

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 416

ISSN 1213-418X

Zbyněk Keršner

**ASPEKTY LOMOVÉ MECHANIKY
KVAZIKŘEHKÝCH
STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.

**ASPEKTY LOMOVÉ MECHANIKY KVAZIKŘEHKÝCH
STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ**

FRACTURE MECHANICS ASPECTS OF QUASI BRITTLE
BUILDING MATERIALS

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



Brno 2012

KLÍČOVÁ SLOVA

lomová mechanika, kvazikřehký materiál, beton, lomový experiment, numerická simulace, předpjatý železniční pražec, únava

KEY WORDS

fracture mechanics, quasi-brittle material, concrete, fracture test, numerical simulation, pre-stressed railway sleeper, fatigue

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	6
2 ANALÝZA CHOVÁNÍ TESTOVANÉHO PŘEDPJATÉHO PRAŽCE.....	9
2.1 Všeobecné požadavky na betonové pražce	9
2.2 Experimentální měření odezvy pražce	10
2.3 Simulace odezvy pražce při kontrolní zkoušce.....	12
2.4 Porovnání výsledků experimentu a numerických simulací.....	15
3 KOREKCE ÚNAVOVÝCH PARAMETRŮ BETONU	16
3.1 Časová závislost pevnosti betonu v tlaku	17
3.2 Únavové zkoušky těles.....	18
3.3 Vyhodnocení únavových zkoušek	19
4 ZÁVĚR.....	20
5 VÝBĚR Z POUŽITÉ LITERATURY	21
6 PŘEHLED PŮVODNÍCH VĚDECKÝCH PRACÍ V ČASOPISECH.....	24
6.1 Původní vědecké práce ve vědeckém časopisu s IF.....	24
6.2 Původní vědecké práce v recenzovaném vědeckém časopisu.....	25
7 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI	27
8 ABSTRACT	28

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Zbyněk Keršner

Datum a místo narození: 19. 1. 1960 v Boskovicích, okres Blansko

Adresa do zaměstnání:

Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební VUT v Brně,
Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR
Telefon 541 147 362, fax 541 240 994
E-mail kersner.z@fce.vutbr.cz



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- maturita – 1979, Střední průmyslová škola stavební, Kudelova 8, Brno;
- Ing. – 1984, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby;
- CSc. – 1992, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Technologie staveb, téma práce *Matematické modelování ve vztahu k technologii betonu*;
- doc. – 2005, Fakulta stavební VUT v Brně, obor Teorie a konstrukce staveb, téma habilitační práce *Křehkost a lomová mechanika cementových kompozitů*.

Zaměstnání:

- 1984–1989 Katedra technologie stavebních dílců, Fakulta stavební VUT v Brně (1984–1988 asistent, po vykonání základní vojenské služby aspirant, asistent; 1988–1989 odborný asistent);
- 1989–1990 KERAMOPROJEKT Brno, samostatný programátor-analytik ve výpočetním středisku;
- 1990–1992 Katedra technologie stavebních dílců, Fakulta stavební VUT v Brně;
- od 1992 doposud – odborný asistent/docent (od roku 2005) na Ústavu stavební mechaniky, FAST VUT v Brně.

Výzkumné zaměření:

Lom/lomová mechanika především kvazikřehkých materiálů, aplikace simulačních metod v oblasti stavebních konstrukcí s ohledem na technologii betonu, degradaci materiálů a životnost konstrukcí/prvků.

Vyučované předměty:

Stavební mechanika, Statika stavebních konstrukcí, Pružnost a plasticita, resp. Pružnost a pevnost, Vybrané statě ze stavební mechaniky, Spolehlivost stavebních konstrukcí, Nelineární mechanika, Teorie porušování materiálů, Mechanika materiálu, Lomová mechanika.

Publikační činnost do r. 2011:

Celkem přes 300 publikací, ve vědeckých časopisech zahraničních i domácích 28 zahrnutých ve WoS, 18 ve Scopus, 23 v RV pro VaV, 183 ve sbornících zahraničních a domácích vědeckých konferencí a symposií.

Granty:

Řešitel/nositel či spoluřešitel následujících projektů:

- Pravděpodobnostní modelování a optimalizace ošetřování betonu: doba ošetřování, odolnost proti mrazu (Fond tvůrčích aktivit VUT v Brně č. 54-55/93-D, 1993);

- Chování ocelových stavebních konstrukcí: spolehlivostní přístup (Fond VUT pro vědy a umění č. B 16/94, 1994);
- Predikce karbonatace betonu (GA ČR 103/95/0781, 1995–1996);
- Lom kvazikřehkých materiálů s uvažováním náhodné proměnlivosti parametrů (FR VŠ č. 0776 T. o. 2, 1996);
- Komplexní spolehlivostní model předpovědi životnosti betonu (GA ČR 103/03/1350, 2003–2005);
- Mechanismus porušení stavebních kompozitů s křehkou maticí namáhaných vysokými teplotami (MŠMT CLUTCH 1K04111, 2004–2007);
- Komplexní modelování lomu pokročilých stavebních materiálů (GA ČR 103/07/1276, 2007–2009);
- Základní únavové charakteristiky a lom pokročilých stavebních materiálů (GA ČR 103/08/0963, 2008–2010);
- Analýza spolehlivosti konstrukcí s kvazikřehkou maticí s využitím lomových testů a identifikace parametrů modelů porušování (specifický výzkum VUT, FAST-S-10-37, 2010);
- Přetvárné vlastnosti betonů vyšších pevností (GA ČR P104/10/2359, 2010–2012);
- Odezva cementových kompozitů na únavové zatěžování: pokročilé numerické modelování a experimenty (GA ČR P104/11/0833, 2011–2013);
- Chování trhlin/mikrotrhlin v kompozitech s křehkou maticí (mezifakultní specifický výzkum VUT, FAST/FCH/FSI-S-11-1, 2011).

V letech 2005–2011 tajemníkem Centra integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS na FAST.

Doktorandi:

V období 1999–2011 školitel 7 doktorandů (5 interních a 2 externí); pět disertačních prací obhájeno, jedna těsně před obhajobou (Ing. Ladislav Řoutil), jedna rozpracována (Ing. Hana Šimonová).

Fakultní aktivity – členství:

- Akademický senát FAST (čtvrté období);
- Oborová rada doktorského studia, komise pro státní doktorskou zkoušku a pro obhajobu disertačních prací oboru Konstrukce a dopravní stavby FAST.

Členství v organizačním výboru kongresu, sympózia, vědecké konference, semináře:

Problémy lomové mechaniky, Brno 2001–2011 (každoročně); Představitelé stavebních fakult zemí EU, Brno 2004; Pravděpodobnost a porušování konstrukcí (PPK), Brno 2004; Experiment – významný zdroj poznání a verifikace metod navrhování nosných stavebních konstrukcí, Brno 2004; Life Cycle Assessment, Behaviour and Properties of Concrete and Concrete Structures (LC), Brno 2004; Non-Traditional Cements and Concrete, Brno 2002, 2005, 2008 a 2011.

1 ÚVOD

Lomová mechanika zahrnuje široký rámec aplikované mechaniky a nauky o materiálech nezbytné pro popis chování konstrukcí či konstrukčních prvků s trhlinami. Od svého vzniku ve dvacátých letech 20. století se lomová mechanika využila pro hodnocení nejrůznějších materiálů a konstrukčních prvků. Obecně ji lze začlenit do mechaniky poškozování a lomu konstrukčních materiálů, jejímž cílem je popis mechanismů a procesů vedoucích k jejich porušení, jakož i hledání řídicích fyzikálních zákonů a matematických modelů, včetně studia procesů degradace těchto materiálů.

Lomová mechanika tedy představuje velké množství odvětví – lze zdůraznit alespoň dvouparametrovou lomovou mechaniku (Knésl & Bednář, 1998), lomovou mechaniku materiálových rozhraní, lomovou mechaniku obecných singulárních koncentrátorů napětí (Knésl et al., 2007; Klusák et al., 2007; Náhlík et al., 2008; Knésl et al., 2008), elasto-plastickou lomovou mechaniku apod. Ve stavebnictví je významná zejména nelineární lomová mechanika se souvisejícími kohezivními modely. Z celosvětového hlediska představuje lomová mechanika důležitý obor inženýrské činnosti.

Od počátku šedesátých let minulého století začala být lomová mechanika aplikována také u kompozitů na silikátové bázi, většina inženýrů i vědců však nebyla přesvědčena o její použitelnosti na beton a betonové konstrukce (citováno podle Karihaloo, 1995). Je potěšitelné, že se tento stav postupně mění – především díky výzkumné a publikační činnosti mnoha vědeckých týmů, řadě mezinárodních konferencí a dalších aktivit podporovaných významnými (normotvornými) společnostmi. Například v aktuálním dokumentu Model Code 2010, který připravují komise mezinárodní organizace pro beton *fib*, lze nalézt pasáže související s uplatněním lomové mechaniky a příslušné parametry modelů (lomová energie apod.).

Důvody pro použití lomové mechaniky u cementových kompozitů jsou zřejmé. Prostý i vyztužený beton obsahuje ještě před jeho mechanickým zatížením množství nejrůznějších defektů: póry, inkluze, smršťovací trhliny apod. Zmíněné defekty, především pak trhlinky/mikrotrhliny, mohou pod vnějším zatížením růst, spojovat se s existujícími či nově vytvořenými mikrotrhlinami až do magistralních trhlin, které mohou způsobit vážné porušení konstrukce. Návrh konstrukcí založený na teorii pružnosti a plasticity, který nebere ohled na vznik rozsáhlé zóny trhlin nebo na energetické kritérium lomu, není dlouhodobě udržitelný. Aplikace teorie a modelů lomové mechaniky se dnes dostává do popředí také v souvislosti s mezními stavy použitelnosti betonových konstrukcí; vznik a šíření trhlin – oblastí porušení – výrazně ovlivňuje jejich životnost a vstupuje do metodik pro návrh jejich ekonomicky náročné údržby či oprav.

Teorie lomové mechaniky může na základě fyzikálních principů vysvětlit řadu návrhových pravidel empirické povahy. Mohla by také poskytnout návod pro návrh netypických konstrukcí, pro které empirická návrhová pravidla chybějí. Lineární elastická lomová mechanika (LELM) je budována asi od roku 1920 (Griffith, 1921) pouze pro pružně se chovající homogenní křehké materiály (např. sklo). I její pozdější úpravy ve 40. a 50. letech 20. století (Orowan, Irwin) jsou použitelné na pružně-plastické homogenní materiály, jako jsou kovy s omezenou tažností.

Původní neúspěch LELM v případě betonu zřejmě souvisí s úlohou zmíněných defektů – pórů a mikrotrhlin – a také stupněm heterogenity (složením) v tahové odezvě všech materiálů na bázi cementu, které byly tradičně považovány za křehké, ve skutečnosti však vykazují odezvu komplikovanější. Dochází u nich k mírnému zpevnění před dosažením limitní únosnosti v tahu/ohybu, připomínající odezvu kovových materiálů s vysokou pevností. Avšak po dosažení limitní pevnosti jsou charakterizovány nárůstem deformace při snižování tahové/ohybové únosnosti. Taková odezva se nazývá tahové změkčení, a materiály takto se chovající se označují

jako kvazikřehké. Toto změkčení u betonu je způsobeno lokalizací mikrotrhlin, vytvářením mřížky zrn kameniva pojivem a dalšími jevy.

V několika publikacích, které se zabývají lomem kvazikřehkých materiálů (Karihaloo, 1995; Shah et al., 1998; Bažant & Planas, 1998), lze nalézt řadu argumentů pro podporu zahrnutí teorie lomové mechaniky do norem pro navrhování betonových konstrukcí – energetický požadavek růstu trhliny, chybějící průtažná prodleva v pracovním diagramu, schopnost absorpce energie a projevy tažnosti, objektivita výpočtů odezvy konstrukcí metodou konečných prvků, či například vliv velikosti.

Aktuální výpočetní nástroje pro analýzu, návrh a posouzení stavebních konstrukcí a prvků z kvazikřehkých materiálů se opírají o pokročilé teorie porušování, mezi něž pro případ porušení tahem patří zmíněná nelineární lomová mechanika (Karihaloo, 1995; Shah et al., 1995; Bažant & Planas, 1998; Trunk & Wittman, 2001). Chování numerických modelů vycházejících z těchto přístupů řídí sada parametrů, jejichž hodnoty je třeba dostatečně spolehlivě určit, aby odezva těchto modelů byla ve shodě s odezvou realizovaných prvků či konstrukcí. Mezi nejpoužívanější nelineární lomové modely v oblasti numerické analýzy přetváření a porušování betonových stavebních konstrukcí patří varianty modelů kohezivní trhliny (Hillerborg et al., 1976; Bažant & Oh, 1983). Stěžejní lomově-mechanický parametr těchto modelů představuje specifická lomová energie, pro jejíž experimentální určování existují standardizované metody (RILEM Committee FMC 50, 1985, resp. Hillerborg, 1985, Elices et al., 1997) a jež je používána v rámci dostupných softwarových prostředků pracujících s těmito modely (např. ATENA, Červenka & Červenka, 2006; Červenka et al. 2009), respektive je jako vstupní údaj explicitně požadována, a to (obvykle) na rozdíl od dalších parametrů ovlivňujících kvazikřehkou lomovou odezvu (tvar funkce tahového změkčení, tahová pevnost, příp. kritické otevření trhliny, příp. tahová pevnost), jejichž korektní přímé měření je technicky značně problematické.

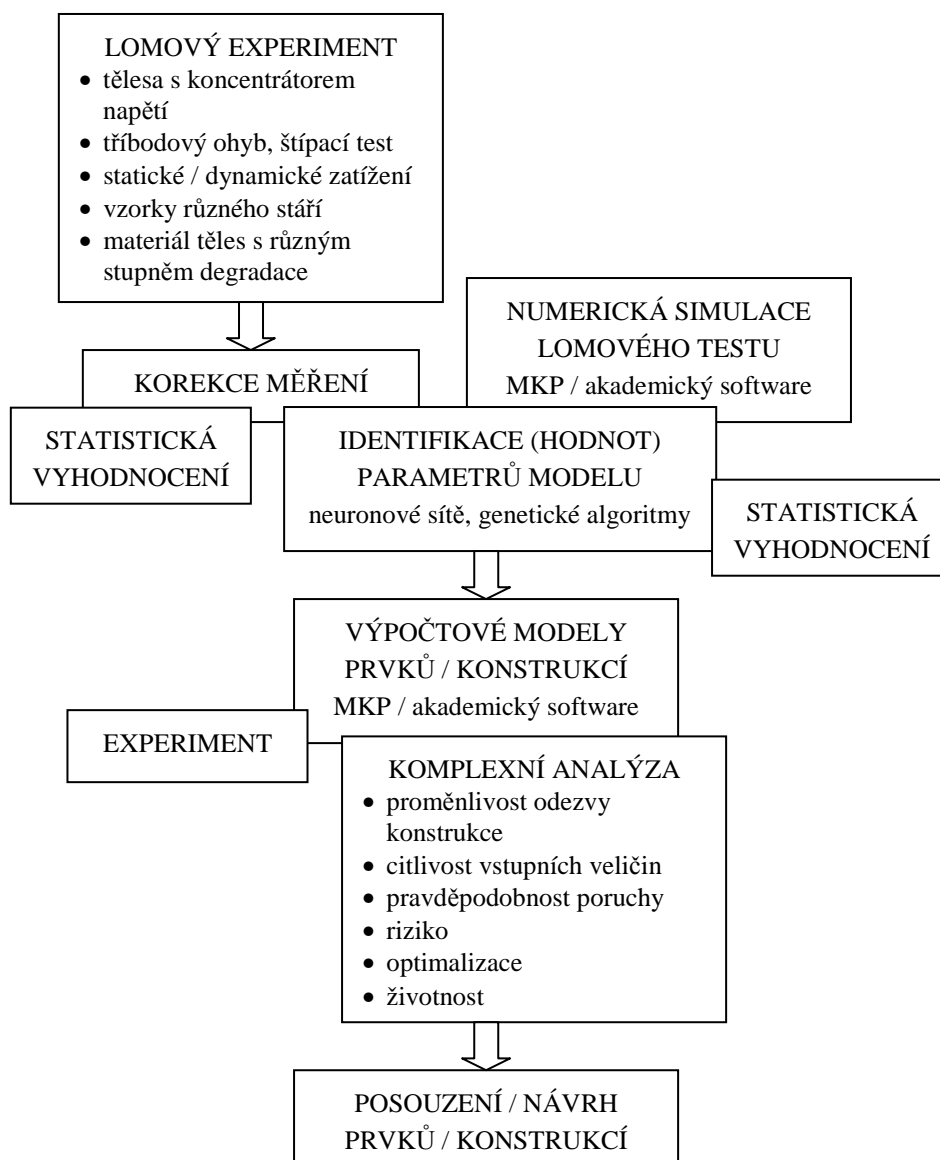
Stanovování hodnot lomové energie zahrnuje řadu zdrojů nepřesností, z nichž k nejdůležitějším patří vliv velikosti a geometrie zkušebních těles, resp. vzdálenosti lomového procesu od volných okrajů tělesa – viz práce Bažanta či Shaha se spolupracovníky, kolektivu autorů Duan, Hu, Trunk & Wittmann a dalších.

Jinou metodou, kterou lze využít pro zkoumání charakteru procesů porušování studovaných kompozitů, je metoda založená na fyzikální diskretizaci kontinua (aplikace FyDiK, Frantík, 2007–2011). Hypotetické kontinuum se zde nahrazuje sítí hmotných bodů vzájemně spojených pružinami; je možné takto přistupovat až na úroveň mezo- či mikromechanického modelování materiálové struktury. Tato metoda umožňuje řešit 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 (Frantík et al., 2011).

Autor se vybranými aspekty uváděné problematiky zabývá přibližně od roku 1994, kdy na Fakultě stavební VUT v Brně vznikl interdisciplinární výzkumný tým, využívající spojení odborníků v různých oblastech numerické simulace, stavební vědy a praxe, významnou spolupráci s pokročilým pracovištěm Ústavu fyziky materiálů AV ČR v Brně a v neposlední řadě podporu studentů především doktorského stupně studia. Aktuálně se tým spolupracovníků zabývá také možnostmi eliminovat výše zmíněné vlivy při určování hodnoty lomové energie. Přitom se vztahuje energie disipované během lomu v lomové procesní zóně (LPZ) vyvíjející se u čela makroskopické trhliny k objemu této zóny (Veselý & Frantík, 2010).

Postupně byl vytvářen komplexní přístup k analýze mechanické odezvy kvazikřehkých konstrukcí/prvků, o jehož dílčích oblastech a provázanosti si lze učinit představu ze schématu v obr. 1.1. Osu přístupu tvoří precizně provedený lomový experiment s pokročilou korekcí

naměřených dat a identifikací zejména hodnot vybraných parametrů numerických modelů, použitelných ke komplexním výpočtům odezvy konstrukce či konstrukčního prvku.



Obr. 1.1 Schéma dílčích oblastí komplexního přístupu k analýze odezvy kvazikřehkých konstrukcí/prvků na mechanické zatěžování.

Použitelnost a efektivnost tohoto komplexního přístupu byla testována na řešení řady dílčích i rozsáhlejších problémů:

- Experimentální a numerická analýza chování předpjatého pražce při kontrolních zkouškách pro průřezy uprostřed rozpětí a pod kolejnicí – viz samostatná kapitola.
- Pravděpodobnostní analýza chování fasádního panelu ze speciálního cementového kompozitu s použitím vláken (Keršner et al., 2007; Routil et al., 2010).
- Stanovení hodnot lomově-mechanických parametrů betonu zkušebních těles pro spolehlivostní analýzu betonové konstrukce (Keršner et al., 2007) – spolupráce s BOKU Vídeň.

- Identifikace hodnot lomově-mechanických parametrů dvou typů betonů zkoumaných v TU Mnichov pro využití k numerické analýze chování laboratorních prvků z tohoto materiálu (Lehký et al., 2009).
- Virtuální kontrola spolehlivosti prefabrikovaných předpjatých betonových prvků SPIROLL a ELEMATIC pomocí parametrů identifikace a statistické simulace (Lehký & Keršner, 2008; Novák et al., 2009).
- Vyhodnocení lomových zkoušek pro modelování porušování a spolehlivosti prvků z vybraných multifunkčních kompozitů (Keršner et al., 2009).
- Konstrukce „Jointless Bridge“ v Rakousku (Lehký et al., 2010); hodnoty lomově-mechanických parametrů betonu byly stanoveny na zkušebních tělesech z budovaného mostu a mohly posloužit v pokročilých materiálových modelech betonu pro virtuální stochastické nelineární analýzy chování konstrukce.

V následujících kapitolách bude věnována pozornost řešení dvou vybraných oblastí z uvedené problematiky, které jsou relativně komplexní a jsou vyvolány potřebami praxe: analýze chování předpjatého pražce při kontrolních zkouškách a korekci hodnot únavových parametrů betonu.

2 ANALÝZA CHOVÁNÍ TESTOVANÉHO PŘEDPJATÉHO PRAŽCE

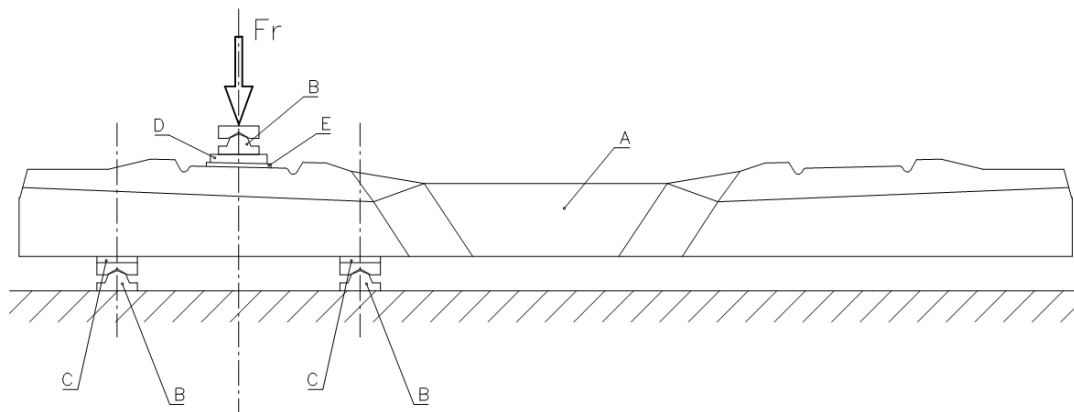
Předpjaté pražce patří k důležitým prvkům železničního stavitelství. Při jejich výrobě je podobně jako u jiných výrobků třeba kontrolovat jakost a zajistit jejich dostatečnou spolehlivost. Kontrola jakosti těchto předpjatých prvků se zabezpečuje při prototypových a kontrolních výrobních zkouškách. Množství vyráběných pražců a předepsaný počet kontrolních zkoušek kladou vysoké nároky na zkušební laboratoř. Výstižný numerický model na stochastické úrovni proto může vhodně doplnit a rozšířit data získaná při kontrolních testech a přispět tak k zajištění potřebné spolehlivosti předpjatých pražců. Stochastický model umožňuje provádět i další analýzy, např. studovat vliv změn v konstrukci, v poloze předpínací výztuže, v materiálovém složení apod. na výsledné chování sledovaného prvku.

2.1 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY NA BETONOVÉ PRAŽCE

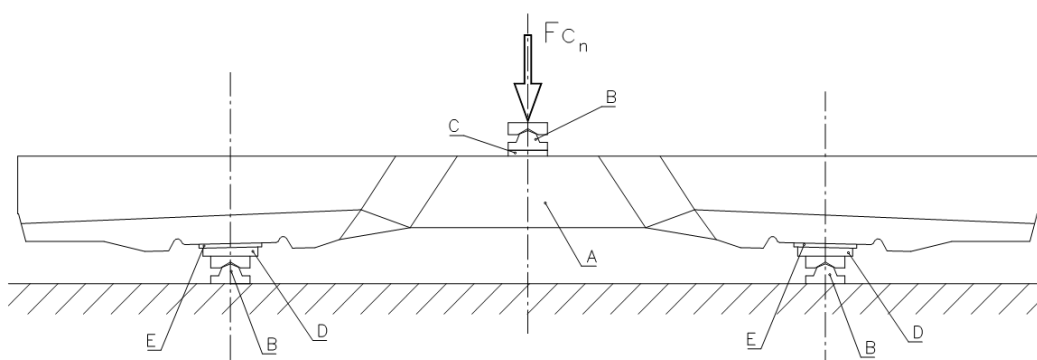
Požadavky vztahující se na betonové železniční pražce specifikuje evropská norma ČSN EN 13230 – Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce (2004). V části 2 tohoto předpisu se definují dodatečné technické požadavky a kontrolní postupy pro navrhování a výrobu předpjatých monoblokových pražců. Jsou zde předepsána uspořádání zkoušek (zkušební konfigurace) pro test pražce ve dvou rozhodných průřezech: v průřezu pod kolejnicí a v průřezu ve středu pražce. Zkušební konfigurace představují tříbodové ohyby, přičemž průřez pod kolejnicí je namáhán kladným ohybovým momentem (obr. 2.1) a průřez ve středu pražce kladným i záporným (viz obr. 2.2) ohybovým momentem. Ke každé zkušební konfiguraci jsou ve zmíněném dokumentu také stanoveny hodnoty/parametry zkušebního zatížení, průběhy zatěžování pro statickou, dynamickou a únavovou zkoušku, jakož i kritéria pro vyhodnocení těchto zkoušek.

Výskyt zatěžovacích schémat pražce, které přesně odpovídají zkušebním konfiguracím znázorněným na obr. 2.1 a 2.2, je při skutečném uložení pražce v kolejovém loži nepravděpodobný; tyto konfigurace však lze uvažovat jen jako extrémní případy skutečného namáhání, a proto byly předmětem rozsáhlých numerických studií. Je nutno poznamenat, že dále prezentované numericky simulované i experimentálně provedené zkoušky nejsou prototypovými zkouškami přesně ve smyslu zmíněné ČSN EN 13230-2. Podle této normy průběh zatěžování při prototypové zkoušce monoblokového předpjatého pražce v průřezu pod kolejnicí není plynulý, do vzniku prvních trhlin v ložné ploše pražce se zatěžuje přerušovaně a po vzniku trhlin probíhají

cykly odtížení–přetížení až do meze únosnosti pražce. Průběhy zatěžování prezentovaných zkoušek jsou zjednodušené – monotónně rostoucí.



Obr. 2.1 Zkušební konfigurace při zkoušce na tříbodový ohyb pražce pro průřez pod kolejnicí (Veselý, 2004; podle ČSN EN 13230): A – předpjatý monoblokový pražec, B – kloubová podpora, C – pružná podložka, D – šikmá podložka, E – standardní podložka pod patu kolejnice, F_r – zatížení působící kolmo na ložnou plochu.



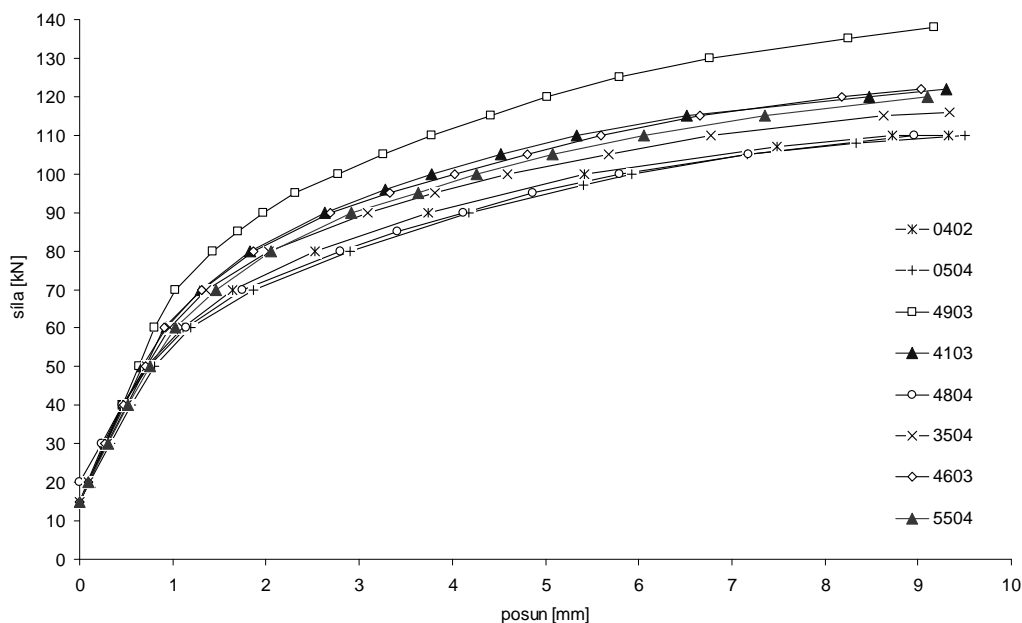
Obr. 2.2 Zkušební konfigurace při zkoušce na tříbodový ohyb pražce pro průřez uprostřed rozpětí (Veselý, 2004; podle ČSN EN 13230): A–E jako u obr. 2.1, F_{Cn} – zatížení působící kolmo na ložnou plochu.

2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ODEZVY PRAŽCE

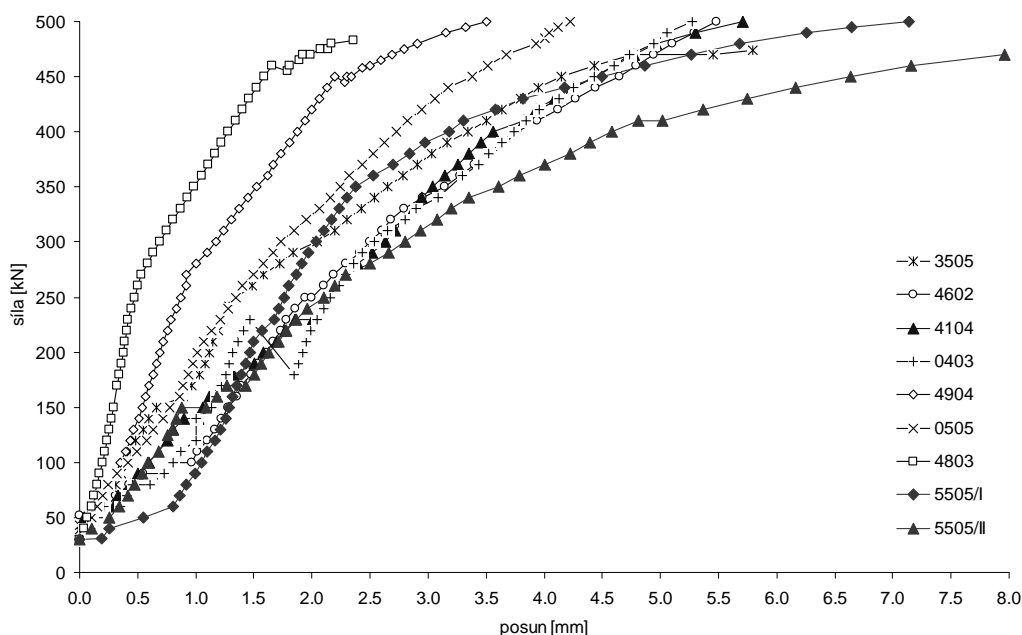
První experimentální měření odezvy pražců na zatížení při kontrolních zkouškách byly uspořádány ve zkušebně ŽPSV, závod Uherský Ostroh, v roce 2005, a sloužily především pro odladění postupu při zaznamenávání výsledků. Rozsáhlejší série experimentů, na jejichž koncepci, provedení a vyhodnocení se autor výrazně podílel, proběhly ve zkušebně ŽPSV, a.s., výrobní závod Nové Hrady, v roce 2006 a v roce 2008.

Výsledky zkoušek tvoří především záznamy závislostí zatížení–posun v rozhodném průřezu a zatížení–šířka/-y trhlin pro předpjaté pražce vyrobené jednak z několika typů betonu, a dále speciálně připravené s různou úrovní předpětí. V tomto druhém případě se jednalo o 15 pražců rozdělených do tří skupin (po pěti) podle úrovně vneseného předpětí, zkoušených v průřezu pod kolejnicí, které byly vyrobeny z betonu C50/60 s předpětím o hodnotách 0 %, 50 % a 100 % návrhové předpínací síly; během zkoušek byly zaznamenávány závislosti mezi vnášeným zatížením a posunem bodu na dolním líci prvku uprostřed rozpětí, a také závislosti mezi zatížením a šířkou/šířkami trhliny/trhlin u dolního líce prvku. Provedené experimentální práce jsou podrobně

popsány v řadě publikací autorského kolektivu (Štancl et al., 2006; Veselý et al., 2007, Řoutil et al. 2007; Keršner et al., 2009). Představu o získaných vybraných zatěžovacích diagramech si lze učinit z obr. 2.3 a 2.4.



Obr. 2.3 Naměřené závislosti zatížení vs. posun při zkoušce na tříbodový ohyb pražce pro průřez uprostřed rozpětí – aritmetické průměry vždy z údajů dvou průhyboměrů; zvýrazněny jsou výsledky pro pražec s vláknovým betonem (4103) a s drátkobetonem (5504).



Obr. 2.4 Naměřené závislosti zatížení vs. posun při zkoušce na tříbodový ohyb pražce pro průřez pod kolejnicí – aritmetické průměry z údajů dvou průhyboměrů (s výjimkou 0505, kdy byl použitelný pouze jeden průhyboměr); zvýrazněny jsou výsledky pro pražec s vláknovým betonem (4104) a s drátkobetonem (5505/I a 5505/II).

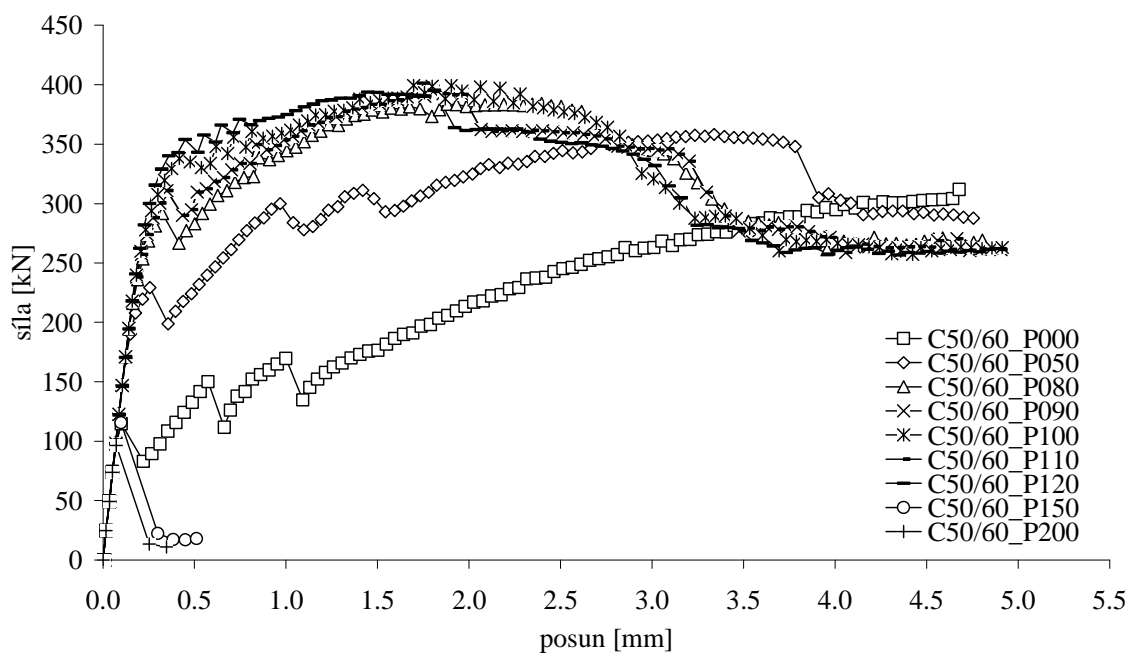
2.3 SIMULACE ODEZVY PRAŽCE PŘI KONTROLNÍ ZKOUŠCE

Simulace kontrolních statických zkoušek byly realizovány pod vedením autora ve dvojdimenzionální a třídimenzionální verzi softwaru ATENA umožňujícím analýzu metodou konečných prvků s implementovanými principy nelineární lomové mechaniky (Červenka & Červenka, 2006; Červenka et al., 2009). Numerické 2D analýzy byly realizovány zejména jako rovinná napjatost (materiálový model SBETA). Pro ověření a srovnání proběhly také výpočty s užitím nelineárního modelu pro beton ve variantách rovinná napjatost i rovinná deformace, které byly využity i ve 3D modelu. Hodnoty materiálových parametrů byly stanoveny při dříve provedených kalibracích na numerických modelech laboratorních zkoušek (tříbodový ohyb vzorků z pražcového betonu s centrálním zářezem v oblasti tažených vláken – Veselý, 2004), resp. při tahové zkoušce oceli užitě pro předpínací výztuž pražce. Při tvorbě modelu byly uvažovány také různé tvary a hustoty sítí konečných prvků, neboť sledované aspekty porušení pražců jsou do značné míry závislé právě na těchto vlastnostech modelu. Zatížení bylo realizováno nuceným přírůstkem průhybu v rozhodném průřezu.

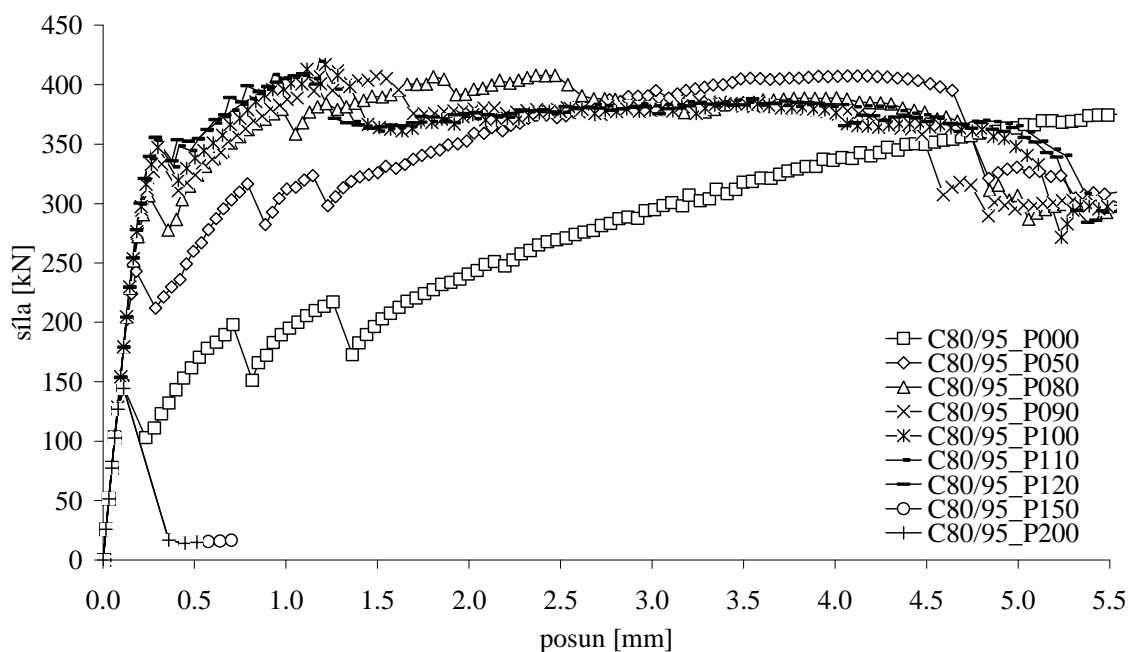
Představu o možnostech simulace odezvy pražců si lze učinit z výsledků rozsáhlé parametrické studie modelování kontrolní zkoušky tříbodového ohybu pražce pod kolejnicí, při které byly hodnoty parametrů betonu generovány v programu ATENA na základě třídy betonu, resp. jeho krychelné pevnosti v tlaku (Štancl et al., 2006). Jednalo se o třídy C50/60 a C80/95 s následujícími parametry a jejich hodnotami: pevnost v tlaku (válcová) 51,0 a 80,8 MPa, tahová pevnost 3,7 a 5,0 MPa, modul pružnosti 39,3 a 44,1 GPa a lomová energie 92,0 a 124,9 J/m². Tyto parametry byly ze všech 13 parametrů použitého materiálového modelu (SBETA model) vybrány na základě citlivostní analýzy, která prokázala jejich dominantní vliv na konstrukční odezvu studovaného prvku. Vliv změny úrovně předpětí pražce byl uvažován pomocí parametru velikosti předpínací síly v rozmezí 0 až 200 %.

Mezi výstupy parametrické analýzy můžeme nalézt např. diagramy zatížení–posun (průhyb uprostřed rozpětí) či diagramy zatížení–maximální šířka trhliny (Štancl et al., 2006). O vlivu úrovně předpětí na chování pražce při kontrolní zkoušce si lze učinit představu z obr. 2.5 pro uvažovaný beton pražce C50/60, resp. z obr. 2.6 pro beton C80/95. Ve vztahu k maximální šířce trhliny při daném zatížení lze obdobné informace obdržet z obr. 2.7 a 2.8. Podotkneme, že obě zmíněné závislosti nejsou při provádění reálných kontrolních zkoušek standardně zaznamenávány. Odladěný numerický model tedy může rozšířit poznatky o mechanickém chování pražce a přispět ke zvyšování jeho spolehlivosti a životnosti (např. chování v nelineární oblasti zatěžovacího diagramu po iniciaci trhlín, šířka propagovaných trhlín).

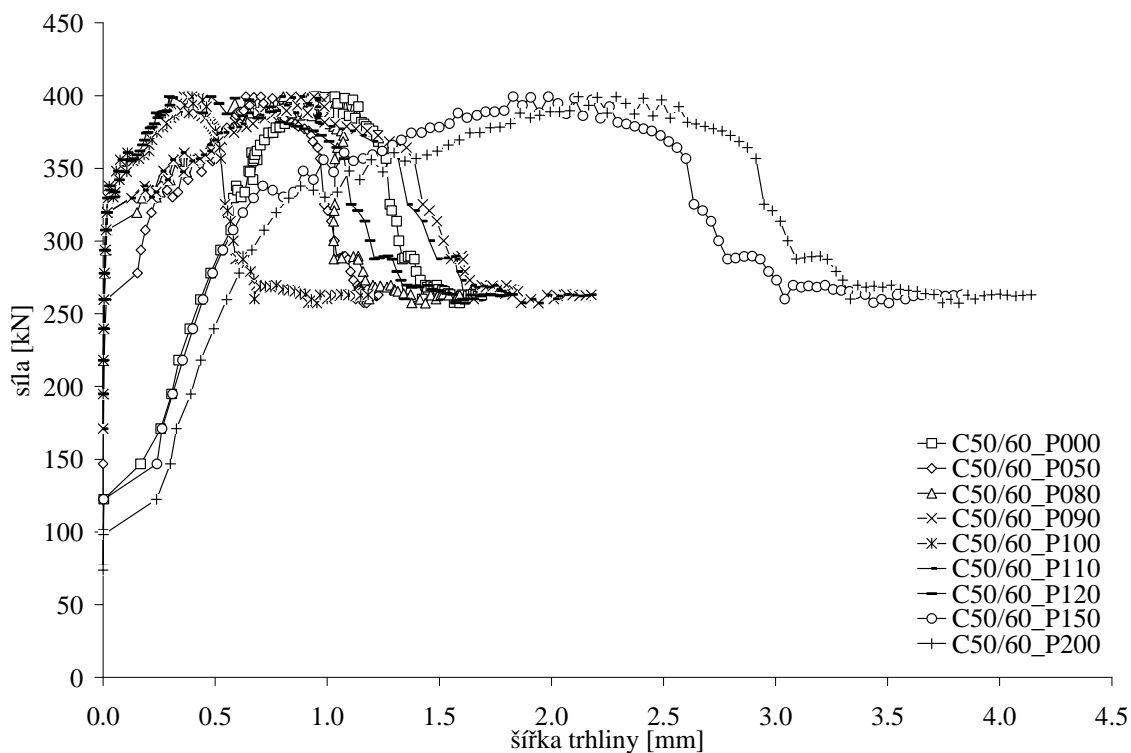
Poznamenejme, že následné analýzy na 3D modelech (provedené pro tři hodnoty tlakových pevností betonu) byly dovedeny k návrhu metodiky pro určení počtu a šířky trhlín vznikajících na taženém líci předpjatého pražce během standardizované ohybové zkoušky (pro průřez uprostřed rozpětí viz Veselý et al., 2009). Navržený postup, resp. zpracované grafy, mohou sloužit jako pomůcka při experimentálním dokazování kvality vyráběných pražců. Pro úroveň zatížení dosaženého při testu lze usuzovat na počet a šířku vzniklých trhlín.



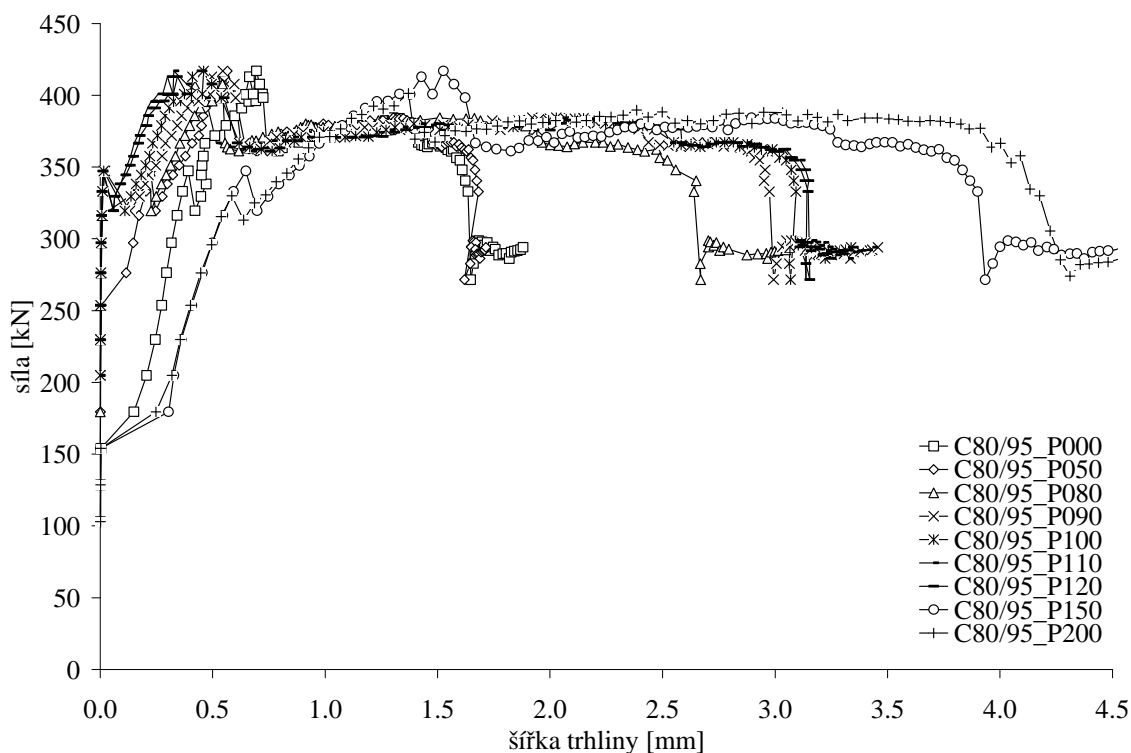
Obr. 2.5 Diagramy zatížení pražce vs. průhyb uprostřed rozpětí pro třídu betonu C50/60 a úroveň předpínací síly 0, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 150 a 200 %.



Obr. 2.6 Diagramy zatížení pražce vs. průhyb uprostřed rozpětí pro třídu betonu C80/95 a úroveň předpínací síly 0, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 150 a 200 %.



Obr. 2.7 Diagramy zatížení pražce vs. maximální šířka trhliny pro třídu betonu C50/60 a úroveň předpínací síly 0, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 150 a 200 %.

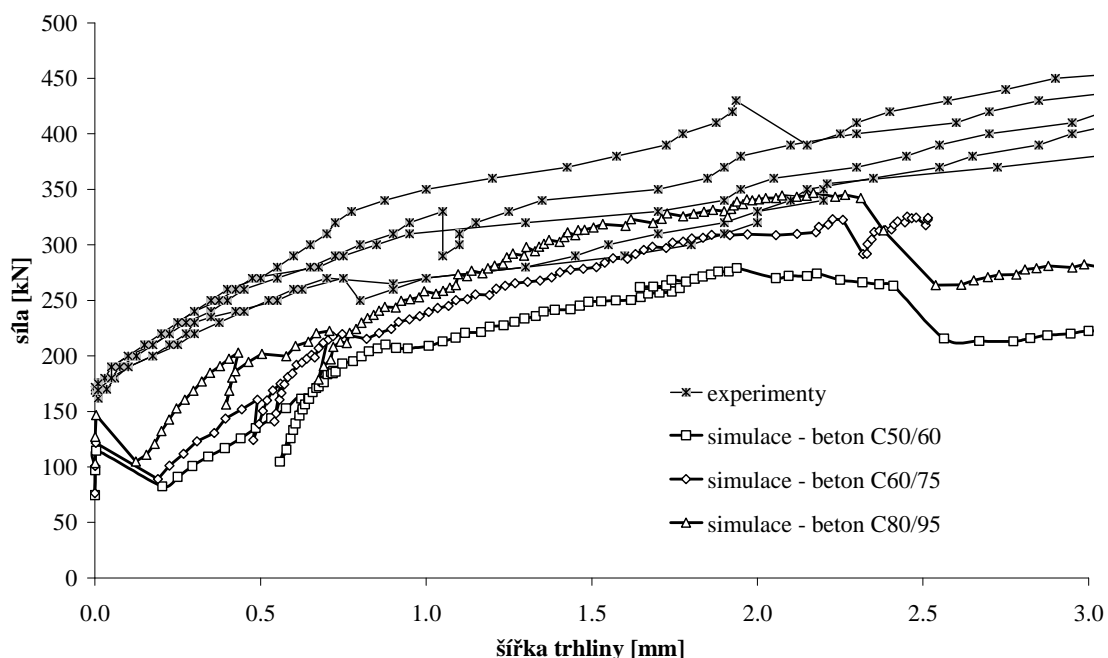


Obr. 2.8 Diagramy zatížení pražce vs. maximální šířka trhliny pro třídu betonu C80/95 a úroveň předpínací síly 0, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 150 a 200 %.

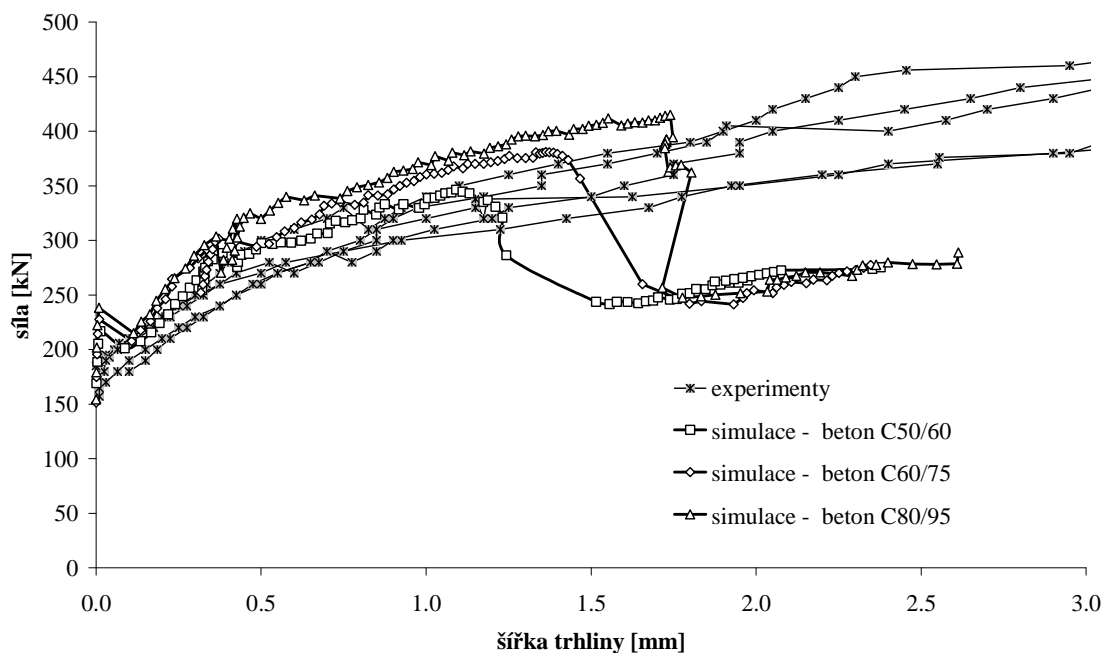
2.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU A NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Na obr. 2.9 až 2.11 jsou porovnány vybrané křivky zatížení–šířka trhlin pro různé hladiny předpětí získaných z fyzikálního experimentu s vypočtenými křivkami zatížení–šířka trhlin pro odpovídající hladinu předpětí a tři různé třídy pevností betonu (Veselý et al., 2007). Simulace byly prováděny s materiálovým modelem SBETA ve variantě s fixovanými i rotovanými trhlinami. Na obrázcích jsou kvůli přehlednosti vykresleny jen křivky pro variantu s fixovanými trhlinami. Rozdíly mezi výsledky simulací s fixovanými a rotovanými trhlinami nebyly významné.

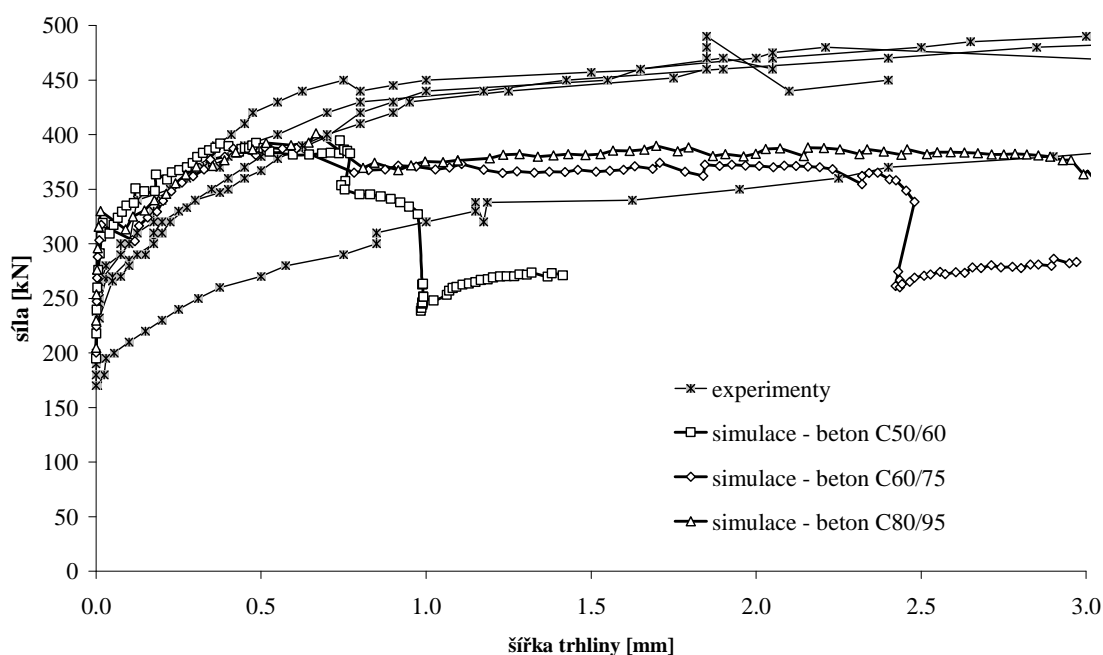
Křivky zatížení–šířka trhlin získané experimentálně i pomocí numerických simulací vykreslené na zmíněných grafech na obr. 2.9 až 2.11 nejsou vzhledem k rozdílným způsobům jejich stanovování zcela porovnatelné. V případě naměřených křivek jde o závislost působící síly na součtu šířek viditelných trhlin, které byly monitorovány a měřeny u dolního líce prvku. U numerických simulací jde z důvodů vycházejících z použitého materiálového modelu (rozetřené trhliny) a s tím související obtížnosti při vyhodnocování součtu šířky trhlin u spodního líce prvku o závislost působící síly na maximu z šířek trhliny zjištěných při daném zatěžovacím kroku v tahem porušených konečných prvcích. Součtovou hodnotu šířky trhlin by bylo možné za jistých předpokladů považovat za ekvivalent šířky trhlin naměřené při experimentech.



Obr. 2.9 Diagram zatížení–šířka trhlin pro průřez pod kolejnici; předpětí 0%.



Obr. 2.10 Diagram zatížení–šířka trhlin pro průřez pod kolejnicí; předpětí 50%.



Obr. 2.11 Diagram zatížení–šířka trhlin pro průřez pod kolejnicí; předpětí 100%.

3 KOREKCE ÚNAVOVÝCH PARAMETRŮ BETONU

Konstrukce a konstrukční prvky z pokročilých stavebních materiálů jsou navrhovány tak, aby odolávaly statickému a kvazistatickému zatížení. Má-li být taková konstrukce vystavena vlivům dynamickým, uvažují se většinou jako opakovaně působící zatížení statická. U konstrukcí, které jsou namáhány cyklickým proměnným zatížením – např. mosty, tunely, betonové pražce – představuje únava konstrukcí/materiálu podstatně nebezpečnější zátěž než namáhání statické, jelikož při cyklickém namáhání kvůli intenzivnější koncentraci/propagaci trhlin dochází k vyčerpání únosnosti konstrukce nebo prvku při nižší úrovni zatížení. Únavové zatížení se pak

projevuje nárůstem šířek trhlin, zvyšováním průhybů a snížením tuhosti konstrukcí, což může nakonec vést ke kolapsu.

Přestože je beton široce používaným stavebním materiálem, důkladné pochopení únavového porušení cementových kompozitů (kvazikřehkých materiálů) stále chybí, především ve srovnání s kovovými materiály. Ještě méně informací o únavě je k dispozici u kompozitních materiálů, jako je např. vlákny vyztužený beton. Z literatury pojednávající o výše uvedené problematice únavy stavebních materiálů (např. Lee & Barr, 2004) vyplývá, že v současné době není známa a sjednocena metodika stanovení základních únavových charakteristik prostého nebo vlákny vyztuženého betonu tak, aby jednotlivé výsledky bylo možno vzájemně porovnat a prakticky využít. Dosavadní publikované výsledky nejsou systematické a není také vyjasněna korelace mezi strukturou studovaných materiálů a jejich únavovými vlastnostmi.

V příspěvku Šimonová et al. (2012) byl představen následující postup korekce hodnot základních únavových parametrů – Wöhlerovy křivky – vzorků betonů pevnostní třídy C30/37 a C45/55, které byly zjištěny ze zkoušek tříbodovým ohybem cyklicky namáhaných zkušebních těles s centrálním zářezem. Poznamenejme, že příspěvek navazuje na článek Pryl et al. (2011), ve kterém byly výsledky únavových experimentů využívány pro kalibraci parametrů numerického modelu únavového chování materiálu. Ke zmíněné korekci se využívají aproximace hodnot lomově-mechanických parametrů těchto betonů určených ze statických zkoušek, přičemž stáří vzorků pokrývá časový interval únavových zkoušek. Testy byly simulovány nelineárním MKP programem ATENA, do něhož byl implementován materiálový model pro únavové poškození betonu v tahu. Experimentálně zjištěné hodnoty byly porovnány s numerickými výsledky.

Stanovování únavových parametrů kvazikřehkých materiálů může být problematické z důvodu doby trvání dynamických zkoušek těles při vyšších počtech cyklů, což je mimo jiné důvod k hledání způsobu korekce naměřených dat z únavových experimentů tak, aby byla mezi sebou porovnatelná i pro zkoušky těles s narůstajícím stářím. Možné řešení je naznačeno níže, kdy se využijí výsledné hodnoty ze statických zkoušek krychelné pevnosti betonu v tlaku ve vztahu ke stáří vzorků k určení koeficientů vybrané vhodné aproximační křivky hodnot tohoto parametru v čase a následně pro stanovení korektních hodnot základních únavových parametrů. Na základě statických zkoušek lze aproximovat řadu dalších lomově-mechanických parametrů, např. modul pružnosti, lomovou houževnatost, lomovou energii, přičemž kritériem vhodnosti výběru může být maximalizace koeficientu disperze Wöhlerovy křivky.

3.1 ČASOVÁ ZÁVISLOST PEVNOSTI BETONU V TLAKU

Pro určení hodnot pevnosti v tlaku zkoumaných betonů byly použity krychle o hraně 150 mm. Jak už bylo zmíněno, dynamické zkoušky při vysokocyklové únavě jsou časově náročné, z tohoto důvodu byly tlakové zkoušky provedeny pro stáří těles 28 dní, přibližně 3 měsíce a po ukončení dynamických zkoušek. Stanovení zmíněných pevností bylo provedeno v hydraulickém lisu FORM+TEST ALFA 3-3000 s rozsahem 3000 kN, rychlost zatěžování byla $0,6 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$.

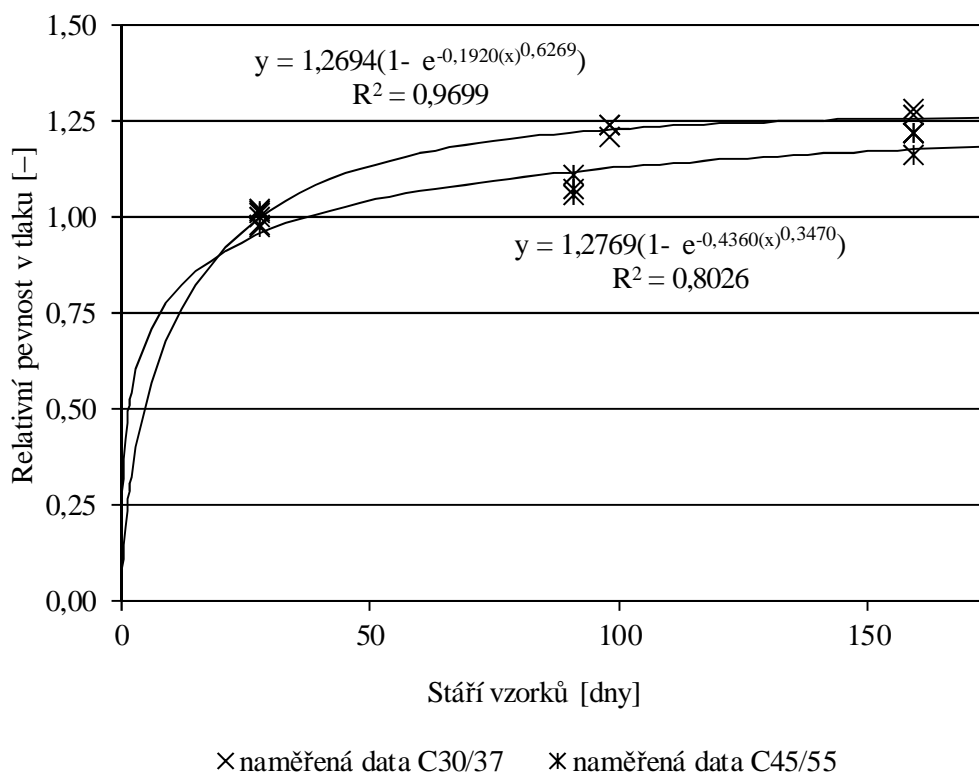
Výsledné hodnoty získané z tlakových zkoušek betonových těles lze nalézt v Šimonová et al. (2010) pro beton C30/37, resp. v Seitzl et al. (2011) pro beton C45/55. Tyto hodnoty byly nejprve redukovány aritmetickým průměrem pro stáří vzorků 28 dní, čímž se získaly relativní hodnoty pro všechna zkoumaná stáří. Tyto hodnoty byly poté aproximovány vybranou funkcí:

$$\frac{f_c(t)}{f_{c28}} = a (1 - e^{-b(t)^c}) \quad (3.1)$$

kde koeficient $a = f_{c\infty}/f_{c28}$ představuje asymptotu k aproximační křivce vyjádřenou jako poměr mezi teoretickou hodnotou pevnosti v tlaku vzorku v čase $t = \infty$ a zjištěnou hodnotou aritmetického průměru pevnosti v tlaku pro stáří vzorku 28 dní; exponenciální člen rovnice (3.1)

s koeficienty b a c vyjadřuje míru časově závislé změny pevnosti v tlaku v intervalu $t = (0, \infty)$, která je obecně závislá na parametrech použité směsi pro výrobu betonu a také na podmínkách prostředí, ve kterém je vzorek uchováván.

Aproximace byla provedena s kritériem nejmenších čtverců odchylek pomocí genetických algoritmů implementovaných v Java balíku GA s otevřeným zdrojovým kódem (Frantík, 2011). Na obr. 3.1 je uveden průběh aproximační křivky (3.1) s výslednými hodnotami koeficientů a , b a c pro oba výše zmiňované betony; symbol x v rovnici označuje čas ve dnech, y bezrozměrné relativní hodnoty krychelné pevnosti v tlaku a R^2 je bezrozměrný koeficient disperze.



Obr. 3.1 Aproximační křivky pro relativní krychelnou pevnost v tlaku (Šimonová et al. 2012).

3.2 ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY TĚLES

Vysokocyklické únavové zkoušky těles s počátečním zářezem namáhané v tříbodovém ohybu probíhají v rámci společného výzkumného projektu ve spolupráci týmů Fakulty stavební VUT v Brně a Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Nominální rozměry zkušebních těles byly 100×100×400 mm, rozpětí podpor činilo 300 mm. Počáteční vruby byly vyřezány pilou s diamantovým kotoučem, relativní hloubka zářezu (k výšce vzorku) byla rovna 0,1.

Experimentální měření probíhala v laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně na počítačem řízeném servohydraulickém přístroji značky INOVA-U2 (obr. 3.2) za standardních laboratorních podmínek – teplota (20±5)°C, relativní vlhkost (60±5)%.

Únavové testy byly provedeny při kontrolovaném zatížení. Parametr asymetrie cyklu $R = P_{\min}/P_{\max} = 0,1$ [-], kde hodnoty P_{\min} a P_{\max} jsou minimální a maximální zatížení sinusové vlny v každém cyklu. Zatěžovací frekvence byla přibližně 10 Hz.

Zkušební vzorky byly zatěžovány v oblasti vysokocyklové únavy, horní limit počtu cyklů byl stanoven na 2 miliony. Zkoušky byly ukončeny buďto při porušení vzorku, případně po dosažení horního limitu zatěžovacích cyklů.



Obr. 3.2 Umístění vzorku v přístroji (vlevo); celkový pohled na zkušební zařízení.

3.3 VYHODNOCENÍ ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK

Při posuzování únavové životnosti konstrukčních prvků byly v minulých letech využity různé přístupy. Všeobecně přijímaný přístup v technické praxi je založen na empiricky odvozených $S-N$ diagramech, tj. grafech zobrazujících závislost napětí (S) na počtu cyklů do porušení (N). Tyto křivky jsou jednoduché a poskytují dostatečné množství údajů pro běžnou inženýrskou praxi.

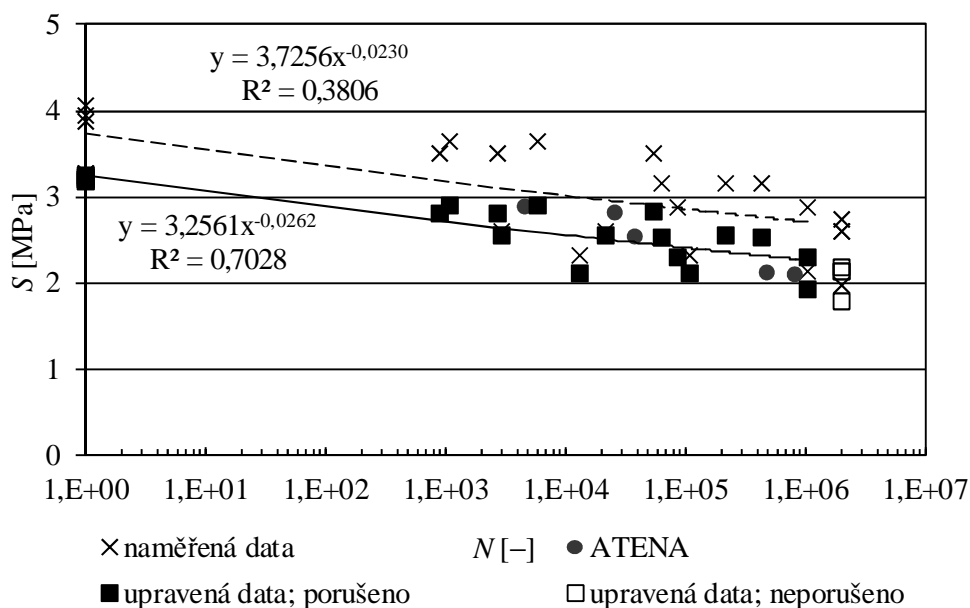
Únavové zkoušky cementových kompozitů bývají zatíženy poměrně značným rozptylem hodnot na jednotlivých hladinách zatížení/napětí, takže pro přibližné stanovení Wöhlerovy křivky je potřeba minimálně 8 až 12 zkušebních těles, pro přesnější stanovení jejího průběhu, případně i pro její statistické vyhodnocení, je třeba 15 až 20 těles.

V rámci zde vyhodnocovaných experimentů bylo odzkoušeno 25 zkušebních vzorků pro každou pevnostní třídu betonu. První vzorek se zatížil staticky, z důvodu odhadu hodnoty maximálního zatížení, další vzorky se postupně zatěžovaly s úrovní napětí stále nižší, až se dosáhlo hladiny napětí, při kterém se vzorky neporušily předepsaným počtem cyklů. Výsledky únavových zkoušek při různé maximální úrovni ohybového napětí jsou shrnuty na obr. 3.3 a 3.4 pro beton C30/37 a C45/55, kde je maximální hodnota nominálního normálového napětí při ohybu (S , v rovnici v obrázcích označeno y) vynesena v závislosti na logaritmu počtu cyklů do porušení (N , v obrázcích označeno x). Spolu s výsledky měření (v obrázku označeny symbolem \times) byly získány analytické výrazy Wöhlerovy křivky (3.2) a byly určeny příslušné koeficienty disperze (R^2) pro oba výše zmiňované betony.

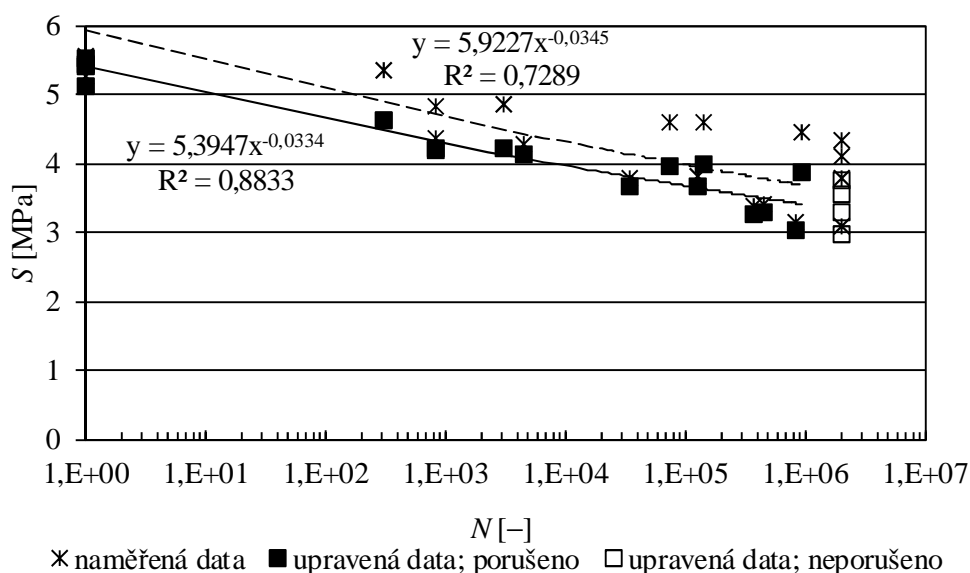
$$S = a \times N^b \quad (3.2)$$

Koeficient disperze $S-N$ křivky pro beton C30/37 určené přímo z naměřených hodnot je relativně nízký: z tohoto důvodu byla data upravena pomocí výše zmiňované aproximační křivky relativních hodnot krychelné pevnosti betonu v čase. Tím byla naměřená data standardizována na stáří vzorků 28 dní, což vedlo k podstatnému zvýšení hodnoty bezrozměrného koeficientu disperze z 0,38 na 0,70. Tento postup byl použit i na výsledky únavových zkoušek pro beton C45/55, přičemž koeficient disperze se zvýšil tentokrát z hodnoty 0,73 na 0,88.

Obě korigované $S-N$ křivky jsou vyneseny v obrázcích 3.3 a 3.4, v případě betonu C30/37 doplněny o výsledky simulací nelineárním MKP programem ATENA, do něhož byl implementován materiálový model pro únavové poškození betonu v tahu.



Obr. 3.3 $S-N$ křivky pro beton C30/37 (Šimonová et al., 2012).



Obr. 3.4 $S-N$ křivky pro beton C45/55 (Šimonová et al., 2012).

4 ZÁVĚR

Předložený dokument pojednává o vybraných aspektech lomové mechaniky v oblasti cementových kompozitů. Aplikace lomově-mechanického přístupu ve sledované problematice umožňuje zahrnout do popisu chování betonových konstrukcí celou řadu významných aspektů, zvyšujících významně spolehlivost odhadu životnosti konstrukce apod. Výsledky přispívají k rozvoji základního výzkumu a mají bezprostřední praktický význam. Pozornost byla věnována řešení dvou problémů: 1) experimentální a numerické analýze chování předpjatého pražce při kontrolních zkouškách a 2) korekci hodnot únavových parametrů betonu. Lze uvést následující závěry:

- Soubor výsledků tvoří relevantní podklad pro verifikaci numerického modelu chování předpjatého pražce při kontrolní zkoušce na tříbodový ohyb pro průřez uprostřed rozpětí i průřez pod kolejnicí s ohledem na předpověď velikosti zatížení pražce při vzniku první viditelné trhliny.
- Úrovně zatížení při vzniku trhlin byla numerickými simulacemi odhadnuta s vysokou přesností (vyjma simulace pražců bez předpětí).
- Pro určitou hladinu zatížení byla šířka trhliny stanovená numerickou simulací nižší než šířka trhlin určená při experimentu, což odpovídá způsobů jejich stanovování (z tohoto trendu se opět vymykají simulace bez předpětí).
- Lomově-mechanické parametry betonu ovlivňují mechanickou odezvu pražce na (kvazistatické) zatížení ve dvou hlavních fázích zatěžovací zkoušky: a) na přechodu z lineární do nelineární větve zatěžovacího diagramu (vznik trhlin při spodním lící prvku je řízen tahovou pevností, dále pak lomovou energií); b) na vrcholu zatěžovacího diagramu (drcení betonu u horního líce prvku – řízeno především tlakovou pevností). Hodnoty lomově-mechanických parametrů ovlivňují také vývoj a šířku trhlin během celé modelované zkoušky: vyšší pevnost přináší pozdější vznik trhlin, avšak větší šířku maximální trhliny.
- Zvýšení pevnosti betonu (ze současné třídy C50/60) by podle výsledků modelu přineslo pozdější vznik trhlin.
- Hodnota předpínací síly ovlivňuje únosnost a celou následnou nelineární část zatěžovacího diagramu.
- Úroveň předpětí určuje vznik trhlin a má vliv na šířku maximální trhliny. Změna úrovně předpětí se ukazuje jako racionální jen v rozsahu $\pm 20\%$.
- U simulovaných zatěžovacích diagramů pro všechny úrovně předpětí je patrný strmý pokles křivky po překročení maxima zatížení a s tím související výrazně nižší vypočtená únosnost pražce v porovnání s únosností naměřenou. Podobný jev byl sledován i na zatěžovacích diagramech publikovaných v předchozích pracích autorů a dosud nebyl uspokojivě vysvětlen.
- Vliv posunu předpínací výztuže na mechanickou odezvu pražce vycházel ze statického působení pražce – z posuzovaných variant má zřejmě největší vliv posun skupiny předpínacích drátů o stejný úsek na obou koncích pražce směrem k taženému/tlačenému líci. Poznamenejme, že hodnota analyzovaných posunů (3 mm) byla uvažována s ohledem na technologii výroby po konzultaci s výrobcem (povolené tolerance), model však umožňuje posoudit i jiné hodnoty či varianty polohy výztuže.
- V postupu korekce hodnot základních únavových parametrů vzorků betonů pevnostní třídy zkušebních těles s centrálním zářezem, byla využita aproximace hodnot pevnosti tlaku těchto betonů ze statických zkoušek, přičemž stáří vzorků pokrývalo časový interval únavových zkoušek. Korekce u obou sad zkušebních těles vedla ke zvýšení koeficientu disperze Wöhlerovy křivky, což lze považovat za průkaz její účinnosti.

5 VÝBĚR Z POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAŽANT, Z. P. & OH, B.-H. (1983) Crack band theory for fracture of concrete. *Materials and Structures*, 16, 155–177.
- [2] BAŽANT, Z. P. & PLANAS, J. (1998) *Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials*. CRC Press, Boca Raton, Florida.

- [3] ČERVENKA, V., ČERVENKA, J. (2006) ATENA Program Documentation, Part 2-1 – User's Manual for ATENA 2D, Červenka Consulting, Praha.
- [4] ČERVENKA, V., JENDELE, L., ČERVENKA, J. (2009) ATENA Program Documentation, Part 1 – Theory, Červenka Consulting, Praha.
- [5] ČSN EN 13230-2: Železniční aplikace – Kolej – Betonové příčné a výhybkové pražce – Část 2: Předpjaté monoblokové pražce. Český normalizační institut, 2004.
- [6] ELICES, M., GUINEA, G. V. & PLANAS, J. (1997) On the measurement of concrete fracture energy using three-point bend tests. *Materials and Structures*, Vol. 30, 375–376.
- [7] FRANTÍK, P. (2007–2011) FyDiK application, <http://www.kitnarf.cz/fydik>.
- [8] FRANTÍK, P. (2011) Java balík GA. GNU GPL licence, <http://www.kitnarf.cz/java>.
- [9] FRANTÍK, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z. (2011) Efficient Lattice Modelling of the Fracture Process Zone Extent in Cementitious Composites. In: Proc. of 2nd International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering – PARENG 2011. Ajaccio: Civil Comp. Press., 18 p.
- [10] GRIFFITH, A. A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Royal Soc.*, London, 163–198.
- [11] HILLERBORG, A. (1985) The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. *Materials and Structures*, Vol. 18, 291–296.
- [12] HILLERBORG, A., MODÉER, M. & PETERSSON, P. E. (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 773–782.
- [13] KARIHALOO, B. L. (1995) *Fracture mechanics of concrete*. Longman Scientific & Technical, New York, ISBN 0-582-21582-X.
- [14] KERŠNER, Z. (2005) Křehkost a lomová mechanika cementových kompozitů, Habilitační práce, FAST VUT v Brně.
- [15] KERŠNER, Z., LEHKÝ, D., NOVÁK, D., ELIÁŠ, J., STRAUSS, A., HOFFMAN, S., WENDNER, R., BERGMEISTER, K. (2007) Determination of fracture-mechanical parameters for reliability calculation. In: Proceedings of 5th International Probabilistic Workshop. Eds. Taerwe & Proske, Ghent. 123–134. ISBN 978-3-00-022030-2.
- [16] KERŠNER, Z., LEHKÝ, D., ŘOUTIL, L., ŠKROB, V., VESELÝ, V., BÍLEK, V., MOSLER, T. (2009) Tests of fibre concrete pre-stressed sleepers. In: Proceedings of 5th International Conference Fibre Concrete 2009. Eds. A. Kohoutková et al., Prague: CTU in Prague, 135–138. ISBN 978-80-01-04381-3.
- [17] KERŠNER, Z., NOVÁK, D., ŘOUTIL, L., PODROUŽEK, J. (2007) Stochastic nonlinear analysis of concrete structures – Part II: Application to fiber-reinforced concrete facade panels. In: Proceedings Conference on Application of Statistics and Probability in Civil Engineering. Eds. Kanda, Takada & Furuta, Tokio. ISBN 978-0-415-45211-3, 327–328 (abstract) + 7 p.
- [18] KERŠNER, Z., ŘOUTIL, L., ŠKROB, V., LEHKÝ, D., VESELÝ, V., FRANTÍK, P. (2009) Vyhodnocení lomových zkoušek pro modelování porušování a spolehlivosti prvků z vybraných multifunkčních kompozitů. In: Proc. of the 7th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings (extended abstracts + CD ROM). Eds N. Jenželovský, A. Grmanová. Bratislava: Slovak Technical University in Bratislava, 111–114 + CD 6 s. ISBN 978-80-227-3170-6.
- [19] KLUSÁK, J., KNĚSL, Z., NÁHLÍK, L. (2007) CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS. Part II: Stability of Sharp and Bi-Material Notches. *Engineering Mechanics*, Vol. 14, No. 6, 409–422.

- [20] KNĚSL, Z., BEDNÁŘ, K. (1998) Dvoupárametrová lomová mechanika: Výpočet párametrů a jejich hodnoty. Brno: ÚFM AV ČR, 51 stran.
- [21] KNĚSL, Z., KLUSÁK, J., NÁHLÍK, L. (2007) CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS. Part I: A Universal Assessment of Singular Stress Concentrations. *Engineering Mechanics*, Vol. 14, No. 6, 399–408.
- [22] KNĚSL, Z., NÁHLÍK, L., BAREŠ, P. (2008) CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS. Part IV: Application to Fracture of Coated Structures. *Engineering Mechanics*, Vol. 15, No. 4, 263–270.
- [23] LEE, M. K., BARR, B. I. G. (2004) An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, 299–305.
- [24] LEHKÝ, D., KERŠNER, Z. (2008) Identifikace hodnot lomových párametrů betonu panelů SPIROLL. In: Sborník příspěvků konference Betonářské dny 2008. Hradec Králové: Česká betonářská společnost, 404–407. ISBN 978-80-87158-11-1.
- [25] LEHKÝ, D., KERŠNER, Z., NOVÁK, D. (2009) Fracture-mechanical parameters of concrete: experiment and inverse analysis. In 12th International Scientific Conference of FCE BUT. Brno: FCE BUT in Brno, 57–60. ISBN 978-80-7204-629-4.
- [26] LEHKÝ, D., KERŠNER, Z., NOVÁK, D. (2010) Jointless Bridge: Determination of Fracture Mechanical Parameters Values for Nonlinear Analysis, In: Proceedings of the 5th International IABMAS Conference – Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS'10). Philadelphia, 472–475.
- [27] NÁHLÍK, L., KNĚSL, Z., KLUSÁK, J. (2008) CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS. Part III: An Application to a Crack Touching a Bimaterial Interface. *Engineering Mechanics*, Vol. 15, No. 2, 99–114.
- [28] NOVÁK, D., DOLEŽEL, J., KERŠNER, Z., LEHKÝ, D. (2009) Probabilistic Assessment of Shear Capacity of Precast Prestressed Hollow-core Slab Using Statistical Simulation. In: Proceedings of the 5th Central European Congress on Concrete Engineering, Innovative Concrete Technology in Practice. Baden, 172–176.
- [29] NOVÁK, D., KERŠNER, Z., DOLEŽEL, J., LEHKÝ, D. (2009) Virtual reliability control of precast prestressed concrete elements using parameters identification and statistical simulation. In: Proceedings of 18th IEEE International Conference on Control Applications. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1778–1781, ISBN 978-1-4244-4602-5.
- [30] PRYL, D., PUKL, R., SEITL, S., KERŠNER, Z. (2011) Poškození betonu cyklickým tahovým zatížením – experiment a model. *Beton TKS*, 2, 2011, 48–51.
- [31] ŘOUTIL, L., KERŠNER, Z., NOVÁK, D. (2010) Probabilistic analysis of response of special cement based fibre-composite façade panel. In: Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Structural and Physical Aspects of Civil Engineering (Proceeding of Abstracts + CD). Eds. K. Kotrasova, E. Kormanikova. Štrbské Pleso: TU Košice, 8 p. ISBN 978-80-89284-68-9, EAN 9788089284689.
- [32] ŘOUTIL, L., KERŠNER, Z., VESELÝ, V. (2005) Modelování chování předpjatého pářce při kontrolní zkoušce: vliv proměnlivosti předpětí. Sborník konference Modelování v mechanice 2005. Ostrava: FAST VŠB-TU, 217–220. ISBN 80-248-0776-9.
- [33] ŘOUTIL, L., KERŠNER, Z. (2004) Pravděpodobnostní analýza šířky trhlin předpjatého pářce při kontrolní zkoušce. Sborník konference Pravděpodobnost a porušování konstrukcí 2004. Brno, 307–312. ISBN 80-214-2718-3.
- [34] ŘOUTIL, L., ŠTANCL, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z. (2007) Experimentální a numerická analýza chování železničních pářců při kontrolních zkouškách pro průřez

uprostřed rozpětí. Experimental and numerical analyses of the railway sleeper's behaviour during check tests for the profile in the middle of the sleeper. In: Sborník abstraktů a sborník příspěvků (CD) konference *Modelování v mechanice*. Ostrava: FAST VŠB-TU Ostrava, 27–28 + CD 5 s. ISBN 978-80-248-1330-1.

- [35] SEITL, S., ŠIMONOVÁ, H., KERŠNER, Z., PUKL, R., PRYL, D. (2011) Základní únavové charakteristiky betonu C45/55 z testů vzorků tříbodovým ohybem. In: Sborník konference 18. Betonářské dny. Hradec Králové: Česká betonářská společnost, 547–550. ISBN 978-80-87158-30-2.
- [36] SHAH, S. P., SWARTZ, S. E. & OUYANG, CH. (1995) *Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials*. J. Wiley & sons, New York.
- [37] STIBOR, M. (2004) Lomové parametry betonu a jejich určování. Disertační práce, STM FAST VUT v Brně.
- [38] ŠIMONOVÁ, H., PAIL, T., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. (2011) Vyhodnocení únavových testů betonových vzorků s využitím aproximace hodnot pevnosti betonu v čase. In: Proc. of the 5th Int. Conf. on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering. Jasná pod Chopkom: FCE University of Žilina, 155–158. ISBN 978-80-554-0354-0.
- [39] ŠTANCL, P., KERŠNER, Z., ŘOUTIL, L., VESELÝ, V. (2006) Parametrická analýza modelování kontrolní zkoušky pražce. In: Sborník konference Betonářské dny 2006. Hradec Králové: Česká betonářská společnost, 379–384. ISBN 80-903807-2-7.
- [40] TRUNK, B., WITTMANN, F. H. (2001) Influence of size on fracture energy of concrete. *Mater. Struct.*, 34, 260–265.
- [41] VESELÝ, V. (2004) Parametry betonu pro popis lomového chování. Disertační práce, STM FAST VUT v Brně.
- [42] VESELÝ, V., FRANTÍK, P. (2010) Reconstruction of a fracture process zone during tensile failure of quasi-brittle materials. *Appl. Comp. Mech.*, 4, 237–250.
- [43] VESELÝ, V., LAHNER, J., GROCHALOVÁ, E., KERŠNER, Z., BÍLEK, V., MOSLER, T. (2009) Predikce distribuce a šířky trhlin při ohybové zkoušce železničních pražců pomocí numerických simulací. In: Sborník konference IDEAS 09 – Integrated Design of Advanced Structures, Ostrava: CIDEAS, 127–128 + CD 8 s., 445–452. ISBN 978-80-248-2091-0.
- [44] VESELÝ, V., ŠTANCL, P., ŘOUTIL, L., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. (2007) Vznik a šíření trhlin při zkouškách železničních pražců: experiment a MKP modelování. In: Sborník příspěvků VIII. vedeckej konferencie Stavebnej fakulty Technickej univerzity v Košiciach. Košice: Stavebná fakulta TU v Košiciach, 211–215. ISBN 978-80-8073-790-0.

6 PŘEHLED PŮVODNÍCH VĚDECKÝCH PRACÍ V ČASOPISECH

6.1 PŮVODNÍ VĚDECKÉ PRÁCE VE VĚDECKÉM ČASOPISU S IF

1. TEPLÝ, B., KERŠNER, Z., NOVÁK, D. Sensitivity study of BP-KX and B3 creep and shrinkage models. *Materials and Structures*, Vol. 29, 1996, 500–505. IF = 0,51 (2005).
2. VEJMEKOVÁ, E., PAVLÍKOVÁ, M., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., ONDRÁČEK, M., SEDLMAJER, M., ČERNÝ, R. High performance concrete containing lower slag amount: A complex view of mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 6, 2009, 2237–2245, . IF = 1,46 (2009).
3. VEJMEKOVÁ, E., PAVLÍKOVÁ, M., KEPPERT, M., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., ONDRÁČEK, M., SEDLMAJER, M., ČERNÝ, R. High performance concrete with Czech

metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 8, 2010, 1404–1411. ISSN 0950-0618. IF = 1,46 (2009).

4. ZUDA, L., DRCHALOVÁ, J., ROVNANÍK, P., BAYER, P., KERŠNER, Z., ČERNÝ, R. Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: Mechanical and water transport properties. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32, 2, 2010, 157-163. ISSN 0958-9465. IF = 1,84 (2009).
5. VESELÝ, V., KERŠNER, Z., NĚMEČEK, J., FRANTÍK, P., ŘOUTIL, L., KUCHARCZYKOVÁ, B. Estimation of fracture process zone extent in cementitious composites. *Chem. listy*, Vol. 104, 2010, 382–385. IF = 0,72 (2009).
6. VEJMELKOVÁ, E., KEPRT, M., ROVNANÍKOVÁ, R., ONDRÁČEK, M., KERŠNER, Z., ČERNÝ, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, 2012, 55–61. ISSN 0958-9465. IF = 1,84 (2009).
7. KUCHARCZYKOVÁ, B., KERŠNER, Z., POSPÍCHAL, O., MISÁK, P., DANĚK, P., SCHMID, P. The porous aggregate pre-soaking in relation to the freeze–thaw resistance of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, 2012, 761–766. ISSN 0950-0618. IF = 1,46 (2009).
8. VEJMELKOVÁ, E., KEPRT, M., ROVNANÍKOVÁ, R., KERŠNER, Z., ČERNÝ, R. Application of burnt clay shale as pozzolana addition to lime mortar. *Cement & Concrete Composites*, 2012, doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.001. ISSN 0958-9465. IF = 1,84 (2009).
9. TEPLÝ, B., VOŘECHOVSKÁ, D., KERŠNER, Z. Performance-based design of concrete structures: durability aspects. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 35, 4, 2010, 535-538. IF = 0,44 (2009).

6.2 PŮVODNÍ VĚDECKÉ PRÁCE V RECENZOVANÉM VĚDECKÉM ČASOPISU

1. TEPLÝ, B., MATERNA, A., KERŠNER, Z. K výpočtům základových konstrukcí. *Beton a zdivo*, 4, 1994, 30–31.
2. TEPLÝ, B., ŠMERDA, Z., KERŠNER, Z. Výpočetní metody prognózy životnosti betonových konstrukcí. *Beton a zdivo*, 1, 1995, 14–17.
3. KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, R., SUZA, I., NOVÁK, D., TEPLÝ, B. Kdy je nutné opravovat železobetonové konstrukce? *Beton a zdivo*, 4, 1996, 2–4.
4. KERŠNER, Z., NOVÁK, D., RUSINA, R., TEPLÝ, B. Stochastic Finite Element Method as a Tool for Modelling of Deterioration of Concrete Structures. *Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej*, 1998, 27–36.
5. KERŠNER, Z., BÍLEK, V. Influence of microstructure on toughening mechanisms of concretes. *Engineering Mechanics*, Vol. 5, 1998, No. 3, 199–201.
6. KIJAWATWORAWET, W., NOVÁK, D., KERŠNER, Z., TEPLÝ, B. Statistical prediction of carbonation deterioration: Two-case studies in Thailand. *Building Research Journal (Stavebnický časopis)*, Vol. 47, No. 1, 1999, 41–49.
7. TEPLÝ, B., NOVÁK, D., KERŠNER, Z., LAWANWISUT, W. Deterioration of reinforced concrete: Probabilistic and sensitivity analyses. *Acta Polytechnica*, Praha, Vol. 39, 2/1999, 7–23.
8. KERŠNER, Z., BÍLEK, V., SCHMID, P. Fracture mechanics study of two aspects reducing mechanical characteristics of concrete. *Acta Polytechnica*, Praha, Vol. 39, 2, 1999, 25–38.

9. KERŠNER, Z., NÁHLÍK, L., KNĚSL, Z. Analýza interakce kamenivo-trhlina z hlediska lomových charakteristik betonu. Fracture characteristics of concrete: analysis of aggregate-crack interaction. *Beton*, č. 5, 2002, 40–43.
10. TEPLÝ, B., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. K navrhování železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost. Performance-based design for durability of RC structures. *Beton*, č. 6, 2002, 41–45, ISSN 1213-3116.
11. FRANTÍK, P., KERŠNER, Z., STIBOR, M. Optimised box-counting method: effect of mesh size distribution. *Acta Polytechnica*, Praha, 2003.
12. KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., SCHMID, P., MATESOVÁ, D. Lomové vlastnosti C-vláknových kompozitů po namáhání vysokými teplotami. *Inžinierske stavby*, roč. 51, 2003, č. 1, 9–12.
13. TEPLÝ, B., ROVNANÍK, P., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. Podpora navrhování betonových konstrukcí na životnost. Design tool for durability of RC structures. *Beton* č. 3, 2004, 43–45. ISSN 1213-3116.
14. ROVNANÍK, P., KERŠNER, Z., TEPLÝ, B., ROVNANÍKOVÁ, P. Index of reliability and design of reinforced concrete structures for durability. *Roczniki inzynierii budowlanej, Zeszyt 4*, Katowice, 2004, 71–77. ISSN 1505-8425.
15. TEPLÝ, B., ROVNANÍK, P., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. How reliable is the durability of RC structures? *Acta Polytechnica*, No. 5/6, 2004, 107–109.
16. SEITL, S., KLUSÁK, J., KERŠNER, Z. Vliv šířky zářezu na růst trhliny pro různé konfigurace vzorků pro třibodový ohyb. The influence of a notch width on a crack growth for various configurations of three-point bending specimens. *Materials Engineering / Materiálové inžinierstvo*, roč. XIV, č. 3, 2007. ISSN 1335-0803, 213–219.
17. KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., SCHMID, P. Lomové parametry malt na bázi hlinitanových cementů – vliv stárí vzorků a teploty ošetření. *Inžinierske stavby*, roč. 54, 2, 2007, 46–47.
18. SEITL, S., KERŠNER, Z., BÍLEK, V., KNĚSL, Z. Glass fibre reinforced cement based composite: fatigue and fracture parameters. *Applied and Computational Mechanics*, Vol. 3, 2, 2009, 1–12.
19. KUCHARCZYKOVÁ, B.; KERŠNER, Z.; POSPÍCHAL, O.; MISÁK, P.; VYMAZAL, T., Influence of freeze-thaw cycles on fracture parameters values of lightweight concrete. *Procedia Engineering*, 2010, 959–966. ISSN 1877-7058.
20. SEITL, S., BÍLEK, V., KERŠNER, Z., VESELÝ, J. Cement based composites for thin building elements: Fracture and fatigue parameters. *Procedia Engineering*, 2010, 911–916. ISSN 1877-7058.
21. FRANTÍK, P., KERŠNER, Z., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L. Fractality of Simulated Fracture. The 3rd International Conference Fractography of Advanced Ceramics, Academia Congress Center, Stará Lesná, Slovakia, September 2008, Stará Lesná. Key Engineering Materials Vols. 413 (2009) 154–160 (online available since 2009/Mar/18 at www.scientific.net).
22. VEJMEJKOVÁ, E., PAVLÍKOVÁ, M., KEPPERT, M., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., ONDRÁČEK, M., SEDLMAJER, M., ČERNÝ, R. Fly ash influence on the properties of high performance concrete. *Cement Wapno Beton* 4, 2009, 189–204. ISSN 1425-8129.
23. SEITL, S., KERŠNER, Z., BÍLEK, V., KNĚSL, Z. Fatigue parameters of cement-based composites with various types of fibres. *Key Engineering Materials*, Vols. 417–418, 2010, 129–132, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.129.
24. KOKTAVÝ, P., VESELÝ, V., KERŠNER, Z., FRANTÍK, P., KOKTAVÝ, B. Utilization of Electromagnetic and Acoustic Emission in Monitoring of Fracture of Cementitious

Composites. *Key Engineering Materials*, Vol. 465, 2011, 503–506, doi: 10.4028, www.scientific.net/KEM.465.503.

25. PRYL, D., PUKL, R., SEITL, S., KERŠNER, Z. Poškození betonu cyklickým tahovým zatížením – experiment a model. *Beton TKS*, 2, 2011, 48–51.
26. VESELÝ, V., FRANTÍK, P., VODÁK, O., KERŠNER, Z. Lokalizace průběhu porušování v betonových vzorcích stanovená pomocí akustické a elektromagnetické emise a numerických simulací. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské–Technické univerzity Ostrava, č. 2, roč. XI, řada stavební, 2011, 269–278.
27. SEITL, S., ŠIMONOVÁ, H., KERŠNER, Z., FERNÁNDEZ-CANTELI, A. Evaluation of concrete fatigue measurements using standard and non-linear regression model. *Applied Mechanics and Materials: Frontiers of Manufacturing and Design Science II* [online]. 2012, Vols. 121–126 [cit. 2011-10-24]. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.121-126.2726>. ISSN 1662-7482.
28. ŠIMONOVÁ, H., KERŠNER, Z., SEITL, S., PRYL, D., PUKL, R. Korekce únavových parametrů betonu s využitím aproximací lomově-mechanických parametrů v čase. *Beton TKS*, 1, 2012, 57–59.

7 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Další vědeckou, odbornou i pedagogickou činnost autor předpokládá v oblastech přímo navazujících na práce z předchozího období, především při hlubším zkoumání a aktivnějším uplatňování aspektů lomové mechaniky, zejména v oblasti zejména cementových kompozitů. Autor je přesvědčen, že nové formy technologie, trvanlivosti a použití kvazikřehkých materiálů typu betonu, které vedou k výrazným změnám a pokroku při budování stavebních děl, se stále méně obejdou bez znalostí také lomové mechaniky.

Konkrétně lze v budoucí práci autora zdůraznit následující oblasti:

- problematika lomových parametrů kvazikřehkých materiálů na silikátové bázi (betonu, malty, zatvrdlé cementové pasty), jakož i řady dalších obdobně se projevujících stavebních materiálů s vybranými částečnými/plnými náhradami dávky cementu reaktivními příměsmi, především na bázi druhotných surovin (např. vysokopeční granulovaná struska, popílky z vysokoteplotního spalování, mikrosilika, mikromletý vápenec, metakaolin, jemně mletý cihelný střepek), multifunkčních kompozitů, umělých/přírodních pískovců, sádry apod., se speciální pozorností na vláknové kompozity;
- metody k určování lomových parametrů těchto materiálů z vybraných lomových experimentů, jejich vyhodnocování s využitím pokročilých korekcí naměřených dat a se zaměřením na optimální varianty a možnosti;
- zkoumání, popis a modelování lomové procesní zóny vybraných stavebních materiálů také s ohledem na korektní určování hodnot lomové energie;
- pokroky ve vyšetřování vztahů lomově-mechanických parametrů a struktury/mikro-struktury materiálů (např. vlastnosti přechodové zóny mezi zrnem kameniva a matricí), včetně fraktálních aspektů lomu;
- podklady k využití výsledků lomových testů při komplexním modelování chování především betonových konstrukcí či konstrukčních prvků s ohledem na jejich porušování trhlinami, stárí, degradaci, únavu (cementového) kompozitu apod., a to jak v oblasti deterministických, tak také stochastických výpočtů;

- zaktivnění prací interdisciplinárního charakteru, např. ve směru stochastické lomové mechaniky a spolehlivosti betonových konstrukcí;
- pokračování v šíření a prohlubování znalostí mezi doktorandy, studenty i odborníky z praxe v rámci výzkumných projektů (podobně, jak bylo vykonáno v Centru integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS v letech 2005–2011), organizace mezinárodních i tuzemských odborných akcí (dalších sympózií *Non-Traditional Cement and Concrete* – konaných již čtyřikrát, a to v letech 2002, 2005, 2008 a 2011 –, či seminářů *Problémy lomové mechaniky* – v roce 2011 se konal již 11. ročník), aktualizací přednášené látky volitelných předmětů s touto tematikou apod.;
- podíl na tvorbě excelentních týmů fakultních či celouniverzitních typů projektů (autor je např. zapojen jako mentor do projektu OPVK *Podpora tvorby excelentních týmů mezioborového výzkumu na VUT* (2012–2015)).

Autor se podstatně podílel také na koncipování nového recenzovaného časopisu *Speciální problémy mechaniky*, zacíleného na poskytování prostoru pro publikování příspěvků zejména studentům, diplomantům a doktorandům. Časopis by mohl pokračovat v tradici publikování výsledků přednášených na výše zmíněných seminářích *Problémy lomové mechaniky*, které jsou organizovány v rámci spolupráce mezi Ústavem stavební mechaniky FAST VUT v Brně a Ústavem fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

8 ABSTRACT

The author focuses on selected aspects of fracture mechanics of quasi-brittle building materials. A complex approach is introduced towards the analysis of mechanical response for quasi-brittle structures or structural elements. Precisely executed fracture test with advanced correction procedure of the measured data and identification of the values of selected parameters of numerical models applicable for complex analyses of structural response represent the axis of this approach. Special attention is paid to the resolving of two problems: (1) experimental and numerical analysis of the behaviour of pre-stressed railway sleeper during standard tests, and (2) the correction of values of fatigue parameters of concrete.

It is indicated that the set of the simulation results obtained using the finite element method solution (ATENA software) creates a relevant source for the verification of the numerical model of the behaviour of pre-stressed railway sleeper during three-point bending standard test with respect to prediction of load level during the formation process of the first visible crack and to load bearing capacity of the sleeper. The fracture-mechanical parameters of concrete affect the mechanical response of the sleeper to (quasi-static) loading in the two main phases of test: i) during the transition from linear to non-linear branch of the load–deflection diagram (formation of cracks along the lower side of the sleeper – driven by tensile strength and furthermore fracture energy); ii) on the top of the diagram (crushing of concrete along the upper side of the sleeper – driven mainly by compressive strength). The values of fracture-mechanical parameters also affect the development and width of cracks throughout the whole duration of the simulated test.

A correction procedure for basic fatigue parameters with respect to specimen age is presented. The approximation is based on statics compressive strength measurements covering the time interval of the fatigue tests. Related procedure is applied to three-point bending specimens with central edge notch of plain class C30/37 and C45/55 concretes. The tests are simulated using the nonlinear finite element software ATENA, where a material model for tensile fatigue damage of concrete has been implemented. The experimentally obtained values are compared with the numerical results.