

PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZA ZATÍŽITELNOSTI A SPOLEHLIVOSTI SPŘAŽENÉHO MOSTU Z MPD NOSNÍKŮ

PROBABILISTIC LOAD-BEARING CAPACITY AND RELIABILITY ANALYSES OF A COMPOSITE MPD BRIDGE

David Lehký, Martina Šomodíková,
Jiří Doležel, Drahomír Novák

Příspěvek se zabývá pravděpodobnostní analýzou zatížitelnosti a spolehlivosti jednoplošného deskového mostu sestaveného z prefabrikovaných nosníků typu MPD3 a MPD4. Vedle mezních stavů únosnosti a použitelnosti je pozornost zaměřena také na mezní stav trvanlivosti konstrukce s ohledem na možnou karbonataci betonu, s tím spojenou depasivací a následnou korozi výztuže. ■ The paper deals with probabilistic load-bearing capacity and reliability analyses of a single-span slab bridge composed of composite precast MPD3 and MPD4 girders. Beside the ultimate and serviceability limit states it is focused also on durability limit state. We study also possible concrete carbonation leading to reinforcement depassivation and subsequent corrosion.

S narůstajícím stářím mostů pozemních komunikací je velmi aktuální otázka určení jejich spolehlivosti, provozuschopnosti, úrovně zatížitelnosti, zbytkové životnosti a s tím související strategie jejich údržby či rekonstrukce, to vše v přímé vazbě na stavební stav konstrukce.

V současnosti se na silnicích a rychlostních komunikacích v České republice nachází více než 17 400 mostů. Téměř 3 000 z nich je ve špatném až havarijním stavu a je nezbytné provést jejich celkovou či částečnou rekonstrukci [1].

Spolehlivost a zbytková životnost mostů z železobetonového nebo předpjatého betonu je velmi výrazně ovlivněna úrovní degradace betonu vlivem karbonatace či působením chloridů, a po ztrátě pasivační schopnosti krycí betonové vrstvy i následnou korozi betonářské či předpínací výztuže [2, 3]. Rozhodnutí o časovém sledu případných oprav tedy vyžadují efektivní modelování těchto jevů [4].

Vzhledem k přítomnosti řady nejistot v celém systému návrhu – výstavby – provozu – údržby je vhodné při hodnocení stávajících mostů využít technik pokročilé pravděpodobnostní analýzy. Tato analýza, v porovnání s klasickými deterministickými metodami založený-

mi zpravidla na metodě dílčích součinitelů spolehlivosti, zavádí tzv. ukazatele spolehlivosti, kterými jsou pravděpodobnost poruchy (pravděpodobnost překročení některého mezního stavu) či index spolehlivosti. Tím je možné úroveň spolehlivosti lépe kvantifikovat.

Přímou aplikací pokročilých pravděpodobnostních metod v kombinaci s nelineární globální analýzou únosnosti konstrukce, založenou na metodě konečných prvků (MKP), je možné dosáhnout finanční úspory při rozhodování o údržbě či opravě stávajících mostů [5, 6].

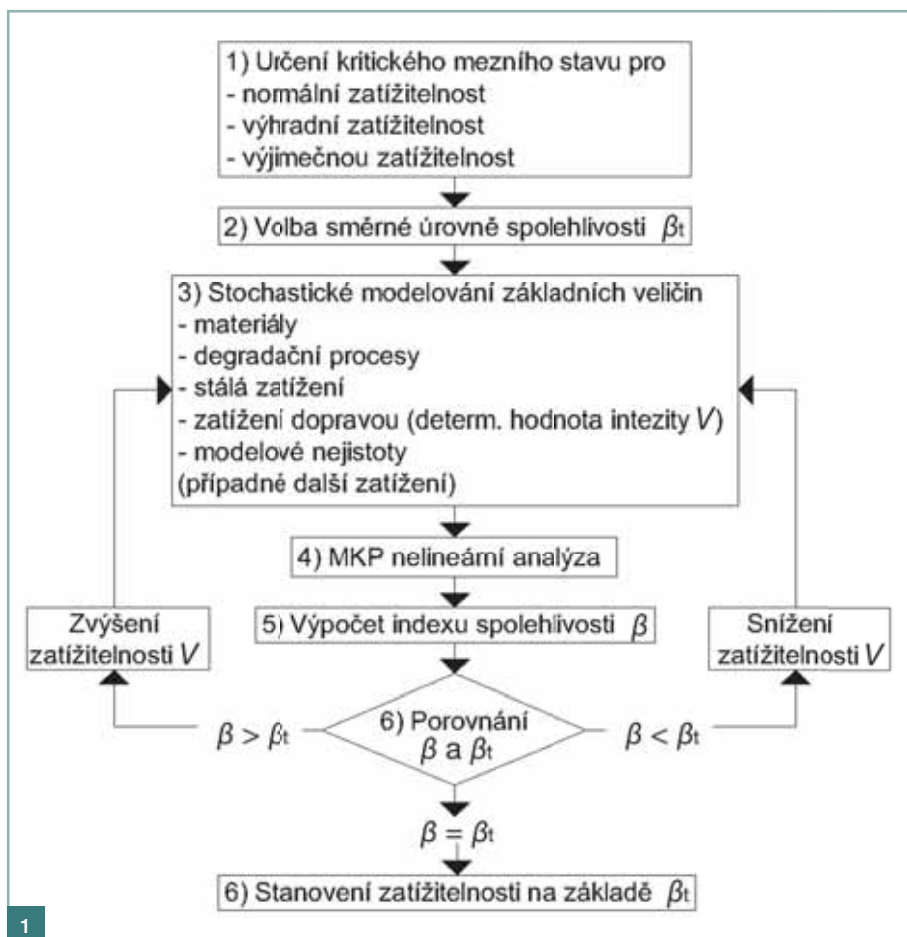
PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZA ZATÍŽITELNOSTI A SPOLEHLIVOSTI MOSTŮ

Při hodnocení existujících mostů je prvním důležitým krokem stanovení rozhodujícího mezního stavu, jehož překročení může být pro danou konstrukci z hlediska jejího fungování kritické.

V souladu s platnými předpisy se může jednat o mezní stav únosnosti (MSÚ) či některý z mezních stavů použitelnosti (MSP).

U degradovaných konstrukcí se v souvislosti s jejich životností často posuzuje i mezní stav trvanlivosti (MST). S tím souvisí zejména znalost časového úseku, tzv. iniciačního času, který uplyne od zhotovení konstrukce do okamžiku, kdy pomyslná karbonatační fronta prostoupí celou tloušťkou betonové krycí vrstvy a/nebo koncentrace chloridů dosáhne v hloubce krycí vrstvy kritické hodnoty a může docházet ke korozi výztuže, což má přímý vliv na celkovou únosnost konstrukce.

V případě určení zatížitelnosti stávajících mostů s využitím pravděpodobnostních metod se doporučuje postupovat dle diagramu na obr. 1, kde je použit klíčový ukazatel – index spolehlivosti β . Orientační směrné hodnoty in-



dexu spolehlivosti β_t a pravděpodobnosti poruchy p_{ft} jsou uvedeny v tab. 1 a v příslušných normativních předpisech, např. [7].

Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti stávajících mostů je založena na simulaci porušení konstrukce daným zatížením pomocí nelineární analýzy MKP v kombinaci se simulačními technikami typu Monte Carlo. Celý postup výpočtu může být rozčleněn do následujících kroků.

Statistická analýza naměřených dat

Hodnocení naměřených dat získaných z diagnostického průzkumu a/nebo ze zkušební laboratoře zahrnující stanovení odhadu statistických charakteristik náhodných veličin, testování vhodných pravděpodobnostních modelů pomocí testů dobré shody, aktualizace modelů na základě bayesovských postupů, či stanovení vzájemné statistické závislosti mezi veličinami. Dále sem spadá případná identifikace parametrů materiálových modelů využitých při MKP analýze (např. lomová energie či tahová pevnost betonu). Ta bývá provedena na základě výsledků reálných lomových zkoušek těles ve vhodné zkušební konfiguraci [8].

Matematické modelování degradačních procesů betonu vlivem CO₂, Cl⁻ a koroze výztuže

Pro výpočet chemického poškození konstrukce, tj. pro výpočet hloubky karbonatace, koncentrace chloridů a úbytku výztuže vlivem koroze, se s využitím dostupných matematických modelů provede časová analýza průběhu těchto degradačních procesů. To lze provést na úrovni deterministické, ale vzhledem k neurčitosti a náhodné povaze vstupních veličin modelů je vhodnější přistoupit ke statistickému modelování pomocí náhodných veličin nebo náhodných polí.

Deterministická analýza konstrukce pomocí MKP na lokální a globální úrovni

V případě modelování odezvy betonových konstrukcí je důležité použití pokročilých nelineárních materiálových modelů, které dobře vystihují všechny důležité aspekty chování betonu jako kvazikřehkého materiálu při různých typech porušení, a tím postihnout reálné chování konstrukce na dané účinné zatížení.

Spolehlivostní analýza

Spolehlivostní analýza je založena na

statistickém hodnocení nelineární odezvy konstrukce získané opakovaným deterministickým výpočtem realizovaným pro vektor náhodných veličin generovaný z jejich pravděpodobnostních modelů některou ze simulačních metod. Zde se, vzhledem k časové náročnosti nelineárních MKP analýz, osvědčilo použití stratifikované simulační metody Latin hypercube sampling (LHS) [9]. Z teoretického modelu odolnosti je možné provést odhad zatížitelnosti pro danou úroveň spolehlivosti nebo pravděpodobnosti poruchy odpovídající analyzovanému meznímu stavu. Nebo se pro danou úroveň zatížitelnosti stanoví odpovídající úroveň spolehlivosti, která je daná indexem spolehlivosti nebo pravděpodobností poruchy.

SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZA MOSTU Z PREFABRIKOVANÝCH MPD NOSNÍKŮ

Popis konstrukce

Řešenou konstrukcí, na kterou byla plně použita výše popsaná metodika, je jednoplošný deskový most (obr. 2). Stavební dokumentace objektu se nezachovala, rok výstavby mostu není přesně znám, zřejmě v letech 1955 až 1960. V letech 2006 a 2007 byl

Obr. 1 Postup stanovení zatížitelnosti pomocí pravděpodobnostního přístupu

Fig. 1 Procedure of probabilistic load-bearing capacity assessment

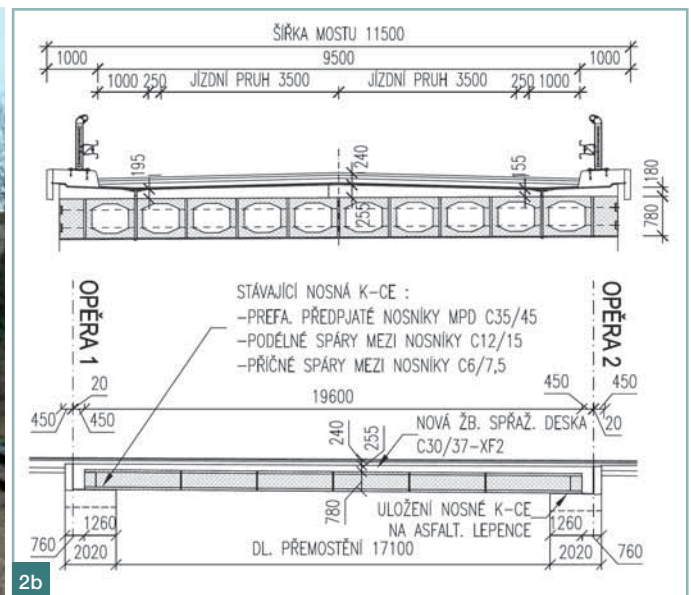
Obr. 2 Řešený most, a) boční pohled, b) příčný a podélný řez mostem

Fig. 2 Analyzed bridge, a) side view, b) transversal and longitudinal section of the bridge

Tab. 1 Směrné hodnoty indexu spolehlivosti a pravděpodobnosti poruchy

Mezní stav	β_t	p_{ft}	
Použitelnosti	- vratné jevy	0,0	0,5
	- nevratné jevy	1,3-2,3	$9,7 \cdot 10^{-2}$ - $1,1 \cdot 10^{-2}$
Únosnosti	- velmi malé následky poruchy	2,3	$1,1 \cdot 10^{-2}$
	- malé následky poruchy	3,1	$9,7 \cdot 10^{-4}$
	- střední následky poruchy	3,8	$7,2 \cdot 10^{-5}$
	- vysoké následky poruchy	4,3	$8,5 \cdot 10^{-6}$

Pozn.: Pro obvyklé typy mostů se doporučuje hodnota indexu spolehlivosti pro mezní stav únosnosti $\beta_t = 3,8$.



na mostě proveden podrobný diagnostický průzkum (DP) [10].

Nosnou konstrukci mostu tvoří přibližně vodorovná prostě uložená deska složená z dvanácti typových prefabrikovaných dodatečně předpjatých nosníků typu MPD3 (krajní) a MPD4 (mezilehlé), které se používaly od roku 1955, spodní stavba je monolitická. Dodatečně předpjaté nosníky, jejichž teoretické rozpětí je 19 m, byly složeny na stavbě každý ze šesti (MPD4), respektive tří (MPD3) segmentů. Spolupůsobení jednotlivých dílců je zajištěno jejich spojením příčnými kabely.

Beton nosníků MPD3 a MPD4 byl dle DP zařazen do pevnostní třídy C35/45. Beton příčných spár měl střední hodnotu tlakové pevnosti o málo nižší (pro jednotlivé vzorky se pohybovala od 22,5 do 55,8 MPa). Vzhledem k výrazné variabilitě dosahující 38 % byl beton, na základě odhadu 5% kvantilu v přímé vazbě na počet platných zkušebních míst nedestruktivního testování, zatříděn do pevnostní třídy C6/7,5 s nezaručenou pevností. Podélná a příčná předpínací výztuž nosníků je tvořena přepínacími lany z patentovaných drátů PZØ4,5 1 650/1 200. Pro betonářskou výztuž byla použita ocel 10512 (ROXOR).

V době provádění DP byla zatížitelnost na mostě omezena hodnotami $V_n = 25$ t pro normální a $V_r = 48$ t pro výhradní zatížitelnost. Z důvodů diagnostikovaných poruch v hydroizolaci nosné konstrukce a nízké zatížitelnosti byla v roce 2012 provedena celková rekonstrukce mostu. Ta spočívala zejména v zesílení mostu v podobě realizace spřažené železobetonové desky. Předložený příspěvek se zabývá stanovením zatížitelnosti v čase před rekonstrukcí a jejím srovnáním s diagnostikovanými hodnotami.

Statistické modely náhodných veličin

V rámci diagnostického průzkumu bylo provedeno nedestruktivní měření tlakové pevnosti betonu nosníků včetně příčných a podélných spár, které bylo doplněno destruktivními tlakovými zkouškami na vzorcích betonu odebraných přímo z nosníků. Pomocí prostředků matematické statistiky byly získány základní statistické charakteristiky pro stanovení pravděpodobnostního modelu tlakové pevnosti betonu nosníků MPD a příčných spár. Na základě informací o tlakové pevnosti betonu byly podle vztahů uvedených v CEB-

Tab. 2 Definice vstupních náhodných veličin pravděpodobnostního modelu ■ Tab. 2 Definition of input random variables of probabilistic model

Veličina	PDF	Střední hodnota	CoV
Beton nosníků			
Modul pružnosti E_c [GPa]	Lognormální (2 par.)	37,2	0,1
Pevnost betonu v tahu f_t [MPa]	Weibullovo min (2 par.)	3,301	0,15
Pevnost betonu v tlaku f_c [MPa]	Lognormální (2 par.)	43,35	0,08
Specifická lomová energie G_f [N/m]	Weibullovo min (2 par.)	82,51	0,15
Specifická hmotnost ρ [kN/m ³]	Normální	23,8	0,04
Beton příčných spár			
Modul pružnosti E_c [GPa]	Lognormální (2 par.)	34,03	0,15
Pevnost betonu v tahu f_t [MPa]	Weibullovo min (2 par.)	2,807	0,35
Pevnost betonu v tlaku f_c [MPa]	Trojúhelníkové	36	0,25
Specifická lomová energie G_f [N/m]	Weibullovo min (2 par.)	70,18	0,25
Specifická hmotnost ρ [kN/m ³]	Normální	23,8	0,04
Smyková výztuž			
Modul pružnosti E [GPa]	Lognormální (2 par.)	200	0,07
Mez kluzu f_v [MPa]	Lognormální (2 par.)	465,1	0,07
Mez pevnosti f_u [MPa]	Lognormální (2 par.)	581,4	0,07
Poměrné přetvoření ϵ_{im} [-]	Normální	0,05	0,07
Předpínací výztuž			
Modul pružnosti E [GPa]	Normální	190	0,03
Mez kluzu f_{vp} [MPa]	Normální	1 248	0,03
Mez pevnosti f_{up} [MPa]	Normální	1 716	0,03
Poměrné přetvoření ϵ_{im} [-]	Normální	0,05	0,07
Předpínací síla P [MN]	Normální	P_{mean}	0,09
Zatížení			
Zatížení vozovkou g_1 [kN/m]	Normální	$g_{1,mean}$	0,05
Sestava pro normální zat. V_n [t]	Deterministicky	V_n	-
Sestava pro výhradní zat. V_r [t]	Deterministicky	V_r	-
Sestava pro výjimečnou zat. V_e [t]	Deterministicky	V_e	-

Tab. 3 Korelační matice parametrů betonu a výztuže ■ Tab. 3 Correlation matrices of parameters of concrete and reinforcement

a) beton segmentů a příčných spár

■ a) segment and cross joint concrete

	E_c	f_t	f_c	G_f	ρ
E_c	1	0	0,3	0	0
f_t	0	1	0,4	0,8	0
f_c	0,3	0,4	1	0	0
G_f	0	0,8	0	1	0

b) smyková a předpínací výztuž ■

b) web reinforcement and steel tendon

	f_y	f_u	ϵ_{im}	E
f_y	1	0,9	0,5	1
f_u	0,9	1	0,5	0
ϵ_{im}	0,5	0,5	1	0
E	1	0	0	1

-FIP Model Code 1990 [11] stanoveny zbývající pevnostní a přetvárné charakteristiky betonu. V případě předpínací a betonářské výztuže byly hodnoty tahové pevnosti na mezi kluzu a na mezi pevnosti převzaty z typových podkladů.

Volba vhodného pravděpodobnostního modelu, tj. typ rozdělení pravděpodobnosti (PDF) a variační koeficient (CoV), byla provedena v souladu s doporučeními dle JCSS [12] a TP [13]. Vedle materiálových parametrů byla znáhodněna vlastní tíha betonových částí nosné konstrukce a tíha stávajícího vozovkového souvrství. Hodnota předpínací síly, která má zásadní vliv na úroveň zatížitelnosti v případě mezního stavu použitelnosti, byla stanovena s ohledem ke krátkodobým a dlou-

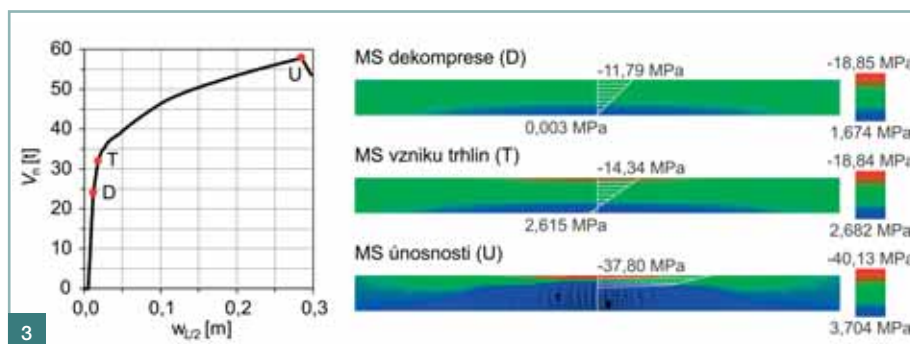
hodobým ztrátám předpětí v souladu s ČSN EN 1992-1-1 v podobě střední hodnoty. Použitý pravděpodobnostní model předpínací síly je plně v souladu s JCSS. Jednotlivé modely náhodných veličin vstupujících do pravděpodobnostní analýzy spolehlivosti a zatížitelnosti mostu jsou souhrnně uvedeny v tab. 2.

Mezi jednotlivé parametry betonu segmentů, betonu příčných spár, předpínací výztuže i betonářské výztuže byla, na základě výsledků dříve provedených testů zkušebních betonových těles a doporučení JCSS, zavedena statistická korelace (tab. 3). Její zavedení bylo provedeno s využitím metody simulovaného žhání v rámci tvorby náhodných permutací simulační metody Latin hypercube sampling [14].

Tab. 4 Karbonatace betonu nosníků MPD a příčných a podélných spár při stáří 55 let
 Tab. 4 Carbonation of concrete of MPD girders and transversal and longitudinal joints at age of 55 years

	Hloubka karbonatace [mm]		
	FT (2007)	Model dle Boba	Model dle Papadakise
Nosníky MPD	1 až 4	2,6 (3,9)	2,8 (4,2)
Příčné a podélné spáry	-	3,3 (4,9)	3,4 (5,2)

Obr. 3 Výsledky MKP nelineární analýzy: diagram zatížení–průhyb a průběh normálových napětí při dosažení mezních stavů dekomprese, vzniku trhlin a únosnosti
 Fig. 3 Results of FEM nonlinear analysis: load–deflection diagram and normal stress distribution at decompression, cracking and ultimate limit states



Degradace betonu vlivem CO₂

Úroveň chemického poškození betonu nosníků MPD a příčných spár vlivem účinku vzdušného CO₂ byla vyšetřována z důvodu možné koroze předpínací výztuže při ztrátě pasivační schopnosti betonu, která může zásadním způsobem ovlivnit výslednou úroveň zatížitelnosti. V případě karbonatace betonu lze mezní stav trvanlivosti definovat jako okamžik, kdy karbonatační fronta prostoupí celou krycí vrstvou betonu. Tím je narušena pasivační schopnost výztuže, která následně může začít korodovat.

V případě řešeného mostu bylo krytí podélných kabelových kanálků předpínacích lan 30 mm. Dle DP byla fenolftaleinovým testem (FT) stanovena hloubka karbonatace betonu nosníků v rozsahu 1 až 4 mm. K depasivaci výztuže tedy nedochází a mezního stavu trvanlivosti nebylo v případě nosníku MPD dosaženo.

Pro srovnání naměřených výsledků a následnou předpověď degradace betonu byl s pomocí programu FReET-D [4] proveden teoretický výpočet hloubky karbonatace v čase. Použity byly modely dle Boba a Papadakise, podrobněji viz [4]. Srovnávací výpočet rovněž posloužil k odhadům vstupních parametrů modelů karbonatace a k následnému odhadu hloubky karbonatace u příčných a podélných spár (tab. 4). V tabulce je vedle střední hodnoty hloubky karbonatace uvedena v závorce i hodnota odpovídající 95% kvantilu za předpokladu normálního rozdělení a variačního koeficientu 0,3.

Hloubka karbonatace v místě příčných a podélných spár, získaná na základě výše zmíněných matematických modelů, nedosahuje úrovně kabelo-

vých kanálků předpínací výztuže. Spolehlivost konstrukce z pohledu mezního stavu trvanlivosti tedy nebyla překročena, a tím nebyl započat proces koroze výztuže. V následných pravděpodobnostních odhadech zatížitelnosti nebylo tedy nutné provádět redukci průřezové plochy výztuže vlivem oslabení korozí a s tím související pokles předpínací síly.

Výpočtový MKP model

Za předpokladu vytvoření dokonale tuhé desky z jednotlivých nosníků MPD3 a MPD4 díky jejich příčnému sepnutí byl vytvořen výpočtový rovinný MKP model v programu ATENA 2D [15]. Šířka modelu byla definována s ohledem na počet a příčný tvar spřažených nosníků (obr. 2) a jejich skladebné rozměry. Betonové části nosníku byly modelovány pomocí materiálového modelu 3D Non Linear Cementitious 2, předpínací výztuž byla modelována jako diskrétní pruty a měkká výztuž jednotlivých segmentů nosníku jako rozptýlená. V obou případech byl materiál výztuže uvažován pomocí bilineárního pracovního diagramu se zpevněním. Předpokládá se prosté uložení nosníku na operách. Pro MKP řešení byla generována síť tvořená čtyřuzlovými izoparametrickými konečnými prvky se čtyřmi integračními body.

Model konstrukce byl zatížen vlastní tíhou, účinky podélného předpětí a ostatním stálým zatížením od vozovkového souvrství. Následně byl nosník postupně přitěžován v přírůstcích jednotkového zatížení od vozidel dle normových sestav zatížení pro zatížitelnost normální (dále označena V_n), výhradní (V_r) a výjimečnou (V_e), včetně zahrnutí dynamických účinků (blíže viz [16]). Zatěžovací sestavy byly umístěny

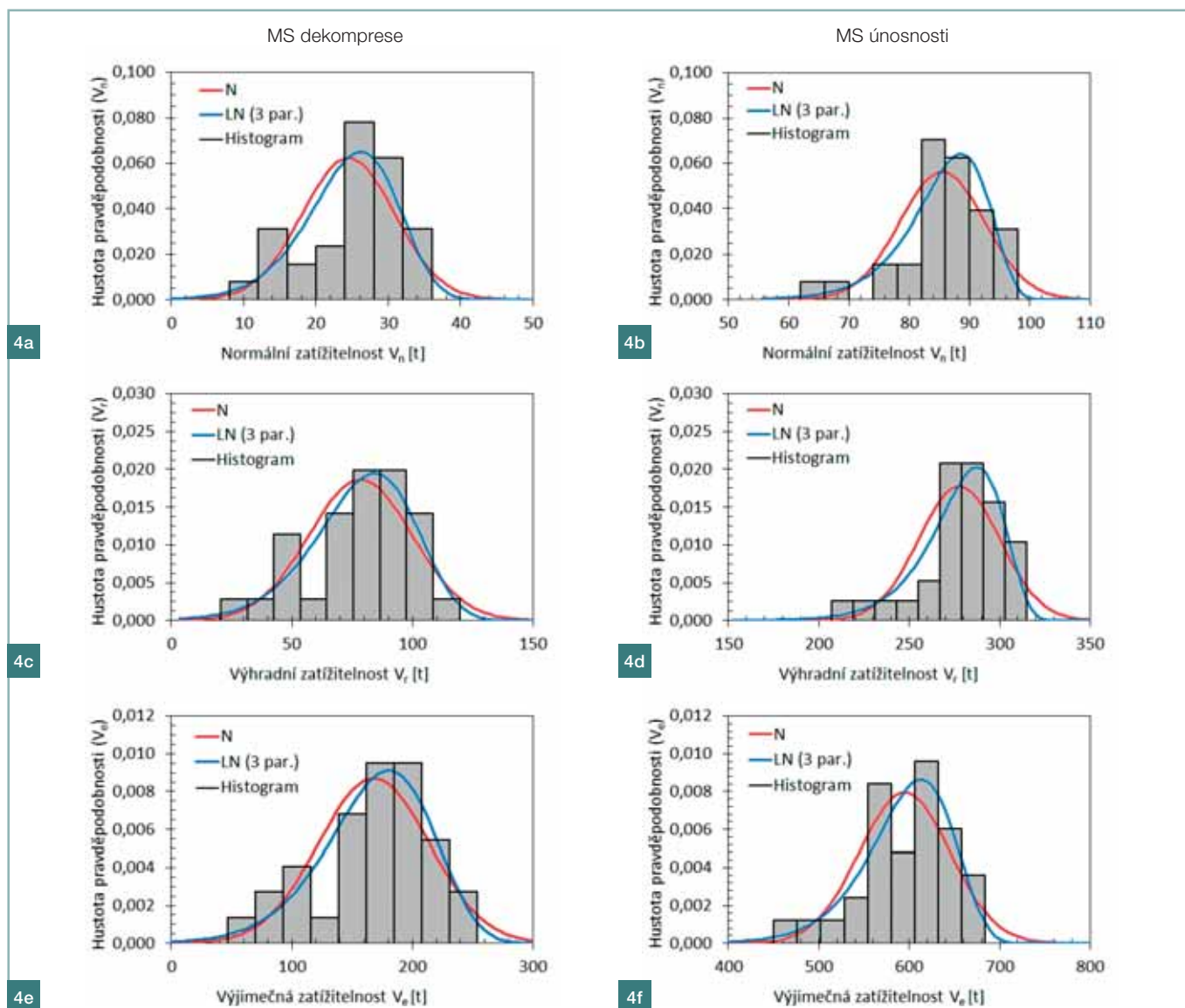
na konstrukci tak, aby vyvodily nejnepríznivější ohybový účinek.

Vlastní nelineární řešení bylo provedeno s pomocí metod Newton-Raphson a Arc-length. Zatěžováno bylo přírůstkem silového zatížení až do dosažení sledovaného mezního stavu (obr. 3). Za mezní stavy byla považována úroveň zatížení při stavu dekomprese, stavu před vznikem trhlin a při mezní únosnosti.

Pravděpodobnostní analýza zatížitelnosti

Odhad zatížitelnosti stávajících nosníků MPD, resp. celého mostu před rekonstrukcí, byl proveden na globální úrovni celé konstrukce. Hodnoty jednotlivých zatížitelností byly stanoveny pro požadovanou úroveň spolehlivosti odpovídající řešenému meznímu stavu, která byla dána směrnou hodnotou indexu spolehlivosti β_1 . Pro řešený most byly uvažovány následující hodnoty indexu spolehlivosti: $\beta_1 = 3,8$ pro mezní stav únosnosti a $\beta_1 = 0$ pro mezní stavy použitelnosti pro vratné jevy (tab. 1). Lze předpokládat, že po odeznění nahodilého zatížení v případě stavu dekomprese a vzniku trhlin nedojde k trvalému poškození konstrukce.

Nelineární pravděpodobnostní analýza spolehlivosti a zatížitelnosti řešeného mostu byla provedena v programu SARA Studio [17], zastřešující výpočtový program ATENA 2D a spolehlivostní software FReET [18], s využitím simulační metody LHS za použití 32 náhodných simulací odezvy. Na základě opakovaného deterministického MKP výpočtu porušení konstrukce v programu ATENA 2D pro jednotlivé sestavy zatížení V_n , V_r a V_e byl získán soubor třiceti dvou hodnot úrovně zatíži-



Tab. 5 Srovnání zatížitelností odpovídajících analyzovaným mezním stavům stanovených pomocí jednotlivých metod ■ Tab. 5 Comparison of load-bearing capacities corresponding to analyzed limit states and determined by using individuals methods

Mezní stav	Zatížitelnost dle PA			Zatížitelnost dle DET			Zatížitelnost dle DP		
	V_n [t]	V_r [t]	V_e [t]	V_n [t]	V_r [t]	V_e [t]	V_n [t]	V_r [t]	V_e [t]
- dekomprese	25 (24)	80 (78)	172 (168)	21	71	163	25	48	-
- vzniku trhlin	32 (32)	103 (103)	220 (219)	23	79	181			
- únosnosti	38 (58)	129 (192)	298 (404)	25	85	197			

Pozn.: Hodnoty v závorce odpovídají normálnímu rozdělení pravděpodobnosti.

telosti pro mezní stavy dekomprese, vzniku trhlin a únosnosti. Soubor odevz byl následně statisticky vyhodnocen v programu FReET, tj. byl proveden odhad statistických charakteristik získaného statistického souboru.

Výsledné histogramy společně se zvolenými teoretickými modely rozdělení pravděpodobnosti pro mezní stavy dekomprese a únosnosti jsou pro jednotlivé třídy zatížitelnosti uvedeny na obr. 4. Číselné hodnoty jednotlivých zatížitelností stanovené pravděpodobnostní

analýzou (PA) pro všechny tři studované mezní stavy, tedy včetně mezního stavu vzniku trhlin, jsou uvedeny v tab. 5. Hodnoty jsou stanoveny za předpokladu, že odezva konstrukce má tříparametrické lognormální rozdělení. Toto rozdělení bylo zvoleno na základě testu dobré shody a velmi dobře vystihuje nasimulované histogramy odezvy.

Pro srovnání byl proveden výpočet zatížitelností i pro normální rozdělení odezvy. Výsledné hodnoty jsou v tab. 5 uvedeny v závorce a na obr. 4 červe-

Obr. 4 Výsledné histogramy normální, výhradní a výjimečné zatížitelnosti spolu s vybranými modely rozdělení pravděpodobnosti pro mezní stavy dekomprese a únosnosti ■

Fig. 4 Resulting histograms of normal, reserved and exceptional load-bearing capacity together with selected probability distributions for decompression and ultimate limit states

nou křivkou. Ze srovnání je patrné, že vhodná či nevhodná volba pravděpodobnostního modelu může, při odhadech velmi nízkých pravděpodobností, což je případ zejména mezního stavu únosnosti, výrazně ovlivnit výsledné hodnoty zatížitelností. V případě volby pravděpodobnostního modelu únosnosti mostu v podobě normálního rozdělení může být výsledná zatížitelnost pro mezní stav únosnosti až o 50 % vyšší oproti uvažovanému tříparametrickému lognormálnímu rozděle-

Literatura:

- [1] Ředitelství silnic a dálnic ČR: Přehledy z informačního systému o silniční a dálniční síti ČR, 2013, http://www.rsd.cz/sdb_intranet/sdb/download/prehledy_2013_1_cr.pdf
- [2] Richardson M.: Carbonation of Reinforced Concrete: Its Causes and Management. Citis Ltd., Dublin, Ireland, 1988
- [3] Rodriguez J., Ortega L. M., Casal J. and Diez J. M.: Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures. In: Proc. of the 7th Intern. Conf. on Durability of Building Materials and Components 7, Stockholm, 1996, 117–126
- [4] Teplý B., Chromá M., Vořechovská D., Rovnaník P.: FReET-D Deterioration Module Program Documentation, Part 1: Theory. Brno/Cervenka Consulting, Prague, Czech Republic, 2008, <http://www.freet.cz>
- [5] Pukl R.: Moderní metodika pro stanovení bezpečnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí. Beton TKS 4/2008, str. 74–78
- [6] Enevoldsen I.: Practical implementation of probability based assessment methods for bridges. Structure and Infrastructure Engineering, 7(7–8), 2011, 535–549
- [7] Česká technická norma. ČSN ISO 13822 Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí. Český normalizační institut, Praha, 2005
- [8] Novák D., Lehký D.: ANN inverse analysis based on stochastic small-sample training set simulation. Journal of Engineering Application of Artificial Intelligence, 19(7), 2006, 731–740
- [9] McKay M. D., Conover W. J., Beckman R. J.: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics, 21(2), 1979, 239–245
- [10] Kryštof J.: Diagnostický průzkum mostu přes trať Českých drah na silnici č. I/55. Mostní vývoj, s. r. o., Brno, 2007
- [11] Comité Euro-International du Béton: CEB-FIP Model Code 1990: Design code. London: Thomas Telford services Ltd., 1993
- [12] Joint Committee on Structural Safety (JCSS): Probabilistic Model Code, Part 3: Material Properties, 2000
- [13] Technické podmínky TP 224 – Ověřování existujících betonových mostů pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, Praha, 2010
- [14] Vořechovský M., Novák D.: Correlation control in small sample Monte Carlo type simulations I: A Simulated annealing approach. Probabilistic Engineering Mechanics, 24(3), 2009, 452–462
- [15] Červenka V., Jendele L., Červenka J.: ATENA Program Documentation – Part 1: Theory. Cervenka Consulting, Praha, 2012
- [16] ČSN 73 6222 – Zatížitelnost mostů pozemních komunikací. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2009
- [17] Pukl R., Červenka V., Strauss A., Bergmeister K., Novák D.: An advanced engineering software for probabilistic based assessment of concrete structures using nonlinear fracture mechanics. 9th Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9), San Francisco, California, USA, 2003, 1165–1171
- [18] Novák D., Vořechovský M., Rusina R.: FReET – Program Documentation: User's and Theory Guides, Version 1.5, Brno/Červenka Consulting, Czech Republic, 2012, <http://www.freet.cz>

strukce sestavené z dodatečně předpjatých mostních nosníků typu MPD3 a MPD4. Vzhledem k náhodné povaze materiálových parametrů bylo při stanovení normou definovaných základních skupin zatížitelnosti přistoupeno k plně pravděpodobnostnímu pojetí. Kromě mezního stavu únosnosti byly hodnoty zatížitelnosti stanovovány také s ohledem na mezní stavy použitelnosti, které se u analyzovaného mostu ukázaly jako klíčové.

Pravděpodobnostní metody v kombinaci s nelineární analýzou MKP představují účinný prostředek při hodnocení úrovně zatížitelnosti a spolehlivosti existujících stavebních konstrukcí. Přímá aplikace pravděpodobnostních metod může posloužit k získání podkladů pro rozhodování o způsobu údržby a opravách, a tak může přispět k efektivnějšímu nakládání s finančními prostředky určenými na správu dopravní infrastruktury. Představená komplexní metodika založená na pokročilém software pro pravděpodobnostní a nelineární analýzu má obecné použití.

Příspěvek vznikl za finanční podpory projektu specifického vysokoškolského výzkumu na Vysokém učení technickém v Brně registrovaným na VUT pod číslem FAST-S-12-6 a s finanční pomocí programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky (TAČR) v rámci projektu Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), číslo projektu TE01020168.

ní. Hodnoty zatížitelnosti pro mezní stavy použitelnosti jsou vzhledem k uvažovanému směrnému indexu spolehlivosti $\beta_f = 0$ ($p_f = 0,5$) podobné pro oba pravděpodobnostní modely.

Vedle pravděpodobnostního přístupu (PA v tab. 5) byla normální, výhradní a výjimečná zatížitelnost mostu stanovena v souladu s [13] klasickým deterministickým postupem (DET) dle EC. V tab. 5 je provedeno srovnání výsledků výše zmíněných metod společně s hodnotami zatížitelnosti uvedenými v DP. Z porovnání výsledků je patrné, že rozhodujícími mezními stavy pro stanovení zatížitelnosti jsou mezní stavy použitelnosti, které oproti meznímu stavu únosnosti vykazují hodnoty zatížitelnosti až dvojnásobně nižší.

Jelikož řešený most je konstrukcí předpjatou, lze největší důležitost přikládat stavu na mezi dekomprese, popř. na vzniku trhlin, neboť případná koroze předpínací výztuže vlivem průniku atmosférického kyslíku či chloridů z po-

sypových solí trhlkami by měla na fungování konstrukce jako celku zásadní vliv. Srovnání s deterministickým výpočtem rovněž ukazuje, že použití pravděpodobnostního výpočtu není v případě mezního stavu použitelnosti tolik konzervativní a poskytuje o něco vyšší hodnoty zatížitelnosti. Z toho je zřejmé, že použití plně pravděpodobnostních výpočtů poskytujících přesnější odhad zatížitelnosti může být, jako v tomto případě, mnohem výhodnější pro posuzování stavu konstrukcí, následných oprav či rozhodnutí o případné demolicí.

ZÁVĚR

Cílem předloženého příspěvku bylo nastínit problematiku stanovení zatížitelnosti stávajících mostů pozemních komunikací s ohledem na jejich aktuální stavební stav pomocí výpočetních nástrojů nelineární lomové mechaniky a s využitím pravděpodobnostních metod. Celá metodika byla aplikována při analýze stávající deskové mostní kon-

Ing. David Lehký, Ph.D.
e-mail: lehky.d@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 363



Ing. Martina Šomodíková
e-mail: somodikova.m@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 131



Ing. Jiří Doležel
e-mail: dolezel.j@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 131



Prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
e-mail: novak.d@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 360



všichni: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavební mechaniky
Veveří 331/95, 602 00 Brno
www.fce.vutbr.cz

Text článku byl posouzen odborným lektorem.