

Václav VESELÝ<sup>1</sup>, Petr FRANTÍK<sup>2</sup>, Ondřej VODÁK<sup>3</sup>, Zbyněk KERŠNER<sup>4</sup>

LOKALIZACE PRŮBĚHU PORUŠOVÁNÍ V BETONOVÝCH VZORCÍCH STANOVENÁ  
POMOCÍ AKUSTICKÉ A ELEKTROMAGNETICKÉ EMISE A NUMERICKÝCH SIMULACÍ

LOCALIZATION OF PROPAGATION OF FAILURE IN CONCRETE SPECIMENS ASSESSED  
BY MEANS OF ACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC EMISSION AND NUMERICAL  
SIMULATIONS

**Abstrakt**

V článku jsou prezentovány výsledky numerické analýzy zaměřené na verifikaci záznamu průběhu porušování – jeho postup a lokalizaci jednotlivých událostí – odehrávajícího se ve kvazikřehkých materiálech na bázi cementu. Experimentální metodika pro sledování porušení, která je zde zkoumána a verifikována, vychází z (kombinace) akustické a elektromagnetické emise (AE, resp. EME). Analýza je prováděna na zkušebních tělesech z betonu s cílem odhalit typ a intenzitu porušení, jež je schopna použitá technika zachytit. Pro zde prezentovanou numerickou analýzu jsou použity výpočetní nástroje ATENA, resp. FyDiK, založené na mechanice kontinua se zahrnutím modelu kohezivní trhliny, resp. na metodě fyzikální diskretizace kontinua, rovněž využívající materiálový model zohledňující kohezivní povahu kvazikřehkého lomu.

**Klíčová slova**

Cementové kompozity, kvazikřehké porušení, akustická emise, elektromagnetická emise, numerické simulace, model kohezivní trhliny, fyzikální diskretizace kontinua.

**Abstract**

This paper presents a numerical analysis aimed at verification of monitoring of failure – its propagation and the locations of the individual failure events – in quasi-brittle cement-based materials performed using a monitoring technique based on utilization of (combination of) acoustic emission (AE) and electromagnetic emission (EME) phenomena. The analysis is conducted on concrete laboratory specimens and helps to reveal the type and intensity of failure which can be captured by this experimental technique. Computational tools ATENA and FyDiK based on continuum mechanics with implemented cohesive crack model and physical discretization of continuum, again with a material model considering the cohesive nature of quasi-brittle fracture, respectively, are employed in the numerical analysis.

**Keywords**

Cementitious composites, quasi-brittle failure, acoustic emission, electromagnetic emission, numerical simulation, cohesive crack model, physical discretization of continuum.

---

<sup>1</sup> Ing. Václav Veselý, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 362, e-mail: vesely.v1@fce.vutbr.cz.

<sup>2</sup> Ing. Petr Frantík, Ph.D., dtto, tel.: (+420) 541 147 376, e-mail: kitnarf@centrum.cz.

<sup>3</sup> Bc. Ondřej Vodák, dtto, e-mail: vodak.o@study.fce.vutbr.cz.

<sup>4</sup> doc. Ing. Zbyněk Keršner, dtto, tel.: (+420) 541 147 362, e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz.

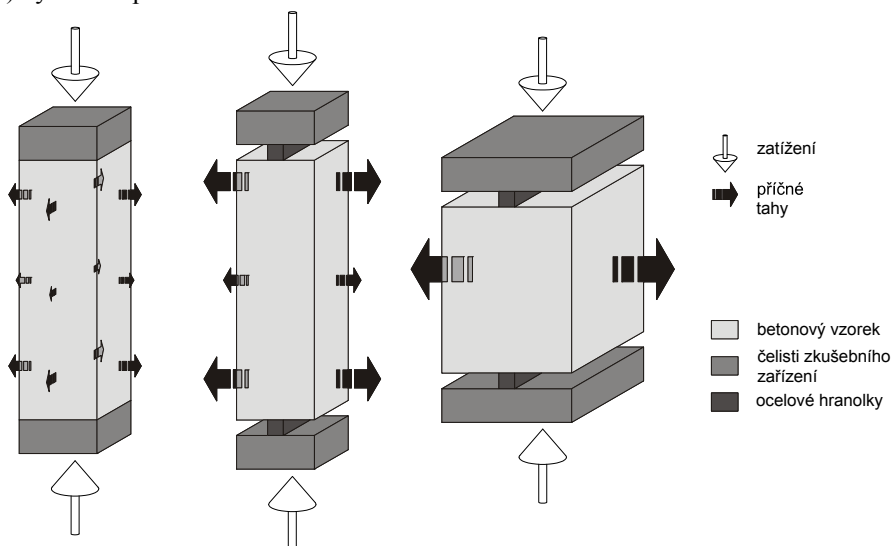
# 1 ÚVOD

Iniciaci a šíření trhlin v pevných látkách lze detekovat pomocí akustických a elektromagnetických jevů (pro materiály ve stavebnictví např. [8], [14], [23]). Tyto jevy jsou označovány jako akustická/elektromagnetická emise (AE/EME). Při vývoji metodologie měření a vyhodnocování vzniku a šíření trhlin/y pomocí těchto jevů lze s výhodou použít výpočetních nástrojů schopných simulovat postup porušování materiálu. Tento článek je věnován právě simulacím porušování vybraných stavebních materiálů, a to cementových kompozitů, při lomových zkouškách. Hlavní pozornost je soustředěna na sledování distribuce porušení po objemu zkušebních vzorků a disipaci energie při porušování, která se (nejen) u cementových kompozitů projevuje akustickou a elektromagnetickou emisí. Pro simulace jsou použity výpočetní nástroje založené na metodě konečných prvků (MKP) s implementovaným modelem kohezivní trhliny (komerčního software ATENA [3]), resp. na metodě fyzikální diskretizace kontinua (vlastní pružinový/částicový model formulovaný jako nelineární dynamický systém, program FyDiK [5]).

## 2 NUMERICKÉ SIMULACE

### 2.1 Modelování metodou konečných prvků, software ATENA

V předchozích pracích autorů, jež se zabývají související problematikou, byly s použitím MKP softwaru ATENA [3] provedeny numerické studie polí napětí a deformací a průběhu porušení během testů ve vybraných zkušebních konfiguracích. Práce [19] byla zaměřena na výběr tvaru tělesa a okrajových podmínek testu (pro zatěžování tlakem ve zkušebním zařízení), které by byly vhodné pro studium porušování kvazikřehkých materiálů pomocí EME (resp. kombinace EME a AE). Studie byla prováděna jako rovinná úloha, bylo použito několik různých materiálových modelů pro beton. Následné analýzy ([20], [11], [12]) se prováděly ve 3D verzi použitého softwaru a soustředily se na dva tvary těles (sady A a B, tj. štíhlé resp. masivní těleso – viz obr. 1) a dvě zatěžovací konfigurace (neboli geometrie, I a II, tj. prostý tlak zkušebního tělesa, resp. tlak přes centrálně umístěné ocelové hranolky způsobující napjatost v tělese vedoucí k porušení příčnými tahy – viz obr. 1) vybrané z předchozí studie.



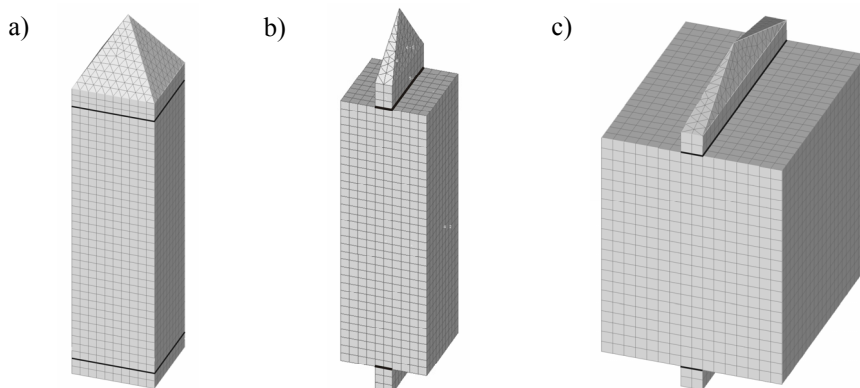
Obr. 1: Schematické znázornění zkušebních těles (sada A – vlevo a uprostřed, sada B – vpravo) v uvažovaných zatěžovacích konfiguracích (konfigurace I – vlevo, konfigurace II – uprostřed a vpravo) [12]

Provedené simulace ověřily možnosti modelování procesů porušování ve zkušebních tělesech podrobených testům ve zvolených zkušebních geometriích. V souvislosti se zkoumanou experimentální technikou využívající jevy AE a EME se však ukázalo jako žádoucí provést

také detailnější analýzu charakteristik simulovaného porušení, např. velikost (otevření) a orientace vznikajících trhlin, resp. odpovídajícího neelastického poměrného přetvoření. Na základě jejich porovnání s charakteristikami záznamů AE/EME by pak bylo možné usuzovat na možnosti a citlivost této experimentální techniky v oblasti monitorování porušení kvazikřehkých materiálů ve stavebnictví (v aplikaci zejména např. na silikátové kompozity a skalní horniny).

### Model

Pro výše nastíněnou podrobnou analýzu byly použity 3D modely z předchozí studie [12]; vývoj metodiky k této analýze a její pilotní zjednodušené testy probíhaly na jim odpovídajících modelech ve 2D. 3D verze modelů včetně MKP sítě jsou pro testy AI, AII a BII (těleso tvaru A v geometrii I, těleso tvaru A v geometrii II, resp. těleso tvaru B v geometrii II) znázorněny na obr. 2.



Obr. 2: 3D modely testů AI (a), AII (b) a BII (c) včetně znázornění zatěžovacích přípravků určujících okrajové podmínky testu

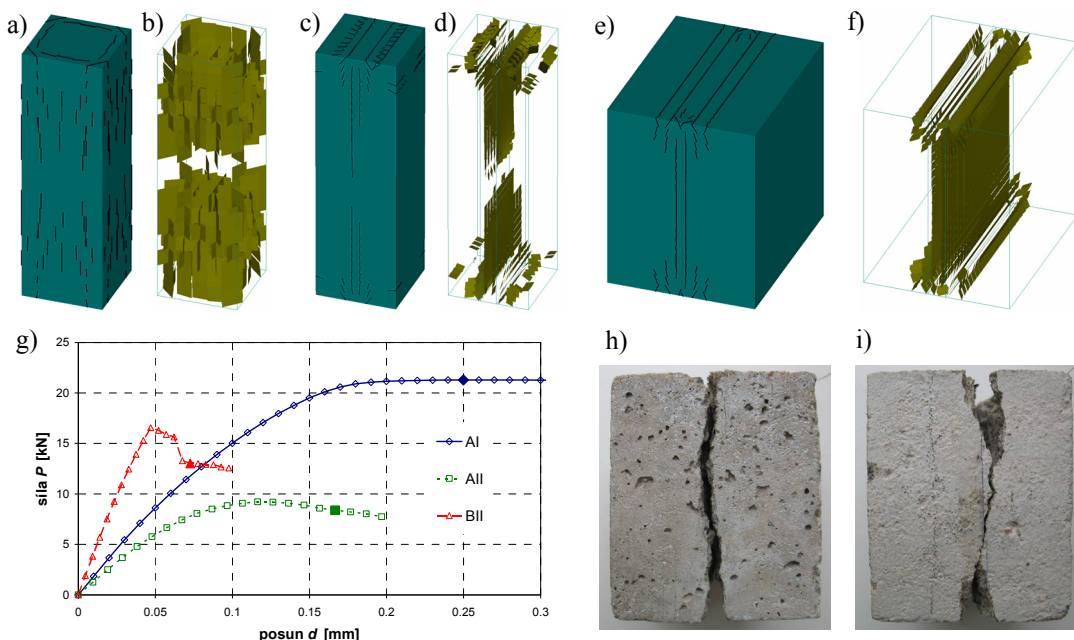
Modelované okrajové podmínky testu jsou schematicky naznačeny na obr 1., dolní příčnick lisu byl uvažován jako pevný (podepřen neposuvně ve všech uzlech MKP sítě na dolní straně modelované příložky), horní příčnick zatěžoval těleso (přes ocelové příložky, resp. hranolky) přírůstkem svislého posunu. Jak je zřejmé z obr. 2, zatěžování deformací bylo uvažováno jen v jednom bodě, vrcholu jehlanu přiloženého k roznášecím podložkám, a to z důvodu zjednodušení monitorování zatěžovací síly (tj. reakce vůči zatěžování přírůstkem posunu). Hodnota modulu pružnosti materiálu přiřazeného zatěžovacímu jehlanu byla zvolena o 3 řády větší než pro ocelové roznášecí podložky, resp. hranolky.

Modely byly ve 2D i 3D verzi vytvořeny v několika variantách hustoty MKP sítě. Třídímní analýzy byly prováděny s lomově-plasticistním materiálovým modelem (3D Non-Linear Cementitious 2 – viz [3]), pro 2D pilotní simulace byl navíc použit SBETA materiálový model [3]. Materiálové modely byly nastaveny tak, aby simulovaly porušení vzorků z betonu o hodnotě krychelné pevnosti v tlaku 20 MPa, na nichž byla prováděna experimentální měření [10].

### Výsledky

Pro porovnání odezvy virtuálních testů – výsledků numerických simulací – s testy skutečnými se typicky využívá zatěžovacích diagramů, tj. závislostí zatěžovací síly a vnášeného posunu (tzv. *load–displacement*, neboli *P–d* diagramy). V těchto diagramech lze pro kvazikřehké materiály/konstrukce rozlišit základní stádia průběhu porušování tělesa, jako jsou lineární chování, nelinearita před dosažením maxima zatížení způsobená vznikem a spojováním mikrotrhlin, vrchol zatížení a začátek sestupné větve diagramu odpovídající lokalizaci porušení a sestupná větev charakteristická pro šíření/otevírání vzniklé makrotrhliny [1], [9], [15], [16].

Další významnou skupinou výsledků je zobrazení (průběhu) napjatosti a deformací a zejména rozsahu porušení, a to pomocí řady parametrů různého typu (napjatostní, deformační, energetické), které výpočetní programy tohoto druhu poskytují. Zde se omezíme pouze na prezentaci vybraných



Obr. 3: Rozložení porušení v objemu tělesa predikované programem ATENA 3D pro testy AI (a, b) AII (c, d) a BII (e, f) – zobrazena je povrchová síť trhlin resp. jejich distribuce uvnitř tělesa; odpovídající simulované zatěžovací diagramy (g); fotografie dvou porušených těles sady BII (h, i)

vzorů trhlin ve stádiu testu při/po dosažení maxima zatížení (z 3D analýzy) a jejich porovnání s odpovídajícími výsledky experimentů [10], [12].

Pro vybrané vzorky experimentální sady AI, AII i BII jsou histogramy četností emisních událostí zachyceny na obr. 5. Je z nich patrné nerovnoměrné, avšak v zásadě ani vhodně lokalizované, porušení pro sadu AI a naopak relativně úzce lokalizované porušení pro sadu BII (histogramy v tomto aspektu dobře korespondují se zobrazeními porušení v obr. 3 – porušení rozestřené po objemu pro AI vs. lokalizované do centrální roviny u BII).

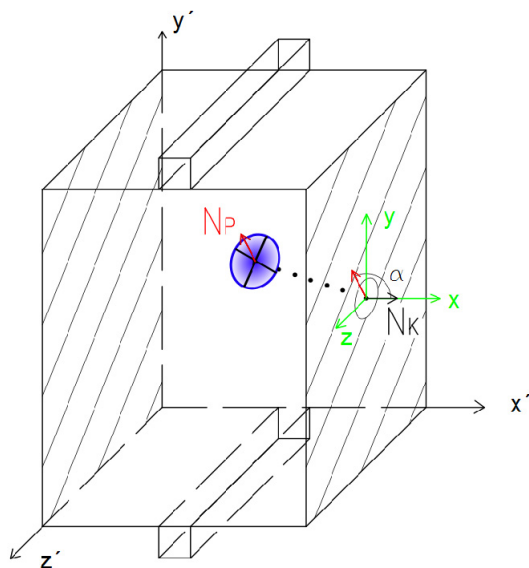
### Zpracování výsledků simulací, doplňkový post-processing

Jak bylo uvedeno výše, vybrané parametry simulovaného porušení se dále zpracovávaly za účelem např. zjištění mezí použitelnosti experimentální techniky pro sledování poškození kvazikřehkých materiálů/konstrukcí ve stavebnictví založené na EME/AE, pochopení a správné interpretace zaznamenaných dat apod.

Jedním z úkolů bylo zpracování výsledků simulací do podoby porovnání s experimentálně naměřenými histogramy popisujícími četnosti událostí způsobujících EME/AE (procesy porušování) v závislosti na vzdálenosti od akustického senzoru umístěného na povrchu vzorku (obr. 4). Poznamenejme, že u experimentálních měření, k jejichž výsledkům publikovaným v [10], [12] je snaha se v této části práce simulacemi přiblížit, byla použita (pouze) dvoukanálová měřicí aparatura (1 kanál pro AE, jeden pro EME). Prostorové rozložení porušení bylo tedy po projekci do 1D vyšetřováno pouze skrze výše zmíněné histogramy. Hlavní autoři prací [10], [11] vyvinuli a v současné době testují vícekanálové měřicí zařízení (5 až 7 snímačů AE), které poskytne 3D rozložení porušení. Výsledky experimentů snímané touto aparaturou budou výhledově také analyzovány s pomocí zde prezentovaných numerických simulací.

Doplňkový post-processing byl proveden tak, že textové výpisy výsledků simulací v programu ATENA 3D byly načteny a zpracovány v programu MS Excel. Vypočtené hodnoty neelastického části hlavního poměrného přetvoření (principal fracture strain,  $\varepsilon_{\text{fract},1}$  – viz [3]) ve všech integračních bodech MKP modelu byly vynásobeny koeficientem, jehož velikost závisí na vzájemné prostorové

orientaci sledovaného neelastického poměrného přetvoření a desek kondenzátoru umístěných na protilehlých stěnách zkušebních těles (úhel  $\alpha$ , viz obr. 4). Hodnota tohoto koeficientu se řídí funkcí kosinus úhlu  $\alpha$ , tj. pokud normálový vektor poměrného přetvoření ( $N_p$ , zde se jedná o normálovou komponentu jednotkového vektoru, kterým je v použitém softwaru ATENA popsán směr vzniklé deformace) svíral nulový úhel s normálovým vektorem desky kondenzátoru ( $N_k$ ), hodnota koeficientu byla rovna jedné, v případě úhlu  $90^\circ$  rovna nule. Výsledky takto spočtených hodnot průmětu hlavního neelastického poměrného přetvoření  $\tilde{\epsilon}_{\text{fract}}$  z každého integračního bodu (betonové části) MKP modelu byly následně filtrovány (s různými prahovými hodnotami filtru, od  $1e-3$  až po  $1e-7$ ), a to za účelem vyšetřit citlivost zkoumané experimentální metody. Jestliže hodnota  $\tilde{\epsilon}_{\text{fract}}$  v daném integračním bodě překračovala nastavený filtr, uvažovala se v tomto bodě existence porušení, tj. vznik lomové události. Ze souřadnic takto vybraných integračních bodů byla určena vzdálenost  $l$  lokalizovaného porušení od akustického senzoru na povrchu vzorku (viz obr. 4). Počet uskutečnivších se lomových událostí byl pak zaříděn podle jejich prostorové vzdálenosti  $l$  od akustického senzoru (třídy od 0,02 m až 0,065 m po krocích 0,005 m). Počty lomových událostí v jednotlivých třídách se následně vydělily celkovým počtem událostí za účelem získání relativní četnosti událostí, kterou lze dobře porovnat s naměřenými experimentálními histogramy v obr. 5.



Obr. 4: Schéma naznačující určení prostorového úhlu mezi normálou k rovině vznikající trhliny a normálou desek kondenzátoru a vzdálenosti mezi vznikající trhlinou a akustickým senzorem; vztahy pro výpočet zpracovávaných parametrů vznikajícího porušení

Z provedené analýzy se dá usuzovat, že experimentální metoda využívající EME/AE zachycuje vznik trhlín odpovídající hodnotě neelastického poměrného přetvoření většího než  $1e-5$ , zhruba  $1e-4$ . Očekává se, že porovnání výsledků simulací s výsledky připravovaných experimentů s vícekanálovou měřicí aparaturou může výrazně zpřesnit tento odhad.

## 2.2 Modelování pomocí fyzikální diskretizace kontinua, program FyDiK

Jiná metoda, kterou lze využít pro zkoumání charakteru procesů porušování vyvolávajících akustickou emisi, je metoda založená na fyzikální diskretizaci kontinua. Hypotetické kontinuum se zde nahrazuje sítí hmotných bodů vzájemně spojených pružinami. Tato metoda umožňuje řešit

Průmět neelastické části hlavního tahového poměrného přetvoření do roviny kolmé k rovině desek kondenzátoru je určen jako:

$$\tilde{\epsilon}_{\text{fract}} = \epsilon_{\text{fract},l} \cos \alpha, \quad (1)$$

kde:

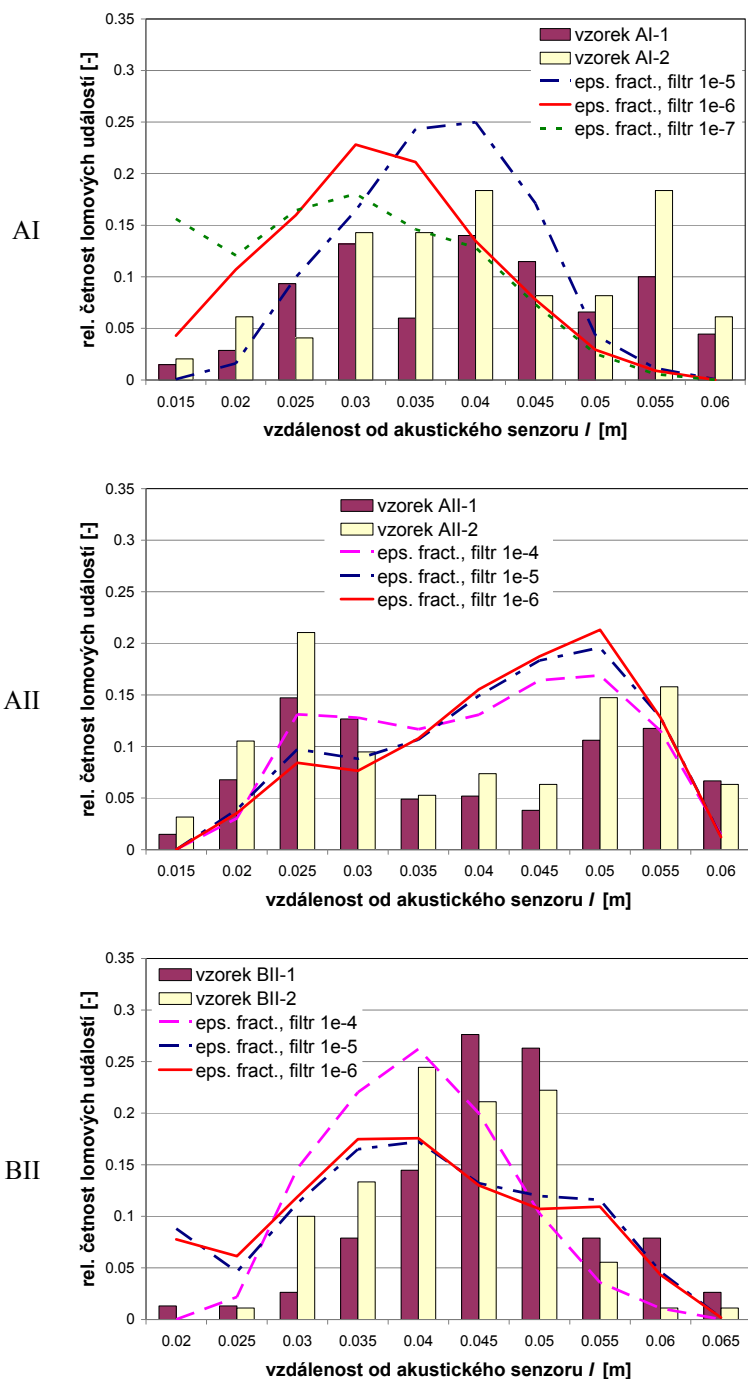
- $\epsilon_{\text{fract},l}$  – je neelastická část hlavního tahového poměrného přetvoření,
- $\alpha$  – je prostorový úhel mezi směrem hlavního tahového poměrného přetvoření a normálou k deskám kondenzátoru.

Vzdálenost mezi integračním bodem a akustickým senzorem se spočte dle vztahu:

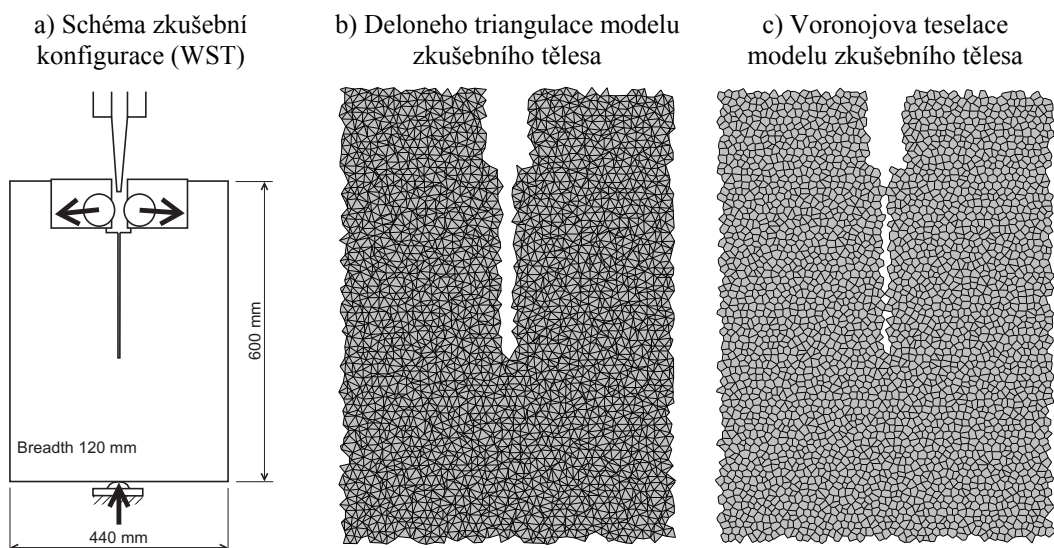
$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

kde:

- $x, y, z$  – jsou souřadnice integračního bodu.



Obr. 5: Experimentálně zjištěné histogramy četnosti událostí v závislosti na vzdálenosti mezi vznikajícím porušením a akustickým senzorem pro dvě vybraná tělesa ze sady AI, AII a BII [12]; histogramy jsou doplněny o výsledky numerických simulací pro několik nastavení filtru pro hodnotu velikosti průmětu neelastického poměrného přetvoření do roviny kolmé k rovině desek kondenzátoru uvažované v analýze, uvažované stádium zatěžování je vyznačeno v zatěžovacích diagramech v obr. 3 plnou značkou



Obr. 6: a) Schéma zkušební konfigurace testu z [13], b) a c) ilustrace tvorby modelu pro simulaci zkoušky metodou vyvinutou pro RBSN [2], [4] (zobrazená síť je výrazně řidší než ta, která byla použita pro simulace, jejíž výsledky jsou zobrazeny)

nelineární úlohy a zároveň nevyžaduje komplikované modely porušování materiálu. Nevýhodou je relativně velká výpočetní náročnost při požadavku dostatečné hustoty sítě. Tuto závislost lze do jisté míry účinně eliminovat použitím paralelního zpracování, které lze pro takové modely jednoduše implementovat [7]. Zde použitý model je implementován v aplikaci FyDiK [5].

Možnosti této metody a její využití byly testovány na modelování fragmentace při impaktu [6] a skrze simulace experimentu z literatury ([13], část výsledků simulací publikováno v [7]). U druhé jmenované skupiny simulací se jedná o tzv. štípací (wedge-splitting) test (WST) prováděný na tělesech relativně velkých rozměrů (viz obr. 6a) vyrobených z betonu dvou složení (lišících se velikostí maximálního zrna kameniva) a malty. Tento experiment byl vybrán proto, že pro něj byly publikovány také záznamy AE zobrazující lokalizace jednotlivých událostí porušování materiálu, bohužel bez indikace energetické náročnosti jednotlivých emisních událostí.

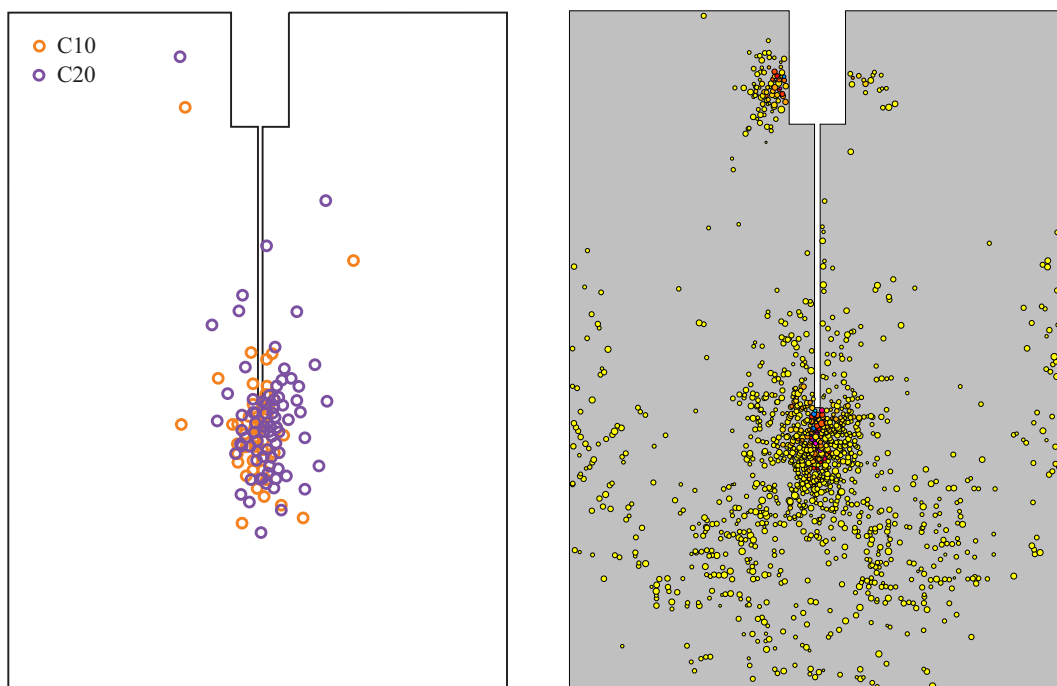
### Model

Materiál vzorku je diskretizován množinou hmotných bodů generovaných v hexagonální mřížce s určitou mírou náhodného šumu. Pro tuto množinu se vytvoří Deloneho triangulace a Voronjova mozaika (teselace). Triangulace určuje geometrii pružinové sítě a teselace vlastnosti pružin, viz obr. 6. Tento postup vychází z techniky, vyvinuté pro tzv. Rigid Body Spring Networks (RBSN), viz [2], [4]. Pružiny jsou modelovány jako kvazikřehké s bilineárním pracovním diagramem (lineární pružná část, lineární změkčení). Detaily ohledně tvorby pružinové sítě a specifikace vlastností pružin lze nalézt v [7].

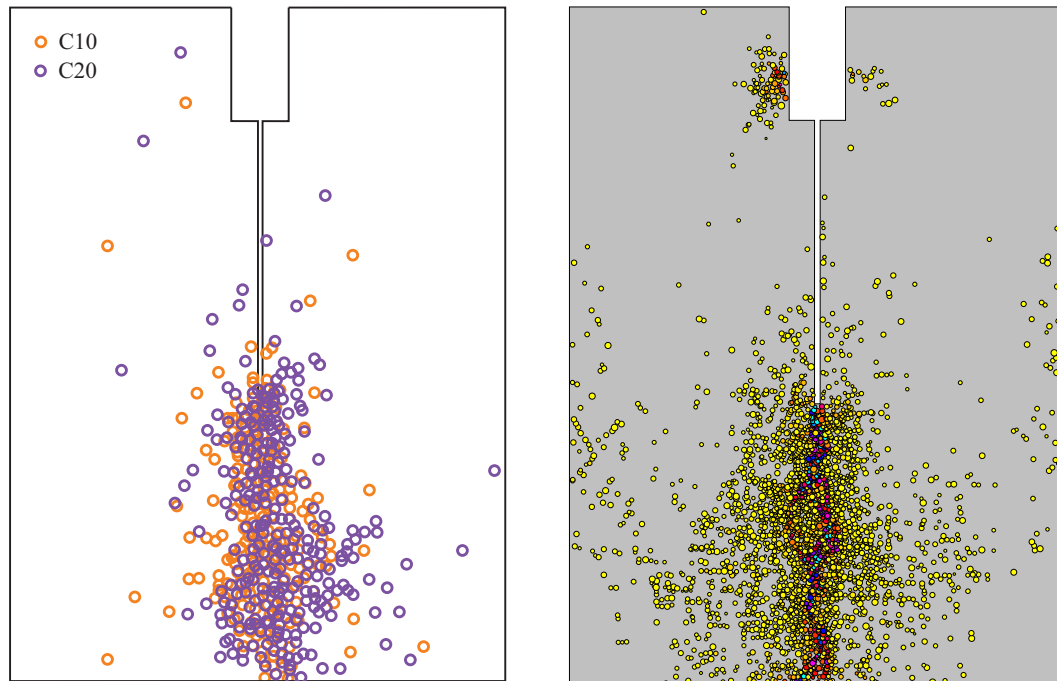
### Výsledky

V průběhu simulace se zaznamenávalo množství energie disipované vlivem porušování pružin. Intenzita této disipace v konkrétní pružině je na obr. 7 znázorněna barvou (od žluté po modrou vzestupně). Pro simulace byla použita značně hustá síť pro FyDiK model, počet událostí porušení je tedy v porovnání s experimentálními daty větší. Je zde však patrné, že odhady rozsahu porušované oblasti tělesa velmi dobře odpovídají experimentálním měřením publikovaným v [13]. Je plánováno použití modelu FyDiK také pro simulace zatěžovacích testů uvedených v části 2.1, při kterých bude prostorové rozložení porušení (včetně jeho dalších aspektů jako např. množství disipované energie apod.) určováno pomocí výše zmíněné vícekanálové měřicí aparatury.

Stádium lomu při maximálním dosaženém zatížení (vrchol zatěžovacího diagramu)



Stádium blízko konce lomového procesu (konec sestupné větve zatěžovacího diagramu)



Obr. 7: Porovnání záznamů AE pro dvě zkušební tělesa (ozn. C10 a C20, viz [13]) – vlevo – a výsledek dynamické simulace modelem FyDiK – vpravo – pro dvě stádia zatěžování



### 3 ZÁVĚR

Článek prezentuje dva přístupy k modelování procesů porušování těles/konstrukcí z cementových kompozitů, jež lze detekovat pomocí experimentálních technik založených na akustické a elektromagnetické emisi, resp. jejich kombinaci. Pochopení a správné interpretace výsledků měření za použití těchto metod lze dosáhnout pomocí detailní analýzy porušování materiálu numerickými nástroji. V článku byly ukázány některé z možností těchto výpočetních nástrojů.

Experimentální techniky využívající EME/AE mají velký potenciál zodpovědět klíčové otázky související se vznikem a šířením porušení v kvazikřehkých materiálech, které je spojeno s vývojem tzv. lomové procesní zóny u vrcholu makroskopické trhliny, což jsou témata, jimiž se autorský kolektiv dlouhodobě zabývá [7], [17], [18], [21], [22].

### PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl realizován za finančního přispění Grantové agentury ČR, projekt P104/11/0734, a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, projekt 1M0579, v rámci činnosti Centra integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS.

### LITERATURA

- [1] BAŽANT, Z.P., PLANAS, J. 1998. *Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials*. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [2] BOLANDER, J. E., YOSHITAKE, K., THOMURE, J. 1999. Stress analysis using elastically uniform rigid-body-spring network. *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, 633, 125–132, 1999.
- [3] ČERVENKA, V. et al. 2005. *ATENA Program Documentation, Theory and User Manual*. Prague: Cervenka Consulting, 2005.
- [4] ELIÁŠ, J. 2009. *Discrete simulation of fracture processes of disordered materials*. Ph.D. thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2009.
- [5] FRANTÍK, P. FyDiK application, <http://www.kitnarf.cz/fydik>, 2007–2011.
- [6] FRANTÍK, P., KERŠNER, Z., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L. 2009. Fractality of simulated fracture. *Key Engineering Materials*, Vol. 409, 154–160, 2009.
- [7] FRANTÍK, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z. 2011. Efficient Lattice Modelling of the Fracture Process Zone Extent in Cementitious Composites. In: *Proc. of 2<sup>nd</sup> International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering – PARENG 2011*. Ajaccio, Korsika, Francie. Civil-Comp Press, Stirlingshire, 2011
- [8] GORDEEV, V. F. et al. 1994. Electromagnetic emission of dielectric materials due to the static and dynamic loading. *Journ. Tech. Phys.* 64 (4), 57–67, 1994.
- [9] KARIHALOO, B. L. 1995. *Fracture mechanics and structural concrete*. New York: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [10] KOKTAVÝ, B., KOKTAVÝ, P., ŠTEFKOVÁ, M. 2007. On the effect of mechanical loading method on rectangular concrete specimen electromagnetic and acoustic emission signals (in Czech). In: *Experiment 2007*, FCE BUT Brno, 211–216, 2007.
- [11] KOKTAVÝ, B., KOKTAVÝ, P., VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. 2008. Utilization of electromagnetic and acoustic emission in monitoring the tensile failure of cementitious composites. In book of abstracts of conference *Mechanics of Composite Materials – MCM 2008*, Riga, Latvia, 26–30 May 2008. V. Tamužs, K. Cīrule and A. Lagzdīņš (Eds.). Institute of Polymer Mechanics, University of Latvia, 138–139, 2008.
- [12] KOKTAVÝ, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z., FRANTÍK, P., KOKTAVÝ, B. 2011. Utilization of electromagnetic and acoustic emission in monitoring of fracture of cementitious composites. *Key Engineering Materials*, vol. 465, 503–506, 2011.

- [13] MIHASHI, H., NOMURA, N. 1996. Correlation between characteristics of fracture process zone and tension-softening properties of concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 165, 359–376, 1996.
- [14] SKLARCZYK, CH., ALPETR, I. 2001. The electric emission from mortar and concrete subjected to mechanical impact. *Scripta mater.*, Vol. 44, 2537–2541, 2001.
- [15] SHAH, S. P., SWARTZ, S. E., OUYANG, C. 1995. *Fracture mechanics of structural concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [16] VAN MIER, J. G. M. 1997. *Fracture Processes of Concrete: Assessment of Material Parameters for Fracture Models*. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [17] VESELÝ, V., FRANTÍK, P. ReFraPro – ReFraPro – ReUreConstruction of FraCture Process, Java application, 2008–2011.
- [18] VESELÝ, V., FRANTÍK, P. 2011. Reconstruction of a fracture process zone during tensile failure of quasi-brittle materials. *Applied and Computational Mechanics*, 2010, 4, 237–250.
- [19] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. 2007. Analýza napjatosti a šíření trhlin ve zkušebních vzorcích pro měření poškození kvazikřehkého materiálu pomocí elektromagnetické emise. Sborník abstraktů a sborník příspěvků (CD) konference *Modelování v mechnice 2007*, Ostrava, 14.–15. 2. 2007. Ostrava: Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, 11–12 + CD 21 s, 2007.
- [20] VESELÝ, V., KERŠNER, Z., KOKTAVÝ, P., KOKTAVÝ, B. 2007. Studie průběhu porušení betonových vzorků při zatěžování příčným tahem. Sborník konference *Experiment – významný zdroj poznání a verifikace metod navrhování nosných stavebních konstrukcí*, Brno, 25.–26. 10. 2007. J. Melcher a M. Karmazinová (Eds.). Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 511–516, 2007.
- [21] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. 2009. Cracked volume specified work of fracture. In: Proc. of the *12th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, B.H.V. Topping, L.F. Costa Neves and R.C. Barros (Eds.), Funchal, Civil-Comp Press, 2009.
- [22] VESELÝ, V., KERŠNER, Z., NĚMEČEK, J., FRANTÍK, P., ŘOUTIL, L., KUCHARCZYKOVÁ, B. 2010. Estimation of fracture process zone extent in cementitious composites. *Chem. Listy*, 104, 382–385, 2010.
- [23] YAMADA, I., MASUDA, K., MIZUTANI, H. 1989. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Phys. of the Earth and Plan. Inter.*, Vol. 57, 157–168, 1989.

#### **Oponentní posudek vypracoval:**

Prof. Ing. RNDr. Josef Šikula, DrSc., Ústav fyziky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně.

Doc. Ing. Jiří Němeček, Ph.D., Katedra mechaniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze.