



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

NONLINEAR MODELING OF ARCH SEGMENT OF THE CHARLES BRIDGE

Z. Janda, J. Novák, J. Šejnoha, M. Šejnoha*

Summary: *In the present contribution, a numerical simulation of the nonlinear behaviour of the Charles Bridge in Prague with the emphasis on the heterogeneous character of the material is presented. The results summarize numerical two-level simulations of the historical masonry, performed on the 2D mesoscopic periodic unit cells and on the macroscopic 3D Charles bridge arch-segment, respectively. The main goal of this article is the transfer of the material characteristics between meso and macro-scales. At the end, some results show a predisposition of some parts of the structure to damage in agreement with damage patterns observed for the real structure.*

1. Úvod

Karlův most je jednou z našich nejcennějších historických staveb. Z tohoto důvodu je nejenom přísně chráněn státem, ale jeho sledováním, ochranou a propagací se zabývá i nemalé množství různých zájmových skupin a občanských sdružení. Tato pozornost samozřejmě vyžaduje i značnou péči při jeho opravách, sanacích a případných rozsáhlejších rekonstrukcích. Velmi obezřetně, tj. nedestruktivním způsobem, je nutné se chovat i ve fázi zjišťování příčin dílčích poruch a materiálových charakteristik vlastního zdiva, které je z větší části tvořeno rozměrnými pískovcovými bloky a vápenojílovou maltou.

V posledním desetiletí se opět uvažuje o celkové rekonstrukci mostu. Současně s ní jsou zvažovány možnosti nasazení různých stavebních technologií, přičemž je snahou co nejlépe zhodnotit příčiny poruch mostu a vyvarovat se necitlivých zásahů.

Tento příspěvek se snaží odpovědět na otázku, co je příčinou deformací a porušení zejména kleneb a podpěr zdiva řešeného kamenného mostu.

* Zdeněk Janda, Ing. Jan Novák, prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc., doc. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D.: ČVUT Praha, fakulta stavební, katedra stavební mechaniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, +420 224 354 472, e-mail: zdenek.janda@atlas.cz, <http://www.charles-bridge.czechian.net>

2. Stručná historie poruch a oprav Karlova mostu

1406 - Dokončení Karlova mostu

1432 - poškození při povodních, pilíře č. 3,4,7,8,10

1496 - podemletí a pokles pilíře č. 3

do 1503 - oprava škod z roku 1432 a 1496

1655 - poškození založení pilířů

1784 - poškození 3 pilířů a 5 oblouků

do 1788 - oprava škod z roku 1784

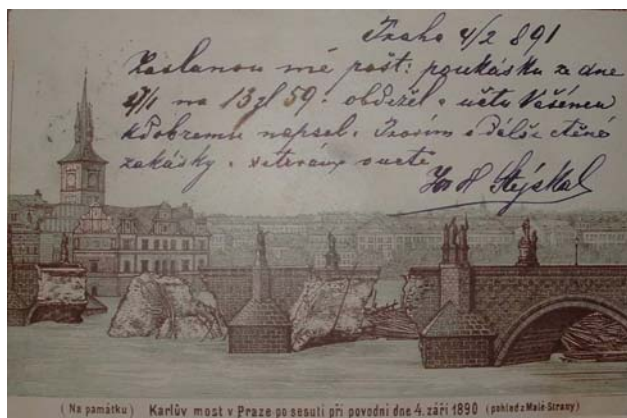
1890 - strženy klenby č. 5,6 a 7, poškozeny pilíře č. 4 – 8 (obr. 1)

1893 - oprava škod z roku 1890

1903 - sanace pilířů č. 3, 4, a 7

1966 - 1975 - rozsáhlá rekonstrukce, injektáže, železobetonová deska

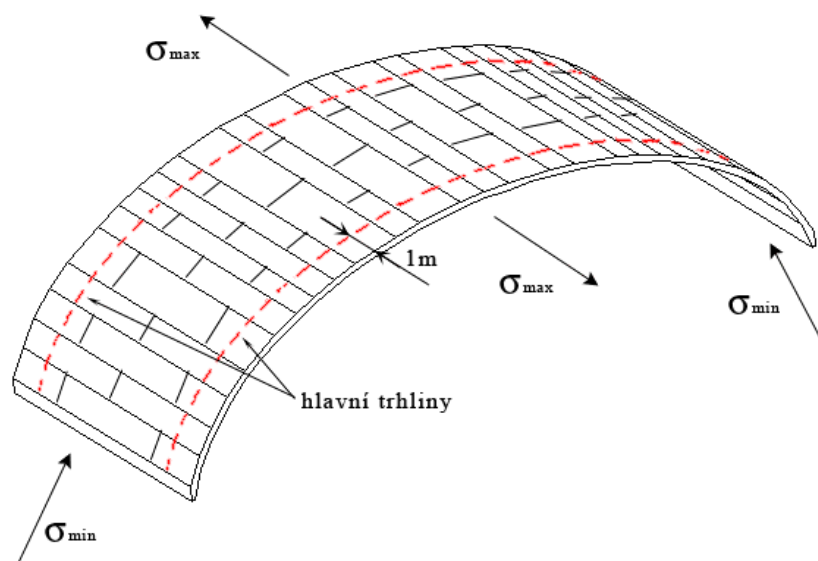
2002 - povodeň (více než stoletá voda) - most odolal



Obr. 1: Karlův most po povodni roku 1890

3. Současný stav porušení zdiva

V periodickém zdivu kleneb je patrný vývoj trhlin orientovaných souběžně s osou mostu. Trhliny jsou situovány zejména v oblastech vzdálených cca do 1 m od líců parapetních zdí směrem dovnitř klenby (obr. 2).



Obr. 2: Převládající směry hlavních tahů v klenbě Karlova mostu

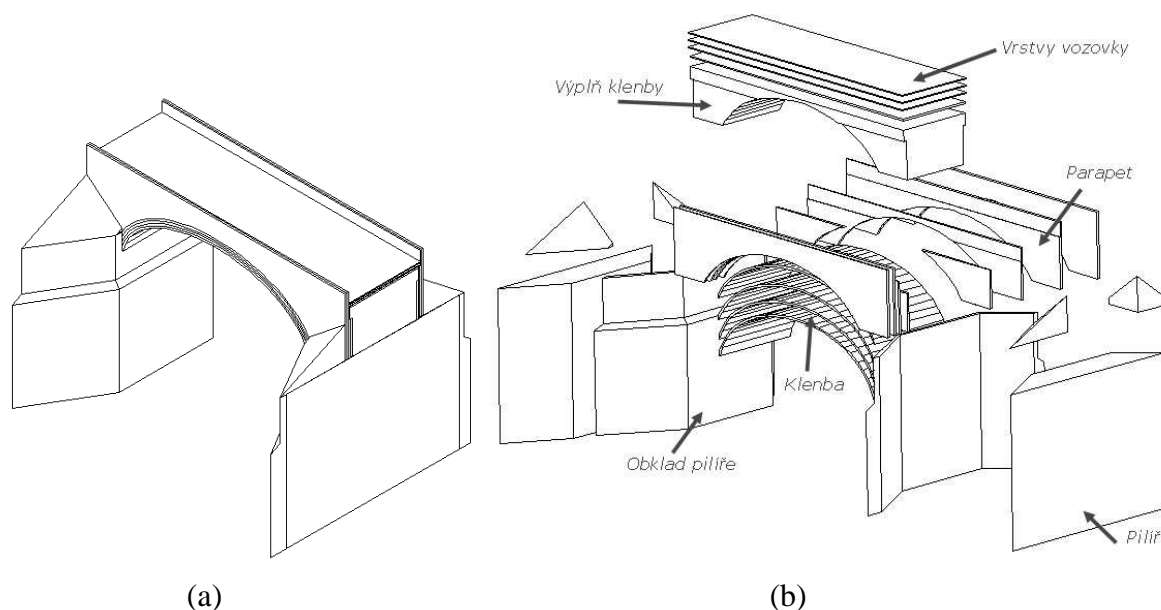
Trhliny mezi klenbou a parapetními zdmi jsou ovlivněny smykovými napětími zapříčiněnými nesterjným oteplováním jednotlivých částí konstrukce.

4. Rozčlenění kvazihomogenních celků

Těleso Karlova mostu lze rozdělit na pilíře a klenby. Jak pilíře, tak klenby jsou tvořeny obvodovým pláštěm z pískovcových bloků kladených periodicky v případě kleneb a neperiodicky v případě pilířů a poprsních zdí. Jádro mostu (prostor uvnitř pilířů nebo mezi klenbou a poprsními zdmi) je vyplněno opukovým zdivem na maltu převážně z černého hydraulického vápna. Jádro bylo v 60 letech minulého století injektováno vysokotlakou injektáží (klakáží). Vzniklý tlak tak nepochybně přispěl k dalšímu vývoji trhlin

Dlažba vozovky je uložena v betonové mazanině, pod ní je vrstva keramzitbetonu, železobetonová deska a výplňové zdivo

Z důvodu většího množství konstrukčních vrstev výplně mostovky a geometricky odlišného rozložení bloků v obvodovém zdivu pilířů, kleneb a parapetních zdí, byl celý objekt jednoho obloukového segmentu rozčleněn do kvazihomogenních celků (obr. 3b). Kvazihomogenní celky, které svými mechanickými parametry vystihují odlišné chování jednotlivých materiálů, byly tvořeny také s ohledem na rozložení teplot v konstrukci. Rozložení teploty v konstrukci bylo řešeno v předstihu programem DOLPHIN a následně byl teplotní spád aproximován čtyřmi hodnotami, které byly aplikovány vždy na celou vrstvu (kvazihomogenní celek, viz. obr. 5b).



Obr. 3: a) 3D Geometrie jednoho obloukového segmentu mostu, b) rozdělení oblouku na kvazihomogenní celky

5. Materiálové charakteristiky a simulace na mezoúrovni

Materiálové charakteristiky jednotlivých kvazihomogenních celků byly odvozeny z nelineárních simulací prováděných na periodických jednotkových buňkách (PUC) na mezoúrovni. Testována byla sada jednotkových periodických buněk zdiva klenby (obr. 4a), neperiodického zdiva parapetních zdí (obr. 4b) a výplňového zdiva (obr. 4c). V současné době jsou veškeré výpočty z mezoúrovně vyhodnocovány. Jsme schopni uspokojivě zjistit materiálové parametry pro periodické zdivo klenby a neperiodické zdivo parapetů (tab. 1), jakož i pro výplňové lomové zdivo z opuky.

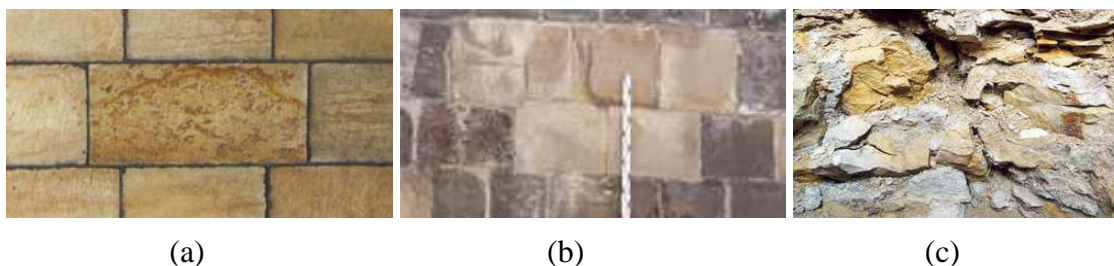
Výpočty na mezoúrovni probíhaly za předpokladu periodicity vyšetřovaných struktur s využitím homogenizační techniky. Využit byl program ATENAWin, který disponuje celou škálou nelineárních materiálových modelů využitelných k popisu nejen betonu, ale i malty a pískovcových bloků, jejichž chování je betonu velmi podobné. Mechanicko-fyzikální parametry na mezoúrovni byly odvozeny z experimentů prováděných v Kloknerově ústavu týmem Doc. Boušky s přihlédnutím k faktům uváděných v literatuře.

Pro upřesnění problematiky homogenizace uvádíme základní homogenizační rovnice rozkládající pole posunutí, potažmo pole deformace v doméně PUC na homogenní a flukтуаční složku:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{u}^*(\mathbf{x}), \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega, \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \quad \forall \mathbf{x} \in S \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \mathbf{E} + \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}^*(\mathbf{x})) = \mathbf{E} + \boldsymbol{\varepsilon}^*(\mathbf{x}), \quad (2)$$

kde \mathbf{E} je jednotkové pole deformace a \mathbf{u}^* a $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ jsou flukтуаční složky posunutí a deformace



Obr. 4: a) Reprezentativní objemový vzorek zdiva klenby, b) reprezentativní objemový vzorek zdiva poprsných zdí, c) reprezentativní objemový vzorek výplňového zdiva

Tab. 1 Materiálové charakteristiky

č.	materiál	E	ν	G_f	f_t	w
		GPa		Nm ⁻¹	MPa	m
1	Klenba	18	0,16	65	0,65	1,67
2	Parapet	18	0,16	65	0,65	1,67

6. Numerická analýza obloukového segmentu na makroúrovni

Nelineární výpočet makroskopického segmentu byl proveden programem ATENAWin. Za materiálový model vystihující chování reálné konstrukce na makroúrovni byl zvolen model CC3DCementitious. Síť konečných prvků byla generována dvěma pre-procesory. V první fázi byl nasazen generátor GID, kterým jsme ale nebyli schopni vygenerovat dostatečně vhodnou síť v oblastech (míněno makroelementech) s velkými rozměrovými rozdíly. K tvorbě sítě byl tedy nakonec použit pre-procesor programu ANSYS (obr. 6) s velmi výkonnými generátory.

7. Okrajové podmínky a zatížení

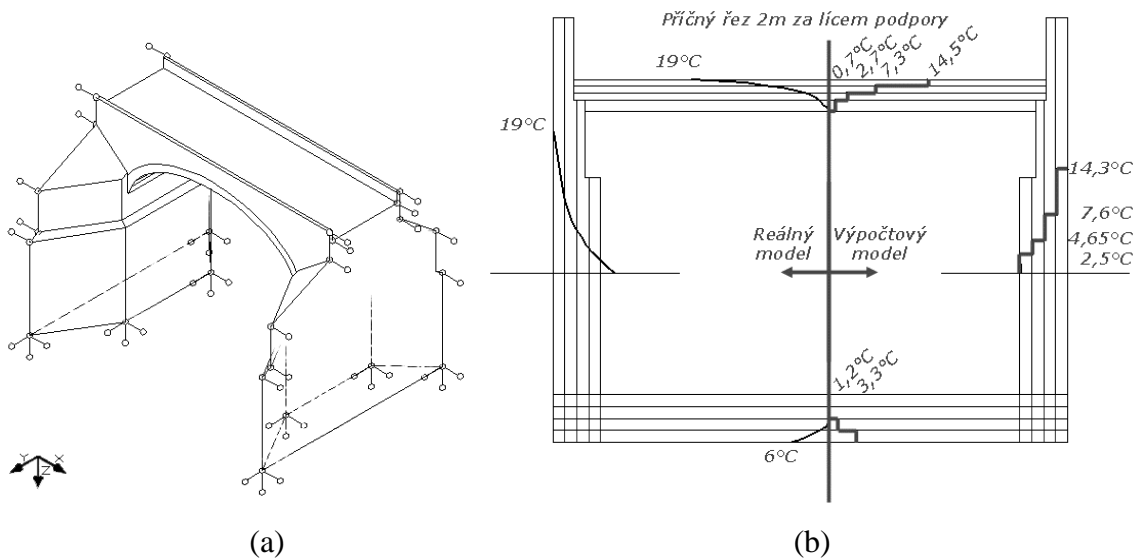
Vnější kinematické okrajové podmínky (obr. 5a) aplikované na jednom obloukovém segmentu mostu byly zvoleny tak, aby odpovídaly co nejlépe reálnému chování celé konstrukce. Obě podstavy mostních pilířů byly vzhledem k jejich založení pevně vetknuty a boční čela modelu, kolmá na podélnou osu mostu byla vzhledem k symetrii sousedních oblouků vetknuta posuvně.

Zatížení konstrukce bylo zvoleno s ohledem na vnější klimatické a provozní vlivy. Dnes, kdy je most zatěžován již pouze běžným provozním zatížením, se stává hlavním zatížením vlastní tíha konstrukce a oteplování, popřípadě ochlazování povrchu objektu, zapříčiňující odpovídající objemové změny.

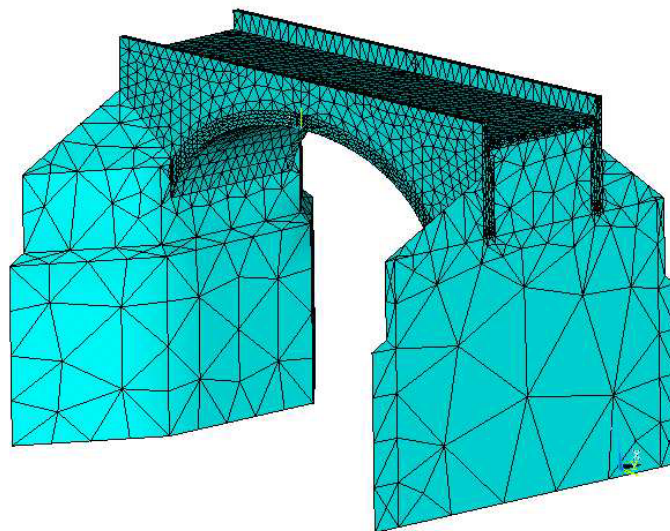
Most je opakovaně podrobován extrémním tlakům vodních proudů Vltavy ve spojení s případným podemíláním podzákladí pilířů. Tento problém však není předmětem příspěvku.

Zatížení teplotou bylo aplikováno diskrétně do jednotlivých vrstev klenby a poprsních zdí s ohledem na jeho skutečné průběhy (obr. 5b).

Vstupní hodnoty teplot jednotlivých povrchů konstrukce vkládané jako okrajové podmínky do programu DOLPHIN byly naměřeny in-situ.

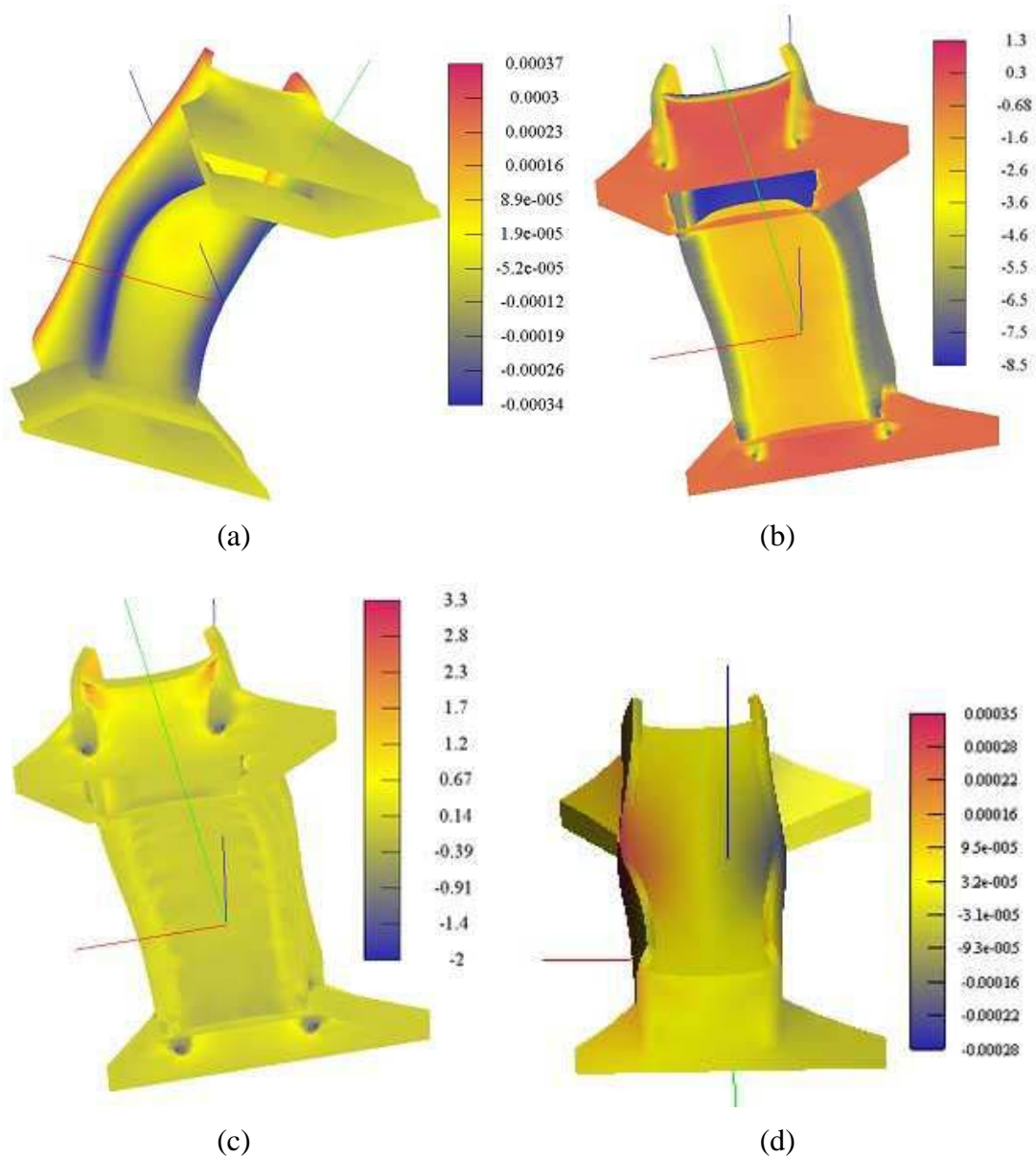


Obr. 5: a) Kinematické okrajové podmínky, b) rozložení teplot v konstrukci



Obr. 6: MKP model generovaný pre-procesorem programu ANSYS

8. Odezva prověřovaného segmentu



Obr. 7: a) Posunutí ve svislém směru, b) minimální hlavní napětí, c) maximální hlavní napětí, d) posunutí ve směru kolmém na osu mostu

Obecně lze konstatovat, že odezva konstrukce na aplikovaná zatížení teplotou a vlastní tíhou odpovídá očekávaným napětím a deformacím.

Rozložení tahových napětí predisponujících tahové porušení odpovídá reálnému rozložení trhlin v klenbě, které lze na obloucích pozorovat ze spodního pohledu od hladiny Vltavy. Trhliny patrně vznikají nejen z důvodu tahového namáhání, ale i z důvodu namáhání smykového, které je způsobeno relativními posuny mezi klenbou a parapetními zdmi.

Z obr. 7d je také patrná tendence boulení parapetních zdí, které je jednou z hlavních příčin diskuse kolem zamýšlených oprav Karlova mostu. Velikost vodorovných posunů parapetů kolmých na osu mostu ale není v případě výpočtu tak výrazná, jakou uvádějí autoři měření.

9. Závěr a další záměr

Další prohloubení práce bude spočívat v přidání vrstev podloží pro simulace podemletí a nestejnomyšlného naklání podpór. Hlavním úkolem však stále zůstává zjištění materiálových charakteristik pro zbývající kvazihomogenní celky, které jsou spojeny s dalšími numerickými simulacemi na mezoúrovni.

10. Poděkování

Príspevek byl vypracován za podpory GAČR 103/04/1321 a 106/03/H150

11. Literatura

Novák, J. & Šejnoha, J. (2004) Dvouúrovňové modelování zdiva. *Engineering Mechanics 2004*, Praha, Ústav termomechaniky AV ČR, 2004, s. 213-214.

Šejnoha, M., Zeman, J., (2002) Micromechanical analysis of random composites, *CTU Reports*, 6

Šejnoha, J. a kol., (2004) Počítačový model pro analýzu napjatosti a přetvoření Karlova mostu. *Zpráva 2. Analýza podkladů*, Mott MacDonald, Praha

Červenka, V. a kol., (2003) ATENA Program Documentation Part 1, *Theory*, Prague

Jendele, L., (2003) ATENA Program Documentation Part 7, *AtenaWin description*, Prague

Drozd, K., Příkryl, R., (2003) Věrohodnost průzkumných geotechnických metod při hodnocení stavu Karlova mostu. *Geotechnika 4*

Votoček R., (2003) Geofyzikální průzkum Karlova mostu. *Geotechnika 3*