

## Trwałość betonu a współczynnik $k$

### Concrete durability and the $k$ -value concept

#### 1. Wprowadzenie

Zagadnieniu trwałości betonu poświęcono w ostatnim czasie wiele uwagi w kontekście właściwości użytkowych, zrównoważonego rozwoju oraz kosztów całkowitego czasu użytkowania. Znajduje to również odbicie w działalności normalizacyjnej dla konstrukcji betonowych, np. norma ISO16204 (1) i dokument Międzynarodowej Federacji Konstrukcji Betonowych Model Code 2010 (2). W dokumentach tych zalecane są metody probabilistyczne. Zarówno trwałość jak i niezawodność konstrukcji betonowych wpływają na ekonomię i zrównoważony rozwój oraz należą do najważniejszych strukturalnych właściwości użytkowych. Probabilistyczne projektowanie cyklu życia w oparciu o właściwości użytkowe nabiera zatem dużego znaczenia wśród naukowców, a także w mniejszym stopniu wśród projektantów.

Beton wytwarzany z cementu portlandzkiego jest najczęściej stosowanym materiałem budowlanym. W konsekwencji przemysł cementowy ma 7% udział w całkowitej, globalnej, antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub>, który uwalniany jest w trakcie produkcji cementu portlandzkiego, patrz zwłaszcza (3). W ostatnich latach włożono wiele wysiłku w ograniczanie emisji CO<sub>2</sub> poprzez zwiększenie produkcji cementów wieloskładnikowych, z wykorzystaniem odpadów przemysłowych, takich jak materiały krzemionkowe i glinokrzemianowe (np. popiół lotny, pył krzemionkowy, żużel wielkopiecowy, gliny wypalane, itp.), jak również niektóre naturalne materiały pucolanowe. Materiały takie mogą być klasyfikowane jako drugorzędne materiały cementowe [DMC], albo według normy EN 206-1 (4) jako dodatki typu II. Projektując betony zawierające ten rodzaj dodatków powinno się uwzględnić ich wpływ na właściwości mechaniczne i trwałość betonu.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest zagadnienie trwałości betonów wykonanych z cementów z dodatkami mineralnymi, to znaczy cementy CEM II-CEM V, zgodnie z normą EN 197-1 (5). W ocenie trwałości w pracy uwzględniono właściwości użytkowe, w tym modelowanie postępu karbonatyzacji betonu oraz dyskusję normy EN 206-1 (4, 6), która stosuje pojęcie współczynnika  $k$  (podejście normatywne). W niniejszej pracy podkreślono podejście oparte na właściwościach użytkowych oraz zalecono stosowanie technik

#### 1. Introduction

The durability concrete issue has recently been receiving considerable attention in the context of performance-based approaches, sustainability and whole life costing. It is also reflected in standardisation activities for concrete structures, e.g. ISO16204 (1) and fib Model Code 2010 (2). In these documents probabilistic approaches are recommended. Both the durability and reliability of such structures have pronounced impacts in terms of economy and sustainability, and rank among the most decisive structural performance characteristics. Probabilistic performance-based service life design is thus gaining a great deal of attention from researchers – and, to a lesser extent, from designers.

Concrete produced from Portland cement is the most widely used building material. Consequently, the cement industry is responsible for producing 7% of total global anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions, which it releases during the production of Portland cement (OPC); see especially (3). Recently, substantial efforts have been made to decrease CO<sub>2</sub> emissions by increasing the production of blended cements using industrial by-products such as silica and silica glass (e.g. fly ash, condensed silica fume, blast furnace slag, burnt clays, etc.) as well as some natural pozzolanic materials. These materials can be characterized as supplementary cementitious materials (SCM) or, according to EN 206 (4), as type II additions. When designing concretes containing SCM, the effects of such mineral additives on mechanical and durability properties should be taken into account.

The durability aspect of concretes made from cements with SCM [i.e. CEM II-V, conforming to EN 197-1 (5)] is focused in this paper. The performance-based approach (involving the modelling of degradation - namely concrete carbonation progress) is presented, together with a specific discussion concerning EN 206-1 (4, 6), which utilizes the  $k$ -value concept (the prescriptive approach). In the present paper, the performance-based approach is embraced and the use of modelling and simulation techniques is advocated. Such techniques may be used to develop a prognosis for degradation over the time of exploitation as well as for the design/assessment of reinforced concrete structures.

modelowania i symulacji. Takie techniki mogą być wykorzystywane do prognozowania zniszczenia betonu, w miarę upływu czasu, jak również do projektowania i oceny konstrukcji żelbetowych.

## 2. Koncepcja normatywna, oparta na właściwościach technicznych betonu

W podejściu opartym na właściwościach technicznych należy brać pod uwagę sformułowanie podane we wprowadzeniu do normy EN 206-1 (4), a także w nowej wersji tej normy (6), którego odpowiednia część brzmi: „Jeśli beton jest zgodny z wartościami granicznymi, beton w konstrukcji uważany jest za spełniający wymagania dotyczące trwałości w przypadku zamierzonego zastosowania w konkretnych warunkach środowiska... Koncepcje oparte na właściwościach użytkowych, jako alternatywa dla podejścia uwzględniającego wartości graniczne, są w fazie opracowywania”.

Koncepcja wartości granicznych jest podejściem normatywnym – na przykład tablica F.1 w (4) podaje zalecane wartości graniczne dotyczące maksymalnego stosunku woda/cement oraz minimalnej zawartości cementu dla określonej klasy ekspozycji. Z drugiej strony, podejście oparte na właściwościach użytkowych stawia wymagania projektowania betonu o odpowiednich właściwościach użytkowych (na przykład wytrzymałość, masa odprysków betonu w trakcie zamrażania- rozmrażania). Odpowiednie doświadczenie w tej dziedzinie zdobyte w USA można znaleźć w pracy (7). Należy również wspomnieć, o ogólnym podejściu opartym na „wskaźnikach trwałości” – patrz na przykład (8). Wskaźniki trwałości obejmują podstawowe właściwości materiału i mogą także służyć jako główne dane wejściowe w modelach stosowanych w prognozowaniu.

Należy pamiętać, że nie tylko rodzaj betonu, ale także jego mikrostruktura może być objęta projektowaniem z uwzględnieniem trwałości poprzez wykorzystanie podejścia opartego na właściwościach technicznych – na przykład dla wymaganego czasu depastywacji zbrojenia lub dla docelowego poziomu niezawodności, uwzględniającego różne eksploatacyjne stany graniczne.

## 3. Współczynnika $k$ a norma EN 206

Stosunek woda/cement lub woda/spoiwo nie może być bezpośrednio wykorzystany do oszacowania lub przewidywania wytrzymałości lub trwałości betonu produkowanego z cementów wieloskładnikowych, a nawet nie nadaje się do tego celu. Dlatego pojęcie „efektywnego” stosunku wodno-cementowego zostało opracowane już w 1967 r. (9), początkowo do oceny wytrzymałości betonu. Pojęcie to zostało także ostatnio wykorzystane także do oceny innych właściwości betonu oraz zostało włączone do Eurokodu (4). Stosunek „woda/cement” zastąpiono stosunkiem „w/c efektywne”, który wyrażono wzorem:

$$(w/c)_{\text{eff}} = \text{woda} / (\text{cement} + k \times \text{DMC}) \quad [1]$$

gdzie  $k$  jest współczynnikiem efektywności (lub współczynnikiem

## 2. Prescriptive vs. performance-based concepts

In the context of performance-based approaches it should be noted that in the Introduction to EN 206-1(4), as well as in the new version of this Standard (6), the relevant part reads: “If the concrete is in conformity with the limiting values, the concrete in the structure is deemed to satisfy the durability requirements for the intended use in the specific environmental condition... Performance based concepts as alternatives to the concept of limiting values are under development”.

The limiting values concept is a prescriptive concept – e.g. Table F.1 in EN 206-1 (4) lists the recommended limiting values for e.g. maximum water/cement ratio and minimum cement content for a specified exposure class. Conversely, performance-based concepts directly require concrete to be designed in terms of performance-related parameters (e.g. mechanical properties, as well as the scaling of concrete in a freeze-thaw test). Relevant experience in this area gained in the USA can be found in the paper of Bickley et al. (7). A general approach based on what are termed durability indicators (DIs) should also be mentioned – see e.g. (8). DIs are key material properties with regard to durability and can also serve as the main input data for predictive models.

Note that not only a concrete specification but also a structure may be designed for durability via the utilization of the performance-based approach - e.g. for a required time to reinforcement depassivation or for a target level of reliability respecting different limit states.

## 3. The $k$ -value concept and EN 206

Water/cement or water/binder ratios are not straightforward or appropriate for use in calculating or predicting the strength and durability characteristics of concretes made from blended cements. Therefore, the concept of an “effective” water-cement ratio was developed as early as in 1967 (9), initially for concrete strength. This concept has also been utilized more recently for other characteristics of concrete and it has been incorporated in e.g. Eurocode (4), too. The “water/cement ratio” is replaced with the formula for an “effective w/c ratio”

$$(w/c)_{\text{eff}} = \text{water} / (\text{cement} + k \times \text{SCM}) \quad [1]$$

where  $k$  is the efficiency factor (or  $k$ -value) defined as the part of an SCM which can be considered as equivalent to a Portland cement with the same properties (obviously  $k = 1$  holds true for Portland cement). In the following paragraphs the values of efficiency factor  $k$  given in EN 206 (6) and/or found in the literature are listed and briefly discussed.

In the CEN commission report (10) it was agreed that for fly ash (FA) and silica fume (SF) prescriptive  $k$ -values will be given in (6) which have been proven to be safe to use. For ground granulated blast furnace slags (GGBS) only a recommended value is given. From the Survey of National Requirements [12 countries – see

Tablica 1 / Table 1

WYZNACZONY DOŚWIADCZALNIE WSPÓŁCZYNNIK  $k$  DLA RÓŻNYCH WŁAŚCIWOŚCI BETONU (12-14)

EXPERIMENTALLY DETERMINED  $k$ -VALUES FOR DIFFERENT PROPERTIES OF CONCRETE (12-14)

Rodzaj DMC SCM type	współczynnik $k$ / $k$ -value					
	Wytrzymałość na ściskanie, Compressive strength MPa				Odporność na chlorki 100 dni Chloride resistance 100 days	Odporność na karbonatyzację 100 dni Carbonation resistance 100 days
	2 dni/days	7 dni/days	28 dni/days	90 dni/days		
Pył krzemionkowy Silica fume			2 (12) 3 (14)	2.4 (14)	6 (12, 14)	0.3 (14)
Popiół lotny o małej zawartości wapnia Low-calcium fly ash	0.8 (13)	1.0 (13)	0.5 (12, 14) 1.1 (13)	0.7 (14) 1.2 (13)	2.5 (13) 3 (12, 14)	0.5 (14)
Popiół lotny o dużej zawartości wapnia High-calcium fly ash	0.8 (13)	0.9 (13)	0.9 (13) 1 (12, 14)	0.9 (13)	2 (12-14)	0.7 (13, 14)

$k$ ), zdefiniowanym jako część dodatku DMC, która może być uznana za równoważną zawartości cementu portlandzkiego o tych samych właściwościach (oczywiście  $k = 1$  odnosi się do cementu portlandzkiego). W następnych punktach krótko omówiono współczynnik  $k$  podany w normie EN 206 (6) oraz w literaturze.

W raporcie Komisji CEN (10) ustalono, że dla popiołu lotnego (PI) i pyłu krzemionkowego (Pk) normatywne wartości współczynnika  $k$ , które jako bezpieczne zaleca się do stosowania; są one podane w (6). Dla granulowanego żużla wielkopieczowego podano tylko wartość zalecaną. Z przeglądu wymagań różnych krajów [12 krajów - patrz (10)] wynika, że wartości współczynnika  $k$  dla PI są zawarte w zakresie od 0,2 do 0,8, natomiast dla Pk od 1,0 do 2,0, a dla granulowanego żużla wielkopieczowego GŻW od 0,4 do 1,0. W raporcie tym wyjaśniono również przyczyny normatywnego podejścia do współczynnika  $k$ , w oparciu o wytrzymałość betonu. Stosowanie normy EN 206 do projektowania trwałości betonu w praktyce codziennej wydaje się zatem dosyć dyskusyjne. Ponieważ pojęcie współczynnika  $k$  jest głównie związane z wytrzymałością betonu, objęcie nią także trwałości nie jest oczywiste. Ponadto, wartości współczynnika  $k$  zalecane w normie EN 206 mają służyć wyłącznie do celów kontroli wartości granicznych, zgodnych z zaleceniami normatywnymi w tabeli F.1.

Papadakis i Tsimas (12-14) stwierdzili doświadczalnie, że wartości współczynnika  $k$  zależą od rodzaju, ilości i składu DMC w betonie i różnią się w zależności od rozważanej właściwości użytkowej (wytrzymałości na ściskanie w różnym wieku, odporności na chlorki i karbonatyzację) - patrz tablica 1.

Bentur (15, 16) omówił wyniki badań zawartych w wielu źródłach literaturowych i porównał uzyskane eksperymentalnie wartości współczynnika  $k$  - patrz tablica 2. Można wnioskować, że współczynnik  $k$  może być bardzo różny dla różnych właściwości tego samego betonu. Takie różnice można wyjaśnić zachowaniem interakcji cementu z DMC i zależności rozpatrywanej właściwości, od mikrostruktury i chemicznych właściwości betonu i ich modyfikacji

(10)] it is apparent that the  $k$ -values for FA vary from 0.2 to 0.8, while those for SF vary from 1.0 to 2.0 and those for GGBS vary from 0.4 to 1.0. In this report, the derivation of the prescriptive  $k$ -value approach is also explained based on concrete strength. The adoption of EN 206 for durability design in every-day practice thus seems to be rather complicated. As the  $k$ -value concept is principally based on concrete strength, the link to durability parameters is not straightforward. Furthermore, the values of efficiency factor  $k$  indicated in EN 206 are supposed to serve only for checking the limiting values according to the prescriptive recommendations in Table F. 1.

Papadakis and Tsimas (12-14) have experimentally established that  $k$ -values depend on the type, amount and composition of SCM in concrete and differ depending on the performance in question (compressive strength at various ages, chloride resistance and carbonation resistance) – see Table 1.

Bentur (15, 16) reviewed the results found in many literature sources and compared the experimentally obtained  $k$ -values – see Table 2. It also appears that the  $k$ -value could be quite different for different properties of the same concrete. Such differences can be explained in terms of the fundamentals of cement-SCM interactions and the dependency of a property in question on different microstructural and chemical characteristics of the concrete, and their modification by SCM. This  $k$ -value also depends on the type and origin of the supplementary cementing materials used. The strength efficiency  $k$ -factor declines quite significantly as the amount of SCM content increases, and it changes over time. The replacement of 30% Portland cement with fly ash is the measure most commonly applied in practice, and the strength efficiency  $k$ -values occurring in this case are all approximately 1 for different fly ash origins. This is much greater value than the 0.2 and 0.4 recommended in EN 206-1. The efficiency  $k$ -factor also depends on the nature of water curing and the curing time. The strength efficiency  $k$ -factor is relatively insensitive to curing, while the efficiency  $k$ -factor for chloride penetration can be affected by water curing quite significantly.

Tablica 2 / Table 2

WSPÓŁCZYNNIK  $k$  DOTYCZĄCY WYTRZYMAŁOŚCI, KARBONATYZACJI I WNIKANIA CHLORKÓW DLA BETONÓW Z POPIOŁEM LOTNYM O MAŁEJ ZAWARTOŚCI WAPNIA PO 90 DNIACH – NA PODSTAWIE DANYCH LITERATUROWYCH

THE  $k$ -FACTOR VALUES FOR STRENGTH, CARBONATION AND CHLORIDE PENETRATION FOR CONCRETES WITH LOW-CALCIUM FLY ASH AFTER 90 DAYS - BASED ON DATA COMPILED FROM THE LITERATURE

Czynnik	współczynnik $k$ $k$ -value	Autor/Reference
Wytrzymałość Strength efficiency	1.12 – 0.43*	Babu i Rao/Babu and Rao (17)
	0.7	Papadakis (14)
	1.2	Papadakis i Tsimas/ Papadakis and Tsimas (13)
	1.5	Bentur (15)
Karbonatyzacja Carbonation efficiency	0.5	Papadakis i Tsimas (13) – test przyspieszony/ Papadakis and Tsimas accelerated test Papadakis (14) – test przyspieszony/ accelerated test
	0.8	Bentur (15) – test przyspieszony/ accelerated test
	0.5	Bentur (15) – test w warunkach naturalnych/natural test
	0.30	Hobbs (18) – test w warunkach naturalnych/ natural test
Penetracja chlorków Chloride penetration efficiency	2.5	Papadakis i Tsimas/ Papadakis and Tsimas (13)
	3	Papadakis (12), Papadakis (14)
	1.8	Bentur (15)

\*Współczynnik  $k$  maleje wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego - wspomniany rozrzut odpowiada poziomom zastępowania 15 - 75%

\*The  $k$ -factor value declines with increases in the amount of fly ash – the mentioned scatter corresponds to replacement levels of 15 – 75%

spowodowanych dodatkiem DMC. Współczynnik  $k$  zależy również od rodzaju i pochodzenia stosowanych drugorzędnych materiałów cementowych DMC. W przypadku wytrzymałości współczynnik  $k$  maleje znacznie wraz ze wzrostem zawartości DMC i zmienia się z upływem czasu. Zastąpienie 30% cementu portlandzkiego popiołem lotnym jest rozwiązaniem powszechnie stosowanym w praktyce i wartości współczynników  $k$  w przypadku wytrzymałości wynoszą w przybliżeniu 1 dla popiołów różnego pochodzenia. Jest to o wiele większa wartość niż 0,2 i 0,4 zalecana w normie EN 206-1. Współczynnik efektywności  $k$  zależy również od rodzaju zastosowanej pielęgnacji wodnej oraz od jej czasu. W przypadku wytrzymałości współczynnik  $k$  zależy stosunkowo mało od pielęgnacji, natomiast pielęgnacja wodna może znacznie wpływać na współczynnik efektywności  $k$  w odniesieniu do penetracji chlorków.

Ustalenie wartości współczynnika  $k$  dla mieszanek trójskładnikowych (19) byłoby znacznie bardziej skomplikowane i dlatego do tej pory nie podejmowano prób w tym zakresie (według posiadanych przez autorów wiadomości).

Wartości współczynnika  $k$  zalecane w normie EN 206-1 (6) podano w tablicy 3. Znaczenie wartości współczynnika  $k$  omówiono wcześniej, na przykład w pracach (20 - 23). W szerszym znaczeniu projektowania trwałości konstrukcji betonowych nasuwa się także kilka innych pytań:

- ogólnie, pod uwagę należy brać często spotykany rozrzut przyjętych zmiennych (materiałowych, technologicznych i środowiskowych), jak również jego wpływ na efektywny koszt trwałości i niezawodność konstrukcji żelbetowych;
- pełna i różnicowana gama wartości współczynnika  $k$  dla różnych właściwości (wytrzymałość na ściskanie po różnym czasie, odporność na karbonatyzację, penetrację chlorków

The determination of  $k$ -values for ternary mixes (19) would be much more involved and so no attempts have been made in this respect to date (to the best of the author's knowledge).

The  $k$ -factor values recommended in EN 206-1 (6) are shown in Table 3. The relevance of the  $k$ -values has been also discussed previously, e.g. in (20 – 23). In the broader sense of the durability design of concrete structures some other questions also arise:

- generally, the natural scatter of involved variables (material, technological and environmental characteristics) should be taken into consideration, as well as its impact on the cost effective durability and reliability of RC structures;
- the full and varied range of differing  $k$ -values for different properties (compressive strengths for different ages, resistance to carbonation, chloride penetration and other degradation effects) are still not available for the application of the  $k$ -concept. Note also that in a prescriptive  $k$ -value concept for concrete mix design, the defined rules must be safe in use and cover all possible combinations of materials and variations for the given addition (10);
- the direct dependence of strength class on water and cement content is not a unique one, and the relation of concrete durability to compressive strength is not generally to be taken for granted, e.g. increasing the proportion of cement may lead to concretes being more crack-prone, which may influence the durability as well as the transport properties of concrete. The type and grain size of the used cement, supplementary cementitious materials and aggregate may also have a strong influence. Furthermore, the strength of SMC concretes develops over time and evaluation at the age of 28 days is not completely adequate. As a result of these factors, relying on strength as a characteristic expressing the effectiveness of



i innych czynników destrukcyjnych) nie jest jeszcze objęta współczynnikiem  $k$ . Należy również zauważyć, że w normatywnym podejściu do współczynnika  $k$  przy projektowaniu mieszanki betonowej, zdefiniowane zasady muszą zapewniać bezpieczeństwo konstrukcji i obejmować wszystkie możliwe kombinacje materiałowe i ich zmiany dla rozpatrywanego dodatku (10);

- 3) bezpośrednia zależność klasy wytrzymałości od zawartości wody i cementu nie jest wartością stałą, a zależność trwałości betonu od wytrzymałości na ściskanie nie można traktować jako niezmienną; na przykład zwiększenie udziału cementu może prowadzić do uzyskania betonów bardziej podatnych na pękanie, co może wpływać na trwałość oraz właściwości transportowe różnych mediów. Rodzaj i uziarnienie stosowanego cementu, drugorzędnych materiałów cementowych i kruszywa mogą także mieć znaczny wpływ. Ponadto rozwój wytrzymałości w czasie i jej ocena po 28 dniach dojrzewania betonów z dodatkami DMC nie jest w pełni określona. Czynniki te powodują, że traktowanie wytrzymałości jako właściwości określającej trwałość betonu może nie być słuszne (15, 24). Ta złożona sytuacja może prowadzić do zbyt uproszczonego rozwiązania: przesadnego stosowania najmniejszej wartości współczynnika,  $k_{min}$ . Wybór taki jest wątpliwy, ponieważ może wpływać: na warunki techniczne (urabialność betonu), charakterystykę odporności betonu (większe wartości  $(w/c)_{eff}$ ) oraz na wymagania związane z warunkami eksploatacyjnymi betonu (zakres zastąpienia cementu portlandzkiego przez DMC).
- 4) współczynnik  $k$  może być zależny od czasu twardnienia betonu (15, 16), a także mogą na niego wpływać warunki pielęgnacji, rodzaj i ilość dodatku DMC oraz warunki ekspozycji betonu;
- 5) zalecenia dotyczące trwałości powinny również brać pod uwagę projektowany czas użytkowania i odpowiadające mu wymagania niezawodności, to znaczy wskaźnik niezawodności  $\beta$ , związany z odpowiednim warunkiem stanu granicznego {na przykład równanie [2]}.

Należy jeszcze raz podkreślić, że współczynnik  $k$  stanowi podejście normatywne; ilość (cement +  $k \times$  DMC) nie powinna być mniejsza niż minimalna zawartość cementu wymagana dla danej klasy ekspozycji. Załącznik J (4) podaje alternatywę dla podejścia normatywnego - stosowanie sprawdzonych modeli projektowych, które wydają się być skuteczną metodą oceny trwałości, obejmującej właściwości techniczne betonu, pokazując możliwość wyjścia poza ramy współczynnika  $k$ . Niestety, załącznik J nie został włączony do normy (6); zamiast tego w punkcie 5.2.5 stwierdzono, co następuje: „Dodatki typu II... mogą być brane pod uwagę w składzie betonu... jeśli ich przydatność została ustalona na podstawie jednej z metod...”. Metody wymienione w normie (6) są następujące: (i) współczynnik  $k$ , (ii) równoważne właściwości techniczne betonu (RWTB) oraz (iii) kombinacyjne podejście do równoważnych właściwości technicznych (KRWTB). Stosując metodę RWTB należy udowodnić, że beton ma takie same właściwości techniczne w różnych warunkach ekspozycji oraz tę samą trwałość co beton referencyjny, zgodny z wymaganiami dla danej klasy ekspozycji.

a concrete's durability performance can be misleading (15, 24). Such a complex situation may lead to an oversimplified solution: the overcautious use of the lowest value,  $k_{min}$ . This choice is questionable as it might influence the following: technical considerations (the workability of concrete), the resistance characteristics of concrete (greater  $(w/c)_{eff}$  values), and environmental impacts (the range of SCM to replace Portland cement).

- 4) the  $k$ -factor may be time-dependent (15, 16), and also influenced by curing conditions, the type and amount of SCM, and exposure conditions;
- 5) recommendations for durability should also take into account design working life categories and the corresponding reliability requirements, i.e. the index of reliability  $\beta$  associated with the appropriate limit state condition – e.g. Eq. [2].

It has to be stressed again that the  $k$ -value concept is defined as a prescriptive concept; the amount of (cement +  $k \times$  SCM) shall not be less than the minimum cement content required for the relevant exposure class. Appendix J of EN 206 (4) mentions an alternative to the prescriptive approach - the application of proven design models, which seems to be an effective methodology for the assessment of concrete durability performance, displaying capabilities beyond the frame of the  $k$ -value concept. Unfortunately, appendix J is no longer incorporated in FprEN 206 (6); instead, section 5.2.5 states “Type II additions... may be taken into account in the concrete composition... if the suitability is established by any of the concepts according to...” Relevant concepts listed in (6) are: (i) the  $k$ -value concept; (ii) the Equivalent Concrete Performance Concept (ECPC), and (iii) the Equivalent Performance of Combination Concept (EPCC). Thanks the utilization of the ECPC it shall be proven that concrete has an equivalent performance with respect to its interaction with the environment and to its durability when compared with a reference concrete in accordance with the requirements for the relevant exposure class. Similarly, the EPCC equates the performance of a combination of cement and additions with the performance of a standardized cement of the same nominal composition (10). So, both performance concept types (ii) and (iii) involve repeated time-consuming and costly testing. They do not seem to always be sufficiently feasible for application in practice. In place of the missing Appendix J of EN-206 (4), the possibility of using a relevant model analysis as a performance-based alternative for durability tasks is mentioned in FprEN 206 (6) in section 5.3.2. Note 3 there reads: “...Guidance for the interpretation of the “end of design working life”, and how to calibrate/validate the limiting values for concrete composition to be given in provisions valid in the place of use, can be found in ISO 16204 (1)”. In this way the utilization of modelling is partially restored within EN 206. Note (1) covers design for environmental actions leading to the deterioration of concrete and embedded steel. Four options are available for use in the design activities needed in a rational service life design process with a chosen reliability level. Level 1 is a full probabilistic method which involves probabilistic models and limit state assessments, and ranks among the performance-based approaches. Note also that code (1) is based on the more general,

Podobnie, metoda KRWTB powinna wykazać, że właściwości użytkowe betonu z cementu z dodatkami są takie same jak betonu produkowanego ze znormalizowanego cementu (10). Tak więc, obydwie metody (ii) i (iii) oznaczania właściwości użytkowych betonu, wymagają czasochłonnych i kosztownych badań. Badania te nie zawsze mogą dawać wyniki przydatne w praktyce. W miejsce brakującego załącznika J w normie (4), wspomina się w normie (6) w punkcie 5.3.2. o możliwości korzystania z odpowiedniego modelu, jako alternatywy do oszacowania właściwości użytkowych, decydujących o trwałości. Odpowiednia uwaga 3 brzmi: ....Wytyczne do interpretacji „końca projektowanego czasu użytkowania” oraz jak oceniać/sprawdzać wartości graniczne dotyczące składu betonu, które powinny być zawarte w przepisach obowiązujących w miejscu jego stosowania, można znaleźć w wytycznych ISO 16204 (1)”. W ten sposób stosowanie modeli zostało częściowo przywrócone w normie EN 206. Wytyczne ISO (1) obejmują projektowanie uwzględniające wpływ warunków ekspozycji prowadzących do uszkodzeń betonu i stali zbrojeniowej. W projektowaniu, uwzględniającym czas eksploatacji na wybranym poziomie niezawodności, są do wykorzystania cztery możliwości. Poziom 1 jest metodą probabilistyczną, która wykorzystuje modele probabilistyczne i oszacowany stan graniczny oraz zaliczana jest do metod opartych na właściwościach użytkowych. Należy również zauważyć, że kod (1) opiera się na bardziej ogólnej, niezależnej od materiałów normie ISO 13823 (11) oraz na dokumencie Model Code (2), specjalnie opracowanym dla konstrukcji betonowych.

Jednak przeprowadzenie badań powinno być traktowane jako podstawowa metoda, aczkolwiek w przypadkach, gdy oszacowanie trwałości przeprowadzane jest na betonach wykonanych z cementów z dodatkami DMC można wysunąć dwie przyczyny, wskazujące na przydatność modelowania: (i) transformacja wyników przyspieszonych badań w dane przydatne w praktyce jest często wątpliwa oraz (ii) brak jest długoterminowych danych doświadczalnych dotyczących odpowiednich, dobrze udokumentowanych próbek/struktur - również ze względu na stosunkowo krótki czas stosowania niektórych rodzajów DMC.

#### 4. Modelowanie procesu karbonatyzacji

Znaczenie współczynnika  $k$  i zastosowanie modelowania zjawisk destrukcji są omówione w tym rozdziale, dotyczącym karbonatyzacji betonu – prawdopodobnie najczęściej badanego zjawiska zniszczenia tego kompozytu. Zastosowano podejście stochastyczne w celu zwrócenia należytej uwagi na występujące niepewności oraz zmienność stosowanych parametrów.

Karbonatyzacja betonu jest procesem, który powoduje depasycję stali: gdy front karbonatyzacji osiąga poziom zbrojenia może się rozpocząć jego korozja w obecności tlenu i wilgoci. Okres aż do tego momentu często opisywany jest jako okres inicjacji i często stanowi decydujący stan graniczny – uważany za graniczny dla czasu użytkowania. Ten stan graniczny można opisać wzorem:

$$P_f(t_D) = P\{a - x_c(t_D) \leq 0\} \leq P_d \quad [2]$$

material independent ISO 13823 (11) and on the fib Model Code (2) specially developed for concrete structures.

Still, testing should be considered generally as a fundamental methodology, albeit in cases when durability assessments are carried out on concretes made from cements with SCM two points may be stated to show the usefulness of modelling: (i) the transformation of accelerated test results into data for use in the real world is often questionable, and (ii) there is a lack of long-term monitored experimental data from suitable, well documented samples/structures – also due to the relatively short existence of some types of SCM.

#### 4. Carbonation modelling

The relevance of the  $k$ -value concept and the employment of degradation phenomena modelling are reflected in this section concerning concrete carbonation - probably the most frequently studied degradation effect. The stochastic approach is utilized in order to pay proper attention to associated uncertainties and the variability of involved parameters.

The carbonation of concrete is a process which affects the depassivation of steel: once the carbonation front reaches the reinforcement, reinforcement corrosion may start in the presence of oxygen and moisture. The time period up to this point is frequently designated as the initiation period and frequently serves as the decisive limit state - considered to be a limit for service life. The relevant limit state condition reads:

$$P_f(t_D) = P\{a - x_c(t_D) \leq 0\} \leq P_d \quad [2]$$

where  $P_f$  is the probability of failure (here, the probability of reinforcement depassivation),  $P_d$  is the design (acceptable, target) probability value,  $a$  is concrete cover and  $x_c$  is the depth of carbonation at time  $t_D$ , while  $t_D$  is design service life. Note that the carbonation process is driven by the diffusivity of ambient  $\text{CO}_2$  in concrete and the reactivity of  $\text{CO}_2$  with components of hydrated cement in concrete. The  $\text{CO}_2$  penetrating from the surface decreases the pH of pore solution to a value of about 8.5 due to its reaction especially with calcium hydroxide. When the carbonation depth equals the depth of the concrete cover, the steel is depassivated and corrosion may start (when oxygen and moisture are present). The rate of carbonation progress from the concrete surface to the reinforcement depends on many parameters, e.g. concrete cover thickness and permeability, the ambient temperature, relative humidity and carbon dioxide content. The concrete cover permeability itself depends on the concrete mix type and composition, the aggregate grade and the processing and curing of the fresh concrete.

To model  $x_c(t_D)$  realistically and to effectively assess the service life of a structure requires attention to be given to inherent uncertainties in materials, and technical and environmental characteristics. Such tasks necessarily lead to the utilization of stochastic approaches and also simulation techniques, all based on experimental evidence and relevant monitoring of structures under real-field conditions.

gdzie  $P_f$  jest prawdopodobieństwem zniszczenia (tutaj prawdopodobieństwo depastywacji zbrojenia),  $P_d$  jest projektowanym prawdopodobieństwem (dopuszczalnym, celem), a jest grubością otuliny i  $x_c$  jest głębokością karbonatyzacji w czasie  $t_D$ , natomiast  $t_D$  jest projektowanym czasem eksploatacji. Należy zauważyć, że proces karbonatyzacji jest uzależniony od dyfuzji  $\text{CO}_2$  w betonie z otaczającego powietrza oraz od reaktywności  $\text{CO}_2$  ze składnikami uwodnionego cementu w betonie. Wnikanie  $\text{CO}_2$  od powierzchni betonu obniża pH roztworu w porach do około 8,5 w wyniku jego reakcji, w szczególności, z wodorotlenkiem wapnia. Gdy głębokość karbonatyzacji osiąga grubość otuliny stal ulega depastywacji i może rozpocząć się jej korozja (w przypadku dostępu tlenu i wilgoci). Szybkość postępu karbonatyzacji od powierzchni betonu do zbrojenia zależy od wielu czynników, przede wszystkim od grubości i przepuszczalności otuliny betonowej, temperatury otoczenia, wilgotności względnej oraz zawartości dwutlenku węgla w powietrzu. Przepuszczalność otuliny betonowej zależy od rodzaju i składu mieszanki betonowej, uziarnienia kruszywa oraz od pielęgnacji świeżego betonu.

Do realnej oceny czasu użytkowania konstrukcji betonowej w modelu w przypadku  $x_c(t_D)$  należy uwzględnić zmienność materiałów oraz ich właściwości technicznych i wpływ środowiska. Takie zadania muszą prowadzić do wykorzystania metod stochastycznych, a także technik symulacyjnych, w oparciu o doświadczalne śledzenie właściwości konstrukcji, w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

Dobrym przykładem jest model karbonatyzacji betonu z cementów wieloskładnikowych, pierwotnie opracowany przez Papadakis i in. (12) jako deterministyczny, został włączony w formie probabilistycznej do oprogramowania FReET-D (patrz następny punkt). W modelu tym współczynnik  $k$  jest zmienną wejściową (odpowiednie wartości podano w tabelicy 1).

Stosunkowo złożony model procesu karbonatyzacji opracowany w ramach europejskiego projektu, który zalecany jest w dokumencie Model Code (2), jest również zawarty w oprogramowaniu FReET-D. W modelu podanym w kodzie (2) współczynnik  $k$  jest w pewien sposób „ukryty” w wartości odporności na karbonatyzację  $R_{\text{ACC},0}$ . Jest to zmienna wejściowa, którą można wyznaczyć albo z danych literaturowych i jej zależności od  $(w/c)_{\text{ef}}$  i rodzaju zastosowanego DMC, lub przeprowadzając badanie karbonatyzacji metodą przyspieszoną. W zawartych w oprogramowaniu FReET-D dziewięciu modelach karbonatyzacji, tylko jeden (na podstawie (12) i omówiony powyżej) stosuje bezpośrednio współczynnik  $k$ .

Należy zauważyć, że dysponowanie większym wyborem modeli jest przydatne, na przykład w związku z problemami z dostępnością danych statystycznych dotyczących zmiennych wejściowych w niektórych modelach. Czasami nawet prostszy model może zapewnić uzyskanie wyników wystarczającej jakości. Niektóre akceptowane w skali międzynarodowej i sprawdzone modele podano w kodzie (2), podczas gdy inne są obecnie na etapie opracowywania lub są dostępne w literaturze, a niektóre są już włączone do specjalistycznych oprogramowań (patrz następny punkt).

To provide an example of carbonation modelling for concretes made from blended cements the model originally developed by Papadakis et al. (12) in the deterministic format has been incorporated in the probabilistic format in the software tool FReET-D (see the next section). In this model the  $k$ -factor value serves as an input variable (relevant values are shown in Table1).

A relatively complex model for the carbonation process developed within European joint research, which is recommended in the fib Model Code (2), is also included in FReET-D. In the model in (2) the  $k$ -value concept is somehow “hidden” in the value of carbonation resistance  $R_{\text{ACC},0}$ . It is an input variable which can be determined either from literature-derived data with a dependence on  $(w/c)_{\text{eff}}$  and the type of SCM, or via accelerated carbonation tests. Of total 9 models for carbonation included in FReET-D; only one (based on (12) and mentioned above) uses directly the efficiency factor  $k$ .

Note that having a broader choice of models is useful e.g. due to problems with the availability of statistical data for the input variables of some models. Sometimes even a simpler model may provide results of sufficient quality. Some internationally accepted and verified models for concrete degradation processes are given in (2), while others are currently under development or are presented in the relevant literature, and some are already incorporated in specialized software (see next section).

## 5. Software tools

For the purposes of carrying out the analyses described in the present paper the commercial software tool **FReET-D** was used ([www.freet.cz](http://www.freet.cz)). It is a feasible and user friendly combination of analytical models and simulation techniques [26]. It represents a specialized code for assessing the potential degradation of newly designed as well as existing concrete structures. More than 30 models for carbonation, chloride ingress, reinforcement corrosion and other phenomena are provided (though not all have been fully verified yet). In (27), several models utilized in FReET-D are compared and verified, and a description of carbonation and chloride ingress into concrete is presented. Full probabilistic formats are employed, making it possible to perform: (i) the assessment/prediction of degradation progress over time together with its statistical characteristics, and (ii) probability analyses using a relevant limiting condition – e.g. Eq. (2). Note that the second variant is not employed in the present paper.

Other software products suitable for handling the issues involved in the durability design or assessment of concrete structures with SCM also exist. Let us mention e.g. the RC LifeTime web page, Life-365 and EUCON. **RC LifeTime** is a simple-to-use tool which utilizes three models of the concrete carbonation process. It considers input data as random variables and performs stochastic analysis. It is freely accessible at <http://www.freet.cz/rclifetime.html>. **Life-365** is a computer program operating on a deterministic basis for predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of reinforced concrete exposed to chlorides (authors: M.D.A. Thomas



## 5. Oprogramowania

W celu przeprowadzenia analiz opisanych w niniejszej pracy zastosowano dostępne na rynku oprogramowanie FReET-D ([www.freet.cz](http://www.freet.cz)). Oprogramowanie to jest łatwym w zastosowaniu i przyjaznym dla użytkownika połączeniem modeli analitycznych i technik symulacyjnych [26]. Jest on specjalistycznym kodem do oceny potencjalnego zagrożenia destrukcją nowych projektów, jak również istniejących konstrukcji betonowych. Znanych jest ponad 30 modeli dotyczących karbonatyzacji, wnikania chlorków, korozji zbrojenia i innych procesów (choć nie wszystkie zostały jeszcze w pełni zweryfikowane). We wcześniejszej pracy części autorów (27) porównano i zweryfikowano kilka modeli stosowanych w oprogramowaniu FReET-D oraz przedstawiono opis karbonatyzacji i wnikania chlorków do betonu. Stosowane są metody probabilistyczne, umożliwiające przeprowadzenie: (i) oceny/przewidywania postępu destrukcji w funkcji czasu wraz z charakterystyką statystyczną oraz (ii) analiz probabilistycznych, stosujących odpowiednie warunki graniczne – na przykład równanie (2). Należy zaznaczyć, że drugi wariant nie jest uwzględniony w niniejszej pracy.

Są również inne przydatne programy komputerowe związane z projektowaniem trwałości lub oceną konstrukcji betonowych ze stosowaniem DMC. Wymieńmy na przykład stronę internetową RC LifeTime, Life - 365 i EUCON. **RC LifeTime** jest prostym w obsłudze narzędziem, które wykorzystuje trzy modele procesu karbonatyzacji betonu. Oprogramowanie wykorzystuje dane wejściowe, jako zmienne losowe i przeprowadza analizę stochastyczną. Jest ono bezpłatne i dostępne pod adresem <http://www.freet.cz/rclifetime.html>. **Life-365** to program komputerowy stosujący metodę deterministyczną do przewidywania czasu użytkowania i kosztów cyklu życia konstrukcji żelbetowych, narażonych na działanie chlorków (autorzy: M.D.A. Thomas i E.C. Bentz). Oprogramowanie jest bezpłatne, dostępne pod adresem internetowym <http://www.silicafume.org/specifiers-lifecycle.html> i jest często wykorzystywane w USA. Program EUCON (28) może być stosowany do oceny czasu użytkowania betonu zagrożonego karbonatyzacją i wnikaniem chlorków. EUCON nie jest oprogramowaniem probabilistycznym, ale zapewnia opcje modelowania i szczegółowej optymalizacji ekonomicznej, jak również uwzględnia wpływ oddziaływań środowiska.

## 6. Porównania z doświadczalnymi wynikami głębokości karbonatyzacji

Wyniki krótkoterminowych, przyspieszonych badań przeprowadzonych przez Jianga i in. (29) wykorzystano do porównywania szacowanej i oznaczonej doświadczalnie średniej wartości głębokości karbonatyzacji [tablica 4]. Określono doświadczalnie głębokość karbonatyzacji, na podstawie krótkiego, przyspieszonego badania tego procesu w komorze o temperaturze 20°C, wilgotności względnej 70% i stężeniu CO<sub>2</sub> 20% (29). Do oszacowania głębokości karbonatyzacji stosowano dwa modele zawarte w oprogramowaniu FReET-D (opisane w punkcie 5):

and E.C. Bentz). It is freely accessible at <http://www.silicafume.org/specifiers-lifecycle.html> and is frequently used in the USA. **EUCON** (28) can be used for the estimation of concrete service life impacted by carbonation and chloride ingress. EUCON is not a probabilistic software package but it provides options for modeling and detailed economic as well as environmental effect optimization.

## 6. Comparisons with experimental carbonation depth findings

The results of short-term accelerated tests performed by Jiang et al. were utilized (29) for the comparison of predicted and experimentally observed mean carbonation depth values – see Table 4. The experimentally observed carbonation depths were determined after a short accelerated carbonation test in a chamber with a temperature of 20°C, a relative humidity of 70% and a CO<sub>2</sub> concentration of 20% (29). For the prediction of the carbonation depth two models included in FReET-D software (described in Section 5) were used:

- 1) the model developed by Papadakis et al. [12] with the  $k$ -value as an input variable (**model a**);
- 2) the model developed by Jiang et al. [29] without the  $k$ -value as an input variable (**model b**).

The set of input data were chosen according to the composition of the specimens used by Jiang et al. (29), and are shown in Table 5. Since low-calcium fly ash (3.69% CaO) was used as an SCM for experiment (29), three alternative  $k$ -values were investigated in the case of model **a**: (a)  $k = 0.2$ , as recommended in EN 206 (4) for the composition and properties of concrete when using fly ash and CEM I 32.5; b)  $k = 0.4$ , as presented in the revised version of EN 206 (6) and (c)  $k = 0.5$ . The last  $k$ -value was experimentally established and recommended by (13) – see Table 1. In the case of model **b** the degrees of hydration of cement ( $\alpha$ ) and fly ash ( $\beta$ ) were used according to the data published in (30).

In the case of model **a**, which utilizes the  $k$ -values, the best agreement between experimental and analytical results has been gained for the  $k$  value experimentally established in (13), i.e. for  $k = 0.5$  – see Fig. 1 and Table 4. This might be due to the fact that the values of factor  $k$  recommended in EN 206 [ $k = 0.2$  (4),  $k = 0.4$  (6)] were developed for the purposes of concrete strength representation and do not properly express the basis of chemical reactions between cement and SCM - namely calcium hydroxide consumption, which plays a decisive role in concrete carbonation. FReET-D software may thus be utilized for the partial verification of “problematic” input variables (in this case the  $k$ -value), and can be subsequently used for modeling concrete carbonation in concretes with similar composition. Model **b** (without  $k$ -value utilization) yields results closer to the experimentally observed values – see Table 4 and Fig. 1.

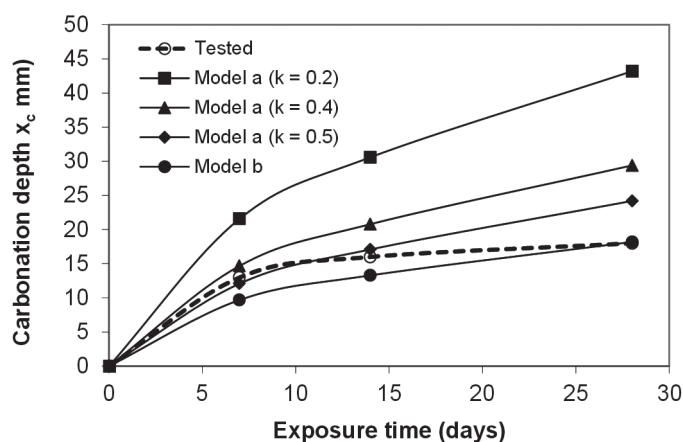
Moreover, since the input parameters are treated as random variables, the scatter assessment of carbonation depth  $x_c$  over time can be evaluated. E.g., in the case of model **b** the coefficient of



- 1) model opracowany przez Papadakis i in. [12] ze współczynnikiem  $k$ , jako zmienną wejściową (**model a**);
- 2) model opracowany przez Jianga i in. [29] bez współczynnika  $k$  (**model b**).

Zbiór danych wejściowych został wybrany według składu próbek stosowanych przez Jianga i in. (29), a podano go w tablicy 5. Ponieważ w badaniach (29), jako dodatek DMC stosowano popiół lotny o małej zawartości wapnia (3,69% CaO), w przypadku modelu **a** badano trzy alternatywne wartości  $k$ : (a)  $k = 0,2$  zgodnie z zaleceniami normy EN 206 (4) dla składu i właściwości betonu przy stosowaniu popiołu lotnego i cementu CEM I 32,5, (b)  $k = 0,4$  jak przedstawiono w zaktualizowanej wersji normy EN 206 (6) i (c)  $k = 0,5$ . Ostatnia wartość  $k$  została wyznaczona doświadczalnie i jest zalecana przez Papadakis i Tsimasa (13) [tablica 1]. W przypadku modelu **b** stopnie uwodnienia cementu ( $\alpha$ ) i popiołu lotnego ( $\beta$ ) przyjęto zgodnie z danymi zawartymi w pracy Wang i in. (30).

W przypadku modelu **a**, który wykorzystuje współczynnik  $k$ , najlepszą zgodność wyników doświadczalnych a wyliczonymi z modeli osiągnięto dla wartości  $k = 0,5$  wyznaczonej doświadczalnie przez Papadakis i Tsimasa(13) [rysunek 1 i tablica 4]. Może to być spowodowane tym, że wartości współczynnika  $k$  zalecane w normie EN 206. [ $k = 0,2$  (4),  $k = 0,4$  (6)] zostały wybrane z punktu widzenia wytrzymałości betonu i nie uwzględniają reakcji chemicznych cementu z dodatkami DMC – a mianowicie zmniejszenie zawartości wodorotlenku wapnia, który odgrywa decydującą rolę w karbonatacji betonu. Oprogramowanie FReET-D może być zatem wykorzystywane do częściowej weryfikacji „problematycznych” zmiennych wejściowych (w tym przypadku współczynnika  $k$ ), oraz może być następnie wykorzystane do modelowania karbonatacji



Rys. 1. Średnie wartości głębokości karbonatacji w funkcji czasu, wyznaczone doświadczalnie przez Jianga (29) oraz oszacowane z zastosowaniem modeli.

Fig. 1. Mean carbonation depth values (experimentally observed (29) and predicted by models) vs. time.

variation COV = 21.5%, which means that about 70% of the possible realizations of  $x_c$  in 28 days have been found to be in the range from 14.3 to 22.1 mm. The best fit of the probabilistic distribution function (PDF) for carbonation depths has been found using the Kolmogorov Smirnov goodness of fit test (Table 4). This may be used e.g. for the determination of certain confidence intervals of  $x_c$ .

## 8. Conclusions

- This study presents a discussion of the  $k$ -value concept used in EN 206, analytical modeling and probabilistic design for durability. The carbonation process in concretes made from

Tablica 4 / Table 4

OSZACOWANA I WYZNACZONA DOŚWIADCZALNIE GŁĘBOKOŚĆ KARBONATYZACJI  
PREDICTED AND EXPERIMENTALLY OBSERVED CARBONATION DEPTH

Czas, dni Time, days		Głębokość karbonatacji – wartość średnia Carbonation depth – mean value, mm	Współczynnik zmienności, COV %	Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa PDF
7	Oznaczona/Tested	13	-	-
	Model a, $k = 0.2$	21.6	9.2	Gamma, dwu param. Gamma, 2 par
	Model a, $k = 0.4$	14.7	9.9	Lognormalny, trój parametryczny Lognormal, 3 par
	Model a, $k = 0.5$	12.1	10.5	Lognormalny, dwu parametryczny Lognormal, 2 par
	Model b	9.7	21.6	Lognormalny, trój parametryczny Lognormal, 3 par
14	Oznaczona/Tested	16	-	-
	Model a, $k = 0.2$	30.6	9.2	Normalny/Normal
	Model a, $k = 0.4$	20.8	9.9	Normalny/Normal
	Model a, $k = 0.5$	17.1	10.5	Normalny jednocieły OneBounded Normal
	Model b	13.3	21.7	Lognormalny, trój parametryczny Lognormal, 3 par
28	Oznaczona/Tested	18	-	-
	Model a, $k = 0.2$	43.3	9.2	Weibull max, trój parametryczny Weibull max, 3 par
	Model a, $k = 0.4$	29.4	9.9	Beta
	Model a, $k = 0.5$	24.2	10.4	Lognormalny, trój parametryczny Lognormal, 3 par
	Model b	18.2	21.5	Weibull min, trój parametryczny Weibull min, 3 par

Tablica 5 / Table 5

ZMIENNE WEJŚCIOWE

INPUT VALUES

Zmienna wejściowa Input variable	Współczynnik zmienności PDF	Średnia Mean	Współczynnik zmn. COV %	Model
Czas, lata Time, years	Deterministyczny Deterministic	0.0192, 0.0383 i 0.0767		a, b
Zawartość CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> content mg/m <sup>3</sup>	Normalny Normal	3.6667 · 10 <sup>5</sup>	12	a, b
Wilgotność względna, Relative humidity %	Beta; a = 0, b = 100	70	7	a, b
Zawartość jednostkowa cementu, Unit con- tent of cement, kg/m <sup>3</sup>	Normalny Normal	150	3	a, b
Zawartość jednostkowa wody, Unit content of water, kg/m <sup>3</sup>	Normalny Normal	127	3	a, b
Zawartość jednostkowa popiołu lotnego, Unit content of fly ash, kg/m <sup>3</sup>	Lognormalny, dwu parametryczny Lognormal, 2 par	183	1	a, b
Ciężar właściwy cementu, Specific gravity of cement kg/m <sup>3</sup>	Normalny Normal	3100	2	a
Współczynnik k (-) k-factor (-)	Deterministyczny Deterministic	0.2, 0.4 i 0.5	-	a
Stopień hydratacji cementu Hydration degree of cement (-)	Normalny dwu-ucięty Two Bounded Normal	0.83 dla 7 dni 0.85 dla 14 dni 0.88 dla 28 dni	5	b
Fracja masowa CaO w cemencie, Weight fraction of CaO in cement, %	Normalny dwu-ucięty Two Bounded Normal	63.78	5	b
Fracja masowa SiO <sub>2</sub> w cemencie, %	Normalny dwu-ucięty	21.45	5	b
Fracja masowa Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w cemencie, %	Normalny dwu-ucięty Two Bounded Normal	4.68	5	b
Fracja masowa Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w cemencie, %	Normalny dwu-ucięty Two Bounded Normal	6.15	5	b
Fracja masowa SO <sub>3</sub> w cemencie, %	Normalny Normal	1.08	5	b
Stopień hydratacji popiołu lotnego (-)	Normalny dwu-ucięty TwoBounded Normal	0.16 dla 7 dni 0.17 dla 14 dni 0.19 dla 28 dni	5	b
Fracja masowa CaO w popiele lotnym, %	Normalny/Normal	3.69	5	b
Fracja masowa SiO <sub>2</sub> w popiele lotnym, %	Normalny dwu-ucięty TwoBounded Normal	44.98	5	b
Fracja masowa Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w popiele lotnym, %	Normalny dwu-ucięty Two Bounded Normal	30.08	5	b
Fracja masowa Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w popiele lotnym, %	Normalny dwu-ucięty Two Bounded Normal	13.92	5	b
Fracja masowa SO <sub>3</sub> w popiele lotnym, %	Lognormalny, dwu param. Lognormal, 2 par	0.15	5	b
Parametr układu porów w beton.	Deterministyczny Deterministic	2.1	-	b

betonów o podobnym składzie. Model **b** (bez wykorzystania współczynnika *k*) daje wyniki bliższe do uzyskanych doświadczalnie [tablica 4 oraz rysunek 1].

Ponadto, ponieważ parametry wejściowe traktowane są jako zmienne losowe, ocena rozrzutu wyników dotyczących głębokości karbonatyzacji  $x_c$  może być oszacowana w czasie. Na przykład

cements with SCM is studied and comparisons with experimental results are provided.

- The *k*-value should not only reflect strength characteristics but also take account of the resistance of concrete against different degradation effects, giving consideration to time-dependence and the type and grain size of used cement and supplement-

w modelu  $b$  współczynnik zmienności = 21,5 %, co oznacza, że około 70% z możliwych oznaczonych  $x_c$  po 28 dniach przypadło w zakresie od 14,3 do 22,1 mm. Najlepsze dopasowanie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa dla głębokości karbonatyzacji uzyskano stosując test zgodności Kolmogorova-Smirnova (tablica 4). Można go zastosować na przykład do określenia pewnych przedziałów ufności dla  $x_c$ .

## 8. Wnioski

- W pracy przedstawiono dyskusję pojęcia współczynnika  $k$ , stosowanego w normie EN 206, modelowania analitycznego oraz probabilistycznego projektowania trwałości. Badano proces karbonatyzacji betonów wykonanych z cementów z dodatkami DMC oraz dokonano porównania z wynikami doświadczalnymi.
- Współczynnik  $k$  powinien odzwierciedlać nie tylko wytrzymałość, lecz także uwzględniać odporność betonu na różne czynniki korozyjne, rozważając zależności czasowe, rodzaj i uziarnienie zastosowanego cementu oraz drugorzędnych materiałów cementowych DMC, pielęgnację, aktywność dodatków DMC i uziarnienie kruszywa. Takie zadanie jest dość skomplikowane. Niemożliwe jest uzyskanie odpowiednio dobranych wartości współczynnika  $k$ , do zapewnienia efektywnego projektowania trwałości.
- Zakłada się zatem, że uzasadnione i praktyczne będzie zalecenie stosowania sprawdzonych modeli projektowych [jak to wspomniano w załączniku J w normie (4)], które mogą służyć jako skuteczne podejście inżynierskie do oceny trwałości i właściwości technicznych betonu – jego składu, oszacowanie degradacji, między innymi do ilościowego oznaczania czasu użytkowania i jego charakterystyki statystycznej. Podejście probabilistyczne również może być wykorzystywane do projektowania i oceny konstrukcji betonowej w określonych warunkach eksploatacyjnych (nie tylko ograniczonych do klas ekspozycji przedstawionych w Eurokodach). Ponadto, będzie ważne zintegrowane podejście doświadczalne/numeryczne, oparte na właściwościach użytkowych (31, 32) a czasochłonne doświadczenia będzie można ograniczyć.
- Powinno się stosować podejście stochastyczne, aby uwzględniać wpływ rozrzutu stosowanych zmiennych z uwzględnieniem konsekwencji niezawodności. Niektóre gotowe do zastosowania narzędzia programowe, opracowane dla praktyki projektowej, mogą być bardzo przydatne.

## Podziękowania

Praca została wykonana przy wsparciu finansowym Czech Science Foundation, Projekt nr P104/12/0308 (autorzy czescy). Praca ta była również wspierana przez: FFG - Forschungsförderungsgesellschaft w ramach grantu « Optimierte Monitoringsysteme für die normbasierte Zuverlässigkeitsbewertung von Ingenieurstrukturen » OMZIN (autorzy austriaccy).

tary cementing materials, curing, the reactivity of SCMs and aggregate granulometry. Such a task is rather a complex one. It is unfeasible to gain a sufficient variety of  $k$ -values to enable effective durability design and variant assessment.

- It is thus supposed that it will be reasonable and practical to recommend the application of proven design models [similarly as was mentioned in Appendix J of (4)] which may serve as an effective engineering approach for the assessment of concrete durability performance – i.e. for concrete specification, for degradation prognosis – so e.g. for the quantitative determination of service life and its statistical characteristics. Also, a probabilistic approach may be used in concrete structure design/assessment under specific environmental and operating conditions (not restricted to the exposure classes given in the Eurocodes). Moreover, an integrated experimental/numerical and performance-based approach will be supported (31, 32) and time consuming experiments partially avoided.
- To effectively incorporate the influence of the scatter of involved variables with consideration of the reliability consequences a stochastic approach should be employed. Some ready-to-use software tools created to be employed in design practice are highly useful.

## Acknowledgements

This outcome has been achieved with the financial support of the Czech Science Foundation, Project No. P104/12/0308 (Czech authors). This work was also supported by the: FFG – Forschungsförderungsgesellschaft within the grant « Optimierte Monitoringsysteme für die normbasierte Zuverlässigkeitsbewertung von Ingenieurstrukturen » OMZIN (Austrian authors).

## Literatura / References

1. ISO 16204: Durability – Service life design of concrete structures. ISO, 2012.
2. fib Final Draft Model Code 2010. fib Bulletins No. 65 and 66. International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland. 2012.
3. G. Habert, A method for allocation according to the economic behavior in the EU-ETS for by-products used in cement industry. Int. J. Life Cycle Assess. Published on-line: 06 July 2012. doi: 10.1007/s11367-012-0464-1.
4. EN 206-1 : Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. European Standard. 2000.
5. EN 197-1: Cement - Composition, specifications and conformity criteria – Part 1: Common cements. European Standard. 1992.
6. FprEN 206: Concrete – Specification, performance, production and conformity. Final Draft European Standard. 2013.
7. J. Bickley, R. D. Hooton, K. C. Hover, Preparation of a Performance-based Specification for Cast-in-Place Concrete: a) Phase I (2006); b) Phase II (2008), P2P Initiative, RMC Research & Education Foundation, Silver Spring, USA.
8. V. Baroghel-Bouny, T. Q. Nguyen, P. Dangla, Assessment and prediction of RC structure service life by means of durability indicators and physical/chemical models. Cem. Concr. Comp., **31**, 522–534 (2009).



9. I. A. Smith, The design of fly-ash concretes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, **36**, 769-790 (1967).
10. CEN/TC 104/SC 1 N 717: Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept. CEN Technical report, TG5-170, October 26<sup>th</sup> 2011.
11. ISO 13823: General Principles on the Design of Structures for Durability. 2008.
12. V. G. Papadakis, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cem. Concr. Res.*, **30**, 291–299 (2000).
13. V. G. Papadakis, S. Tsimas, Supplementary cementing materials Part I: efficiency and design in concrete. *Cem. Concr. Res.*, **32**, 1525–1532 (2002).
14. V. G. Papadakis, Efficiency factors (k-values) for supplementary cementing materials regarding carbonation and chloride penetration. Proc. of Fifth Int. Conf. on Durability of Concrete, CANMET/ACI, ed. V.M. Malhotra, Vol. I, 173-187, Barcelona, Spain 2000.
15. A. Bentur, D. Mitchell, Material performance lessons. *Cem. Concr. Res.*, **38**, 259-272 (2008).
16. A. Bentur, Impact of additions: indicators for durability and strength performance. International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 19-21 March 2006, Madrid, Spain; Proc. edit by V. Baroghel-Bouny et al., 297-309, RILEM Publication 2007.
17. K. G. Babu, S. N. Rao, Efficiency of fly ash in concrete with age. *Cem. Concr. Res.*, **26**, 3, 465–474 (1996).
18. D. W. Hobbs, Carbonation of concrete containing PFA. Magazine of Concrete Research, **46**, 166, 35-38 (1994).
19. V. Bilek, Development of concrete with ternary binders, Proc. of 12<sup>th</sup> Int. CANMET Conf. on recent advances in concrete technology and sustainability issues, Supplementary papers, Prague, Czech Rep., 547-562 (2012).
20. M. Chromá, F. Pernica, B. Teplý, Blended cements, durability and reliability of concrete structures. Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium Non-Traditional Cement and Concrete, 216-223 Brno, Czech Republic 2005.
21. M. Chromá, P. Rovnaník, B. Teplý, Carbonation Modeling and reliability analysis of RC structures made from blended cements. International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 19-21 March 2006, Madrid, Spain; Proc. edit by V. Baroghel-Bouny et al., 319-325, RILEM Publication 2007.
22. R. Härdtl, The k-value concept applied for GGBFS – principles and experiences. Internat. RILEM Confer. On Mater. Sci. – MATSCI, – Vol. III, 189-198, Aachen 2010.
23. E. Gruyaert, N. Maes, N. De Belie, Performance of BFS concrete: k-Value concept versus equivalent performance concept. *Constr. Build. Mat.*, **47**, 441-455, Elsevier 2013.
24. P. K. Mehta, Durability– Critical Issues for the Future. *Concrete International*, 27-33 (1997).
25. B. Teplý, M. Chromá, P. Rovnaník, Durability assessment of concrete structures: reinforcement depassivation due to carbonation. *Structure and Infrastructure Engineering*, **6**, 3, 317 – 327, June 2010.
26. D. Novák, M. Vořechovský, B. Teplý, FReET: Software for the statistical and reliability analysis of engineering problems and FReET-D: Degradation Module. *Advances in Engineering Software* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.06.011>.
27. B. Teplý, M. Chromá, P. Rovnaník, D. Novák, Role of modeling in probabilistic durability assessment of concrete structures. CD-ROM, Proc., Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, 2012, edit. A. Strauss, D. M. Frangopol, K. Bergmeister, International Association for Life-Cycle Engineering, CRC Press, Taylor & Francis Group.
28. V. G. Papadakis, M. P. Efstathiou, Computer modeling of concrete service life. In *Cement Combinations for Durable Concrete*, edited by R. K. Dhir, 777–786, Thomas Telford: London 2005.
29. L. Jiang, B. Lin, Y. Cai, A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. *Cem. Concr. Res.*, **30**, 699-702 (2000).
30. A. Wang, Ch. Zhang, W. Sun, Fly ash effects II. The active effect of fly ash. *Cem. Concr. Res.*, **34**, 2057-2060 (2004).
31. A. Strauss, K. Bergmeister, D. Novák, D. Lehký, Probabilistic response identification and monitoring of concrete structures [Stochastische Parameteridentifikation bei Konstruktionsbeton für die Betonerhaltung] *Beton- und Stahlbetonbau*, **99**, 12, 967-974 (2004).
32. R. Wendner, A. Strauss, T. Guggenberger, K. Bergmeister, B. Teplý, Approach for the assessment of concrete structures subjected to chloride induced deterioration [Ansatz zur beurteilung von chloridbelasteten stahlbetonbauwerken mit bewertung der restlebensdauer], *Beton- und Stahlbetonbau*, **12**, 105, 778-786 (2010).