

KARBONATACE BETONU, DRUHY CEMENTŮ A DOPORUČENÍ ČSN EN 206-1

CARBONATION OF CONCRETE, CEMENT TYPES AND RECOMMENDATION OF ČSN EN 206-1

**BŘETISLAV TEPLÝ,
MARKÉTA CHROMÁ,
PAVEL ROVNANÍK,
PAVLA ROVNANÍKOVÁ**

Článek doplňuje diskusi vedenou na Betonářských dnech 2005 k příspěvku [1] o úloze a užitečnosti k -hodnoty pro stanovení vodního součinitele a posuzování životnosti při používání betonů vyrobených ze směsných cementů. Jsou zde diskutovány mezní stavy trvanlivosti a přístup dle Eurokódů i přístup pravděpodobnosti.

This article fills in a discussion led on symposium Betonářské dny 2005 about the paper [1] concerning a role and usefulness of k -concept for determination of w/c ratio, if concretes prepared from blended cements are used, as well as for service life assessment. Durability limit states, Eurocode standards and probabilistic approach are discussed.

Na Betonářských dnech 2005 v Hradci Králové byl přednesen v sekci **Výzkum a nové materiály 1** příspěvek [1]. K němu se pak rozvinula diskuse, která – dle názoru autorů i některých účastníků diskuse – nebyla (a z časových důvodů ani nemohla být) zcela srozumitelně ukončena. Autoři proto využívají příležitost poskytnutou redakcí časopisu a dovolu- jí si doplnit některé související informace tak, aby byla zlepšena orientace v oblasti navrhování, resp. posuzování železobetonových konstrukcí na životnost s použitím **směsných cementů** nejenom účastníků zmíněné konference, ale i čtenářů, kteří nebyli mezi posluchači v sále.

Využívání popílku, křemičitých úletů, příp. dalších průmyslových odpadů jako přísad do cementů vede k omezení množství použitého portlandského cementu. Kromě toho, že tím mohou být příznivě ovlivněny vlastnosti betonů, to vede také ke snížení emisí CO_2 . Pokusíme se nejprve uvést problematiku trvanlivosti betonových konstrukcí vyrobených ze směsných cementů v širším kontextu. Správně navržená konstrukce by obecně měla respektovat několik okolnos-

tí (obr. 1). Zde si všimneme blíže dvou z nich: spolehlivosti a životnosti.

SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST

Spolehlivost a životnost jsou navzájem úzce spjaty: výslednicí trvanlivosti všech materiálových komponent vystavených degradaci vnějšími vlivy je **životnost** stavebního prvku, konstrukce či objektu a je vlastně kvantifikací trvanlivosti. Po celou dobu životnosti musí být vždy zajištěna také potřebná/požadovaná **míra spolehlivosti** nosných prvků konstrukce a také konstrukce jako celku, která se hodnotí ve vztahu k mezním stavům – viz [2, 3]. Podle nich se porovnávají účinky zatížení s příslušnými vlastnostmi konstrukce, i s ohledem na vlivy prostředí. Jako míry spolehlivosti se užívají alternativně index spolehlivosti β nebo pravděpodobnost poruchy P_f .

Požadovaná životnost i hladina spolehlivosti výrazně ovlivňují náklady stavebního díla, zejména když jsou hodnoceny pro celý životní cyklus [4]. Je tedy velmi důležité správně rozhodnout o návrhových hodnotách životnosti a spolehlivosti, tj. také vybrat potřebné typy mezních stavů, u kterých budeme ověřovat dodržení cílových hodnot β (nebo P_f) po dobu požadované životnosti.

Zde je nutno zdůraznit, že rozeznáváme mezní stavy:

- **únosnosti** (ve zkratce jen ULS – Ultimate Limit States): jsou vymezeny jako případy ohrožení osob, příp. bezpečnosti konstrukce – kolapsu či jiné, obdobné formy porušení konstrukce; patří sem i porušení v důsledku únavy materiálu.

Požadovaná míra spolehlivosti je v tomto případě pochopitelně předepsána legislativně (normami, tj. [2]);

- **použitelnosti** (SLS – Serviceability Limit States): odpovídají podmínkám, po jejichž překročení již nejsou splněny provozní požadavky na konstrukci či její část – funkční, vzhledové, pohoda osob. Dle základního dokumentu pro navrhování konstrukcí [2] se kritéria pro SLS mají **specifikovat a odsouhlasit s klientem!** Jde totiž převážně o ekonomické dopady, které ponese on a měl by tedy sám rozhodnout o míře spolehlivosti.

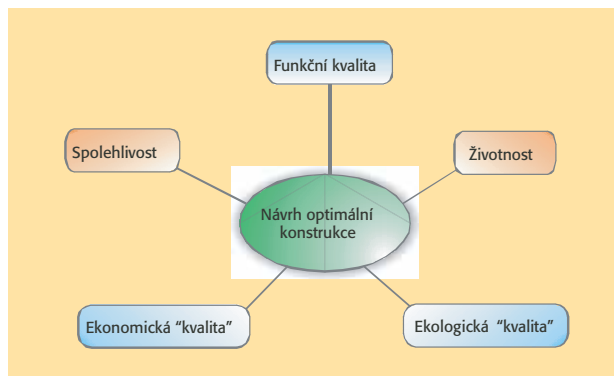
Do kategorie SLS (ale někdy též do kategorie ULS) spadají také **mezní stavy trvanlivosti** (DLS – Durability Limit States), které jsou spojeny s požadavky na životnost. Nejsou zatím v platných normách explicitně vyjmenovány jako samostatná kategorie, ale to se zřejmě brzy změní: připravované mezinárodní dokumenty [5, 6] je již definují jako samostatnou kategorii mezních stavů, kdy je iniciována degradace – spolu s poznámkou o nutnosti specifikovat či odsouhlasit s klientem požadovanou životnost a odpovídající hodnotu indexu spolehlivosti.

Diferenciace spolehlivosti není asi pro inženýra dostatečně transparentní a vlastně ani doposud nebylo vyžadováno, aby se tím zabýval. Investorům tím ale také uniká jedna z možností, jak ovlivnit – patrně příznivě – své **ekonomické výsledky**.

U železobetonových konstrukcí s ohledem na nejběžnější druh jejich degrada-

Obr. 1 Diagram obecných zásad při navrhování optimální konstrukce.

Fig. 1 Diagram of general principles for designing optimal structures.



ce, tj. na korozi ocelové výztuže, můžeme za stavy DLS považovat několik situací:

- 1) depasivaci výztuže, tj. stav, kdy se sníží koncentrace hydroxidových iontů v okolí výztuže a vytvoří se tak podmínky, kdy může započít koroze;
- 2) vznik viditelných trhlin na povrchu betonu, způsobených expanzí korozních produktů na výztuži;
- 3) odlučování betonu krycí vrstvy v důsledku pokračujících objemových změn oceli, způsobených korozi a
- 4) nepřipustné snížení únosnosti či tuhosti zmenšením efektivní plochy nosné výztuže korozi.

Každý z těchto stavů by nastal v jiném časovém okamžiku a vytyčil by tedy také jinou životnost. Vzhledem k tomu, že zmíněné mezní stavy mají odlišné ekonomické důsledky, by měly mít také odlišné cílové hodnoty indexu spolehlivosti β . Případy (3) a (4) již spadají spíše do kategorií SLS nebo ULS, ale jsou vázány také na jistou životnost. Při definování požadované životnosti pro případy (1), (2), někdy i (3), by mělo být rozhodnuto, jak velká část konstrukce má být degračním jevem zasažena, aby to již bylo považováno za mezní stav – např. v rozsahu 10 nebo 30 % celého nosného prvku či konstrukce, u případů (4) zase může rozhodovat to, které průřezy jsou oslabeny (v souvislosti se statickým schématem konstrukce).

MEZNÍ STAV TRVANLIVOSTI A KARBONATACE BETONŮ ZE SMĚSNÝCH CEMENTŮ

Postup dle Eurokódů

Pojem karbonatice je zahrnut do souboru neutralizačních reakcí, které snižují koncentraci hydroxidu vápenatého (tedy hodnotu pH) v cementovém tmelu. Neutra-

lizaci hydroxidu způsobují kyselé plyny z ovzduší, a protože je v běžné atmosféře vždy přítomen oxid uhličitý (CO_2), je největší pozornost věnována právě karbonatice. Karbonatice, která vede k vytvoření podmínek pro depasivaci výztuže, představuje tedy jeden z mezních stavů typu DLS. Životnost L je pak omezena tzv. iniciačním časem L_i , tj. dobou, která uplyne od zhotovení konstrukce do okamžiku, kdy karbonatice prostoupí celou krycí vrstvou až k výztuži. Pravděpodobnost nesplnění požadované životnosti v tomto smyslu pak může popisovat index spolehlivosti β . Při postupu dle Eurokódů je nutno mj.:

- rozhodnout, který ze stupňů vlivu prostředí (nebo-li expoziční třída) je pro daný případ relevantní. Tyto stupně jsou definovány v ČSN EN 206-1 [7], tabulka NA.1. Pro korozi vlivem karbonatice jde o stupně XC1 až 4. Tomu pak musí odpovídat složení, resp. specifikace betonu. V tab. F.1 jsou proto uvedeny informativní mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu pro dané stupně vlivu prostředí a předpokládanou životnost 50 let: maximální vodní součinitel (resp. „efektivní“ vodní součinitel $voda/(cement + k \times příměs)$) dle koncepce k -hodnoty pro cementy s příměsmi), minimální obsah cementu a minimální pevnostní třída. Kromě toho ještě tab. F.2 ukazuje použitelnost cementů pro stupně vlivu prostředí (CEM I až CEM V; druhy cementů viz tab. 1 v ČSN EN 197-1 [8]);
- při použití běžné oceli bez povrchových úprav se stanoví minimální tloušťka krycí vrstvy c betonu, což se řídí čl. 4.4.1 a tabulkami 4.3N, 4.4 eurokódu [9] ve vztahu ke stupňům prostředí, tzv. konstrukční třídě (padesátá či stoletá návrhová životnost, prvky deskové geometrie

trie či zvýšená kvalita kontroly při výrobě) a pevnostní třídě betonu;

- při tomto postupu nedospívá projektant k informaci o odpovídající úrovni spolehlivosti, pouze se mlčky předpokládá, že je splněna podmínka SLS pro 50 let, kdy má být $\beta \geq 1,5$ v souladu s ČSN EN 1990 [2]. Pro jiné hodnoty životnosti než 50 let podklady nemá.

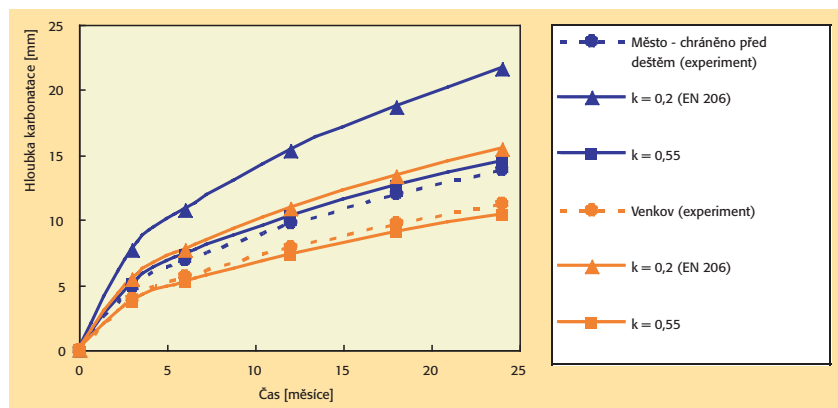
Můžeme shrnout, že při posuzování železobetonové konstrukce na mezní stav trvanlivosti je nutno pracovat s ustanoveními Eurokódů [2], [7] a [9], přitom někde jde v současné době jen o doporučení či o informativní hodnoty; česká verze dokumentu [9] má vyjít v II/2006.

V případech aplikace tohoto postupu na **cementy s příměsmi** se projektant navíc musí potýkat s řadou nejasností v dokumentu ČSN EN 206-1 [7]. Bylo na ně upozorněno v příspěvku [1]; zde zopakujeme jen ten hlavní „otazník“: ze znění normy není zřejmé, jestli se k -koncepce a tam uvedené hodnoty součinitele k (odst. 5.2.5.2) mají používat ve vztahu k odolnosti vůči karbonatice, resp. k působení chloridů či pevnosti betonu a zda a jak se tyto hodnoty v různých případech liší. Poznamenejme, že v příspěvku [1] bylo již poukázáno na to, že hodnoty součinitele k doporučené normou [7] neposkytují dostatečně věrohodné výsledky.

Pravděpodobnostní přístup

Cestu k vyřešení některých zmíněných problémů lze řešit plně pravděpodobnostním přístupem (který je mj. uveden v [2], příloha C) a s využitím odst. 5.3.3 v [7], podle kterého je dovoleno stanovit požadavky pro trvanlivost ve vztahu ke stupňům vlivu prostředí pomocí **návrhu složení betonu s požadovanou vlastností**. Podrobnosti tohoto přístupu jsou pak uvedeny v příloze J (informativní), která jako jednu z možných metod uvádí použití **analytických modelů**. Tyto, aplikovány pravděpodobnostně, příslušně verifikovány a opatřeny vhodnými nástroji, mohou být schůdnou cestou.

Pomocí vhodného výpočetního modelu lze postup karbonatice odhadnout a sta-



Obr. 2 Graf závislosti hloubky karbonatice na čase při rozdílném vlivu prostředí a pro různé k -hodnoty.

Fig. 2 Carbonation depth versus time curves for various environment and k -values.

Literatura:

- [1] *Teplý B., Chromá M. a Rovnaník P.*: Karbonatace, cementy typu CEM II-V a doporučení ČSN EN206-1. Sborník BETONÁŘSKÉ DNY 2005, s.78–83
- [2] EN 1990 Eurocode – Basis of structural design, resp. ČSN EN 1990 Zásady navrhování. Česká technická norma, ČNI, 2003
- [3] *Teplý B.*: Mezní stavy včera, dnes a zítra. Stavební obzor, roč.14, č. 7, 2005, 193–6
- [4] *Teplý B.*: Trvanlivost – náklady – spolehlivost konstrukcí. Beton TKS, 3/2005, 3–5
- [5] *fib* Model Code for Service Life Design, *fib* TG 5.6 (dokument se připravuje)
- [6] ISO/WD 13823 General Principles on the Design of Structures for Durability, ISO TC 98/SC2/WG10 (document se připravuje)
- [7] ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Česká technická norma, ČNI, 2001 (vč. změn Z1/2002 a Z2/2003)
- [8] ČSN P EN 197-1 Cement – Složení, jakostní požadavky a kritéria pro stanovení shody. Část 1: Cementy pro obecné použití, 1993
- [9] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings. CEN, 2003 (ČSN EN 1992-1 je v tisku)
- [10] *Papadakis V. G.*: Efficiency factors (*k*-values) for supplementary cementing materials regarding carbonation and chloride penetration. Proc. of Fifth Int. Conf. Durability of Concrete, CANMET/ACI, ed. V. M. Malhotra, Vol. 1/2000, Barcelona, Spain, 173–187
- [11] *Khunthongkeaw J., Tangtermsirikul S., Leelawat T.*: A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, Construction and Building Materials, In Press, Corrected Proof, 2005

novit tak čas *L*. V příspěvku [1] je popsáno použití modelu navrženého v [10], pro který jeho autoři pomocí výsledků zrychlených testů navrhli hodnoty součinitele *k* pro efektivní vodní součinitel pro různé příměsi, pro popis karbonatace, působení chloridů i popis pevnosti betonu. V [1] a dalších pracích byly provedeny srovnávací studie, které ukazují výrazně lepší souhlas hloubky karbonatace získané pomocí hodnot *k* dle [10] než dle [7] při srovnání se zkouškami zahraničních autorů (pro 28 dní a pro 2 roky). Obr. 2 to dokládá při srovnání s experimenty [11]. V [1] byl studován nejenom vliv faktoru *k* na hloubku karbonatace, ale také na index spolehlivosti.

ZÁVĚR

Z uvedených poznatků mj. vyplývá, že v souvislosti s navrhováním betonových konstrukcí s použitím směsných cemen-

tů na životnost bude nutno se podrobněji věnovat stanovení, resp. ověření hodnot součinitele *k* uvedených v normě ČSN EN 206-1. Důsledná diferenciací *k*-hodnot pro všechny situace, druhy a množství příměsí je mimořádně náročná a pracná. Ověření správnosti numerického modelu a vhodných hodnot součinitele *k* by bylo možné dosáhnout jen porovnáním s dostatečně věrohodnými výsledky měření karbonatace na existujících konstrukcích v reálném prostředí probíhající po dostatečně dlouhou dobu, s podrobnou znalostí o druhu a dávkování příměsí (příp. i informací o jemnosti mletí), způsobu ošetřování a působení prostředí. Takové výsledky však nejsou k dispozici (pokud je autorům známo); částečně by bylo možno je doplnit cíleně koncipovanými zrychlenými laboratorními experimenty.

Jinou možností jsou snahy ponechat

v tab. F.1 [7] jen požadavek na minimální pevnostní třídu betonu (a vynechat požadavek na vodní součinitel). Proti tomu ale hovoří to, že pevnost betonu nemusí přímo korespondovat s pórovou strukturou; kromě toho např. zvýšení pevnosti betonu zvýšením množství cementu může být z hlediska permeability kontraproduktivní, protože obvykle vede ke zvětšené náchylnosti ke vzniku smršťovacích trhlinek. Problematika je tedy značně komplikovaná. Opustit *k*-koncept také asi není schůdné vzhledem k jeho zařazení v Eurokódech, jejich prováděnosti a také snad proto, že se na něj odvolává i vznikající *fib* Model Code [5]. V každém případě je zřejmé, že problematika navrhování betonových konstrukcí na životnost má **multidisciplinární charakter** a vyžaduje kromě znalostí navrhování a technologie betonových konstrukcí též znalosti o teorii spolehlivosti, mezních stavech a v neposlední řadě o chemických procesech.

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc.

tel.: 541 147 642

e-mail: teply.b@fce.vutbr.cz

www.fce.vutbr.cz/CHE/teply.b

RNDr. Markéta Chromá

tel.: 541 147 639

e-mail: chroma.m@fce.vutbr.cz

RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

tel.: 541 147 636

e-mail: rovnanik.p@fce.vutbr.cz

Prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

tel.: 541 147 633

e-mail: rovnanikova.p@fce.vutbr.cz

www.fce.vutbr.cz/CHE/rovnanikova.p

všichni: Stavební fakulta VUT v Brně

Žižkova 17, 602 00 Brno

fax: 541 147 667

Text článku byl lektorován



TEKUTÝ KÁMEN

Doporučujeme vaší pozornosti webovou prezentaci výstavy **Liquid Stone**. Výstava proběhla v National Building Museum ve Washingtonu ([webové stránky www.nbm.org](http://www.nbm.org)) a pro velký zájem byla o rok prodloužena. Obzvláště představení jednotlivých projektů je velice zajímavé. http://www.nbm.org/Exhibits/liquid_stone.html

V březnu by měla být k dispozici kniha.

red