

POŽADAVKY NA SLOŽENÍ BETONU VYPLÝVAJÍCÍ ZE SPECIFIKACE BETONU – PROBLÉMY A ALTERNATIVY ■ DEMANDS ON CONCRETE COMPOSITION ARISING FROM THE CONCRETE SPECIFICATION – PROBLEMS AND ALTERNATIVES

Robert Coufal

Přílišný důraz na složení betonu vyplývající ze specifikace přináší řadu problémů a komplikací. Technolog je často nucen přizpůsobovat složení betonu požadavkům normy místo optimalizace složení z hlediska požadavků reálné budované konstrukce (smrštění, vývoj hydratačního tepla) při dodržení potřebné trvanlivosti. Porovnání požadavků na složení betonu a reálných parametrů odolnosti je věnován tento článek. ■ A very high emphasis on the concrete composition due to the concrete specification can cause many problems and complications. The technologist is often forced to adapt the concrete composition to the demands of the codes instead of optimizing from the point of view of the real concrete structure (shrinkage, hydration heat development) and fulfilling the demands of durability. This article is focused on comparing the demands on concrete composition and real parameters of the durability.

Moderní beton je velmi variabilní materiál s rozsáhlým uplatněním. Současná technologie betonu je ovlivněna širokými možnostmi v oblasti stavební chemie a příměsí a umožňuje vyrobit betony pro velmi specifické využití. Příkladem mohou být ultra vysokohodnotné betony, nebo naopak betony s extrémní dávkou příměsí (např. popílku) a minimální dávkou cementu. Tyto betony mají parametry, které jsou vyžadovány (pevnostní, trvanlivostní), ale nejsou pokryty normou, dle které se beton vyrábí.

Zároveň je moderní beton natolik variabilní materiál, že nelze jednoznačně stanovit parametry složení betonu za účelem zaručení jeho vlastností. Článek se zabývá potřebou specifikovat potřebné parametry betonu (pevnost, průsak, modul pružnosti atd.), bez předepisování složení betonu (vodní součinitel, obsah cementu atd.), jak to stanovuje norma ČSN EN 206-1.

Moderní beton je velmi variabilní materiál s rozsáhlým uplatněním. Současná technologie betonu je ovlivněna širokými možnostmi v oblasti stavební chemie a příměsí a umožňuje vyrobit betony pro velmi specifické využití. Příkladem mohou být ultra vysokohodnotné betony, nebo naopak betony s extrémní dávkou příměsí (např. popílku) a minimální dávkou cementu. Tyto betony mají parametry, které jsou vyžadovány (pevnostní, trvanlivostní), ale nejsou pokryty normou, dle které se beton vyrábí.

Zároveň je moderní beton natolik variabilní materiál, že nelze jednoznačně stanovit parametry složení betonu za účelem zaručení jeho vlastností. Článek se zabývá potřebou specifikovat potřebné parametry betonu (pevnost, průsak, modul pružnosti atd.), bez předepisování složení betonu (vodní součinitel, obsah cementu atd.), jak to stanovuje norma ČSN EN 206-1.

SOUČASNÉ NORMOVÉ POŽADAVKY NA BETON

V dnešní době se beton specifikuje dle ČSN EN 206-1/Z3 (resp. Z4 – v platnosti od října 2013). Dle této normy je specifikována pevnostní třída, stupeň vlivu prostředí, nebo jejich kombinace, plánovaná životnost konstrukce, obsah chloridů v betonu, maximální zrnno kameniva a konzistence. Navíc mohou být předepsány libovolné doplňující parametry betonu (modul pružnosti, průsak), které už ale touto normou nejsou regulovány.

Na základě specifikovaného stupně vlivu prostředí a životnosti (pro Z3) vyplývají pro technologa určité minimální parametry betonu, které při návrhu musí dodržet. Pro příklad jsou v tab. 1 shrnuty požadavky norem v České republice, Rakousku a Německu na beton stupně vlivu prostředí XF2. U nás je situace složitější o to, že jsou odlišné požadavky na beton s plánovanou životností 50 a 100 let (tabulky F.1 a F.2).

Z tab. 1 je patrné, že ačkoliv všechny předpisy vychází z jedné normy, požadavky se vlivem národních úprav dost liší. Normy se i přes drobné odchylky v hodnotách shodnou v požadavcích na minimální vodní součinitel, minimální



1

ní obsah cementu a minimální obsah vzduchových pórů v čerstvém betonu. Zaručit trvanlivost betonu dodržetím těchto parametrů je totiž původní logika normy. Norma předpokládá, že beton splňující tyto parametry je zaručně dostatečně odolný a není tedy potřeba tuto odolnost ověřovat.

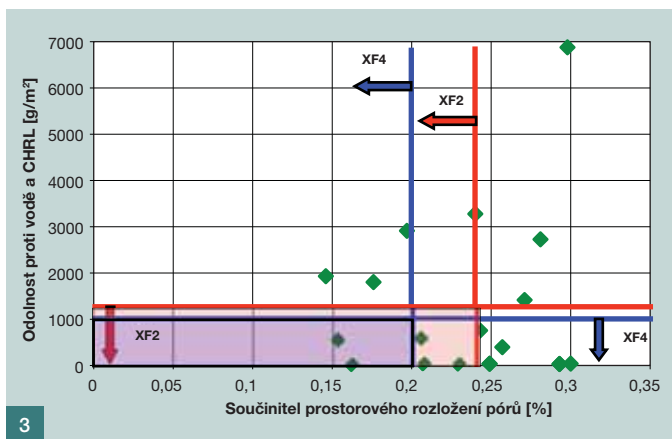
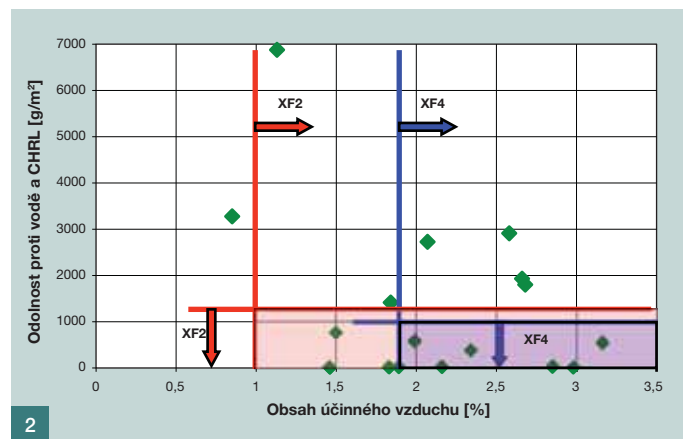
V ČR se ovšem k předepsaným parametrům předepisuje i kontrola odolnosti betonu zkouškami (CHRL, průsak). Toto přímo odporuje původní logice normy, která předepisuje složení, aby byla odolnost zaručena a nemusela se zkoušet. Ze zkušeností ovšem víme, že i beton splňující všechny pře-

Tab. 1 Porovnání požadavků na beton pro svp. XF2 ■ Tab. 1 Comparison of requirements on concrete for exposure class XF2

Norma / požadavek	ČSN EN 206-1/Z3 – CZ, F.1	ČSN EN 206-1/Z3 – CZ, F.2	ÖNORM B 4710-1:2007	DIN EN 206-1/A2
max. w/c	0,55	0,5	0,5	0,55
min. pevnostní třída	C25/30	C25/30	–	C25/30
min. obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	300
min. obsah vzduchu v ČB [%] pro Dmax 22 mm	4	3	2,5	4
max. průsak vody [mm]	50	35	–	–
odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování, při zkoušce dle ČSN EN 12390-8	– metoda A [g/počet cyklů]	1 250 / 75	1 250 / 100	–
	– metoda C [g/počet cyklů]	1 500 / 50	1 250 / 75	–
minimální obsah mikropórů A300 [%]	–	1	1	–
maximální součinitel rozložení vzduchových pórů L [mm]	–	0,24	–	–

Tab. 2 Příklad vypočteného vodního součinitele ■ Tab. 2 Example of calculated water cement ratio

Cement		Samostatná příměs			Celkem pojivo [kg/m ³]	Započitatelné pojivo [kg/m ³]	Obsah slinku [kg/m ³]	Uvažovaná voda [kg/m ³]	Vodní součinitel	Slinkový součinitel
typ	množství [kg/m ³]	typ	množství [kg/m ³]	k-hodnota						
CEM I 42,5	350	popílek	100	0,4	450	390	332,5	190	0,49	0,57
CEM III/B	400	-	-	-	400	400	120	190	0,48	1,58



Obr. 1 Přesná specifikace parametrů betonu je důležitá hlavně u náročných inženýrských konstrukcí, na fotografii výstavba Trojského mostu ■ Fig. 1 Detailed specification of the concrete parameters is important in demanding structures, picture showing construction of the Trója bridge

 Obr. 2 Závislost odolnosti proti vodě a CHRL na A_{300} ■ Fig. 2 Dependence of water resistance and de-icing agents on A_{300}

 Obr. 3 Závislost odolnosti proti vodě a CHRL na L ■ Fig. 3 Dependence of water resistance and de-icing agents on spacing factor

depsané požadavky nemusí být dostatečně odolný a naopak jsou betony, které i přes to, že požadavky na složení nesplňují, mají odolnost dostatečnou. Český přístup je sice opatrný, ale určitě bezpečnější.

Na druhou stranu tento přístup nese zvýšené ekonomické náklady. Pokud má beton bezpečně během celé doby výstavby plnit požadavky na odolnost v prostředí např. XF2 (tzn. vyhovět zkouškám odolnosti proti vodě a CHRL), měl by se obsah cementu pohybovat v rozmezí 360 až 420 kg/m³ (v závislosti na konkrétních surovinách na betonárně). Oproti tomu se dle tab. 1 může obsah cementu pro stejnou konstrukci v Německu pohybovat na úrovni 300 kg/m³, bez rizika reklamace.

Provzdušnění betonu

Co se týká provzdušnění betonu, je nutné pro životnost 100 let a prostředí XF2-4 zkoušet nejenom celkový obsah vzduchu v čerstvém betonu, ale také jeho kvalitu.

Celkový obsah vzduchu v čerstvém betonu se zkouší dle ČSN EN 12350-7 tlakovou metodou na hrnci. Tato metoda je nejjednodušším způsobem ověření obsahu vzduchu během výroby na betonárně i přejímky na stavbě. Touto zkouškou ovšem nezkontrolujeme kvalitu provzdušnění. Nejdůležitěj-

ším pro odolnost proti vodě a CHRL je obsah mikropórů A_{300} , tzn. obsah pórů o průměru do 300 μm (A_{300}) a součinitel jejich rozložení (L). Obsah mikropórů a jejich rozložení se měří mikroskopicky na zatvrdlém tělese, na řezné vyleštěné ploše dle normy ČSN EN 480-11.

Hodnoty A_{300} a L jsou bezesporu důležité pro vyhodnocení kvality provzdušnění. Např. pro porovnání provzdušňovacích přísad dokážeme předpovědět, který beton bude více a který méně odolný. Tyto hodnoty ovšem nelze brát jako záruku dobré, případně nevyhovující odolnosti. Problémem je, že výsledky (hodnoty) A_{300} a L jsou velmi závislé na konkrétním složení betonu, zejména na množství jemných podílů. Např. u samozhutnitelných betonů, nebo betonů vyšší pevnosti, které mají vyšší obsah pojiva, bude větší problém dosáhnout požadovaných hodnot. Oproti tomu např. betony s nízkým vývinem hydratačního tepla (nízkým obsahem cementu) splní požadavky na kvalitu provzdušnění bez problémů s velkou rezervou, zdaleka to ovšem neznamená dostačující odolnost. Porovnání výsledků na těchto typech betonů jsou uvedena v grafech na obr. 2 a 3.

Podle logiky normy by z grafu na obr. 2 měla vyplynout jasně závislost vyšší A_{300} = nižší odpad. Toto z grafu zjevně nevyplývá. Jak již bylo zmí-

něno, nejde o betony stejného složení. Pokud by se jednalo o betony stejného složení, různě provzdušněné, závislost se projeví.

Graf na obr. 3 by měl ukázat podobnou závislost, tzn. nižší L = nižší odpad. Tyto závislosti z grafu ovšem ze stejných důvodů opět nejsou patrné. Jedná se o stejně rozdílné betony jako u předchozího grafu.

Vodní součinitel

Vodní součinitel je velmi přeceňovanou hodnotou. Jeho význam pochází z doby, kdy bylo složení betonu mnohem jednodušší než dnes, tzn. z doby, kdy byl beton složen pouze z kameniva, cementu a vody. Ke zvýšení pevnosti a odolnosti betonu mohlo dojít pouze zvýšením obsahu cementu, nebo snížením obsahu vody. Oba způsoby měly za následek snížení vodního součinitele. Dnes je složení betonu mnohem komplikovanější, stejně jako výpočet vodního součinitele.

První otázkou je výpočet vodního součinitele. Norma ČSN EN 206-1 umožňuje počítat s tzv. k -hodnotou (pro popílek v rozmezí 0 až 0,4 dle typu cementu). Touto k -hodnotou se přenásobí množství latentně hydraulické příměsi a výsledná hodnota se může přičíst k obsahu cementu pro výpočet vodního součinitele. Příměs obsažená přímo v cementu je ovšem do výpo-

čtu uvažována celou hodnotou. Příklad dvou typů betonu je uveden v tab. 2.

Cement typu CEM I obsahuje 95 až 100 % slinku a jde o cement bez příměsí, pouze s doplňující složkou. Cement typu CEM III/B obsahuje pouze 20 až 34 % slinku, zbytek tvoří vysokopeční struska (66 až 80 %) a doplňující složka (0 až 5 %).

Vysokopeční struska je podobně jako popílek latentně hydraulická příměs, která se účastní procesu hydratace, ovšem v případě cementu CEM III/B se celá započítává do vodního součinitele, oproti popílku, kterého se počítá pouze 0,4násobek.

V tab. 2 jsou uvedeny příklady vodního a slinkového součinitele. Pokud bychom si pojivo (cement + popílek) rozdělili na slínek („čistý cement“) a příměs (příměs z cementu + příměs z betonu) a spočítali bychom „čistý vodní součinitel = slinkový součinitel“, dopadne u cementu CEM III/B velmi špatně a mohli bychom dovozovat výrazně horší parametry betonu, než u CEM I. Oproti tomu u standardně počítaného vodního součinitele nám výrazně hůře vychází beton s CEM I. Je tedy vidět, že příměs dodávaná na betonárně je výrazně znevýhodněná, oproti příměsí už obsažené v cementu. Vypovídající hodnota vodního součinitele je tedy dle mého názoru velmi malá.

Druhou otázkou je, jestli nižší vodní součinitel vždy také znamená vyšší odolnost zatvrdělého cementového tmele a zároveň lepší beton z hlediska finální konstrukce. Druhý příklad výpočtu vodního součinitele je uveden v tab. 3.

Na první pohled by měly být betony stejně odolné, alespoň z hlediska vodního součinitele. Faktem je, že se zvyšujícím se obsahem cementu je snáze dosažitelná dobrá zpracovatelnost betonu. V případě s obsahem cementu 400 kg/m³ a 200 l vody tedy do-

Tab. 3 Příklad výpočtu vodního součinitele ■ Tab. 3 Example of calculation of the water cement ratio

Cement		Účinná voda [kg/m ³]	Vodní součinitel
typ	množství [kg/m ³]		
CEM I 42,5	300	150	0,5
CEM I 42,5	400	200	0,5

sáhneme běžné konzistence S3 pouze s obyčejným plastifikátorem, bez větších problémů.

Oproti tomu dosáhnout stabilního dobře zpracovatelného betonu s 300 kg cementu a 150 kg vody bude výrazně náročnější, tj. za použití silných superplastifikátorů. Zatvrdlý cementový tmel s vyšší dávkou cementu tak bude ve výsledku mnohem méně odolný, než tmel s nižší dávkou cementu, i přes stejný vodní součinitel. Problémem ovšem je, že dodržení vodního součinitele nás paradoxně nutí zvyšovat obsah cementu, což ale způsobuje vyšší smrštění betonu a zvýšení rizika trhlin v konstrukci.

Třetí otázkou týkající se vodního součinitele je nutnost jeho dodržení jako parametru odolnosti konstrukce. Pokud budu vycházet z předpokladu, že odolnost betonu proti většině stupňů vlivu prostředí vychází z hutnosti betonu, která je ověřitelná maximálním průsakem tlakovou vodou, stává se pro mě tento maximální průsak garantem pro odolnost betonu. Pokud tedy bude beton složen z kvalitních složek (hlavně kameniva), může vyhovět průsak a tedy odolnost betonu i při výrazně nevyhovujícím vodním součiniteli. Toto je ukázáno v grafu na obr. 4.

Z grafu na obr. 4 je vidět, že i beton s vodním součinitelem, který vyhovuje pouze vlivu prostředí X0, vyhoví z hlediska parametru maximálního průsaku i pro nejpřísnější stupně vlivu prostředí. V grafu je uvedena sada betonů obdobného složení, se stejným cementem i příměsí, pouze s odstupňova-

ným množstvím cementu a plastifikační přísady. Pokud tedy platí maximální průsak jako parametr odolnosti, pak všechny tyto betony bez problémů vyhoví. Pokud ale budeme dodržovat normu ČSN EN 206-1, pak se za odolnější betony dají považovat pouze poslední dva. U těch už se ale výrazně zvyšuje cena ale i např. smrštění betonu.

Obsah cementu

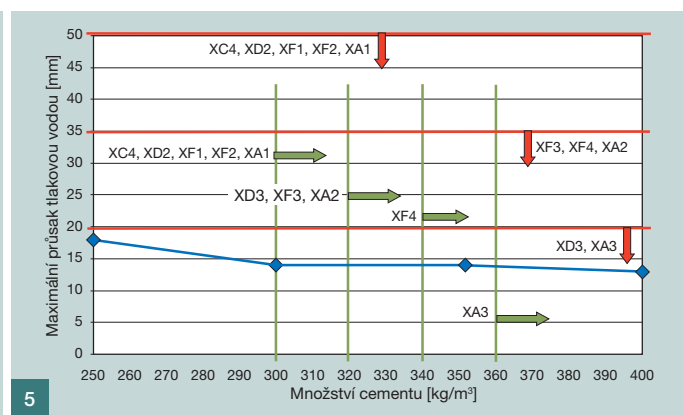
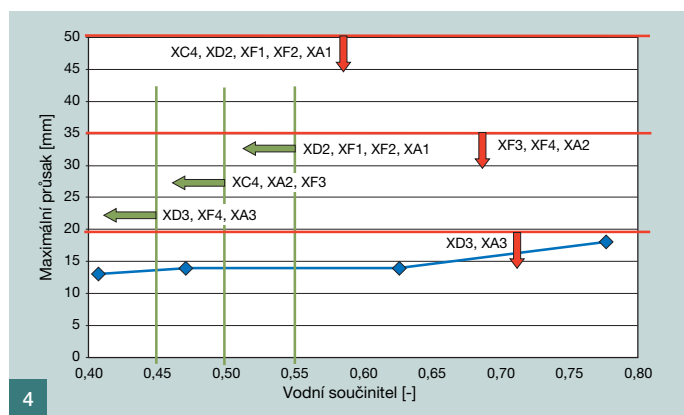
S obsahem cementu je to podobně jako s vodním součinitelem. Normou máme předepsáno určité množství, které ale není zárukou odolnosti betonu, pokud za odolnost opět budeme uvažovat maximální průsak. Výsledky stejných betonů jako z grafu na obr. 4, ale v závislosti na množství cementu, jsou uvedeny v grafu na obr. 5.

Opět je zde vidět, že výrazně se zvyšující obsah cementu nemusí znamenat významné zlepšení odolnosti.

Tyto závislosti, jak pro obsah cementu, tak pro vodní součinitel, jsou obdobné i u dalších záměsí a dalších cementů. Celkem bylo za tímto účelem v laboratořích SQZ na Zbraslavi namícháno šestnáct různých receptur, s obdobným závěrem. Celkové vyhodnocení, včetně dlouhodobých zkoušek ještě nebylo provedeno.

Zkouška odolnosti proti vodě a CHRL

Nejdůležitější zkouškou pro stupně vlivu prostředí XF2-4 je odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování. Zde jsou normou ČSN EN 206-1/Z3 předepsá-



ny dvě metody. Metoda A, která se provádí na krychlicích, a metoda C, která se provádí na odřezcích z válců. V obou případech se zkouší odolnost povrchu betonu měřením hmotnosti betonu odpadlého ze zkoušeného povrchu vlivem zmrazování a rozmrazování.

Nevýhodou zkoušky odolnosti proti mrazu a rozmrazování metodami A a C je velký vliv výroby a ošetřování tělesa na výsledek zkoušky. Tento vliv je mnohdy větší než samotná kvalita betonu. Zejména vlastnosti zkoušené povrchové vrstvy jsou velmi proměnlivé. Velmi zde záleží na konzistenci směsi a jí přiměřené intenzitě vibrování, na uložení čerstvého i zatvrdlého tělesa a hlavně na způsobu úpravy povrchu. Další nevýhodou je, že způsob a intenzita vibrace většinou neodpovídá způsobu a intenzitě vibrace betonu ve skutečné konstrukci.

Významným problémem těchto zkoušek je jejich vypovídající hodnota ve vztahu ke stylu namáhání konstrukce. Např. při zkoušení CB krytů vozovky má zkouška jasně vypovídající hodnotu. Zkouší se stejná část tělesa jako konstrukce, tzn. upravený povrch válce a pojižděný povrch vozovky. Oproti tomu u konstrukcí namáhaných stupněm vlivu prostředí XF2 je namáhána svislá plocha, tudíž plocha z bednění, která se nezkouší. Typ zkoušené plochy má vliv nejen na absolutní hodnotu odpadu při zkoušce, ale také na tvar grafu (obr. 6).

V grafu (obr. 6) je vidět srovnání výsledků získaných na tělesech odebraných ze zabetonovaného pokusného bloku a porovnání se standardně provedeným zkušebním tělesem (válcem). Tělesa byla odebrána jádrovým vývrtem z upraveného povrchu vzorku a z boku vzorku z bednění. Dále byla zkoušena pro srovnání i řezná plocha vzorku neovlivněná ani bedněním, ani úpravou povrchu. Z výsledků je vi-

dět podobná dynamika porušení vývrty z povrchu a standardního tělesa. V těchto případech je porušení na počátku zkoušky pozvolnější z důvodu ochrany vzorku povrchovou vrstvou. Ve chvíli, kdy dojde k rozpadu tohoto hlazeného povrchu, se výrazně zvýší rychlost rozrušování mrazovými cykly.

Oproti tomu má povrch z bednění a řezu na počátku mírně vyšší porušení, ale po 50 cyklech dochází k zmenšení rychlosti porušování. Tyto rozdíly by se pravděpodobně neprojevíly v případě perfektně odolného betonu, s minimálním odpadem.

Princip specifikace betonu na základě jeho vlastností – PSC (performance-based specifications for concrete)

PSC specifikace betonu vychází z principu, že se specifikují všechny parametry betonu, se kterými je uvažováno ve výpočtu nebo při užívání. Nespecifikuje se složení nebo typy vstupních materiálů. Tento způsob specifikace se v současné době zpracovává v pracovní skupině *fib* TG 8.10, které je autor článku členem.

Základní způsob specifikace lze převzít z ČSN EN 206-1, tzn. specifikace pevnostní třídy a stupně vlivu prostředí. Stupeň vlivu prostředí by ovšem pouze stanovoval, jakému prostředí bude betonová konstrukce vystavena a jaké odolnostní parametry má splnit. Dalšími parametry by bylo vše, s čím je uvažováno při přípravě projektu.

Dnes se často stává, že při výpočtu např. šířky trhliny projektant uvažuje s určitým smrštěním. Toto smrštění je odvozeno na základě pevnostní třídy. Převodní vztah, který se využívá, je přitom velmi starý a vychází z výsledků naměřených na betonech velmi odlišných od těch dnešních. Výsledkem je, že konkrétní uvažované smrštění není známo (ze specifikace), není s ním tedy

při návrhu směsi uvažováno a výsledné trhliny v konstrukci mohou být větší, než bylo spočítáno.

Podobné je to i s modulem pružnosti, který už se ale ve specifikaci dnes často objevuje. Výsledkem PSC specifikace je jasně daný soubor požadavků na zatvrdlý beton, v jednoznačně daném formátu. S tímto ale souvisí i přesné stanovení zkušebních norem a podmínek zkoušení. Nevýhodou může být překombinování požadavků, nebo stanovení požadavků příliš přísných, a tudíž obtížně (cenově nákladně) splnitelných. Zásadním způsobem se ovšem snižuje riziko nedorozumění, a tím problémů s konstrukcí.

ZÁVĚR

Dle mého názoru je správné předepisovat a ověřovat odolnostní parametry betonu. Ty musí být pro každý stupeň vlivu prostředí jasně stanoveny a výrobcem betonu dodrženy. Zkušební metody a tělesa by měly respektovat způsob namáhání konstrukce.

Na druhou stranu by první část tabulek NA F.1 a NA F.2, předepisující složení betonu a kvalitativní parametry provzdušnění, měla být pouze doporučující, nezávaznou částí. Alespoň částečně je toto vyřešeno změnou Z4, která vyšla říjnu 2013 (viz str. 55, pozn. red.) a ruší tabulku NA F.2, tzn. tabulku mezního složení pro předpokládanou životnost 100 let. Zrušením této tabulky se ruší i požadavky na A_{300} a L .

Pozn.: V článku jsou uvedeny některé výsledky z projektu MPO ČR č. FR – T13/531.

Ing. Robert Coufal, Ph.D.
TBG Metrostav, s. r. o.
Rohanské nábřeží 68
186 00 Praha 8
tel.: 724 283 989
e-mail: robert.coufal@tbg-beton.cz
www.tbgmetrostav.cz



Obr. 4 Závislost maximálního průsaku na vodním součiniteli ■

Fig. 4 Dependence of maximum leakage on the w/c

Obr. 5 Závislost maximálního průsaku na množství cementu ■

Fig. 5 Dependence of maximum leakage on the amount of cement

Obr. 6 Vliv zkoušeného povrchu na odpady při zkoušce odolnosti proti vodě a CHRL ■

Fig. 6 Impact of the tested surface on waste during the test of water and de-icing agent resistance

