

TRVANLIVOST A PROVOZNÍ ŽIVOTNOST BETONOVÝCH MOSTŮ - INTELIGENTNÍ NÁVRH, REÁLNÁ VÝSTAVBA A PŘEDPOKLÁDANÁ ÚDRŽBA

DURABILITY AND SERVICE LIFE OF CONCRETE BRIDGES - INTELLIGENT DESIGN, REALISTIC CONSTRUCTION AND FORESEEN MAINTENANCE



STEEN ROSTAM

Největší a nejdlohodobější investice, které společnost vynakládá, směřují do budov a infrastruktury. Pozornost by se v této souvislosti měla zaměřit nejen na vstupní stavební náklady, ale též a ve větší míře na rostoucí zátěž, kterou představují budoucí náklady na údržbu. Již nyní je jasné, že prud-

ký růst počtu nových staveb probíhá současně s nárůstem údržby a předčasných oprav stávajícího fondu konstrukcí. Zajistit výrobu velmi trvanlivého betonu dnes nepředstavuje žádný problém, a to i ve značně agresivních a korozi podporujících prostředích. Jenomže hlavním úkolem dneška není zajistit výrobu trvanlivého betonu, ale zajistit výrobu spolehlivých a trvanlivých betonových konstrukcí. A to je něco zcela jiného! Pokud se nepodaří zlepšit a zajistit spolehlivé fungování nových konstrukcí a údržbu a opravy existujících, možnosti další generace, našich vlastních dětí, budovat prosperující budoucnost budou omezeny. Budou muset svá aktiva utrácet za opravy konstrukcí, které zdědily po naší generaci!

Society's largest and most long-term investments are made in its buildings and infrastructure. Attention should therefore be drawn not only to the initial construction costs but also and much more so to the growing burden of the future maintenance costs. It is now clear that the foreseen explosive growth in new constructions will coincide with the growth also in maintenance and premature repair of the existing stock of structures. There are today no difficulties in ensuring very durable concrete, also in very aggressive and corrosive environments. However, the main issue is not to ensure durable concrete but to ensure reliable and durable concrete structures, and that has proved to be a very different challenge! If major improvements in the reliable performance of new structures and in the maintenance and repair of existing structures are not introduced now, next generation, our own childrens, will be imposed limitations in their possibilities to develop their own prosperous future by having to spend their assets on repairing the structures they inherit from our generation!

KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ A NÁVRH TRVANLIVOSTI

Obecně přijímaným cílem návrhu je **dosáhnout přijatelnou míru pravděpodobnosti, že navrhovaná konstrukce bude během své plánované životnosti fungovat uspokojivě.**

Když projektant-statik navrhuje konstrukci, nejprve určí zatížení, která konstrukce musí být schopna přenášet. Protože skutečné hodnoty zatížení mohou být různé, užívá statik bezpečnostní fak-

tory. Aby zajistil, že navrhovaná konstrukce přenesení výpočtová zatížení, volí určitý typ konstrukčního systému, geometrii prvků, typy materiálů a jejich pevnost. Protože vlastnosti materiálů, geometrie i vlastnosti konstrukce budou splněny s nějakou pravděpodobností, zavádějí se bezpečnostní faktory, které omezují maximální povolená napětí. Kromě toho jsou využívány matematické rovnice k ověření přijatelné úrovně pravděpodobnosti výskytu zatížení překračujících odolnost konstrukce.

Co se týče návrhu trvanlivosti, situace v oblasti přijatelně spolehlivého ověření, že je možné dosáhnout plánované životnosti konstrukce, je naprosto jiná. Zdá se, že lze užívat jednodušší přístup. Normy poskytují pouze kvantitativní definice pojmu **vystavení konstrukce vnějším vlivům** a nedefinují návrhovou životnost ve vztahu k trvanlivosti. Především nekvantifikují mezní stavy trvanlivosti, po jejichž překročení je návrhová životnost ukončena. Dřívější přístupy nerozlišovaly, že ve vztahu k trvanlivosti neurčují fungování konstrukce pouze vlastnosti materiálů nebo komponentů, ale stav celé konstrukce v určitém prostředí jako celku a potřeba nápravných zásahů. Fungování konstrukce je možné definovat pomocí funkčních požadavků, např. vhodnost konstrukce k danému účelu využití, která se týká i odchylek, trhlin, drolení, vibrací, estetické a konstrukční integrity.

Aplikace silně zjednodušujících postupů převažuje též v oblasti návrhu provozní životnosti nových konstrukcí, podobně jako při odhadu zbytkové provozní životnosti stávajících konstrukcí. A to navzdory skutečnosti, že jakmile je konstrukce realitou, velká část nejistoty ve vztahu k novým návrhům může být odstraněna či omezena na požadovanou úroveň prostřednictvím vhodně plánovaných kontrol, měření a zkoušek. Čím déle byla konstrukce provozována a čím déle zůstala v interakci s prostředím, tím spolehlivější může být odhad její zbytkové provozní životnosti. Tuto podmínku je třeba respektovat při hodnocení a odhadování zbytkové provozní životnosti.

SPECIFIKA KONSTRUKČNÍHO BETONU

Betonové konstrukce mají s ohledem na jejich stárnutí některé důležité charakteristické vlastnosti, kterými se zásadně odlišují od konstrukcí vyrobených z jiných materiálů. Jsou to:

- Kvalita a chování betonu uvažované v návrhu konstrukce jsou pouhým toužebným přáním. Nicméně konkrétní požadavky na kvalitu a výkon se specifikují v základu návrhu.
- Skutečná kvalita a výkonové vlastnosti betonu jsou určovány během výstavby. Toto velmi krátké období je rozhodující pro určení nejvýznamnějších znaků zajišťujících požadovanou trvanlivost dokončené konstrukce.
- Kvalitativně podřadná trvanlivost betonových konstrukcí není vzhledem k povaze jejich stárnutí a chátrání při vystavení agresivnímu prostředí bezprostředně zřetelná ani zjištělná. Doba potřebná k rozpoznání předčasného stárnutí může být delší

než smluvní termín zákonné odpovědnosti dodavatele a projektanta, ovšem mnohem kratší než provozní životnost očekávaná ze strany vlastníka stavby.

INTELIGENTNÍ NÁVRH TRVANLIVOSTI A PROVOZNÍ ŽIVOTNOSTI

Navrhování betonových konstrukcí na trvanlivost bylo tradičně považováno za požadavek splněný prostřednictvím specifikované nebo kodifikované minimální betonové krycí vrstvy výztuže a návrhem maximální přípustné šířky trhlin vzhledem k uvažované agresivitě prostředí.

Agresivita životního prostředí je definována jako slabá, mírná nebo vysoká podle kombinace úrovně koncentrace agresivních chemických látek, chloridů, sulfátů a kyselin, přítomnosti vody a vlhkosti. V některých oblastech už byla zavedena čtvrtá úroveň agresivity životního prostředí, mimořádně vysoká. Dosud nebylo nalezeno rozlišení mezi prostředími primárně hrozcími narušováním betonu a prostředími primárně hrozcími korozí výztužení.

Tloušťka krycí vrstvy je obvykle určována směsí zkušenosti a citu mezi 25 až 75 mm. Zatím žádný konkrétní výzkum nehledal vědecké zdůvodnění pro určování optimální tloušťky krycí vrstvy u různých druhů betonu v různých prostředích.

Návrhem připuštěná **šířka trhliny** je obvykle stanovena v rozptěti mezi 0,3 a 0,1 mm, podle úrovně agresivity prostředí, ale s různými návrhovými vzorci uvedenými v národních i mezinárodních stavebních předpisech. Úsilí směřovalo k vývoji vzorců pro stanovení šířky trhliny pod užitným zatížením působícím čistý tah nebo ohyb. Zatím nebyla zkoumána problematika šířky trhliny, která se vyvíjí vzhledem k technologickým vlastnostem betonu, jako je např. plastické smrštění a plastické sedání trhlin, tvoření trhlin podél výztuže, korozí vyvolaná tvorba trhlin a oddělování vrstev, tvorba trhlin v důsledku alkalických reakcí kameniva apod. Nicméně právě takové trhliny mohou mít mnohem ničivější účinek na trvanlivost betonových konstrukcí než trhliny vyvolané tahem a ohybem.

Statik musí vyhovět přísným omezením týkajícím se stanovení šířky trhlin, což vede buď k zvýšenému množství výztuže, někdy až příliš, nebo k používání slabší krycí vrstvy a menších průměrů prutů hustě rozmístěných.

Podle současného chápání tohoto mechanismu a praktických zkušeností jsou návrhová opatření týkající se malých šířek trhlin ve většině případů jasně kontraproduktivní s ohledem na zajištění dlouhé životnosti.

Koroze výztuže je nejvážnější příčinou nákladného předčasného poškození betonových konstrukcí. **Šťastnou náhodou**, která provázela vynález železobetonu před jeden a půl stoletím, byla nesmírně efektivní ochrana proti korozi zalitím železa. Tuto ochranu poskytoval alkalický beton z Portlandského cementu obklopující železo. Časem se ale zjistilo, že účinek alkalického prostředí je eliminován, když se karbonizační úroveň nebo chloridy v dostatečném množství dostaly k výztuži. Pokud je přítomna i dostatečná vlhkost, koroze se může rozvíjet a expanzivní produkty rzi způsobují vznik trhlin, oddělování vrstev a odprýskávání krycí vrstvy. Padající kusy betonu mohou ohrožovat lidi a zmenšené betonové a ocelové profily snižují konstrukční bezpečnost.

Účinek průniku kyslíčnicku uhličitého, chloridů a vody upozornil na potřebu zabránit anebo zpozdit pronikání škodlivin. To si žádá pochopení, jak fungují mechanismy pronikání agresivních látek.

Modelování průniku chloridů

Pronikání chloridů do betonu se běžně modeluje podle Fickova druhého zákona difúze.

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (1)$$

kde funkce $C(x,t)$ vyjadřuje koncentraci chloridu v hloubce x v čase t , C_s koncentraci chloridu na odkrytém povrchu, t je doba působení, x je hloubka, erf funkce chyby a $D(t)$ difúzní koeficient.

Proces koroze (nástup koroze) začíná, když koncentrace chloridu na úrovni výztuže převyšuje kritickou hodnotu C_{cr} .

Vypočtená koncentrace povrchového chloridu C_s představuje ekologickou zátěž a považuje se za nezávislou na čase. Difúzní koeficient chloridu $D(t)$ charakterizuje schopnost materiálu odolat pronikání chloridů.

Dříve byl difúzní koeficient chloridu považován za nezávislý na čase. Laboratorními zkouškami i testy in situ byla potvrzena odolnost s časem. Difúzní koeficient závislý na čase lze vyjádřit:

$$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (2)$$

D_0 je měřený referenční difúzní koeficient chloridu v době t_0 . Exponent α určuje, jak rychle se difúzní koeficient časem zlepšuje. Změna difúzního koeficientu s uplynulým časem je důsledkem

Obr. 1 Význam vnější krycí vrstvy, nebo tloušťky betonu, při ochraně konstrukce před poškozením

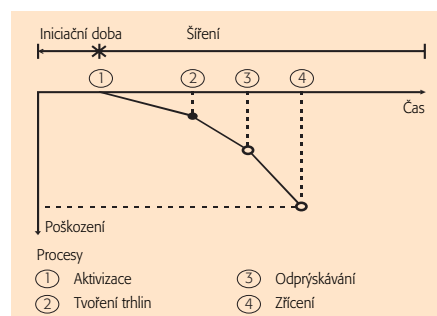
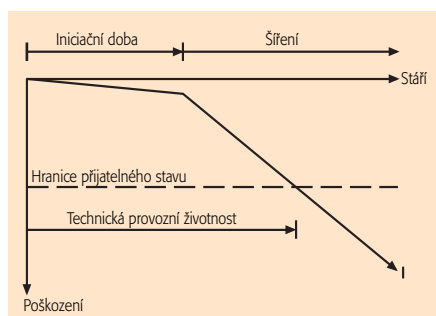
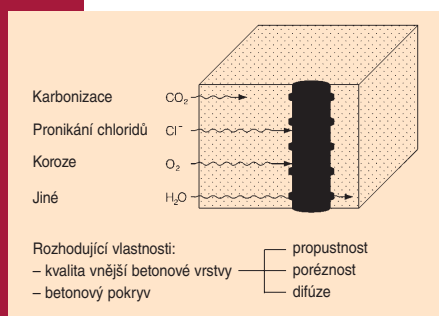
Fig. 1 Importance of the outer concrete layer, or the skin of concrete, to protect the structure against deterioration

Obr. 2 Provozní životnost betonových konstrukcí, dvoufázové modelování škod [Tuutti 1982]

Fig. 2 Service life of concrete structures, a two-phase modelling of deterioration [Tuutti 1982]

Obr. 3 Procesy ovlivňující provozní životnost

Fig. 3 Events related to service life



kombinovaného účinku hydratace a všech dalších mechanismů působících v poli jako výměna iontů s prostředím. V návrhové fázi se dá odolnost betonu D_0 měřit laboratorně objemovým difúzním testem nebo migrační zkouškou.

Podle těchto vzorců je možné spočítat čas zbývající do nástupu koroze. Je to deterministický způsob výpočtu provozní životnosti pomocí středních hodnot nebo fixních charakteristických hodnot relevantních parametrů (krycí vrstvy, koncentrace povrchového chloridu, difúzního koeficientu a kritické koncentrace chloridu), který systematicky nepostihuje zřejmou nejistotu různých parametrů.

Poškození závislá na čase

Poškození betonu je určováno pronikáním agresivních látek do betonu a jejich akumulací v důsledku např. cyklického zvlhčování a vysoušení nebo výparných účinků (obr. 1). Časově závislé chátření betonových konstrukcí lze znázornit pomocí jednoduché lomené křivky (obr. 2), která představuje iniciační dobu (bez poškození) a období šíření (aktivní chátření).

Obrázek 3 ukazuje chování betonové konstrukce s ohledem na korozi vyztuže a související procesy. Body 1 a 2 znázorňují procesy vztahující se k provozuschopnosti konstrukce. Bod 3 se vztahuje jak k provozuschopnosti, tak k meznímu stavu únosnosti a bod 4 reprezentuje zřícení konstrukce.

K určení provozní životnosti je možné využít následující procesy související s korozi vyztuže.

- Provozní životnost je omezena iniciační dobou, což je čas, kdy agresivní látky proniknou k vyztuži a vyvolají její **depasivaci**. Iniciační doba končí v okamžiku, kdy koncentrace chloridů na vyztuži dosáhne kritické prahové hodnoty nebo kdy čelo karbonizace dosáhne vyztuže. Depasivace nutně nemusí představovat nežádoucí proces. Nicméně než dojde ke korozi, proces depasivace musí proběhnout.
- Druhým procesem je **vznik trhlin v krycí vrstvě** následkem roztažných sil generovaných produkty koroze. V tomto případě provozní životnost zahrnuje období šíření korozivní činnosti, během něhož se plocha průřezu vyztuže progresivně zmenšuje. Šířka trhliny závisí na množství koroze, poměru mezi krycí vrstvou a průměrem vyztuže, kvalitě betonu (pevnosti v tahu) a umístění prutu. Doba šíření končí dosažením určité, předem zvolené

nebo určené, povolené šířky trhliny. Na základě dostupných znalostí byla v projektu DuraCrete vybrána hodnota 0,3 mm.

- Pokračující koroze může vést po objevení se trhlin v krycí vrstvě až k jejímu **odprýskávání**. Podle hustoty rozmístění prutů, tloušťky krycí vrstvy a pevnosti betonu v tahu se odprýskávání může projevit buď ve formě místních drobných trojúhelníkových kousků betonu, které začnou odpadávat podél korodujícího prutu, nebo mohou spolupůsobit rozštěpné síly z několika korodujících prutů a způsobit odprýskání krycí vrstvy na větších plochách. Ztráta průměru vyztuže a do jisté míry i ztráta průřezu betonu působí pokles únosnosti.

Odprýskávání betonu je běžně považováno za nepřijatelný stav. Nicméně odprýskávání nevede vždy nutně ke zřícení konstrukce, a proto ho můžeme považovat za mezní stav provozuschopnosti. Na druhé straně, odprýskávání betonu může ohrožovat lidské životy a zdraví. V takovém případě je nutné ho brát jako mezní stav únosnosti.

V rámci projektu DuraCrete je na základě dostupných znalostí předpokládáno, že odprýskávání nastává, když vznikne trhlina o šířce přibližně 1 mm. Tato fáze je označována za konec šíření trhlin.

- Ke **zřícení** betonové konstrukce dochází, jestliže je únosnost prvku podstatně snížena následkem postupující koroze, další ztrátou průměru betonu a oceli nebo ztrátou soudržnosti.

Přestože se tento přehled dokumentující úsilí inženýrů o zajištění trvanlivosti betonových konstrukcí může zdát příliš jednoduchý, poukazuje na důležitý vývoj chápání procesu navrhování na trvanlivost.

Ochranná opatření

Co se týče ochrany vyztuže proti korozi, vývoj byl, zdá se, poněkud jednostranný. Spoléhalo se hlavně na betonovou směs, např. ve formě HPC betonu, a betonovou krycí vrstvu, které měly chránit vyztuž proti korozi, a to bez ohledu na typ prostředí a stupeň jeho agresivity.

Jsou využívány i jiné ochranné postupy, např. nátěry vyztuže nebo betonu, katodová ochrana vyztuže, korozi bránící příměsi do betonu, nekovová vyztuž, vláknitá vyztuž, avšak vždy pouze s omezeným úspěchem.

Statik má v dnešní době k dispozici především vyztuž z nere-

Obr. 4. Železobetonové molo v Perském zálivu vykazující značný stupeň poškození korozi způsobený chloridy

Fig. 4 Reinforced concrete jetty in the Arabian Gulf exhibiting extensive chloride induced corrosion damage



Obr. 5. Mostní pilíře vystavené 18 let přímořskému prostředí v mírném klimatickém pásmu

Fig. 5 Bridge piers exposed for 18 years to a temperate marine environment





Obr. 6 Typická směs vysokohodnotného betonu, tzv. „koktejlový beton“

Fig. 6 Typical HPC mix, so-called “cocktail concrete”

zavějí oceli, která je novou a velice spolehlivou ochranou proti následkům koroze – téměř revoluce v technologiích navrhování na trvanlivost v případech, kdy je nutno vyrovnávat se s vysoce agresivním korozivním prostředím.

Vliv teploty

Dalším z faktorů ovlivňujících rychlost poškozování betonových konstrukcí je teplota, a to teplotní úrovně nad bodem mrazu. Vzrůst teploty urychluje chemické a elektrochemické reakce. Základním pravidlem je, že **vzrůst teploty o 10°C zdvojnásobuje rychlost reakcí.**

Sám tento faktor způsobuje, že horká a tropická prostředí jsou mnohem agresivnější než mírné podnebí. Teplotní účinky jasně ilustruje porovnání obrázků 4 a 5. V prvním případě se jedná o železobetonové molo v Perském zálivu vykazující značný stupeň poškození korozi, vyvolaný rozsáhlou přítomností chloridů. K oddělování vrstev došlo již po 2 až 3 letech, stádia porušení a zřícení bylo dosaženo po 7,5 letech, kdy byl pořízen snímek. Průměrná roční teplota v oblasti je přibližně o 30 °C vyšší než v případě druhém. Zde se jedná o mostní pilíře vystavené 18 let přímořskému prostředí v mírném klimatickém pásmu. Rozsáhlé poškození následkem koroze výztuže vyvolané chloridy je patrné v oblasti, kam se rozstříkuje voda. Teplotní rozdíl způsobuje, že poškozování v Perském zálivu probíhá $2 \times 2 \times 2 = 8$ krát rychleji než v severovýchodních zemích. To má důležitý význam pro návrhové postupy a ochranná opatření, která by měla být aplikována různá v různých klimatických podmínkách; kromě toho je nezbytné počítat se specifickými účinky agresivního média přítomného v prostředí.

VYSOKOHODNOTNÝ BETON – PREVENCE PŘED KOROZÍ

Zájem o propustnost betonu v rámci hledání opatření, která podpoří trvanlivost betonu, „živí“ vědecký výzkum betonu po několika posledních desetiletích a vyústil ve vývoj velmi hustého a nepropustného betonu. Vědci se zaměřili zejména na typ a složení cementového pojiva a na poměr vody a cementu. Tomuto vývoji dominovaly speciální hydraulické minerální přísady, např. křemičitý úlet, popílek a drcená granulovaná vysokopecní struska, použité buď jako minerální přísada nebo náhrada cementu. Zavádění chemických plastifikátorů a superplastifikátorů umožnilo snížit vodní součinitel na extrémní hodnoty. V praxi byly ověřeny hodnoty mezi 0,3 až 0,4, které stále ještě umožňovaly výrobu zpracovatelného betonu. Výsledkem vývoje jsou tzv. vysokohodnotné betony (HPC) (obr. 6).

Vývoj HPC má celou řadu málo patrných, záporných účinků na trvanlivost. HPC má, jak se prokázalo, podstatně větší citlivost na prováděcí proces než tzv. normální beton. Zvláště riziko tvoření trhlin v mladém betonu, např. iniciace trhlin v důsledku plastického smrštění nebo změny teplot, je u HPC znatelně vyšší než u tradičního typu. Kapacita možného přetvoření mladého betonu nestačí kompenzovat rozsáhlé chemické smrštění (samovolné smrštění) vysokohodnotného betonu. To způsobuje křehkost tvrdnoucího betonu a citlivost na nevyhnutelná předčasná napětí následkem výparu vody z betonu. Obdobně v mladém HPC betonu vznikají trhliny jako reakce na vystavení napětím, která jsou vyvolána teplotními rozdíly mezi materiálem ohřátým probíhající hydratací cementu a jeho následným chladnutím na teplotu okolí.

Dalším nežádoucím účinkem ve vztahu k ochraně výztuže proti korozi je nezbytné snížení obsahu hydroxidu kalcia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) v betonu. Minerální přísady spotřebovávají $\text{Ca}(\text{OH})_2$, aby mohly reagovat, což vede ke snížení obsahu OH^- , který však reprezentuje zásaditost (pH) pórové vody v betonu. Proto se snižuje tlumící schopnost odolávat karbonizaci a také účinná prahová hodnota chloridy vyvolané koroze.

KONCEPCE NAVRHOVÁNÍ NA TRVANLIVOST A PROVOZNÍ ŽIVOTNOST

Pojem trvanlivá konstrukce je subjektivní a těžko přesně definovatelný. Měl by označovat konstrukci, která si uchovává uspokojivou **funkčnost po předem stanovenou dobu**, aniž by vyžadovala neočekávaně vysoké náklady na údržbu. Proto byl termín trvanlivost nahrazen termínem návrh na **provozní životnost** (service life design – SLD), který představuje kvantifikovatelnou a měřitelnou hodnotu (roky). Vysvětlení podal Fagerlund v roce 1979.

Existují dva zcela odlišné postupy navrhování na trvanlivost:

- zabránění degradace ohrožující konstrukci podle typu a stupně agresivity prostředí,
 - výběr optimálního složení materiálu a konstrukčního řešení detailu tak, aby se na stanovenou dobu zabránilo degradaci ohrožující konstrukci.
- První postup je možné rozdělit na tři různé typy opatření:
- změna mikroprostředí např. uchováváním v nádržích, membránami, nátěry apod.,
 - výběr nereaktivních nebo inertních materiálů, např. výztuže z nerezavějící oceli, nereaktivní přísady, cementy odolné proti síranům, nízkoalkalické cementy,
 - zabránění reakcím, např. katodovou ochranou; zabránění účinkům mrazu provzdušňováním též patří do této skupiny.

Většina opatření neposkytuje úplnou ochranu a jejich účinek vždy závisí na počtu faktorů. Např. účinnost nátěru závisí na tloušťce nátěru a jeho propustnosti ve vztahu k propustnosti betonu.

Druhý postup počítá s různými typy zásahů. Například antikorozní ochranu je možné poskytnout vhodnou krycí vrstvou a betonovou směsí. Kromě toho je možné vhodným řešením detailu vytvořit robustnější konstrukci proti agresivnímu prostředí.

Modelování mechanismů stárnutí betonových konstrukcí lze použít pro první i druhý postup návrhu. Nicméně zásoba znalostí o efektivitě různých ochranných opatření je zatím nepatrná.

Uspokojivý návrh trvanlivosti

Návrhové pojetí betonových konstrukcí, které uspokojí požadavky na trvanlivost, musí obsahovat specifikaci nároků na různé parametry, např. typ a množství cementu, maximální vodní součinitel, minimální krycí vrstvu výztuže, typ ošetření betonu, ochranu proti předčasné tvorbě trhlin, omezení šířky trhlin apod. Hodnoty jsou vybírány podle předpokládané agresivity prostředí.

Prostředky používané v současné době k zajištění trvanlivosti a provozní životnosti betonových konstrukcí se do značné míry řídí tímto návrhovým pojetím. Jsou zakotveny v národních normách, v modelové normě CEB-FIB 1990 (MC 90), stejně jako v Eurocodu 2. Přesto se v normách chystají radikální změny.

První generace návrhů provozní životnosti – vícefázová ochrana

Pojetí návrhů na provozní životnost podle druhé strategie je založeno na výběru vhodného počtu různých druhů inteligentních spolupracujících opatření tak, aby byla zajištěna požadovaná provozní životnost. Toto pojetí je považováno za vícefázový ochranný návrh, neboli vícebariérový návrhový přístup.

- identifikace typu a stupně agresivity prostředí, ve kterém má konstrukce fungovat,
- předpověď možného pohybu a hromadění agresivních látek,
- určení převládajícího mechanismu přenosu (průnik, difúze, kapilární průnik) a jeho řídicích parametrů,
- výběr bariér, které mohou podporovat zpomalení procesu přenosu a hromadění.

Návrh na provozní životnost první generace byl poprvé aplikován v Dánsku při projektu Great Belt Link (obr. 7 a 8).

Druhá generace návrhů na provozní životnost – metoda spolehlivosti

Pro potřeby navrhování trvanlivosti byly v oblasti konstrukčního návrhu rozvíjeny teorie pravděpodobnosti a spolehlivosti. Během posledních 5 až 10 let tyto teorie pozoruhodně vyzrály, takže se ve zcela nedávné době (před 4 až 5 lety) uplatnily i v návrhové praxi. Na cestě od vědeckého výzkumu a teoretické normovací kalibrace k přímé aplikaci v praktickém inženýrském návrhu prodělaly nezbytnou přeměnu. Základní metodika je uznávána v mezinárodním měřítku a mnoho desetiletí se využívá v návrhu konstrukční bezpečnosti. K zjednodušení pro praktické užití došlo

Obr. 7 Great Belt Link, východní tunel, Dánsko, navrhovaná životnost 100 let

Fig. 7 Great Belt Link, east tunnel, Denmark, design life 100 years



využitím faktoru zatížení – odolnost v návrhu (load-and-resistance-factor design, LRFD). Nicméně faktory ovládající trvanlivost a fungování konstrukcí během celé jejich provozní životnosti začaly být obdobným způsobem vyvíjeny teprve nedávno, během třiletého evropského výzkumného projektu pod názvem „DuraCrete“.

Zmíněná metodika umožnila modelování mechanismů přenosu a zhoršování stavu konstrukce na probabilistické úrovni a jejich zavedení do běžné praxe navrhování konstrukcí. Proto může navrhování na bezpečnost a trvanlivost probíhat podobným způsobem. Tyto skutečnosti otevřely oči majitelům, kteří nyní mohou, případně jsou nuceni, rozhodnout o požadavcích na dlouhodobé využití konstrukcí, důsledcích ohledně budoucí údržby, celkových nákladech na životní cyklus konstrukcí a s tím spojené úrovni jejich spolehlivosti. Tato situace je přímou paralelou navrhování na pevnost, kde kodifikované bezpečnostní koeficienty představují společensky přijatelnou rovinu spolehlivosti konstrukčního návrhu.

Nová metodika navrhování na trvanlivost vychází z teorie spolehlivosti, tradičně používané při navrhování konstrukcí. Účelem analýzy spolehlivosti je určit pravděpodobnost určitého procesu, např. procesu, který označuje konec provozní životnosti. Tento formální nebo návrhový konec provozní životnosti nemusí nutně znamenat konec funkčnosti konstrukce. Jako příklad může sloužit depasivace výztuže. Toto stádium je často považováno za konec návrhové životnosti a čas vytvořit návrh konstrukce nové, tedy za mezní stav provozní životnosti. Obr. 9 ukazuje schematické znázornění problému, který je řešitelný metodami spolehlivosti.

Příklad deterministického a probabilistického návrhu

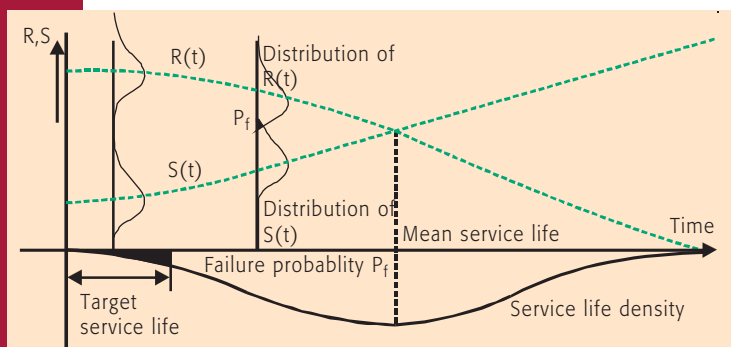
Přednosti probabilistického přístupu k návrhu na trvanlivost ilustruje příklad přímořské konstrukce. Jsou uvažována dvě prostředí představovaná průměrnými ročními teplotami 10 °C (mírné klima) a 30 °C (horké, vlhké klima). Návrhovým požadavkem je padesátiletá provozní životnost. Ta je pro jednoduchost definována jako délka iniciační doby, tj. období před depasivací výztuže v důsledku pronikání chloridů.

Obr. 10 ilustruje požadované krycí vrstvy výztuže v těchto prostředích dle deterministického přístupu.

Obr. 8 Great Belt Link, východní most, Dánsko, délka 1416 m, navrhovaná životnost 100 let

Fig. 8 Great Belt Link, east bridge, Denmark, L = 1416 m, design life 100 years





Obr. 9 Pravděpodobnost vzniku koroze a cílová provozní životnost
Fig. 9 Probability of corrosion initiation and target service life

Obr. 11 upozorňuje na skutečnost, že deterministický přístup poskytuje pouze 50% pravděpodobnost dosažení požadované padesátileté provozní životnosti bez koroze. Tato skutečnost je v mnoha návrzích na trvanlivost přehlížena. Považujeme-li za přijatelné 10% riziko nástupu koroze před uplynutím 50 let, potom jsou požadovány mnohem větší tloušťky krycí vrstvy.

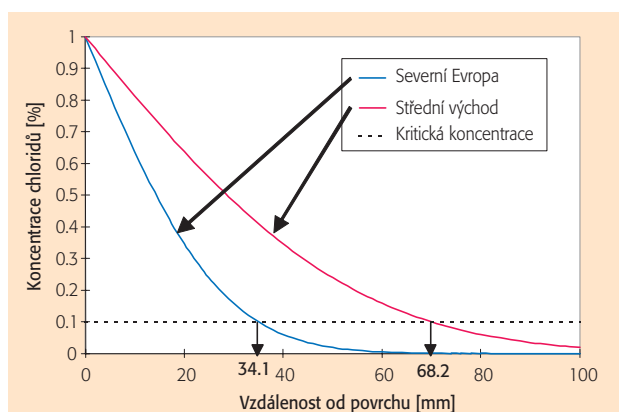
Deterministický přístup vychází ze středních hodnot hlavních parametrů. U probabilistického přístupu se vychází z distribučních funkcí, středních hodnot a jejich známých nebo předpokládaných koeficientů. Novější přístup nejen umožňuje vztahovat tloušťku krycí vrstvy k pravděpodobnosti koroze, ale také kvantifikovat důsledky různých, zvolených rizik koroze výztuže. Tyto důsledky se týkají nejen kvality betonu a tloušťky krycí vrstvy, ale, což je důležitější, ekonomických následků. Proto byl základ optimalizace celoživotních nákladů stanoven podle spolehlivosti.

INTEGRACE PROVOZNÍ ŽIVOTNOSTI DO BUDOUCÍCH KONSTRUKČNÍCH NÁVRHŮ

Počátkem projektu nové speciální či zvláště velké konstrukce by mělo být stanovení konkrétních „základních pravidel návrhu“. Tento dokument shrnuje vybrané relevantní předpisy a normy, možné úpravy norem a veškeré dodatečné relevantní požadavky. Prodloužená provozní životnost ve srovnání s předpoklady vyjádřenými v předpisech, snížená potřeba údržby, estetické po-

Obr. 10 Deterministický přístup, požadavek na krycí vrstvu je zajištěn 50 let provozní životnosti při prahové hodnotě chloridů 0,1 % z váhy betonu

Fig. 10 Deterministic, required concrete cover to ensure 50 years service life and assuming a chloride threshold value of 0,1 % by weight of concrete



žadavky, speciální zatížení a zvláště agresivní prostředí, to vše jsou otázky, které jsou v základních pravidlech projektu shrnuty.

Je zajímavé všimnout si „nových“ kritérií, která jsou uplatňována, jestliže vlastník chce, aby konstrukce plnila určité nároky na provozní životnost – jsou to přesně definované požadavky na přijímací kritéria a úroveň spolehlivosti návrhu. Ukazuje to následující příklad velké přímořské konstrukce v horkém, vlhkém prostředí, kde koroze výztuže představuje hlavní nebezpečí předčasného zhoršování stavu konstrukce.

Návrhová báze s integrací provozní životnosti do návrhu

Na počátku návrhu konstrukce je nezbytné stanovit hlavní parametry určující zatížení, pevnost materiálů dle předpisů a norem a specifické úpravy v projektu a dodatky dle požadavků majitele.

Jestliže má být určitá návrhová životnost dodržena s definovanou úrovní spolehlivosti musí být předem určeny některé další požadavky. Tato otázka je v současných návrhových postupech často opomíjena. Trvanlivost je tradičně zajišťována v konečné fázi návrhu zápisem konkrétních požadavků do specifikace projektu. Tento postup nemůže zaručit předem stanovenou provozní životnost.

Příklad návrhu velkého betonového mostu situovaného v agresivním prostředí na provozní životnost 100 let ilustruje velký počet skutečných návrhových situací (obr. 12).

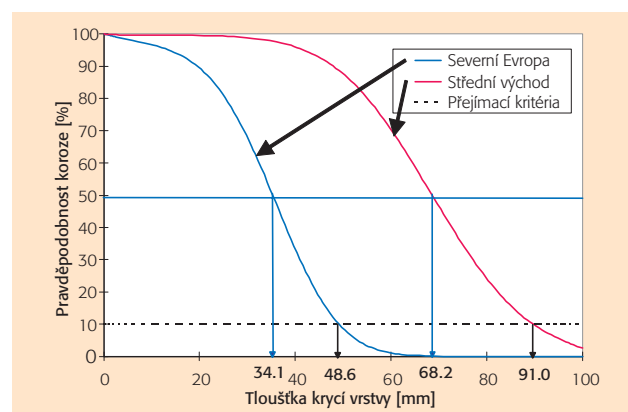
Antikoroziní ochranu výztuže zajišťuje především kvalita betonu v krycí vrstvě a její tloušťka. Základní pravidla projektu řeší i možný negativní účinek tvoření trhlin. Dodatečnými parametry, které musí být předem specifikovány, aby bylo možno provést konstrukční návrh, jsou tloušťka krycí vrstvy, maximální povolená šířka povrchové trhliny a přijatelná úroveň spolehlivosti. Tloušťka krycí vrstvy předznamenává geometrické hranice návrhu. Je to banální informace, ale pro provozní životnost je mnohem významnější, než se obvykle předpokládá. Šířka trhliny ovlivňuje míru pronikání agresivních látek. To je důležitý fakt, ale jeho vliv na provozní životnost je často značně přeceňován.

Báze návrhu musí obsahovat dodatečné informace, které zajistí odpovídající kvalitu betonu, podle ní bude stanovena tloušťka krycí vrstvy s předem určenou úrovní spolehlivosti:

- agresivitu prostředí vyjádřenou povrchovou koncentrací chloridů Cl_s
- maximální přijatelný obsah chloridů v počáteční betonové směsi Cl_0

Obr. 11 Probabilistický přístup

Fig. 11 Probabilistic approach



- maximální přijatelný difúzní koeficient chloridů specifikovaný standardní zkušební metodou v určeném stáří D_{Cl}
- předpokládaná kritická koncentrace chloridů spouštějící korozi Cl_{cr}
- faktor stárnutí ve vztahu k druhu cementového pojiva α .

Předem stanovená úroveň spolehlivosti je dána indexem spolehlivosti β . Podle Euronorem se mezní stavy provozuschopnosti ověřují na základě indexu spolehlivosti $\beta_{95} = 1,5$ až $1,8$, což odpovídá pravděpodobnosti překročení mezního stavu 6,7 až 3,6 %. V příkladu byla přijata desetiprocentní pravděpodobnost překročení mezního stavu. Koroze nastoupí před koncem návrhové provozní životnosti. To odpovídá přibližně $\beta = 1,3$.

Byly uvažovány tři podmínky vystavení vnějším vlivům se vstupními parametry (tab. 1).

Po provedení probabilistického výpočtu (obr. 9) získáme teoretické hodnoty tloušťky krycí vrstvy (tab. 2), které odpovídají hodnotám β .

Při výběru hodnoty konečné tloušťky krycí vrstvy se musí být teoretické hodnoty uvedené v tab. 2 upraveny (zvýšeny) na praktické, např. dle maximální velikosti zrna kameniva. Podle toho budou určeny rozměry distančních podložek.

ZÁVĚRY

Mechanismy stárnutí konstrukce, zvláště koroze výtzuže, účinky mrazu, alkalické reakce kameniva, působení sulfátů atd., způsobují závažná předčasná poškození betonových konstrukcí. Výzkum těchto procesů v posledních letech i nalezení jejich hlavních parametrů vedly ke změnám v modelování provozní životnosti, které se stalo realistickým nástrojem projektanta při zpracování návrhů se zohledněním kvantifikované provozní životnosti.

Zavedení probabilistických metod k řešení nejistot vlastních kvalitě betonu a agresivité prostředí umožňuje nyní kvantifikovat úroveň spolehlivosti návrhů provozní životnosti. Proto je možné aktualizovat během následných trvanlivostních zkoušek v rámci údržby předpověď provozní životnosti s rostoucí spolehlivostí.

Nové možnosti mohou přinést tvorbu mnohem lépe fungujících konstrukcí i podstatné úspory v oblasti budoucí údržby a nákladů na opravu betonových konstrukcí, pokud budou stavebnictví i majitelé seriózně zvažovat skutečný potenciál a jeho následky. K tomu je ovšem třeba považovat beton za živý materiál ve smyslu časem proměnných vlastností, což poukazuje na nezbytnost monitorování betonových konstrukcí. Skutečné a rozhodující vlastnosti betonu a betonových konstrukcí je možné stanovit až během prováděcí etapy. To znamená, že v návrhové fázi, ani v době podepisování kontraktu nejsou známy.

Skutečné zlepšení stavu je nemyšlitelné bez zásadních změn v přístupu majitelů k požadavkům na provozní životnost a bez revize způsobu uzavírání smluv a zákonné odpovědnosti.

Abychom zajistili požadovanou provozní životnost, musí majitel definovat kvalitu a provozní životnost, které vyžaduje. Musí kontrolovat, že kvalita materiálů a provedení jsou uspokojivé a musí za tuto kvalitu zaplatit. Proto ze všeho nejdříve musí rozhodnout o technické a finanční podpoře, které potřebuje. Ve svém dalším rozhodnutí musí uznat nezbytnost integrace vhodných údržbo-

Obr. 12 Klíčový dálniční spoj, zahrnuje zavěšené mosty s přístupovými poli a betonovým tunelem ponořeným v rekordní hloubce

Fig. 12 A vital motorway link comprising cable stayed bridges with approach spans, and record-depth immersed concrete tunnel

Tab. 1 Vstupní parametry do návrhu provozní životnosti založeném na spolehlivosti

Tab. 1 Input parameters to a reliability based service life design

Parametry	Ponořená oblast	Přílivová a rozstřiková oblast	Atmosférická oblast
Cl_s [% váhy pojiva]	2,5	4	2
Cl_o [% váhy pojiva]	0,1	0,1	0,1
D_{Cl} [10^{-12} m ² /s]	2	2	2
Cl_{cr} [% váhy pojiva]	2,2	0,7	0,9
α	0,3	0,4	0,4

Tab. 2 Teoretické minimální krycí vrstvy, c [mm], k dosažení provozní životnosti 100 let s rozdílnou úrovní spolehlivosti β

Tab. 2 Theoretical minimum concrete covers, c [mm], to achieve 100 year service life with the different levels of reliability, β

β	Ponořená oblast	Přílivová a rozstřiková oblast	Atmosférická oblast
1,3	20	59	38
1,5	22	63	40
1,8	25	68	44

vých postupů do návrhového procesu na celou provozní životnost.

My, tj. vlastníci, inženýrská komunita a společnost musíme těžit z cenných zkušeností posledních let, nikoli opakovat své vlastní chyby.

Steen Rostam, MSc PhD

hlavní inženýr COWI A/S

Parallelvej 2, DK – 2800 Kgs. Lyngby, Denmark

e-mail: sro@cowi.dk

Steen Rostam, nar. 1943, MSc v 1969, PhD v 1977 na Technické univerzitě Dánsko. Od roku 1972 pracuje u COWI, Dánsko, v současné době je hlavním inženýrem a specializuje se na technologii trvanlivého betonu v rámci COWI Group. Do roku 1990 působil rovněž jako docent na Technické univerzitě Dánsko. Předseda komise 5 fib (bývalá CEB): Aspekty provozní životnosti konstrukcí, od roku 1978. V roce 2003 získal od fib vyznamenání za vynikající zásluhu o profesii.

