

# VLIV VODNÍHO SOUČINITELE NA PARAMETRY AKUSTICKÉ EMISE ZÍSKANÉ PŘI URČENÍ STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI

THE INFLUENCE OF THE WATER-CEMENT RATIO ON ACOUSTIC EMISSION  
PARAMETERS MEASURED DURING TESTS OF THE STATIC MODULUS OF  
ELASTICITY

Ing. Michaela Hoduláková; Mgr. Libor Topolář, Ph.D.;  
Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

## ABSTRAKT

Stavební materiály se od počátku svého vzniku neustále vyvíjí a také se stále hledají nové možnosti pro poznávání a zdokonalování jejich vlastností, zejména mechanických a deformačních. Tento článek je zaměřen především na zjištění hodnot statického modulu pružnosti za současného měření akustické emise. Pro experiment byly zvoleny tři jemnozrnné kompozity s různou hodnotou vodního součinitele. Metoda akustické emise se často používá k detekci možného selhání struktury materiálu, zejména ve velmi raném stádiu poškození – většinou dlouho předtím, než struktura zcela selže. Příspěvek prezentuje experiment zaměřený na analýzu signálů akustické emise získaných při běžně používaném měření statického modulu pružnosti jemnozrnných kompozitu na bázi cementu. Pro bližší popis chování materiálů při zatížení a pro stanovení časového vývoje poruch během zatěžování byly ze záznamů akustické emise sestaveny výsledné diagramy.

**Klíčová slova:** Akustická emise, modul pružnosti, statická zatěžovací zkouška, cement, jemnozrnné kompozity, vodní součinitel.

## ABSTRACT

Since their inception, building materials have been constantly improving. New ways to explore and improve their properties are constantly being investigated (especially with the goal of improving the mechanical and deformation characteristics of the materials). This article is focused on identifying and comparing values of the static modulus of elasticity and acoustic emission of fine-grained composites and determining how the water-cement ratio influences them. The acoustic emission method is often used to detect a failure at a very early stage of damage long before a structure completely fails. The paper presents an experiment focused on analysing acoustic emission signals captured during a commonly used static modulus elasticity test of specimens of fine-grained cement-based composites. In order to better understand the behaviour of the materials under load and to describe the development of failures, three fine-grained cement composites were tested for their acoustic emission patterns. The data was then plotted in diagrams.

**Key words:** Acoustic emission, modulus of elasticity, static load test, cement, fine-grained composites, water-cement ratio.

## 1 ÚVOD

Již před mnoha lety se začaly používat maltoviny. Obyvatelé starověkého Egypta se například setkali s pálenou sádro. Řekové a Římané, kteří používali pálený vápennec, se později naučili s tímto

materiálem vytvářet kompozity, které je možné považovat za vůbec první betony v historii [1]. Dnes je pravděpodobně každý schopen vytvořit směs z cementu, kameniva a vody, ale vyrobit kompozitní materiál, který splňuje určité požadavky, vyžaduje navíc značnou míru zkušeností a znalostí.

Hlavním cílem tohoto příspěvku je rozšíření znalostí v oboru stavebních materiálů v rámci jejich vlastností. V současnosti je stále více v popředí zájmu stavebních odborníků modul pružnosti, který udává schopnost materiálu přetvořit se pod působícím napětím. Tato schopnost je ovlivněna velkou řadou faktorů [2], [3]. Článek pojednává o experimentálním ověření modulu pružnosti v tlaku vybraných jemnozrnných kompozitních materiálů s různým vodním součinitelem. Příspěvek je dále zaměřen zejména na výsledky z měření akustické emise.

### 1.1 Modul pružnosti v tahu a tlaku

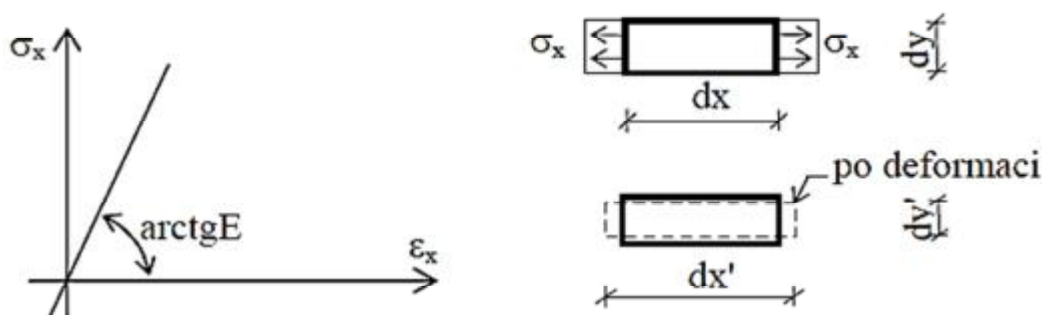
Youngův modul pružnosti (MP), charakterizovaný v pružné oblasti, definuje míru tuhosti materiálu. Je to přetvárná vlastnost materiálu, jež popisuje jeho schopnost chovat se pod určitým zatížením do jisté míry pružně. Pokud má některý materiál vyšší MP než jiný, znamená to, že bude méně náchylný na deformace a naopak. Tato materiálová charakteristika se označuje velkým písmenem E a udává se v MPa, případně v GPa. Hodnoty modulů pružnosti se využívají u spousty statických výpočtů. Protože hodnota modulu pružnosti závisí do jisté míry na tom, jak je MP definován, je důležité správně vymezit pojem MP a zkušební postup pro jeho stanovení [2], [4], [5], [6], [7], [8].

V mezích Hookova zákona lze MP v tahu a tlaku charakterizovat jako koeficient přímé úměrnosti mezi normálovým napětím  $\sigma_x$  a poměrným přetvořením  $\varepsilon_x$ , které vzniká při jednoosé napjatosti působením napětí na elementární kvádr ve směru osy x (viz Obr. 1). Jinými slovy je modul pružnosti fyzikální konstantou, jež má rozměr napětí a definuje úhel sklonu lineární části deformačního diagramu.

Modul pružnosti je možné vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti [MPa],  
 $\sigma$  je napětí [MPa],  
 $\varepsilon$  je poměrné přetvoření [-] [4].



Obr. 1 Hookův zákon v tahu a tlaku [4]

U skutečných látek bývají zaznamenány průběhy deformací vzhledem k napětí mnohem složitější, a tak se za použití různých idealizovaných diagramů různě aproximují a nahrazují [5]. Zkušebních

postupů, pomocí kterých je možné stanovit modul pružnosti cementového kompozitu, je hodně. Tento příspěvek se zabývá pouze zjištěním statického modulu pružnosti v tahu a tlaku.

## 1.2 Akustická emise

Akustická emise (AE) je fyzikální jev, který se projevuje v materiálech. Při tomto jevu dochází k uvolňování částí nahromaděné elastické energie v důsledku dynamických procesů (vyvolaných vnějšími nebo vnitřními silami) [9].

Nedestruktivní metoda, která je na tomto jevu založená, se nazývá metoda AE. Podle fyzikálního účinku, na kterém je metoda AE založena, se společně s metodou mechanické impedance, tlumeného rázu či impakt – echo metody řadí do skupiny elektrodynamických metod [10].

Princip této metody je založen na snímání mechanických impulzů dilatačních vln (vyvolaných mikroporušením vzniklým např. od zatížení), které se šíří prostředím jako ultrazvukové (UZ) signály. Velkou výhodou této metody je například možnost určení vznikající trhliny dříve, než ji lze lokalizovat okem nebo mikroskopem. Tato metoda je v praxi velice oblíbená zejména díky tzv. Kaiserovu efektu, který poprvé zkoumal Joseph Kaiser. Tento efekt popisuje jev, kdy je u materiálu při zatížení detekce pomocí AE možná teprve až po překročení předchozí úrovně zatížení, neboť před dosažením předchozího maximálního zatížení během opětovného zatěžování se materiály chovají elasticky. Pokud je Kaiserův efekt trvalý, pak tyto materiály vykazují malou nebo žádnou aktivitu akustické emise před dosažením předchozího maximálního zatížení. Na základě stanovení historie zatěžování lze odhadnout rezervu únosnosti prvku před jeho destrukcí z průběhu intenzity rozvoje vnitřních trhlin [10].

Z výstupů měření akustické emise je možné vidět počet překmitů signálů AE, které určují takovou kvantitu překmitů signálu akustické emise, jež při daném časovém intervalu překročí přesně nastavenou prahovou hodnotu. Tento parametr je jednoduchým měřítkem určení velikosti signálu, neboť silnější signály dávají větší počet překmitů. Při současném stupni poznání AE se předpokládá, že počet překmitů odhaluje množství vznikajících mikrotrhlin (trhlin) v materiálu, ale neříká nic o jejich velikosti ani orientaci [9], [11], [12], [13]. Velikost detekovatelné události akustické emise ukazuje amplituda signálů AE (maximální elektrické napětí dosažené událostmi akustické emise), kdy odhalení závisí na rozkmitu, který překoná prahovou hodnotu. Předpokládá se, že amplituda ukazuje na velikost vznikajících mikrotrhlin (trhlin) v materiálu při zátěžové zkoušce [11], [12], [13].

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci popisovaného experimentu byly vyrobeny cementové malty s různým poměrem písku (P), cementu (C) a vody (W) s označením I, III a IV. Složky kompozitu odpovídaly normě ČSN EN 196-1 [14] pro zkoušení cementu, kdy byly zvoleny tyto suroviny:

- cement CEM I 42,5 R (cementárna Mokrá),
- normalizovaný křemenný písek CEN, frakce 0–2 mm,
- destilovaná voda.

Všechna plniva, pojiva, voda i plastifikační přísada (figurující v kompozitu IV) byla nadávkována hmotnostně dle předem stanovených receptur. Údaje o recepturách, vodním součiniteli a také o rychlosti míchání jednotlivých směsí jsou uvedeny v Tab. 1.

Označení kompozitu		I	III	IV
Receptura	P:C:W	3:1:0,5	3:1:0,47	3:1:0,35
Vodní součinitel	w/c	0,50	0,47	0,35
Plastifikátor	% z hmotnosti cementu	-	-	1 %
Rychlost míchání	otáčky/min	25	30	40

**Tab. 1 Složení jednotlivých kompozitů včetně hodnot jejich vodních součinitelů a informace o rychlosti míchání směsi**

Vyrobená zkušební tělesa ve tvaru válečků o průměru 42 mm a výšce 160 mm byla uložena bez přikrytí horního povrchu na vhodné místo o teplotě  $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti okolního prostředí 55 %, kde zrála 3 dny (pouze u kompozitu I byla relativní vlhkost okolního prostředí 75 %). Poté byla zkušební tělesa odformována a ponechána bez ošetřování v prostředí s teplotou  $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkostí okolního prostředí 55 %. Následně byla zkušební tělesa zkoušena po 28 dnech zrání.

Postup pro zkoušení těles byl zvolen na základě platné české normy pro stanování modulu pružnosti u prvků z betonu ČSN ISO 1920-10 [15]. Metodika zkoušení podle této normy je založena na zatěžování zkušební tělesa mezi základním napětím (je vždy 0,5 MPa) a horním napětím (třetina pevnosti betonu v tlaku) v určitých cyklech, přičemž jsou na tomto tělese zároveň sledovány a zapisovány změny podélného poměrného přetvoření [15]. Po třetím zatěžovacím cyklu, který je současně měřicí, byla zkušební tělesa zatěžována až do porušení, viz Obr. 2. Během celé zkoušky statického modulu pružnosti byla měřena odezva materiálu pomocí metody AE, viz Obr. 3.



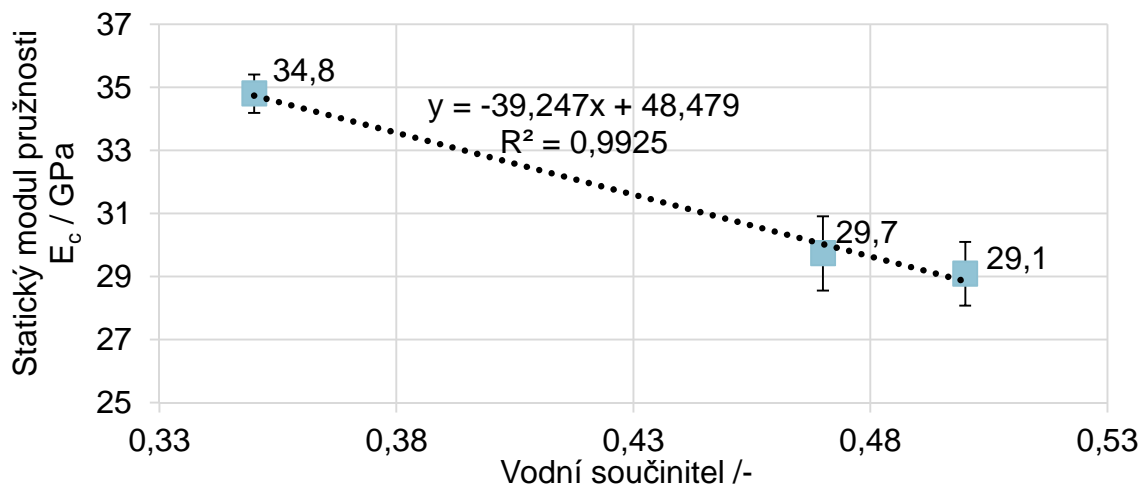
**Obr. 2 Těleso po zkoušce statického modulu pružnosti  $E_c$**



**Obr. 3 Stanovení statické hodnoty MP  $E_c$  a měření odezvy materiálu pomocí metody AE**

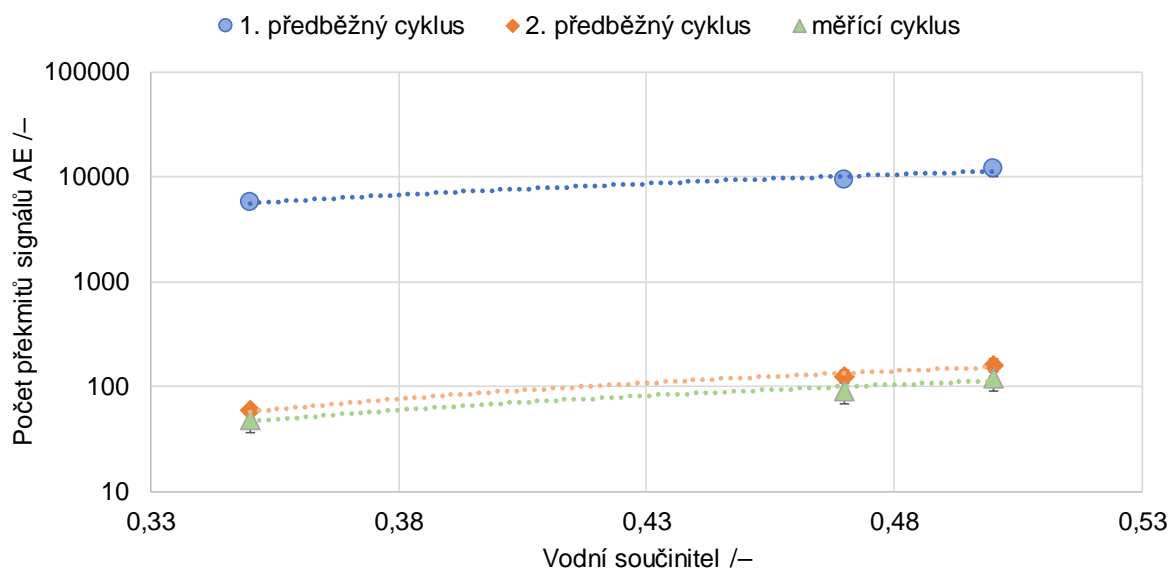
### 3 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

Na Obr. 4 je znázorněna závislost statického modulu pružnosti na vodním součiniteli použitých kompozitů. Je zřejmé, že s větším vodním součinitelem klesá hodnota modulu pružnosti.

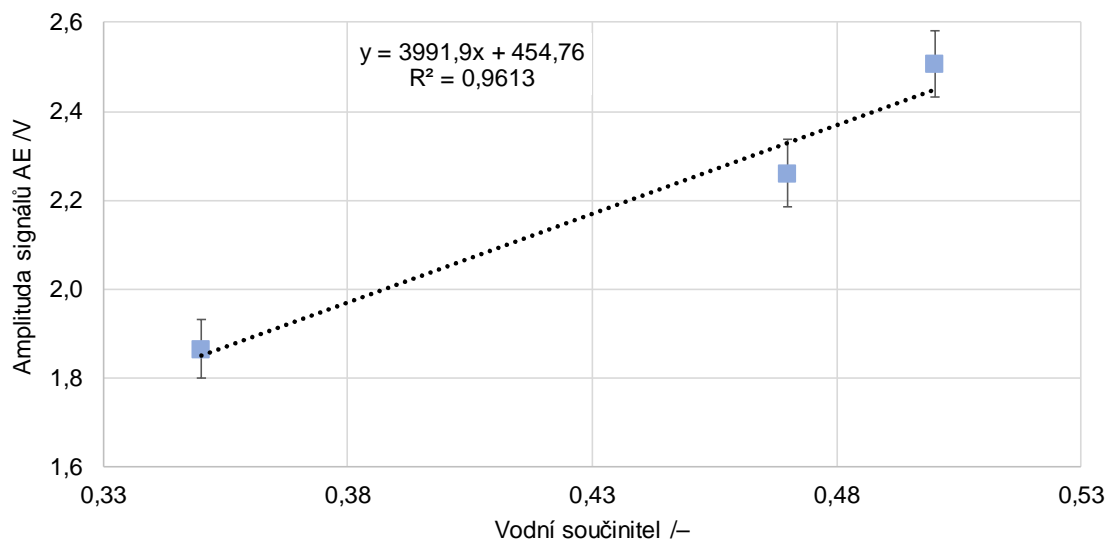


Obr. 4 Závislost statického MP v tlaku v závislosti na vodním součiniteli u cementových malt po 28 dnech jejich zrání

Na Obr. 5 je zobrazen počet překmitů signálů AE v jednotlivých zatěžovacích cyklech. Je zřejmé, že se zde projevil tzv. Kaiserův efekt, neboť nejvíce vznikajících mikrotrhlin se objevilo při prvním předběžném cyklu. Při druhém předběžném a třetím měřicím cyklu již bylo vznikajících mikrotrhlin zaznamenáno podstatně méně. Současně je vidět, že pravděpodobně nejvíce mikrotrhlin vzniklo u vzorků s vyšším vodním součinitelem [16].



Obr. 5 Relativní počet překmitů signálů AE v průběhu zkoušky statického MP u cementových malt po 28 dnech jejich zrání



**Obr. 6 Změna velikosti amplitudy v průběhu měřícího cyklu u zkoušky statického MP u cementových malt po 28 dnech jejich zrání**

Z grafu na Obr. 6 je patrné, že u kompozitů s nižším vodním součinitelem (vyšším statickým modulem pružnosti) byla zjištěna nižší velikost amplitudy, a tedy že v těchto materiálech pravděpodobně vznikaly mikrotrhliny menší velikosti než u kompozitů s vyšším vodním součinitelem. Různé typy prasklin vytvářejí různé typy signálů AE s různými parametry. Tyto rozdíly mohou souviset se stupněm poškození struktury nebo složení materiálu. Menší mikrotrhliny generují mnoho událostí s malou amplitudou, zatímco větší generují méně událostí, ale s vyššími amplitudami [17].

#### 4 ZÁVĚR

Studium vlastností cementových kompozitů při zatížení je stejně důležité pro stavebnictví jako studium oceli ve strojírenství. Pro pochopení chování stavebních materiálů na bázi cementu je užitečné znát změny mikrostruktury při jejich zatížení.

V příspěvku jsou prezentovány výsledky experimentu zaměřeného na analýzu signálů AE při určení statického modulu pružnosti cementových kompozitů. Bylo potvrzeno, že vyšší vodní součinitel znamená u kompozitů na bázi cementu nižší hodnotu jejich modulu pružnosti. Současně lze konstatovat, že v použitých kompozitech s nižším vodním součinitelem vznikají při zatížení zřejmě mikrotrhliny menší velikosti než u kompozitů s vyšším vodním součinitelem.

#### Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory GAČR 17-14302S „Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí“ a v rámci projektu J-17-4554 podporovaného Vysokým učením technickým v Brně, Fakultou stavební.

**Použitá literatura**

- [1] NEVILLE, A.M. Properties of concrete. 4th and final ed. Harlow: Longman Group, 1995. ISBN 0582230705.
- [2] KOCÁB, Dalibor, Petr MISÁK, Petr CIKRLE, Tereza KOMÁRKOVÁ a Bronislava MORAVCOVÁ. STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU V TLAKU DLE ČSN ISO 6784 A ČSN EN 12390-13. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2014, (32014), 74-79.
- [3] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 8021416475.
- [4] NOVÁK, Drahomír a Luděk BRDEČKO. Pružnost a pevnost: Modul BD02 - M01 Základní pojmy a předpoklady. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004.
- [5] KOCÁB, Dalibor. Experimentální stanovení faktorů ovlivňujících statický modul pružnosti betonu s využitím nedestruktivních zkušebních metod. Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cíkrle, Ph.D.
- [6] HUŇKA, Petr, Jiří KOLÍSKO, Stanislav ŘEHÁČEK a Miroslav VOKÁČ. ZKUŠEBNÍ A TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA MODUL PRUŽNOSTI BETONU – REKAPITULACE. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2012, 12(42012), 62-67. ISSN 12133116.
- [7] HODULÁKOVÁ, Michaela. Modul pružnosti přírodního kamene. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.
- [8] CIKRLE, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. Beton. Praha: Česká betonářská společnost, 2011, (32011).
- [9] Diagnostická metoda akustické emise a její perspektivy. Techmagazín.cz [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING, 2017 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/85>
- [10] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLE a Pavel SCHMID. Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [11] PAZDERA, Luboš, Jaroslav SMUTNÝ a Pavel MAZAL. Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004. ISBN 8021428023.
- [12] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. Technická diagnostika - 4. díl. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [13] POLLOCK, A. Practical guide to acoustic emission testing. Physical Acoustic Corporation - Princeton: New Jersey, 1988.
- [14] ČSN EN 196 - 1 (72 2100). Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [15] ČSN ISO 1920-10 (73 1319): Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Český normalizační institut, 2014.
- [16] GROSSE, Christian, OHTSU, Masayasu. Acoustic Emission Testing, Springer, Berlin, Germany, 2008.
- [17] LI, Zongjin, Xi, Y. Application of acoustic emission technique to detection of concrete cracking and rebar corrosion, NDT-CE: Int. Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Germany, 1995.