

NAVRHOVÁNÍ ZAMĚŘENÉ NA ŽIVOTNOST: IMPLEMENTACE ZÁSAD ZAHRNUTÝCH V MODEL CODE 2010 DO PROVOZNÍ NORMY ISO 16204 ■ DESIGN FOR SERVICE LIFE: IMPLEMENTATION OF MODEL CODE 2010 RULES IN THE OPERATIONAL CODE ISO 16204

Steinar Helland

CEB/FIP Model Code 1990 (MC-1990) [1] reprezentoval technologie a zaměření tak, jak byly aktuální před dvaceti lety. Brzy se ukázalo, že dokument má v některých oblastech významné mezery. V roce 1995 valné shromáždění obou organizací schválilo dokument publikovaný v CEB/FIP bulletinu č. 228 [2], rozšíření MC 1990 o vysokopevnostní beton a v roce 2000 bylo publikováno podobné rozšíření MC 1990 pro beton z lehkého kameniva jako bulletin č. 4 [3]. V roce 2006 *fib* schválil k používání Model Code pro navrhování dle životnosti (MC SLD) publikovaný v bulletinu č. 34 [4]. Všechna uvedená (tři) rozšíření postupně vyžrála a jsou v současnosti zahrnuta v novém *fib* Model Code 2010 (MC-2010) [5, 6 a 7]. Hlavním cílem přípravy *fib* Model Code je vytvořit modelovou normu, která slouží v dalším období jako podklad pro zpracování konečných návrhových a prováděcích norem. Odpovídajícím protějškem k organizaci, jako je *fib*, je celosvětově rozšířené ISO. Iniciativa shrnutá v MC SLD byla proto dále rozpracována v ISO TC-71/SC-3/WG-4 a během léta roku 2012 byla přijata jako norma ISO 16204 „Trvanlivost – Návrh životnosti betonových konstrukcí“ [8]. Podle závazků stanovených smlouvou WTO (Světová obchodní organizace) o technických bariérách v obchodu [9] se očekává, že uvedené principy budou implementovány do národních a regionálních standardů. Článek popisuje potřebu standardní metodologie pro navrhování na životnost a proces, který vyvolala skupina nadšenců prostřednictvím organizace *fib* před deseti lety a který nyní konečně dospěl k mezinárodnímu konsenzu v ISO. ■ CEB/FIP Model Code 1990 (MC-1990) [1] did represent the technology and focus some 20 years ago. It soon became evident that the document had some important lacunas. In 1995 the General Assemblies in the two organisations endorsed CEB/FIP bulletin no. 228 [2], extensions to MC 1990 for high strength concrete and in 2000 a similar extension to MC 1990 for lightweight aggregate concrete as bulletin no. 4 [3]. In 2006, *fib* approved bulletin no. 34 Model Code for Service Life Design (MC SLD) [4]. All these three extensions have since matured and are today incorporated in the new *fib* Model Code 2010 (MC-2010) [5, 6, 7]. The main purpose for a *fib* Model Code is to act as a model for operational standards. The obvious counterpart for a body like *fib* operating world-wide is ISO. The initiative taken by MC SLD has therefore further matured in ISO TC-71/SC-3/WG-4 and was accepted as ISO 16204 “Durability – Service Life

Design of Concrete Structures” [8] during summer 2012. According to the obligations given in WTO Agreement on technical barriers to trade [9], it is hoped that these principles will be further implemented in national and regional standards. This article describes the need for a transparent methodology when dealing with service life design and the process, originating from a group of enthusiasts one decade ago, through *fib* and finally reaching international consensus in ISO.

VÝCHOZÍ SITUACE

Trvanlivost betonových konstrukcí, a zvláště nedostatečná trvanlivost, byla v posledních dekádách v centru pozornosti společnosti obecně. Rostoucí potřeby oprav se staly výzvou pro stavební průmysl.

Tradiční přístup většiny národních či regionálních betonářských norem se zaměřuje na zajištění určité návrhové životnosti pomocí mezních hodnot kompozice materiálu a geometrie konstrukce, které vychází z názorů odborníků zastoupených v normotvorné skupině.

Tento přístup však má určité slabiny, např.:

- Často je nejasné, které podmínky vyjadřují konec životnosti.
- Požadovaná úroveň spolehlivosti je v návrhu často nejasná.
- Kritéria by měla být založena na dlouhodobých praktických zkušenostech. Pro nové materiály a konceptuální návrh však jsou takové zkušenosti nedostupné a koncept se sledováním životnosti delším než 50 let je užíván zřídka.

V roce 1998 skupina evropských nadšenců, všichni dlouhodobě činní v CEB a FIP, podepsala s Evropskou komisí kontrakt na vývoj společné platformy pro návrh betonových konstrukcí se zaměřením na trvanlivost, který bude zahrnovat stejné prvky a filozofii jako moderní návrh konstrukcí. Tato evropská síť byla nazvána „DuraNet“ a kontrakt běžel do roku 2001.

Účastníci (z Evropy a Severní Ameriky) závěrečného workshopu „DuraNet“, který se konal v roce 2001 v norském Tromsø, vypracovali plán postupu pro standardizaci nové metodologie a její celosvětové přijetí v betonovém stavebnictví (obr. 1).

Zdálo se tedy, že ISO je pro tuto činnost nejvhodnější prostředím.

Někteří členové naší skupiny se proto zúčastnili zasedání ISO TC-71 na podzim roku 2001 v Norsku a představili tam naše vize. Členové TC-71, která je zodpovědná za normalizaci v oblasti betonu na půdě ISO, podpořili naši iniciativu,



Obr. 1 Duranet workshop v Tromsø, 2001, který přišel s „cestovním plánem“, jak implementovat mezní stavy a na spolehlivosti založený návrh životnosti do norem ■ Fig. 1 The Duranet workshop in Tromsø, 2001, coming up with a road-map for how to implement limit state and reliability based service life design in standards

ale dali nám na vědomí, že ISO obvykle vychází ve své činnosti z již existujících dokumentů. Proto jsme se společně rozhodli požádat mezinárodní betonářskou federaci *fib* (kteřá v té době vznikla sloučením aktivit CEB a FIP) o vypracování vhodné předlohy pro normu.

Na půdě *fib* byla z předních odborníků z Evropy, Severní a Jižní Ameriky a Japonska ustanovena Pracovní skupina 5.6 (Task Group – TG 5.6).

V roce 2006 byl valným shromážděním *fib* schválen v Neapoli *fib* „Model Code pro návrh podle životnosti“ (bulletin č. 34).

fib TG 5.6 předsedal prof. Peter Schiessl z Německa. Dalšími členy komise byli Gehlen (Německo), Baroghel-Bouny (Francie), Bamforth (Velká Británie), Corley (USA, současný předseda ISO TC-71), Faber (Dánsko), Helene (Brazílie), Ishida (Japonsko), Markeset (Norsko), Nilsson (Švédsko), Rostam (Dánsko) a Helland (Norsko).

Komise se brzy rozhodla vytvořit paralelní dokument k ISO 2394 „General principles on reliability for structures“ [10] (ČSN ISO 2394 Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí). Tato norma tvoří dnes referenci pro *fib* MC-2010 a nejmodernější normy pro navrhování konstrukcí. ISO 2394 je také zdrojovým dokumentem pro evropský Eurocode-0 „Basis of structural design“ (EN 1990) [11] (ČSN EN 1990 (730002) Zásady navrhování konstrukcí).

fib potom založil svůj přístup na mezních stavech (MS) a konceptu spolehlivosti.

Tento přístup uznává, že povaha časově závislé degradace betonových konstrukcí musí být vyjadřována statistickým způsobem ze dvou důvodů:

- přirozeného rozptylu materiálových vlastností,
- rozptylu v meso- i mikroklimatických podmínkách, kterým je betonová konstrukce vystavena.

Od roku 2006 *fib* skupina připravující MC-2010, Special Activity Group no. 5, úzce spolupracuje s ISO TC-71/SC-3/WG-4.

Na jaře roku 2013 (v době, kdy vyšla angl. verze tohoto článku v *Structural Concrete Vol. 14, March 2013, pozn. red.*) byl *fib* MC-2010 dokončován včetně částí zahrnujících návrh dle životnosti.

V létě roku 2012 získala norma ISO 16204 „Durability – Service life design of concrete structures“ pozitivní mezinárodní podporu.

Tyto dva dokumenty jsou dnes, s výjimkou obalu a odkazů, téměř identické pohledem na návrh konstrukcí podle životnosti.

PŘÍSTUP VĚTŠINY NOREM K NÁVRHU ŽIVOTNOSTI

Ustanovení k zajištění dostatečné trvanlivosti jsou dnes běžně zahrnuta v betonářských normách. V Evropě je trvanlivost stále vnímána jako národní specifikum a předpokládá se, že ustanovení, která se k ní vážou, budou součástí národní přílohy k evropské normě. V CEN TR 15868 [12] zpracoval Tom Harrison srovnání, jak 31 evropských zemí spolupracujících v CEN řešilo požadavek uvedený v EN 1992/EN 13670/EN 206-1 [13, 14, 15] stanovující 50letou životnost založenou na požadavcích vážících se zejména k maximálnímu poměru w/c , minimální krycí vrstvě výztuže a typu cementu.

Rozptyl požadavků na konstrukce vystavené obdobným podmínkám je pozoruhodný. Některé příklady pro třídy prostředí XC3 (vystaveny působení karbonatace a chráněny před deštěm), XC4 (vystaveny působení karbonatace a vystaveny dešti) a XS2 (ponořeny v mořské vodě) pro pade-

Tab. 1 Srovnání některých evropských požadavků na zajištění návrhu padesátileté životnosti [12] ■ Tab. 1 Comparison of some European durability requirements to ensure 50 years design service life [12]

Rozsah XC3 opatření pro CEM I v rámci Evropy	UK → $w/c < 0,55$ a minimální krycí vrstva 25 mm	Německo → $w/c < 0,65$ a minimální krycí vrstva 20 mm
Rozsah XC4 opatření pro CEM I v rámci Evropy	Nizozemsko → $w/c < 0,5$ a minimální krycí vrstva 25 mm	Německo → $w/c < 0,6$ a minimální krycí vrstva 25 mm
Rozsah XS2 opatření CEM I v rámci Evropy	UK → $w/c < 0,5$ a minimální krycí vrstva 35 mm	Norsko → $w/c < 0,4$ a minimální krycí vrstva 40 mm

sátiletou životnost jsou uvedeny v tab. 1. Rozdíly ve skutečných provedeních pro tyto extrémní jsou opravdu velké.

Porovnání požadavků na trvanlivost z ostatních částí světa vychází podobně široké.

Předpokládáme-li, že odborné znalosti o uvažovaných otázkách jsou v těchto zemích více méně na stejné úrovni, vysvětlení lze nalézt v tom, že různé národní normové skupiny chápou odlišně, co skutečně představuje konec životnosti stejně jako jaká je zamýšlená (plánovaná) úroveň spolehlivosti.

KONCEPT MEZNÍHO STAVU PRO NÁVRH ŽIVOTNOSTI

Koncept mezního stavu uznává potřebu specifikovat podmínku, která svým splněním představuje „konec životnosti“.

Zavedení navrhování dle životnosti založené na spolehlivosti a mezním stavu v obou dokumentech, ISO 2394 a EN 1990, vyplývá z jejich zaměření. Pro *fib* TG 5.6 to potom byl jasný úkol – otevřít diskuzi o nutnosti jejich doplnění, příp. novelizaci, o odpovídající dokumenty.

Na první pohled se tyto myšlenky mohou zdát revoluční, ale ve skutečnosti tomu tak není.

Všichni zpracovatelé norem v minulosti museli mít nějakou představu o tom, co považují za „konec životnosti“, když přicházeli se svými opatřeními. Museli mít představu, zda se jedná pouze o rezavé skvrny, nebo o úplné zhroutení konstrukce. Pak uplatnili koncept „mezních stavů“.

Museli si také uvědomovat, zda v návrhu na životnost počítají s jakousi průměrnou konstrukcí daného typu, či jejich většinou. Nakonec byl použit pravděpodobnostní přístup.

Avšak je čestné přiznat, že tyto postupy byly jen zřídka transparentní.

ISO 2394 definuje mezní stav použitelnosti jako stav, který odpovídá podmínkám, za kterých již není možné splnit požadavky na použitelnost konstrukce nebo konstrukčních prvků.

fib MC SLD, MC-2010 a ISO 16204 užívají stejnou definici, ale MC-2010 prosazoval skupinu „Mezních stavů spojených s trvanlivostí“ jako samostatnou kategorii.

V principu to může být jakýkoliv stav, který způsobí, že vlastník objektu se cítí nepohodlně. Pro betonové konstrukce je koroze výztuže často kritickým procesem zhoršení kvality konstrukce. Mezním stavem může být depasivace výztuže, vznik trhlin, odprýskávání či kolaps konstrukce (mezní stav únosnosti). Vzhledem k problémům při vývoji spolehlivých časově závislých modelů pro postup koroze (po depasivaci) je mezní stav depasivace možností, která je přijatelná pro většinu inženýrů.

ÚROVEŇ SPOLEHLIVOSTI – NÁSLEDKY SELHÁNÍ

fib MC SLD, MC-2010, EN 1990 a ISO 2394, všechny navrhuji tříúrovňové rozdělení následků dosažení mezního stavu:

- nízké riziko pro život – ekonomické, sociální a environmentální následky jsou malé nebo žádné,
- střední riziko pro život – ekonomické, sociální a environmentální následky jsou značné,
- vysoké riziko pro život – ekonomické, sociální a environmentální následky jsou velmi vysoké.

Vycházejíce z odpovídající třídy následků a v kombinaci s uvážením nákladů na bezpečnostní opatření by měla být při návrhu životnosti stanovena odpovídající úroveň spolehlivosti tak, aby nedošlo k dosažení mezního stavu.

V rámci pravidel, která lze obvykle najít v národní stavební legislativě, by úroveň spolehlivosti použitá v návrhu měla být odsouhlasena majitelem stavby.

fib a ISO navrhuji limitní pravděpodobnost porušení $p_f = 10^{-1}$ pro depasivaci výztuže (karbonatací nebo napadením chlořidy) v případech, kdy přístup oxidu a vlhkosti umožňují vnik korozí. Když je jako MS chápán kolaps konstrukce, je možné uvažovat $p_f = 10^{-4}$ až 10^{-6} podobně, jako v tradičním návrhu konstrukce, pokud možné následky jsou v třídách b) a c).

KONEC ŽIVOTNOSTI

Jak bylo uvedeno, hlavním prvkem dokumentů fib a ISO je doplněná kvantitativní definice k původní kvalitativní, kterou lze najít v tradičních normách, např. v ISO 2394 nebo EN 1990:

- Tradiční kvalitativní definice: *Návrh životnosti je předpoklá-*

dané období, po které konstrukce nebo její část má být užívána pro svůj zamýšlený účel při odpovídající údržbě, ale bez nutnosti významných oprav.

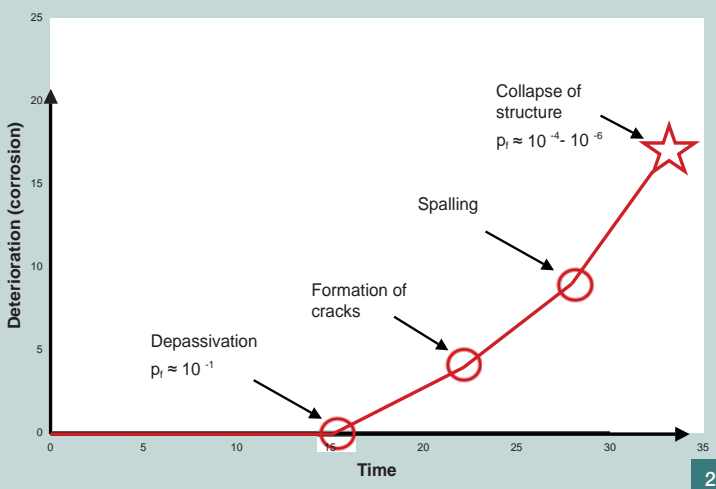
- Kvantitativní doplnění dle fib a ISO: *Návrh životnosti je definován pomocí:*

- definice odpovídajícího MS,
- počtem let,
- úrovně spolehlivosti, se kterou nebude dosaženo MS během tohoto období.

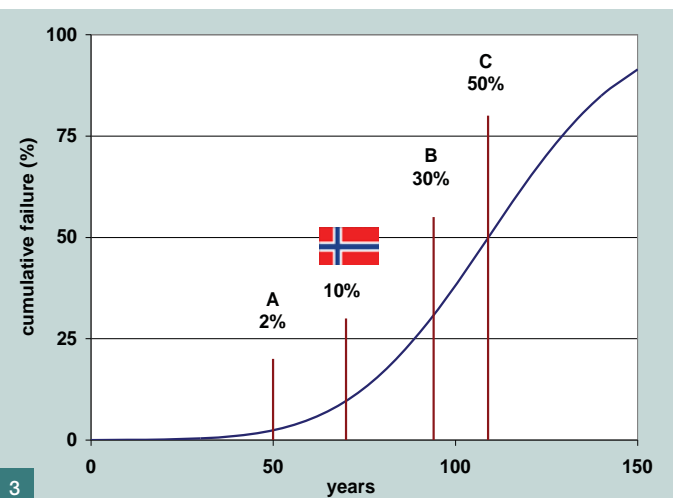
Obr. 2 ukazuje, jak mohou být různé mezní stavy spojovány s odpovídajícími úrovněmi spolehlivosti, že nebude dosažen mezní stav v rámci návrhu dle životnosti v případě, kdy korozí výztuže je kritickou situací.

V principu musí ověření návrhu prokázat, že konstrukce vydrží všechny kombinace MS s pravděpodobností poruchy p_f . Pro praktický návrh nemusíme mít vhodné časově závislý model pro predikci vzniku korozí po dosažení depasivace výztuže, pro který bylo dosaženo mezinárodního konsenzu. Odpovídající p_f potom musí být dostatečně nízké, aby bylo zajištěno, že tento MS dá stejné nebo přísnější požadavky na materiál a tloušťku krycí vrstvy než ostatní kombinace.

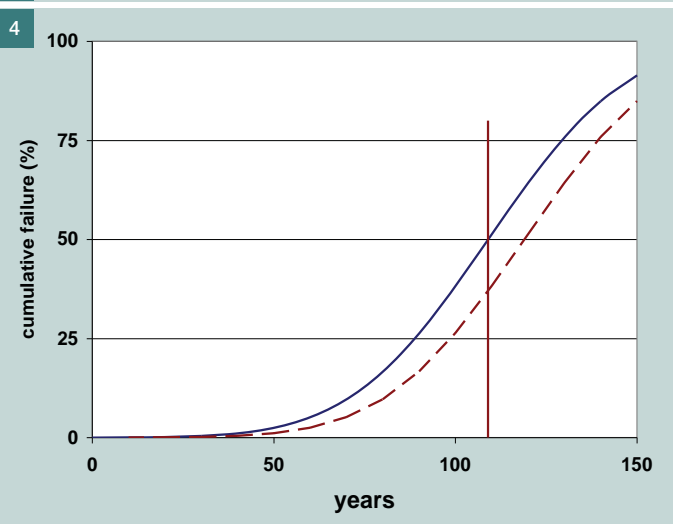
Uvažujeme-li účinek korozí výztuže po její depasivaci, měl by zde být vedle účinků jiných mechanických namáhání na krycí vrstvu zahrnut i účinek rozpínavých tlaků korozních produktů výztuže. Kdekoliv, kde působí napětí v soudržnosti na výztuž, působí také „rozpínavé napětí“ (bursting stresses) v betonu, které je stejné povahy jako expanzní tlaky korozních produktů, vedoucí až k mezním situacím, tj. ke vzniku trhlin a odprýskávání krycí vrstvy.



Obr. 2 Různé mezní stavy a odpovídající úrovně spolehlivosti na příkladu postupující korozí výztuže ■ Fig. 2 Various Limit States and related reliability levels exemplified for corrosion of reinforcement



Obr. 3 Čas do depasivace povrchu výztuže (příklad převzat z [16]), norská standartizace stanovila 10% přijatelnost pro depasivace jako kritérium stanovující opatření trvanlivosti, zatímco země A, B a C stanovují 2%, 30% a 50% přijatelnost ■ Fig. 3 Time till depassivation of reinforcement surface (example derived from [16]). The Norwegian Standardisation body applied a 10% acceptance for depassivation as criteria when determining its durability provisions, while country A, B and C applied 2%, 30% and 50%, resp.



Obr. 4 Stejný příklad jako na obr. 3, ale přidáno 10 let probíhající korozí k dosažení vzniku trhlin a odprýskávání krycí vrstvy, MS na 50% pravděpodobnosti depasivace potom dává cca 35% pravděpodobnost porušení pro MS vzniku trhlin a odprýskávání ■ Fig. 4 The same example as in Fig. 3, with added 10 years active corrosion to reach cracking and spalling of the rebar cover. The Limit State at 50% probability for depassivation then gives a ≈ 35% probability of failure for Limit State cracking and spalling

To je další z argumentů pro vyloučení „minového pole“ vzniku trhlin a odprýskávání jako kritéria MS pro návrh životnosti.

Budeme-li se věnovat příkladu depasivace výztuže způsobené karbonatácí, všechny sledované charakteristiky budou mít určitý statistický rozptyl. Bude to např. skutečná tloušťka krycí vrstvy, mikroklimatické podmínky, vlhkost betonu, jeho ošetřování ad. Výsledek, určený interval iniciace koroze, bude mít také jistý statistický rozptyl.

Obr. 3 odvozený Bamforthem [16] ukazuje kumulativní čas depasivace povrchu výztužných prutů v konstrukci s probíhající karbonatácí. Pro stanovení skutečné životnosti této konstrukce musí MS depasivace odpovídat úrovni spolehlivosti. Ve fib komisi 5, TG 5.11 v současné době připravujeme podpůrný dokument k MC-2010 / ISO 16204. Práce odhaluje, že norské požadavky, současně považované za dostatečné, používají $p_f = 10^{-1}$. V tomto případě je dosažena životnost 70 let. Avšak představitelé tří jiných evropských zemí uvedli, že odborníci z jejich normotvorných organizací udávají jako vhodné hodnoty p_f $2 \cdot 10^{-2}$, $3 \cdot 10^{-1}$ a $5 \cdot 10^{-1}$ (2, 30 a 50 %). To dává rozptyl nominální životnosti 50 až 109 let pro stejnou konstrukci vystavenou stejnému prostředí.

Tento nedostatek shody v užití spolehlivosti vycházející z konceptu mezních stavů je pravděpodobně hlavním důvodem pro výše uvedené velké rozdíly v požadavcích trvanlivosti mezi evropskými normami. Současný nedostatek transparentnosti je také velmi matoucí pro odbornou veřejnost, mezi níž se o návrhu životnosti diskutuje.

V obr. 4 jsem zahrnul často používaný předpoklad, že uplyne deset let mezi napadením výztuže korozí a vznikem trhlin, případně počátkem odprýskávání krycí vrstvy. V takovém případě národně akceptovaná 50% pravděpodobnost depasivace výztuže implikuje také přijatelnou 35% pravděpodobnost vzniku trhlin a počátku odprýskávání krycí vrstvy.

Zatímco je pro klienta snadné přijmout vysokou pravděpodobnost dosažení nedramatických projevů, jako depasivace výztuže, během životnosti konstrukce, je pro něj mnohem obtížnější přijmout vznik a rozvoj trhlin a odprýskávání krycí vrstvy. Následky související s příliš vysokou pravděpo-

Tab. 2 ISO 2394, Table 1 [10], dává příklady návrhové životnosti, stejná tabulka je v EN 1990 [11]. ISO 16204 [8] udává, že by měly být použity tři třídy s ohledem na konstrukční části budovy, kde je oprava obtížná nebo drahá ■ Tab. 2 ISO 2394, Table 1 [10], gives examples of design service lives. The same table is given as guidance in EN 1990 [11]. ISO 16204 [8] states that class 3 should be used with care for structural parts of buildings where repair is complicated or expensive

Třída	Národní návrhová životnost [roky]	Příklady
1	1 až 5	dočasné konstrukce
2	25	vyměnitelné konstrukční části, např. jeřábové nosníky, ložiska
3	50	budovy a další konstrukce, které nejsou uvedeny níže
4	100 a více	monumentální budovy a jiné speciální nebo důležité konstrukce, velké mosty

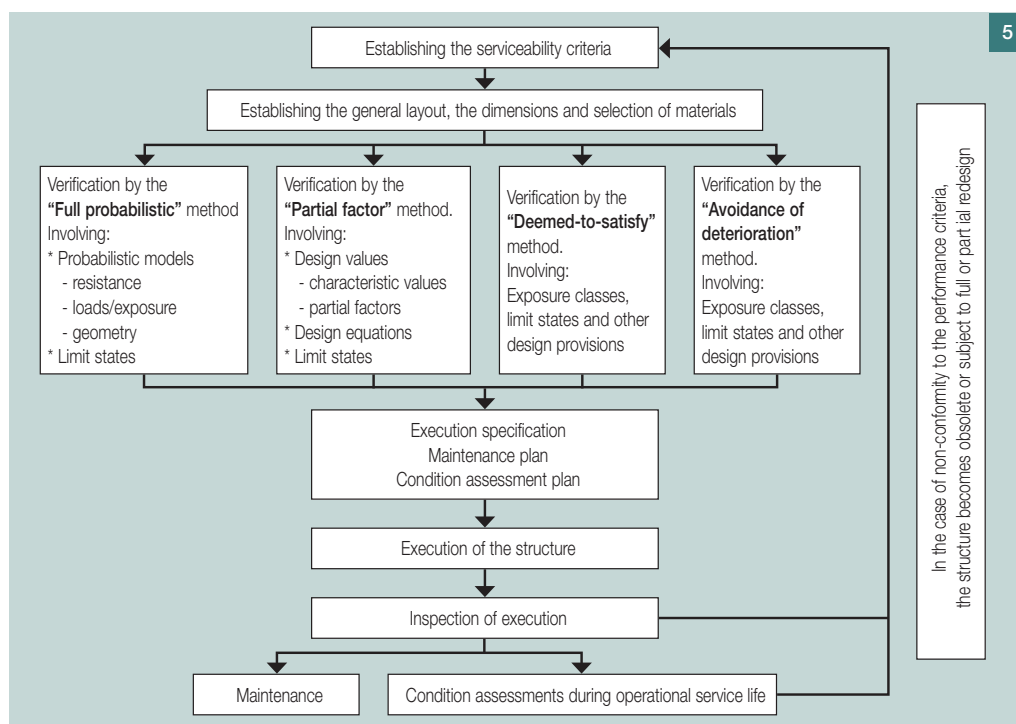
dobností poruchy související s depasivací výztuže by proto měly být řádně objasněny.

JAKÁ JE PŘIJATELNÁ DÉLKA NÁVRHOVÉ ŽIVOTNOSTI?

ISO 2394 dává návod pro přijatelnou volbu délky návrhové životnosti (tab. 2).

Stejný návod je uveden v evropské normě EN 1990 a je v praxi nejčastěji užívaným postupem v nejvýznamnějších částech světa. Tabulka je však obecně platná pro všechny typy stavebních materiálů a měla by být užívána pro betonové konstrukce s nejvyšší opatrností. A to zvláště pro třídu 3 zahrnující budovy, která je nejrozmanitější skupinou. Některé budovy, např. továrny, mají životnost stanovenou ekonomicky v závislosti na instalovaném strojním vybavení. Na druhé straně konstrukční části rezidenčních budov budou mít obecně ve společnosti očekávanou životnost mnohem delší než 50 let (tab. 2).

ISO 16204 proto důrazně doporučuje uživatelům používat vyšší hodnoty přinejmenším pro ty konstrukční části betonových budov, kde by oprava nebo výměna prvků byla obtížná nebo finančně nákladná.



Obr. 5 Vývojový diagram pro návrh životnosti [8] ■ Fig. 5 Flowchart for service life design [8]

NÁVRH ŽIVOTNOSTI A JEJÍ VERIFIKACE

Návrh konstrukce zahrnuje všechny činnosti potřebné k nalezení vhodného řešení z hlediska funkčních, environmentálních a ekonomických požadavků (definice v MC-2010).

To znamená, že činnosti směřující k návrhu životnosti by měly probíhat dle vývojového diagramu na obr. 5. Podobný graf je obsažen v MC SLD a slovně popsán v fib MC-2010.

Kritéria použitelnosti musí být odsouhlasena majitelem objektu v rámci platné legislativy.

Dokumenty nespecifikují, jak projektant vyřeší základní dispoziční, rozměry a výběr materiálů. Ověření/posouzení návrhu v projektu je však důrazně požadováno. fib i ISO dokumenty umožňují čtyři formy posouzení návrhu životnosti:

- Plně pravděpodobnostní metoda: Čas k dosažení MS s požadovanou úrovní spolehlivosti je počítán na základě statistických dat o zatížení vlivem prostředí a odolnosti konstrukce.
- Metoda dílčích součinitelů bezpečnosti: Postup je podobný jako v případě plně pravděpodobnostní metody, ale statistická data o zatížení a odolnosti konstrukce jsou nahrazena charakteristickými hodnotami a dílčími součiniteli bezpečnosti.
- Metoda dodržení zásad životnosti (*The deemed-to-satisfy method*): Soubor podmínek (obvykle w/c , tloušťka krycí vrstvy výztuže, šířka trhliny, pórovitost ad.), pro něž jsou normotvornou komisí stanovena návrhová kritéria splnění.
- Metoda vyloučení vlivů způsobujících degradaci (*The avoidance-of-deterioration method*): tato metoda předpokládá, že k degradačnímu procesu nedojde, protože např. zatížení a konstrukce jsou odděleny obkladem nebo membránou, jsou použity nereaktivní materiály, reakce jsou potlačeny pomocí elektrochemických metod ad.

Pátý způsob nabízený MC-2010 pro ověření celkové únosnosti konstrukce, tzv. celková odolnost, není pro návrh životnosti používán.

Obě metody, metoda dílčích součinitelů bezpečnosti i metoda dodržení zásad životnosti, by měly být kalibrovány, a to buď plně pravděpodobnostní metodou, nebo na základě dlouhodobých zkušeností s použitím tradičních postupů.

Z uvedených čtyř možností je plně pravděpodobnostní metoda nejsložitější a nejpropracovanější. Proto je pro většinu akademiků tou nejprestižnější a nejpřesnější. To je však zásadně špatně. Vzhledem k běžnému nedostatku dobrých a reprezentativních dat, a nejistotám v modelování, je plně pravděpodobnostní metoda jen zřídka vhodná pro návrh nové konstrukce. Na druhou stranu je to však metoda velmi vhodná pro posouzení zbytkové životnosti existujících konstrukcí, kde data mohou být získána ze skutečné konstrukce.

Posuzováním zbytkové životnosti stávajících konstrukcí pomocí plně pravděpodobnostní metody získáváme velmi silný nástroj pro ověřování metody dodržení zásad životnosti (*deemed-to-satisfy*) a jejich ustanovení pro návrh nových konstrukcí v podobné expozici i dalších návrhových podmínkách.

Metoda dílčích součinitelů je semi-pravděpodobnostní přístup, kde jsou výpočty prováděny deterministicky a statistický rozptyl vstupních parametrů je do procesu vnášen prostřednictvím dílčích součinitelů. Kalibrace těchto dílčích součinitelů pro návrhovou životnost v obecném použití je velmi náročná a její praktické využití je proto v blízké budoucnosti obtížně představitelné.

Oba dokumenty, MC-2010 i ISO 16204, předpokládají, že metoda dodržení zásad životnosti i metoda vyloučení vlivů způsobujících degradaci budou dominantní při praktickém

návrhu životnosti nových konstrukcí v budoucnosti, ale ustanovení první z nich se budou vztahovat ke specifickým MS a spolehlivosti. Toto bude dále ověřováno normalizační komisí a komunikováno s odbornou veřejností.

MODELOVÁNÍ

Obecně

Abychom mohli používat plně pravděpodobnostní metodu a metodu dílčích součinitelů bezpečnosti, potřebujeme modely, které dokážou popsat degradační proces v čase.

Takových a ještě se širokým mezinárodním konsenzem však v naší oblasti (*betonové stavebnictví, pozn. red.*) zatím mnoho není.

fib MC SLD, MC-2010 a ISO 16204 doporučují 2. Fickův zákon modifikovaný časově závislým difúzním koeficientem pro průnik chloridů a tradiční model druhého odmocniny času pro karbonataci. Oba modely, popsané a vysvětlené v uvedených třech dokumentech, jsou vysvětleny i v dalším textu.

Dokumenty nevylučují pro užívání také další modely s podmínkou, že jsou dostatečně ověřeny zkušenostmi v reálných případech.

Karbonatace

Postup karbonatace lze popsat následujícím vztahem

$$x_c(t) = W \cdot k \cdot \sqrt{t}, \quad (1)$$

kde k je součinitel vyjadřující základní odolnost vybrané betonové směsi (poměr w/c , typ cementu, přísady) v referenčních podmínkách a za vlivu základních podmínek prostředí (tj. relativní vlhkosti a koncentrace CO_2) proti postupu karbonatace. Odráží také vliv provádění betonové konstrukce. W vnáší do vztahu vliv proměnných meso-klimatických podmínek pro specifický betonový prvek během jeho životnosti, jako jsou vlhkost a teplota.

Při návrhu nové konstrukce mohou být faktory k a W odvozeny ze záznamů o stávajících konstrukcích, kde je návrh směsi betonu, provádění i vystavení podmínkám prostředí podobné jako u nově navrhované konstrukce.

Pro posouzení zbytkové životnosti stávající konstrukce mohou být hodnoty k a W stanoveny přímo dle stavu vyšetřované konstrukce.

Průsak chloridů

Průsak chloridů z mořské vody (*nebo rozmrazovacích solí, pozn. red.*) by měl být posuzován pomocí následujícího vztahu

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{app}}(t) \cdot t}} \right) \right]. \quad (2)$$

V tomto modifikovaném 2. Fickově zákonu difúze $C(x, t)$ vyjadřuje obsah chloridů v betonu v hloubce x (povrch konstrukce: $x = 0$ mm) a v čase t [wt. – %/obsah pojiva], C_s obsah chloridů v povrchové vrstvě betonu [wt. – %/obsah pojiva], C_i počáteční obsah chloridů v betonu [wt. – %/obsah pojiva], x je hloubka odpovídající obsahu chloridů $C(x, t)$ [mm], $D_{\text{app}}(t)$ je koeficient difúze chloridů betonem [mm^2/rok] v čase t (viz vztah (3)), t čas vystavení působení chloridů [rok] a erf je chybová funkce.

$$D_{\text{app}}(t) = D_{\text{app}}(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha, \quad (3)$$

kde $D_{\text{app}}(t_0)$ je koeficient difúze měřený v referenčním čase t_0

a α je faktor věku ovlivňující snižování difúzního koeficientu v čase. V závislosti na typu pojiva a podmínkách mikroprostředí se pohybuje mezi 0,2 až 0,8.

Zdánlivý koeficient difúze po časovém úseku t vystavení působení chloridů $D_{app}(t)$ představuje konstantní ekvivalentní koeficient difúze dávající podobný chloridový profil jako měřený profil pro konstrukci vystavenou chloridovému prostředí po dobu t .

K poklesu zdánlivého koeficientu difúze dochází z několika důvodů:

- pokračující reakce pojiva,
- vliv snižování obsahu vody v kapilárách v povrchové zóně v čase,
- stupeň nasycení betonu,
- působení chloridů vniklých do betonu z mořské vody nebo rozmrazovacích solí (výměna iontů s následným zanášením (uzavíráním) pórů v povrchové vrstvě).

Pro návrh nové konstrukce lze parametry C_s , C_i , $D_{app}(t_0)$ a α odvodit z nějaké stávající konstrukce, kde jsou betonová směs, provádění a podmínky expozice stejné jako ty předpokládané pro novou konstrukci.

Při posuzování zbytkové životnosti stávající konstrukce, faktory, s možnou výjimkou α , mohou být určeny přímo z odpovídajících měření na konstrukci.

Pro oba případy, návrh nové konstrukce i posouzení zbytkové životnosti stávající konstrukce, lze faktor stáří α získat z místního šetření konstrukce s podobnou betonovou směsí, realizací a podmínkami prostředí, jako u řešené konstrukce. Pro výpočet faktoru stárnutí jsou třeba výsledky alespoň ze dvou intervalů (s dostatečným odstupem mezi nimi) expozice konstrukce v chloridovém prostředí.

Další degradační mechanismy

O účinku kyselin, síranů a alkalické reakci MC-2010 a ISO 16204 uvádí, že zatím nejsou dostupné žádné časově závislé modely s širokým mezinárodním konsenzem a že plně pravděpodobnostní přístup a přístup na základě metody dílčích součinitelů bezpečnosti nejsou v těchto případech v současnosti vhodné.

Pro tyto mechanismy by měly být použity postupy zahrnuté v metodě dodržení zásad životnosti a metodě vyloučení vlivů způsobujících degradaci (*deemed-to-satisfy and avoidance-of-deterioration approaches*).

Pro rozmrazování a zmrazování byl formulován obecný časově závislý model, který je však vzhledem ke složitosti vstupních parametrů zatím obtížně použitelný. Proto by i v tomto případě měly být v praxi používány přístupy metod dodržení zásad životnosti a vyloučení vlivů způsobujících degradaci.

Jak bylo zmíněno, komise *fib* a ISO měly problém s doporučením časově závislých modelů pro výpočet rychlosti postupu koroze výztuže po její depasivaci, přestože modely schopné určit celkový objem korozivních produktů již existují. Je však u nich problematické rozlišit koncentrovanou (důlkovou) korozi a korozi rozprostřenou na větší plochu s méně vážnými následky.

Vliv trhlin

Intuitivně předpokládáme, že konstrukce poškozené trhlinami budou degradovat rychleji než konstrukce bez trhlin. Avšak ani *fib* ani ISO komise nerozhodly o doporučení nějakého obecného modelu, který by zahrnoval tento jev.

Komise zatím doporučují setrvat u zjednodušeného přístupu užívaného ve většině současných operativních norem. To znamená, že koroze výztuže není ovlivněna šířkou trhliny pod určitou hodnotou. V závislosti na náročnosti prostředí a citlivosti konstrukce je tato mezní šířka trhliny udávána jako charakteristická hodnota (horní 5% kvantil) v intervalu 0,2 až 0,4 mm.

V nejtvrdějších podmínkách expozice (např. expoziční třídy XD3/XS3, jak je definuje ISO 22965-1 [17] a EN 206-1), jsou-li použitelnost nebo konstrukční celistvost narušeny a jestliže sledování, kontroly a případné zásahy nelze provádět, je doporučeno vyloučit vlivy způsobující degradaci.

Nejistoty v modelech a datech

Jako inženýři skromně přiznáváme a připouštíme, že mode-



6



7

Obr. 6 Platforma Oseberg A v bouřlivém počasí [19] ■

Fig. 6 Oseberg A platform in stormy weather [19]

Obr. 7 Inspektor posuzující stav betonového pláště těžní platformy v Norském moři [19] ■ Fig. 7 An inspector assessing the condition of a concrete shaft on a North Sea petroleum installation [19]

ly, které používáme, jsou pouze přiblížením skutečného chování konstrukcí.

Podobně jako v tradičních postupech návrhu, musí být nejistoty modelů do výpočtů zahrnuty tak, aby jejich následky byly, pokud možno, potlačeny.

Stejně tak máme základní problém, když se pokoušíme popsat dlouhodobou odolnost konstrukce pomocí zrychlených zkoušek mladých betonových prvků v laboratoři.

MC-2010 a ISO 16204 varují uživatele před nekritickým spoléháním se na předpovědi založené na laboratorních testech vzorků starých pouze několik měsíců a extrapolovaných do konce návrhové životnosti bez zohlednění nejistot modelu i vstupních dat.

Jedna z cest, jak redukovat tyto vlivy, je užívat k extrapolaci dat modely vycházející ze sledování konstrukcí vystavených po určenou dobu ve skutečném prostředí.

Norská normalizační komise užívala tento přístup, když jsme prověřovali současné požadavky na dodržení zásad životnosti zahrnuté v norských normách.

Maage a Smeplass [18] analyzovali a extrapolovali místní šetření o karbonatácii konstrukcí starých přibližně jednu dekádu.

Helland, Aarstein a Maage [19] analyzovali zbytkovou životnost deseti betonových konstrukcí v Norském moři na základě 180 chloridových profilů sestavených po 2 až 26leté expozici (obr. 6 a 7).

Obě studie byly zpracovány podle modelů a principů založených na MS (depasivaci) a stupni spolehlivosti, jak jsou popsány pro plně pravděpodobnostní metodu v MC-2010 a ISO 16240.

PŘEDPOKLADY NÁVRHU Z HLEDISKA PROVÁDĚNÍ, ÚDRŽBY A OPRAV

Navrhujeme-li novou konstrukci (nebo rekonstrukci stávající konstrukce), je třeba pracovat s některými základními předpoklady.

Proces výstavby konstrukce musí zajistit, že výsledná konstrukce bude mít vlastnosti, které předpokládal její návrh. Kvalita odváděné práce a kvalita řízení procesů na staveništi musí proto dosahovat určité úrovně. MC-2010 a ISO 16204 proto považují za minimální požadovanou úroveň splnění požadavků uvedených v ISO 22966 „Provádění betonových konstrukcí“. Tato norma je více méně identická s evropskou normou EN 13670.

Je zdůrazněno, že některé zvláštní požadavky na materiály nebo provádění vztahené k trvanlivosti nejsou vždy prováděcí normou pokryty a měly by být vyjasněny mezi autorem návrhu a realizátorem stavby jako část „specifikace provádění“.

Očekává se, že dokončená konstrukce bude řádně prohlédnuta a zkontrolována.

Je doporučováno, aby návrh a projekt konstrukce byl zakončen prováděcí dokumentací. Část této dokumentace, která obsahuje vstupní parametry k návrhu životnosti, a slouží proto jako podklad pro posouzení stavu během používání konstrukce, je často označována jako „rodný list“ konstrukce.

Pokud kontrola odhalí odchylky od specifikace, které překračují dané tolerance, musí být zahájen proces činností směřující k dosažení shody.

Předpoklady týkající se sledování konstrukce během jejího užívání jsou v MC-2010 zahrnuty v kapitole 9 „Údržba“ a pro normu ISO 16204 jako navazující norma ISO 16311 [21].

ISO 16311 pro údržbu a opravy betonových konstrukcí připravuje ISO TC-71/SC-7 pod vedením profesora Tamona Uedy, jednoho z hlavních autorů Kapitoly 9 MC-2010. Je to dal-

ší z příkladů implementace ustanovení *fib* MC-2010 do operačních norem ISO.

Dále je požadováno, aby projektant zpracoval v součinnosti s organizací, která se bude starat o provoz a údržbu konstrukce, „Plán údržby“. Tento plán by měl obsahovat instrukce k činnostem, o kterých se předpokládalo, že je bude třeba vykonávat, např. generální úklid, kontrola systému odvodnění, pravidelné prohlídky a opravy těsnění ad.

V projektu by měl být také zahrnut plán prohlídek a kontrol. Tento plán by měl stanovit:

- jaké typy kontrol jsou požadovány,
- které prvky konstrukce by měly být kontrolovány,
- frekvenci prohlídek,
- kritéria, která by měla být splněna,
- zápis výsledků kontrol,
- návrh postupu v případě, že nebudou splněna požadovaná kritéria.

Protože úroveň spolehlivosti, na které je založeno posouzení návrhu, je zvolena na základě možných následků stavu, kdy by konstrukce nevyhověla odpovídajícímu MS, je důležitost prohlídek a kontrol během životnosti konstrukce velmi vysoká. Bude-li konstrukce často podrobena důkladným kontrolám kvalifikovanými pracovníky, poškození a poruchy budou rozeznány v raném stadiu, které umožňuje místní vyspravení či opravu konstrukce, což zabrání vážnějším následkům.

Není-li konstrukce (ani její části) vůbec podrobena kontrolám (často např. základy), mohou být případné následky jejich poruch či poškození mnohem vážnější.

Je třeba, aby to bylo vzato v úvahu už při návrhu a v projektu konstrukce.

ROZDÍLY MEZI *fib* MC SLD, *fib* MC-2010 A ISO 16240

MC SLD byl prvním z tohoto typu dokumentů. Jeho posláním bylo představit nový koncept, a proto zahrnuje rozsáhlé komentáře, vysvětlení a řadu informativních příloh s příklady použití.

Příklady byly pro čtenáře velmi užitečné, ale někteří si je špatně interpretovali a považovali je za obecně platné. Takové chyby v užívání způsobily různá nepochopení a rozčarování, protože získané výsledky byly v těchto případech nerealistické a matoucí.

Část odborné veřejnosti spojovala MC SLD pouze s modelováním na základě plně pravděpodobnostní metody. V praxi a v oblasti standardizace byla k novému přístupu z těchto důvodů značná skepse.

V kontrastu k MC SLD je MC-2010 obecný dokument pokrývající všechny oblasti návrhu, výstavby, údržby a případného odstranění konstrukce. Různé prvky důležitosti pro návrh životnosti jsou zde předkládány a rozebírány paralelně jak v návrhu konstrukce, tak i v návrhu z pohledu udržitelnosti. Hlavní prvek návrhu životnosti konstrukce je zahrnut v kapitole 7.8 „Posouzení mezních stavů z pohledu trvanlivosti“. MC-2010 nepřejal informativní přílohy z MC SLD, ale odkazuje na tento dokument, pokud čtenáři mají zájem.

Text MC-2010 je v zásadě stejný jako v normativní části MC SLD, je však vyzrálejší díky předchozím zkušenostem s MC SLD a faktu, že staré jádro *fib* TG 5.6 bylo rozšířeno o dvacet pět odborníků pracujících v komisích ISO, aby současně s *fib* SAG-5 pracovali na MC-2010.

ISO 16204 je téměř ekvivalentní v otázkách návrhu životnosti s MC-2010, ale obsahuje méně komentářů. Protože ISO 16204 je především operativní norma, její rozsah se od MC-2010 liší.

Tato mezinárodní norma specifikuje principy a doporučuje postupy pro posouzení trvanlivosti betonových konstrukcí vystavených:

- známým nebo předvídatelným vlivům prostředí způsobujícím degradaci materiálu vedoucí až k nemožnosti sloužit účelu, ke kterému byla konstrukce navržena,
- zhoršování materiálových vlastností bez agresivity ze strany vnějšího prostředí konstrukce, označované jako stárnutí materiálu.

Poznámka: Např. chloridy přítomné v betonové směsi mohou způsobit vnitřní degradaci materiálu i v případě, že další chloridy nebudou z povrchu vnikat.

Tato mezinárodní norma je určena pro národní normotvorné orgány pro jejich práci v posuzování a oceňování jejich požadavků na trvanlivost betonových konstrukcí. Norma může být také použita pro:

- posouzení zbytkové životnosti stávající konstrukce,
- pro návrh životnosti nových konstrukcí za předpokladu kvantifikovaných parametrů na úrovni spolehlivosti a návrhových parametrů daných národními přílohami tohoto mezinárodního standardu.

V příloze E k ISO 16204 jsme uvedli návod na obsah takové národní přílohy.

DALŠÍ AKTIVITY fib NA POLI NÁVRHU ŽIVOTNOSTI

Komise 5 „Aspekty životnosti konstrukce“ je základní fib komisi na toto téma. Pracovní skupiny v současnosti zpracovávající dokumenty v přímé podpoře MC-2010 a ISO 16204 jsou:

- TG 5.08 „Podmínky kontroly a posuzování železobetonových konstrukcí vystavených korozivnímu prostředí“,
- TG 5.09 „Předlohy technických specifikací pro účely oprav a zásahů“,
- TG 5.10 „Rodný list a další doklady pro management životnosti“,
- TG 5.11 „Kalibrace předpisů dodržení zásad životnosti vzhledem k trvanlivosti“,
- TG 5.13 „Operativní dokumenty pro podporu návrhu životnosti“.

ZÁVĚRY

MC-2010 zahrnuje návrh betonové konstrukce souběžně z hlediska únosnosti, její životnosti a udržitelnosti. Hlavní autor části MC-2010 zaměřené na udržitelnost je prof. Koji Sakai. Je také předsedou paralelní subkomise ISO TC-71, která se zabývá implementací těchto ustanovení do ISO 13315 [22], soustavy norem zajišťující kompatibilitu mezi oběma soubory dokumentů.

Návrh životnosti konstrukce je hlavní jmenovatel všech výpočtů zaměřených na náklady a udržitelnost pro vlastníka i společnost.

Jako předseda pracovní skupiny ISO TC-71/SC-3/WG-4 doufám, že koncept založený na MS a spolehlivosti vyvinutý fib a implementovaný ISO zlepšil současnou situaci a umožní praxi přistupovat k racionálnějších rozhodnutím.

V Evropě jsme začali s procesem revize našich hlavních normových předpisů pro výstavbu betonových konstrukcí. Výsledky tohoto procesu by se měly objevit na konci této dekády.

Spojením pracovní skupiny CEN TC-104 (materiály a provádění) a TC-250/SC-2 (návrh) s překrývajícími se náplněmi se nová metodologie dostala do jejich diskuzí. Podobná snaha zařadit fib/ISO metodologii návrhu životnosti byla vyjádřena TC-250/SC-2, když se začínalo s procesem revize EN 1992 [23].

Literatura:

- [1] CEB/FIP Model Code 90, fib – fédération internationale du béton, International Federation for Structural Concrete. Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland, 1993
- [2] FIP/CEB Bulletin No 228, High Performance Concrete. Extensions to the Model Code 90, fib, Lausanne, Switzerland, 1995
- [3] fib Bulletin No. 4, Light Weight Aggregate Concrete – part 1: Recommended extensions to Model Code 90, fib, Lausanne, Switzerland, 2000
- [4] fib Bulletin No. 34, Model Code for Service Life Design, fib, Lausanne, Switzerland, 2006
- [5] fib Bulletin No. 65, Model Code 2010, Final draft, Vol. 1, fib, Lausanne, Switzerland, 2012
- [6] fib Bulletin No. 66, Model Code 2010, Final draft, Vol. 2, fib, Lausanne, Switzerland, 2012
- [7] Walraven J., Bigaj-van Vliet A.: The 2010 fib Model Code for concrete structures: a new approach to structural engineering, Structural Concrete, Journal of the fib, Vol. 12, No. 3, September 2011
- [8] ISO 16204 Durability – Service Life Design of Concrete Structures, International Organization for Standardization ISO Central Secretariat. 1, ch. de la Voie-Creuse, CP 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland, 2012
- [9] WTO Agreement on technical barriers to trade (TBT), Uruguay Round Agreement, World Trade Organization, https://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/17-tbt_e.htm
- [10] ISO 2394 General Principles on reliability for structures, ISO, Geneva, Switzerland, 1998
- [11] EN 1990, Eurocode – Basis of structural design, CEN – European Committee for standardization, Avenue Marix 17, B-1000 Brussels, Belgium, 2002
- [12] Harrison T.: CEN/TR 15868 Survey of national requirements used in conjunction with EN 206-1:2000, CEN, Brussels, Belgium, 2009
- [13] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium, 2004
- [14] EN 13670 Execution of concrete structures, CEN, Brussels, Belgium, 2009
- [15] EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, CEN, Brussels, Belgium, 2000
- [16] Bamforth Ph.: Enhancing reinforced concrete durability, Concrete Society Technical Report no 61. The Concrete Society, Riverside House, 4 Meadows Business Park, Station Approach, Blackwater, Camberley, Surrey, GU17 9AB, 2004
- [17] ISO 22965-1 Concrete – Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier, ISO, Geneva, Switzerland, 2007
- [18] Maage M., Smeplass S.: Carbonation – A probabilistic approach to derive provisions for EN 206-1, DuraNet, Third workshop, Tromsø, Norway, June 2001, Reported in “Betongkonstruksjoners Livsløp” report no 19, Norwegian Road Administration, P.O.Box 8142, 0033 Oslo, 2001
- [19] Helland S., Aarstein R., Maage M.: In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance, Structural Concrete, Journal of the fib, Vol. 11, No. 2, June 2010
- [20] ISO 22966 Execution of concrete structures, ISO, Geneva, Switzerland, 2009
- [21] ISO/DIS 16311 Maintenance and repair of concrete structures, ISO, Geneva, Switzerland, 2011
- [22] ISO 13315 Environmental management for concrete and concrete structures, ISO, Geneva, Switzerland, 2012
- [23] CEN TC250/SC2 document N 833 Future development needs in EN 1992's, Secret. DIN, mailing address: 10772 Berlin, Germany

Doufám, že tato metodologie bude promítnuta i do „lehké“ revize evropské normy pro výrobu betonu EN 206, jejíž dokončení bylo plánováno na rok 2013 (a bylo odsunuto, pozn. red.). Revize má umožnit 31 národním normotvorným orgánům zajistit pro jejich národní přílohy v rámci CEN vyšší míru harmonizace a transparentnosti, než je tomu v současnosti.

DOI: 10.1002/suco.201200021 – původní anglický text článku v Structural Concrete, Vol. 14, March 2013, pp. 10–18.

Steinar Helland
Skanska Norge as
Post box 1175, Sentrum, 0107 Oslo, Norway
e-mail: steinar.helland@skanska.no



Pozn. red.: O dokumentech, které jsou předmětem článku, bylo referováno v Beton TKS 3/2006 a 2/2010.