

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STAVEBNÍ



**POSUZOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI ŽELEZOBETONOVÉ
MOSTOVKY S OHLEDEM K PŮSOBENÍ CHLORIDŮ**

Autoreferát k doktorské disertační práci:

**RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE DECKS
WITH RESPECT TO INGRESS OF CHLORIDES**

Ing. Petr Konečný

Studijní program: P3607 Stavební inženýrství
Obor studia: 3607V025 Teorie konstrukcí
Školitel: Prof. Ing. Pavel Marek, DrSc.

Ostrava, 2007

Disertační práce byla vypracována v externí formě studia na:

Katedře stavební mechaniky
Fakulty stavební
VŠB-TU Ostrava

Předkladatel: Ing. Petr Konečný
Katedra stavební mechaniky,
Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava
Ludvíka Podéště 1875
708 33 Ostrava

Školitel: Prof. Ing. Pavel Marek, DrSc.
ÚTAM AV ČR, v.v.i., Praha
a
Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava

Oponenti: Prof. Ing. Robert Černý, DrSc.
Doc. Ing. Juraj Králik, PhD.
Paul J. Tikalsky, Ph.D., P.E., FACI

Autoreferát byl rozeslán dne:

Obhajoba disertační práce se koná dnev hodin
před komisí pro obhajobu disertační práce postgraduálního
doktorského studia v oboru 3607V025 Teorie konstrukcí v zasedací
místnosti děkana Fakulty stavební VŠB TU Ostrava.

S disertační prací se je možno seznámit na studijním oddělení Fakulty
stavební VŠB - TU Ostrava na L. Podéště 1875, 708 00.

© Petr Konečný, 2007
ISBN 978-80-248-1556-5

Anotace

Předložena práce je zaměřena na pravděpodobnostní posudek trvanlivosti železobetonových mostů vystavených působení chloridů. Jsou hledány možnosti využití simulačních nástrojů viz. SBRA (Simulation-Based Reliability Assessment) při rozboru trvanlivosti z hlediska vzniku koroze u mostovky s výztuží chráněnou epoxidovým povlakem. Typickým příkladem takových desek jsou mostovky realizované v některých oblastech U.S.A.

Trvanlivost sledovaných mostovek je vážně ohrožena rizikem koroze ocelové výztuže vzhledem k vystavení povrchu betonu přímému působení posypových solí. Je nutné sledovat efekt trhliny v železobetonové mostovce usnadňující průnik chloridů k výztuži poškozenou epoxidovou ochranou ocelové výztuže.

Při rozboru korozního procesu je uplatněno stochastické modelování zohledňující vstupní nahodile proměnné veličiny. Je užitá simulační metoda Monte Carlo a náhodně proměnné jsou vyjádřeny useknutými rozděleními.

Jako transformační model k určení odezvy na uvažované „zatížení“ chloridy slouží druhý Fickův zákon difuze. Odezva je vyjádřena koncentrací chloridů v nejexponovanějších místech výztuže (zejména v místech poruchy epoxidového povlaku), která je v posudku porovnána s tzv. chloridovým prahem“, což je koncentrace nutná pro započetí koroze. Statisticky je vyhodnocena pravděpodobnost vzniku koroze, která je porovnána s návrhovou pravděpodobností.

Stochastický model na bázi metody SBRA využívající jako transformační model MKP může významně posloužit ke studiu vlivu jednotlivých vstupních proměnných na trvanlivost z hlediska rizika vzniku koroze. Z výsledků práce vyplývá, že rozptyl vstupních parametrů významně ovlivňuje trvanlivost mostovky. Nejzávažnější uvažovanou veličinou je difuzní součinitel. Dále se ukazuje, že kvalitně provedená epoxidová ochrana výztuže pozitivně ovlivňuje trvanlivost železobetonové desky.

Annotation

The aim of the submitted work is to make a probabilistic durability assessment of concrete bridges affected by deicing agents applied to melt snow. The potential of the application simulation tools, see SBRA (Based Reliability Assessment method), is studied with respect to chloride ingress induced corrosion of bridge decks with epoxy-coated steel reinforcement. Representative slabs of this type are e.g. bridge decks in some parts of the U.S.

The durability of the investigated decks is severely threatened by the risk of corrosion because the concrete surface is directly exposed to deicing salts. It is necessary to study the effect of cracks in the reinforced bridge deck which are the most likely gate for chloride ions to enter flaws in epoxy-coating.

The stochastic approach is applied in the evaluation of the corrosion process in order to respect the inherent randomness of pertinent random input variables. The Monte Carlo simulation tool is applied with random variables described by bounded distributions.

Response to the considered “loading” by chlorides is computed using Fick’s second Law of diffusion. It is expressed by the concentration of chlorides in the most exposed location of the reinforcement (especially in the epoxy-coating defect). This concentration is compared in the assessment with the chloride threshold (amount of chlorides sufficient to start corrosion). The likelihood of corrosion initiation is statistically evaluated and compared with the target probability.

The stochastic model based on the SBRA method utilizes FEM as a transformation model and can significantly facilitate the study of the significance of input variables with respect to corrosion initiation. The results indicate that the variation in input parameters substantially affect durability of bridge deck. The most important variable is diffusion constant. The effect of epoxy-coated reinforcement improves durability under proper handling and construction practices.

Poděkování

Rád bych využil této příležitosti a vyjádřil svou vděčnost lidem, jejichž podpora, rady a vedení umožnily vypracování této práce. Nejvděčnější jsem mé ženě Nice, mé mamce a rodině, a to za neutuchající podporu a trpělivost v průběhu doktorských studií.

Také bych mile rád poděkoval panu profesoru Pavlu Markovi, který je mým školitelem. Roky spolupráce s ním pro mne byly poučné a věřím, že jsem se od něj mnoho přiučil. Profesor Marek byl vždy připraven diskutovat jak vědecké otázky tak sdílet roky získané zkušenosti. Jeho intenzivní podpora nás mladých inženýrů mi umožnila šířit ideu metody SBRA (Simulation-Based Reliability Assessment) a potkávat zajímavé osobnosti na národních i mezinárodních fórech.

Spolupráce profesora Marka s profesorem Paulem Tikalsky mi umožnila odbornou stáž na Pennsylvania State University. Profesor Tikalsky přišel s ideou využití metody SBRA na posudek spolehlivosti železobetonové mostovky s ohledem na vliv trhlin a poškození epoxidového povlaku výztuže, čímž mě inspiroval k aplikaci metody SBRA v této oblasti. Jsem vděčný za cenné rady získané v průběhu zajímavých konzultací.

Na PSU jsem se setkal s jeho doktorandem Davidem Tepke, kterému jsem pomáhal při práci na instrumentaci mostů budované dálnice I99. David mi umožnil v průběhu předlouhých diskuzí nahlédnout do oblasti trvanlivosti železobetonu s ohledem na korozi.

V neposlední řadě patří můj dík kolegům z VŠB-TU Ostrava, a to nejen z Fakulty stavební. Mé poděkování si zaslouží zejména Jiří Brožovský za obětavou pomoc při tvorbě MKP modelu, Pavlu Praksovi za podklady pro SBRA modul, Danovi Casten za korekci anglického jazyka. Dále pak děkuji Vítu Křivému, Antonínu Lokajovi, Vladimíře Michalcové, Miroslavu Mynařovi a Jakubu Valihrachovi.

Na závěr bych rád poděkoval odpovědným pracovníkům VŠB – TU Ostrava, Pennsylvania State University, Grantové agentury České Republiky, Pennsylvania Department of Transportation, Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy a Ministerstva dopravy ČR za finanční podporu výzkumu během mého doktorského studia.

Obsah

1. Úvod.....	7
1.1 Železobetonové mostovky	7
1.2 Vztah trhliny a epoxidové ochrany výztuže v ŽB desce	8
1.3 Posudek spolehlivosti mostovky	9
2. Cíle disertační práce.....	12
3. Rozsah disertační práce	12
4. Aplikace metody SBRA.....	13
4.1 Pravděpodobnostní přístup	13
4.2 Vstupy a náhodně proměnné.....	13
4.3 MKP Transformační model	16
4.4 SBRA modul pro ANSYS	17
4.5 Koncentrace chloridů v kritické lokalitě výztuže	17
4.6 Pravděpodobnost iniciace koroze	18
4.7 Návrhová pravděpodobnost	19
4.8 Citlivostní analýza	20
4.9 Posudek trvanlivosti.....	20
5. Výběr výsledků z parametrické studie.....	21
5.1 Vliv epoxidového povlaku.....	21
5.2 Vliv difuzního součinitele.....	22
6. Souhrn	24
6.1 Význam náhodně proměnných	24
6.2 SBRA modul	24
7. Závěry a doporučení pro další výzkum.....	25
Conclusions and Recommendations for Future Research	27
Reference	29
Další publikace autora vztahující se k problematice	36

1. Úvod

Spolehlivosti železobetonových konstrukcí je v mnoha případech ovlivněna časově závislými degradačními procesy díky kterým mnoho konstrukcí vyžaduje předčasnou rekonstrukci, či výměnu. Snížení životnosti vede obvykle k nárůstu celkových nákladů čímž dochází v případě mostních konstrukcí ke zvýšenému zatížení veřejných rozpočtů. Harmonie mezi náklady na pořízení a celkovými náklady stavby hraje důležitou roli. Je proto důležité budovat konstrukce mající dlouhou životnost, čehož lze dosáhnout vhodnou předpovědí degradačních mechanismů. Kvalitní odhad degradačních procesů umožní odborníkům lépe navrhovat železobetonové konstrukční systémy, tak aby byly dlouhodobě odolné vůči působení prostředí a zatížení.

Zakomponování trvanlivosti do veřejné infrastruktury nebo průmyslových oběktů vyžaduje pokročilé znalosti degradačních mechanismů, stavebních materiálů, posudku spolehlivosti, kontroly kvality a konstrukčních postupů. Přesto, že je zřejmá nutnost navrhovat konstrukce s dlouhou životností, nástroje a pomůcky k dosažení tohoto cíle jsou stále ve vývoji.

Dnes implementované a doporučené normy v Evropě a Spojených státech jsou bohužel obvykle ve své podstatě preskriptivní ([55], [58], [93] a [32]), a to navzdory snaze formulovat normy orientované na užitnost ([30], [3] či [2]). Tyto normy obvykle formulují spíše vhodné materiálové a konstrukční řešení, ale neuvádějí úroveň spolehlivosti či trvanlivost [93].

V inženýrské komunitě roste poptávka po funkčně orientovaném přístupu k návrhu stavebních konstrukcí, který by zohledňoval požadovanou úroveň spolehlivosti, životnost, optimalizaci celkových nákladů stavby a vlivů na životní prostředí. Pozornost je tedy upřena k relativně novému přístupu zvanému Performance-Based Design (volně přeloženo dle [88] jako posudek spolehlivosti s ohledem na užité vlastnosti, viz. např. [93], [34]). Performance-Based Design je spolu s rizikovým inženýrstvím, monitoringem částí tzv. integrovaného návrhu (viz. např. [22]).

Potřeba vývoje posudků spolehlivosti zaměřených na užité vlastnosti (performance) je doceněna rovněž Kongresem Spojených států, který označil otázku trvanlivosti mostů jako výzvu pro Strategic Highway Research Program (SHRP 2, [81]). Do tohoto programu je začleněn projekt nazvaný *Mosty s životností více než 100 let (Bridges for Service Life beyond 100 Years)*.

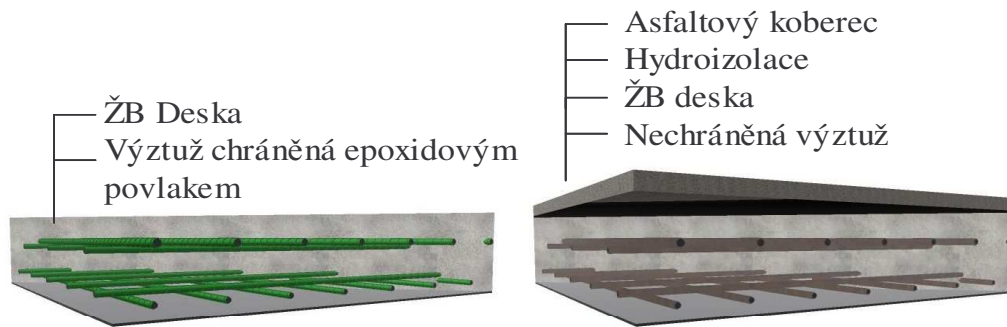
Projekt mj. volá po posudku spolehlivosti, který umožní zhodnotit úroveň spolehlivosti po celou dobu plánované životnosti s ohledem na vstupující náhodně proměnné veličiny, při využití dat dostupných z rozsáhlých experimentů.

1.1 Železobetonové mostovky

Trvanlivost železobetonových mostovek může být ovlivněna mnoha faktory, a to zásadami, kyselinami, opakovaným změnami vlhkosti, cyklickými změnami teplot, karbonatácí, působením chloridů, UV zářením, sulfidy, únavou a jinými vlivy včetně trhlin. Působení posypových solí, které pronikají skrz krytí k ocelové výztuži, vyvolává korozi výztuže a je jedním z nejvýznamějších faktorů snižujících životnost mostovek jak ve střední Evropě tak na severovýchodě USA. Chloridy vyvolaná koroze může způsobit pokles užitnosti konstrukce nejen s ohledem na použitelnost, ale i na únosnost, a ve svém důsledku může vézt ke zvýšeným nákladům životního cyklu mostu. Modely umožňující odhad průběhů

degradačních procesů mohou dát stavebním inženýrům nástroje pro vhodnější návrh a realizaci stavebních konstrukcí.

Zkušenost ukazuje, že nechráněná výztuž z měkké oceli vyžaduje kromě krytí betonem další ochranu. Odpovědí bylo oddělení výztuže od agresivního prostředí.



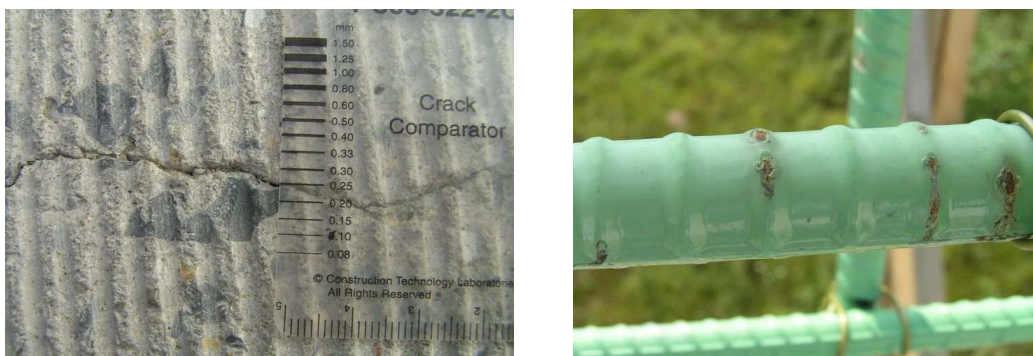
Obr. 1: Schéma ŽB mostovky s epoxidovou ochranou výztuže typické pro severovýchod USA (vlevo) a hydroizolací typickou pro střední Evropu (vpravo)

Severní Amerika přijala v širokém měřítku epoxidové ochranné povlaky ocelové výztuže zatímco ve střední Evropě je zabráněno pronikání chloridů za pomoci hydroizolací pod asfaltovým kobercem. Oba systémy oddálí počátek koroze, ale i přesto trpí v širokém měřítku předčasnou korozi výztuže (viz.Obr. 1).

Problémy se kterými se setkáváme jsou v zásadě podobné na celém světě. Disertační práce však obrací pozornost čtenáře k problematice trvanlivosti mostovek ze železobetonu s výztuží chráněnou epoxidovým povlakem.

1.2 Vztah trhliny a epoxidové ochrany výztuže v ŽB desce

Povrchová ochrana epoxidovou pryskyřicí (epoxy-coating) by měla chránit výztuž před přímým působením chloridových solí. Ochranný povlak výztuže může být ovšem poškozen, a toto poškození umožní chloridům depasivovat výztuž a připravit podmínky pro vznik koroze. Tato poškození jsou anglicky nazývány zjednodušeně „holidays“, tento termín bude užíván i v této práci. Je tedy nutné zvážit mj. náhodnou interakci koncentrace chloridových solí v blízkosti obnažených míst výztuže (holidays) ve vztahu k poloze trhliny v betonové konstrukci, neboť trhlina umožňuje snadnější pronikání agresivních látek.

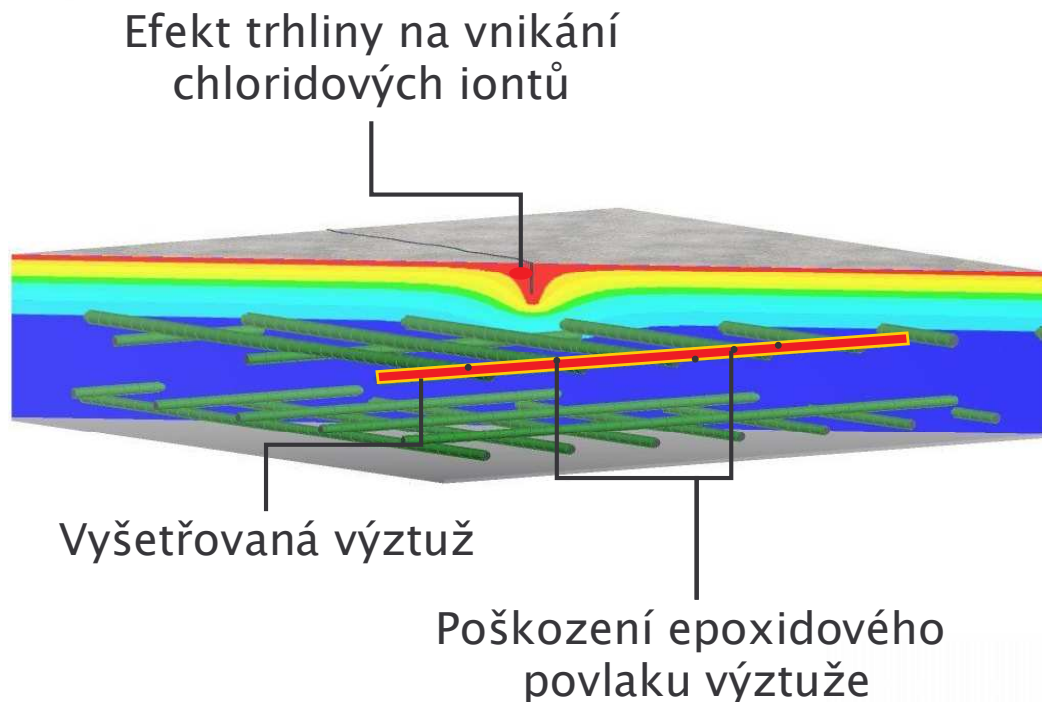


Obr. 2: Trhlina na nové mostovce, která byla zbroušena (vlevo) a poškozený epoxidový povlak výztuže (vpravo).

Jako mostovka bude v práci uvažována železobetonová deska spřažená s železobetonovými předpjatými nosníky. Deska obvykle přenáší tlakovou sílu, zatímco nosník tahovou (kromě případů, kdy je ŽB deska v oblasti negativních

momentů). Ocelová výztuž tedy převážně kontroluje rozvoj trhlin (frekvenci výskytu a šířku). Výztuž je chráněna proti působení agresivních látek za pomoci epoxidového povlaku.

Předčasná degradace mostovek je dominantně způsobena korozí vyvolanou působením vnikajících chloridových iontů. Vzhledem k dvojí roli mostovky, a to funkci nosné a funkci vozovky, je tato vystavena přímo působení posypových solí. Je tedy nutné zhodnotit vliv trhlin na vnikání chloridových iontů, neboť trhlina je velmi pravděpodobně vstupní branou pro chloridy. Ty pak mohou dosáhnout úrovně výztuže mnohem dříve.



Obr. 3: Vnikání chloridů do mostovky – vliv interakce trhliny a pozice poškození epoxidové ochrany výztuže (holiday).

Vyvstává zajímavá otázka, a to: „Jak ovlivňuje vztah trhlina vs. poškození epoxidového povlaku (holiday) pravděpodobnost vzniku koroze výztuže? Odpověď může být získána za pomoci stochastické „Performance-Based“ analýzy.

1.3 Posudek spolehlivosti mostovky

Práce se zaměřuje na konkrétní oblast spolehlivosti železobetonové mostovky, a to na trvanlivost s ohledem na depasivaci výztuže způsobenou chloridy. Období iniciace koroze končí depasivací výztuže mostovky, což je považováno za nežádoucí jev. Konstrukce přestává plnit požadovanou funkci, a je hodnocena v práci jako nespolehlivá, neboť začla korodovat. K vyhodnocení spolehlivosti je užito pravděpodobnostního přístupu, který umožňuje vyšetřit úroveň spolehlivosti formou pravděpodobnosti poruchy (pravděpodobnosti nežádoucího jevu - výskytu koroze) $P_{f,t}$ ve zvoleném čase t . Pravděpodobnost výskytu koroze je $P_{f,t}$ v posudku porovnána s návrhou pravděpodobností P_d .

Aby mohly být nalezeny odpovědi na předchozí otázky je nutno využít stochastickou analýzu trvanlivosti, přičemž bezpečnost, použitelnost a trvanlivost mostovky závisí na mnoha vzájemně provázaných podmínkách a činitelích.

Vzhledem k nutnosti splnit kritéria spolehlivosti u „panenské“ konstrukce ovlivňuje problematika koroze ocelové výztuže závažně spolehlivost mostovky. Úroveň spolehlivosti se mění s postupem degradačního procesu a dobou života železobetonové konstrukce. Je-li koroze vyvolaná vniknutím chloridů k ocelové výztuži uvažována jako dominantní parametr ovlivňující degradaci, lze tento proces s ohledem na korozi rozdělit do dvou období [103]:

$$t_{\text{service}} = t_{\text{initiation}} + t_{\text{propagation}} \quad /1/$$

kde je $t_{\text{initiation}}$ čas do vzniku koroze a $t_{\text{propagation}}$ odpovídá času do dosažení neúnosného stupně koroze železobetonové výztuže.

Úroveň spolehlivosti - užitnosti může být rovněž konzervativně vztažena k době do započetí koroze $t_{\text{initiation}}$ ([39], [100], [93] a [26]) jako je tomu v předmětné práci. Je možno uvažovat i další referenční kritéria jako: rozvoj trhlin, oprýskávání betonu, či pokles únosnosti v důsledku úbytku průřezové plochy [93].

Vážnost vnikání solí je posouzena za pomoci porovnání koncentrací chloridových iontů v předmětných místech poškozeného epoxidového povlaku $C_{xy,t}$ a chloridového prahu C_{th} . (koncentrace postačujících k započetí koroze, viz. např. [33]).

1.3.1 Degradační model

Koroze ocelové výztuže je primárně řízena difuzí chloridů. Vliv hydraulického tlaku a kapilární sorpce není v aplikovaném modelu zohledněn, neboť jej lze ve většině případů na mostovce zanedbat [35]. Postup pronikání chloridů betonem jako funkce hloubky a času lze modelovat za pomoci 2. Fickova zákona difuze, jak je běžně akceptováno ([35], [109], [100], [26], [59] a [60]). Řešení příslušné diferenciální rovnice, obvykle popisované jako Crankovo, je uvedeno v následujícím vztahu [24]:

$$C_{x,t} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_c t}} \right) \right] \quad /2/$$

kde je $C_{x,t}$ koncentrace rozpustitelných chloridových iontů (jako procento hmotnosti materiálů s cementačními schopnostmi) v čase t (roky) a hloubce x (metry). C_0 je koncentrace chloridů (% hmotnosti cementu atd.) v povrchové vrstvě betonu a D_c je tzv. „zjevný“ koeficient difuze (m^2/rok). Vztah /2/ je široce užívaným pro 1-D modelování pronikání chloridů, i když nepostihuje kombinovaný transport vody a chloridových iontů [21], a neumožňuje rovněž popisovat specifické okrajové podmínky nutné pro zohlednění vlivu trhliny.

Hodnota limitní koncentrace chloridů C_{th} závisí zejména na druhu a přípravě výztužných vložek a na složkách betonu. Typické hodnoty jsou 0.2 % hmotnosti chloridů v poměru k hmotnosti cementu dle ACI 222R-01 [3] a 0.4 % dle CEB [20]. Širší diskusi nad velikostí chloridového prahu uvádí [33].

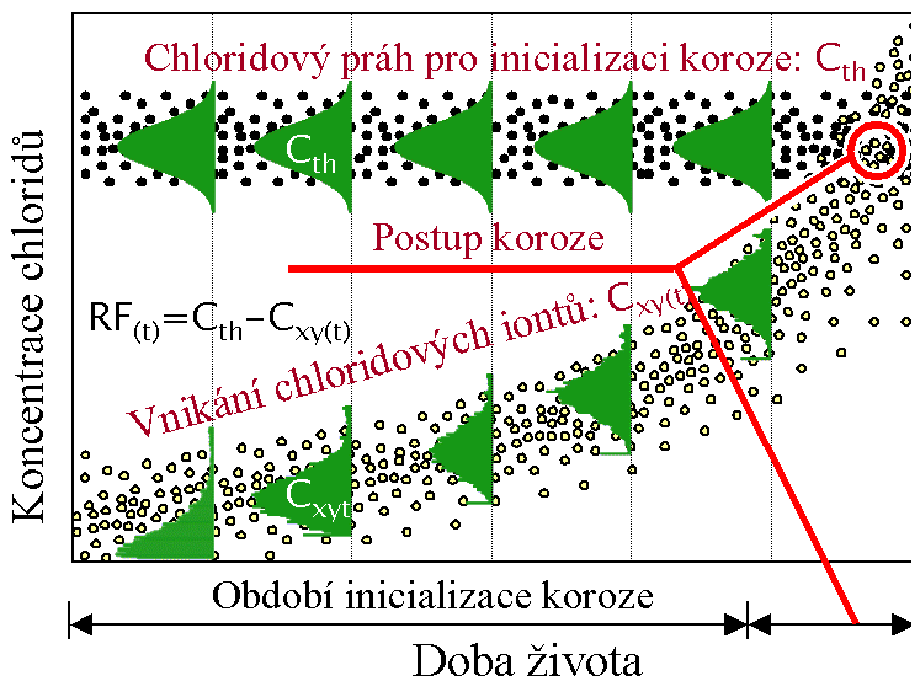
Chování mostovky je popsitelné s ohledem na iniciaci koroze funkcí spolehlivosti RF_t . Funkce spolehlivosti je vyjádřena jako časově závislé překročení korozního prahu C_{th} koncentrací chloridů $C_{xy,t}$, které je místně závislé na parametrech poškození povlaku výztuže a blízkostí trhliny:

$$RF_t = C_{th} - C_{xy,t}$$

1.3.2 Simulation-Based Reliability Assessment

Metoda SBRA by mohla být vhodná k aplikaci v oblasti stochastické analýzy degračních procesů. SBRA se rozvíjela od jednoduchých příkladů spolehlivosti konstrukčních prvků z hlediska bezpečnosti a použitelnosti, přes problematiku únavy ocelových konstrukcí, k problematice trvanlivosti. Návrh a posudek konstrukcí s ohledem na náhodně proměnné vstupní veličiny, který by umožňoval navrhovat objekty na vyrovnanou úroveň spolehlivosti je rovněž klíčovou součástí vývoje metody Simulation-Based Reliability Assessment (SBRA, viz. [55], [58]), a to od prvopočátku. Náhodně proměnné jsou v metodě SBRA charakterizovány pravděpodobnostní funkcí (obvykle useknutými histogramy), pravděpodobnost překročení vybraných referenčních hodnot je počítána s využitím simulačních nástrojů typu Monte Carlo a úroveň spolehlivosti je vyjádřena za pomoci porovnání pravděpodobnosti poruchy P_f s návrhovou pravděpodobností P_d . Požadované referenční kritéria a návrhové hodnoty mohou být ušity na míru konkrétnímu inženýrskému problému, tak aby odpovídaly účelu objektu, jeho umístění, očekávání klienta apod.

BRADÁČ, [17] uvedl metodu SBRA na pole posudků trvanlivosti železobetonových konstrukcí. TIKALSKY následně obohatil využití metody SBRA o oblast Performance-Based Design železobetonových konstrukcí ([100], [58], a [102]). Obohacení spočívá v analogii, jak mezi zatížením a působením agresivních cemikálií, tak mezi odolností a schopností vzdorovat agresivním látkám. Posypové soli představují zatížení chloridy, které pronikají do betonu v čase a koroze započne je-li dostatečné množství chloridových iontů, vlhkosti a kyslíku dostupné na úrovni výztuže.



Obr. 4: Idea pravděpodobnostní analýzy trvanlivosti s ohledem na chloridy vyvolanou korozi

Obr. 4 nastiňuje pravděpodobnostní koncepci iniciace koroze v čase. Stochastický posudek trvanlivosti si lze představit jako průsečík náhodně

proměnných realizací časově závislých funkcí koncentrace chloridů v nejexponovanějším místě výztuže $C_{xy,t}$ a kritické koncentrace chloridů nutné pro iniciaci koroze C_{th} . Jakmile pravděpodobnost vzniku koroze v kritických lokalitách výztuže překročí návrhovou pravděpodobnost poruchy $P_{d,t}$ (v závislosti na důležitosti konstrukce a čase) je předpokládáno, že riziko koroze je vážné. Konstrukce tedy nesplňuje performance kritérium $P(RF_t > 0) < P_{d,t}$.

Vzhledem k potřebě provádět 2D analýzu difuzního procesu s ohledem na interakci trhliny v mostovce a poškození ochrany výztuže je vhodné užití numerických výpočtů k provedení analýzy. Využití metody konečných prvků v rámci metody SBRA se postupně rozvíjí ([49], [50], [38], [62], [44], [76] a [47]) a jsou uvažovány následující možnosti: (a) nagenování náhodně proměnných ve statistickém software jako je Anthill [9] a provedení MKP analýzy v dalším programu ([49], [50], [62] a [44]), (b) provedení stochastické MKP úlohy ve specializovaném programu optimalizovaném pro konkrétní úlohu [38], (c) využití univerzálního MKP a doprogramování skriptů pro práci s histogramy ([62] a [44]).

2. Cíle disertační práce

Důraz je kladen na ověření možnosti využití metody SBRA [58] v oblasti trvanlivosti železobetonových konstrukcí se zaměřením na analýzu chování mostovky vystavené působení chloridů s ohledem na vznik koroze [100]. Práce se soustředí zejména na vytvoření pravděpodobnostního modelu pro odhad vzniku koroze železobetonové mostovky s využitím metody SBRA při uvážení vnikání chloridů a při zvážení náhodně proměnných vstupních parametrů.

Pro aplikaci metody SBRA je vybrána ŽB konstrukce s epoxidovým povlakem chránícím výztuž proti působení solí. Tyto mostovky se vyskytují v některých částech Severní Ameriky. Z hlediska pravděpodobnostního přístupu je s ohledem na vnikání chloridů k výztuži zajímavý zejména vliv náhodné interakce trhliny v mostovce a poškození epoxidového povlaku výztuže. Disertační práce se zaměřuje zejména na:

- Aplikaci stochastické analýzy s využitím metody SBRA na palčivý problém trvanlivosti železobetonových mostovek. Užité hodnota mostovky je hodnocena na základě pravděpodobnosti vzniku koroze.
- Vyhodnocení náhodně proměnných vstupních proměnných ovlivňujících trvanlivost ŽB mostovky s výztuží chráněnou epoxidovým povlakem, a to zejména s ohledem na vzdálenost trhlin a poškození epoxidové ochrany výztuže.
- Provedení citlivostní analýzy proměnných, které mají největší vliv na trvanlivost výztuže ve vztahu ke vzniku koroze.
- Vývoj programového nástroje umožňujícího kombinaci obecně dostupného FEM systému a metody SBRA.

3. Rozsah disertační práce

Práce obsahuje stručný úvod do posudku užítosti ŽB mostovky metodou SBRA s ohledem na trvanlivost železobetonu vystaveného působení posypových solí, což je proces veskrze stochastický. Podstata pravděpodobnostního přístupu je předvedena na 1-D problému koroze výztuže železobetonové mostovky vyvolané chloridovými ionty, jak byla popsána v práci [100]. Tato část není blíže popsána v autoreferátu.

Hlavní část práce se zabývá vyhodnocením pravděpodobnosti vzniku koroze na ŽB mostovce s trhlinami a epoxidovou ochranou výztuže, dále pak na mostovce s trhlinou a nechráněnou výztuží, a také na ideální ŽB mostovce bez trhlin a výztuži bez ochrany. Je popsán vytvořený 2D MKP model mostovky s trhlinou. Pravděpodobnostní vyhodnocení 2D modelu následuje po stručném popisu užití metody SBRA při aplikaci MKP systému ANSYS s ohledem na popis náhodně proměnných histogramy.

Důraz je kladen na pravděpodobnostní vyhodnocení vlivu pozice trhliny ve vztahu k poškození epoxidového povlaku výztuže s ohledem na vznik koroze. Jako zdroj dat slouží studie [84] založena na hodnocení 240 vývrtů ze 77 mostovek severovýchodu USA, a rovněž inženýrský odhad, v případech omezeného množství informací. Pravděpodobnostní posudek je rozdělen na dílčí části: *Vstupní parametry*, *Analýza metodou SBRA*, kde je procházen postup posudku vzniku koroze krok po kroku spolu s citlivostní analýzou, tato část je následována rovněž souhrnem.

Je zkoumána citlivost modelu na vstupní parametry. Jedná se zejména o vlivy difuzního součinitele, frekvence poškození ochrany výztuže, vzdálenosti trhlin a jejich hloubky s ohledem na trvanlivost mostovky vyjádřené za pomoci pravděpodobnosti vzniku koroze více do hloubky s rozbohem zjištění na závěr, a to před literaturou.

Přílohy obsahují popis 2D MKP makra popisujícího vnikání chloridů do ŽB mostovky s ohledem na interakci trhliny a poškození ochranného povlaku výztuže, který je následován popisem SBRA modulu pro generování proměnných popsatelných histogramy v rámci MKP systému ANSYS včetně odpovídajících maker pro ANSYS. Detaily popisovaných deterministických a stochastických výpočtů včetně vstupních maker pro ANSYS jsou uvedeny na DVD-ROM přiloženém k disertaci.

4. Aplikace metody SBRA

V autoreferátu je přisoupeno přímo ke zkoumání 2D problému difuze chloridů s ohledem náhodnou interakci trhliny a poškození epoxidového povlaku.

4.1 Pravděpodobnostní přístup

Pravděpodobnostní přístup je užit ke studiu citlivosti modelu na náhodně vstupní parametry, neboť počátek koroze závislý na koncentraci chloridů je silně ovlivněn náhodnou kombinací blízkosti trhliny a poškození epoxidového povlaku, a proto lze s výhodou užit pravděpodobnostní přístup. Úroveň spolehlivosti systému je odhadnuta za pomoci časově závislé pravděpodobnosti iniciace koroze, která je v posudku porovnána s návrhovou pravděpodobností. Následující příklad ilustruje užití metody SBRA na příkladě vyšetření úrovně spolehlivosti ŽB mostovky s trhlinou vystavené přímému působení chloridů, přičemž výztuž je proti působení korozivních činitelů chráněna epoxidovým povlakem.

4.2 Vstupy a náhodně proměnné

Stochastická povaha 2D difuzního pronikání chloridů je popsána s využitím metody SBRA užití již v [102] a [100] pro popis 1D difuze chloridů. Histogramy difuzního koeficientu a hloubky výztuže byly vytvořeny v návaznosti na [84].

V Tabulce 1 je uveden souhrn náhodně proměnných parametrů užitých v uvedeném příkladě. Náhodně proměnné jsou charakterizovány, jak histogramy, tak spojitými rozděleními. Podkladem pro histogramy difuzního koeficientu

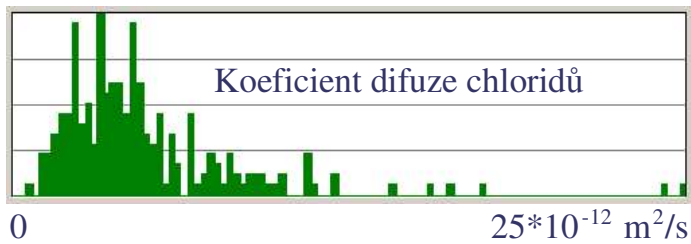
a hloubky výztuže uvedeným na Obr. 5 a Obr. 6 jsou data získaná z měření prostupů chloridů na konstrukcích vystavených provozu publikována v práci [84]. Histogram difuzního koeficientu je získán ze 120 vzorků získaných ze 40 mostů. Histogram krytí je získán z 240 vzorků získaných ze 80 mostovek. Rozdělení chloridového prahu bylo popsáno useknutým normálním rozdělením v rozsahu hodnot 0.2 – 0.4% (doporučovaných dle ACI a CEB). Popis distribuce poškození epoxidového povlaku výztuže, chloridového prahu a distribuce trhlin včetně jejich hloubky je založen na odhadu jejich chování. Rozptyl hloubky trhliny je odhadnut s využitím exponenciálního rozdělení s následujícími předpoklady. Maximální hloubka trhliny je rovna tloušťce ŽB desky. Šířka zkoumané desky je rovna jednomu metru. Další veličiny jsou uvažovány deterministicky.

Tabulka 1: Náhodně proměnné a deterministické vstupní parametry

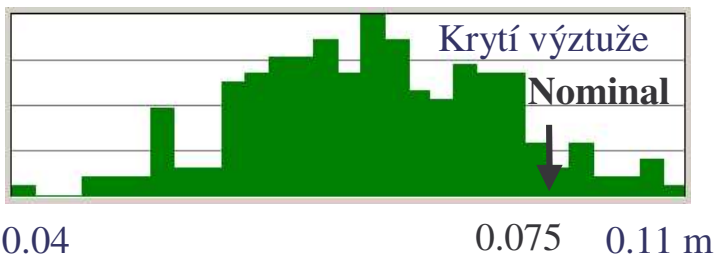
Parametr	Rozsah	Rozdělení pravděpodobnosti
Difuzní koeficient D_c [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]	0-25	Histogram
Hloubka výztuže (krytí) R_{ebd} [m]	0.04-0.11	Histogram
Frekvence defektu povlaku výztuže M_{ashn} [m^{-1}]	0-100	Rovnoměrné Rozdělení
Vzdálenost trhlin $Crck_s$ [m]	0.25-1.15	Normalní Rozdělení $N(0.75,0.15)**$
Hloubka trhliny $Crck_{dpt}$ [m]	0-Depth	Exponenciální Rozdělení*
Relativní pozice trhliny $Crack_i$	0-1	Rovnoměrné Rozdělení
Relativní vzd. defektu povlaku výztuže $Mash_i$	0-1	Rovnoměrné Rozdělení
Efektivní koncentrace chloridů u povrchu C_0 [%]	0.6	Konstanta
Chloridový práh pro počátek koroze C_{th} [%]	0.2-0.4	Normalní Rozdělení $N(0.3,1/3)**$
Koncentrace chloridů na pozadí C_b [%]	0.0	Konstanta
Hloubka mostovky $Depth$ [m]	0.23	Konstanta
Doba působení chloridů t [years]	100	Konstanta

* Rozdělení hloubky trhliny je reprezentováno exponenciálním rozdělením, které je charakterizováno průměrnou hodnotou 1, a směrodatnou odchylkou 1 při rozsahu $\langle 0;5 \rangle$. Násobení součinem $0.2 \times Depth$ vede k požadovaným hranicím histogramu mezi $\langle 0-Depth \rangle$.

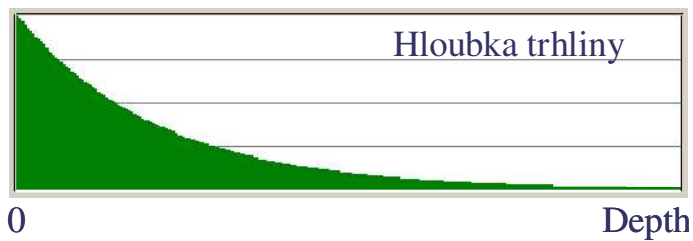
** Vzdálenost trhlin a chloridový práh jsou modelovány useknutým normálním rozdělením v rozsahu průměr ± 3 standardní odchylky.



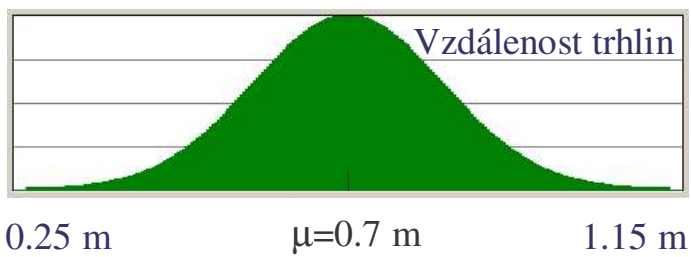
Obr. 5: Histogram difuzního koeficientu.



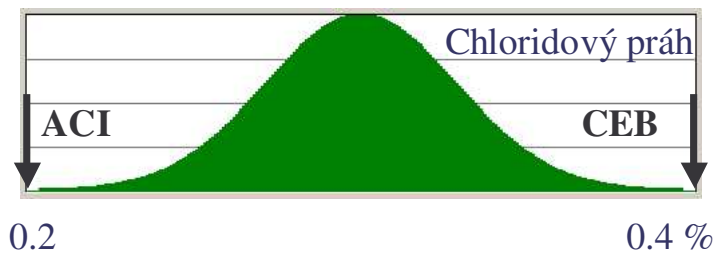
Obr. 6: Histogram hloubky výztuže.



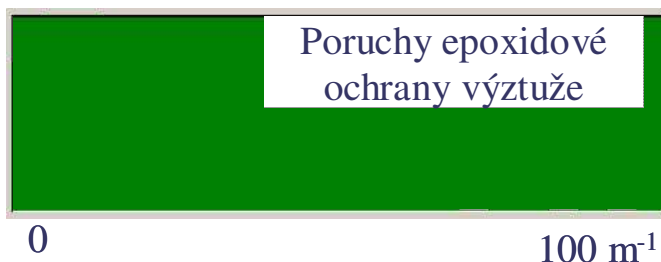
Obr. 7: Exponenciální rozdělení hloubky trhliny.



Obr. 8: Useknuté normální rozdělení vzdálenosti trhlin.



Obr. 9: Useknuté normální rozdělení chloridového práhu.

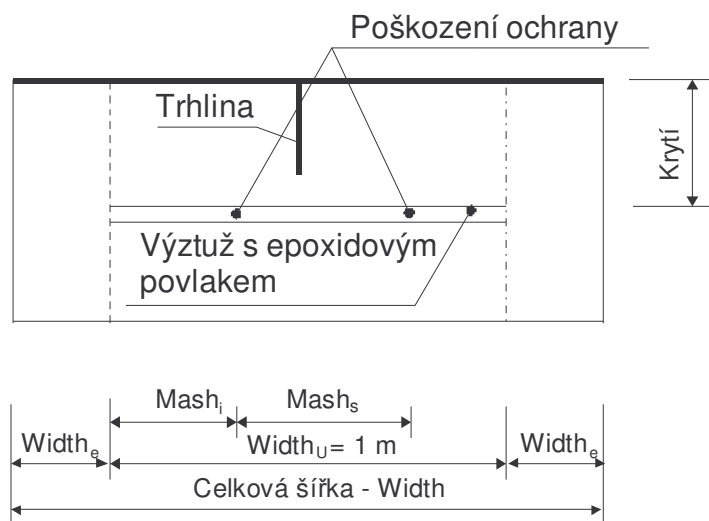


Obr. 10: Rovnoměrné rozdělení poruch v epoxidově ochraně výztuže.

4.3 MKP Transformační model

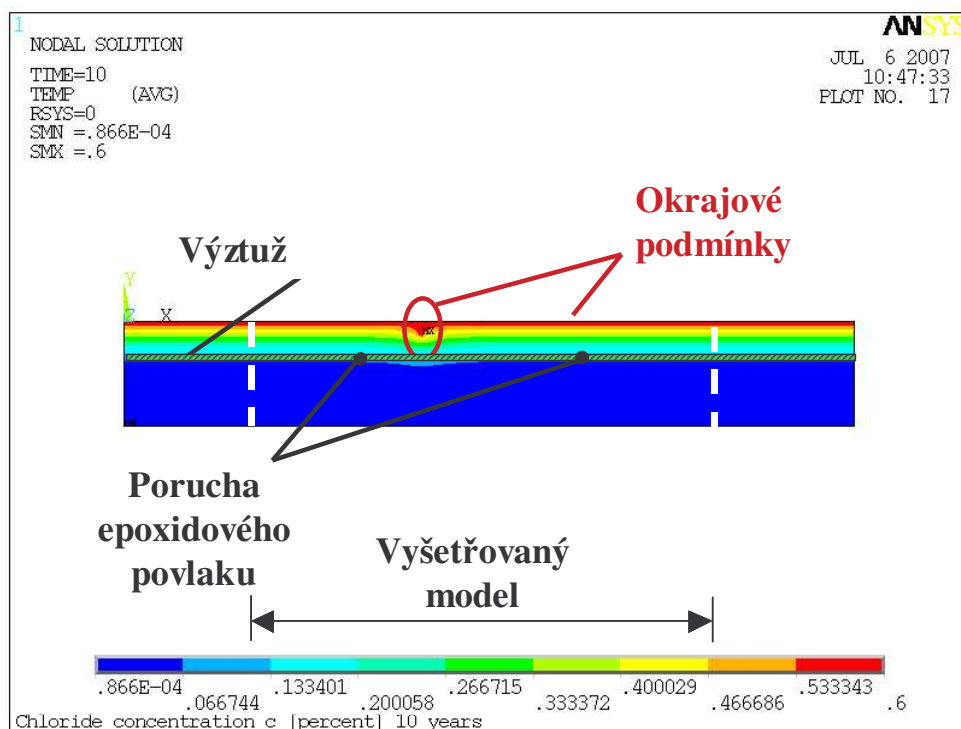
2D MKP model (viz. Obr. 11) založený na 2. Fickově zákoně difuze je vytvořen v systému ANSYS ve formě makra, a je zaměřen na iniciační období koroze, tedy období kdy je koncentrace chloridů v nejexponovanějších místech výztuže nižší než chloridový práh. Model podrobně popsán v disertační práci se zaměřuje na transport chloridových iontů železobetonovou mostovkou s příčnou trhlinou a na odhad koncentrace chloridů v místech poškození epoxidového povlaku ŽB výztuže.

Model umožní postihnout, jak efekt trhliny na vnikání chloridů k výztuži s epoxidovou ochranou, tak bez ní. Je rovněž schopen vypočítat koncentrace chloridů bez vlivu trhliny, což je prakticky 1D řešení. Model je vybaven okrají ($width_e$ na Obr. 11) proto aby nedošlo k ovlivnění výsledků výskytem trhliny na hranici vyšetřovaného modelu o šířce 1 m.



Obr. 11: Schéma ŽB desky s trhlinou, parametr Mash charakterizuje pozici defektů epoxidového povlaku.

MKP makro umožňuje opakovanou analýzu úlohy 2D difuze chloridů s náhodně generovanými vstupními parametry. V každém simulačním kroku je vytvořena síť konečných prvků. Na jednotlivé uzly jsou aplikovány okrajové podmínky. Dále je proveden výpočet koncentrace chloridů v celém průřezu pro sledovanou dobu zatížení chloridy (10, 20, ..., 50 let). Výstup z ANSYSu pro jeden simulační krok a 10 let služby konstrukce je uveden na následujícím obrázku, na kterém je rovněž ilustrační zobrazení výztuže.



Obr. 12: Koncentrace chloridů po v mostovce s trhlinou po desetileté expozici.

Z oblastí s poruchou ochranného povlaku epoxidové pryskyřice je vybráno místo s nejvyšší koncentrací chloridů. Tato koncentrace $C_{xy,t}$ je pak vybrána pro porovnání s chloridovým prahem C_{th} ve funkci spolehlivosti RF_t dle vztahu /4/.

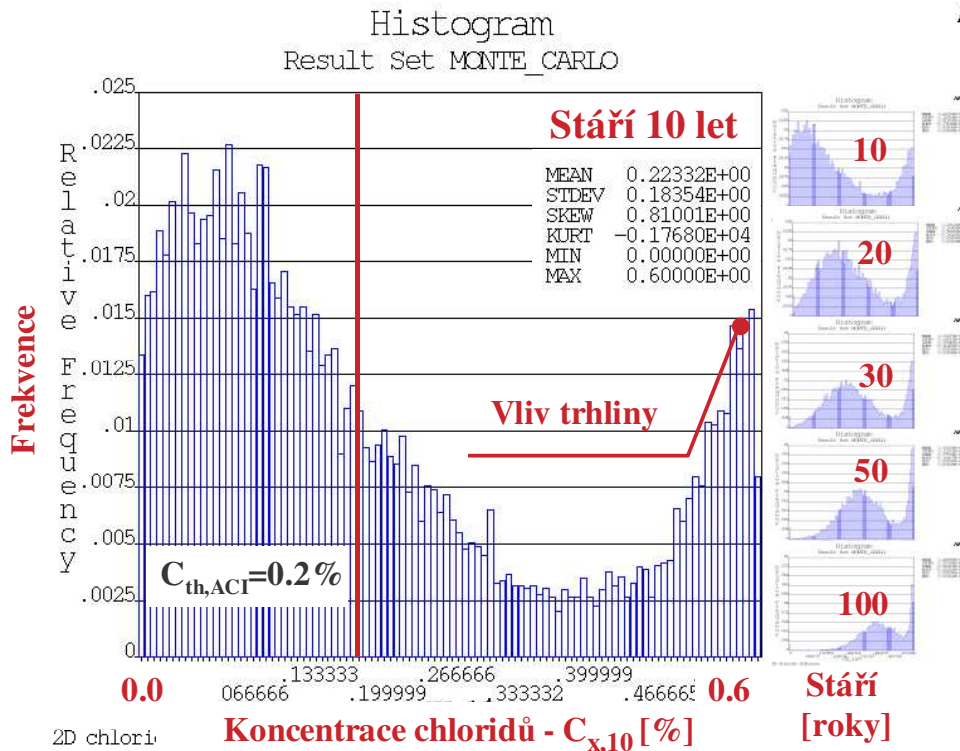
4.4 SBRA modul pro ANSYS

Stochastická analýza iniciace koroze ŽB desky je provedena přímou metodou Monte Carlo při charakterizaci náhodně proměnných jak useknutými histogramy dle [55] tak spojitými rozloženími pravděpodobnosti. Je užito prostředí programu ANSYS, kde je MKP úloha opakovaně řešena pro náhodně generované vstupy, přičemž generování náhodně proměnných dle histogramů řídí modul SBRA (viz. [47]). Je aplikováno 10 tisíců simulací Monte Carlo, což je dostatečné pro odhady pravděpodobností v řádech procent.

Simulace je využita zejména k získání rozdělení koncentrace chloridů v kritické lokalitě výztuže $C_{xy,t}$ a k analýze funkce spolehlivosti RF_t pro zvolené časové intervaly, tak aby bylo možno sestavit křivku pravděpodobnosti iniciace koroze v čase. Dále je možno zobrazit citlivostní analýzu pro zhodnocení vlivu jednotlivých parametrů.

4.5 Koncentrace chloridů v kritické lokalitě výztuže

Jedním z výstupů simulace Monte Carlo je histogram koncentrace chloridů. Histogram v nejexponovanější lokalitě výztuže (poblíž trhliny v betonu a v místě poruchy epoxidové ochrany) je pro 10 leté působení chloridů zobrazen na Obr. 13. Z histogramu je vidět, že v určitém počtu případů nedojde k průniku chloridů k výztuži vůbec (levý sloupec korespondující s koncentrací 0%), v mnoha případech dojde k úplnému nasycení chloridy (koncentrace 0.6 %), kdy působí vliv trhliny. Průměrná koncentrace chloridů je 0.22 %.



Obr. 13: Histogram koncentrace chloridů v kritické lokalitě výztuže $C_{xy,t}$ [%] pro 10 let působení chloridů (vlevo), náhledy zobrazují dobu expozice 10, 20, 30, 50 a 100 let.

Na obrázku jsou vpravo umístěny náhledy umožňující sledovat nárůst koncentrace chloridů v čase (těžiště histogramu se přesouvá vpravo k maximální koncentraci).

4.6 Pravděpodobnost iniciace koroze

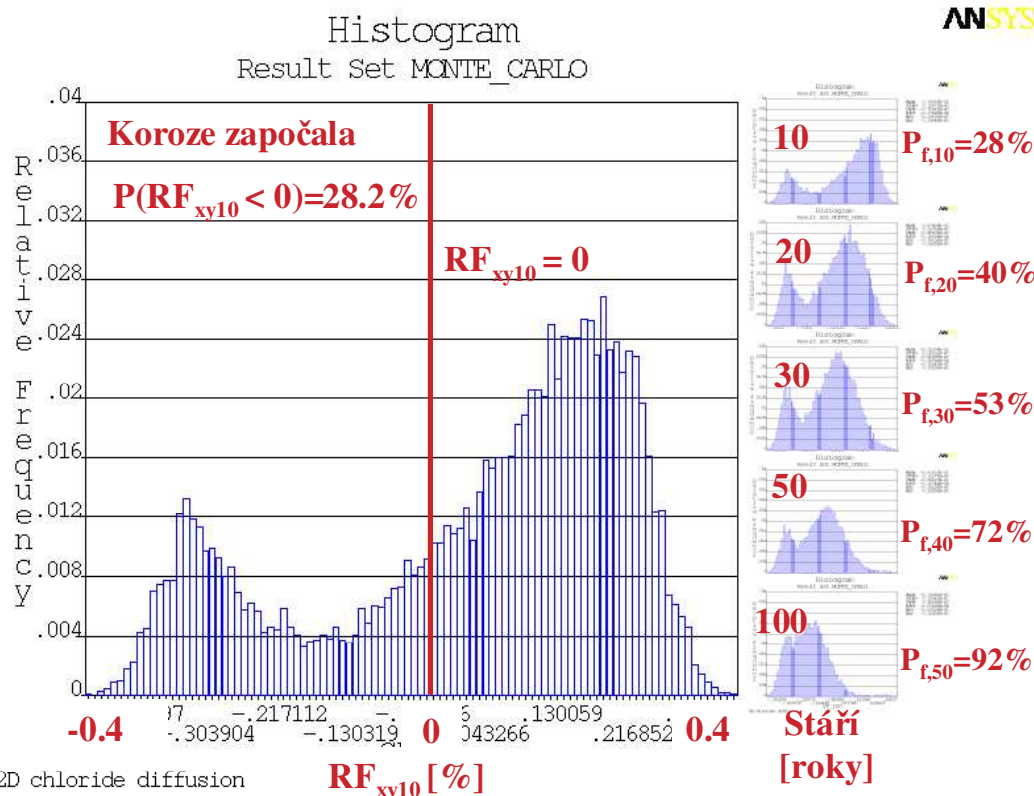
Úroveň spolehlivosti ocelové výztuže s ohledem na počátek koroze je vyjádřena za pomoci pravděpodobnosti iniciace koroze $P_{f,t}$. Ta vyjadřuje pravděpodobnost započetí koroze ocelové ŽB výztuže pro zvolené stáří konstrukce.

Stochastická analýza funkce RF_t , která je provedena ve zvolených časových intervalech (pro různé stáří konstrukce), vede k odhadu pravděpodobnosti iniciace koroze $P_{f,t}$ (pravděpodobnosti překročení zvolené referenční hodnoty):

$$P_{f,t} = P(RF_t < 0) = P(C_{th} - C_{xy,t} < 0) \quad /4/$$

kde $C_{xy,t}$ je koncentrace chloridů v nejexponovanější lokalitě výztuže (v místě poruchy epoxidového povlaku v blízkosti trhliny), C_{th} je chloridový práh (koncentrace chloridů nutná pro započetí koroze).

Pravděpodobnost iniciace koroze je v případě desetiletého působení chloridů, je $P_{f,10} = 22.8\%$, jak může být patrné z Obr. 14 – histogramu funkce spolehlivosti RF_{10} . Tuto hodnotu je třeba brát s rezervou, neboť je poplatná zvoleným předpokladům a zjednodušením odpovídajícím komplexnosti analyzovaného problému. Svou vypovídací hodnotu získá při porovnání s hodnotami pravděpodobnosti vzniku koroze získané analýzou dalších alternativních řešení.



Obr. 14: Histogram funkce spolehlivosti $RF_t [\%]$ pro 10 let působení chloridů (vlevo), náhledy zobrazují dobu expozice 10, 20, 30, 50 a 100 let.

Na náhledech předchozího obrázku je možno sledovat pokles spolehlivosti – přesun těžiště histogramu do oblasti koroze v čase. Dále je možno sledovat pokles vlivu trhliny na pronikání chloridových iontů k poruše epoxidového povlaku výztuže, neboť se s narůstající expozicí chloridů stírá rozdíl mezi dvěma vrcholy histogramu. Levý vrchol histogramu představuje poruchu povlaku v blízkosti špičky trhliny v betonu, zatímco pravý vrchol histogramu představuje dobrou funkci ochranného systému (porucha povlaku je od trhliny v betonu dále než od povrchu).

4.7 Návrhová pravděpodobnost

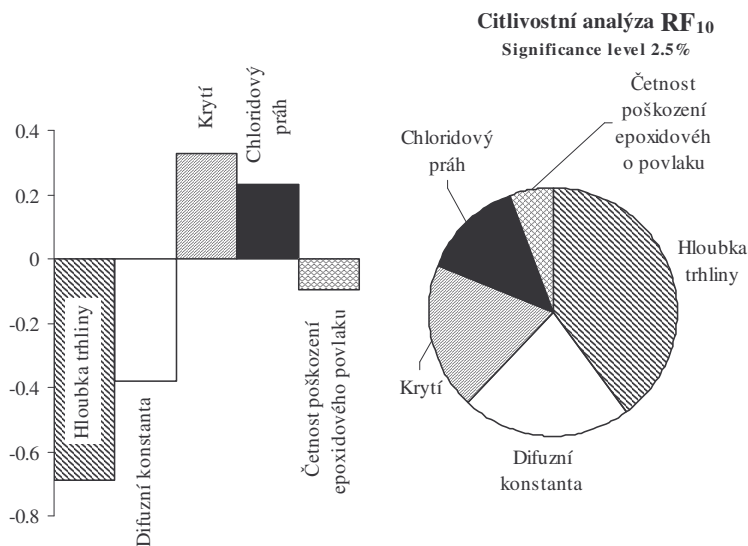
Zatímco je návrhová pravděpodobnost porušení P_d pro posudek bezpečnosti v řádech 10^{-5} a pro posudek použitelnosti v řádech 10^{-2} , pro oblasti posudku trvanlivosti a dalších specifických vlastností může být dle [96] P_d i v řádech procent. TEPLÝ v [93] srovnává iniciaci koroze s mezním stavem použitelnosti a $P_{d,50} = 7\%$. TIKALSKY ve [100] uvádí pro posudek pravděpodobnosti iniciace koroze P_d v rozsahu mezi 25 pro životnost 50 let a 50% pro životnost 100 let. Za akceptovatelné riziko vzniku koroze budiž v práci zvoleno splnění následujícího kritéria:

$$P_{f,t} < P_{d,100} = 50\% \quad /5/$$

Je-li pravděpodobnost iniciace koroze po 10 leté aplikaci posypových solí $P_{f10} = 28.2\%$, což by bylo vyšší než $P_{d,50} = 50\%$ pak by bylo akceptovatelné. Na zvoleném příkladě je naznačena možnost posudku spolehlivosti s ohledem na vznik koroze. Nutno podotknout, že návrhová pravděpodobnost poruchy P_d je do značné míry závislá na intenzitě korozního procesu. Pro případ rychlého vyčerpání rezervy spolehlivosti by bylo vhodné zvolit přísnější návrhovou pravděpodobnost.

4.8 Citlivostní analýza

Dalším velmi cenným výstupem je citlivostní analýza, která je pro funkci spolehlivosti RF_{10} zobrazena na Obr. 15. Z analýzy vyplývá, že model je nejcitlivější na hloubku trhliny, difuzní koeficient, hloubku krytí, chloridový práh, a frekvenci poškození epoxidového povlaku. Riziko vzniku koroze je přímo úměrné hloubce trhliny, velikosti difuzní konstanty a četnosti holidays (viz. záporný index součinitele korelace na Obr. 14 vlevo). Naopak velikost krytí a chloridového práhu ovlivňují korozi nepřímo.



Obr. 15: Citlivostní analýza funkce spolehlivosti RF_t pro 10 let působení chloridů.

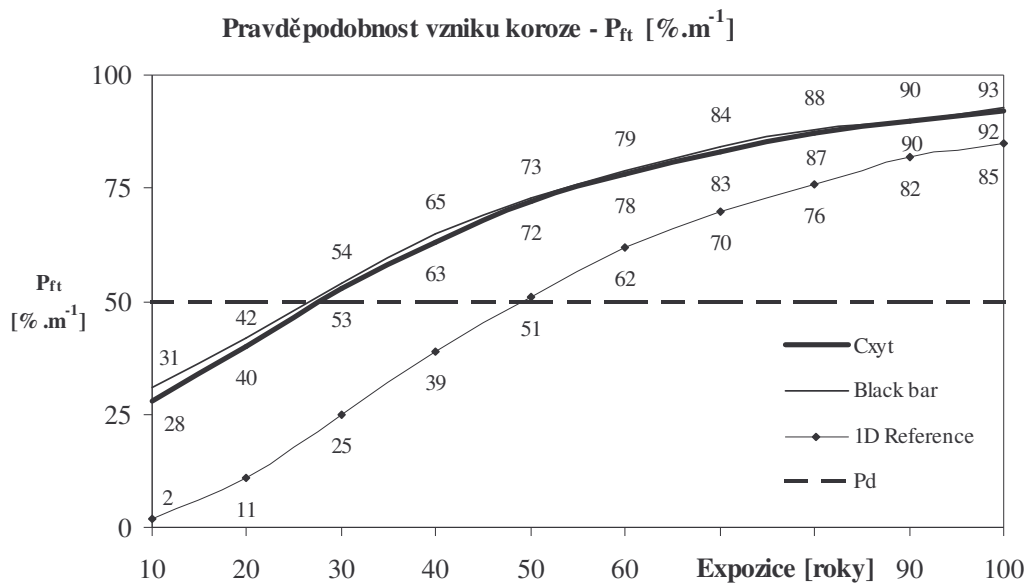
4.9 Posudek trvanlivosti

Pravděpodobnosti poruchy lze vypočítat ve zvolených časech expozice posypovými solemi, jak bylo ukázáno na příkladě funkce spolehlivosti RF . úroveň spolehlivosti je pak analyzována ve zvolených intervalech po 10 letech, až do stáří 100 let.

Klíčovou částí posudku spolehlivosti je porovnání vypočtené pravděpodobnosti vzniku koroze $P_{f,t}$ a návrhové pravděpodobnosti P_d . Výsledky pravděpodobnostní analýzy jsou uvedeny na Obr. 16. Na grafu jsou kromě ŽB mostovky s trhlinou a epoxidovou ochranou výztuže (značeno - C_{xyt}), uvedeny i výsledky vyšetření rozšířeného o hodnocení vlivu trhlin na nechráněnou ocelovou výztuž (Black bar), a analýzy koroze bez uvažování vlivu trhlin na nechráněnou výztuž (Reference).

Graf zobrazuje vývoj spolehlivosti ŽB mostovky v čase s ohledem na riziko vzniku koroze. Je možno odečíst, že návrhová pravděpodobnost poruchy bude pro mostovku s trhlinou překročena v závěru třetí dekády provozu. Ideální mostovka by vyhovovala cca 50 let.

Z grafu je rovněž patrné, že pro zvolené zadání je rozdíl mezi výztuží chráněnou epoxidem a nechráněnou epoxidem minimální, což je dáno vysokou frekvencí výskytu poruch epoxidového povlaku v uvažovaném příkladě inspirovaném daty z [84]. Výsledky naznačují, že je vhodné věnovat pozornost dohledu a zpracování epoxidového povlaku, tak aby mohl být potenciál epoxidové ochrany výztuže využit pro zvýšení trvanlivosti.



Obr. 16: Porovnání časově závislé pravděpodobnosti započítí koroze $P_{f,t}$ [%] a návrhové pravděpodobnosti P_d [%] pro ŽB mostovku vystavenou působení chloridů, Mostovka strhlinou a epoxidovou ochranou výztuže (C_{xyt}), mostovka s trhlinou a nechráněná ocelová výztuž (Black bar), mostovka bez trhliny a nechráněná výztuž (ID-Reference).

5. Výběr výsledků z parametrické studie

V této části je uveden výběr z grafů prezentovaných disertační práci v kapitole *Parametrická studie*. Je zde zhodnocen vliv poškození epoxidového povlaku a difuzního součinitele, přičemž za základ je užito lehce upravené zadání diskutované v předchozí části. Zadání je upraveno o drobnou změnu rozdělení vzdálenosti trhlin na Normální(1,0,3), tak aby se úloha lépe parametrizovala. Změna výrazně neovlivní výsledky, jak vyplývá z citlivostní analýzy.

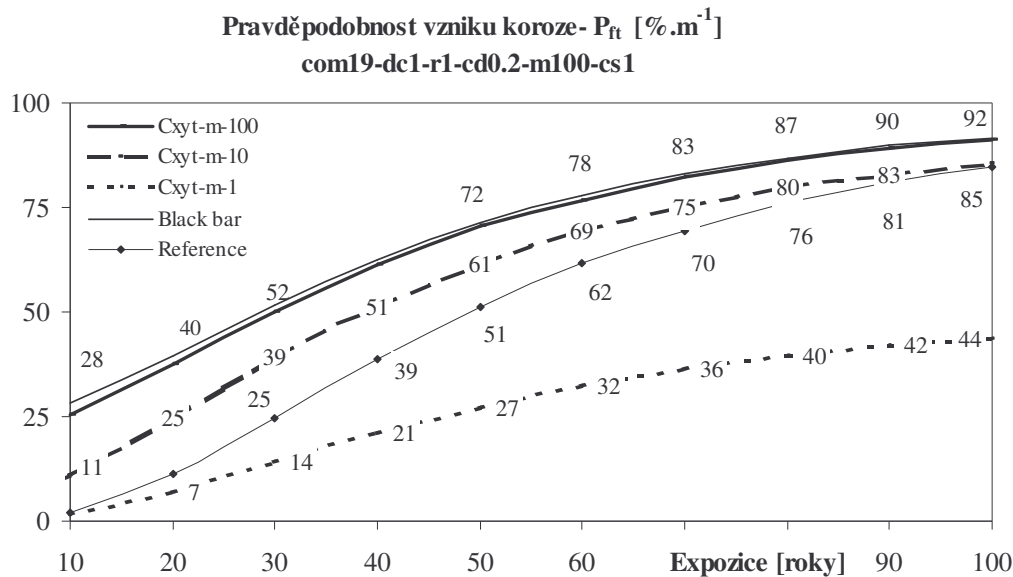
5.1 Vliv epoxidového povlaku

Na následujícím grafu (Obr. 17) je naznačen význam epoxidového povlaku. Jsou hodnoceny tři rozsahy frekvence poškození epoxidového povlaku.

Na Obr. 17 je možno vidět řešení pro mostovku s trhlinami a výztuží chráněnou epoxidovým povlakem (tučné křivky), a to pro tři různé varianty maxim počtu poruch ochrany výztuže. Je uvažováno rovnoměrné rozdělení, kde je až 100 poruch na metr výztuže ($m=100$, viz. [84]). Varianta kde je počet poruch limitován na maximálně 10 na jednem metr výztuže ($m=10$), a varianta, kde holiday buď je nebo není ($m=1$). Dále je zde opět varianta s nechráněnou výztuží na kterou působí vliv trhliny (Black bar – tenká křivka). Křivka se čtvercovou značkou reprezentuje variantu 1D (Reference).

Je možno vidět, že při max. 100 poruchách epoxidového povlaku je pravděpodobnost vzniku koroze téměř stejná jako u nechráněné výztuže. Další alternativa ukazuje, že dojde-li k redukci poruch desetkrát (max 10 poruch na běžný metr), je patrný pokles pravděpodobnosti vzniku trhliny v rozsahu 16 až 8 procent. Rozdíl je patrnější v počátečních dekádách. Další desetinásbná redukce poruch povlaku už dává slušnou redukci rizika vzniku koroze, kdy nedojde

dokonce k překročení 50 % rizika vzniku koroze a chování epoxidového povlaku je lepší než v případě běžné výztuže u ŽB desky bez trhlin. Je patrné, že stav epoxidového povlaku výrazně ovlivňuje životnost mostovky.



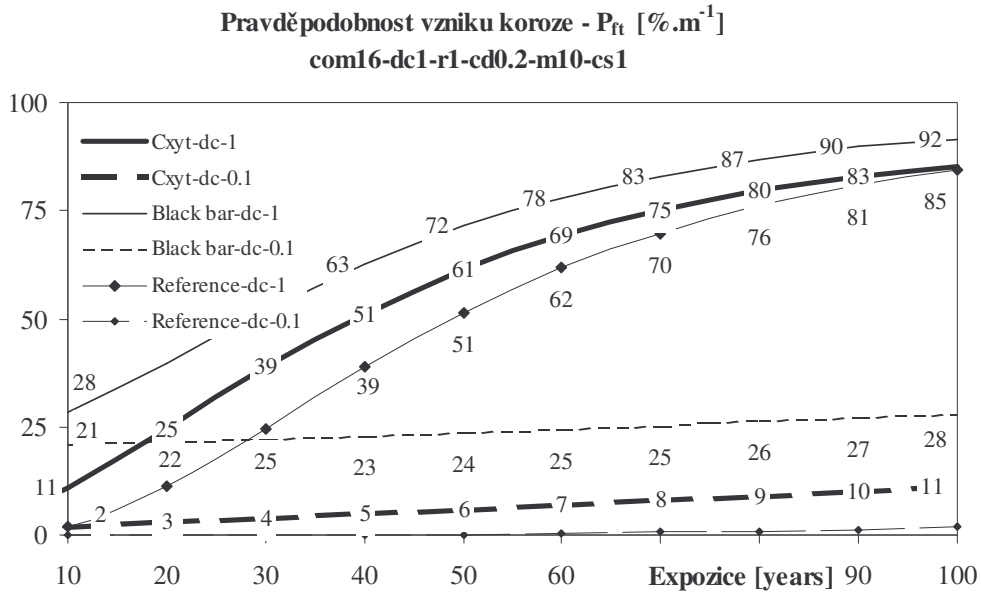
Obr. 17: Efekt frekvence poruch epoxidového podkladu na pravděpodobnost započítání koroze $P_{f,t}$ [%] pro ŽB mostovku vystavené působení chloridů. Varianty: Epoxidový povlak a vliv trhliny (C_{xyt} : Maximální hodnoty hranic rozdělení frekvence poruch povlaku jsou 1, 10 a 100 [m^{-1}]), nechráněná výztuž a vliv thlin (Black bar), a 1-D MKP (Reference).

5.2 Vliv difuzního součinitele

Nejdůležitějším parametrem je difuzní součinitel, který reprezentuje materiálové charakteristiky betonu. Následující příklad ukazuje vliv použití běžného betonu reprezentovaného daty dle [84] (označeno $dc = 1$) ve vztahu k užití vysokohodnotného betonu s příměsími poléťavého popílu, křemičitého úletu. Příměsi popílků a mikrosiliky jsou modelovány změnou rozsahu histogramu difuzního součinitele. Maximum je redukováno desetkrát, tak aby rozdělení odpovídalo zjištěním studie [15]. Tato studie uvádí, že se difuzní součinitel u 15 mostů postavených z vysokohodnotného betonu pohyboval v rozsahu 0.1×10^{-12} to $2.4 \times 10^{-12} [m^2/s]$ [15]. Tato alternativa je označena jako $dc = 0.1$. Porovnání na následujícím grafu umožňuje zhodnotit kvalitativní rozdíl mezi vysokohodnotným a běžným betonem.

Graf na Obr. 18 je založen na výsledcích předchozího příkladu přičemž frekvence poruch epoxidového povlaku je v rozpětí $<0;10> [m^{-1}]$. Graf rovněž zobrazuje chování nechráněné výztuže vystavené vlivu trhlin, a referenční 1D výsledek.

Snížení rizika vzniku koroze je výrazné. Pravděpodobnost vzniku koroze nechráněné výztuže při uvažování vlivu trhlin nepřekročí 25 procent po dobu 70 let. Pravděpodobnost vzniku koroze pro chráněnou výztuž je pod 12 procenty po celou sledovanou dobu života. Vliv snížení propustnosti betonu tedy hraje podle zjištění studie výraznější roli než vzdálenost trhlin a další parametry.



Obr. 18: Efekt difuzního součinitele na pravděpodobnost započetí koroze $P_{f,t}$ [%] pro ŽB mostovku vystavené působení chloridů. Epoxidový povlak a vliv trhliny (C_{xyt}), nechráněná výztuž a vliv thlin (Black bar), a 1-D MKP (Reference). Varianty: běžný beton $dc=1$ a vysokohodnotný beton $dc=0.1$.

6. Souhrn

V práci je studována aplikace metody Simulation-Based Reliability Assessment (SBRA, MAREK et. al., [55], [58]) na stochastickou analýzu chování/performance ŽB mostovky s ohledem na pravděpodobnost vzniku chloridy vyvolané koroze. Výzkum se zabývá typickou ŽB deskou s ocelovou výztuží chráněnou epoxidovým povlakem proti vlivům chloridů z posypových solí. Typickým příkladem jsou mostovky severovýchodu Spojených států. Je studována zejména náhodná interakce vlivu trhliny v betonu s poškozením epoxidového povlaku. Je užit 2D model difuze na bázi MKP. Práce navazuje na 1D případ diskutovaný v [100]. Chování mostovky je modelováno za pomoci druhého Fickova zákona difuze. Model je založen na využití metody SBRA v kombinaci s MKP programem ANSYS. Data jsou založena jak na vzorcích z reálných konstrukcí, tak na inženýrském odhadu. Užítost je vyjádřena za pomoci pravděpodobnosti vzniku koroze při zohlednění náhodných parametrů (difuzní koeficient, krytí betonu, chloridový práh pro iniciaci koroze, frekvence poškození epoxidového povlaku a jejich vzdálenosti k trhlíně). Úroveň spolehlivosti systému je odhadnuta za pomoci časově závislé pravděpodobnosti iniciace koroze, která je v posudku porovnána s návrhovou pravděpodobností.

6.1 Význam náhodně proměnných

Analýza obsahující data naměřená z 240 vývrtů na 77 mostovkách států Pennsylvania a New York [84] ukazuje důležitost jednotlivých parametrů studovaného problému. Přičemž difuzní koeficient je bezesporu parametr nejdůležitější. Je tedy žádoucí používat vysokohodnotý beton s vysokým odporem proti vnikání chloridů.

Studie rovněž ukazuje, že epoxidový povlak pomáhá chránit výztuž proti vzniku koroze v případě výskytu trhlín, pokud je počet poruch povlaku v mezích 0-10 na běžný metr výztuže. Při vyšším počtu problému epoxidového povlaku popisovaného v [84] se pak chová chráněná výztuž podobně jako nechráněná, a jeho funkce je diskutabilní.

Model naznačuje, že zvýšení vzdálenosti trhlín v betonu na víc jak jeden metr snižuje riziko vzniku koroze u nechráněné výztuže výrazněji než u výztuže chráněné epoxidovým povlakem. Je to do značné míry způsobeno přijatými předpoklady. Model totiž přechází v 1D řešení a chloridy postupují pouze ve svislém směru. Pokud ve sledovaném úseku dojde ke vzniku koroze alespoň na jednom místě, pak je toto považováno za vznik koroze. Model dále bohužel nerozlišuje stupeň koroze, kdy je patrné, že u výztuže nechráněné vůbec bude koroze probíhat na mnohem větší ploše.

Velký význam má rovněž hloubka krytí. Krytí však hraje dvojí roli, a to jednak ochranu výztuže před pronikáním chloridů, kdy větší krytí zajišťuje delší dráhu pro chloridy, ale zároveň vzdálenost výztuže od povrchu ovlivňuje vznik trhlín. Z hlediska omezení vzniku trhlín je pak žádoucí větší počet výztuží o menším průřezu blíže k povrchu. V disertaci je použito rozdělení krytí dle [84].

6.2 SBRA modul

SBRA modul je vytvořen proto, aby mohly být zkombinovány možnosti univerzálního MKP systému ANSYS [8] a popis náhodně proměnných usekнутými histogramy. Monte Carlo analýza je prováděna v pravděpodobnostním

modulu ANSYSu (ANSYS PDS), ke kterému je připojen SBRA modul popisující náhodně proměnné 2D modelu difuze chloridů dle histogramu.

Práce představuje další krok k rozšíření možností inženýrského posudku spolehlivosti metodou SBRA na stále komplikovanější úlohy, a to od prvních krůčků [55], přes početné ukázky možných aplikací [58], k dnešnímu stochastickému MKP v rámci metody SBRA či Performance-Based analýze. Zakomponování MKP do možností metody SBRA navazuje rovněž na následující práce ([49], [50], [38], [62], [76] a [43]).

Navrhovaný přístup umožňuje generovat náhodně proměnné, řešit MKP problém a vyhodnotit výsledky s využitím pouze jednoho programu, což je vykoupeno vyšší výpočetní náročností pro zpracovávání skriptů popisujících jak MKP úlohu, tak SBRA modul.

SBRA modul je úspěšně otestován na příkladě 2D problému difuze chloridů, což je úloha s tisíci stupni volnosti, kde jsou sledované pravděpodobnosti v řádech procent. V tomto případě stačí využít tisíce simulačních kroků místo milionů u posudku únosnosti bezpečnosti.

7. Závěry a doporučení pro další výzkum

Koroze vyvolaná chloridy je důležitý problém železobetonových mostovek, který zasluhuje pozornost. Nahodilost studovaného problému zejména s ohledem na kvalitu betonu, přesnost výroby a vlivy prostředí je výrazná, a to je třeba ji vzít na vědomí. Simulation-Based Reliability Assessment se jeví jako vhodná metoda pro stochastickou analýzu trvanlivosti. SBRA rovněž může sloužit jak nástroj pro odhad pravděpodobnosti poruchy v případě tzv. Integrovaných návrhů konstrukcí s ohledem na definovaná kritéria.

Práce má posloužit k prohloubení možnosti předpovědi degradačních procesů železobetonových mostovek s ohledem na působení chloridů. Je reakcí na rostoucí potřebu navrhovat trvanlivé konstrukce, tak aby bylo možno redukovat náklady veřejných rozpočtů, náklady na údržbu, provozní výluky, zátěž životního prostředí. Diskutovaný posudek užitnosti mostovky s ohledem na korozi vyvolanou působením chloridů naznačuje možnosti získané využíváním sofistikovaných spolehlivostních přístupů. Výzkum oceňuje možnosti simulačních nástrojů v oblasti posudku trvanlivosti s ohledem na nahodilost vstupních parametrů. Pravděpodobnostní posudek užitnosti železobetonové mostovky s výztuží chráněnou epoxidem s ohledem na korozi způsobenou vnikáním chloridů rovněž mívá do jednoho z cílů projektu *SHRP 2* (2007), jehož cílem je návrh mostů na stoletou životnost.

Práce umožňuje získat představu o stochastickém posudku spolehlivosti železobetonové mostovky s využitím metody SBRA. Výsledky ukazují že propustnost chloridů betonem je jednou z nejvýraznějších proměnných ovlivňujících trvanlivost mostovky s ohledem na korozi vyvolanou chloridy. Ukazují rovněž na hodnotu epoxidové ochrany výztuže, přičemž je nutno podotknout, že je nutno bedlivě sledovat kvalitu povlaku a dodržovat konstrukční zásady, tak aby mohl být potenciál epoxidové ochrany využit, a nedocházelo k problémům s četností popisovanou v [84].

Součástí práce je vytvoření 2D modelu difuze chloridů, který se snaží zohlednit vliv trhlin na korozi výztuže s epoxidovou ochranou. Model také umožňuje porovnat získané výsledky se situací kdy se vliv trhliny projeví na nechráněné výztuži, nebo se situací bez vlivu trhliny.

Kombinace metody SBRA a komerčního MKP systému umožňuje opakovat 2D problém v rámci simulace Monte Carlo při charakterizaci vybraných náhodně proměnných za pomoci histogramů. Je nutno připustit, že výpočetní náročnost zvoleného řešení je značná, a že řešení 10000 simulačních kroků trvá dny. Toto je akceptovatelné v případě cílových pravděpodobností v řádu procent, ale neuspokojivé pro náročné posudky bezpečnosti. Aplikaci zvoleného přístupu kombinace SBRA Modulu a ANSYSu pro takové případy je nutno modifikovat či zvážit.

Je třeba zdůraznit, že u vyhodnocení vypočtených pravděpodobností poruchy je na místě opatrnost. V diskutovaném příkladě vypočtené pravděpodobnosti představují míru spolehlivosti, ne však skutečnou pravděpodobnost výskytu sledovaného jevu. Je to dáno velkým počtem předpokladů a zjednodušení v důsledku komplexnosti studovaného problému. Tato hodnota ovšem velmi dobře poslouží při porovnání alternativních materiálových a konstrukční řešení jak je ukázáno v *Parametrické studii*.

Model mostovky by mohl být výrazně vylepšen zakomponováním chování mladého betonu (tepelná roztažnost, smršťování a dotvarování) s ohledem na vznik trhlin, jejich frekvenci a hloubku, což může pomoci ve zhodnocení protichůdné role krytí.

Rovněž období vývoje koroze by bylo cenným obohacením modelu, vzhledem k omezení modelu na období iniciace, čímž by bylo možno zhodnotit pokles únosnosti s ohledem na úbytek průřezové plochy výztuže. Modelování fáze rozvoje koroze přidá modelu nový rozměr, a to zejména s ohledem na možnost vrátit zpět do hry posudku spolehlivosti fyzické zatížení.

Vylepšení popisu náhodně proměnných je rovněž podstatné pro další rozvoj, zejména s ohledem na frekvenci poškození epoxidového povlaku výztuže, hloubku trhlin a jejich frekvenci. Jako podklad pro popis náhodně proměnných může sloužit probíhající výzkumný projekt na Pennsylvania State University, kde jsou sbírána data z konstrukce dálnice I99. Porovnáním těchto dat s daty ze [84] lze porovnat chování moderních mostovek s mostovkami budovanými před 15, 20 lety.

Diskutovaný model může rovněž sloužit v kombinaci s doplněnými statistickými podklady jako podklad k nomogramů pro praktické inženýry, usnadňujícím odhady životnosti mostovek s ohledem na pravděpodobnost vzniku koroze ve vztahu ke zvoleným parametrům a úrovni spolehlivosti.

Pro náročné posudky bezpečnosti je vhodné se vzhledem k velké časové náročnosti zvoleného řešení poohlédnout po sofistikovanějším simulačním nástroji s ohledem na vysokou výpočetní a tedy časovou náročnost těchto úloh danou kombinací MKP systému ANSYS a přímé Monte Carlo simulaci. Efektivní by mohlo být rovněž naprogramování zvolené MKP úlohy ve formě knihovny, kterou je možno napojit na spolehlivostní programový balík typu Monte [114] či Freet [67] (www.freet.cz).

Výzkum v oblasti stochastické analýzy trvanlivosti železobetonových mostovek je cenný a zasluhuje další pozornost zejména s ohledem na důležitost dobré predikce degradačních procesů, které umožní inženýrům lépe navrhovat betonové konstrukce a systémy s ohledem na dlouhodobé působení prostředí a zatížení.

Conclusions and Recommendations for Future Research

Chloride induced corrosion is an important issue that reduces the service life of of bridge decks. Its vast variability due to variability in concrete quality, manufacturing precision and environmental properties is remarkable and should be taken into account. Simulation-Based Reliability Assessment is a suitable tool for stochastic durability analysis evaluation giving engineer an idea of risk of corrosion initiation development in time. It can also serve as a bridge between theory of reliability and so called Integrated design serving as a tool for computation of probabilities of exceeding of specific performance criterion.

The thesis may help in better prediction of deterioration of concrete from reinforced concrete with regards to chloride ion ingress addressing the growing demand for desire to design long lasting structures in order to optimize the public costs, maintenance requirements, functional interruptions, natural resources, and environmental sustainability. The indicated road map to performance assessment of the bridge deck with respect to chloride ingress induced degradation process shows the value of improving the models with a modern reliability approach. It indicates the possibilities of simulation technique to address the durability issues with respect to randomness of input parameters. The bridge deck performance assessment with respect to chloride induced corrosion and thus durability is conducted using probabilistic approach addressing that way also one of goals of the *SHRP 2 Request for Proposals* (2007) for bridges with service life beyond 100 years on the example of typical bridge deck from reinforced concrete in the northeastern United States.

The work gives an idea of stochastic reliability assessment of a typical bridge deck in northeastern United States using SBRA method. The results show that penetrability of chlorides through concrete is one of the most significant variables governing durability of bridge deck with respect to chloride induced corrosion. The study indicates the value of epoxy-coated reinforcement but calls for the improvement of handling and construction practices in order to reduce the number of holidays comparing to state indicated by (SOHANGHPURWALA et al., 1998).

The research brings the 2-D FEM chloride diffusion tool that tries to consider the interaction of the crack effect on the corrosion of reinforcement with holiday in epoxy-coating . It also allows to compare obtained results to situation with crack above black bar and to assessment of black bar without crack influence.

Combination of SBRA Module and a commercial FEM package allowed to repeat the 2-D diffusion problem within Monte Carlo simulation with characterization of selected random variables by bounded histograms. The computational demand for this task is quite high. It takes days for 10 000 simulation steps. That is acceptable for the probabilities in order of percent not for demanding safety assessments. It is worth to consider applied combination of SBRA Module and ANSYS and direct Monte Carlo simulation in case of safety assessment.

The performance assessments allow for quantifying the level of reliability for particular age but, care must be taken however when using the probability quantitatively. It should be noted that the resulting probability does not reflect "real life" likelihood that certain performance is not met. In the discussed case of corrosion initiation, the vast amount of assumptions and simplifications made, and lack of overall scientific understanding of many complex and inter-related governing phenomena could not address the exact corrosion initiation likelihood.

Quantitative application would require extensive model calibration. It, however, can be used quite effectively in the qualitative sense to compare possible structural and materials-related scenarios as shown in section 5 of the thesis called *Parametric Study*.

The discussed bridge deck model would be enhanced considerably by the incorporation of the early age stage (thermal effects, shrinkage, creep) especially with the modelling of the crack spacing and the depth. It can help to address contradictory role of the concrete cover. Comparison of the reliability of the bridge deck from the Northeastern U.S.A. with bridge deck from the Central Europe would be also very helpful. The discussed topic needs more attention in the future as well due to its importance and complex nature.

Since the model is limited to the estimation of the corrosion initiation risk assessment only, it would be valuable to enhance the model capabilities by including the propagation phase of corrosion in order to evaluate also effect on the reduction of the carrying capacity due to the corrosion progress. Modelling of the propagation phase adds to a model new level especially the possibility of the safety assessment with respect to the reduced resistance due to a corrosion bringing the structural loading back to game. This stage would bring along new challenges.

Better characterization of random input variables is of particular interest, especially holiday frequency, crack depth, crack spacing. Ongoing research projects such as “High Performance Concrete” PennDOT project at Pennsylvania Transportation Institute at Pennsylvania State University can be used to furnish valuable statistical distributions from data collected during the construction process of the full scale bridges built on the freeway I99 close to State College, PA. The bridge deck performance based on the data from (SOHANGHPURWALA et al., 1998) would be comparable with state-of-the-art one. Comparison with behaviour of the typical Central European bridge deck model would be also very interesting.

Since there is available model that can evaluate the random interaction of parameters affecting the bridge deck durability with respect to corrosion initiation, the future research should be also aimed in formation of nomograms for practicing engineers that would inform about the estimated lifespan for specified input parameters and acceptable probability of corrosion initiation.

The other possibility to bring a model closer to the field is to implement stand-alone program that would perform statistic analysis as well as FEM solution yielding information about bridge deck performance with respect to corrosion initiation.

The research in the area of reliability of RC bridge deck is valuable and deserves further attention especially due to the importance of long-lasting structures that can help to optimize the public costs, maintenance requirements, functional interruptions, natural resources, and environmental sustainability.

Reference

- [1] AARSTEIN, F., RINDAROY, O. E., LIODDEN, O., JENSSEN, B. W. (1998). "Effect of Coatings on Chloride Penetration into Offshore Concrete Structures." *Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading*, vol. 2, E & FN, London, 1998, pp. 921-929.
- [2] ACI Committee 201 (2001). *Guide to Durable Concrete*. ACI 201.2R-01, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 41.
- [3] ACI Committee 222 (2001). *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. ACI 222R-01, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 41.
- [4] ACI Committee 224 (2001). *Control of Cracking in Concrete Structures*. ACI 224R-01, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 46.
- [5] ACI Committee 318 (2002). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. ACI 318-02, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 445.
- [6] AITCIN, P. (2005). *Vysokohodnotný beton (High-performance Concrete)*, ČKAIT, Prague, ISBN 80-86769-39-9, (In Czech).
- [7] ALISA, M., ANDRADE, C., GEHLEN, C., RODRIGUES, J., VOGELS, R. (1999). "Modelling of Degradation", *European Union – Brite Euram*, 1998-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R0.
- [8] Ansys 10.0 Release Documentation (2005). <<http://www.ansys.com>>.
- [9] Anthill for Windows 2.5 (2005). available on line: <<http://www.sbra-anthill.com>>.
- [10] BAKKER, R.F.M. (1985). "Diffusion Within and Into Concrete." Proceedings of the 13th Annual Convention of the Institute of Concrete Technology, Loughborough, Scotland, pp. 1-21.
- [11] BEEBY, A. W. (1983). "Cracking, Cover, and Corrosion of Reinforcement." *Concrete International*, February 1983, pp. 35-40.
- [12] BENJAMIN, S. E., SYKES, J. M. (1990). "Chloride-Induced Pitting Corrosion of Swedish Iron in Ordinary Portland Cement Mortars and Alkaline Solutions: The Effect of Temperature." *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, SCI, Elsevier, London, 1990, pp. 59-64.
- [13] BENTUR, A., DIAMOND, S., BERKE., N.S. (1997). *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*, E & FN SPON, London, pp. 158.
- [14] BENTZ, E. and THOMAS, M. D. A. (2001). "Life-365 Service Life Prediction Model", Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Silica Fume Association.
- [15] BLESZYNSKI, R.; HOOTON, D. R.; THOMAS, M. D.A.; AND ROGERS, C. A. (2002). „Durability of Ternary Blend Concrete with Silica Fume, and Blast-Furnace Slag: Laboratory and Outdoor Exposure Site Studies,“ *ACI Materials Journal* Vol. 99, No. 5, September-October, p. 499-508.
- [16] BODDY, A., BENTZ, E., THOMAS, M. D. A. And HOOTON, R.D. (1999). "An overview and sensitivity study of a multi- mechanistic chloride transport model." *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 827-837.
- [17] BRADÁČ, J. and MAREK, P. (1999). Application of Simulation-based Reliability Assessment, SBRA, for Lifetime Prediction of Concrete Structures. Proceedings: 8th *International Conference on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, RILEM, Bratislava, July 1999. (in English).

- [18] BRADÁČ (2000). Využití metody SBRA pro předpověď doby životnosti betonové konstrukce, Application of SBRA method in prediction of concrete structure lifetime). Proceedings: *Spolehlivost konstrukcí. Rozvoj koncepcí posudku spolehlivosti stavebních konstrukcí*. Ostrava, 15.-16.3.2000, page 59-64, Dům techniky Ostrava, s.r.o., Czech Republic. ISBN: 80-02-01344-1. (in Czech).
- [19] BROOMFIELD, J. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E & FN SPON, London, 1997.
- [20] CEB (2004). *Design Guide for Durable Concrete Structures*, Thomas Telford Publishers, 2004, ISBN 0-7277-1620-4.
- [21] ČERNÝ, R., PAVLÍK, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. (2004). Experimental Analysis of Coupled Water and Chloride Transport in Cement Mortar, *Cement and Concrete Composites*, 2004, vol. 26, no. 6, s. 705-715. ISSN 0958-9465.
- [22] CIDEAS *Centrum integrovaného návrhu progresivních stavebních konstrukcí (Center for Integrated Design of Advanced Structures)*, available online at <<http://www.cideas.cz>>.
- [23] CLEAR, K. C. (1976). "Time-To-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, Volume 3: Performance After 830 Daily Salt Applications (FHWA-RD-76-70)." *Federal Highway Administration Interim Report*, 1976.
- [24] COLLEPARDI, M., MARCIALIS, A., and TURRIZUANI, R. (1972). "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes," *Journal of American Ceramic Research Society*, V55, No. 10, pp 534-535.
- [25] COSTA, A. APPLETON, J. (1999). Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment – Part II: Prediction of Long Term Chloride Penetration. *Material and Structures*, 1999, vol. 32, pp. 354-359.
- [26] DAIGLE, L., LOUNIS, Z., CUSSON, D. (2004). "Numerical Prediction of Early-Age Cracking and Corrosion in High Performance Concrete Bridges – Case Study", downloaded: August 22, 2006 *available on-line*: <<http://www.tac-atc.ca/english/pdf/conf2004/Daigle.pdf>>.
- [27] DUBROVSKÝ, P. (2003). Často se vyskytující závady na silničních mostních objektech (Frequently Occurring Defects of Highway Bridges), In proceedings of *XIII. mezinárodní symposium SANACE 2003*, pp. 172-179, May 2003, Brno, downloaded: June 30, 2006, available on-line: <http://www.ssbk.cz/www/data/ssbk2003_4.pdf>.
- [28] EN 1990 (2003). Eurocode: Zásady navrhování konstrukcí (Basis of structural design), ČNI, (in Czech).
- [29] EN 1991-1-1 (2002). Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1 General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings, CEN, Brussels.
- [30] EN206 –1 (2000). Concrete. Specification, performance, production and conformity, CEN, Brussels.
- [31] ENV 1992-1-1 (2002). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part1: General Rules and Rules for Buildings, CEN, Brussels.
- [32] GALAMBOS, T. V. (2006). Structural Design Codes: The Bridge Between research and Practice. In *Report of IABSE symposium on „Responding to Tomorrow’s Challenges in Structural Engineering”*, Book of extended abstracts, September 13-15, 2006, Budapest, Hungary, 2006., pp. 2-12. ISBN 3-85748-114-5.
- [33] GLASS, G.K. and BUENFELD, N.R. (1997). "Chloride Threshold Levels for Corrosion Induced Deterioration of Steel in Concrete". In "*Chloride Penetration into Concrete*": St-Remy-les-Chevreuses, France, October 15-

- 18, 1995. *Proc. of the RILEM Intl. Workshop*, pp. 429-452.
- [34] HÁJEK, P., TEPLÝ, B. A KRÍSTEK, V. (2002). Trvale udržitelný rozvoj a betonové konstrukce (Sustainable Development and Concrete Structures, In Beton TKS, No. 4, pp. 40-42, (in Czech).
- [35] HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A., STANISH, K. (2001). *Prediction of Chloride Penetration in Concrete*. Federal Highway Administration Publication, FHWARD-00-142, October 2001.
- [36] ISO 2394 General principles on reliability for structures, ISO 1998.
- [37] JONES, M. R., MCCARTHY, M. J., DHIR, R. K. (1993). "Chloride Resistant Concrete." *Concrete 2000: Economic and Durable Construction through Excellence*, London 1993, pp. 1429-1444.
- [38] KALA (2003). Section 24.4. Reliability of a steel frame computed by stochastic FEM, In Marek et. al., 2003.
- [39] KERŠNER, Z., NOVÁK, D., TEPLÝ, B., BOHDANECKÝ, V. (1996). "Karbonatace betonu, koroze výztuže a životnost chladící věže (Concrete Carbonation, Reinforcing Steel Corrosion and Cooling Tower Durability), *Sanace*, No. 4, pp. 21-23, (in Czech).
- [40] KIRKPATRICK, T., J. (2001). *Impact of Specification Changes on Chloride Induced Corrosion Service Life of Virginia Bridge Decks*, Master thesis at Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.
- [41] KMEŤ, S. (2005). Hodnoty návrhovej pravdepodobnosti P_{fd} (Values of the Design Probability of Failure P_{fd}), In Proceedings of VI.TH national conference Spolehlivost konstrukcí, 6. 4. 2005, Ostrava, DT Ostrava, ISBN 80-02-01708-0, (In Slovak).
- [42] KOBAYASHI, KAZUSUKE, SHUTTOH, KEIZOH (1991). "Oxygen Diffusivity of Various Cementitious Materials." *Cement and Concrete Research*, vol. 21, 1991, pp. 273-284.
- [43] KONEČNÝ, P. (2001). Application of two-component wind rosette. Example is included in the textbook MAREK et. al. (2001 and 2003).
- [44] KONEČNÝ, P. (2005). "Využití metody konečných prvků při posudku spolehlivosti metodou," dissertation outline, FAST VŠB-TU Ostrava, Ostrava.
- [45] KONEČNÝ P., TIKALSKY, P. J., TEPKE, D. G. (2006). Performance Assessment of Concrete Bridges applying SBRA approach. In *Report of IABSE symposium on „Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering”*, Book of extended abstracts and CD-ROM, September 13-15, 2006, Budapest, Hungary, 2006. paper #A-0230, pp. 404-405. ISBN 3-85748-114-5.
- [46] KONEČNÝ P., TIKALSKY, P. J., TEPKE, D. G. (2007). Performance Assessment of a Concrete Bridge Deck Applying Simulation-Based Reliability Assessment and Finite Element Modelling with regards to Chloride Ingress. Presented at *Transportation Research Board Annual Meeting 2007*, Washington, DC, USA, (Accepted for TRB journal).
- [47] KONEČNÝ, P., MAREK, P. (2006). Aplikace metody SBRA v rámci univerzálního MKP software, In *Sborník vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, Řada stavební*, No. 1, 2006, ročník VI., ISBN: 80-248-1248-7.
- [48] KOROUŠ, J. A MAREK, P. (2002). Trvanlivost a plán inspekcí ocelového dílce vystaveného korozi. (Durability and plan of inspections of steel component exposed to corrosion). Journal: *Stavebni obzor 2002/6*, ČVUT Praha. (in Czech).
- [49] KRÁLIK, J., VARGA, T. (2004). Pravděpodobnostná analýza združeného rámu ocelového rámu za požiaru (Probabilistic Analysis of Steel Frame with Fire Situation). In proceedings of V.th conference „Spolehlivost

- konstrukcí (Reliability of Structures)*“, DT Ostrava, 24. 3. 2004. ISBN 80-248-0573-1.
- [50] KRÁLIK, J., VARGA, T. (2005). “Pravděpodobnostná a deterministická analýza požiarnej odolnosti združeného ocelového rámu v systéme Anthill a ANSYS (Probabilistic Analysis of Steel Frame with Fire Situation Considered using Anthill and ANSYS)”, In proceedings of VI.th conference „Spolehlivost konstrukcí“, DT Ostrava, 6. 4. 2005. ISBN 80-02-01708-0.
- [51] KRIVÝ, V., VÁCLAVEK, L., MAREK, P., VALIHRACH, J. (2006). *Probabilistic Reliability Assessment of Structural Systems in the Computer Era*, In Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology. Stirlingshire: Civil-Comp Press, paper#187, 2006. ISBN 1-905088-08-6.
- [52] KURGAN, G., J. (2003). *Comparison of Chloride Penetrability, Porosity, and Resistivity for High Performance Concrete*, Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, State College, PA, U.S.A.
- [53] LOGAN, D., L. (2002). *First Course in the Finite Element method-3.rd ed.*, Brooks/Cole, Pacific Groove, USA, ISBN:0-534-38517-6.
- [54] MAREK, P., GUŠTAR, M. (1988). Pravděpodobnostní rozbor kombinací odezev na zatížení = zdroj úspor oceli. (Probabilistic Analysis of the Simultaneous Load Effects = Source of Steel Savings). Proceedings: Conference “Ocelové konstrukce pro skladové hospodářství”, ZP ČSVTS OK Mostárna Hustopeče, Dec. ‘88. (in Czech).
- [55] MAREK, P., GUŠTAR, M. and ANAGNOS, T. (1995). *Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, ISBN: 0-8493-8286-6.
- [56] MAREK, P., GUŠTAR, M., PERMAUL, K. (1999). Transition from Partial Factors Method to Simulation Based Reliability Assessment in Structural Design. Journal: *Probabilistic Engineering Mechanics* 14 (1999), pp. 105-118, Elsevier Science Ltd. (in English).
- [57] MAREK, P., BROZZETTI, J. and GUŠTAR, M. (editors) (2001). *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo simulation. Basics, Exercises, Software*, ITAM Academy of Sciences Czech Republic, (CD ROM attached), ISBN: ISBN – 86-86246-08-6.
- [58] MAREK, P., BROZZETTI, J., GUŠTAR, M. and TIKALSKY P (editors) (2003). *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo simulation. Basics, Exercises, Software*, ITAM Academy of Sciences Czech Republic, (CD ROM attached). 2ND edition, ISBN: 80-86246-19-1.
- [59] MATESOVÁ, D., PERNICA, F., TEPLÝ, B. (2006). Limit States for Durability Design – Modelling and the Time Format, In: *Sborník konference Modelování v Mechanice*, Ostrava.
- [60] MATESOVÁ, D., TEPLÝ, B. (2006). Aplikace a popis software pro pravděpodobnostní hodnocení degradace materiálů (Application and Software for probabilistic evaluation of Material degradation), *CIDEAS*, available on-line at:
<http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/3tlv/TL06CZ_1132-4.pdf>.
- [61] MCDONALD, D., PFEIFER, D., VIRMANI, P. (1998)“Corrosion – Resistant Reinforcing Bars Findings of a 5-Year FHWA Study.” *Proceedings of The International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures*, WJE Inc. & FHWA, Orlando, December 1998, pp. 1-13.
- [62] MICKA, M. (2005). *Pravděpodobnostní výpočet konstrukce s programy ANSYS a Anhill (Probabilistic Structural Evaluation using Anthill and*

- ANSYS Softwares), Project AV0Z 20710524, ITAM CAS Czech Republic, Prague.
- [63] MINDESS, S., YOUNG, F., J. (1981). *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [64] MIURA, T., ITABASHI, H., IWAKI, I. (1997). "Study on Allowable Coating Damage of Epoxy-Coated Reinforcing Bars." *ACI Materials Journal*, vol. 94, no. 4, July-August 1997, pp. 267-272.
- [65] MODAK, M. S., GUPTA, A. K. (1999) "Reinforcement Protection of Concrete Against Corrosion – New Technology." *International Symposium on 'Innovative World of Concrete-98'*: Calcutta, India, Netherlands, 1999, pp. 11.29-11.38.
- [66] NĚMEC, L., MAREK, P. (2000). „Zatížení sněhem a větrem. (Snow and Wind loads)”. Journal: Stavební obzor, volume 9, number 10, page 289 – 297, Prague, 2000. ISSN 1210-4027. (in Czech).
- [67] NOVÁK, D., VOŘECHOVSKÝ, M., RUSINA, R. (2003). Small-sample probabilistic assessment – FREET software, Applications of Statics and Probability in Civil Engineering, Der Kiureghian, Madanat & Pestana (eds.), Millpress, Rotterdam, ISBN 90-5966-004-8.
- [68] PAPADAKIS, V. G. (2000). "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (2), pp. 291-299.
- [69] PAPADAKIS, V. G., FARDIS, M. N. a VAYENAS, G. G.(1992). "Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation", *Materials & Structures*, Vol. 25, pp. 293-304.
- [70] PAPADAKIS, V., G., EFSTATHIOU, M., P. (2006). Field Validation of a Computer-Based Prediction for Concrete Service Life, In proceedings of 2ND International fib Congress, June 5-8, Naples, Italy.
- [71] PAPADAKIS, V., G., FARDIS, M., N., VAYENAS, G., G. (1996). Mathematical Modelling of Chloride Effect on Concrete Durability and Protection measures. In proceedings of Concrete In the Service of Mankind, Dundee, 1996, pp.165-174.
- [72] PeBBu (2004). *PeBBu – Performance Based Building Thematic network*, available on-line at: <<http://www.pebbu.nl/>>.
- [73] PETTERSSON, K. (1998). "Service Life of Concrete Structure Including the Propagation Time." *Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading*, vol. 1, E & FN, London, 1998, pp. 489-498.
- [74] PHOON, K., K., QUEK, S., T., HUANG, H. (2004). Simulation of non-Gaussian Processes using fractile correlation, In *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol 19, p. 287-292, 2004.
- [75] PRAKS, P. (2002). Numerical aspects of Simulation Based Reliability Assessment of Systems. Proceedings: *International Colloquium Euro-SiBRAM'2002. Volume II*. Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, June 2002. ISBN 80-86246-17-5. (in English).
- [76] PRAKS, P. (2006). *Analýza spolehlivosti s iteračními řešiči (Reliability Analysis with Application of Iterative Solvers)*. Doctoral dissertation thesis, VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Applied mathematics, December, 2005.
- [77] ROVNANÍKOVÁ, P., PAVLÍK, Z., ČERNÝ, R. (2002). Měření současného přenosu vody a chloridů jako podklad pro predikci koroze výztuže v betonu

- (Measurement of the Simultaneous Transfer of Water and Chlorides as a Basis for The Prediction of Corrosion of reinforcement in Concrete). In *Beton TKS*, 2002, vol. 6, pp. 46-49, (in Czech).
- [78] SAGUES, A., POWERS, R., ZAYED, A. (1990). "Marine Environment Corrosion of Epoxy-Coated Reinforcing Steel." *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, SCI, Elsevier, London, 1990, pp. 539-549.
- [79] SCHIESSL, P., RAUPACH, M. (1997). "Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete." *ACI Materials Journal*, vol. 94, no. 1, January – February 1997, pp. 56-62.
- [80] <<http://rc-lifetime.stm.fce.vutbr.cz>>.
- [81] *SHRP 2 Request for Proposal* (2007). Project #R19: Bridges for Service Life beyond 100 Years, available on-line: <<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/R19.pdf>>.
- [82] ŠMERDA, Z., ADÁMEK, J., KERŠNER, Z., MELOUN, V., MENCL, V., NOVÁK, D., ROVNANÍKOVÁ, P. and TEPLÝ, B. (1999). *Trvanlivost betonových konstrukcí (Durability of Concrete Structures)*, Informační centrum ČKAIT, Prague, ISBN-8090269788, (in Czech).
- [83] SMITH, K., M., SCHOCKER, A., J., TIKALSKY, P., J., TEPKE, D., G. (2003). *Evaluation of Bridge Deck design Factors using Concrete Resistivity*, Final report prepared for Commonwealth of Pennsylvania Department of Transportation, FHWA-PA-2002-040-97-04(81-5).
- [84] SOHANGHPURWALA and SCANNELL, W.T.(1994). "Verification of Effectiveness of Epoxy-Coated Rebars", Final Report to Pennsylvania Department of Transportation, Project No. 94-005, 1994.
- [85] SUZUKI, K., OHNO, Y., PRAPARNTANATORN, S., TAMURA, H. (1990) "Mechanism of Steel Corrosion in Cracked Concrete." *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, SCI, Elsevier, London, 1990, pp. 19-28.
- [86] TALIB, A.Y., RASHEEDUZZAFAR, AL-GAHTANI, A.S. (2000) "Chloride Binding and Corrosion in Silica Fume Concrete." *Concrete 2000: Economic and Durable Construction through Excellence*, London 1993, pp. 1453-1466.
- [87] TEPLÝ B. and NOVÁK D. (1999). *Spolehlivost stavebních konstrukcí (Reliability of Civil Engineering Structures)*, CERM, s.r.o., Brno 1999, (in Czech).
- [88] TEPLÝ, B., NOVÁK, D., KERŠNER, Z., LAWANWISUT, W. (1999). "Deterioration of reinforced concrete: Probabilistic and sensitivity analyses", *Acta Polytechnica*, vol. 39, no. 2, pp. 7-22, Prague, ISSN 1210-2709.
- [89] TEPLÝ, B., BAUER, K., KŘÍSTEK, V. (2000). Risk and Total Costs of Civil Engineering Structures (Problematika rizik a celkových nákladů stavebních objektů), In proceedings of conference *Betonářské dny 2000*, ČBZ Pardubice, pp. 193-198. (In Czech).
- [90] TEPLÝ, B., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. (2002). K navrhování železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost (On Performance-based Design of Reinforced Concrete Structures), *Beton – TKS*, 6/2002, pp. 41-45, (in Czech).
- [91] TEPLÝ, B. (2004). Performance-based přístupy k navrhování konstrukcí (Performance-based Approaches in Structural Design). In proceedings of *Pravděpodobnost porušování konstrukcí 2004*, Brno (In Czech).
- [92] TEPLÝ, B., ROVNANÍK, P., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. (2004).

- Podpora navrhování konstrukcí na životnost (Support for the Durability-based Structural Design)*, Beton - TSK 3 / 2004, pp. 43-45.
- [93] TEPLÝ, B., KERŠNER, Z., ROVNANÍK, P. AND CHROMÁ, M. (2005a). Durability vs. Reliability of RC structures, In proceedings of 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17-20 April 2005.
- [94] TEPLÝ, B. (2005b). Trvanlivost – náklady – spolehlivost konstrukcí (Durability - Costs and Reliability of Structures), *Beton TKS*, No. 3, pp. 3-5, ISSN 1213-3116, (In Czech).
- [95] TEPLÝ, B. (2005c). Trvanlivost – náklady – spolehlivost konstrukcí (Durability - Costs and Reliability of Structures), *Beton TKS*, No. 3, pp. 3-5, ISSN 1213-3116, (In Czech).
- [96] TEPLÝ, B. (2007). Může investor využít modelování? (Can Investor Utilize Modelling?) In *Sborník příspěvků konference Modelování v mechanice 2007*, VŠB-TU Ostrava, ISBN 978-80-248-1330-1.
- [97] THOFT-CHRISTENSEN, P. (downloaded 07/2005). “Modelling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures”, available online: <<http://www.civil.aau.dk/i6/publ/srpaper199.PDF>>.
- [98] THOMAS, M.D.A., MATTHEWS, J. D. (1996). “Chloride Penetration and Reinforcement Corrosion in Fly Ash Concrete Exposed to a Marine Environment (SP 163-15).” *Third CANMET/ACI International Conference: Performance of Concrete in Marine Environment (SP-163)*, Canada, 1996, pp. 317-338.
- [99] TIKALSKY, P. (2002). Reference Values for DurabilityBased Performance Design Criteria, *Euro-SBRAM 2002 International Colloquium (Simulation-Based Reliability Assessment Methods)*. Proceedings V.2 Marek, P., Guštár, M. and Tikalsky, P. (eds.) ITAM Czech Academy of Sciences, Prague, June 2002.
- [100] TIKALSKY, P. (2003). “Chapter 20 Durability and Performance-Based design using SBRA“ in [58].
- [101] TIKALSKY, P. J., KONEČNÝ P. (2007). Effect of Binary and Ternary Cementitious Systems on the Performance of Concrete Bridges. In proceedings of *Terence C. Holand Symposium on Advances in Concrete Technology*, June, 2007, Warsaw, Poland, pp.255-269, ISBN 978-0-9731507-4-2.
- [102] TIKALSKY, P., J. and PUSTKA, D., MAREK, P. (2005). “Statistical Variations in Chloride Diffusion in Concrete”, *ACI Structural Journal*, vol. 102, is. 3, 2005.
- [103] TUUTTI, K. (1982). “Corrosion of steel in concrete“, *CBI Research Report 4:82*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- [104] VAŇURA, T., ŠTEPÁNEK, P., ŠERTLER, H. (2003). Reliability and Economy in Probabilistic Design Application (Spolehlivost a hospodárnost při pravděpodobnostním návrhu), In proceedings of conference *Spolehlivost Konstrukcí*, Ostrava, April 23-24, 2003, pp. 147-150, ISBN 80-02-01551-7, (in Czech).
- [105] VUKAZICH, S., MAREK, P. (2002). Structural Design Using Simulation Based Reliability Assessment. *Acta Polytechnica – Journal of Advanced Engineering*, Vol. 41, No. 4-5/2001, page 85-92, ČVUT Praha. ISSN 1210-2709. (in English).
- [106] WEST, J. S. (1999). *Durability Design of Post-Tensioned Bridge Substructures*. vol. 1 & 2, Doctoral of Philosophy Dissertation, University

- of Texas, May 1999.
- [107] WEYERS, BROWN, KIRKPATRICK, MOKAREM, SPRINKEL (2002). "Field Assessment of the Linear Cracking of Concrete Bridge Decks and Chloride Penetration." *A Paper submitted for Presentation at TRB Annual Meeting*, January 2002, pp. 1-18.
- [108] WEYERS, R.E. PROWELL, B. D., SPRINKEL, M. M., and VORSTER. M. (1993). Concrete Bridge Protection, Repair, and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Methods Application Manual, SHRP-S-360, National Research Council, pp 75, 153. available on-line: <<http://gulliver.trb.org/publications/shrp/SHRP-S-360.pdf>>.
- [109] ZEMAJTIS, J. (1998). Modeling the Time to Corrosion Initiation for Concretes with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride-Laden Environments , Dissertal15tion at Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.

Další publikace autora vztahující se k problematice

- [110] KONEČNÝ, P. (2002). *Posudek spolehlivosti vybraných konstrukčních dílců podle norem Eurocode a metodou SBRA*. Master Thesis, Ostrava, 2002.
- [111] KONEČNÝ, P., TIKALSKY, P., TEPKE, D. (2006). Výpočet koncentrace chloridů v ŽB mostovce s využitím MKP a přístupu SBRA. In MAREK, P., KONEČNÝ, P. (eds.) *Sborník referátů VII. ročníku celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí*, 5. 4. 2006, Praha, DT Ostrava, pp. 147–156, ISBN 80-02-01770-6.
- [112] KONEČNÝ, P., TIKALSKY, P. J., TEPKE, D. G. (2006). Performance assessment of concrete bridge deck applying SBRA approach and fem model with regard to chloride ingress. In and CD-ROM proceedings of *Engineering Mechanics 2006*, May 15-19 2006, Svratka, Czech Republic, pp. 164-165, ISBN 80-86246-27-2, (In English).
- [113] KONEČNÝ P., TIKALSKY, P. J., TEPKE, D. G. (2006). Probabilistic performance assessment of a bridge deck with regards to chloride ion ingress, In CD-ROM of Symposium *Trwałość Materiałów i Konstrukcji Budowlanych*, June 21-22, 2006, Kamień Śląski, Poland, (In English).
- [114] MATERNA, A., BROŽOVSKÝ, J. and KONEČNÝ, P. (2006). Příspěvek k analýze stavebních konstrukcí s uvážením náhodného charakteru vybraných vstupních veličin, In *Sborník vědeckých prací Fakulty Stavební VŠB-TU Ostrava*, ISBN 80-248-1248-7, ISSN 1213-1962.
- [115] KONEČNÝ, P. (2007). Posudek trvanlivosti ŽB mostovky s ohledem na působení chloridů s využitím MKP a metody. In In MAREK, P., KONEČNÝ, P. (eds.) *Sborník VIII. celostátní konference se zahraniční účastí SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ*, 12. 4. 2007, Praha, ISBN: 978-80-86246-33-8.
- [116] KONEČNÝ P., TIKALSKY, P. J., TEPKE, D. G. (2007). "Performance Assessment of a Concrete Bridge Deck Affected by Chloride Ingress by Using Simulation-Based Reliability Assessment and Finite Element Modeling". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA, (In Print).

Autor:	Petr Konečný
Katedra, Institut:	Katedra stavební mechaniky (228)
Název publikace:	Posuzování spolehlivosti železobetonové mostovky s ohledem k působení chloridů
Počet stran:	36
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2007
Vydala:	VŠB – Technická univerzita Ostrava
Tisk:	Falulta stavební VŠB-TU Ostrava
Náklad:	30 ks
ISBN:	978-80-248-1556-5
