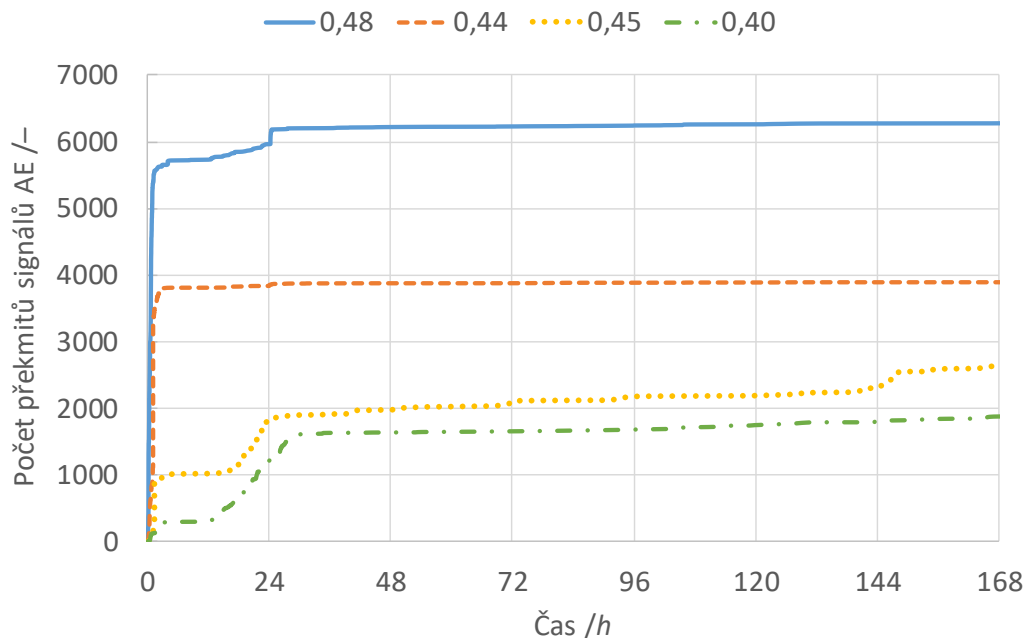
<b>Vodní součinitel (označení vzorků) /–</b>	<b>0,48</b>	<b>0,44</b>	<b>0,45</b>	<b>0,40</b>
<b>Složka/Vlastnost</b>				
Cement 42,5 R /kg	338	386	335	405
Písek 0/4 /kg	905	854	850	841
Kamenivo 4/8 /kg	183	207	312	188
Kamenivo 8/16 /kg	667	671	526	715
Voda /kg	176	181	164	176
Superplastifikátor /kg	1,77	2,01	1,70	2,11
Provzdušňovací přísada /kg	–	–	0,76	0,73
Objemová hmotnost /kg/m <sup>3</sup>	2270	2300	2190	2260
Sednutí /mm	70	50	60	50
(Třída betonu)	(S2)	(S2)	(S2)	(S2)
Obsah vzduchu /%	4,5	3,0	6,2	5,7

Grafy na Obr. 3.1.14 a Obr. 3.1.15 znázorňují kumulativní křivky počtu překmitů signálů AE během prvních hodin po namíchání. V první fázi tvrdnutí betonu asi 2 hodiny po smíchání jednotlivých složek jsou aktivnější, z hlediska AE, směsi bez provzdušňovací přísady. Nižší aktivita AE je pravděpodobně způsobena

zpomalujícím účinkem provzdušňovací přísady. Graf (Obr. 3.1.15) ukazuje, že jednotlivé směsi vykazují menší množství počtu překmitů signálů AE po vložení do vodní lázně tedy po 24 hodinách, což je nejspíše způsobeno menším počtem vznikajících mikrotrhlin (Topolář, 2016a).



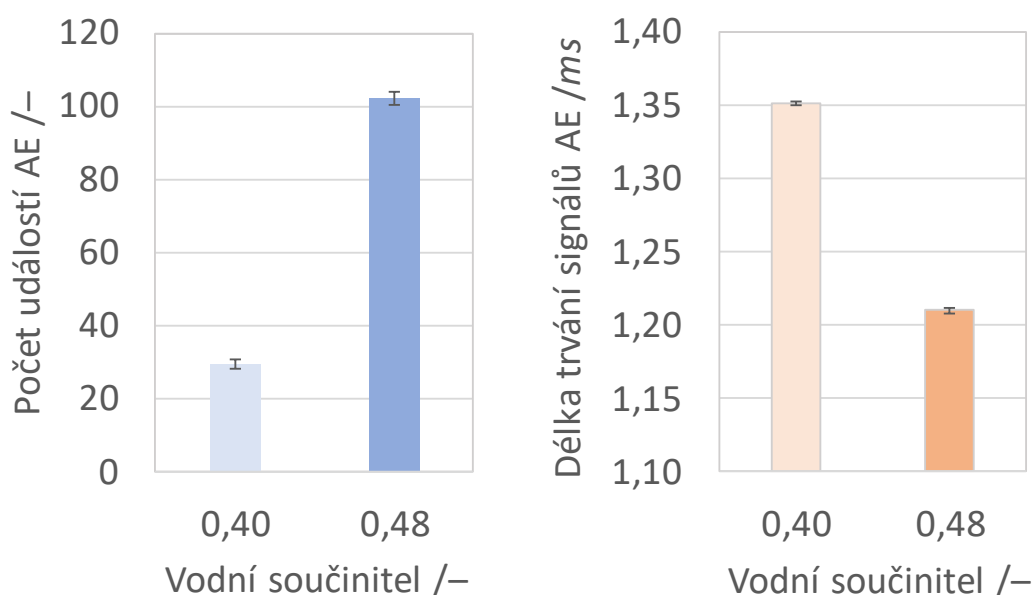
Obr. 3.1.14: Kumulativní počet překmitů signálů AE během prvních 28 hodin



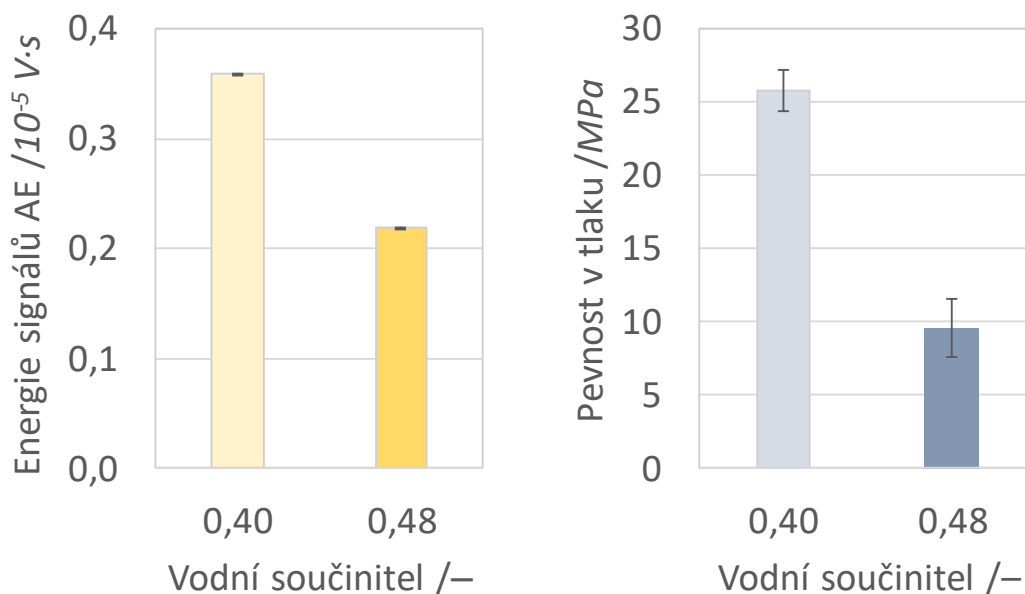
Obr. 3.1.15: Kumulativní počet překmitů signálů AE během prvních 7 dnů

Pro detailní srovnání jednotlivých parametrů signálů AE byly vybrány dvě směsi s nejvíce odlišným průběhem kumulativních křivek počtu překmitů signálů AE. Z grafu na Obr. 3.1.16 (vlevo) je vidět, že počet událostí u směsi s vodním součinitelem

0,40 je menší, než u směsi s vodním součinitelem 0,48, což je zřejmě způsobeno rychlejším hydratováním cementového zrna u směsi s nižším vodním součinitelem během prvních 24 hodin od namíchání. Stejně tak doba trvání signálů AE viz Obr. 3.1.16 (vpravo) je vyšší u směsi s vodním součinitelem 0,40. Pevnější struktura neutlumuje signály AE, tak jako větší množství vody ve směsi s vodním součinitelem 0,48, i když rozdíl v dobách trvání signálů AE není tak významný. Z porovnání grafů Obr. 3.1.17 je patrná podobnost získaných hodnot jednak z měření AE a jednak z měření jednodenních pevností v tlaku. Lepší vazba matrice při vytvoření mikrotrhliny vygeneruje větší množství energie signálů AE, což odpovídá i hodnotám jednodenních pevností v tlaku (Topolář, 2015a).



Obr. 3.1.16: Závislost počtu událostí AE (vlevo) a doby trvání signálů AE (vpravo) na vodním součiniteli



Obr. 3.1.17: Závislost energie signálů AE (vlevo) a pevnosti v tlaku (vpravo) na vodním součiniteli

### Betony – různé způsoby ošetřování

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. P104-10-0535 „Výzkum a vývoj vybraných metod měření a analýzy pro sledování chování stavebních směsí při tuhnutí“. Cílem provedených experimentů bylo porovnat rozdíl ve tvrdnutí a zrání hrubozrnných cementových kompozitů pomocí metody AE, které se liší ve způsobu ošetřování. Vzorky byly ve formě betonových trámčů o rozměrech 100 x 100x 400 mm viz Obr. 3.1.18.



Obr. 3.1.18: Fotografie vzorků

Složení směsi je uvedeno v Tab. 3.1.5. Jeden ze vzorků byl zakryt fólií, aby se zabránilo samovolnému vysychání a druhý vzorek byl ponechán volně na vzduchu. V průběhu

vkládání směsi do ocelových forem byly současně vloženy i teplotní snímače. Nutno poznamenat, že tyto experimenty byly provedeny bez použití akustický vlnodů, proto je začátek měření AE posunut asi o 7 h od namíchání (Topolář, 2014a; Topolář, 2014b).

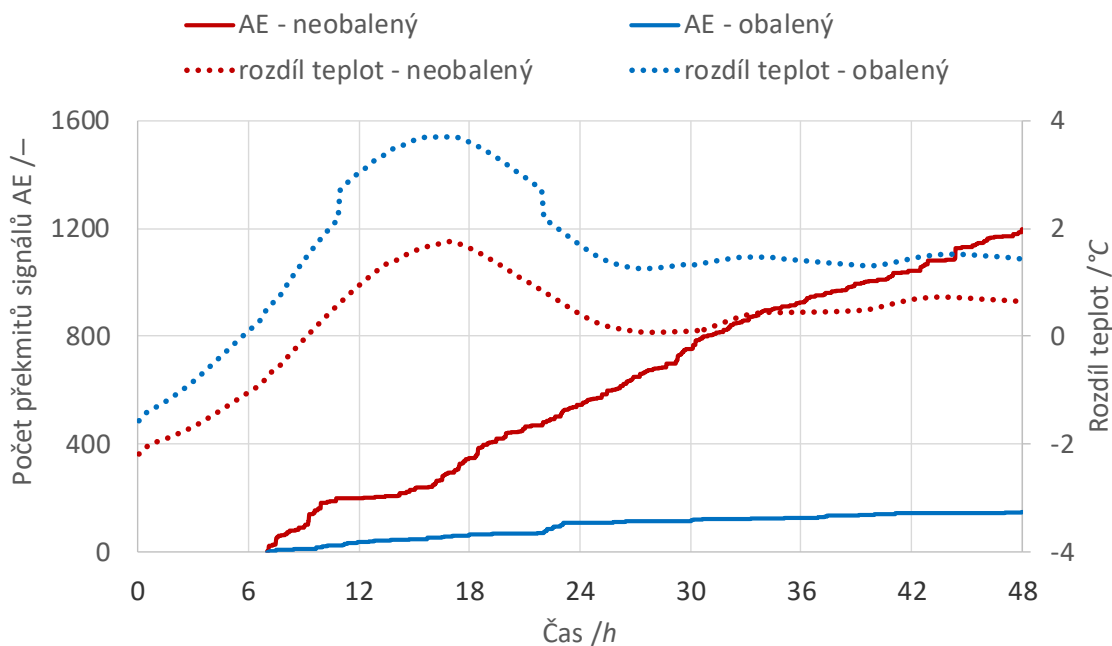
Tab. 3.1.5: Složení směsi na 1 m<sup>3</sup> (Topolář, 2014a; Topolář, 2014b)

Složka	Množství /kg
Cement (CEM I 52,5N)	390
Písek (O.N.V.) 0/4 /mm	700
Kamenivo (Olbramovice) 8/16 /mm	1275
Voda	125
Plastifikátor (Spolostan 7L)	4

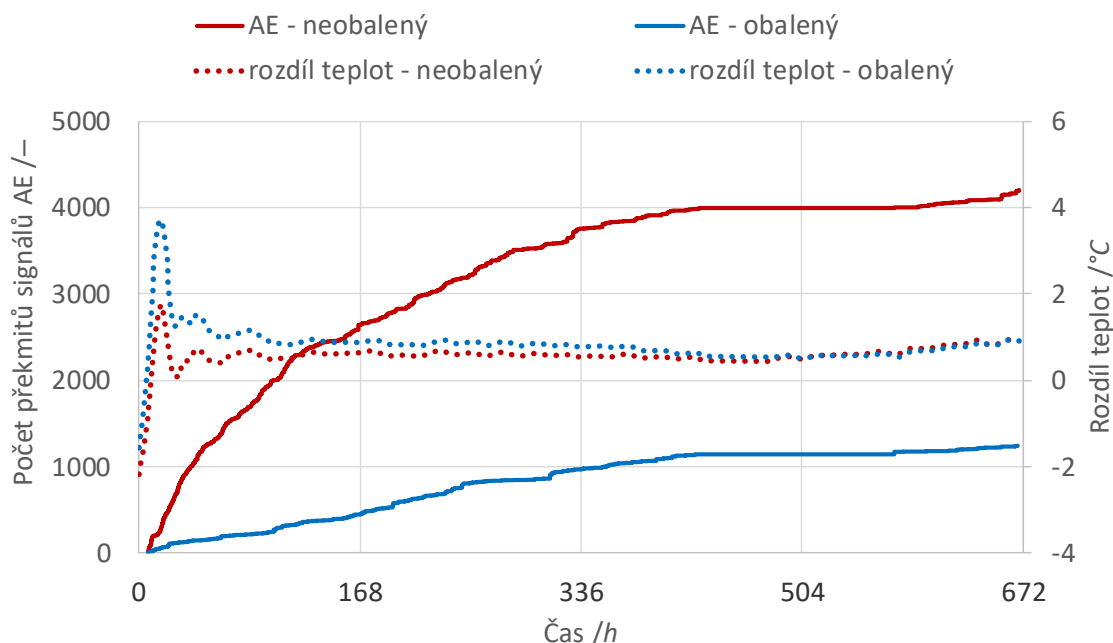
Pro měření teploty tuhnutí a tvrdnutí betonu byl vybrán NTC termistor (Negative Temperature Coefficient), jehož rezistence klesá s rostoucí teplotou. Teplota je vypočtena z naměřených rezistencí podle následující rovnice:

$$v = 12,8 \cdot \log^2(R) - 129 \cdot \log(R) + 280 \quad (\text{Rce 3.1.1})$$

kde  $v$  je teplota v °C, a  $R$  je naměřená rezistence v  $\Omega$ .



Obr. 3.1.19: Srovnání naměřených výsledků obaleného a neobaleného vzorku během 48 hodin



Obr. 3.1.20: Srovnání naměřených výsledků obaleného a neobaleného vzorku během 28 dní

Grafy (Obr. 3.1.19 a Obr. 3.1.20) ukazují křivky kumulativního počtu překmitů signálů AE a průběh rozdílů teplot (teplota ve vzorku minus teplota laboratorního prostředí) na čase. Začátek měření teplot je posunut přibližně o 7 h před začátek měření AE z výše uvedených důvodů. Rozdílová teplota na počátku měření je záporná, a to z důvodu, že mísené složky měly nižší teplotu, než byla po spuštění měření teplota laboratorního prostředí. Z tvaru kumulativních křivek je patrné, že neobalený vzorek vykazuje podstatně vyšší aktivitu AE, což pravděpodobně ukazuje i na vyšší množství vznikajících mikrotrhlin v průběhu měření než u vzorku obaleného. I z průběhu rozdílů teplot je patrné, jaký vliv má obalení vzorku, tedy teplota uvnitř obaleného vzorku je vyšší než teplota u vzorku neobaleného. Maximální pík u obaleného vzorku je téměř o 2 °C výše než u vzorku neobaleného, což je způsobeno rychlejším ochlazováním povrchu neobaleného vzorku v důsledku odpařování vody. (Topolář, 2014a; Topolář, 2014b). Při podrobnějším studiu by bylo zajímavé sledovat prostorové rozložení teplot, což však není tématem této práce.

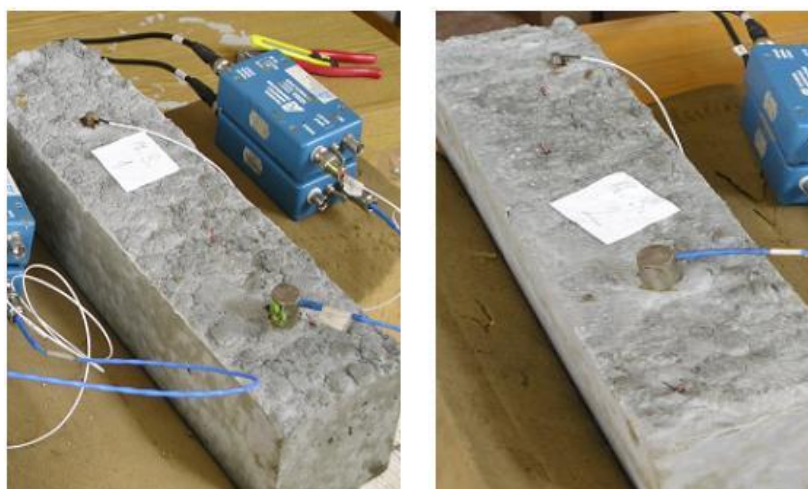
### Betony – různé plastifikační přísady

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. P104-10-0535 „Výzkum a vývoj vybraných metod měření a analýzy pro sledování chování stavebních směsí při tuhnutí“. Cílem provedených experimentů bylo porovnat rozdíl ve tvrdnutí a zrání hrubozrnných cementových kompozitů pomocí metody AE, které se liší v typu plastifikační přísady. Složení a vlastnosti vytvrdlého betonu jsou v Tab. 3.1.6.

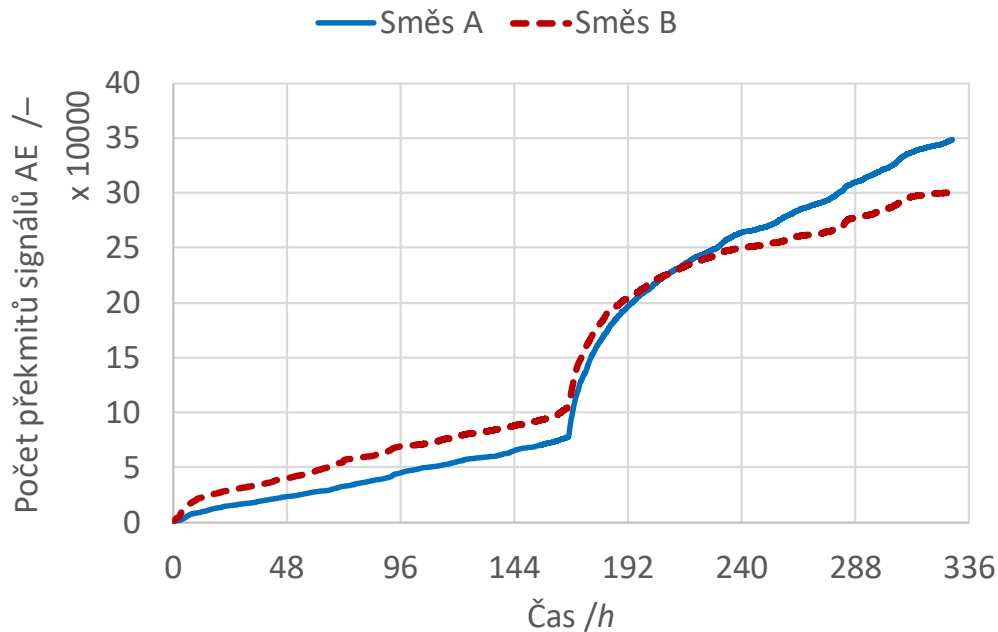
Tab. 3.1.6: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> a vlastností ve stáří 7 a 28 dní

Složka/Vlastnost	Množství /kg	
	Směs A	Směs B
Cement (CEM I 52,5N)	390	330
Písek (O.N.V.) 0/4 /mm	700	720
Kamenivo (Olbramovice) 8/16 /mm	1275	1310
Voda	125	110
Plastifikátor	Spolostan 7L 3,6	Premia 196 2,7
Pevnost v tlaku (7/28 dní) /MPa	75,2/90,1	87,9/110,3
Pevnost v tahu za ohybu (7/28 dní) /MPa	7,6/-	9,1/-
Objemová hmotnost (7/28 dní) /kg/m <sup>3</sup>	2431/2446	2460/2467

Vzorky byly ve formě betonových trámčů o rozměrech 100 x 100x 400 mm viz Obr. 3.1.21. Tyto směsi byly navrhovány z důvodu optimalizace betonu pro výrobu železničních předpínaných pražců. U těchto cyklicky namáhaných dílců je nalezení, resp. sledování vzniku mikrotrhlin, velmi důležité.



Obr. 3.1.21: Umístění snímačů na vzorcích po odformování (vlevo – směs A; vpravo – směs B dle Tab. 3.1.6)



Obr. 3.1.22: Vývoj kumulativního počtu překmitů signálů AE v čase (14 dní)

Vzhledem k nepatrně vyššímu vodnímu součiniteli u směsi B (0,33) než u směsi A (0,32), dochází při neobalení obou směsí k vyšší aktivitě AE u směsi B, zejména v období do odformování viz Obr. 3.1.22. Tato nepatrně vyšší aktivita je velmi pravděpodobně způsobena vyšším odparem vody z povrchu směsi B. Po odformování (po 7 dnech), ale dochází k nárůstu aktivity AE u vzorku ze směsi A, což je v tomto případě nejspíše způsobeno horší vazbou matrice u tohoto vzorku viz vlastnosti v Tab. 3.1.5 a také odpařením nezhydratované vody z částí vzorku, které byly ukryté v ocelové formě.

#### **Alkalicky aktivovaný beton – srovnání různých alkalických aktivátorů**

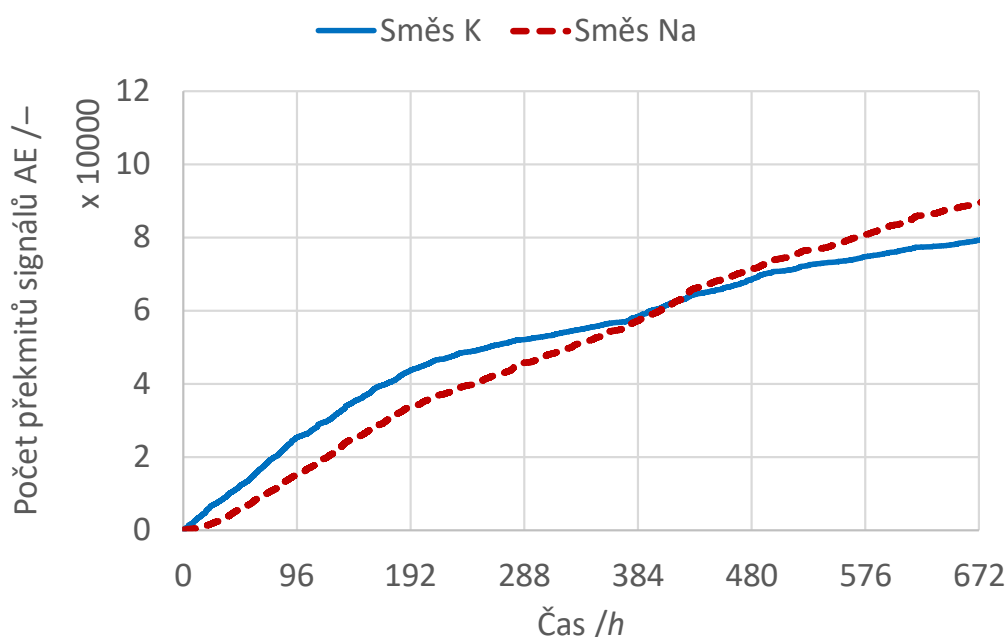
Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. P104-10-0535 „Výzkum a vývoj vybraných metod měření a analýzy pro sledování chování stavebních směsí při tuhnutí“. Cílem provedených experimentů bylo porovnat rozdíl ve tvrdnutí a zrání hrubozrnných bezcementových kompozitů pomocí metody AE, které se liší v alkalickém aktivátoru. Složení a vlastnosti vytvrdlého betonu jsou v Tab. 3.1.7.

Vzorky byly ve formě betonových trámčů o rozměrech 100 x 100x 400 mm. Tyto směsi byly navrhovány z důvodu zlevnění výroby betonů pro železniční předpínané pražce. Ve směsi jsou použity různé alkalické aktivátory, jednou je to KOH a podruhé NaOH.



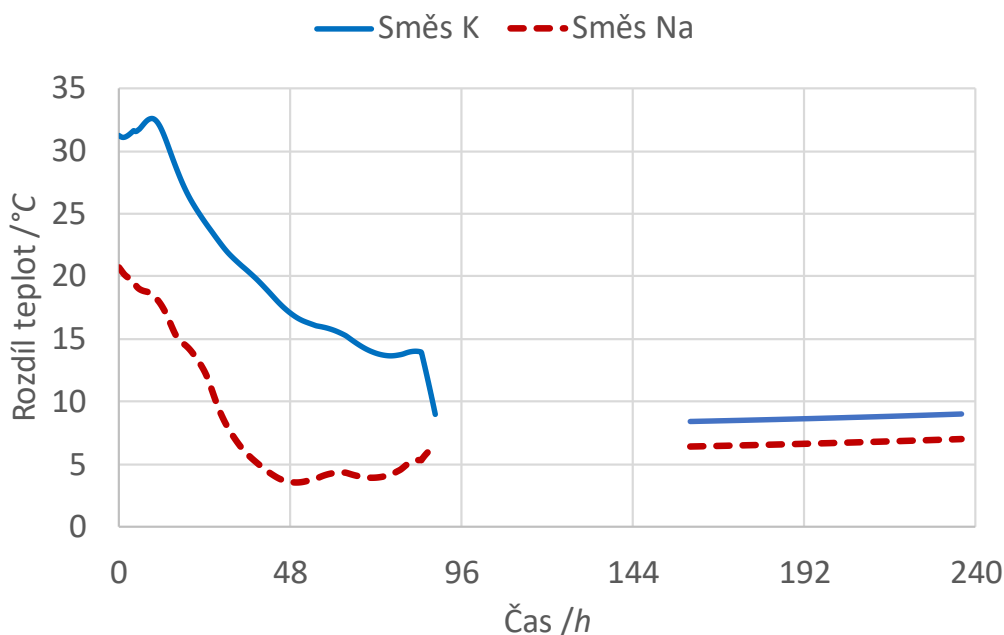
Tab. 3.1.7: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> a mechanické vlastnosti ve stáří 28 dní

Složka/Vlastnost	Množství /kg	
	Směs K	Směs Na
Struska 420	450	
Vodní sklo 1,8	62	
Písek (Lípa) 0/4 /mm	790	
Kamenivo (Litice) 4/8 /mm	240	
Kamenivo (Litice) 8/16 /mm	550	
Voda	150	148
50 % roztok	KOH 60	NaOH 64
Pevnost v tlaku /MPa	77,3	58,9
Pevnost v tahu za ohybu /MPa	6,65	6,4
Objemová hmotnost /kg/m <sup>3</sup>	2300	2319



Obr. 3.1.23: Vývoj kumulativního počtu překmitů signálů AE v čase (28 dní)

Z grafu (Obr. 3.1.23) je patrné, že u směsi s vodním sklem a KOH je rychlejší nástup událostí akustické emise během prvních 200 hodin od začátku měření. Oproti tomu je počet událostí u směsi s vodním sklem a NaOH během měřeného úseku větší.



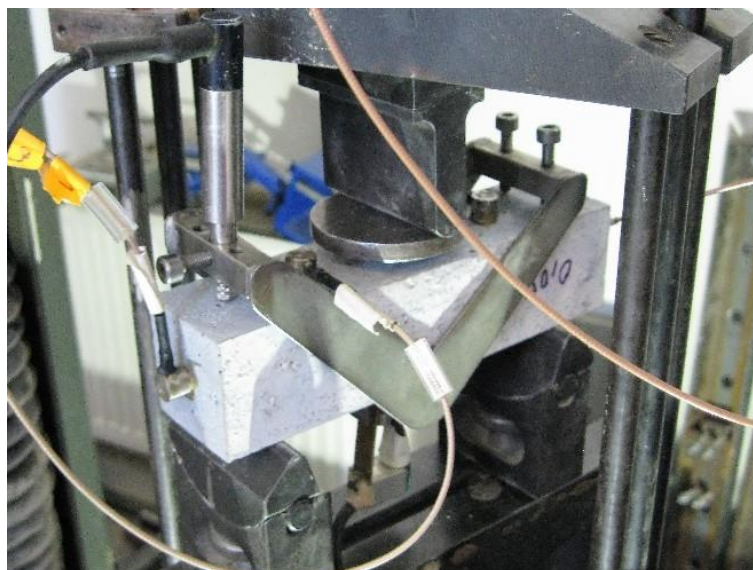
Obr. 3.1.24: Porovnání rozdílů teplot u jednotlivých vzorků během 10 dnů od namíchání (měření bylo přerušeno mezi 87–160 h vlivem softwarové chyby)

U obou vzorků byla měřena i teplota (Obr. 3.1.24) během tvrdnutí, která může napomoci při vysvětlování předcházejících srovnávacích grafů (Obr. 3.1.23). Velký nárůst počtu událostí akustické emise na počátku měření u směsi s vodním sklem a KOH je způsoben rychlým nárůstem i poklesem teploty během prvních čtyřadvaceti hodin. Naproti tomu směs s vodním sklem a NaOH měla po znovuzahájení měření vyšší teplotu a tím si vysvětlujeme celkově větší počet událostí akustické emise v celém měření. Obecně je patrný trend nižšího počtu akustických událostí pro alkalicky aktivovaný beton s KOH, a to i přesto, že při jeho tuhnutí došlo k výraznějšímu růstu teploty a pevnosti byly podstatně vyšší.

### 3.2 Tříbodový ohyb

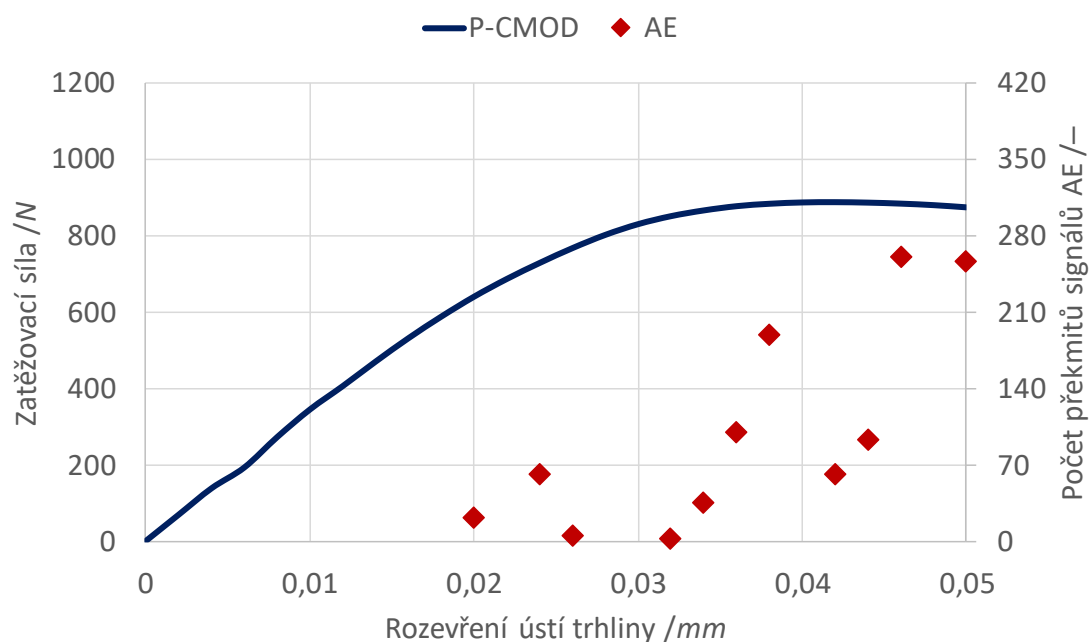
#### **Jemnozrnny alkalicky aktivovaný kompozit – vliv uhlíkových nanotrubiček**

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 13-09518S „Vliv uhlíkových nanotrubiček na zlepšení lomového chování materiálů na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátových pojiv (NANOFRAM)“. Cílem experimentů bylo určení vlivu množství mnohostěnných uhlíkových nanotrubiček (multi-walled carbon nanotubes – MWCNT) na lomové vlastnosti alkalicky aktivované struskové (AAS) malty se sledováním aktivity AE v průběhu tříbodového ohybu. Pro experimenty bylo připraveno sedm různých směsí jejichž složení je v Tab. 3.1.3. Obsah MWCNT byl 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,50 a 1,00 % hmotnosti strusky a výsledky testů byly porovnány s referenční směsí, která byla připravena bez MWCNT.

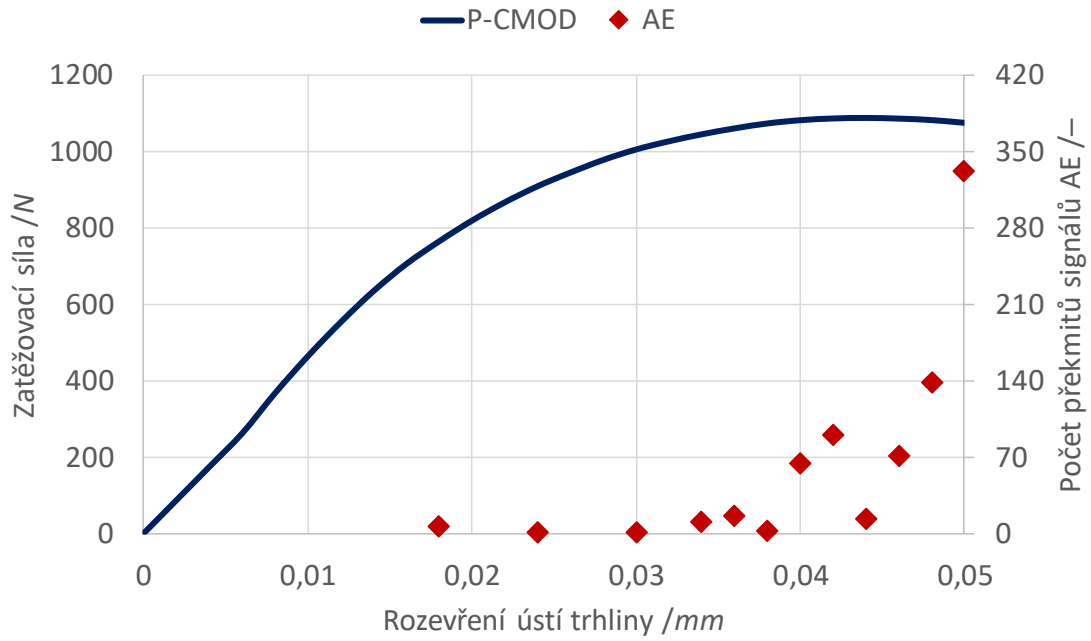


Obr. 3.2.1: Rozmístění snímačů AE a uložení vzorků v lisu

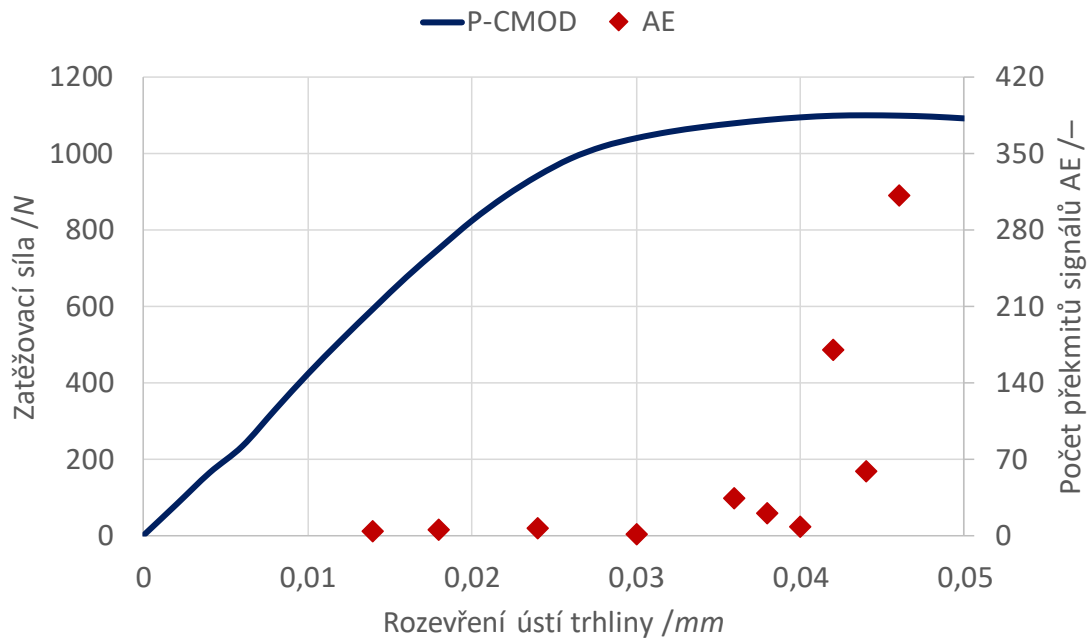
Pro experimenty byly vyrobeny trámce o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Ve středu byl proveden zářez diamantovou pilou do jedné třetiny výšky. Experimenty byly provedeny na mechanickém lisu Heckert FP 10/1 s měřícím rozsahem 0–1200 N, umístění vzorku a rozmístění snímačů AE je vidět na Obr. 3.2.1. Kromě AE bylo zaznamenáno zatížení a rozevření ústí trhliny s použitím extenzometru. Z těchto záznamů byly vytvořeny P-CMOD diagramy (zatížení v závislosti na rozevření ústí trhliny) a do nich byly vloženy záznamy počtu překmitů signálů AE viz Obr. 3.2.2 - Obr. 3.2.8 (Šimonová, 2015).



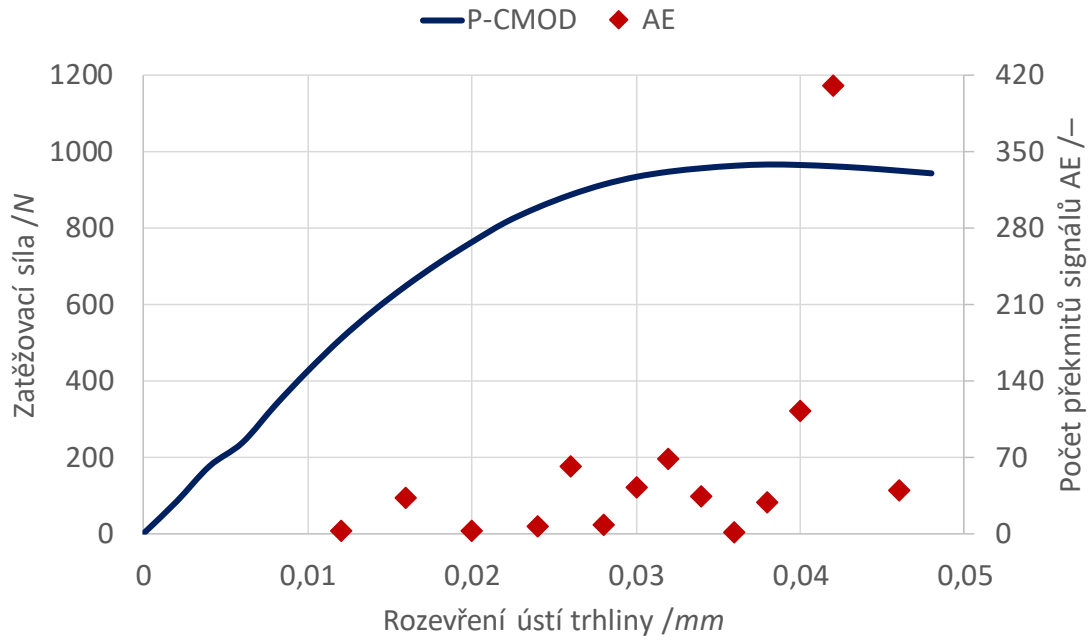
Obr. 3.2.2: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC



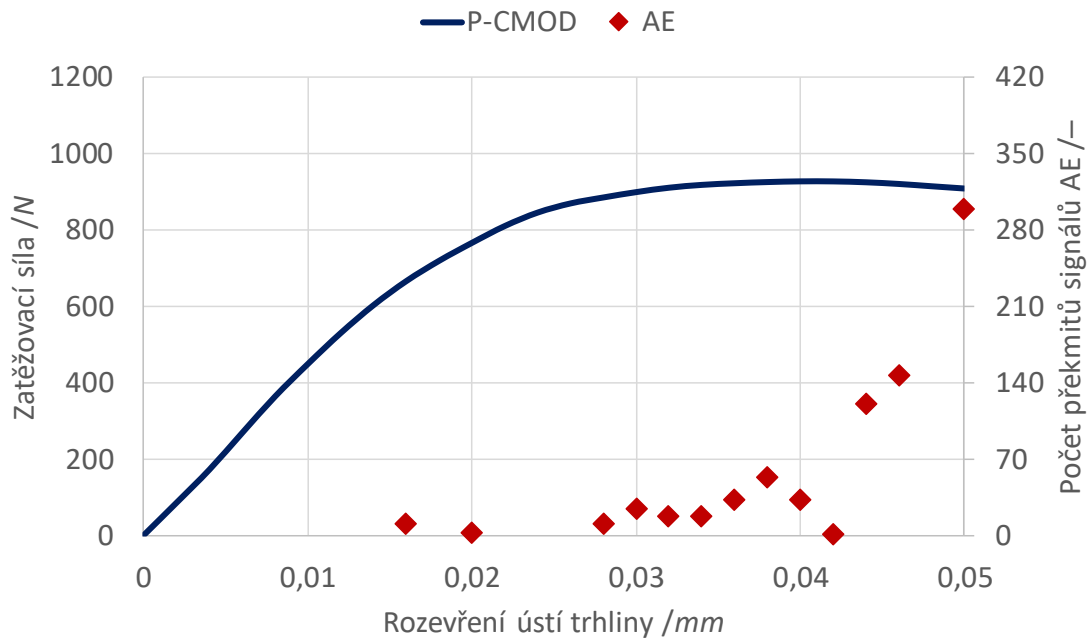
Obr. 3.2.3: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC 0.05



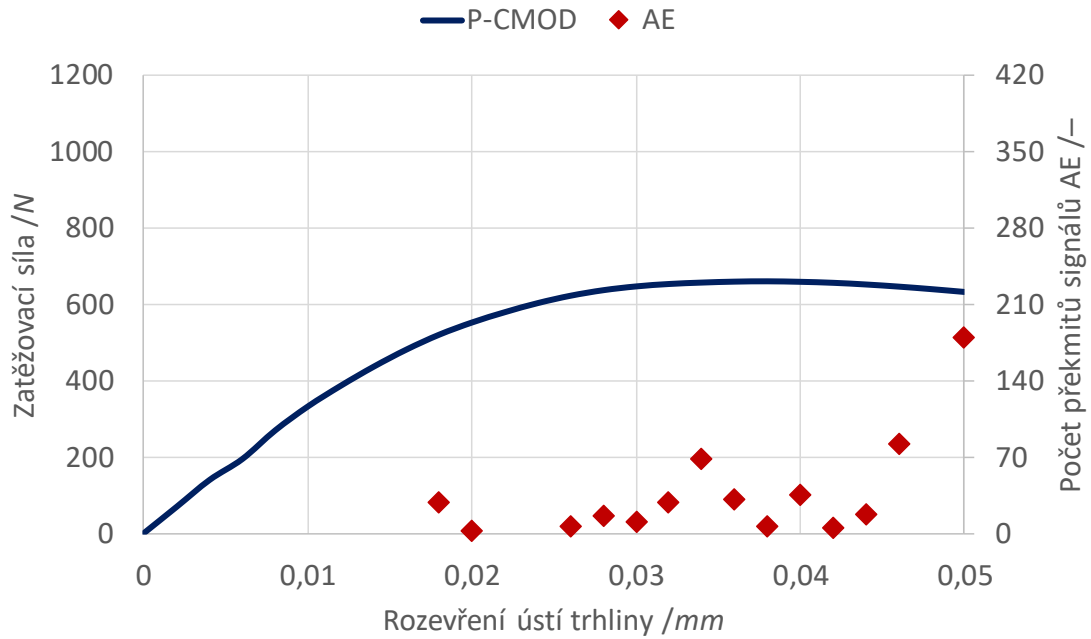
Obr. 3.2.4: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC 0.10



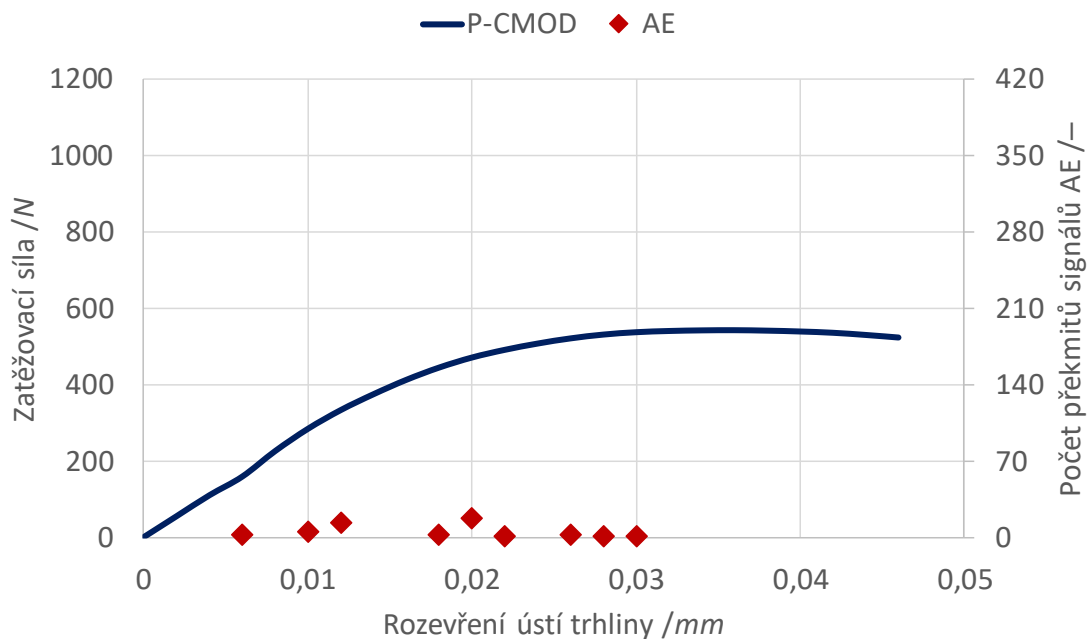
Obr. 3.2.5: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC 0.15



Obr. 3.2.6: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC 0.20



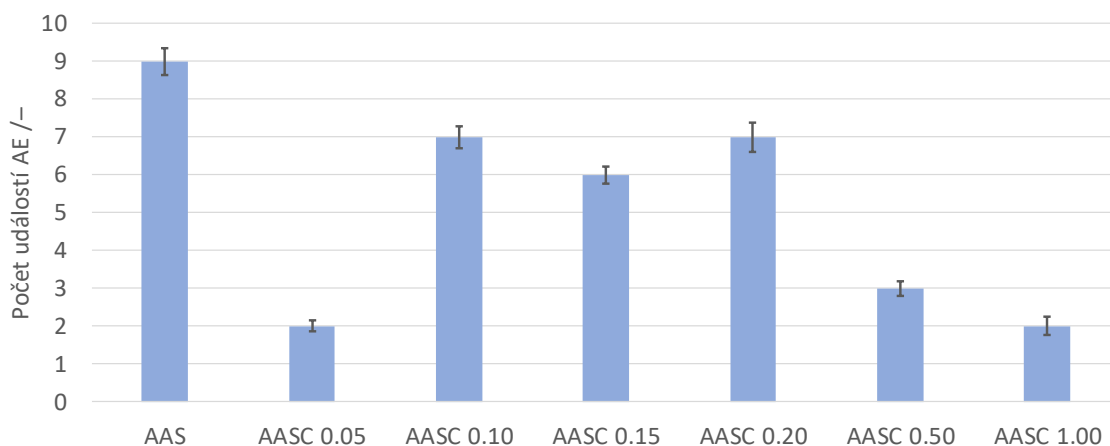
Obr. 3.2.7: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC 0.50



Obr. 3.2.8: P-CMOD diagram s počtem překmitů signálů AE pro vzorek AASC 1.00

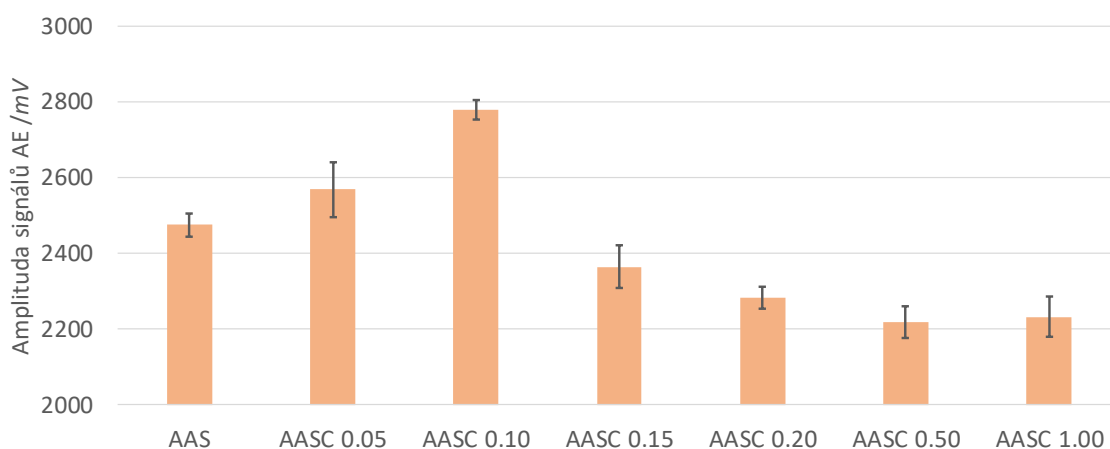
Grafy ukazují, že stabilní šíření trhlin z počátečního zářezu začíná, když jsou zaregistrovány první překmitů signálů AE. Další stabilní šíření trhlin je následováno zvýšeným počtem překmitů signálů AE s výjimkou kompozitu s 1,0 % MWCNT, kde bylo zjištěno jen velmi málo signálů před úplným zlomením vzorku. Vysoký obsah MWCNT přináší do matrice AAS příliš mnoho nedokonalostí a způsobuje, že kompozit je křehčí, což je vidět na menším počtu překmitů signálů AE před dosažením úplného zlomení vzorku (Šimonová, 2015).

V rámci těchto experimentů byly i podrobně analyzovány signály AE, které byly zaznamenány během testu tříbodovým ohybem před úplným zlomením. Pozornost byla zaměřena na čtyři základní parametry popisující signál AE: počet událostí AE (Obr. 3.2.9), amplitudu (Obr. 3.2.10), délku trvání (Obr. 3.2.11) a energii (Obr.3.2.12) signálů AE (Rovnaník, 2016a).



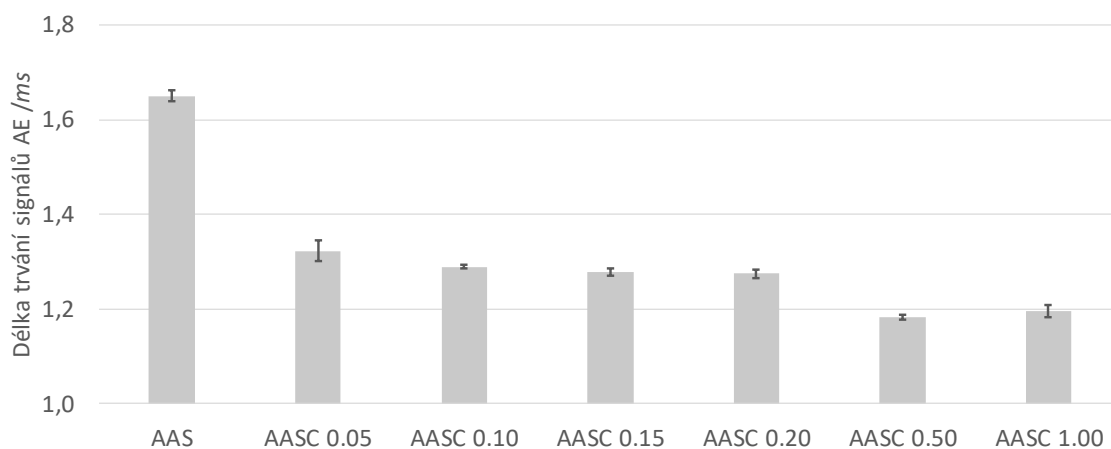
Obr. 3.2.9: Zaznamenaný počet událostí AE pro jednotlivé směsi (počet událostí AE je určen ze zatěžování do maximální síly)

Jakmile zachycený signál překročí nastavenou prahovou hodnotu, zaznamená se událost AE. Počet událostí AE odpovídá schopnosti materiálu odolávat zlomení. Pokud se v materiálu začne tvořit větší množství trhlin ještě před zlomením, je zaznamenán i větší počet událostí AE. Nejvyšší počet událostí AE vykazuje referenční vzorek bez přidaných MWCNT. Se zvyšujícím se množstvím MWCNT počet událostí AE se mírně zmenšuje. Lze předpokládat, že čím větší je zaznamenaný počet událostí AE během šíření trhlin ze zářezu, tím vyšší je odolnost proti úplnému zlomení vzorku (Malhotra, 2003). Z tohoto hlediska se jako nejlepší směsi jevíly s 0,15 a 0,2% obsahem MWCNT.



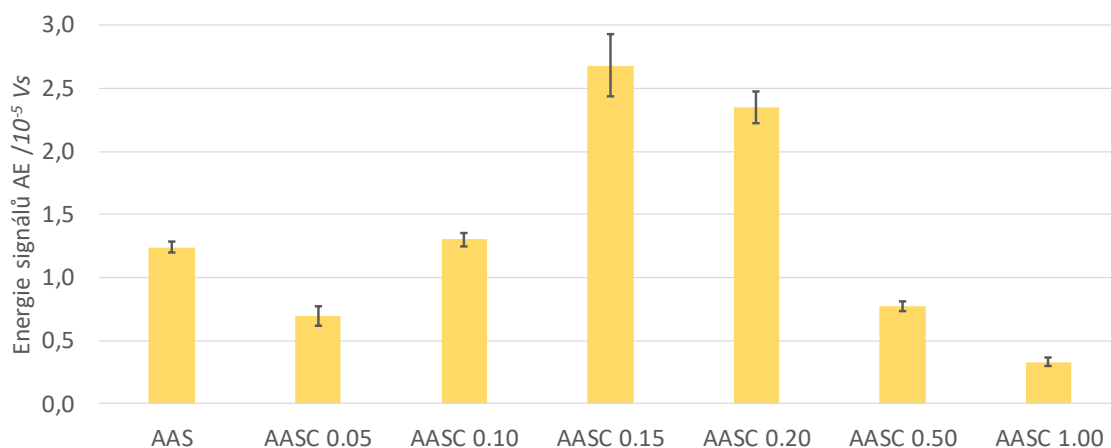
Obr. 3.2.10: Zaznamenaná amplituda signálů AE pro jednotlivé směsi (amplituda signálů AE je určena ze zatěžování do maximální síly)

Vyšší amplituda znamená vytvoření větší a významnější trhliny. Hodnoty naměřené amplitudy se pohybují v intervalu 2217 až 2780 mV. Přidáním MWCNT se amplituda mírně zvýší a dosáhne svého maxima pro 0,1% obsahu MWCNT a pak opět poklesne.



Obr. 3.2.11: Zaznamenaná délka trvání signálů AE pro jednotlivé směsi (délka trvání signálů AE je určena ze zatěžování do maximální síly)

Délka trvání signálů AE zaznamenaná u jednotlivých směsí s obsahem MWCNT je o 20-28 % nižší než u referenčního vzorku. Snížení délky trvání signálů AE s rostoucím množstvím MWCNT není významné. To ukazuje, že při přítomnosti MWCNT je útlum signálů AE významnější i při již velmi nízkém obsahu MWCNT.



Obr. 3.2.12: Zaznamenaná energie signálů AE pro jednotlivé směsi (energie signálů AE je určena ze zatěžování do maximální síly)

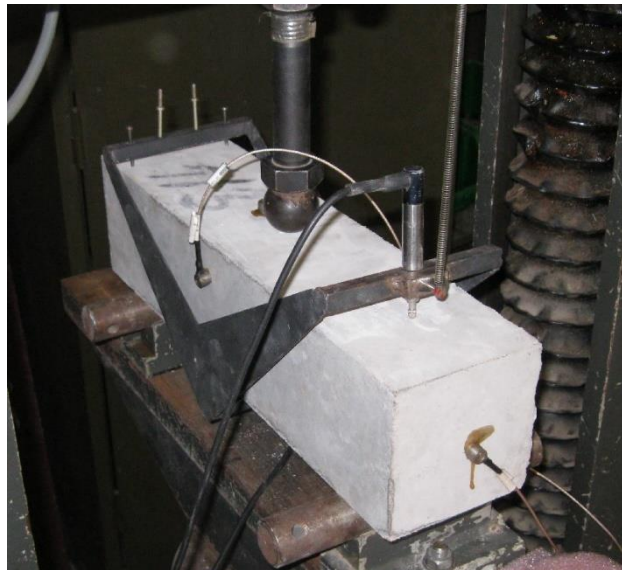
Nejvyšší zaznamenaná energie signálů AE je získána ze směsí označených AASC 0.15 a AASC 0.20. Z grafu Obr. 3.2.12 je vidět, že zvyšování až do 0,2% obsahu MWCNT způsobuje zvýšení energie signálů AE, ale vzrůstající obsah MWCNT způsobuje snížení energie signálů AE. Malý rozpor ohledně tohoto trendu pozorujeme u směsi označené AASC 0.05, což se dá vysvětlit nízkým počtem událostí AE a vysokou variabilitou údajů dosažených pro tuto směs.



Tyto výsledky ukazují složitost vyhodnocení AE neboť různý pohled na parametry zaznamenaných signálů AE skrývá odlišné možnosti analýzy těchto parametrů, potažmo pak charakter vznikajících poškození ve struktuře materiálu.

### **Betony – vliv vodního součinitele**

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“. Cílem experimentů bylo porovnat cementové betony s různým vodním součinitelem a jeho vliv na parametry signálů AE, během tříbodového ohybového testu.



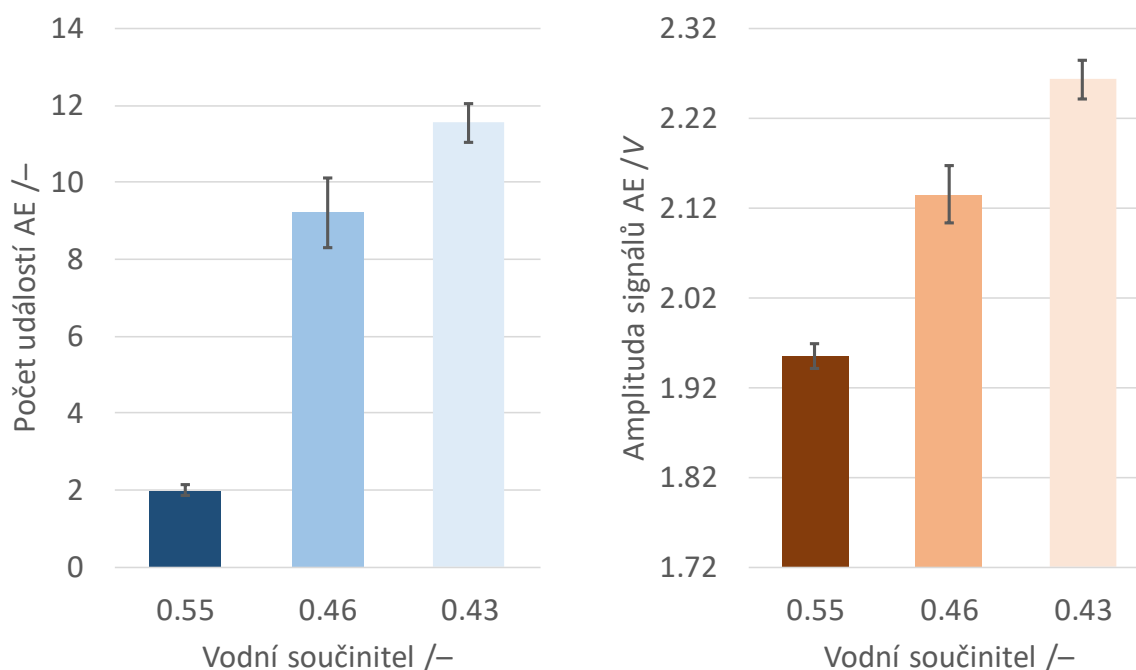
Obr. 3.2.13: Ukázka umístění vzorku v lisu a rozmístění snímačů AE

Tab. 3.2.1 uvádí složení, vlastnosti betonu a označení vybraných směsí vyhodnocených v této části práce. Portlandský cement CEM I 42,5 R byl použit jako pojivo. Dávkování cementu se postupně zvyšovalo z 300 kg/m<sup>3</sup> až na 400 kg/m<sup>3</sup>. Superplastifikátor byl použit v těchto směsích v množství 0,25 % hmotnosti cementu. Jednotlivé směsi byly různé v poměru dávkování cementu a poměru vody a cementu podle toho, jaké množství cementu bylo zvýšeno při zachování konzistence S2 podle EN 206-1 [3]. Tříbodové ohybové testy byly provedeny ve stáří 28 dní vzorků. Byly testovány tři vzorky z každé směsi (Topolář, 2015b).

Pro experiment byly vytvořeny trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm (Obr. 3.2.13). Délka rozpětí byla 300 mm. Zářez (koncentrátor napětí) byl vyroben diamantovou pilou a jeho hloubka byla asi 33 mm, tedy 1/3 výšky trámce. Tříbodové ohybové testy byly prováděny za použití lisu Heckert FPZ 100/1 v rozsahu 0-10 kN ve zkušebně Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Brno, Vysoké učení technické v Brně.

Tab. 3.2.1: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> a vlastnosti čerstvé betonové směsi (Topolář, 2015b)

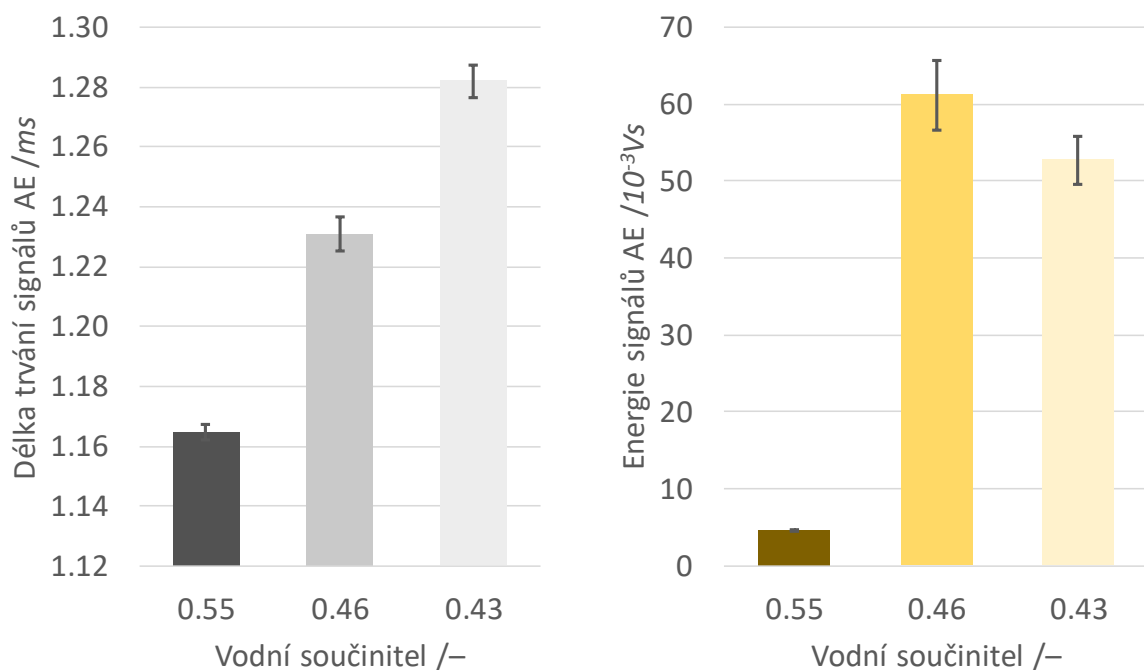
<b>Vodní součinitel (označení vzorků) /–</b>	<b>0,55</b>	<b>0,46</b>	<b>0,43</b>
<b>Složka/Vlastnost</b>			
Cement 42,5 R /kg	295	349	394
Písek 0/4 /kg	927	897	846
Kamenivo 4/8 /kg	185	185	192
Kamenivo 8/16 /kg	689	693	684
Voda /kg	177	175	183
Superplastifikátor /kg	0,71	0,91	0,95
Objemová hmotnost /kgm <sup>3</sup>	2275	2300	2300
Sednutí /mm	60	50	60
Pevnost v tlaku (28 dní) /MPa	42,8	50,8	56,4
Pevnost v tahu za ohybu (28 dní) /MPa	3,8	4,9	5,6



Obr. 3.2.14: Parametry signálů AE: počet událostí (levý graf), amplituda (pravý graf) (parametry signálů AE jsou určeny ze zatěžování do maximální síly)

Pro vyhodnocení parametrů AE byla pozornost zaměřena na čtyři základní parametry popisující signál AE: počet událostí AE (Obr. 3.2.14 vlevo), amplitudu (Obr. 3.2.14 vpravo), délku trvání (Obr. 3.2.15 vlevo) a energii (Obr. 3.2.15 vpravo) signálů AE. Získané výsledky jsou uvedeny ve formě aritmetického průměru (získaného ze 3 nezávislých měření) a standardních odchylek jako chybových úseček (Topolář, 2015b).

Z grafu na Obr. 3.2.14 (vlevo) je patrné, že se snižujícím se vodním součinitelem roste odolnost struktury materiálu, která brání zlomení. Zatímco vzorek ze směsi s vyšším vodním součinitelem se jen zlomí, matrice vzorků ze směsi s nižším vodním součinitelem „má snahu se tomuto zlomení bránit“. Současně se u vzorků ze směsi s nižším vodním součinitelem vytváří před úplným zlomením větší mikroporuchy (Obr. 3.2.14 vpravo) než u vzorku s vyšším vodním součinitelem, což opět pravděpodobně souvisí s lepší vazbou matrice vzorků.



Obr. 3.2.15: Parametry signálů AE: délka trvání (levý graf), energie (pravý graf) (parametry signálů AE jsou určeny ze zatěžování do maximální síly)

Na grafu (Obr. 3.2.15 vlevo) je vidět, že délka trvání signálů je vyšší u vzorků ze směsi s nižším vodním součinitelem, což pravděpodobně souvisí s lepší vyzářností matrice, a i vyšší dávkou cementu ve směsi, ve vzorcích ze směsi s vyšším vodním součinitelem dochází k většímu tlumení signálu. Z grafu (Obr. 3.2.15 vpravo), je vidět, že zachycená energie signálů AE je podstatně vyšší u vzorků ze směsi s nižším vodním součinitelem, což opět ukazuje na hodnotnější vazbu v matrici betonu.

## Betony – vliv provzdušnění

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“. Cílem experimentů bylo porovnat cementové betony s a bez provzdušňující přísady (označení P – provzdušněný; označení N – neprovzdušněný, složení směsí viz Tab. 3.2.2) a jejího vlivu na parametry signálů AE, během tříbodového ohybového testu. Pro experiment byly vytvořeny trávce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Délka rozpětí byla 300 mm. Zářez (koncentrátor napětí) byl vyroben diamantovou pilou a jeho hloubka byla asi 33 mm, tedy 1/3 výšky trávce. Tříbodové ohybové testy byly prováděny za použití lisu Heckert FPZ 100/1 v rozsahu 0-10 kN ve zkušebně Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Brno, Vysoké učení technické v Brně (Topolář, 2015c).

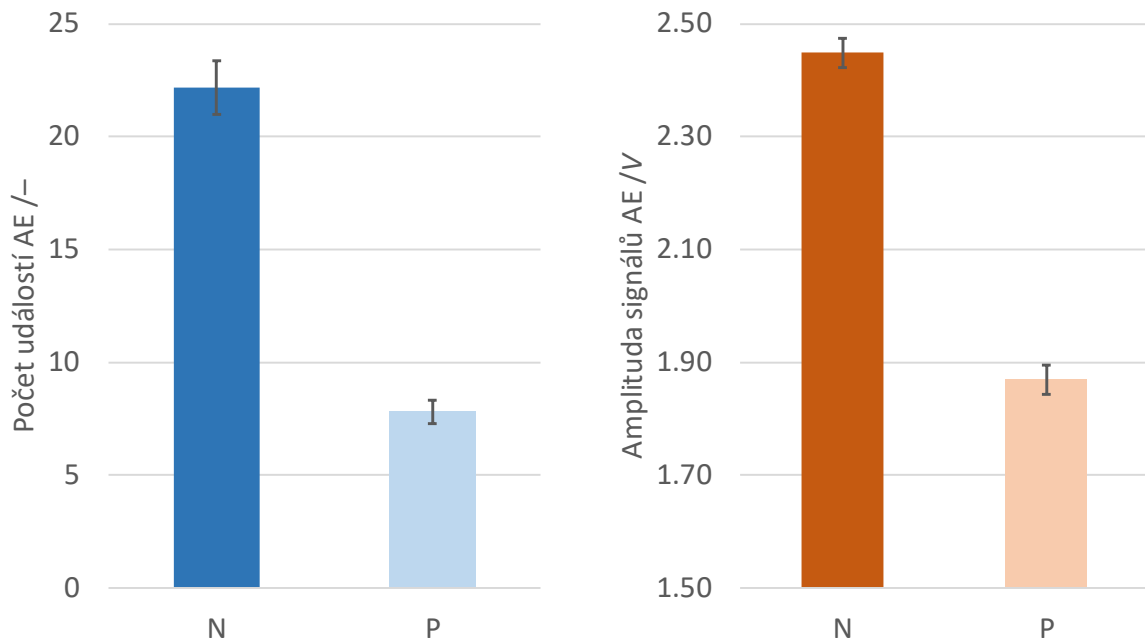
Tab. 3.2.2: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> a vlastnosti čerstvé betonové směsi (Topolář, 2015c)

Označení vzorků	N	P
Složka/Vlastnost		
Cement 42,5 R /kg	338	335
Písek 0/4 /kg	905	850
Kamenivo 4/8 /kg	183	312
Kamenivo 8/16 /kg	667	526
Voda /kg	176	164
Superplastifikátor /kg	1,77	1,70
Provzdušnění /kg	–	0,76
Vodní součinitel /–	0,48	0,45
Objemová hmotnost /kgm <sup>3</sup>	2270	2190
Sednutí /mm	65	55
Obsah vzduchu /%	4,5	6,2
Pevnost v tlaku (28 dní) /MPa	52,2	53,7
Pevnost v tahu za ohybu (28 dní) /MPa	5,6	5,3

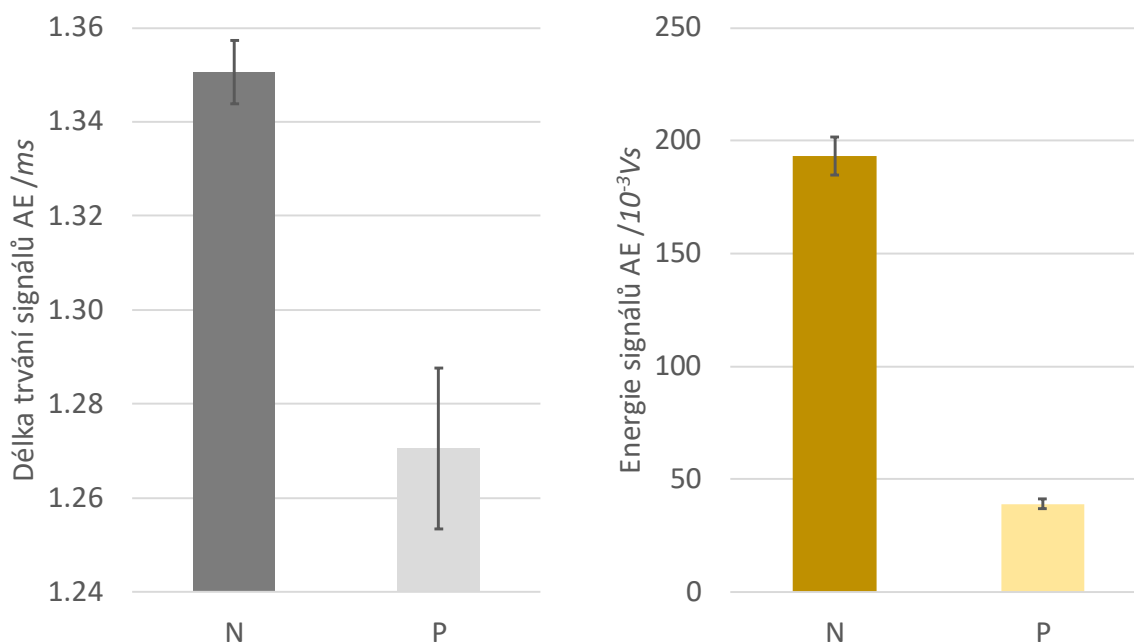
Pro vyhodnocení parametrů AE byla pozornost zaměřena na čtyři základní parametry popisující signál AE: počet událostí AE (Obr. 3.2.16 vlevo), amplitudu (Obr. 3.2.16 vpravo), délku trvání (Obr. 3.2.17 vlevo) a energii (Obr. 3.2.17 vpravo) signálů AE.

Získané výsledky jsou uvedeny ve formě aritmetického průměru (získaného ze 3 nezávislých měření) a standardních odchylek jako chybových úseček (Topolář, 2015c).

Počet událostí AE (Obr. 3.2.16 vlevo) s provzdušněním poklesl o asi 65 % pravděpodobně proto, že uzavřené vzduchové póry v provzdušněném betonu a některé zejména menší typy mikroporuch „pochytaly“ a nedovolily signálům AE dojít až ke snímačům AE. Nejspíše i z tohoto důvodu je amplituda signálů AE (Obr. 3.2.16 vpravo) nižší (o asi 24 %) u provzdušněného betonu než u neprovzdušněného.



Obr. 3.2.16: Parametry signálů AE: počet událostí (levý graf), amplituda (pravý graf) (parametry signálů AE jsou určeny ze zatěžování do maximální síly)

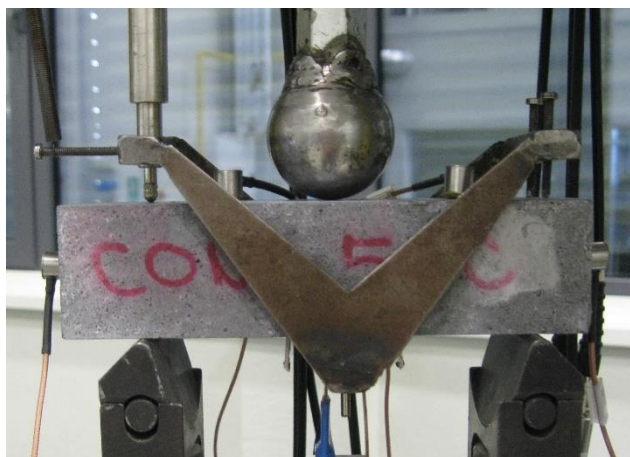


Obr. 3.2.17: Parametry signálů AE: délka trvání (levý graf), energie (pravý graf) (parametry signálů AE jsou určeny ze zatěžování do maximální síly)

Provzdušnění betonu způsobilo i pokles doby trvání signálů (Obr. 3.2.17 vlevo) a větší rozptyl zaznamenaných hodnot. Uzavřené vzduchové póry pravděpodobně způsobují větší útlum signálů AE. Uvolněná energie signálů AE (Obr. 3.2.17 vpravo) u vzorků z neprovzdušněného betonu je přibližně pětikrát vyšší než u betonu provzdušněného, což opět způsobují uzavřené póry v betonu.

### Jemnozrnny alkalicky aktivovaný kompozit – vliv přidaného grafitu

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 16-00567S „Alkalicky aktivované aluminosilikátové kompozity se zvýšenou elektrickou vodivostí“. Cílem experimentů bylo porovnat alkalicky aktivované malty s různým množstvím přidaného grafitového prášku a zjistit jeho vliv na parametry signálů AE, během tříbodového ohybového testu. Grafitový prášek byl přidán v množství 5, 10 a 15 % hmotnosti strusky. Připravené směsi, jejichž složení je v Tab. 3.2.3, byly odlity do hranolových forem (40 x 40 x 160 mm) a po 20 hodinách byly vzorky odformovány a ponořeny do vody na dalších 27 dní před ohybovým testem.



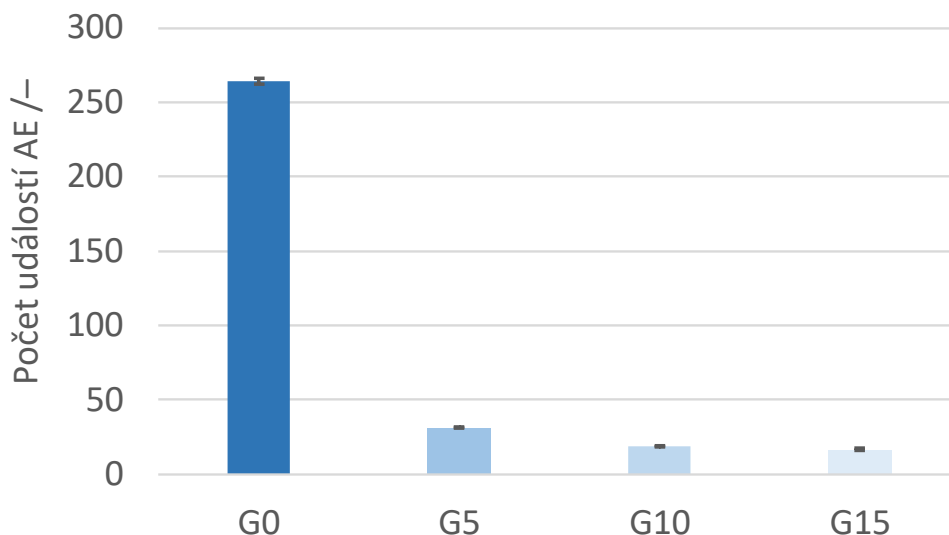
Obr. 3.2.18: Umístění vzorku v lisu a rozmístění snímačů AE

Zářez (koncentrátor napětí) byl vyroben diamantovou pilou a jeho hloubka byla asi 33 mm, tedy 1/3 výšky trámce. Délka rozpětí byla 120 mm viz Obr. 3.2.18.

Tab. 3.2.3: Složení alkalicky aktivovaných kompozitů (Rovnaník, 2016b)

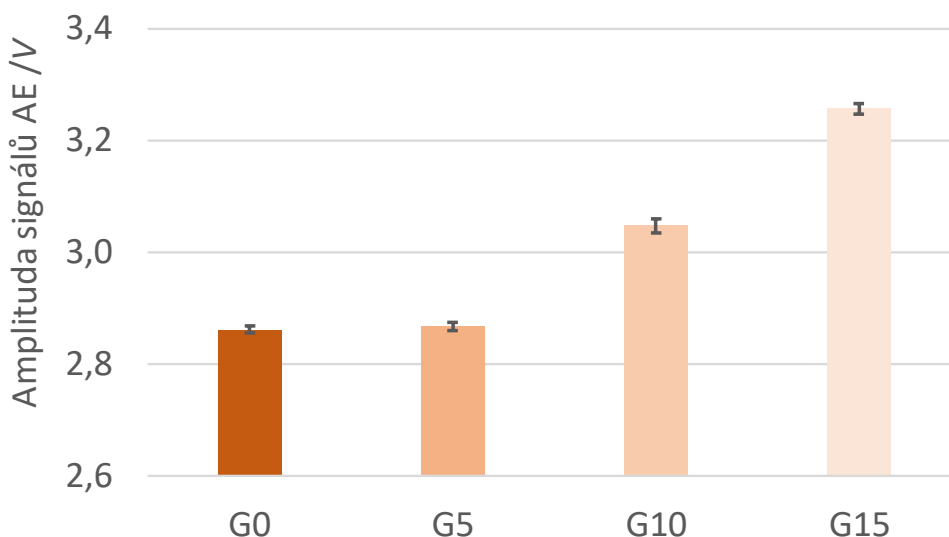
Označení vzorků	G0	G5	G10	G15
<b>Složka/Vlastnost</b>				
Struska /kg	0,45			
Křemičitan sodný /kg	0,09			
Kamenivo 0/2,5 /kg	1,35			
Voda /kg	0,18	0,135	0,09	0,075
Grafitový prášek /kg	–	0,0225	0,045	0,0675
0,5 % Triton X 100 /l	–	0,06	0,12	0,18
1 % Lukosan S /l	–	0,01	0,02	0,03

Tříbodové ohybové testy byly prováděny za použití elektromechanického zkušebního lisu LabTest 6.1000 v rozmezí 0-100 kN v laboratoři AdMaS centra, Fakulty stavební, Vysoké učení technické v Brně (Rovnaník, 2016b; Topolář, 2016b). Pro vyhodnocení parametrů AE byla pozornost zaměřena na čtyři základní parametry popisující signál AE: počet událostí AE (Obr. 3.2.19), amplitudu (Obr. 3.2.20), délku trvání (Obr. 3.2.21) a energii (Obr. 3.2.22) signálů AE.



Obr. 3.2.19: Zaznamenaný počet událostí AE pro jednotlivé směsi (počet událostí AE je určen z celého průběhu měření)

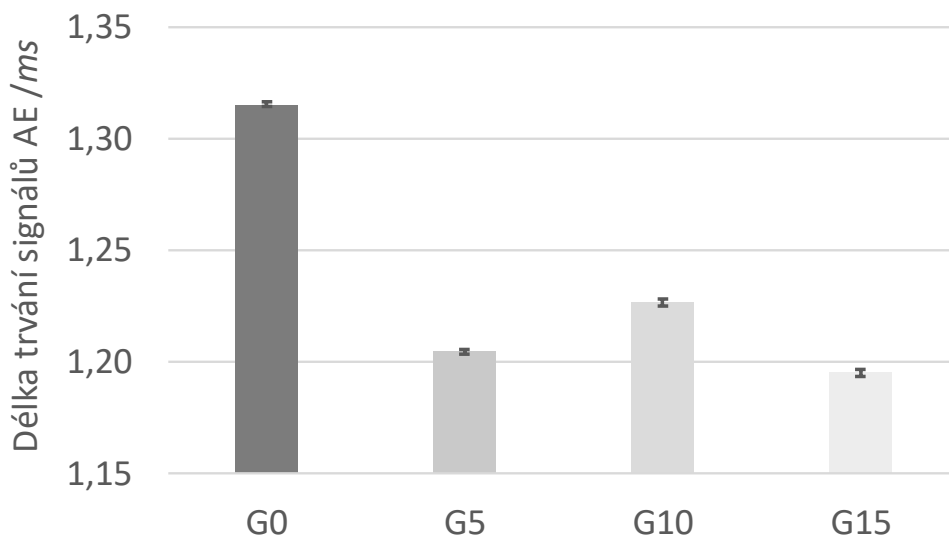
Přidání grafitového prášku do směsi alkalicky aktivované strusky způsobilo snížení počtu událostí AE (Obr. 3.2.19) o přibližně 88 % a s množstvím přidaného grafitu ještě klesá. Což naznačuje, že alkalicky aktivovaný struskový kompozit s grafitovým práškem je pravděpodobně křehčí než referenční směs z alkalicky aktivované strusky, také tento výsledek ukazuje na zhoršení vazby v matici vzorku.



Obr. 3.2.20: Zaznamenaná amplituda signálů AE pro jednotlivé směsi (amplituda signálů AE je určena z celého průběhu měření)

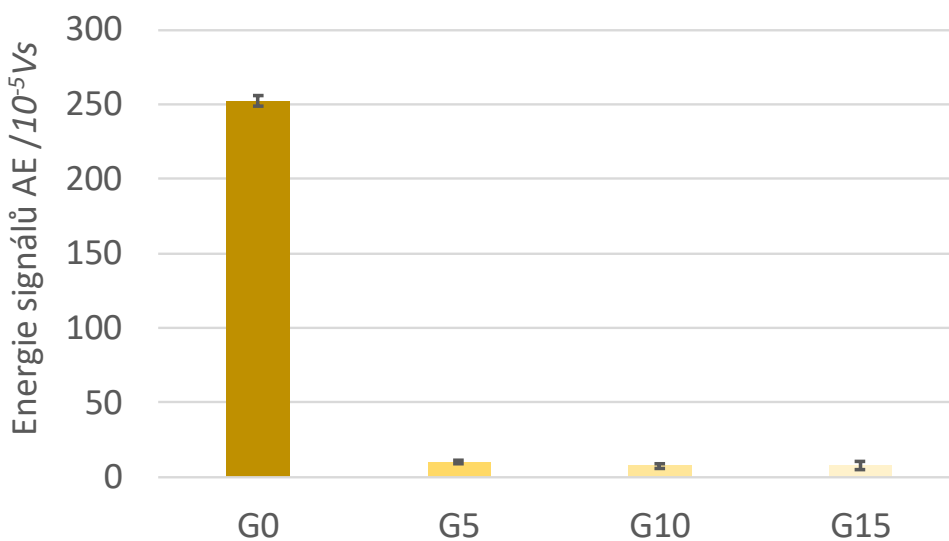
Přidání 5 % grafitového prášku neovlivnilo velikost amplitudy signálů AE (Obr. 3.2.20), ale velikost amplitudy se zvýšila až s přidáním 10 % a 15 % grafitového prášku. Což znamená, že směsi s vyšším obsahem grafitového prášku mají horší vazbu matrice než referenční malta, protože při zatížení při lomu se vytváří menší počet (počet událostí AE) mnohem větších trhlin (amplituda signálů AE).





Obr. 3.2.21: Zaznamenaná délka trvání signálů AE pro jednotlivé směsi (délka trvání signálů AE je určena z celého průběhu měření)

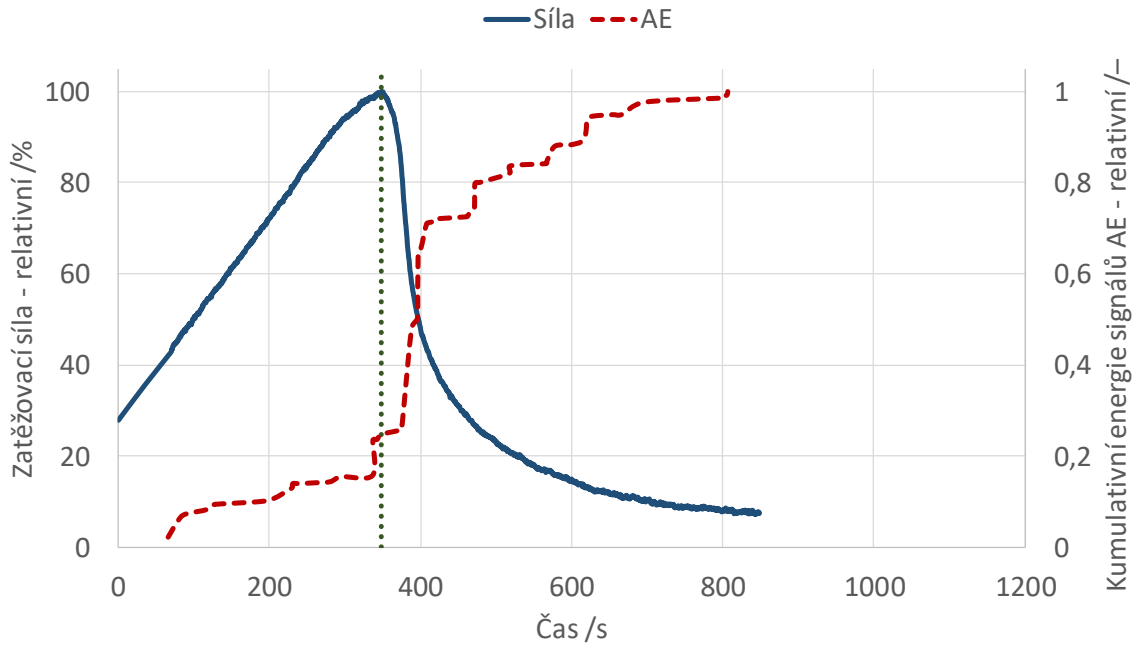
Přidání grafitového prášku do alkalicky aktivovaných struskových směsí nezpůsobí výraznější změny v délce trvání signálů AE. Pouze přidání grafitového prášku mírně zvýší útlum akustického signálu, ale útlum signálů AE se zvyšujícím se množstvím grafitového prášku není významný.



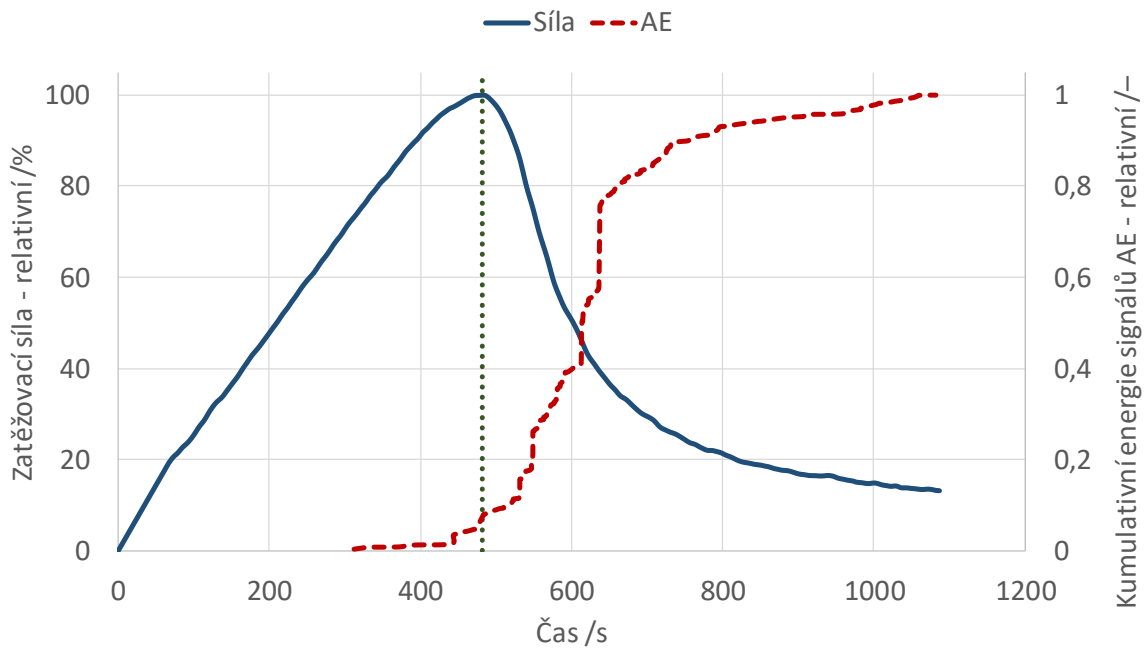
Obr. 3.2.22: Zaznamenaná energie signálů AE pro jednotlivé směsi (energie signálů AE je určena z celého průběhu měření)

Směsi s alkalicky aktivovanou struskou a grafitovým práškem vykazují ve srovnání s referenční směsí velmi nízkou energii signálů AE (Obr. 3.2.22). Přidání grafitu způsobuje při mechanickém zatížení nižší akumulaci AE energie při šíření mikroporuch. Toto chování lze vysvětlit tak, že přidání grafitového prášku umožňuje snadnější vznik a šíření mikroporuch.

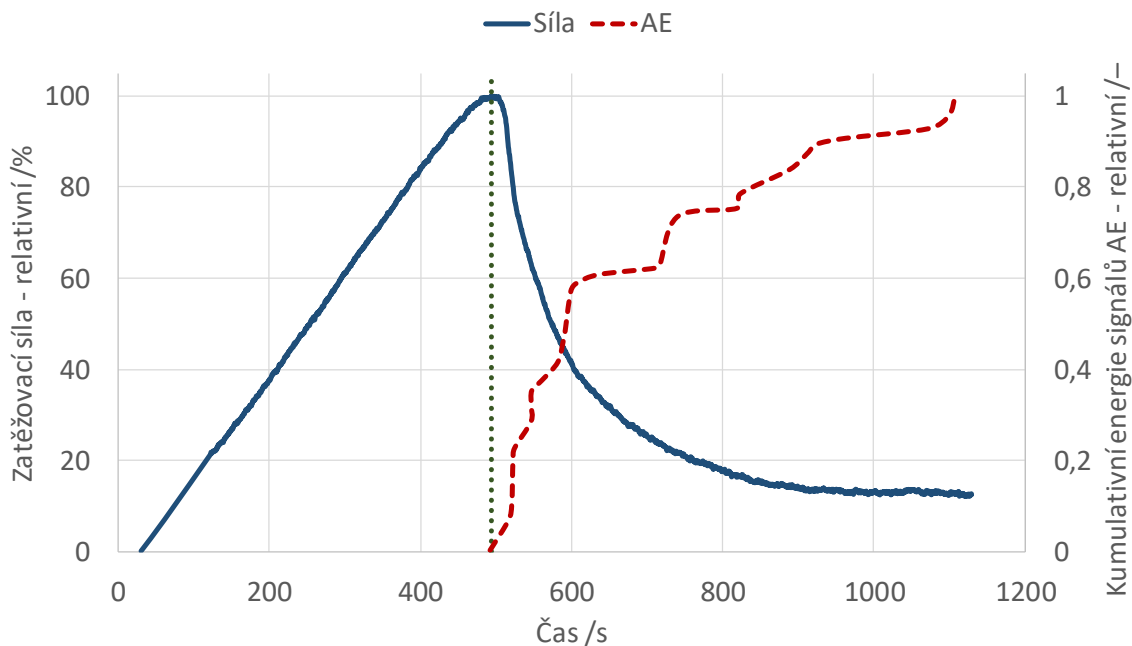
K posouzení povahy vznikajících mikroporuch je použito kumulativní křivky energie signálů AE a relativního zatížení v závislosti na čase viz Obr. 3.2.23 až Obr. 3.2.26.



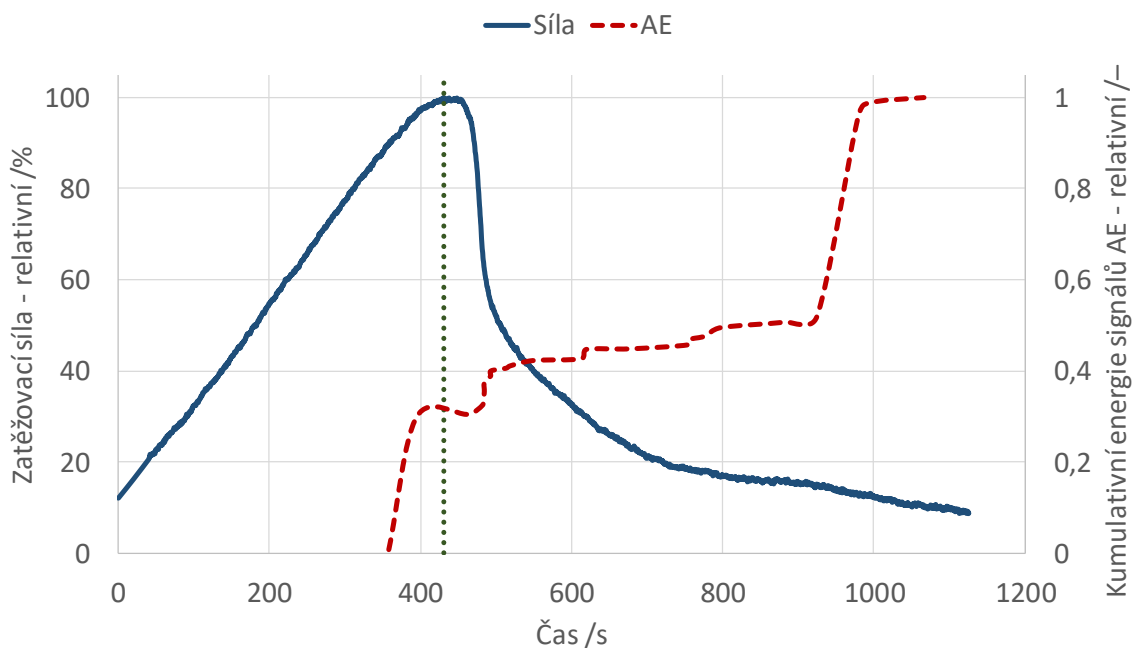
Obr. 3.2.23: Kumulativní křivka energie signálů AE a relativního zatížení v závislosti na čase pro vzorek G0



Obr. 3.2.24: Kumulativní křivka energie signálů AE a relativního zatížení v závislosti na čase pro vzorek G5



Obr. 3.2.25: Kumulativní křivka energie signálů AE a relativního zatížení v závislosti na čase pro vzorek G10



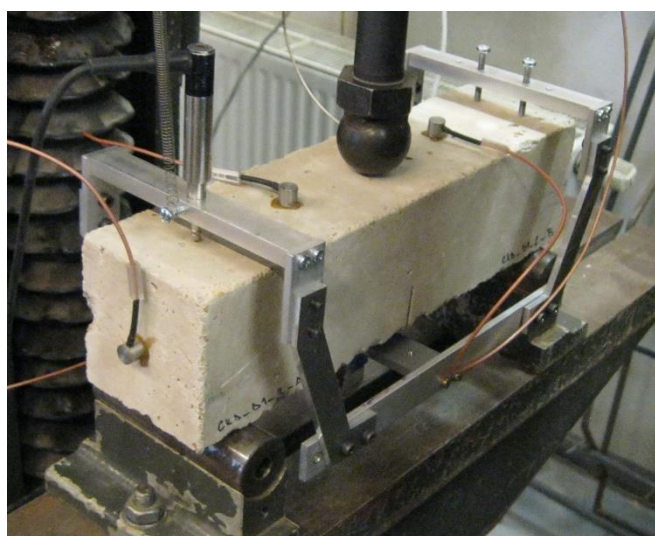
Obr. 3.2.26: Kumulativní křivka energie signálů AE a relativního zatížení v závislosti na čase pro vzorek G15

Z výše uvedených grafů je vidět, že aktivita signálů AE začíná před dosažením maximálního zatížení. Což znamená, že začátek vzniku a rozvoje mikroporuch v materiálu, a tím i uvolnění AE energie, začíná přibližně na 40 % u vzorku G0, na 75 % u vzorku G5, na 100 % u vzorku G10 a na 90 % u vzorku G15. Vzhledem k výše uvedenému lze tedy říci, že určité zvýšení množství grafitového prášku oddálí počátek

vzniku prvních mikroporuch v materiálu, ale toto zvyšování nejde do nekonečna, jak ukazují výsledky u vzorku G15.

### **Jemnozrný alkalicky aktivovaný kompozit – vliv popílku a cementového odprašku**

Naměřená data byla získána při řešení projektu specifického výzkumu FAST/FCH-J-14-2371 „Analýza nukleace trhlin a objemových změn u jemnozrných kompozitů na bázi portlandského cementu i alkalicky aktivované strusky“. Cílem experimentů bylo porovnat alkalicky aktivované betony s příměsí popílku a cementových odprašků a jejich vlivu na parametry signálů AE, během tříbodového ohybového testu ve stáří 28 a 90 dní. Pro každý beton bylo připraveno šest vzorků o jmenovitých rozměrech 75 × 75 × 295 mm viz Obr. 3.2.27.



Obr. 3.2.27: Umístění vzorku v lisu a rozmístění snímačů AE

Složení směsi je uvedeno v Tab. 3.2.4, kdy hlavní rozdíl je v použití popílku (FA) a cementových odprašků (CKD). Vzorky byly po 24 hodinách odformovány a ponechány v laboratorních podmínkách. Tříbodové ohybové testy byly provedeny na trámcích s centrálním zářezem, který byl vyhotoven diamantovou pilou do hloubky 1/3 výšky trámce. Délka rozpětí byla 245 mm. Tříbodové ohybové testy byly provedeny za použití lisu Heckert FPZ 100 v rozsahu 0-10 kN v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně (Šimonová, 2016).

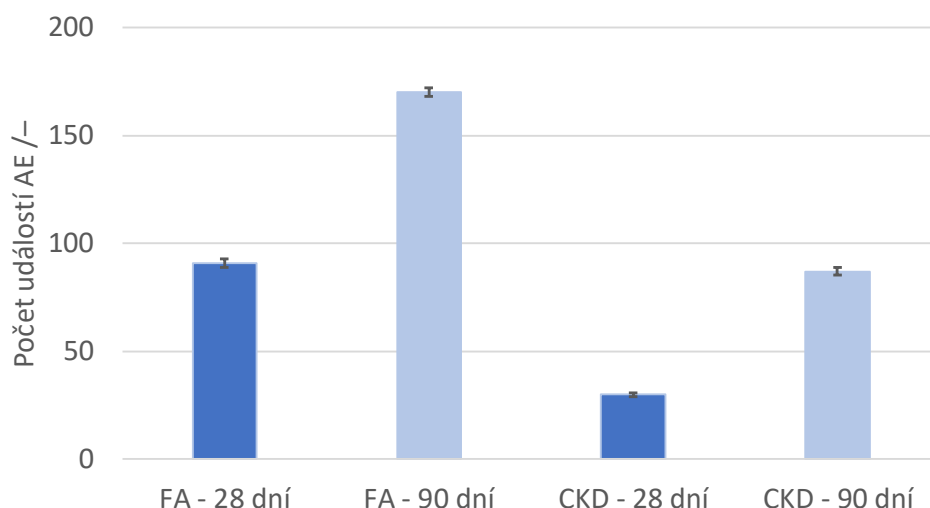
Cementářské odprašky (cement kiln dust – CKD), jsou vedlejším produktem při výrobě cementu. Vznikají v rotační peci při produkci portlandského slínku a lze je v zásadě rozdělit na dva typy. První typ vzniká únikem mikročástic spolu se spalovacími plyny na začátku předehřívacího pásma. Mikročástice se zachytávají na elektrostatických filtrech. Složení tohoto typu odprašků je podobné složení portlandského cementu se zvýšeným obsahem volného vápna, alkálií a sloučenin síry (Siddique, 2007). Druhý typ souvisí se zařazením tzv. bypassu mezi rotační pec a předehřívací pásmo. Proto jsou

tyto odprašky někdy označovány jako bypassové (cement bypass dust – CBPD) (Saito, 2011).

Tab. 3.2.4: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> alkalicky aktivovaných betonů

<b>Označení vzorků</b>	<b>FA</b>	<b>CKD</b>
<b>Složka</b>		
Struska /kg	233	300
Popílek /kg	233	–
Cementářské odprašky /kg	–	100
Technologické kaly /kg	506	435
Kamenivo 0/4 /kg	193	372
Kamenivo 4/8 /kg	394	423
Kamenivo 8/16 /kg	550	591
Voda /kg	151	106
ChrysoPlast 460 /kg	0,9	0,8
Stachment AC600 /kg	4,7	2,0

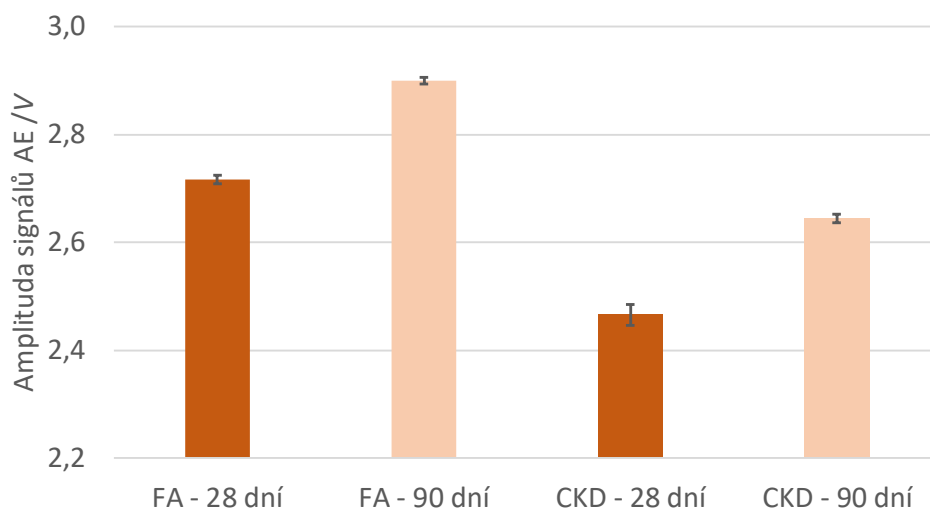
Vysokoteplotní popílek je vedlejší produkt spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Do pece je jemně mleté uhlí vháněno společně s horkým vzduchem a za vstupních teplot kolem 1500 °C okamžitě dochází ke spálení této suspenze. Nespalitelné anorganické látky, nazývané popeloviny (nejčastěji jílovité materiály), jsou roztaveny a rychle ochlazeny během jejich únosu spalinami. Vzniká tak práškový materiál složený především z kulovitých amorfních částic, který je zachycován na mechanických, či elektrostatických odlučovačích. Tento typ popílku je nazýván létavý (Siddique, 2007).



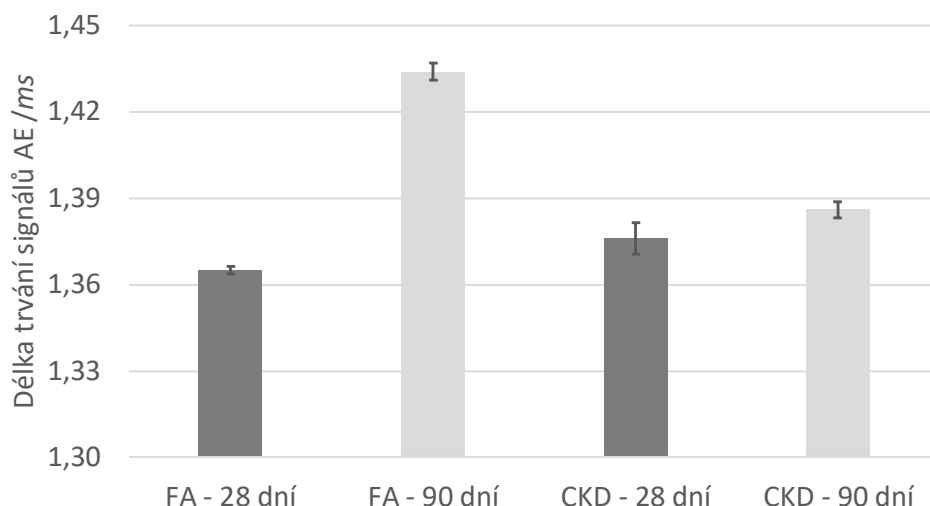
Obr. 3.2.28: Zaznamenaný počet událostí AE pro jednotlivé směsi a stáří vzorků (počet událostí AE je určen ze zatěžování do maximální síly)

Z grafu (Obr. 3.2.28) je vidět, že CKD vzorky vykazují vyšší křehkost matrice než FA vzorky, což je vidět na nižším počtu událostí AE jak po 28 dnech tak i po 90 dnech zrání betonů. Současně je vidět, že počet událostí AE s přibývajícím časem vzrostl dvakrát u směsi FA a téměř třikrát u směsi CKD. Což pravděpodobně znamená, že materiály se po 90 dnech staly více houževnaté.

Na srovnání velikostí amplitudy signálů AE (Obr. 3.2.29) je vidět, že v případě FA vzorků je tato amplituda vyšší, což nejspíše souvisí i s větší velikostí mikroporuch, které se vytvářejí před úplným zlomením vzorků. Také je vidět, že opět u obou směsí tato amplituda signálů AE vzrostla. Což patrně znamená, že matrice se stala pevnější než ve stáří 28 dní.

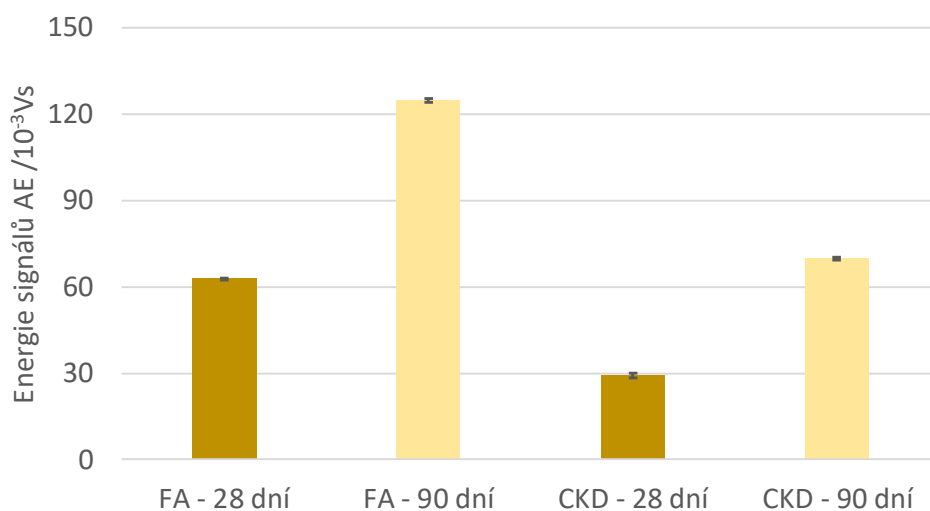


Obr. 3.2.29: Zaznamenaná amplituda signálů AE pro jednotlivé směsi a stáří vzorků (amplituda signálů AE je určena ze zatěžování do maximální síly)



Obr. 3.2.30: Zaznamenaná délka trvání signálů AE pro jednotlivé směsi a stáří vzorků (délka trvání signálů AE je určena ze zatěžování do maximální síly)

Na hodnotách délky trvání signálů AE (Obr. 3.2.30) je vidět, že po 28 dnech jsou hodnoty přibližně stejné u obou směsí. Tento parametr AE je také citlivý na množství volné vody ve vzorcích a tím je pravděpodobně způsobena velice podobná zaznamenaná hodnota po 28 dnech. Opět u obou směsí zaznamenáváme zvětšení hodnot, což v případě FA směsi je více dramatictější, což může ukazovat na lepší vazby v matrici a proto se signál méně utlumí.



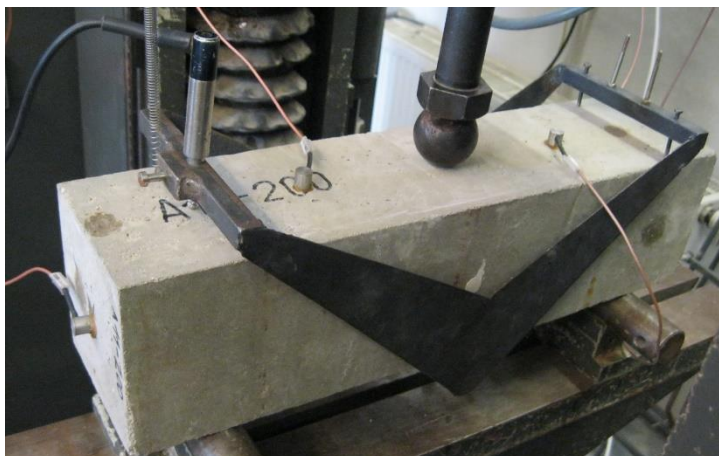
Obr. 3.2.31: Zaznamenaná energie signálů AE pro jednotlivé směsi a stáří vzorků (energie signálů AE je určena ze zatěžování do maximální síly)

Uvolněná energie signálů AE (Obr. 3.2.31) je opět výrazně vyšší u FA vzorků v obou měřených obdobích, což opět ukazuje na snad lepší vazbu matrice u FA vzorků. Z hlediska parametrů signálů AE se ukazuje, že v případě tříbodového ohybového testu alkalicky aktivovaného betonu s náhradou strusky popílkem (FA

vzorky) vyšší než s přidavkem cementových odprašků (CKD vzorky), ale postupem času u obou dochází ke zlepšení dané odolnosti.

### Beton – vliv tepelné degradace

Naměřená data byla získána při řešení projektu GAČR č. 16-02261S „Využití akustických metod pro nedestruktivní testování stavu betonu degradovaného vysokou teplotou“. Cílem experimentů bylo porovnat cementové betony degradované vysokou teplotou a jejího vlivu na parametry signálů AE, během tříbodového ohybového testu.



Obr. 3.2.32: Umístění vzorku v lisu a rozmístění snímačů AE

V rámci experimentů byly připraveny betonové trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Trámce byly vyrobeny podle směsí Tab. 3.2.5 v laboratoři na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. Vzorky byly 28 dní ve vlhkém uložení při teplotě 20 °C. Následně se vzorky nechaly povrchově oschnout v laboratoři při teplotě 20 °C a poté byly vloženy na 72 h do laboratorní sušárny při teplotě 110 °C zejména kvůli tomu, aby byly zbaveny volné vody ve struktuře.

Tab. 3.2.5: Složení směsi na 1 m<sup>3</sup> (Topolář, 2017c)

Složka	Množství na 1 m <sup>3</sup>
Cement (CEM I 42,5R Mokrý) /kg	345
Kamenivo 0/4 (Žabčice) /kg	813
Kamenivo 8/16 (Olbramovice) /kg	980
Voda /kg	176
Superplastifikátor (SicaViscocrete 2030) /kg	3,1

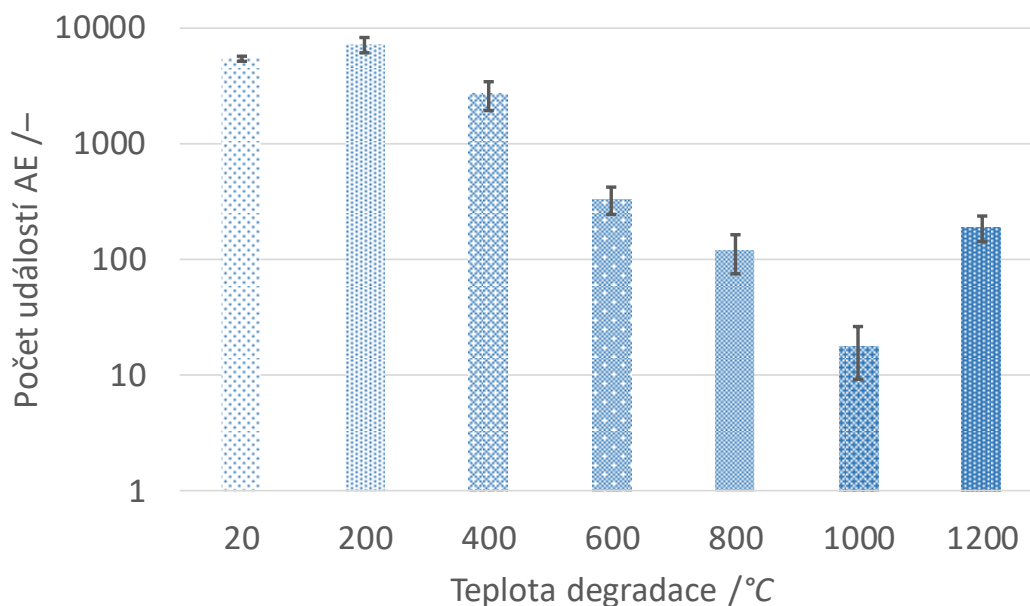


Po dosušení byly trámce zahřívány v programovatelné laboratorní peci. Rychlost ohřevu byla 5 °C/min a daná teplota byla držena po dobu 60 minut následně se trámce nechaly spontánně zchladnout na laboratorní teplotu 20 °C. Srovnávací teplota byla 20 °C vybrané teploty výpalu, pak 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.

Tab. 3.2.6: Mechanické vlastnosti teplotně degradovaných vzorků (Topolář, 2017c)

<b>Vlastnost Označení vzorků</b>	<b>Objemová hmotnost /<math>kgm^3</math></b>	<b>Pevnost v tlaku /MPa</b>	<b>Pevnost v tahu za ohybu /MPa</b>
<b>20</b>	2350	69,9	5,82
<b>200</b>	2310	65,9	5,13
<b>400</b>	2280	55,0	3,15
<b>600</b>	2310	38,2	1,86
<b>800</b>	2240	32,7	0,60
<b>1000</b>	2150	14,8	0,33
<b>1200</b>	2040	13,8	1,47

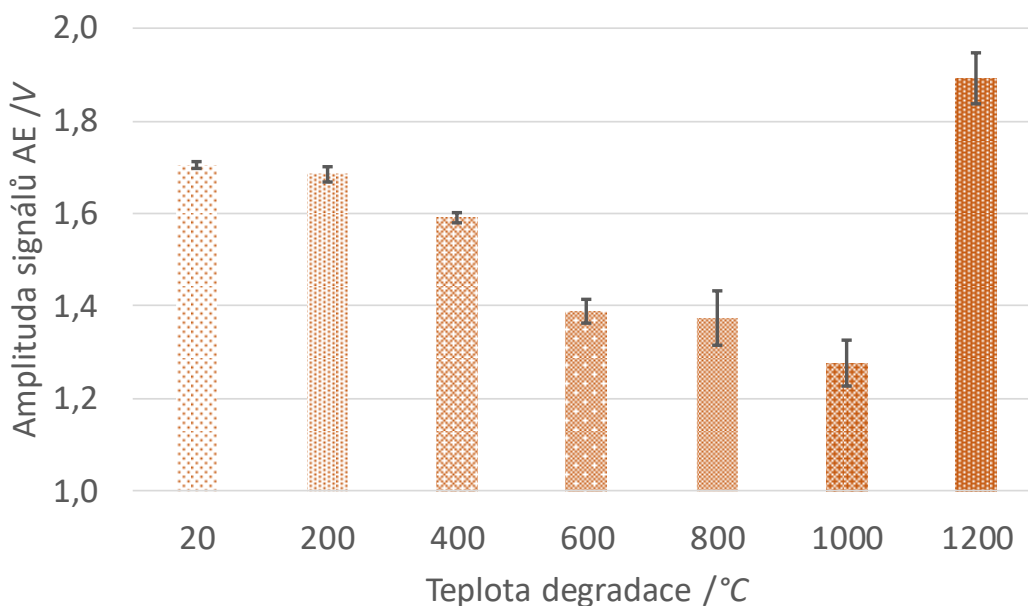
Tříbodové ohybové testy byly provedeny na trámcích s centrálním zářezem, který byl vyhotoven diamantovou pilou do hloubky 1/3 výšky trámce. Délka rozpětí byla 300 mm. Tříbodové ohybové testy byly provedeny za použití lisu Heckert FPZ 100 v rozsahu 0-10 kN v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně.



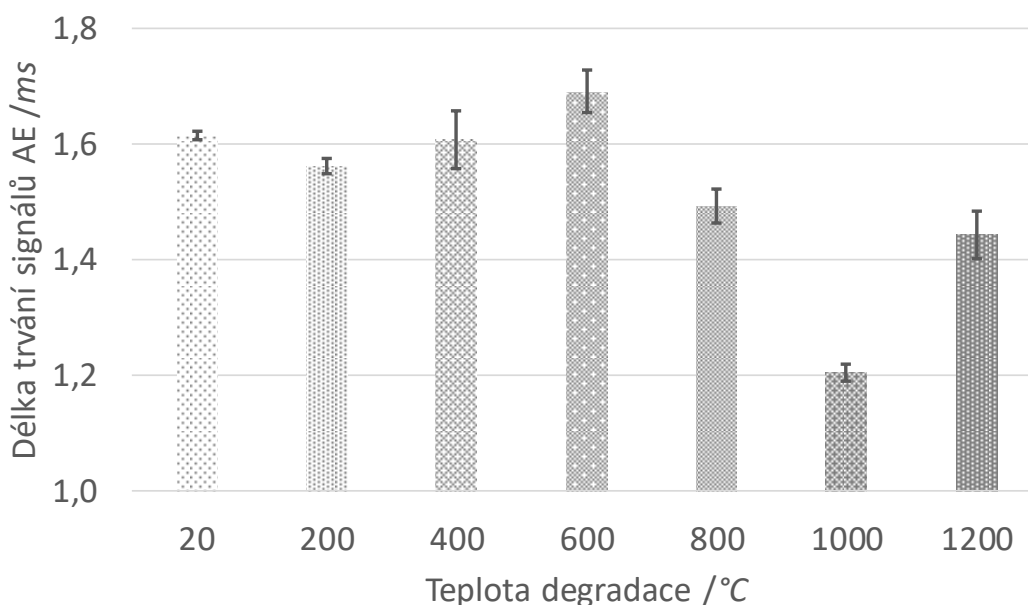
Obr. 3.2.33: Zaznamenaný počet událostí AE pro jednotlivé teploty (počet událostí AE je určen z celého průběhu měření)

Podle grafu (Obr. 3.2:33) lze říci, že vzrůstající teplota výpalu 400–1000 °C způsobuje pokles počtu událostí AE, což ukazuje na zvyšující se křehkost struktury materiálu. Toto chování materiálu se změní při výpalu na 1200 °C, když vzniká Wollastonit [ $\beta$  ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )], který se začíná objevovat při výpalu nad 1000 °C (Bodnárová, 2013) a lze pozorovat zvýšení houževnatosti struktury materiálu. Pro přesnější určení zlomové teploty, kdy se mění struktura (vznik Wollastonitu), by bylo potřebné detailněji proměřit oblast mezi 1000 °C a 1200 °C.

Na grafu Obr. 3.2.34 je znázorněna závislost amplitudy signálů AE na úrovni teplotní degradace. Mechanické vlnění, které se objevuje a šíří uvnitř vzorku během tříbodového ohybového testu, ovlivňují nelinearity v materiálu. Vystavení vzorku vyšším a vyšším teplotám způsobilo změnu struktury, což následně vede ke změně velikosti amplitudy signálů AE generovaných při tříbodovém ohybovém testu. Mikroporuchy vytvářené během zatížení byly pravděpodobně různé velikosti. Vysvětlení tohoto jevu lze nalézt v procesu rozkladu struktury materiálu při teplotní degradaci v intervalu 400–1000 °C. Vzorky, které byly vystaveny teplotě 1200 °C, generují vyšší hodnotu amplitudy než vzorky vystavené nižším teplotám nebo vzorky bez teplotní degradace. To je nejspíše způsobeno strukturálními změnami, které jsou doprovázeny tvorbou nových krystalických fází např. Wollastonitem.



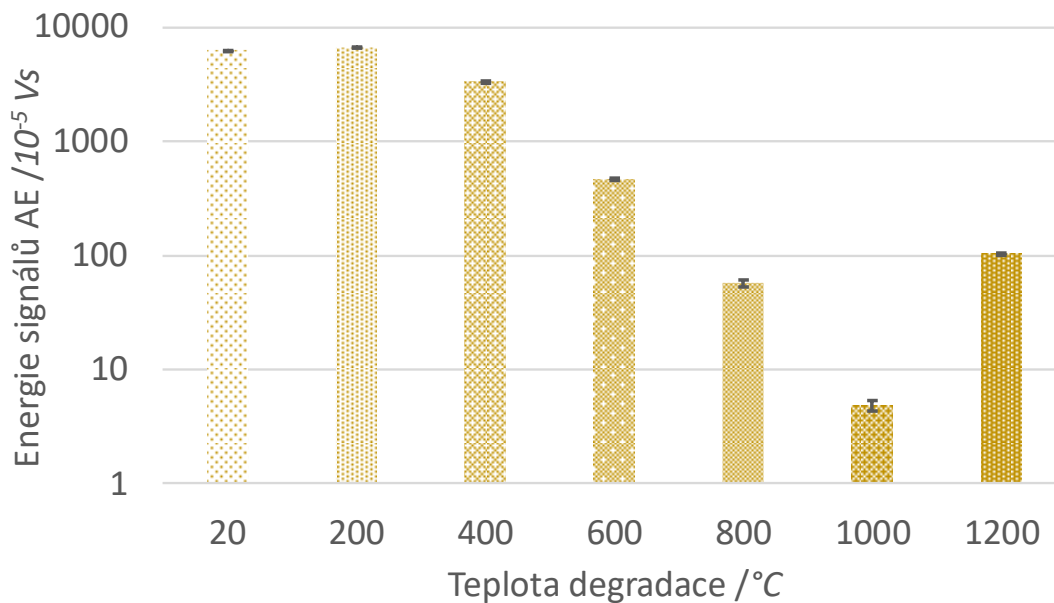
Obr. 3.2.34: Zaznamenaná amplituda signálů AE pro jednotlivé teploty (amplituda signálů AE je určena z celého průběhu měření)



Obr. 3.2.35: Zaznamenaná délka trvání signálů AE pro jednotlivé teploty (délka trvání signálů AE je určena z celého průběhu měření)

Z hlediska délky trvání signálů AE (Obr. 3.2.35) je patrné, že zvyšování teplotní degradace až do teploty 600 °C nemá významný vliv na hodnotu tohoto parametru a délky trvání signálu jsou v rámci chyby měření totožné. Ke změně dochází při zahřátí vzorků na 800 °C a 1000 °C, kdy se hodnota délky trvání signálů AE sníží, což je pravděpodobně spojeno s rozpadem vnitřní struktury materiálu, kdy tento rozpad brání šíření mechanického vlnění, které se následně tlumí. Při zahřátí vzorků na 1200 °C

dochází s výraznou změnou struktury i ke zvýšení hodnot délky trvání signálu AE, což je patrně způsobenou zlepšenou a pro mechanické vlnění hustší vazbou Wollastonitu.



Obr. 3.2.36: Zaznamenaná energie signálů AE pro jednotlivé teploty (energie signálů AE je určena z celého průběhu měření)

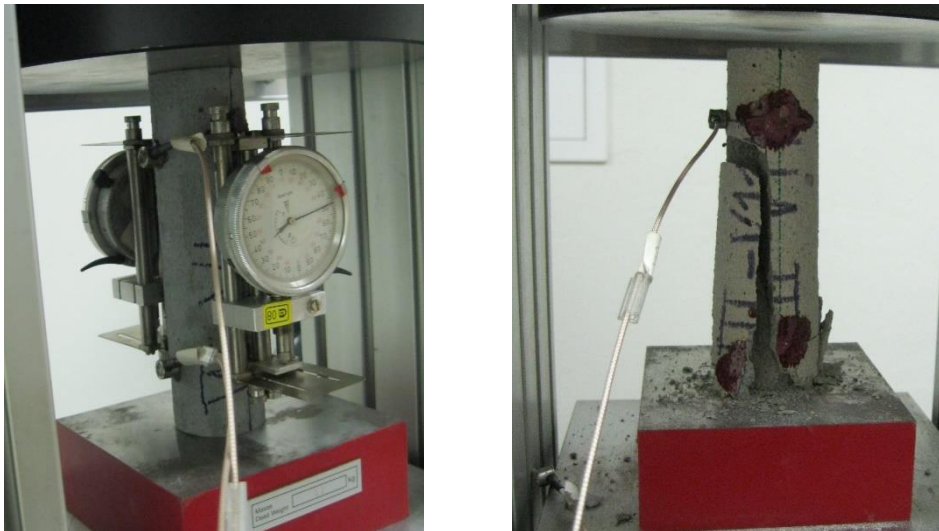
Hodnoty energie signálů AE (Obr. 3.2.36) odpovídá houževnatosti betonových vzorků po teplotní degradaci. Nejvyšší hodnota energie signálů AE byla zaznamenána u vzorků vystavených teplotě 200 °C, což pravděpodobně znamená, že i houževnatost vzorků je vyšší i než v případě nezahříváných vzorků (20 °C). Což znamená, že došlo ke strukturálním změnám, které zabraňují vzniku a růstu trhlin, je totiž zapotřebí více energie pro vytvoření poruch. Lze tedy konstatovat, že zvyšující se teplota degradace, a to pro teploty nad 200 °C, způsobuje pokles množství energie signálů AE uvolněné během třibodového ohybového testu, což patrně ukazuje na zvýšenou křehkost materiálu. Toto chování materiálu se opět mění při teplotě nad 1000 °C, kdy vzniká Wollastonit.

### 3.3 Ostatní – mechanické zatěžování, degradační procesy

#### Statický modul pružnosti – jemnozrné kompozity – různé směsi

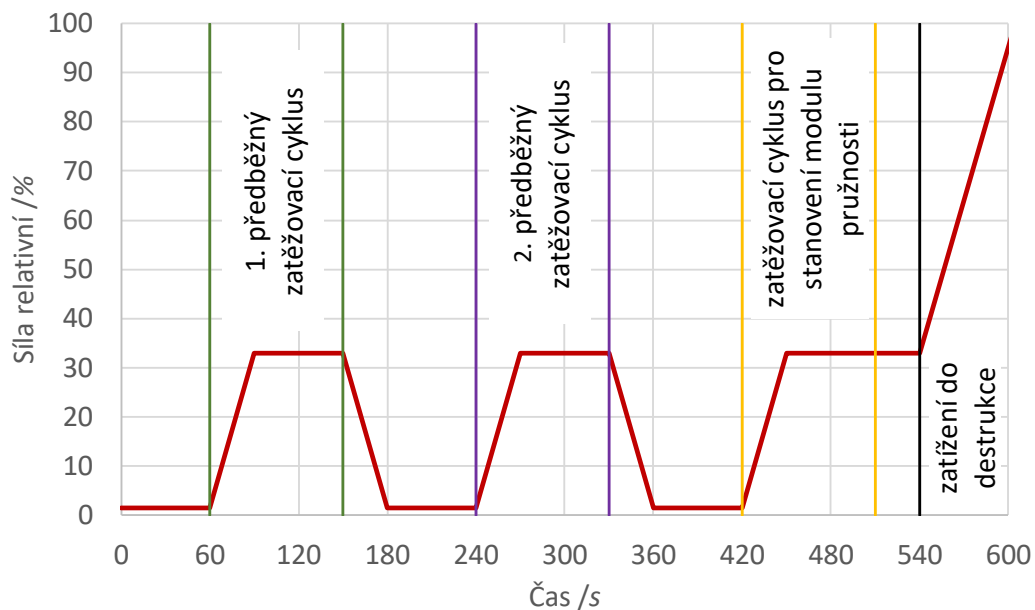
Pro experiment byly vybrány jemnozrné kompozity na bázi portlandského cementu. Při návrhu experimentu a výrobě čerstvých směsí byl kladen důraz na výsledné hodnoty pevnostních i pružnostních charakteristik ztvrdlých kompozitů tak, aby se tyto hodnoty vzájemně významněji lišily. Pro zkoušky byla vyrobena zkušební tělesa tvaru válce o jmenovitém průměru 40 mm a jmenovité délce 160 mm. Byly vybrány tři následující cementové kompozity:

- **COMP\_13:** pro výrobu zkušebních těles tohoto kompozitu byl vybrán materiál s nejnižší předpokládanou hodnotou statického modulu pružnosti (13 GPa). Jedná se o polymer-cementovou maltu (PCM). Tyto PCM či polymer-cementové betony (PCC) se velmi často používají pro ochranu a sanaci betonových konstrukcí (Malorny, 2013). PCM a PCC nejčastěji nacházejí uplatnění v oblasti reprofilace nejen betonových konstrukcí či jejich částí, při injektování a vyplňování trhlin nebo při lepení speciální nerezové šroubovicové výztuže. Pro výrobu kompozitu COMP\_13 bylo použito ruční míchadlo, postup výroby včetně doby míchání byl proveden v souladu s postupem uvedeným v technickém listu použité PCM. Zkušební tělesa byla vyrobena z dvousložkové směsi, kde tekutou složku tvořila vodní disperze kopolymerů a práškovou složku směs portlandských cementů a minerálních plniv.
- **COMP\_28:** pro účely výroby zkušebních těles s vyšším předpokládaným statickým modulem pružnosti (28 GPa) byla použita cementová malta. Jemnozrný cementový kompozit COMP\_28 byl navržen dle požadavků normy ČSN EN 196-1. Čerstvý kompozit byl vyroben pomocí křemičitého písku s maximální velikostí zrna kameniva 2 mm standardizovaného dle ČSN EN 196-1, pomocí Portlandského cementu typu 42,5 R a vody v poměru 3:1:0,5. Pro výrobu čerstvé směsi s vodním součinitelem 0,5 byla použita laboratorní míchačka s nastavitelnou rychlostí.
- **COMP\_34:** pro výrobu kompozitu s nejvyšší očekávanou hodnotou statického modulu pružnosti (34 GPa) byla upravena receptura kompozitu s označením COMP\_28. Křemičitý písek odpovídající požadavkům normy ČSN EN 196-1, Portlandský cement typu 42,5 R a voda byly smíchány v poměru 3:1:0,35 s přidáním superplastifikátoru SVC4035 v množství 1 % z hmotnosti cementu (3:1:0,35). Vodní součinitel tohoto kompozitu byl tedy 0,35 a pro výrobu byla opět použita míchačka s nastavitelnou rychlostí otáček.



Obr. 3.3.1: Umístění vzorku v lisu s indikátorovými hodinkami pro měření statického modulu pružnosti a rozmístění snímačů AE (vlevo), vzorek po destrukci (vpravo)

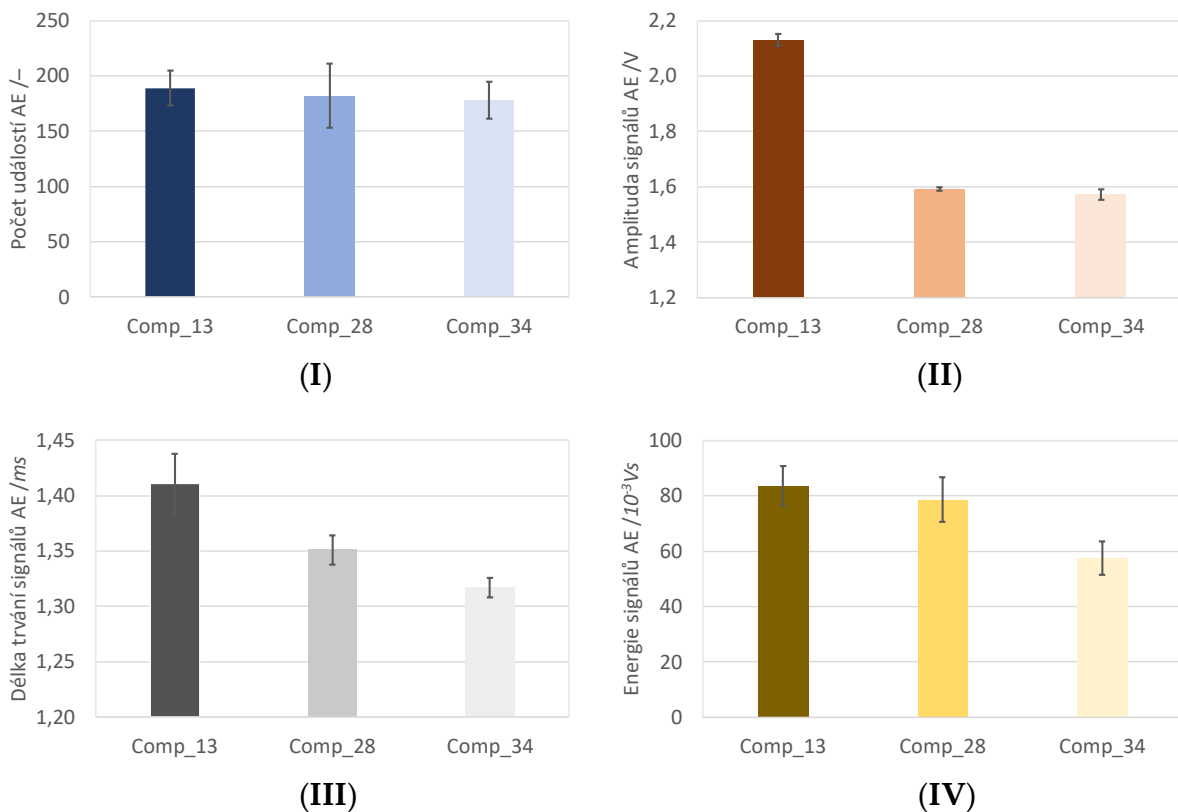
Všechna zkušební tělesa nebyla záměrně v průběhu celé doby zrání nijak ošetřována a jejich povrch byl po celou dobu vystaven volnému vysychání v laboratorním prostředí s teplotou  $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkostí  $(60 \pm 10) \%$ . Všechny následné zkoušky byly provedeny ve stáří 28 dní od namíchání. Každé zkušební těleso bylo při zkoušce statického modulu pružnosti umístěno do zkušebního hydraulického lisu (Obr. 3.3.1) FORM+TEST s rozsahem 0–200 kN. Podélné deformace zkušebních těles byly stanoveny pomocí dvou mechanických tenzometrů typu HM s číselníkovými úchylkoměry, což je možné vidět na fotografii (Obr. 3.3.1). Mechanické tenzometry měly délku 100 mm a na zkušebním tělese byly osazeny proti sobě.



Obr. 3.3.2: Průběh zkoušky při určování statického modulu pružnosti podle ČSN ISO 1920-10 (závislost relativní zatěžovací síly na čase)

Na grafu (Obr. 3.3.2) je zobrazen relativní průběh zatěžovací síly v tlaku s vyznačenými oblastmi, kdy probíhaly jednotlivé fáze zatěžování podle ČSN ISO 1920-10 a současně tyto oblasti odpovídají i fázím vyhodnocení jednotlivých parametrů signálů AE.

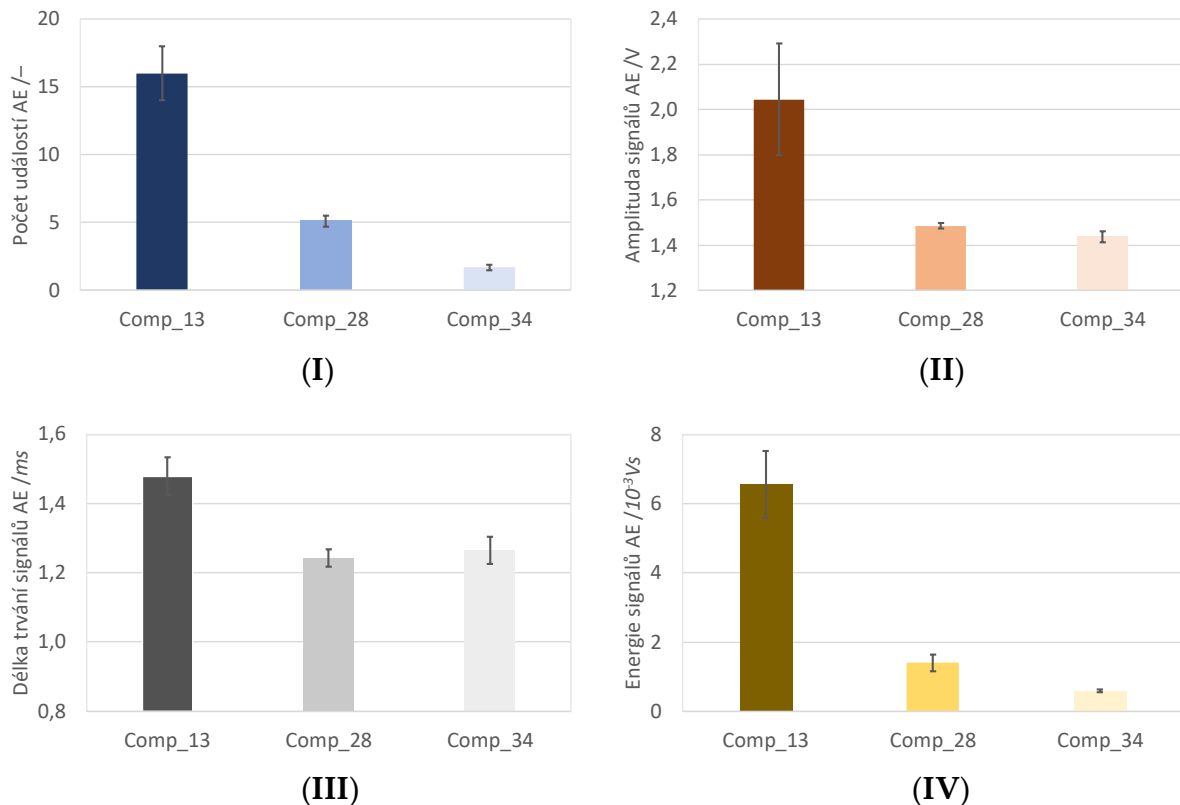
Ze získaných hodnot parametrů AE zachycených během prvního předběžného zatěžovacího cyklu (Obr. 3.3.3) je patrné, že v tomto období je počet událostí, a tedy i množství vznikajících mikrotrhlin, shodný v rámci chyby měření pro všechny tři směsi. Ale charakter vznikajících mikrotrhlin je rozdílný, což ukazují ostatní parametry. Délka trvání signálů AE se zvyšujícím se statickým modulem pružnosti klesá, což v této fázi zatěžování ukazuje na lepší akustickou vodivost materiálu s nižším statickým modulem, která je zřejmě dána složením jednotlivých směsí. Graf amplitudy signálů AE ukazuje, že ač z událostí AE víme, že vzniká přibližně stejné množství mikrotrhlin u všech tří směsí, tak je patrné, že u vzorků COMP\_13 jsou tyto mikrotrhliny o něco větší než u ostatních sad vzorků. Energie signálů AE nám zase říká, že u vzorků s nižším statickým modulem pružnosti je energie uvolněná při tvorbě mikrotrhlin vyšší.



Obr. 3.3.3: Parametry signálů AE během prvního předběžného zatěžovacího cyklu:  
 (I) Počet událostí; (II) Amplituda; (III) Délka trvání; (IV) Energie

Ve fázi druhého předběžného zatěžovacího cyklu (Obr. 3.3.4) se již částečně projevuje absolvované přetvoření z prvního předběžného zatěžovacího cyklu a "paměťový efekt

materiálu tzv. Kaiserův jev”, proto v této fázi vzniká minimální množství nových mikrotrhlin, což je vidět na grafu počtu událostí AE. V této fázi je již potlačen vliv akustické vodivosti materiálu, a proto jsou délky trvání signálů AE srovnatelné. Největší rozdíly mezi jednotlivými sadami vzorků v období druhého předběžného zatěžovacího cyklu se z hlediska parametrů AE ukazují v množství uvolněné energie a velikosti amplitudy od vznikajících mikrotrhlin, kdy u obou těchto parametrů dosahuje nejvyšších hodnot sada vzorků s nejnižším statickým modulem pružnosti, tedy COMP\_13.

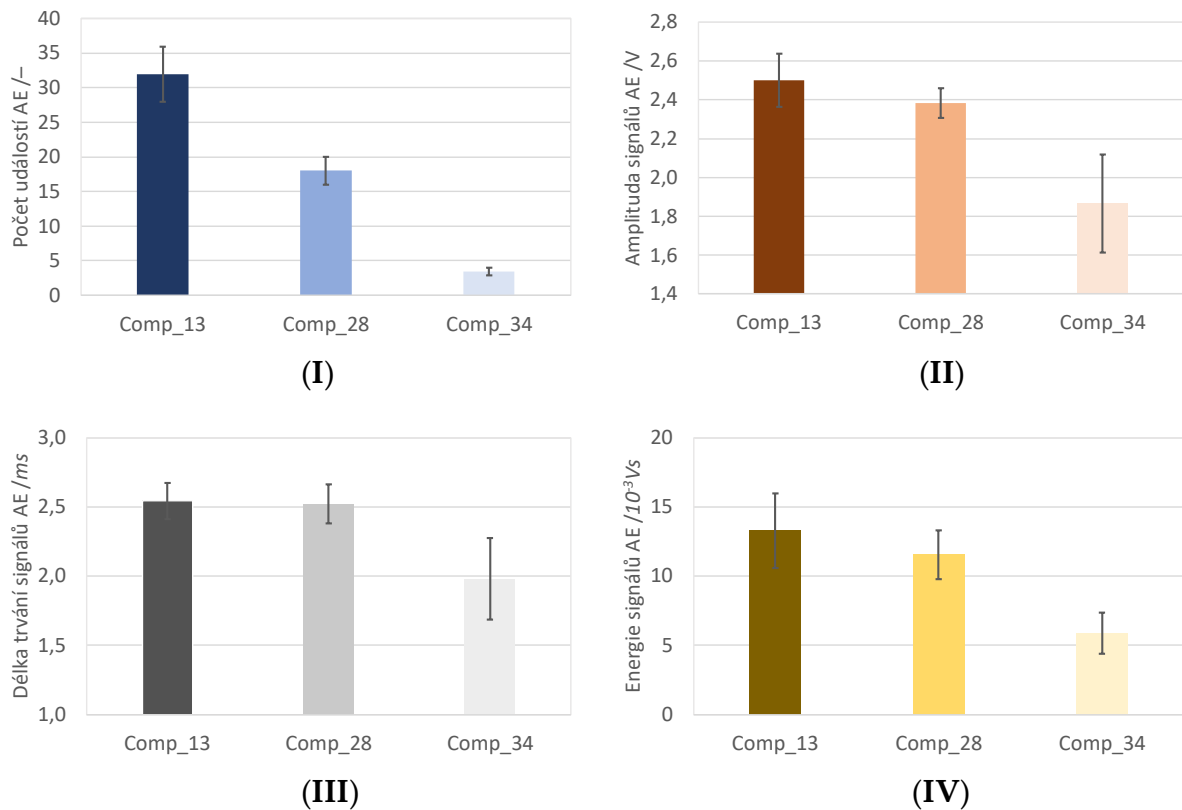


Obr. 3.3.4: Parametry signálů AE během druhého předběžného zatěžovacího cyklu: (I) Počet událostí; (II) Amplituda; (III) Délka trvání; (IV) Energie

Během třetího zatěžovacího cyklu (Obr. 3.3.5), tedy v období určování hodnot statického modulu pružnosti podle ČSN ISO 1920-10, se již naplno projevují rozdíly mezi jednotlivými sadami vzorků. Vzorky s označením COMP\_13 jsou již pravděpodobně protkány sítí mikrotrhlin, a i proto je u nich vyšší variabilita získaných hodnot, kdy nejenže vznikají nové mikrotrhliny, ale ty stávající se zřejmě spojují do větších celků. Se vzrůstajícím statickým modulem pružnosti klesá množství událostí AE, což je dáno odolností struktury proti přetvoření od namáhání, a i mírou předchozího poškození. Délky trvání signálů AE jsou na více než jeden a půl násobku předchozích hodnot (1. a 2. předběžný zatěžovací cyklus), což právě ukazuje na pravděpodobné spojování jednotlivých mikrotrhlin ve větší celky. Na tento fakt ukazuje i velikost amplitudy signálů AE. Nižší uvolněná energie než v případě 1.

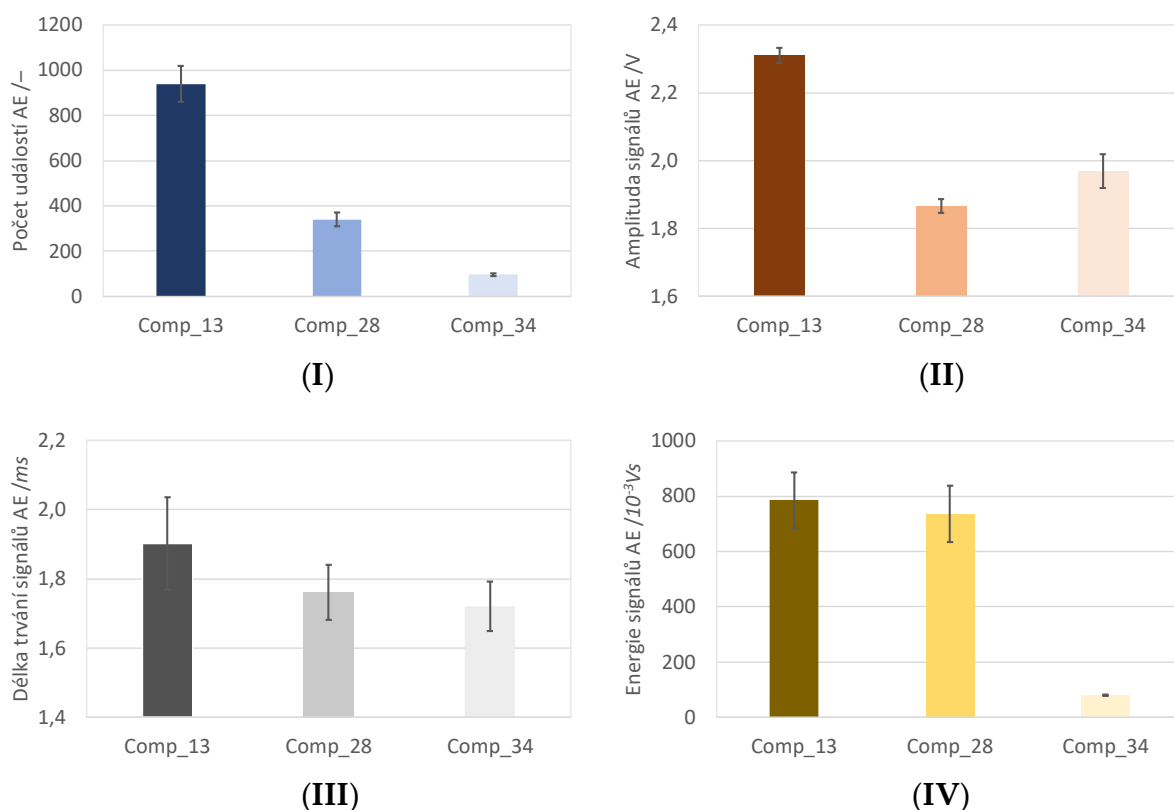


předběžného zatěžovacího cyklu opět ukazuje spíše na spojování již vzniklých mikrotrhlin.



Obr.3.3:5: Parametry signálů AE během cyklu stanovení statického modulu pružnosti: (I) Počet událostí; (II) Amplituda; (III) Délka trvání; (IV) Energie

Ze získaných hodnot parametrů signálů AE při zatěžování vzorků až do destrukce (Obr. 3.3.6) je již patrný rozdíl v reakci struktury na zatěžování. Zatímco vzorky COMP\_13 vykazují velké množství velkých mikrotrhlin a později i odpadávání částí z povrchu vzorků, což je patrné z největších průměrných hodnot událostí AE, amplitudy AE a v množství uvolněné energie signálů AE. Vzorky označené jako COMP\_34 vykazují u všech dříve vyjmenovaných parametrů nižší průměrné hodnoty než sady COMP\_13 a COMP\_28. Je také patrné, že když se blížíme k rozpadu vzorků, je délka trvání signálů AE u jednotlivých směsí podobná, což je dáno drcením a následně rozpadem cementové matrice.



Obr. 3.3.6: Parametry signálů AE během zatěžování do destrukce:  
 (I) Počet událostí; (II) Amplituda; (III) Délka trvání; (IV) Energie

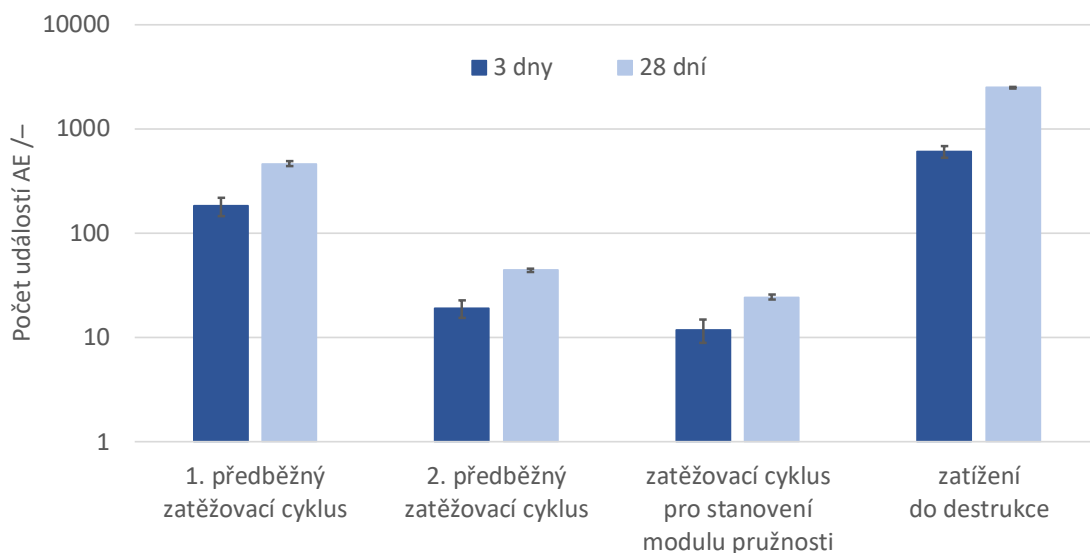
### Statický modul pružnosti – jemnozrné kompozity – různé stáří

Pro experiment, který je součástí rozsáhlejších zkoušek, byla vybrána jedna jemnozrná polymerová zálivková hmota<sup>4</sup> (PMM) na bázi portlandského cementu. Použitá malta je dvousložková směs, kde tekutá složka je tvořena vodnou disperzí kopolymerů. Práškovou složku tvoří směs portlandských cementů a minerálních plniv. PMM je primárně určena pro zesilování konstrukcí nebo jejich částí pomocí helikální výztuže, pro injektáž a vyplňování trhlin, utěsnění děr mezi štětovými stěnami a pro kotvení šroubů, tyčí a jiných kotevních prvků.

Pro naplánované zkoušky byla vyrobena zkušební tělesa tvaru válce o jmenovitém průměru 40 mm a jmenovité délce 160 mm. Pro výrobu čerstvé směsi bylo použito ruční míchadlo, přičemž postup výroby včetně doby míchání byl v souladu s postupem uvedeným v technickém listě. Po důkladné homogenizaci složek bylo vyrobeno mimo jiné 14 kusů zkušebních válečků, které byly uloženy do prostředí s teplotou  $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkostí vzduchu  $(60 \pm 10) \%$ . Zkušební tělesa byla odformována po 72 hodinách. Polovina zkušebních těles, tzn. 7 válečků, byla určena ke zkoušení ve 3 dnech stáří, tedy ihned po odformování. Zbýlých 7 válečků bylo

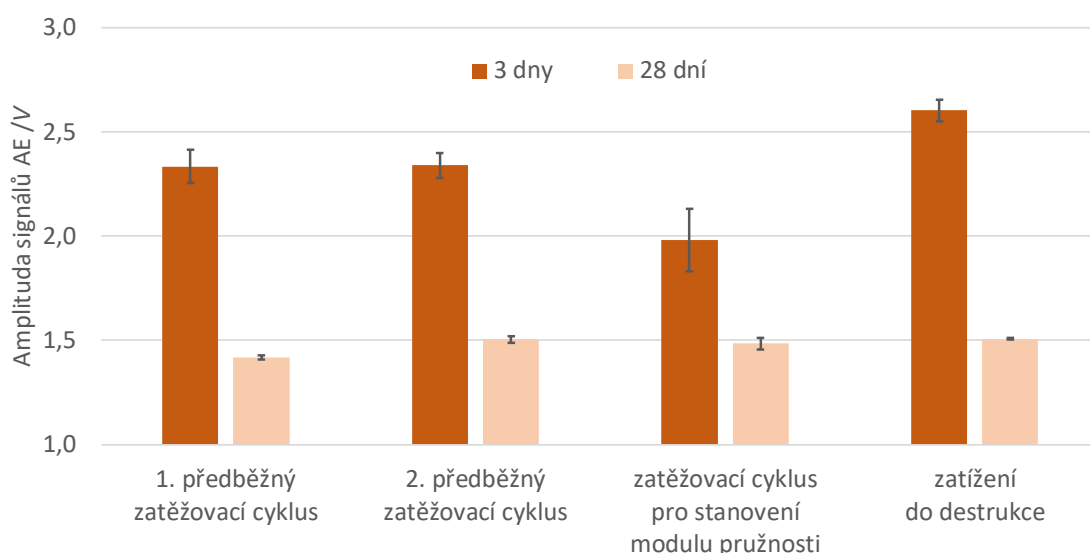
<sup>4</sup> Její výrobní označení není uvedeno, vzhledem k tomu, že se jednalo o prvotní zkoušky zaměřené na sledování nejen vývoje hodnot smrštění, ale také vývoje pružnostních charakteristik v čase.

uloženo do stejných podmínek jako před odformováním, ve kterých zrálo po dobu dalších 25 dní, a bylo zkoušeno ve stáří 28 dní. Ostatní postup je uveden v předcházející části této kapitoly (Statický modul pružnosti – jemnozrné kompozity – různé směsi).



Obr. 3.3.7: Počet událostí AE v průběhu zkoušky

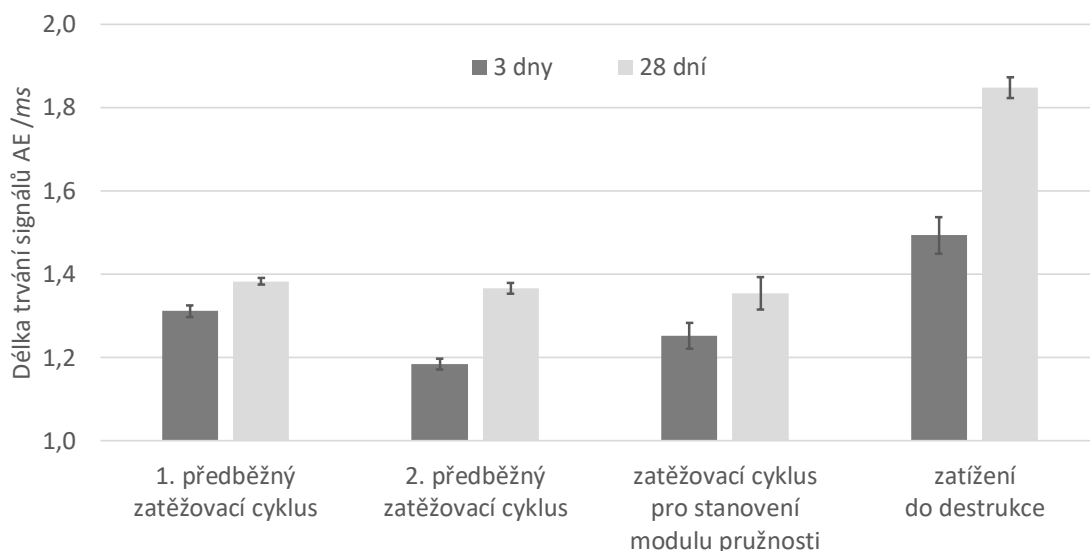
Z počtu AE událostí (Obr. 3.3.7) v průběhu jednotlivých zatěžovacích cyklů je vidět, že více AE událostí vzniká u vzorků ve stáří 28 dní. To ukazuje na větší množství vznikajících mikrotrhlin v matrici PMM ve stáří 28 dní oproti stáří 3 dny. Menší počet událostí, a tedy i vznikajících mikrotrhlin, pravděpodobně ukazuje na méně pevné vazby v matrici materiálu. Rozdíly mezi 3 a 28 dny stáří ale nejsou nijak zásadní.



Obr. 3.3.8: Velikost amplitudy signálů AE v průběhu zkoušky

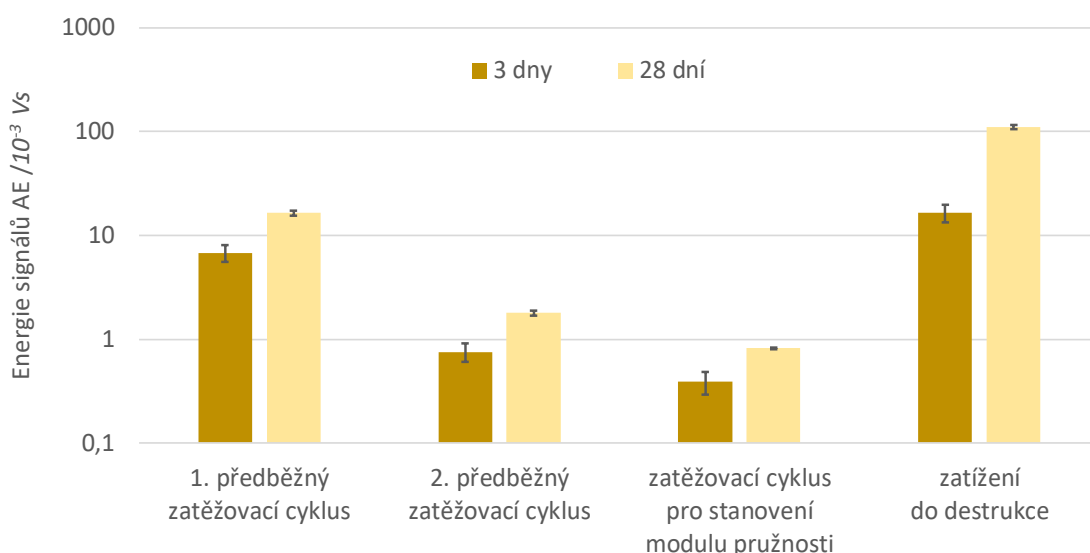
Z velikosti amplitudy signálů AE (Obr. 3.3.8) v průběhu 1. a 2. předběžného zatěžovacího cyklu lze usuzovat, že vznikající mikrotrhliny mají po 3 i 28 dnech zrání

PMM přibližně podobnou velikost. Nejvyššího rozdílu, co se velikosti vznikajících mikrotrhlin týče, nastává v průběhu třetího zatěžovacího cyklu, při němž je určována hodnota statického modulu pružnosti. Amplitudy signálů AE u zkušebních těles ve stáří 28 dní vykazují největší hodnoty. Naopak při zatěžování až do porušení jsou výsledky velikosti amplitudy v obou stáří malty opět velmi podobné.



Obr. 3.3.9: Délky trvání signálů AE v průběhu zkoušky

Z hodnot délek signálů akustické emise v průběhu zatěžovacích cyklů (Obr. 3.3.9) je zřejmé, že k většímu tlumení dochází u vzorků ve stáří 3 dnů. Toto je pravděpodobně způsobeno přítomností většího množství nezhydratované vody ve vzorcích, které toto tlumení způsobuje.



Obr. 3.3.10: Energie signálů AE v průběhu zkoušky

Z grafu (Obr. 3.3.10) je vidět, že uvolněná energie signálů AE během zatěžování je ve stáří 3 i 28 dní téměř totožná. Na základě těchto výsledků nelze potvrdit, že vazba

matrice po 28 dnech zrání vykazuje vyšší kvalitu (vyzrálost) než ve stáří 3 dny. Výsledky AE tak pouze potvrzují trend vývoje hodnot dynamického i statického modulu pružnosti použité malty, neboť ve stáří 28 dní vykazuje materiál přibližně stejné výsledky jako ve stáří 3 dny.

### Statický modul pružnosti – betony

Pro experimenty byly zvoleny betonové trámce (100 x 100 x 400 mm) s různou hodnotou statického modulu pružnosti (nižší modul:  $(26,7 \pm 0,1)$  GPa; vyšší modul  $(35,0 \pm 0,2)$  GPa).



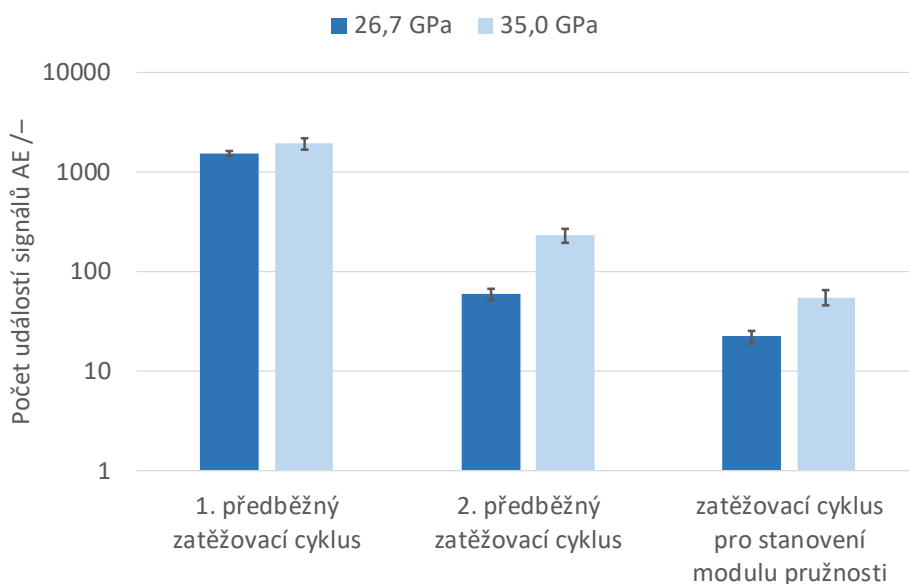
Obr. 3.3.11: Umístění vzorku v lisu a rozmístění AE snímačů

Aktivita AE byla měřena během tří zatěžovacích cyklů bez destrukce, jak je uvedeno na Obr. 3.3.2. Zatěžovací cykly byly provedeny na lisu FORM + TEST ALPHA 3-3000 (Obr. 3.3.11) v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně (Topolář, 2014c). Výsledky ostatních destruktivních i nedestruktivních zkoušek jsou uvedeny v Tab. 3.3.1.

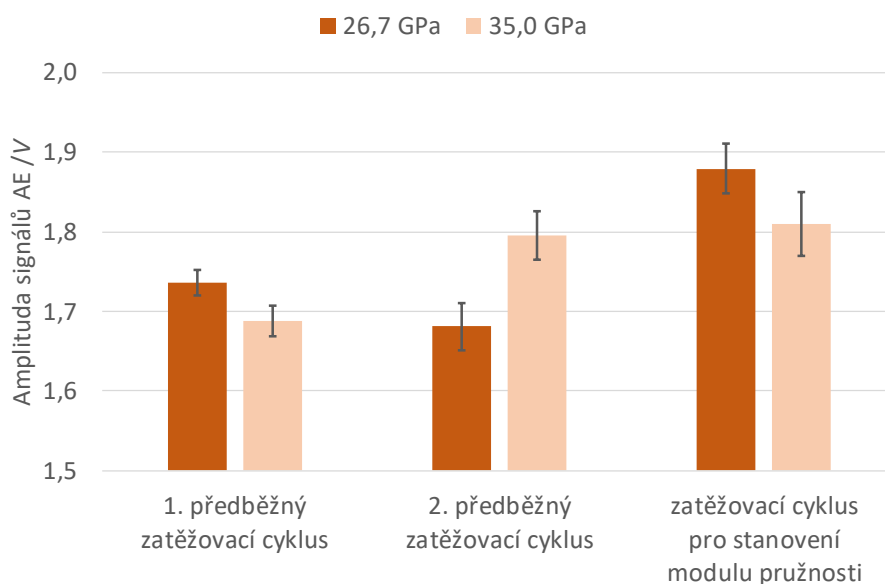
Tab. 3.3.1: Zjištěné vlastnosti jednotlivých sad vzorků (Topolář, 2014c)

Statický modul pružnosti /GPa	Dynamický modul pružnosti /GPa	Pevnost v tlaku /MPa	Hmotnost vzorku /kg	Objemová hmotnost /kgm <sup>-3</sup>
<b>26,7 ± 0,1</b>	37,6 ± 0,2	39,5 ± 0,5	9,49 ± 0,02	2370 ± 20
<b>35,0 ± 0,2</b>	45,9 ± 0,2	69 ± 3	9,65 ± 0,02	2400 ± 40

Počet událostí AE odpovídá schopnosti materiálu odolat poškození. Graf (Obr. 3.3.12) ukazuje, že betonové vzorky s vyšším statickým modulem pružnosti mají i větší počet událostí AE, což pravděpodobně znamená, že během zatěžovacích cyklů se vytvoří více mikroporuch. Z následujícího grafu (Obr. 3.3.13) lze pak usoudit, že vznikající mikroporuchy jsou větší u vzorků s nižším statickým modulem pružnosti, protože průměrná velikost amplitudy signálů AE je větší.



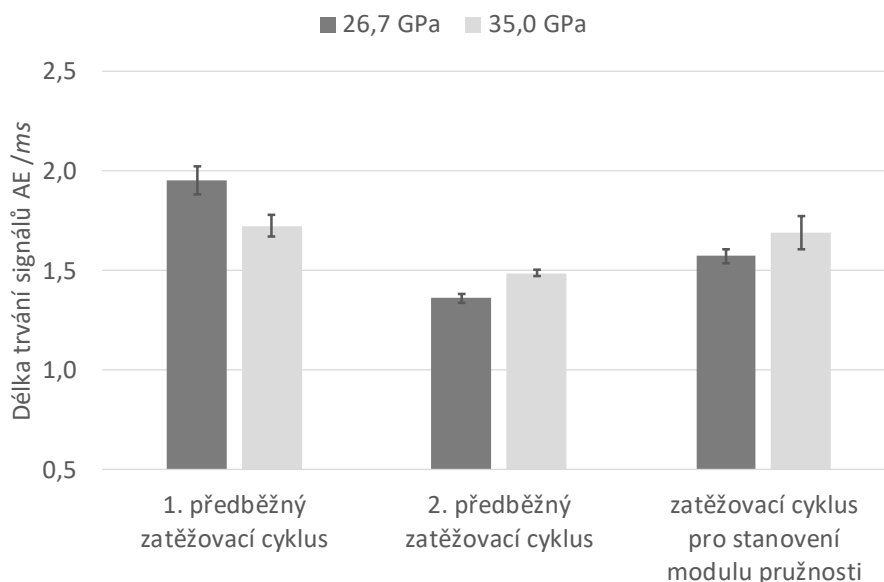
Obr. 3.3.12: Počet událostí AE v průběhu zkoušky



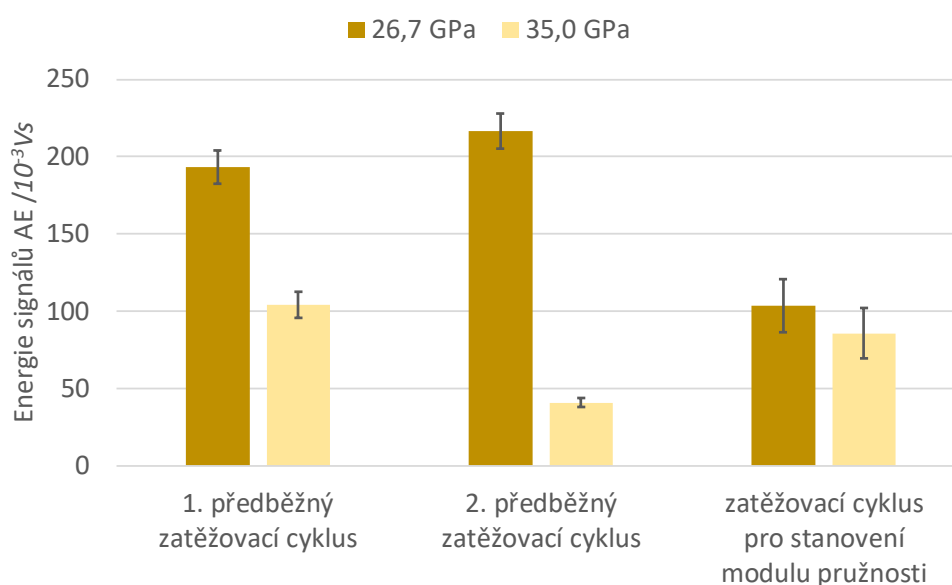
Obr. 3.3.13: Amplituda signálů AE v průběhu zkoušky

Z hlediska délky trvání signálů AE během zatěžovacích cyklů (Obr. 3.3.14) lze usoudit, že během prvního zatěžovacího cyklu je větší útlum způsoben vyšším počtem událostí AE během tohoto cyklu. V dalších cyklech je pak vyšší útlum mechanického vlnění způsoben větším poškozením vzorků s nižším statickým modulem pružnosti.

Posledním sledovaným parametrem byla energie signálů AE (Obr. 3.3.15). Vyšší uvolněná energie signálů AE byla získána u vzorků s nižším statickým modulem pružnosti, což patrně souvisí s vyšší mírou poškození vnitřní struktury betonových vzorků.



Obr. 3.3.14: Délky trvání signálů AE během zkoušky



Obr. 3.3.15: Energie signálů AE během zkoušky

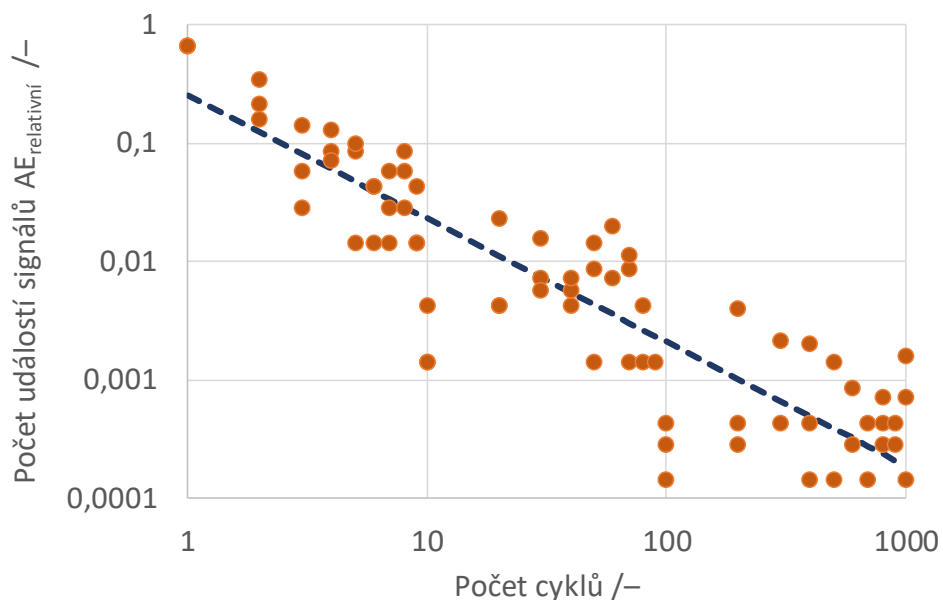
### Cyklické zatěžování – betonové válce

Za účelem eliminace faktoru stárnutí betonu během těchto experimentů byl beton testován více než jeden rok od namíchání. Složení čerstvé betonové směsi a její vlastnosti, jak v čerstvém, tak i vytvrdlém stavu je uvedeno v Tab.3.2.2 (vzorek N). Cyklické zatěžování bylo provedeno v souladu s metodou B popsanou v EN 12390-13. Testovací postup byl konfigurován tak, aby umožnil provádět co nejvíce zatěžovacích

cyklů během několika desítek hodin a zároveň prováděl statický zatěžovací test. Cílem experimentu bylo sledovat chování betonu při zatěžování a odlehčování se sledováním aktivity AE. Byla zvolena nejvyšší přípustná rychlost nakládání (0,80 MPa/s) s dobou trvání 3 s. Cyklické zatížení bylo provedeno pomocí mechanického zkušebního lisu LaborTech s rozsahem zatěžovací síly 0–1000 kN. Umístění vzorku v lisu a rozmístění snímačů AE je vidět na Obr. 3.3.16. Rychlost zatěžování byla nastavena přírůstkem tlakové síly (Topolář, 2017b).



Obr. 3.3.16: Umístění vzorku v lisu a rozmístění snímačů AE

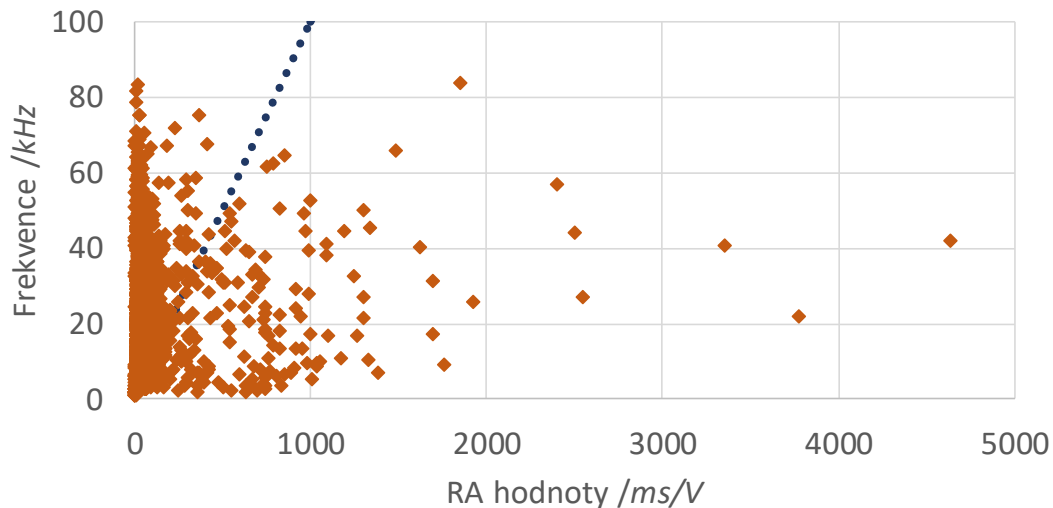


Obr. 3.3.17: Kaiserův jev u cyklicky namáhaného betonu

Výsledky měření znázorněné na Obr. 3.3.17 ukazují, že během zatěžování byl detekován Kaiserův jev. Kaiserův jev popisuje speciální chování materiálu při



tlakovém namáhání materiálu (Ono, 2008). To vyplývá ze skutečnosti, že trhliny, které byly vytvořeny z důvodu předchozího zatížení, se nerozšiřují, dokud zátěž nepřesáhne úroveň zatížení z předchozího cyklu. Běžně je pozorována aktivita AE při zatěžování z nulové úrovně do vyššího. Některé kritické mikroporuchy v průběhu cyklického zatěžování se šíří kvůli „únavovému“ namáhání.



Obr. 3.3.18: Rozdělení trhlín při cyklickém zatěžování betonového válce

Základním přístupem k rozdělení trhlín v materiálu či konstrukci je možnost stanovení tahových a smykových trhlín. Konvenční metoda založená pouze na jednom parametru je při rozdělování trhlín v kompozitních materiálech nedostatečná (Momon, 2012). V případě, že má AE signál vysokou hodnotu RA a nízkou průměrnou frekvenci, vznikla smyková trhlina. Tahová trhlina je zaznamenána, když má signál AE nízkou hodnotu RA a vysokou průměrnou frekvenci. Stříhové události jsou charakterizovány delší nárůstovou dobou signálu AE a vyšší amplitudou než tahové události (Shiotani, 2006). Vztah mezi průměrnou frekvencí a hodnotou RA (Obr. 3.3.18) vykazuje silnou citlivost na způsoby poškození a klasifikace trhlín, pak umožňuje varování před konečným selháním prvku konstrukce nebo konstrukce celé. V tomto případě se jednalo převážně o vznik tahových trhlín, jak ukazuje Tab. 3.3.2 (Topolář, 2017b).

Tab. 3.3.2: Rozdělení vznikajících trhlin během prvního cyklu (Topolář, 2017b)

Fáze cyklu	Časový interval /s	Počet událostí /-	Tahové trhliny /%	Smykové trhliny /%
Zatěžování	30	732	80,2	19,8
Držení na horní úrovni	3	191	89,0	11,0
Odlehčování	30	562	88,1	11,9
Držení na dolní úrovni	3	121	91,7	8,3

### Čtyřbodový ohyb – alkalicky aktivované betony

Cílem experimentů bylo porovnat cementový a alkalicky aktivovaný beton s různou výztuží a jejího vlivu na vznik signálů AE, během čtyřbodového ohybového testu na trámech o rozměrech 300 x 200 x 3000 mm viz Obr. 3.3.19. Pro experimenty byly zvoleny tři směsi, jejichž složení a označení je v následující tabulce Tab. 3.3.3.

Po betonáži byly jednotlivé trámy označeny následovně:

**C** – prostý samozhutnitelný beton C40/50

**C+D** – prostý samozhutnitelný beton C40/50 s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

**AA+D** – alkalicky aktivovaný samozhutnitelný struskový beton s přidáním drátků Dramix RC65/35BN

**AA+D+V** – alkalicky aktivovaný samozhutnitelný struskový beton s přidáním drátků Dramix RC65/35BN a s ocelářskou výztuží (4x R14 + třmínky 14x R6)

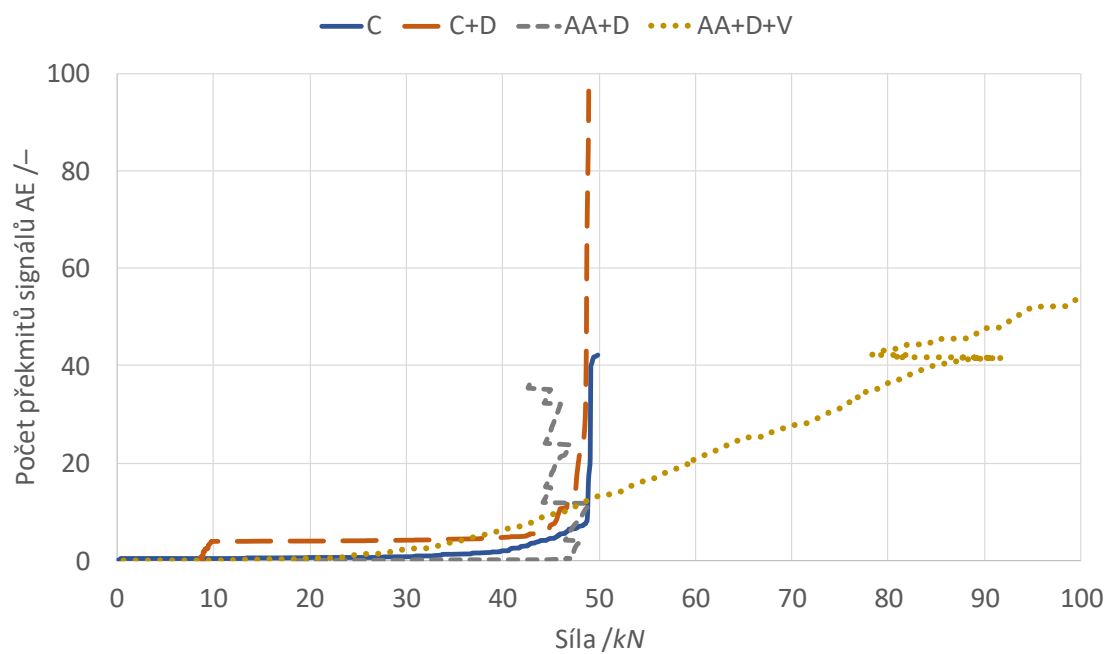
Po 28 dnech od betonáží byly na trámech v laboratoři ŽPSV, a.s. na lisu provedeny ohybové zkoušky se sledováním aktivity AE. Grafy na Obr. 3.3.20 Obr. 3.3.21 ukazují závislost kumulativního počtu překmitů signálů AE na síle pro jednotlivé vzorky. Z celkového pohledu je patrné, že u trámu AA+D+V došlo k porušení matrice, tedy ke zlomení při asi 90 kN. Zatímco ostatní trámy vydržely podstatně méně, což je pravděpodobně způsobeno pevnou výztuží v trámu AA+D+V, i když při detailnějším pohledu (Obr. 3.3.21) je vidět, že k aktivitě AE, a tedy i k předpokládanému vzniku mikrotrhlin, dochází dříve asi od 20 kN.

Tab. 3.3.3: Složení směsí na 1 m<sup>3</sup> a jejich vlastnosti (Topolář, 2012)

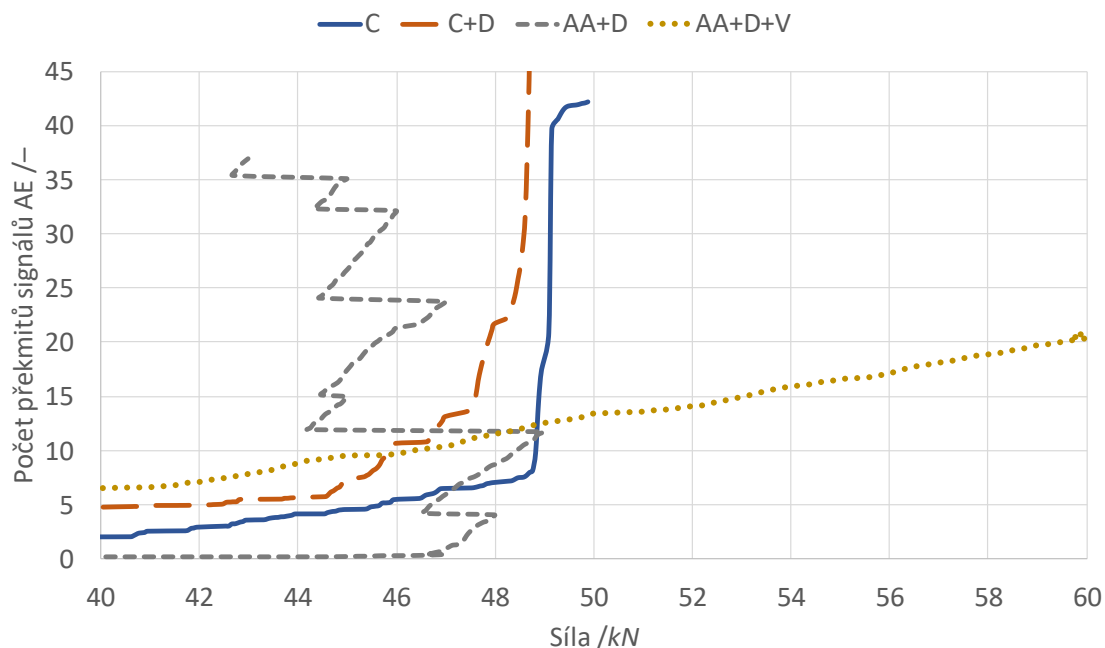
Označení vzorků	C	C+D	AA+D	AA+D+V
<b>Složka / Vlastnost</b>				
Cement (CEM I 42,5 R – Mokrý) /kg	385	385	–	–
Struska (SMŠ 380 – Štramberk) /kg	250	250	450	450
Písek (Halámky) 0/4 /kg	775	775	840	840
Kamenivo (Plešovice) 4/8 /kg	355	355	380	380
Kamenivo (Plešovice) 8/16 /kg	360	360	390	390
Voda /kg	210	210	160	160
Superplastifikátor (Premia 150) /kg	4,3	4,3	–	–
Vodní sklo sodné (silikátový modul 1,6) /kg	–	–	65	65
50 % roztok KOH	–	–	37	37
Rozptýlená výztuž (Dramix RC65/35BN) /kg	–	40	40	40
Ocelářská výztuž (4x R14 + třmínky 14x R6)	–	–	–	ano
Objemová hmotnost /kg/m <sup>3</sup>	2350	2360	2330	–
Pevnost v tlaku (7/28 dní) /MPa	53,5/78,8	53,0/71,5	38,7/57,8	–
Pevnost v tahu za ohybu (7/28 dní) /MPa	7,3/8,1	6,9/7,4	5,3/6,5	–



Obr. 3.3.19: Trám AA+D+V po čtyřbodovém ohybovém testu



Obr. 3.3.20: Závislost kumulativního počtu překmitů na síle pro jednotlivé trámy (celkový pohled) (Topolář, 2012)

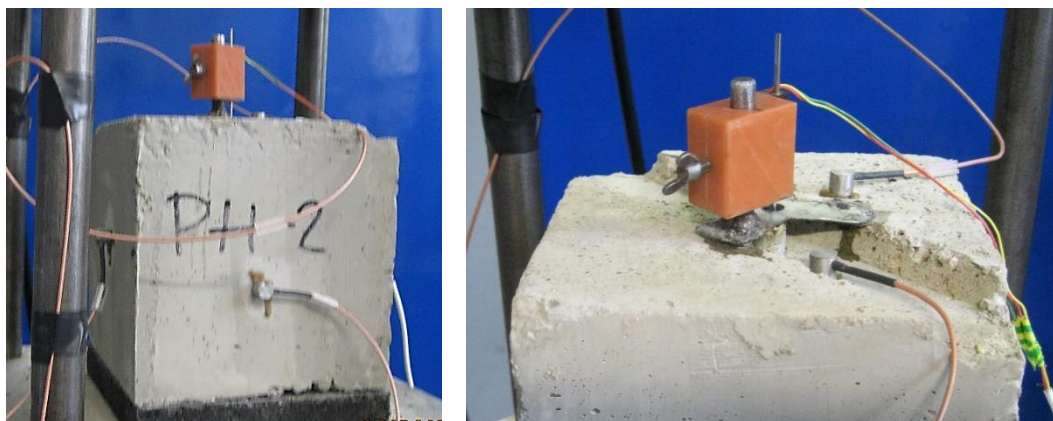


Obr. 3.3.21: Závislost kumulativního počtu překmitů na síle pro jednotlivé trámy (detailní pohled) (Topolář, 2012)

Při detailním pohledu na výsledky můžeme říct, že cementový vzorek (označen jako C) před celkovým zlomením vykazuje nízkou aktivitu AE, což je pravděpodobně způsobeno nevyztužením vzorku, a tedy dochází k rychlému lomu. V případě, že cementovou směs vyztužíme drátky (trám označen jako C+D), je aktivita AE na velmi nízké úrovni (kromě oblasti kolem 10 kN, kde zřejmě došlo k usazení trámce v rámci jeho usazení do podpor, tato AE aktivita nemá vliv na zbytek zkoušky), protože drátky drží matici více pohromadě a následná AE aktivita je způsobena převážně vytahováním drátků z cementové matrice. Drátky způsobují větší houževnatost konstrukce, což je vidět na křivce u vzorku C+D oproti křivce C. U alkalicky aktivovaného betonu (označení AA+D) i přes obsah drátků dochází k rychlému lomu, a tedy z porovnání s C+D vychází AA+D jako křehčí konstrukce. Měřením bylo zjištěno, že alkalicky aktivovaný beton je křehčí než beton na bázi portlandského cementu. AE aktivita u AA+D se rychle zvyšuje, zatímco ve směsi C+D je navyšování postupné.

#### **Pull out test – srovnání různých typů výztuží (ČVUT – Kloknerův ústav)**

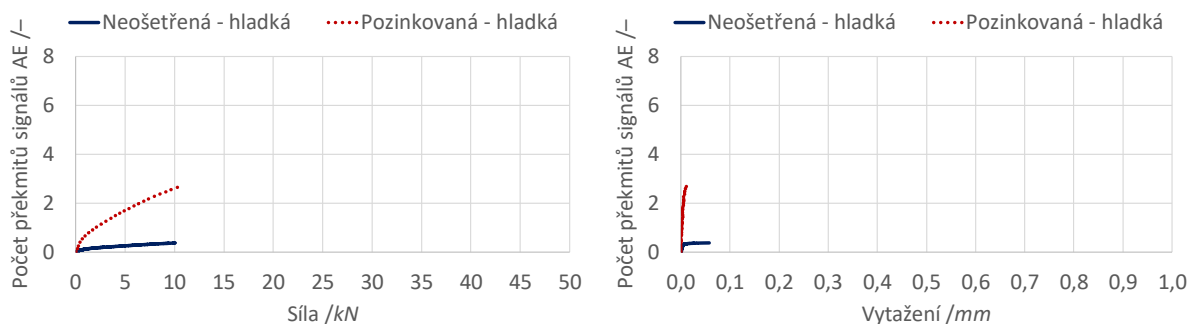
Cílem experimentů bylo porovnat vliv povrchové úpravy betonářské oceli pozinkováním během pull out test u různých typů betonářské oceli a vlivu na vznik signálů AE na k tomu upravených kostkách o hraně 150 mm viz Obr. 3.3.22. Tato měření považujeme za pilotní. Pro případná další měření by bylo vhodné nastavit vyšší citlivost.



Obr. 3.3.22: Umístění kostek v lisu a rozmístění snímačů AE

Vzorek s pozinkovanou hladkou ocelí vykazuje velké deformace ve struktuře během krátkého prodloužení (Obr. 3.3.23), tedy snad „trhání“ materiálu. Vzorek s neošetřenou hladkou ocelí vykazuje „trhání“ do přibližně stejného protažení (0,01 mm) jako vzorek s pozinkovanou hladkou ocelí, pak aktivita AE téměř mizí a pravděpodobně nevznikají deformace – kotva se vytahuje.

U vzorků s neošetřenou a s pozinkovanou hladkou ocelí nárůst aktivity AE s rostoucí silou klesá. Nejvýraznější je v oblasti do 1 kN, zřetelně výraznější je tato AE aktivita u vzorku s pozinkovanou hladkou ocelí, což je zřejmě dáno pozinkováním, kdy se při kontaktu čerstvé betonové směsi se zinkem vytvoří drobné bublinky v blízkosti oceli. Tato reakce má pak za následek špatnou soudržnost pozinkované oceli s betonem na bázi cementu.

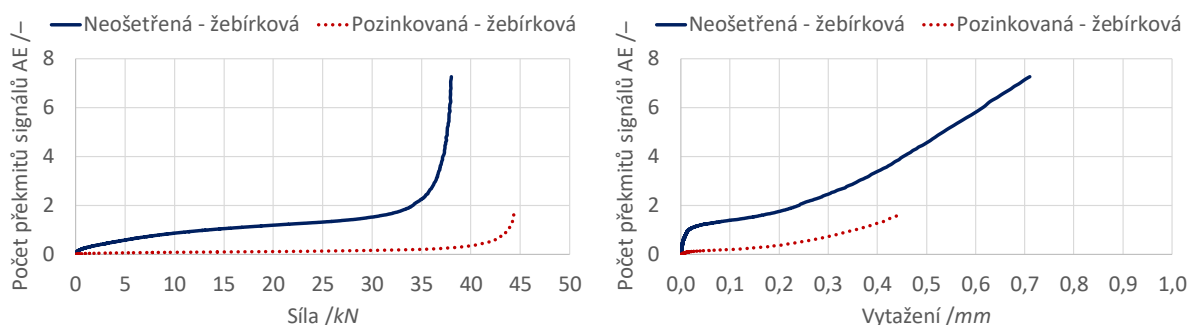


Obr. 3.3.23: Závislost kumulativního počtu překmitů na vytahovací síle a délkovém vytažení neošetřené a pozinkované hladké oceli

Vzorek s neošetřenou žebírkovou ocelí (Obr. 3.3.24) má velkou aktivitu AE při počáteční deformaci (0,01 mm). Další významný nárůst AE aktivity je kolem vytažení o 0,2 mm. U vzorku s pozinkovanou žebírkovou ocelí je AE aktivita nižší než u vzorku s neošetřenou žebírkovou ocelí.

U vzorků s neošetřenou a pozinkovanou žebírkovou ocelí je významný nárůst AE aktivity na počátku vytahování, tedy při nízké síle. Další již významný nárůst aktivity AE je až při vyšší hodnotě síly kolem 32 kN u vzorku s neošetřenou žebírkovou ocelí

a 37 kN u vzorku s pozinkovanou žebírkovou ocelí. V tomto případě, kdy je použita žebírková ocel, zřejmě tolik nevádí povrchová úprava zinkováním, tak jako u hladké oceli. Spíše se naopak zdá, že díky pozinkování se dosahuje lepších výsledků.



Obr. 3.3.24: Závislost kumulativního počtu překmitů na vytažovací síle a délkovém vytažení neošetřené a pozinkované žebírkové oceli

### Mrazuvzdornost – srovnání cementového a alkalicky aktivovaného betonu

V rámci tohoto pilotního experimentu, kdy bylo vše děláno ručně, byly současně měřeny dva betonové trávce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. I z výše uvedeného důvodu, nemají některé zmrazovací cykly stejnou dobu trvání, ale pro porovnání obou vzorků a otestování zkušebních metod pro tento typ poškození kompozitních materiálů byl i takovýto experiment dostatečný. Jeden vzorek měl předpokládanou horší mrazuvzdornost a druhý vzorek očekávanou lepší odolnost proti zmrazovacím cyklům. Na povrch obou vzorků byly umístěny celkem čtyři snímače AE pomocí speciálních držáků viz Obr. 3.3.25 tak, aby kontakt mezi AE snímačem a povrchem vzorku byl co možná nejlepší.



Obr. 3.3.25: Uchycení a rozmístění snímačů AE

Konstrukce AE snímačů použitých v rámci tohoto experimentu je odolná proti agresivnímu solnému roztoku a snímače jsou bezproblémově použitelné v teplotním

rozsahu  $\pm 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (Zhang, 2006; www.dakel.cz). Oba vzorky byly umístěny do mrazničky do doby, než jejich vnitřní teplota klesla na  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  a pak byly udržovány na této teplotě po dobu přibližně 12 h. Pak byly vzorky vloženy do vody o teplotě přibližně  $15 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu dvou až tří dnů.

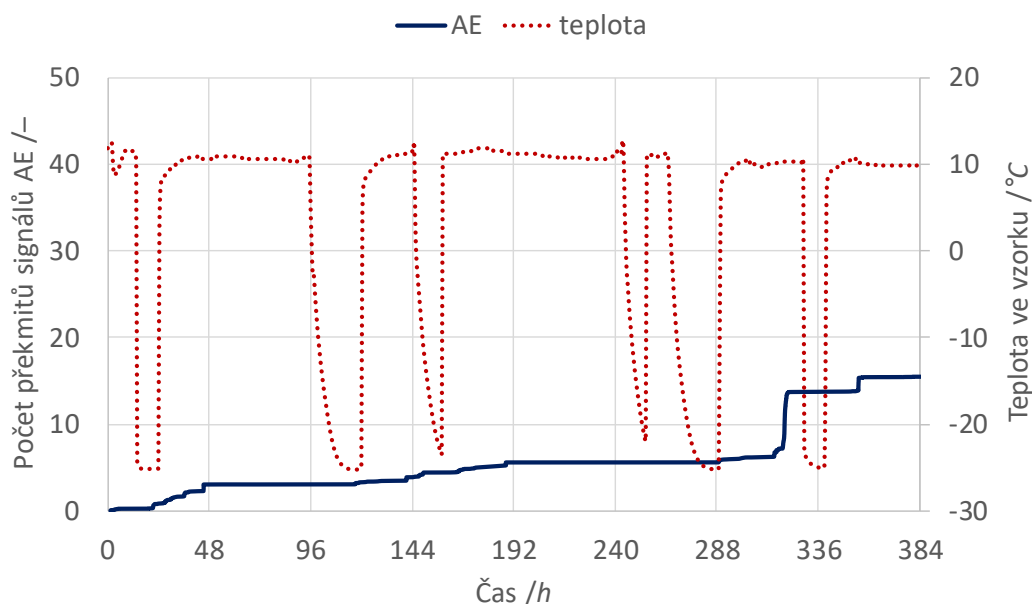
Na zjištění změn vnitřních teplot u jednotlivých vzorků byly použity termistory a následně teplota  $T$  určena rovnicí:

$$T = 0,03 \cdot \left(\frac{R_x}{R_{25}}\right)^4 - 0,83 \cdot \left(\frac{R_x}{R_{25}}\right)^3 + 7,49 \cdot \left(\frac{R_x}{R_{25}}\right)^2 - 33,92 \cdot \left(\frac{R_x}{R_{25}}\right) + 51,69, \quad (\text{Rce 3.3.1})$$

kde  $R_x$  naměřený odpor / $\Omega$

$R_{25}$  je referenční odpor při  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  / $\Omega$

Na grafu (Obr. 3.3.26) je vidět kumulativní počet překmitů signálů AE a hodnoty vnitřní teploty vzorku v závislosti na čase pro vzorek s očekávanou lepší odolností proti zmrazovacím cyklům. Je vidět že drobná AE aktivita nastává po prvním zmrazovacím cyklu, ale v rámci celého měření není podstatná. Dále je vidět že mezi pátým a šestým zmrazovacím cyklem dochází k významnější aktivitě AE, což je pravděpodobně způsobeno vytvořením mikroporuch ve vzorku.

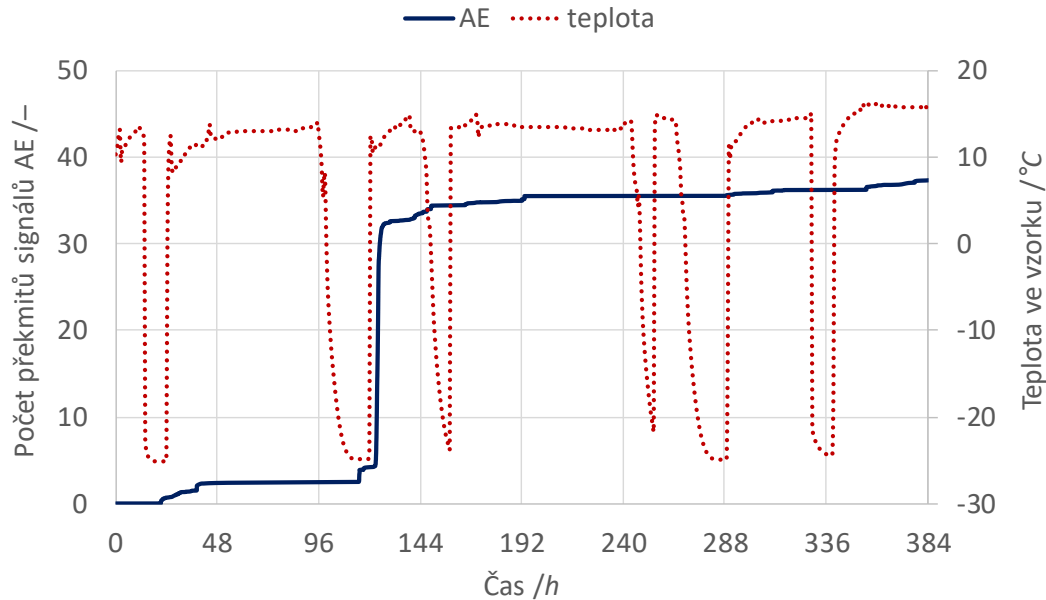


Obr. 3.3.26: Závislost počtu překmitů signálů AE a teploty ve vzorku na čase (vzorek s očekávanou lepší odolností proti zmrazovacím cyklům)

Na grafu (Obr. 3.3.27) je vidět kumulativní počet překmitů signálů AE a hodnoty vnitřní teploty vzorku v závislosti na čase pro vzorek s očekávanou horší odolností proti zmrazovacím cyklům. Je vidět, že opět nastává drobná aktivita AE po prvním

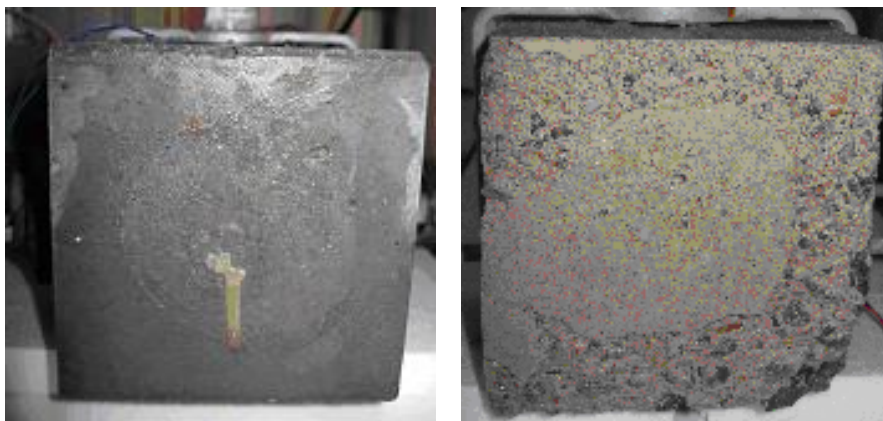


zmrazovacím cyklu, ale v rámci celého měření není podstatná. Dále je vidět, že po druhém zmrazovacím cyklu dochází k významnější aktivitě AE, což je pravděpodobně způsobeno vytvořením velkého množství mikroporuch ve vzorku v porovnání se vzorkem s lepší mrazuvzdorností.



Obr. 3.3.27: Závislost počtu překmitů signálů AE a teploty ve vzorku na čase (vzorek s očekávanou horší odolností proti zmrazovacím cyklům)

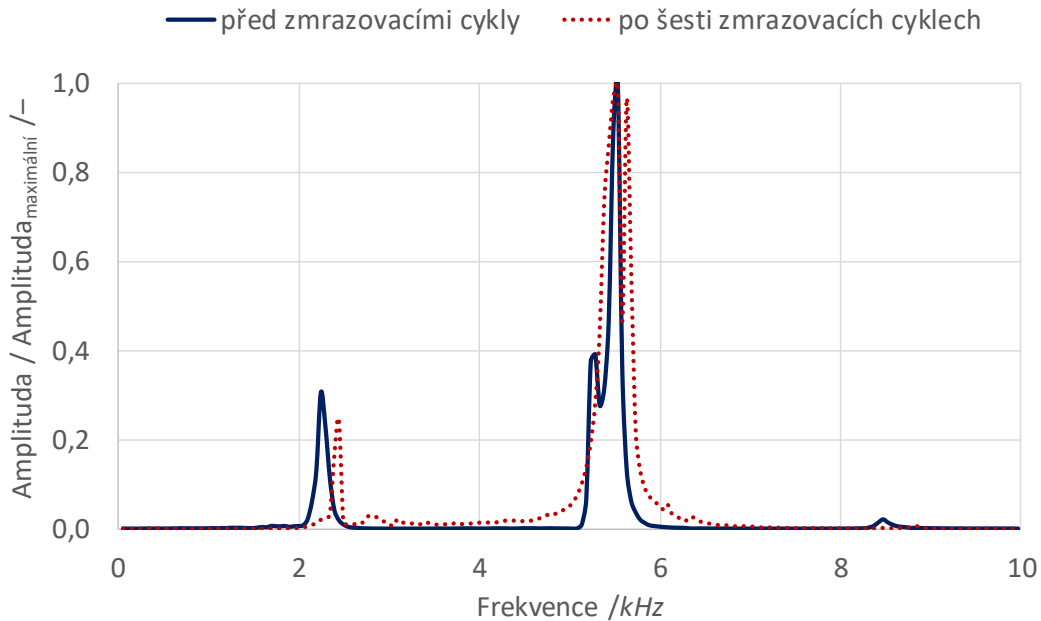
Změny povrchové struktury obou vzorků po šesti zmrazovacích cyklech jsou uvedeny na následujících fotografiích Obr. 3.3.29.



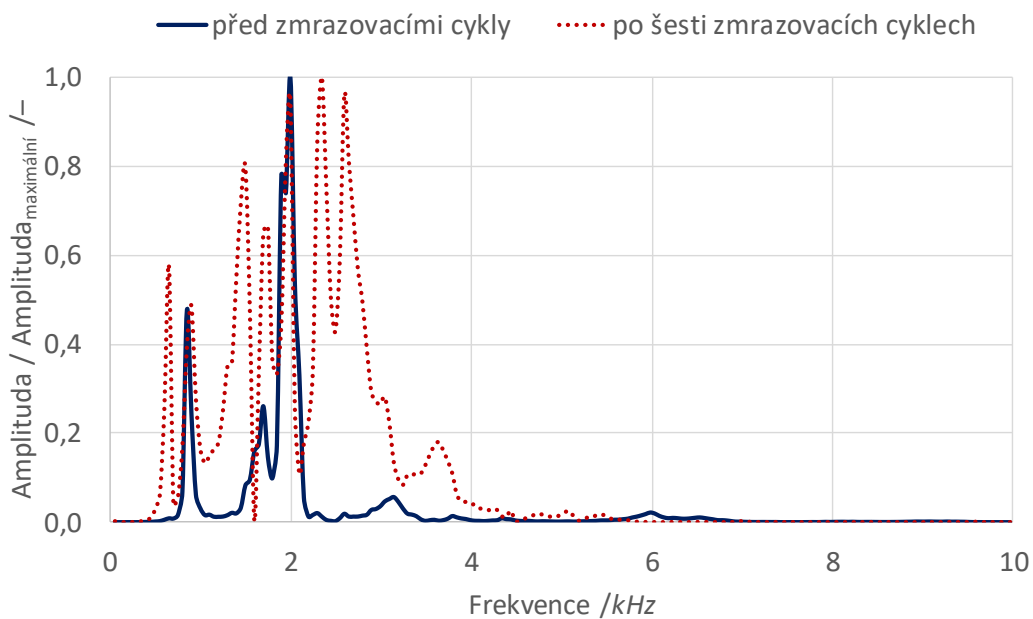
Obr. 3.3.29: Fotografie vzorků po šesti zmrazovacích cyklech

Oba vzorky byly také proměřeny metodou impact-echo, a to před zmrazovacími cykly tak i po šesti zmrazovacích cyklech. Výsledky jsou uvedeny na grafech Obr. 3.3.30 a Obr. 3.3.31. Vzorek s předpokládanou lepší odolností proti mrazu Obr. 3.3.30 má dvě dominantní frekvence, a to na pozici 2200 Hz a 5500 Hz. Jejich pozice se po šesti zmrazovacích cyklech posunula jen nepatrně a je tedy na hraně chyby měření, z čehož

se dá usoudit, že pravděpodobně ve vzorku, nenastalo téměř žádné, nebo jen z hlediska metody zanedbatelné poškození.



Obr. 3.3.30: Frekvenční spektrum před a po šesti zmrazovacích cyklech (vzorek s očekávanou lepší odolností proti zmrazovacím cyklům)



Obr. 3.3.31: Frekvenční spektrum před a po šesti zmrazovacích cyklech (vzorek s očekávanou horší odolností proti zmrazovacím cyklům)

Vzorek s očekávanou horší mrazuvzdorností viz graf na Obr. 3.3.31 má před zmrazovacími cykly dvě dominantní frekvence, a to na pozici 850 Hz a 1990 Hz. Po šesti zmrazovacích cyklech se z těchto původních dvou dominantních frekvencí

vytvořilo více než sedm frekvencí, což naznačuje výrazné poškození vnitřní struktury vzorku.

Porovnáním frekvenčních spekter na Obr. 3.3.30 a Obr. 3.3.31 je zřetelný rozdíl v jejich tvaru po šesti zmrazovacích cyklech, kdy počet frekvenčních píků je ve spektru vzorku s horší mrazuvzdorností výrazně větší. U vzorku s lepší mrazuvzdorností je spektrum před i po šesti zmrazovacích cyklech podobné, avšak je zde vidět drobné posunutí dominantních frekvencí k vyšším frekvencím.

#### 4. ZÁVĚRY

Předložená habilitační práce je zaměřena na aplikaci ultrazvukových metod, zejména metody akustické emise a částečně i metody impact-echo na stavební kompozitní materiály v průběhu zatížení, které vytváří mikroporušení struktury materiálu či konstrukce. Ve stavebnictví stále dochází k nárůstu požadavků na kvalitu, spolehlivost a životnost materiálů, struktur a konstrukcí, při snižování materiálové a ekonomické náročnosti. Z těchto důvodů je nutností zdokonalovat možnosti posuzování jednotlivých parametrů a vlastností, což znamená vyvíjet co nejvhodnější metodiky měření, jakožto i speciální nebo univerzální měřící zařízení a co nejvhodnější analýzy změřených hodnot. Tento požadavek se týká nejen oblasti praktické, ale také oblasti teoretické, tj. laboratorní a pololaboratorní.

V oblasti sledování vlastností stavebních kompozitních materiálů a konstrukcí během zatížení (mechanické, chemické, teplotní apod.) se zabývám zejména metodou akustické emise. Uvedená metoda je jednou z metod nedestruktivního testování, která, na rozdíl od většiny ostatních metod, zachycuje pouze aktivní děje ve struktuře materiálů či konstrukcích. V rámci předkládané habilitační práce bylo ukázáno, že metoda akustické emise, patří do oblasti perspektivních metod využitelných jak v laboratoři, tak i v praxi, při dlouhodobém monitorování stavu konstrukcí, jako vhodný doplněk pro běžně užívané metody.

Měření akustické emise je možné s použitím analyzátoru akustické emise např. DAKEL-XEDO od firmy JZD Rpety s.r.o. a počítače pro záznam dat. Vyhodnocovaným parametrem je nejčastěji počet přechodů signálu přes nastavenou prahovou úroveň (počet překmitů signálů akustické emise). Tento parametr je často používán pro aplikace akustické emise, neboť technika jeho zaznamenání je dostatečně jednoduchá a rychlá. Vyhodnocení tohoto parametru je buď diferenční nebo častěji pomocí kumulativní křivky. Pro podrobnější analýzu vznikajících poškození se používají i další přímo získané parametry signálů akustické emise (čas příchodu signálů, amplituda signálů, délka trvání signálů), popřípadě se dají dopočítat další parametry (energie signálů, RA hodnota či průměrná frekvence), které nám mohou dokreslit celkový obraz míry i charakteru poškození struktury materiálu či konstrukce z hlediska akustické emise.

V úvodní kapitole habilitační práce je uveden nezbytný teoretický aparát pro uvedení do dané problematiky s popisem mechanického vlnění a jednotlivých zjišťovaných parametrů signálů akustické emise. V závěru každé metody je uvedeno autorem používané přístrojové vybavení včetně snímačů, předzesilovačů a systému pro záznam a zpracování dat. V následujících kapitolách práce jsou popsány jednotlivé experimenty, které byly prováděny, s naměřenými a vyhodnocenými výsledky. Většina zde uvedených poznatků je získána na základě autorových experimentálních

prací (např. v rámci grantových projektů, ve kterých byl, či je zapojen) a které byly publikovány v odborných časopisech nebo prezentovány na mezinárodních i národních konferencích. V rámci experimentů autor vytvořil metodiku pro měření a zpracování naměřených dat z jednotlivých aplikací metody akustické emise v průběhu zatěžování kompozitních materiálů. Kapitola popisující experimenty je členěna na tři podkapitoly. První podkapitola se zabývá monitorováním kompozitních stavebních materiálů během tuhnutí a tvrdnutí. Druhá podkapitola se zaměřuje na sledování aktivity akustické emise během tříbodových ohybových testů kompozitních stavebních materiálů. Třetí podkapitola se pak zabývá ostatními způsoby zatěžování stavebních materiálů, které se nedají zařadit do předchozích dvou.

Z provedených experimentů lze tedy usuzovat na:

- o větší počet překmitů signálů akustické emise odpovídají vytvoření vyššího počtu nových produktů nebo mikrotrhlin
- o vyšší hodnoty amplitudy signálů akustické emise nebo uvolněné energie signálů akustické emise odpovídá výraznějším strukturálním změnám, které se objevují ve struktuře materiálu, ať už se jedná o nové produkty nebo vznik či růst mikrotrhlin

Z experimentů pak vyplývá, že metoda akustické emise může významnou měrou přispět k detailnějšímu pohledu na chování kompozitních materiálů a konstrukcí v průběhu jejich životnosti. Metoda akustické emise se jeví jako zajímavá, doplňující metoda pro měření chování stavebních kompozitních konstrukcí, struktur či materiálů, ať už při jejich výrobě, tak i při jejich zatěžování.

### **Vize vědecká**

Destruktivní a nedestruktivní testování patří do skupiny užitečných nástrojů, kterými lze diagnostikovat životnost konstrukce a predikovat vlastnosti materiálu. Metoda akustické emise je zajímavou a zejména v oblasti stavebnictví netradiční metodou, kdy je nadále potřeba se věnovat analýze zaznamenaného signálu akustické emise, a to zejména vyhodnocení jednotlivých parametrů pomocí nich určit míru a typ poškození, a také detailnímu zpracování jednotlivých signálů akustické emise. Toho všeho lze dosáhnout za pomoci matematické statistiky, neuronových sítí nebo kvalifikací časově frekvenčních spekter. Uvedenou metodu lze relativně snadno aplikovat na zatěžované materiály či konstrukce a výrazným způsobem přispět k popisu chování vnitřní destruované struktury materiálu. Cílem autora bude aplikovat tuto metodu do dalších oblastí stavebnictví, zejména jako doplňkovou metodu. Jak bylo výše uvedeno, analýza signálů metody akustické emise není, zejména ve stavebnictví, dostatečně rozpracována. Autor, by se chtěl věnovat také oblasti detailního vyhodnocení sledovaných signálů.

## **Vize pedagogická**

V oblasti stavebnictví je velmi dobře vypracována výuka tradičních destruktivních metod. Použití nedestruktivních metod, snad s výjimkou ultrazvukové metody v jednoduchých stavebních materiálech, je jen v omezené míře. Hlavními důvody tohoto méně častého využívání akustických nedestruktivních metod jsou, podle autorova názoru, zejména nedostačující výbava laboratoří a nedostatek kvalifikovaného personálu. Z pohledu autora, jakožto odborného asistenta, je zřetelný nedostatek detailní výuky fyziky, zapříčiněný nedostatkem výukových hodin. Pro oblast výuky nedestruktivního testování, pak chybí možnost navazovat na tyto základní znalosti.

## POUŽITÁ LITERATURA

**ATIVITAVAS, N.:** Acoustic Emission Signature Analysis of Failure Mechanisms in Fiber Reinforced Plastic Structures. Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin. Austin. **2002**

**BENTUR, A. (Ed.).** Report 25: Early Age Cracking in Cementitious Systems-Report of RILEM Technical committee TC 181-EAS: Early age cracking shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems (Vol. 25). Rilem Publications, **2003**, ISBN 2-912143-33-0.

**BODNÁROVÁ, L., ZACH, J., HROUDOVÁ, J., VÁLEK, J.:** Methods for Determination of the Quality of Concretes with Respect to the High Temperature Behaviour, *Procedia Engineering*, **2013**, vol. 2013, no. 65, pp. 260-265, ISSN: 1877-7058

**BRECKENRIDGE, F.R., GREENSPAN, M.:** Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **1981**, 69(4), pp. 1177-1185

**BUCUR, V.:** Acoustics of wood. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, **2006**, ISBN: 978-3-540-26123-0

**CARINO, J., SANSALONE, M., HSU, N.N.:** A point source-point receiver, pulse-echo technique for flaw detection in concrete. **1986a**, *ACI Materials Journal*, 83(2), pp. 199–208, ISSN: 0889-325X

**CARINO, N.J., SANSALONE, M., HSU, N.N.:** Flaw detection in concrete by frequency spectrum analysis of impact-echo waveforms. *International Advances in Nondestructive Testing*, **1986b**, 12, pp. 117-146

**CHEN, Y. L., WEI, Z. A., ZHANG, Q. G.:** Experimental study on Felicity effect of acoustic emission in rock under cyclic loading and tiered cyclic loading. *Journal of China Coal Society*, **2012**, 37(2), pp. 226-230,

**ČERNÝ, M., MAZAL, P., FILÍPEK, J.:** Sensing of the acoustic signal by waveguides. *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.*, **2008**, LVI, No. 1, pp. 43–54

**ENOKI, M., WATANABE, M., CHIVAVIBUL, P., & KISHI, T.:** Non-contact measurement of acoustic emission in materials by laser interferometry. *Science and Technology of Advanced Materials*, **2000**, 1(3), pp. 157-165

**FINLAYSON, R.D., FRIESEL, M., CARLOS, M., COLE, P., LENAIN, J.C.:** Health monitoring of aerospace structures with acoustic emission and acousto-ultrasonics. *Insight-Wigston then Northampton*, **2001**, 43(3), pp. 155-158

**GROSSE, Ch.U., OHTSU, M.:** Acoustic emission testing. Springer, Berlin **2008**, ISBN 978-3-540-69895-1

**HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.:** FYZIKA – část2 – Mechanika – Termodynamika. VUTIUM, Brno **2000**, ISBN 80-214-1868-0

- HOLT, E.E.:** Early age autogenous shrinkage of concrete (Vol. 446). Espoo, Finland: Technical Research Centre of Finland, **2001**, ISBN 951-38-5870-7
- IWANAMI, M., KAMADA, T., NAGATAKI, S.:** Application of acoustic emission technique for crack monitoring in RC beams. *Cement and Concrete*, **1997**, 51, pp. 192–197
- KOŁAKOWSKI, P., SZELAŹEK, J., SEKUŁA, K., ŚWIERCZ, A., MIZERSKI, K., & GUTKIEWICZ, P.:** Structural health monitoring of a railway truss bridge using vibration-based and ultrasonic methods. *Smart Materials and Structures*, **2011**, 20(3): 035016
- KOPEC, B. a kol.** Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství Cerm **2008**, ISBN 978-80-7204-591-4
- KOŘENSKÁ, M.:** Aplikace akustických metod ve stavebnictví, závěrečná verze habilitační práce. Brno, **2006**, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky, ISBN 80-214-3276-4, ISSN 1213-418X
- KREIDL, M., ŠMÍD, R.:** Technická diagnostika - 4. díl. BEN – technická literatura, Praha **2006**, ISBN 80-7300-158-6
- LI, Z., XI, Y.:** Application of acoustic emission technique to detection of concrete cracking and rebar corrosion. In *Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Berlin, Germany, 15–17 September **1995**, pp. 613–620
- MALHOTRA, V.M., CARINO, N.J.:** Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition, CRC press, **2003**
- MALORNY, W., PLATH, M.:** Investigations on Properties Determining Durability of Novel PCC. In: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, **2013**, pp. 130-138, ISSN: 1662-8985
- MARUŠIĆ, E., ŠTIRMER, N.** Autogenous shrinkage and expansion related to compressive strength and concrete composition. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **2016**, 14(9), pp. 489-501
- MAZAL, P., PAZDERA, L., SMUTNÝ, J.:** Identifikace kontaktního poškození materiálů a ložisek metodou akustické emise. Brno, **2009**, 116 s, ISBN 978-80-214-3826-2
- MECHLOVÁ, E., KOŠTÁL, K. a kol.:** Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky. Prometheus, Praha **2001**, ISBN 80-7196-151-5
- MILLER, R.K., HILL, E.K., MOORE, P.O.:** Acoustic Emission Testing. *Nondestructive testing handbook – 6*, American Society for Nondestructive Testing, **2005**, ISBN: 1-57117-106-1
- MOMON, S., GODIN, N., REYNAUD, P., R'MILI, M., FANTOZZI, G.:** Unsupervised and supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **2012**, 43(2), pp. 254-260, ISSN: 1359-835X



**OHTSU, M., ISODA, T., TOMODA, Y.:** Acoustic emission techniques standardized for concrete structures. *Journal of Acoustic Emission*, **2007**, vol. 25, pp. 21-32

**OHTSU, M.:** Acoustic emission (AE) and related non-destructive evaluation (NDE) techniques in the fracture mechanics of concrete. Woodhead Publishing (Elsevier), Cambridge **2015**, ISBN 978-1-78242-327-0

**ONO, K.:** Structural Integrity Evaluation by Means of Acoustic Emission, in: A. Carpinteri, G. Lacidogna (Eds.), *Acoustic Emission and Critical Phenomena*, Taylor & Francis, **2008**, pp. 13-27

**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

**POLLOCK, A.A.:** Practical guide to acoustic emission testing. Physical Acoustic Corporation – Princeton, New Jersey **1988**

**POLLOCK, A.A.:** Acoustic emission inspection. Technical Report TR-103-96-12/98, Physical Acoustics Corporation **1989**

**RANDALL, R.B.:** Frequency Analysis, Brüel & Kjær, **1987**

**ROVNANÍK, P., ŠIMONOVÁ, H., TOPOLÁŘ, L., BAYER, P., SCHMID, P., KERŠNER, Z.:** Carbon nanotube reinforced alkali-activated slag mortars. *Construction and building materials*, **2016a**, vol. 119, no. 1, p. 223-229. ISSN: 0950-0618

**ROVNANÍK, P., ŠIMONOVÁ, H., TOPOLÁŘ, L., KERŠNER, Z.:** Mechanical fracture properties of alkali-activated slag with graphite filler. *SPACE 2016*. Košice: Technical University of Košice, **2016b**, pp. 1-2, ISBN: 978-80-553-2643- 6

**SAGAR, R.V.:** An experimental Study on Acoustic Emission Energy and Fracture Energy of Concrete. In *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, Bangalore, India, 10–12 December **2009**

**SAITO, S., UENO, N., HARADA, H., OKAMURA, S., SUZUKI, T.:** U.S. Patent No. 7,947,242, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, **2011**

**SANSALONE, M.J., STRETT, W.B.** Impact-echo. *Nondestructive evaluation of concrete and masonry*, **1997**

**SANSALONE, M.J., STRETT, W.B.:** The Impact-Echo Method. *Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, **1998**, vol. 3 no. 2, ISSN 1435-4934

**SAUSE, M.:** Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources. *Journal of Acoustic Emission*, **2011**, 29, pp. 184-196

**SCOTT, I.G.:** Basic acoustic emission (*Nondestructive Testing Monographs and Tracts*). CRC Press, **1991**, Vol. 6, ISBN: 978-2-8812-4352-3

**SHIOTANI, T.:** Evaluation of repair effect for deteriorated concrete piers of intake dam using AE activity. In *Advanced Materials Research*, **2006**, vol. 13, pp. 175-180, ISSN: 1662-8985

**SHULL, P.J.:** *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications*. CRC Press, **2002**, ISBN: 978-0-8247-8872-8

**SCHUBERT, F., KÖHLER, B.** Ten lectures on impact-echo. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **2008**, 27(1), pp. 5-21, ISSN: 0195-9298

**SIDDIQUE, R.:** *Waste materials and by-products in concrete*. Springer Science & Business Media, **2007**, ISBN: 978-3-540-74293-7

**SIKORSKI, W.:** *Acoustic emission – research and applications*. InTech, Rijeka **2013**, ISBN 978-953-51-1015-6

**SMUTNÝ, J., PAZDERA, L.:** Časově frekvenční analýza se zaměřením na železniční konstrukce. *AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., Brno, 2009*, ISBN: 978-80-7204-664-5

**ŠAMÁRKOVÁ, K., TOPOLÁŘ, L., PAZDERA, L.:** Monitoring cement mortar lifetime by means of impact – echo and acoustic emission methods. In *10 th International Conference NDT 2012 Non- Destructive Testing in Engineering Practice*. 1. Brno: *AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2012a*, pp. 112-118, ISBN: 978-80-7204-823-6

**ŠAMÁRKOVÁ, K., TOPOLÁŘ, L., PAZDERA, L.:** Exploring the possibilities the application of waveguides when measured by impact- echo method and method of acoustic emission. In *10 th International Conference NDT 2012 Non- Destructive Testing in Engineering Practice*. 1. Brno: *AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2012b*, pp. 105-111, ISBN: 978-80-7204-823-6

**ŠIMONOVÁ, H., HAVLÍKOVÁ, I., KERŠNER, Z., SCHMID, P., TOPOLÁŘ, L., ROVNANÍK, P.:** Effect of Carbon Nanotubes in Alkali Activated Slag Mortars on Basic Fracture Parameters Obtained via Double – K Fracture Model. In *Brittle Matrix Composites 11*. Warsaw: *ZTUREK Research- Scientific Institute, 2015*, pp. 279-288, ISBN: 978-83-89687-96-8

**ŠIMONOVÁ, H., TOPOLÁŘ, L., HAVLÍKOVÁ, I., ROZSYPALOVÁ, I., KUCHARCZYKOVÁ, B., KERŠNER, Z., BÍLEK, V. Jr.:** Double-K fracture model parameters of alkali activated binders based concrete specimens. *2nd Int. Conf. on Engineering Sciences and Technologies*. Košice: *Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2016*, pp. 1-4, ISBN: 978-80-553-2564-4

**TOPOLÁŘ, L., PAZDERA, L., BÍLEK, V., DĚDEČKOVÁ, L.:** Acoustic Emission Method Applied on Four Point Loading of Concrete Structures with and without Small Wires. In *Proc. of the 50<sup>th</sup> Annual Conference on Experimental Stress Analysis, Praha, 2012*, pp. 477-484, ISBN: 978-80-01-05060-6.

**TOPOLÁŘ, L., PAZDERA, L.:** Acoustic Emission in Protected and Non- Protected Concrete During the First 24 Hours. In *Architecture, Building Materials and Engineering Management*

IV. Applied Mechanics and Materials, Switzerland, **2014a**, pp. 1149-1152, ISBN: 978-3-03835-164- 1, ISSN: 1660-9336

**TOPOLÁŘ**, L.: Quantification of Micro-cracks by Acoustic Emission Method during Setting and Hardening of Concrete. In Ecology and New Building Materials and Products. Advanced Materials Research, Switzerland, **2014b**, pp. 199-202. ISBN: 978-3-03835-188-7, ISSN: 1022-6680

**TOPOLÁŘ**, L., PAZDERA, L., CIKRLE, P.: Acoustic Emission Monitoring during Static Modulus Elasticity Test of Concrete Specimen. In 51<sup>st</sup> Annual of the International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis, EAN 2013, Applied Mechanics and Materials, Switzerland, **2014c**, pp. 267-272, ISBN: 978-3-03785-977- 3, ISSN: 1660-9336

**TOPOLÁŘ**, L., TIMČAKOVÁ, K., MISÁK, P., PAZDERA, L.: Vliv vodního součinitele na vybrané parametry signálů akustické emise získané během tuhnutí a tvrdnutí betonových směsí. In Proceedings of the 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, **2015a**, pp. 1-5, ISBN: 978-80-227-4463- 8

**TOPOLÁŘ**, L., ŠIMONOVÁ, H., MISÁK, P.: Effect of Concrete Mixture Composition on Acoustic Emission and Fracture Parameters Obtained from Three-point Bending Test. In Binders, Materials and Technologies in Modern Constructions. Advanced Materials Research. Switzerland: Trans Tech Publication, **2015b**, pp. 152-155, ISBN: 978-3-03835-452-9, ISSN: 1022-6680

**TOPOLÁŘ**, L., ŠIMONOVÁ, H., MISÁK, P., DANĚK, P., KERŠNER, Z., PAZDERA, L.: Influence of Aeration of Concrete on Acoustic Emission and Fracture Mechanical Parameters Obtained from Three – point Bending Tests. In Ecological and New Building Materials and Products. Advanced Materials Research. Switzerland: Trans Tech Publications, **2015c**, pp. 237-242, ISBN: 978-3-03835-587- 8, ISSN: 1022-6680

**TOPOLÁŘ**, L., MISÁK, P., KOCÁB, D., MATYSÍK, M.: Applying Method of Acoustic Emission for Monitoring of Different Concrete Mixture during Setting and Hardening. In Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015, Solid State Phenomena. Softcover, Switzerland: Trans Tech Publications, **2016a**, pp. 91-95, ISBN: 978-3-03835-675-2, ISSN: 1662-9779

**TOPOLÁŘ**, L., ROVNANÍK, P., PAZDERA, L.: Analysis of Acoustic Emission Signals Generated by Cracks during Three – point Bending Test. In 54th International Conference on Experimental Stress Analysis. Czech Republic: Department of Mechanics, Faculty of Applied Sciences, University of West Bohemia, **2016b**, pp. 1-4, ISBN: 978-80-261-0624- 1

**TOPOLÁŘ**, L., PAZDERA, L., KUCHARCZYKOVÁ, B., SMUTNÝ, J., MIKULÁŠEK, K.: Using acoustic emission methods to monitor cement composites during setting and hardening. Applied Sciences - Basel, **2017a**, vol. 7, no. 5: 451, pp. 1-11, ISSN: 2076-3417

**TOPOLÁŘ**, L., KOCÁB, D., MISÁK, P., PAZDERA, L., HODULÁKOVÁ, M., KUCHARCZYKOVÁ, B.: The Analysis of Acoustic Emission Signals Generated in Cement-

based Composites During the Cyclic Loading Test. In Experimental Stress Analysis 2017, Košice, **2017b**, pp. 402-407, ISBN: 978-80-553-3167- 6

**TOPOLÁŘ, L., DVOŘÁK, R., PAZDERA, L.:** The Assessment of High-Temperature Degraded Concrete Specimens of Different Mixtures by Acoustic Emission Method during Three-Point Bending Test and Pulse Velocity Method in Comparison with Destructive Tests. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction III. Materials Science Forum, Switzerland: Trans Tech Publications, **2017c**, pp. 88-93, ISBN: 978-3-0357-1157-8, ISSN: 0255-5476

**UHLÍŘ, J., SOVKA, P.:** Číslicové zpracování signálů. Vydavatelství ČVUT, Praha, **1995**, ISBN: 80-01-01303-0

**VALLEN, H.:** AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications. NDT.net, **2002**, 7(9)

**VAN DEN ABEELE, K., DESADELEER, W., DE SCHUTTER, G., WEVERS, M.:** Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics. Cement and concrete research, **2009**, 39(5), pp. 426-432, ISSN: 0008-8846

**ZHANG, Y.M., CHEN, S.X., CHEN, B., SUN, W.:** Dry shrinkage, frost resistance and permeability of rubber included concrete. Key Engineering Materials, **2006**, vol. 302, pp. 120-124, ISSN: 1662-9795

**ČSN EN 196-1** - Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti

**ČSN ISO 1920-10** - Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

**ČSN EN 12390-13** - Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku

**JCMS-III B5706** – Monitoring Method for Active Cracks in Concrete by Acoustic Emission, Federation of Construction Materials Industries, Japan, 2003

[https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Theory\\_Sources.php](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Theory_Sources.php) [cit. 05.07.2017]

<http://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=474> [cit. 10.07.2017]

<http://dakel.cz/> [cit. 06.07.2017]

[http://www.tiepie.com/en/products/Oscilloscopes/Handyscope\\_HS3/Key\\_specifications](http://www.tiepie.com/en/products/Oscilloscopes/Handyscope_HS3/Key_specifications) [cit. 25.07.2017]

<http://www.impact-echo.com> [cit. 23.07.2017]