

# Rozwój właściwości betonu w ujęciu draftu prEN 1992-1-1:2021

mgr inż. Estera Urbaniak, dr inż. Agnieszka Jędrzejewska, Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

Nie ulega wątpliwości, że stosowanie cementów wieloskładnikowych do produkcji betonów na potrzeby wznoszenia konstrukcji żelbetonowych jest ukonstytuowaną praktyką wykonawczą. W projektowaniu konstrukcji żelbetonowych natomiast w znikomym stopniu uwzględnia się wpływ mieszanki betonowej, opierając proces projektowy głównie na klasie betonu. Wynika to m.in. z braku narzędzi, które pozwoliłyby na efektywne uwzględnianie specyficznych właściwości spoiw z różnym udziałem dodatków mineralnych. Dlatego też w odpowiedzi na potrzeby rynku budowlanego w projektowanej właśnie nowej wersji normy EN 1992-1-1 (aktualny draft prEN 1992-1-1:2021) zaproponowano modyfikację modeli opisujących rozwój właściwości betonu w czasie z uwagi na wpływ stosowanego spoiwa oraz ich aktualizację na podstawie nowych badań obecnie stosowanych w Europie materiałów.

## 2. Proces projektowania konstrukcji betonowych

Cementy wieloskładnikowe, ze względu na obniżoną zawartość klinkieru portlandzkiego, a co za tym idzie niższą kaloryczność, stosuje się przy wznoszeniu elementów o średniej i dużej masywności, gdzie pożądane jest ograniczenie ilości wydzielanego ciepła hydratacji w fazie dojrzewania [1, 2]. Do tych elementów zaliczyć można średniomasywne ściany (np. zbiorników, tuneli) oraz masywne elementy konstrukcyjne w budownictwie przemysłowym i infrastrukturalnym, takie jak przyczółki mostów czy masywne bloki i płyty fundamentowe.

Dobór składników mieszanki betonowej, w tym typu oraz ilości cementu (spoiwa) jest zagadnieniem z zakresu technologii betonu. Celem projektowania mieszanki jest uzyskanie wymaganej klasy betonu przy jednoczesnym zapewnieniu charakterystyk betonu pożądanych dla konkretnej realizacji, jak np. wydłużenie czasu wiązania, ograniczenie ilości wydzielanego ciepła hydratacji oraz wynikowej temperatury dojrzewającego betonu czy ograniczenie skurczu. Skład mieszanki betonowej nie jest natomiast zwykle uwzględniany przez projektanta na etapie projektowania konstrukcji, kiedy to wskazuje się jedynie wymaganą klasę betonu. Należy jednak pamiętać, że skład mieszanki

betonowej ma kluczowe znaczenie w rozwoju właściwości betonu w okresie jego dojrzewania, tj. od chwili ułożenia betonu w deskowaniu do czasu uzyskania przez beton wymaganej przez założoną klasę wytrzymałości pozwalającej na oddanie konstrukcji do eksploatacji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wspomnianych wcześniej elementów masywnych i średniomasywnych, które mogą ulec uszkodzeniu jeszcze w fazie dojrzewania na skutek oddziaływań odkształceń wymuszonych spowodowanych zmianami temperatury dojrzewającego betonu i skurczu, a także w elementach konstrukcyjnych, w których wymagane jest wczesne uzyskanie wysokiego poziomu dojrzałości w możliwie krótkim czasie, jak np. konstrukcje sprężone.

Za taki stan rzeczy odpowiada brak systemowej współpracy pomiędzy projektantem konstrukcji a technikiem betonu. Holistyczne podejście do projektowania konstrukcji żelbetonowych można zaobserwować w przypadku dużych, krytycznych inwestycji, jednak nie jest to wciąż powszechna praktyka. Pośrednio wynika to z braku narzędzi, które wspomagałyby tę współpracę. W obecnie obowiązującej wersji normy PN EN 1992-1-1 [3] proces projektowania konstrukcji żelbetonowych opiera się przede wszystkim na klasie betonu. Wpływ zastosowanego spoiwa jest uwzględniany poprzez klasyfikację cementów ze względu na tempo rozwoju ich wytrzymałości. Klasyfikacja ta jednak opiera się jedynie na klasach wytrzymałościowych cementów, a nie ich typie (składzie). Co więcej, wśród inżynierów pokutuje przekonanie, że betony wykonane na cementach wieloskładnikowych są po prostu gorsze od betonów na cementach klinkierowych. Wynika to z faktu, że wraz ze spadkiem procentowego udziału klinkieru w spoiwie spada tempo procesu hydratacji oraz zwiększa się poziom energii aktywacji potrzebnej do rozpoczęcia tego procesu. W efekcie wytrzymałość takich betonów narasta wolniej, jednak można zaobserwować istotne przyrosty wytrzymałości po 28 dniu dojrzewania, dzięki czemu przy odpowiednim projekcie mieszanki betonowej możliwe jest uzyskanie tych samych klas betonu co w przypadku stosowania cementów portlandzkich, jednak w późniejszym okresie. Obecna wersja normy nie uwzględnia tego faktu.

Powyższe podejście do projektowania jest jednak sprzeczne z obecnymi trendami kładącymi nacisk na ekologię i zrównoważony rozwój. W tym kontekście naturalne wydaje się być wspieranie rozwoju betonów wykorzystujących odpady

poprzemysłowe jako częściowy – lub nawet całkowity – substytut klinkieru. W projekcie normy prEN 1992-1-1 [4] zaproponowano nową klasyfikację betonów według typu i klasy stosowanych spoiw, a także zmodyfikowane modele rozwoju właściwości betonu zależnych od stopnia hydratacji, tj. właściwości mechanicznych oraz skurczu. Zagadnienia te są omawiane szczegółowo w Załączniku B do projektu normy. Niniejszy artykuł w sposób krytyczny przybliży czytelnikowi propozycję projektu normy prEN 1992-1-1, wskazując na różnice w stosowanym dotychczas podejściu zalecanym przez PN EN 1992-1-1:2008.

Prezentując modele matematyczne proponowane przez obie normy, autorki starały się utrzymać oryginalne oznaczenia, jednak z uwagi na pewne zmiany w zapisie pomiędzy omawianymi dokumentami jak również dla ułatwienia zrozumienia omawianych zagadnień w niektórych przypadkach intencjonalnie ujednoliciły oznaczenia oraz prezentowały wyrażenia matematyczne w przekształconej formie. Dlatego też pracę tę należy traktować jako wskazówki do projektowania, a nie instrukcję do normy.

### 3. Hydratacja cementu

W niedużym uproszczeniu beton można zdefiniować jako materiał powstały z połączenia cementu, wody i kruszywa, który uzyskuje sztywność i wytrzymałość w procesie wiązania (hydratacji) cementu. W efekcie wiązania cementu z wodą tworzy się matryca cementowa, w której zatopione są ziarna kruszywa. Proces hydratacji cementu odpowiada więc za rozwijanie się właściwości mechanicznych betonu, w tym wytrzymałości oraz modułu sprężystości. Wartości tych właściwości zależą od poziomu dojrzałości betonu, czyli stopnia zaawansowania procesu hydratacji, zwanego po prostu stopniem hydratacji. Z definicji stopień hydratacji to ilość cementu, która uległa związaniu w stosunku do całkowitej ilości cementu [5]. Zgodnie z tą definicją beton uzyskuje swoje końcowe właściwości w momencie, gdy stopień hydratacji osiągnie 100%. Należy tutaj jednak zaznaczyć, że całkowita hydratacja cementu w betonie nie jest praktycznie możliwa. Dodatkowo proces ten jest rozłożony w czasie i choć po okresie najintensywniejszej hydratacji zmiany są już niewielkie, proces hydratacji może postępować latami, a w masywniejszych konstrukcjach nawet dziesiątkami lat. Zwykło się jednak przyjmować, że po pewnym okresie zmiany wynikające z postępującego procesu hydratacji są znikome i otrzymane właściwości można uznać za końcowe. Na tej podstawie powszechnie uznaje się wiek betonu 28 dni jako wiek betonu dojrzałego; również obecnie obowiązująca norma PN EN 1992-1-1 [3] odnosi klasę betonu do jego wytrzymałości 28-dniowej.

W praktycznym ujęciu określenie stopnia hydratacji jest jednak bardzo trudne, dlatego też ten parametr nie znalazł zastosowania w praktyce inżynierskiej. Zdecydowanie wygodniej jest w tym przypadku operować czasem – wiekiem

betonu – stąd też normowe modele rozwoju właściwości betonu dojrzewającego wyrażane są właśnie w funkcji czasu. Istotny jest jednak fakt, że proces hydratacji jest zależny od temperatury. Po pierwsze, jak wspomniano we wprowadzeniu, rozpoczęcie procesu hydratacji wymaga dostarczenia odpowiedniej ilości energii, zwanej energią aktywacji, której wartość różni się w zależności od składu mineralogicznego spoiwa. Po drugie, można zauważyć, że proces hydratacji będzie postępował szybciej w temperaturach wyższych od temperatury odniesienia (dla której wyznaczono 28-dniowe wartości wytrzymałości), a wolniej w temperaturach niższych. Aby odzwierciedlić tę zależność, rzeczywisty wiek betonu można zastąpić tzw. wiekiem ekwiwalentnym, który oznacza czas, w jakim beton musiałby dojrzewać w temperaturze odniesienia, aby osiągnąć te same właściwości, co dojrzewając w danej temperaturze. Oznacza to więc, że wiek ekwiwalentny betonu dojrzewającego w temperaturach wyższych od temperatury odniesienia będzie większy od rzeczywistego wieku betonu, a w niższych – odwrotnie. Wiek ekwiwalentny betonu dojrzewającego w temperaturze  $T(t)$  został zdefiniowany na podstawie równania Arrheniusa jako [6]:

$$t_r(t, T) = \int_0^t e^{\frac{-E_a}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} dt \quad (1)$$

gdzie:

$E_a$  – oznacza energię aktywacji [J/mol],

$R$  – stała gazowa = 8.314 [J/(mol·K)],

$T_{ref}$  – temperatura odniesienia [K].

Zarówno obecna wersja normy, jak i projekt draftu definiują wiek ekwiwalentny dla temperatury odniesienia 20°C = 293 K, przy założeniu stałej wartości energii aktywacji  $E_a = 33500$  J/mol [6]. Stąd przedstawiona w normach forma:

$$t_r(t, T) = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left( 13,65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right) \quad (2)$$

Taka definicja wieku ekwiwalentnego nie pozwala na uwzględnienie różnic w dynamice procesu hydratacji spoiw o różnym składzie poprzez modyfikację wartości charakterystycznej dla nich energii aktywacji, która zwiększa się wraz ze wzrostem masowego udziału dodatków mineralnych. Uściślenie tej zależności wraz z podaniem energii aktywacji dla cementów stosowanych w Polsce mogłoby się znaleźć w Załączniku Krajowym do nowej wersji normy EN 1992-1-1.

### 4. Klasyfikacja cementów

W obecnej wersji normy PN EN 1992-1-1 [3] rozróżniono tempo rozwoju właściwości betonu, wynikające z dynamiki procesu hydratacji, poprzez klasyfikację cementów, z wykorzystaniem których wykonano beton. Klasyfikacja ta bazuje na klasach wytrzymałości cementu i wyróżnia trzy kategorie:

**Tabela 1.** Klasyfikacja betonów wg PN EN 1992-1-1 [3] oraz prEN 1992-1-1 [4] wykonanych na cementach stosowanych w Polsce

Typ cementu	Skład	Klasa wg	
		[3]	[4]
CEM I 42,5N – NA	Klinkier portlandzki: ≥ 95%	R	CN/CR
CEM I 42,5R		R	CR
CEM I 42,5R – NA		R	CR
CEM I 52,5R		R	CR
CEM I 52,5R – NA		R	CR
CEM II/B-V 32,5R – HSR	Klinkier portlandzki: 65–75% Popiół lotny: 25–35%	N	CN
CEM II/B-S 42,5N – NA	Klinkier portlandzki: 65–79% Popiół lotny: 21–35%	N	CN
CEM II/A-V 42,5R	Klinkier portlandzki: 80–94% Popiół lotny: 6–20%	R	CN
CEM II/B-M (S-V) 42,5R	Klinkier portlandzki: 65–79% Żużel wielkopiecowy i popiół lotny: 21–35%	R	CN
CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	Klinkier portlandzki: 80–88% Żużel wielkopiecowy: 12–20%	R	CN
CEM II/A-V 52,5R – NA	Klinkier portlandzki: 80–86% Żużel wielkopiecowy: 14–20%	R	CN
CEM III/A 42,5N – LH/HSR/NA	Klinkier portlandzki: 35–64%/35–50% Żużel wielkopiecowy: 36–65%/50–65%	N	CN
CEM V/A (S-V) 42,5N – LH/HSR/NA	Klinkier portlandzki: 40–64% Żużel wielkopiecowy: 18–30% Popiół lotny: 18–30%	N	CN/CS

- Klasa R: cementy o wysokiej wczesnej wytrzymałości (cementy klas 42,5R, 52,5N i 52,5R);
- Klasa N: cementy o normalnej wczesnej wytrzymałości (cementy klas 32,5R i 42,5N);
- Klasa S: cementy o niskiej wczesnej wytrzymałości (cementy klas 32,5N).

Projekt nowej wersji normy prEN 1992-1-1 natomiast definiuje klasy rozwoju wytrzymałości intencjonalnie rozszerzając je na beton, w których kryterium klasyfikacji oparte jest nie tylko na klasie wytrzymałości zastosowanego cementu, ale także jego składzie. Wyróżniono analogicznie jak w obecnej wersji normy trzy kategorie:

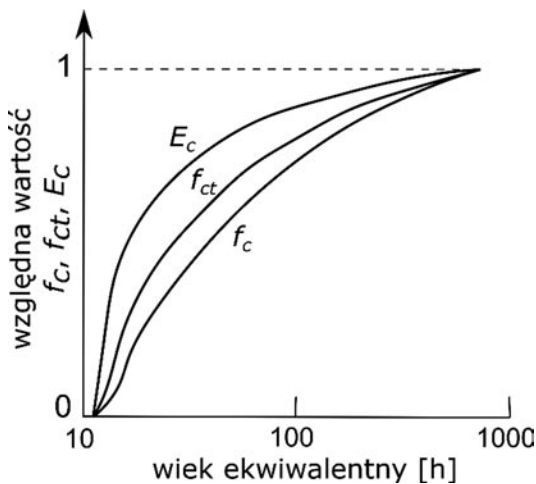
- Klasa CR: betony o wysokiej wczesnej wytrzymałości, wykonane na cementach portlandzkich (np. CEM I 42,5R, 52,5N i 52,5R);
- Klasa CN: betony o normalnej wczesnej wytrzymałości, wykonane na cementach o zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego w zakresie 35–65% udziału masowego lub popiołu lotnego w zakresie 20–35% udziału masowego (np. CEM I 32,5R, CEM II 42,5R);
- Klasa CS: betony o niskiej wczesnej wytrzymałości, wykonane na cementach o zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego powyżej 65% udziału masowego lub popiołu lotnego powyżej 35% udziału masowego (np. CEM II/B 42,5N, CEM III 32,5N).

Cementy stosowane w Polsce na przykładzie oferty handlowej największych polskich producentów cementu wraz z ich klasyfikacją według obecnej wersji PN EN 1992-1-1 [3] oraz projektu normy prEN 1992-1-1[4] zestawiono w tabeli 1. Jak

można zauważyć, próbując utożsamić ze sobą kategorie klas według obu wersji normy, tj. S≡CS, N≡CN oraz R≡CR, w przypadku cementów wieloskładnikowych widać rozbieżności w klasyfikacji. Można zauważyć tendencję, w której projekt nowej normy prEN 1992-1-1 zakłada wolniejszy rozwój właściwości betonu dla cementów wieloskładnikowych aniżeli obecna wersja PN EN 1992-1-1. Co jednak istotniejsze, kryteria klasyfikacji podane są w sposób ogólny i nie obejmują właściwości wszystkich stosowanych cementów, przez co przyporządkowanie danej mieszanki betonowej do klasy jest zadaniem pozostawiającym duże pole do interpretacji. Mając na uwadze przebieg procesu projektowania konstrukcji, w którym projektanci przykładają znikomą uwagę do wpływu składu mieszanki betonowej na zachowanie konstrukcji w fazie dojrzewania, ich brak doświadczenia skutkować może błędnymi założeniami. Dlatego też zdaniem autorów szczególne wytyczne w zakresie klasyfikacji betonów z uwagi na tempo rozwoju właściwości w zależności od zastosowanego spoiwa powinny znaleźć się w Załączniku Krajowym do nowo projektowanej wersji normy.

## 5. Rozwój właściwości mechanicznych betonu

Wytrzymałość oraz sztywność (moduł sprężystości) betonu narastają wraz z postępowaniem procesu hydratacji. Uogólniony schemat rozwoju wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie oraz modułu sprężystości betonu pokazano na rysunku 1. Można na nim zauważyć, że najwolniej przyrasta wytrzymałość na ściskanie, proporcjonalnie do stopnia hydratacji



Rys. 1. Rozwój właściwości mechanicznych betonu w czasie (za [9])

cementu. Rozwój wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości jest szybszy.

Światowe normy do projektowania konstrukcji betonowych, w tym obie omawiane wersje normy EN 1992-1-1, definiują funkcje rozwoju właściwości mechanicznych betonu, które można opisać ogólnym wzorem:

$$f(t) = [\beta_{cc}(t)]^n \cdot f \tag{3}$$

gdzie  $f(t)$  i  $f$  oznaczają wartość właściwości w czasie  $t$  oraz jej wartość końcową, natomiast wykładnik  $n$  odwzorowuje dynamikę przyrostu danej właściwości.

Wartości wykładnika  $n$  wyznaczone w badaniach oraz wartości zalecane przez normy PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4] zestawiono w tabeli 2. Można zauważyć, że zmiany zaproponowane w prEN 1992-1-1 mają na celu zbliżenie parametrów modelu do wartości wyznaczonych w badaniach laboratoryjnych betonów. Wytrzymałość na rozciąganie wyznaczona zgodnie z propozycją nowej wersji normy będzie się zmieniać szybciej, a moduł sprężystości wolniej, aniżeli wynikałoby to z obliczeń z wykorzystaniem parametrów obecnej wersji normy. Istotna jest również definicja funkcji rozwoju właściwości mechanicznych w czasie  $\beta_{cc}(t)$ . W obecnie obowiązującej normie PN EN 1992-1-1 [3] została ona podana jako:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \tag{4}$$

gdzie składnik liczbowy „28” odnosi się do 28-dniowej („końcowej”) wartości danej właściwości. Współczynnik  $s$  jest

natomiast tzw. współczynnikiem kształtu, zależnym od klasy wczesnej wytrzymałości cementu, który pozwala na odzwierciedlenie dynamiki procesu hydratacji w zależności od rodzaju zastosowanego cementu. Zalecane wartości tego współczynnika wynoszą 0,20, 0,25 oraz 0,38 odpowiednio dla cementów klas R, N i S.

Projektowana wersja normy prEN 1992-1-1 [4] adaptuje równanie (4) poprzez uwzględnienie w modelu tzw. wieku odniesienia  $t_{ref}$ :

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right)\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right] \tag{5}$$

Jest to bardzo istotna zmiana, która pozwala na założenie, że oczekiwana wytrzymałość betonu może zostać uzyskana w późniejszym czasie, a co za tym idzie, wyznaczenie właściwości betonu po 28 dniu [10]. W tym celu w modelu rozwoju właściwości mechanicznych należy przyjąć wiek betonu  $t_{ref}$ , dla którego określono pożądane właściwości: w praktyce właściwości betonów wolnodojrzewających określa się zwykle dla 56 lub 91 dni. Jak szczegółowo pokazano w pracy [11], zgodnie z przewidywaniami projektu normy prEN 1992-1-1 [4] w przypadku betonów wysokich wytrzymałości ( $\geq 60$  MPa) wykonanych na cementach o wysokiej wczesnej wytrzymałości, przyrosty po 28 dniu są znikome (w 91. dniu dojrzewania betonu odpowiednio 3, 1 i  $< 1\%$  dla wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i modułu sprężystości). W drugiej skrajnej sytuacji, tj. betonów o wytrzymałości  $\leq 35$  MPa wykonanych na cementach o niskiej wczesnej wytrzymałości te przyrosty są natomiast istotne i wynoszą odpowiednio 16, 9 i 5%.

Dodatkowo w projekcie normy prEN 1992-1-1 [4] podano nowe wartości współczynników kształtu, uzależnione od klasy rozwoju wytrzymałości betonu. Zestawienie wartości tych współczynników pokazano w tabeli 3. Oprócz klasy rozwoju wytrzymałości betonu (czyli rodzaju cementu), wartość współczynnika  $s$  zależna jest też od klasy betonu. Zakres wartości współczynnika jest też znacznie szerszy aniżeli w obecnej normie (od 0,1 do 0,6 względem 0,20 do 0,38).

Wartości funkcji rozwoju właściwości  $\beta_{cc}(t)$  przy założeniu  $t_{ref} = 28$  dni zestawiono w tabeli 4. W takim przypadku wzór (5) upraszcza się do postaci (4), a wyniki zależą jedynie od wartości współczynnika  $s$ . Stąd też w przypadku, gdy projekt nowej wersji normy zakłada większą wartość tego współczynnika, przewidywana szybkość rozwoju właściwości mechanicznych będzie wolniejsza niż by to wynikało z założeń

Tabela 2. Wartości wykładnika  $n$  w funkcji rozwoju właściwości mechanicznych w czasie wg PN EN 1992-1-1 [3], prEN 1992-1-1 [4] oraz badań [9]

Właściwość	Wartość wykładnika $n$		
	PN EN 1992-1-1 [3]	prEN 1992-1-1 [4]	badania [9]
Wytrzymałość na ściskanie	1	1	1
Wytrzymałość na rozciąganie	1 (dla $t \leq 28$ dni)	0,5	0,50 – 0,67
Moduł sprężystości	0,3	1/3	0,30 – 0,43

**Tabela 3.** Wartości współczynnika kształtu  $s$  w funkcji rozwoju właściwości mechanicznych w czasie wg prEN 1992-1-1 [4]

Wytrzymałość betonu	Współczynnik $s$		
	Klasa CS	Klasa CN	Klasa CR
$f_{ck} \leq 35$ MPa	0,6	0,5	0,3
$35$ MPa $< f_{ck} < 60$ MPa	0,5	0,4	0,2
$f_{ck} \geq 60$ MPa	0,4	0,3	0,1

obecnej wersji normy PN EN 1992-1-1, a w przeciwnym wypadku – odwrotnie.

W tym miejscu warto bliżej przyjrzeć się zachowaniu obu modeli we wczesnej fazie dojrzewania betonu (w pierwszych kilku dniach). Dokładne określenie wartości właściwości mechanicznych w tym okresie jest szczególnie istotne w przypadku projektowania konstrukcji z uwagi na oddziaływanie odkształceń termicznych wywołanych w procesie hydratacji cementu. Dlatego też w projekcie normy prEN 1992-1-1 [4], a dokładnie w Załączniku D do tej normy, zaproponowano dalszą modyfikację równania (5) poprzez uwzględnienie dodatkowego parametru – czasu końca fazy uśpienia  $t_{dor}$ :

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{t_{ref} - t_{dor}}{t - t_{dor}}}\right)\sqrt{\frac{28 - t_{dor}}{t_{ref} - t_{dor}}}\right] \quad (6)$$

Odzwierciedla to fakt, że wytrzymałość i sztywność betonu nie zaczynają narastać od razu od momentu połączenia ze sobą składników mieszanki betonowej, ale dopiero

w momencie zakończenia procesu wiązania. Przed rozpoczęciem wiązania, kiedy to mieszanka betonowa ma postać półpłynną, nie można mówić o rzeczywistej wytrzymałości betonu, a jedynie o wytrzymałości pozornej wynikającej z ciśnienia kapilarnego w porach oraz tarcia pomiędzy składnikami mieszanki [12]. W okresie pomiędzy rozpoczęciem a zakończeniem wiązania obserwuje się niemal całkowite wyhamowanie procesu wydzielania ciepła hydratacji, stąd też faza ta zwana jest fazą uśpienia, a parametr  $t_{dor}$  oznaczający zakończenie procesu wiązania został określony w projekcie normy prEN 1992-1-1 czasem końca fazy uśpienia. Wartość tego parametru zależy od kilku czynników, przede wszystkim od rodzaju zastosowanego cementu. W przypadku stosowania domieszek mających na celu wydłużenie czasu wiązania należy ten fakt również uwzględnić w przewidywaniu rozwoju właściwości betonu. W projekcie normy prEN 1992-1-1 podano sugerowane wartości  $t_{dor}$  uzależniając je, podobnie jak w przypadku współczynnika  $s$  (tab. 3), od klasy betonu oraz klasy rozwoju wytrzymałości betonu. Proponowane przez projekt normy wartości  $t_{dor}$  wraz z porównaniem wartości funkcji rozwoju wytrzymałości  $\beta_{cc}(t)$  bez uwzględnienia czasu końca fazy uśpienia oraz z jego uwzględnieniem zestawiono w tabeli 5. Można zauważyć, że uwzględnienie w modelu czasu końca fazy uśpienia ma znaczenie jedynie w pierwszych dniach dojrzewania betonu (do 3 dnia); po tym czasie przewidywane wartości wytrzymałości są już niemal równe. Naturalnie, wpływ parametru  $t_{dor}$  uwidacznia się wraz ze spadkiem dynamiki rozwoju

**Tabela 4.** Wartości funkcji rozwoju właściwości mechanicznych betonów  $\beta_{cc}$  wg PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4]

Klasa betonu $f_{ck}$ [MPa]	Klasa rozwoju wytrzymałości	Norma	Współczynnik $s$	Wartość $\beta_{cc}(t)$ [%]*		
				1 d	3 d	7 d
$\leq 35$	S/CS	PN EN [3]	0.38	20	46	68
		prEN [4]	0.6	8	29	55
	N/CN	PN EN [3]	0.25	34	60	78
		prEN [4]	0.5	12	36	61
	R/CR	PN EN [3]	0.2	42	66	82
		prEN [4]	0.3	28	54	74
$> 35$ $< 60$	S/CS	PN EN [3]	0.38	20	46	68
		prEN [4]	0.5	12	36	61
	N/CN	PN EN [3]	0.25	34	60	78
		prEN [4]	0.4	18	44	67
	R/CR	PN EN [3]	0.2	42	66	82
		prEN [4]	0.2	42	66	82
$\geq 65$	S/CS	PN EN [3]	0.38	20	46	68
		prEN [4]	0.4	18	44	67
	N/CN	PN EN [3]	0.25	34	60	78
		prEN [4]	0.3	28	54	74
	R/CR	PN EN [3]	0.2	42	66	82
		prEN [4]	0.1	65	81	90

\*  $\beta_{cc}(28d) = 100\%$

**Tabela 5.** Wartości funkcji rozwoju właściwości mechanicznych betonów  $\beta_{cc}$  wg prEN 1992-1-1 [4] z uwzględnieniem i bez uwzględnienia czasu końca fazy uśpienia  $t_{dor}$

Klasa betonu $f_{ck}$ [MPa]	Klasa rozwoju wytrzymałości	Parametr $t_{dor}$ [d]	$\beta_{cc}(t_{dor})/\beta_{cc}(t_{dor}=0)$ [%]*		
			1 d	3 d	7 d
≤ 35	S/CS	0,50	28	85	97
	N/CN	0,45	41	89	97
	R/CR	0,40	64	94	99
> 35 < 60	S/CS	0,45	41	89	97
	N/CN	0,40	55	92	98
	R/CR	0,35	78	97	99
≥ 60	S/CS	0,35	61	93	98
	N/CN	0,30	74	96	99
	R/CR	0,30	90	99	100

wytrzymałości oraz klasy betonu: w przypadku betonów klas nie wyższych niż C35/45 z zastosowaniem cementów o niskim przyroście wytrzymałości wczesnej szacowana wartość funkcji rozwoju wytrzymałości betonu po 1 dniu dojrzewania będzie stanowiła niecałe 30% wartości szacowanej bez uwzględnienia czasu końca wiązania, podczas gdy w przypadku betonów o klasie co najmniej C60/75 po tym czasie wartości te będą niemal równe.

Omawiając właściwości mechaniczne betonu warto zwrócić uwagę na fakt, że projekt nowej wersji normy prEN 1992-1-1 [4] modyfikuje także wzór na wyznaczanie wartości modułu sprężystości betonu. Dotychczas, w obecnie obowiązującej normie PN EN 1992-1-1 [3], średnią 28-dniową wartość modułu sprężystości wyznaczyć można było na podstawie średniej wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm}$  [MPa] jako:

$$E_{cm} = 22 \cdot (0,1f_{cm})^{0,3} \text{ [GPa]} \quad (7)$$

W projekcie normy prEN 1992-1-1 [4] nie tylko zmienia się wykładnik potęgi (z 0,3 na 1/3 jak w przypadku wykładnika potęgi w funkcji rozwoju modułu sprężystości w czasie), ale dodatkowo pojawia się nowy parametr  $k_E$ , który pozwala uwzględnić wpływ rodzaju zastosowanego kruszywa na wartość modułu sprężystości:

$$E_{cm} = k_E \cdot f_{cm}^{1/3} \text{ [GPa]} \quad (8)$$

Podstawową wartością współczynnika  $k_E$  przyjętą jak dla kruszywa kwarcytowego, jest 9,5. Wartość współczynnika  $k_E$  dla innych kruszyw waha się natomiast między 5 a 13; według obecnie obowiązującej wersji jest to stała wartość wynosząca  $22 \cdot (0,1)^{0,3} = 11$ . Zalecane dla polskich kruszyw wartości współczynnika  $k_E$  można zdefiniować w Załączniku Krajowym.

## 6. Skurcz betonu

Na całkowite odkształcenia skurczowe składa się skurcz autogeniczny oraz skurcz od wysychania. Choć zjawiska te są

ze sobą łączone, ich mechanizm oraz charakterystyka istotnie się różnią. Skurcz autogeniczny wynika ze zmniejszenia objętości betonu związanego z utratą wody na skutek jej wiązania z cementem, podczas gdy w przypadku skurczu od wysychania ubytek wilgoci spowodowany jest przez wymianę wilgoci z betonu z otoczeniem oraz jej migrację na skutek wynikającej z tego różnicy koncentracji wilgoci w objętości betonu.

Można więc zauważyć, że skurcz autogeniczny jest bezpośrednio związany z procesem wiązania (hydratacji) cementu, stąd też jego dynamika jest największa we wczesnych fazach dojrzewania betonu. W późniejszym okresie przyrosty skurczu autogenicznego są już znacznie mniejsze. Skurcz od wysychania, natomiast, zaczyna się rozwijać dopiero w momencie zakończenia pielęgnacji betonu. W praktyce deskowanie usuwa się z elementu betonowego po kilku dniach, a następnie pielęgnuje się powierzchnię betonu na mokro przez okres 7–14 dni, stąd też moment ten można uznać dopiero za początek rozwoju skurczu od wysychania. Skurcz od wysychania jest zjawiskiem długoterminowym i narasta przez cały okres eksploatacji konstrukcji. Jego wartość końcowa jest zwykle kilkukrotnie większa od wartości skurczu autogenicznego.

Skurcz autogeniczny, zwany w projekcie nowej wersji normy prEN 1992-1-1 skurczem podstawowym (ang. *basic shrinkage*), zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowanego cementu, jego składu mineralogicznego i przemiału oraz stosunku wodno-cementowego mieszanki betonowej. Ponieważ skurcz autogeniczny zachodzi wskutek samoosuszenia betonu poprzez odciąganie wody z porów, na jego wpływ narażone są w szczególności betony o niskim i bardzo niskim stosunku w/c [13]. Porównując rozwój skurczu autogenicznego klinkieru portlandzkiego oraz dodatków stosowanych przy produkcji cementów, tj. przede wszystkim popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego, można zauważyć, że zaczyn cementowy na bazie żużla w początkowej fazie osiąga mniejsze wartości skurczu autogenicznego aniżeli zaczyn na bazie klinkieru z uwagi na istotne zjawisko pęcznienia, natomiast jego ostateczna wartość jest większa.

Odwrotnie jest w przypadku popiołu lotnego, który osiąga mniejsze wartości skurczu autogenicznego niż klinkier [14]. Stąd też w cementach wieloskładnikowych na ostateczną wartość skurczu wpływ będzie miała ilość i rodzaj zastosowanych dodatków.

W obecnej wersji normy PN EN 1992-1-1 [3] oraz w projekcie prEN 1992-1-1 [4] rozwój skurczu autogenicznego w czasie opisano w sposób analogiczny jako iloczyn nominalnej („końcowej”) wartości skurczu oraz funkcji rozwoju skurczu w czasie:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \cdot \alpha_{NDP,b} \quad (9)$$

W projekcie normy prEN 1992-1-1 pojawia się parametr  $\alpha_{NDP,b}$ , który pozwala za pośrednictwem wytycznych zamieszczonych w Załączniku Krajowym uwzględnić specyficzne charakterystyki mieszanek betonowych stosowanych w danym kraju, których skład w znaczący sposób odbiega od składu typowych mieszanek stosowanych w Europie, na podstawie których skalibrowano model. Dotyczyć to może np. mieszanek na bazie kruszywa wapiennego, mieszanek o małej ilości spoiwa lub z zastosowaniem spoiw charakteryzujących się obniżonym skurczem [10].

Końcowa wartość skurczu autogenicznego w obecnej wersji normy PN EN 1992-1-1 [3] opisana jest za pomocą liniowej funkcji charakterystycznej 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie, a więc zależy jedynie od klasy betonu:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck,28} - 10) [\mu\text{m/m}] \quad (10)$$

W projekcie nowej wersji normy prEN 1992-1-1 przyjęto natomiast sformułowanie zaczerpnięte z normy Model Code 2010 [15], zgodnie z którym końcowa wartość skurczu autogenicznego jest hiperboliczną funkcją średniej 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie betonu:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = \alpha_{bs} \left( \frac{f_{cm,28}}{60 + f_{cm,28}} \right)^{2,5} [\mu\text{m/m}] \quad (11)$$

W sformułowaniu projektu normy pojawia się znak „minus” zgodnie z konwencją, w której odkształcenia skurczowe, wynikające ze zmniejszenia objętości, wyrażane są jako ujemne. Nowa forma funkcji końcowej wartości skurczu autogenicznego w odróżnieniu od obecnej jest poprawna fizycznie, dzięki

**Tabela 6.** Wartości współczynnika  $\alpha_{bs}$  do określania wartości skurczu betonu wg prEN 1992-1-1 [4]

Klasa wczesnej wytrzymałości betonu	$\alpha_{bs}$
Niska wczesna wytrzymałość (klasa CS)	800
Normalna wczesna wytrzymałość (klasa CN)	700
Wysoka wczesna wytrzymałość (klasa CR)	600

czemu pozwala uniknąć problemu zmiany znaku w przypadku betonów niskich klas oraz problemu z osiągnięciem końcowej wartości skurczu dla betonów wysokich klas [10]. Dodatkowo skurcz autogeniczny został uzależniony od średniej, a nie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie, w celu zminimalizowania wpływu rozrzutu laboratoryjnie wyznaczonych wartości wytrzymałości na końcową wartość skurczu [16]. Ostatnią bardzo istotną modyfikacją jest uwzględnienie rodzaju zastosowanego cementu poprzez dodanie współczynnika  $\alpha_{bs}$  zależnego od klasy rozwoju wytrzymałości betonu (CS, CN lub CR). Wartości współczynnika  $\alpha_{bs}$  według prEN 1992-1-1 [4] zestawiono w tabeli 6. Wartość współczynnika wzrasta wraz ze spadkiem szybkości wczesnego przyrostu wytrzymałości. Można to utożsamiać z faktem, że betony o wysokiej wytrzymałości wczesnej wykonywane są zwykle z cementów portlandzkich, natomiast betony wykonane na cementach wieloskładnikowych charakteryzują się wolniejszym tempem procesu hydratacji. Ponieważ istotny udział masowy w tych cementach ma żużel wielkopieczowy, betony wykonane na nich będą charakteryzowały się większym końcowym skurczem. Problematyczne wydaje się jednak to, że przy klasyfikacji betonów według prEN 1992-1-1 klasy rozwoju wytrzymałości utożsamia się w ogólności z ilością dodatków, a nie ich typem. W przypadku cementów popiołowych niska klasa rozwoju wytrzymałości betonu nie musi iść w parze z dużą wartością skurczu autogenicznego. Funkcja rozwoju skurczu autogenicznego w czasie natomiast nie uległa zmianie. Obie wersje normy wyrażają ją za pomocą wykładniczej funkcji czasu w postaci:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2\sqrt{t}) \quad (12)$$

W tym miejscu należy także wspomnieć, że skurcz autogeniczny, który jest bezpośrednio związany z procesem

**Tabela 7.** Wartość końcowa skurczu autogenicznego betonów różnych klas wg PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4]

Klasa betonu		C16/20	C30/37	C45/55	C70/85
$f_{ck}$ [MPa]		16	30	45	70
$f_{cm}$ [MPa]		24	38	53	78
$\varepsilon_{ca}(\infty)$ wg PN EN 1992-1-1		15	50	88	150
$\varepsilon_{ca}(\infty)$ wg prEN 1992-1-1	CS	35	75	121	192
	CN	31	66	105	168
	CR	26	56	90	144

hydratacji, zależy od temperatury. Podobnie jak w przypadku dynamiki rozwoju właściwości mechanicznych, tak i skurcz autogeniczny rozwija się szybciej w wyższych temperaturach [12]. Dlatego też analogicznie zjawisko to można odzwierciedlić poprzez zastosowanie w równaniu wieku ekwiwalentnego zamiast czasu.

Końcowe wartości skurczu autogenicznego betonów różnych klas wykonanych na różnych cementach porównano w tabeli 7. Do porównania wybrano cztery odmienne klasy betonu: C16/20, C30/37, C45/55 oraz C70/85. Należy zauważyć, że przedstawione porównanie ma charakter teoretyczny, ponieważ nie wszystkie kombinacje klasa betonu/klasa cementu są w praktyce możliwe lub stosowane. Można zauważyć, że projekt normy prEN 1992-1-1 przewiduje większe końcowe (a więc i pośrednie) wartości skurczu aniżeli obecna wersja normy PN EN 1992-1-1. Najbliższe obecnym wartościom są te wyznaczone dla betonów o wysokiej wczesnej wytrzymałości, czyli betonów na cementach portlandzkich. Pokazuje to, że projekt nowej wersji normy powinien pozwolić na bliższe rzeczywistości oszacowanie skurczu autogenicznego betonów na cementach wieloskładnikowych, który byłby niedoszacowany przy użyciu modelu rekomendowanego przez obecną wersję normy [16].

Modyfikacje proponowane w modelu rozwoju skurczu od wysychania w projekcie normy prEN 1992-1-1 [4] względem obecnej wersji PN EN 1992-1-1 [3] mają na celu urealnienie modelu poprzez usunięcie kalibracyjnych założeń empirycznych, a następnie sformułowanie równań bazując na fizycznych podstawach wynikających z dyfuzji wilgoci w betonie. Analogicznie jak dla skurczu autogenicznego, skurcz od wysychania opisano jako iloczyn nominalnej („końcowej”) wartości skurczu oraz funkcji rozwoju skurczu w czasie za PN EN 1992-1-1 jako:

$$\epsilon_{cd}(t-t_s) = \beta_{ds}(t-t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd}(\infty) \cdot \beta_{RH} \quad (13)$$

oraz za prEN 1992-1-1 jako:

$$\epsilon_{cd}(t-t_s) = \beta_{ds}(t-t_s) \cdot \epsilon_{cd}(\infty) \cdot \beta_{RH} \cdot \alpha_{NDP,d} \quad (14)$$

Znaczenie parametru  $\alpha_{NDP,d}$  jest analogiczne do znaczenia parametru  $\alpha_{NDP,b}$ , który omówiono wcześniej przy modelu skurczu autogenicznego. Przy założeniu jego sugerowanej wartości równej 1 wzory są niemal tożsame, z wyjątkiem współczynnika  $k_h$ , który w projekcie normy prEN 1992-1-1 został usunięty. Współczynnik ten zależy od miarodajnego

wymiaru przekroju  $h_0$  i przyjmuje wartości od 0,70 dla elementów o  $h_0 \geq 500$  mm do 1,00 dla elementów o  $h_0 = 100$  mm. Współczynnik  $k_h$  odzwierciedla więc wpływ rozmiaru elementu poprzez pomniejszenie wartości skurczu od wysychania w elementach o większych przekrojach.

Nominalna wartość skurczu od wysychania w obu wersjach normy opisana jest tą samą funkcją, w której zmieniono jednak niektóre parametry. I tak tę wartość skurczu można wyznaczyć według następujących wzorów za, odpowiednio, normą PN EN 1992-1-1 oraz prEN 1992-1-1:

$$\epsilon_{cd}(\infty) = 0,85 \cdot (220 + 100\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm,28} [\text{MPa}]}{10}) \quad [\mu\text{m/m}] \quad (15)$$

$$\epsilon_{cd}(\infty) = (220 + 100\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-0,012 \cdot f_{cm,28} [\text{MPa}]) \quad [\mu\text{m/m}] \quad (16)$$

gdzie współczynniki  $\alpha_{ds1}$  i  $\alpha_{ds2}$  zależą od rodzaju zastosowanego cementu. Porównanie wartości tych współczynników według obu norm zestawiono w tabeli 8. Wartości współczynnika  $\alpha_{ds1}$  nie uległy zmianie, natomiast w przypadku współczynnika  $\alpha_{ds2}$  przyjęto stałą wartość 0,12. Współczynnik ten nie występuje już jawnie. Zmiana ta, w zależności od klasy betonu, będzie skutkowała różnicą w nominalnej wartości skurczu na poziomie  $\pm$  ok. 1–10%.

Uwagę zwraca natomiast pominięcie mnożnika 0,85 w nowym projekcie normy prEN 1992-1-1. Pojawienie się współczynnika 0,85 w obecnie obowiązującej wersji normy jest bezpośrednio powiązane z wprowadzeniem współczynnika  $k_h$ , który omówiono wcześniej. Te dwa współczynniki zostały dodane w celu obniżenia wartości skurczu od wysychania, dzięki czemu model zaproponowany w normie PN EN 1992-1-1 pozwalał na uzyskiwanie wyników na poziomie zbliżonym do tych przewidywanych przez poprzednie normy (np. Model Code 1978 [17]). Spowodowało to jednak istotne zaniżenie przewidywanego skurczu w małych elementach (o niskiej wartości  $h_0$ ), dlatego też efekt ten musiał zostać skompensowany poprzez modyfikację funkcji rozwoju skurczu w czasie [10]. W efekcie funkcja czasu w obecnej wersji normy PN EN 1992-1-1 ma charakter empiryczny i jest opisana wzorem:

$$\beta_{ds}(t-t_s) = \frac{t-t_s}{t-t_s + 0,04h_0^{3/2}} \quad (17)$$

Takie sformułowanie funkcji  $\beta_{ds}$  miało na celu przyspieszenie rozwoju skurczu od wysychania, aby skompensować jego zaniżenie w początkowej fazie. Po usunięciu

**Tabela 8.** Współczynniki  $\alpha_{ds1}$  i  $\alpha_{ds2}$  do wyznaczania nominalnej wartości skurczu od wysychania wg PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4]

Rodzaj cementu	$\alpha_{ds1}$		$\alpha_{ds2}$	
	PN EN 1992-1-1	prEN 1992-1-1	PN EN 1992-1-1	prEN 1992-1-1
S/CS	3		0,13	0,12
N/CN	4		0,12	
R/CR	6		0,11	



**Tabela 9.** Wielkość skurczu od wysychania po 50 latach wg PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4]

	$h_0 = 100 \text{ mm}$		$h_0 = 500 \text{ mm}$	
	PN EN	prEN	PN EN	prEN
$k_h$	1,0	n.d.	0,7	n.d.
$\epsilon_{cd}(\infty)$ wg (15) i (16) [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	334	393	334	393
$\beta_{ds}(50 \text{ lat})$ wg (17) i (18) [%]	99,8	99,1	97,6	82,2
$\epsilon_{cd}(50 \text{ lat})$ wg (13) i (14) [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	333	389	228	323

współczynników korekcyjnych  $k_h$  oraz 0,85, w projekcie normy prEN 1992-1-1 zaproponowano nową postać funkcji rozwoju skurczu od wysychania w czasie zaczerpniętą z normy Model Code 2010 [15], która wynika bezpośrednio z fizycznych podstaw procesu dyfuzji wilgoci w materiale porowatym, jakim jest beton (odzwierciedla to pierwiastek, który został dodany w nowej wersji równania funkcji rozwoju skurczu od wysychania):

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left[ \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,035h_0^2} \right]^{1/2} \quad (18)$$

Współczynnik  $c = 0,004$  w obecnej wersji normy oraz  $0,035$  w projekcie normy oznacza średnią wartość współczynnika dyfuzyjności wilgoci w betonie, którego wartość – jak pokazano – uległa również modyfikacji.

Oba równania uwzględniają wpływ rozmiaru elementu na szybkość skurczu od wysychania za pośrednictwem miarodajnego wymiaru przekroju, który zdefiniowany jest jako stosunek dwukrotności pola przekroju elementu  $A_c$  do obwodu części przekroju wystawionego na wysychanie  $u$ . Miarodajny wymiar przekroju może być więc postrzegany jako miara masywności elementu analogiczna do grubości zastępczej [18], związanej z procesem dyfuzji ciepła (zjawiska transportu ciepła i masy opisane prawami Fouriera i Ficka charakteryzują się dużą analogią). Czym mniejsza jest wartość  $h_0$ , tym krótszą drogę musi pokonać wilgoć do powierzchni na skutek różnicy koncentracji wilgoci w elemencie betonowym a otaczającym powietrzem, a więc spadek wilgotności, a co za tym

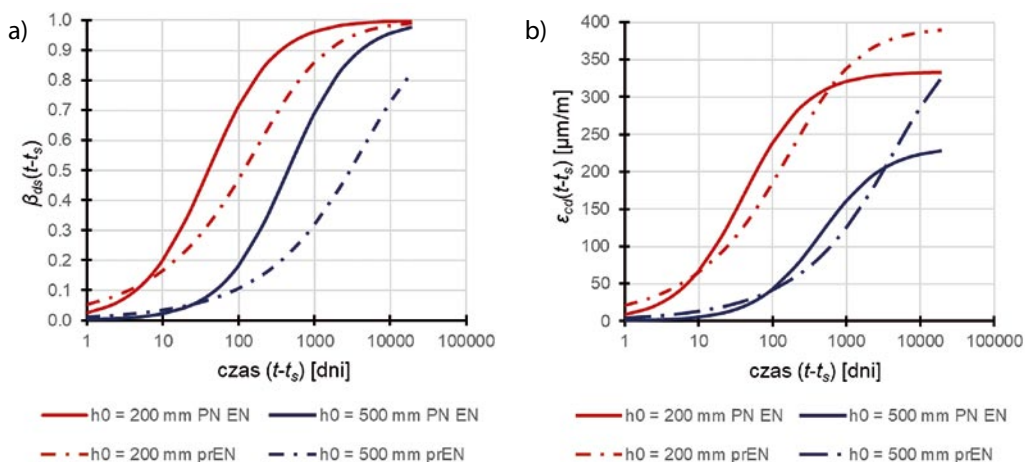
idzie skurcz od wysychania, będą postępowały szybciej. Jest to spójne z powszechnym rozumieniem zjawiska wysychania, które jest intensywniejsze w cieńszych elementach.

Wykres, na którym porównane zostały funkcje rozwoju skurczu od wysychania w czasie 50 lat według PN EN 1992-1-1 i prEN 1992-1-1 na przykładzie elementów o miarodajnym wymiarze przekroju 100 mm i 500 mm pokazano na rysunku 2a. Natomiast właściwy rozwój skurczu dla tych elementów przy założeniu klasy betonu C30/37 na cemencie klasy N/CN oraz  $\beta_{RH} = 1$  (co odpowiada wilgotności względnej powietrza ~65–70%) pokazuje rysunek 2b. Założenia obliczeniowe i najważniejsze wyniki zestawiono w tabeli 9. Jak widać, obecna wersja normy PN EN 1992-1-1 przewiduje wolniejszy przyrost skurczu od wysychania w początkowym okresie, natomiast znacznie bardziej dynamiczny w okresie późniejszym. Efekt ten jest wyraźniejszy dla większych przekrojów. Natomiast ze względu na pominięcie mnożników  $k_h$  oraz 0,85, to projekt normy prEN 1992-1-1 przewiduje większe ostateczne wartości skurczu od wysychania (dla przyjętych założeń jest to rozbieżność nawet powyżej 40%, co potwierdza [10]).

Ostatnim istotnym czynnikiem wpływającym na kształtowanie się skurczu od wysychania jest wilgotność względna powietrza, która w obu modelach wyrażona jest za pomocą współczynnika  $\beta_{RH}$ . W obecnej wersji normy PN EN 1992-1-1 współczynnik ten zdefiniowano jako funkcję wilgotności względnej powietrza  $RH$  [%]:

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_{eq} = 100\%} \right)^3 \right] \quad (19)$$

**Rys. 2.** Rozwój skurczu od wysychania w czasie wg PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4]: a) funkcja rozwoju w czasie 50 lat, b) skurcz od wysychania w czasie 50 lat



Parametr odniesienia  $RH_{eq}$  oznacza średnią względną wilgotność we wnętrzu analizowanego elementu w stanie równowagi wilgotnościowej, którego wartość przyjmuje się na poziomie 100%. W praktyce zauważono jednak, że wilgotność względna elementu betonowego maleje wraz ze wzrostem klasy betonu [10]. Dla klasy betonu o średniej 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm,28}$  nie większej niż 35 MPa  $RH_{eq}$  wynosi 99%, a dla wyższych klas może być wyznaczone ze wzoru [4]:

$$RH_{eq} = 99 \cdot \left( \frac{35}{f_{cm,28} [\text{MPa}]} \right)^{0,1} \leq 99\% \quad (20)$$

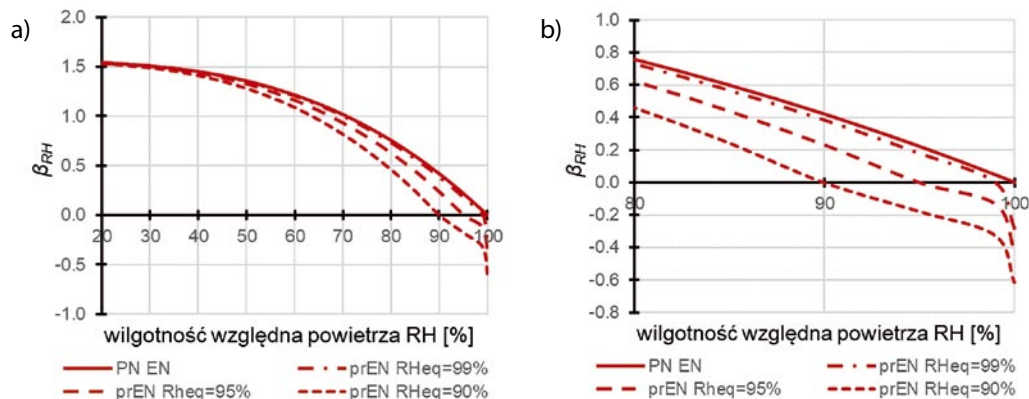
Zgodnie z powyższym wzorem można spodziewać się wartości  $RH_{eq} = 90\%$  dla betonu klasy C80/95, a nawet jedynie 88% dla betonu klasy C100/115. Oznacza to, że w przypadku wysokiej wilgotności względnej powietrza  $RH > RH_{eq}$  następować będzie nie skurcz, a pęcznienie elementu z uwagi na gromadzenie cząsteczek wody w porach betonu, czego nie uwzględnia obecna wersja normy. Dlatego też zaproponowano modyfikację definicji współczynnika  $\beta_{RH}$ , wyszczególniając trzy zakresy względem wilgotności powietrza w odniesieniu do wilgotności względnej elementu betonowego:

- $RH$  powietrza poniżej  $RH$  elementu betonowego w stanie równowagi, przy ograniczeniu  $RH$  powietrza do wartości nie mniejszej niż 20% (wartość graniczna, dla której skalibrowano model, a która dobrze odzwierciedla typowe możliwe warunki wilgotnościowe na świecie);
- $RH$  powietrza powyżej  $RH$  elementu betonowego w stanie równowagi, ale niższa niż 100%;
- $RH$  powietrza równa 100%.

Wzór na współczynnik  $\beta_{RH}$  w projekcie normy prEN 1992-1-1 [4] przyjmuje więc postać:

$$\beta_{RH} = \begin{cases} 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_{eq}} \right)^3 \right] & \text{dla } 20\% \leq RH \leq RH_{eq} \\ 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_{eq}} \right)^2 \right] & \text{dla } RH_{eq} < RH < 100\% \\ 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_{eq}} \right)^2 \right] - 0,25 & \text{dla } RH = 100\% \end{cases} \quad (21)$$

**Rys. 3.** Wpływ wilgotności względnej powietrza  $RH$  oraz elementu betonowego w stanie równowagi na  $RH_{eq}$  na wartość skurczu od wysychania wg PN EN 1992-1-1 i prEN 1992-1-1



Wartości współczynnika  $\beta_{RH}$  według PN EN 1992-1-1 [3] i prEN 1992-1-1 [4] dla wilgotności względnej powietrza od 20 do 100% oraz  $RH_{eq}$  od 99 do 90% porównano na rysunku 3. Co spodziewane, przy wilgotności względnej elementu  $RH_{eq}$  bliskiej 100% przewidywane przez obie normy wartości są niemal identyczne do momentu, gdy obie wilgotności się zrównują. W przypadku wilgotności względnej powietrza powyżej 99% spodziewane byłoby pęcznienie. Analogicznie sytuacja prezentuje się dla niższych wartości  $RH_{eq}$ . Wraz ze wzrostem klasy betonu – bo z tym wiąże się spadek wilgotności względnej elementu betonowego – rozbieżności pomiędzy przewidywaniami obu norm zwiększają się, a różnice w momencie gdy  $RH = RH_{eq}$  wynoszą odpowiednio 0,05; 0,22 i 0,42 dla  $RH_{eq}$  99%, 95% i 90% przy maksymalnej wartości  $\beta_{RH} = 1,54$ . Wraz ze spadkiem  $RH_{eq}$  należy również naturalnie spodziewać się większych wartości wzrostu objętości na skutek pochłaniania wilgoci w warunkach gdy  $RH > RH_{eq}$ .

## 7. Podsumowanie

Obecnie trwają prace nad nową wersją normy EN 1992-1-1. Draft propozycji tej normy prEN 1992-1-1 opublikowany w lutym 2021 roku jest na etapie dyskusji. Planowany termin wejścia w życie normy to rok 2027. Jednym z założeń opracowywanej normy jest dostarczenie narzędzi wspierających projektowanie konstrukcji żelbetonowych z wykorzystaniem cementów wieloskładnikowych w celu zmniejszenia śladu węglowego generowanego przez branżę budowlaną. W draftcie zaproponowano nową klasyfikację betonów z uwagi na tempo rozwoju ich wytrzymałości, uwzględniając nie tylko wytrzymałość, ale także typ (skład) zastosowanego cementu. Utrzymano trzy kategorie odnosząc je do wytrzymałości wczesnej (niska S=CS, normalna N=CN oraz wysoka R=CR). Należy jednak zwrócić uwagę, że przyporządkowanie cementów stosowanych w Polsce do tych kategorii według zaleceń obu norm nie zawsze jest takie samo: zaobserwować można trend, według którego projekt nowej normy przewiduje takie same lub niższe klasy wczesnej wytrzymałości betonu niż obecna wersja normy. Co więcej, klasyfikacja betonów według zaleceń projektu nowej wersji normy

jest niejednoznaczna i pozostawia niebezpiecznie duże pole do interpretacji. Uściślenie klasyfikacji cementów stosowanych w Polsce powinno być zamieszczone w Załączniku Krajowym do normy. Na bazie tej klasyfikacji uaktualniono modele rozwoju właściwości betonu, w tym właściwości mechanicznych oraz skurczu. Ich filozofia nie uległa zmianie, jednak nastąpiła istotna kalibracja tych modeli, aby precyzyjniej odzwierciedlały one zachowanie współczesnych betonów. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że istotny wpływ na ostateczne wyniki będzie miała wspomniana wcześniej różna klasyfikacja tych samych materiałów.

W zakresie rozwoju właściwości mechanicznych zmianie uległy wykładniki potęgi w definicji funkcji rozwoju właściwości mechanicznych w czasie,  $\beta_{cc}$ , których wartości dopasowano na podstawie aktualnych badań betonów. Przede wszystkim projekt nowej wersji normy prEN 1992-1-1 uwzględnił szybsze tempo rozwoju wytrzymałości na rozciąganie. Kalibracji uległy także wartości współczynnika kształtu  $s$ , który uzależniono od klasy betonu oraz klasy rozwoju wytrzymałości betonu. W definicji funkcji rozwoju wytrzymałości w czasie uwzględniono także dwa nowe parametry: czas odniesienia oraz czas końca fazy uśpienia. Czas odniesienia oznacza wiek betonu, dla którego wyznaczono klasę betonu. Dotychczas wymagane było, aby beton danej klasy wykazywał wymaganą przez klasę wytrzymałość po 28 dniach. Według projektu normy ta wytrzymałość może być osiągnięta w późniejszym czasie (zwyczajowo określa się ją po 56. lub 91. dniu dojrzewania betonu). Pozwoli to na wykorzystanie potencjału betonów na cementach wieloskładnikowych, w których wytrzymałość wczesna jest niska, ale obserwuje się istotne, kilkunastoprocentowe przyrosty wytrzymałości po 28. dniu. Betony takie można z powodzeniem stosować w realizacjach, w których nie jest wymagana wysoka wytrzymałość wczesna, a jedynie zapewnienie docelowej wytrzymałości zgodnie z założoną na etapie projektowania klasą.

Modyfikacji uległy także modele rozwoju skurczu betonu. Pozostawiono podział skurczu na skurcz autogeniczny (zwany podstawowym) i skurcz od wysychania, jednak sformułowania niektórych parametrów modeli zmieniono, zaczerpując je z normy Model Code 2010. W przypadku skurczu autogenicznego sformułowanie końcowej wartości skurczu zaproponowano nowe wyrażenie, które w odróżnieniu od obecnie stosowanego wzoru jest poprawne z fizycznego punktu widzenia. Końcową wartość skurczu autogenicznego dodatkowo uzależniono od rodzaju zastosowanego cementu poprzez klasę rozwoju wytrzymałości. Pozwala to na bliższe rzeczywistości oszacowanie skurczu w betonach z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych, zwłaszcza z dużym udziałem masowym żużla wielopieczowego. Obecne sformułowanie, bazujące jedynie na klasie betonu, może prowadzić do niedoszacowania skurczu autogenicznego w betonach wykonanych na cementach innych niż portlandzkie. Natomiast w przypadku skurczu od wysychania

wpływ rodzaju cementu był już uwzględniony w obecnej wersji normy i w projekcie prEN 1992-1-1 nie wprowadzono w tym zakresie istotnych zmian. Główne zmiany zaproponowane w projekcie nowej wersji normy mają na celu sformułowanie modelu rozwoju skurczu od wysychania, który będzie – podobnie jak w przypadku skurczu autogenicznego – bazował na fizycznych podstawach. Usunięto współczynniki korekcyjne  $k_r$  i 0,85, które w sztuczny sposób zaniżały wartość skurczu, oraz przyjęto poprawną z fizycznego punktu widzenia definicję funkcji rozwoju skurczu w czasie. Obecnie funkcjonujące sformułowanie rekomendowane przez PN EN 1992-1-1 ma charakter empiryczny i zostało skalibrowane w taki sposób, aby skompensować niedoszacowanie wielkości skurczu w małych elementach spowodowane wprowadzeniem wspomnianych wcześniej mnożników. Dodatkowo nowy model skurczu od wysychania pozwala precyzyjniej odwzorować rozwój skurczu w coraz częściej stosowanych betonach wysokich i bardzo wysokich wytrzymałości, w tym uwzględnić zjawisko pęcznienia elementów wykonanych z tych betonów w warunkach wysokiej (> 90%) wilgotności względnej powietrza.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Jędrzejewska A., Kanavaris F., Zych M., Schlicke D., Azenha M., Experiences on early age cracking of wall-on-slab concrete structures, *Structures* 27/2020
- [2] Kanavaris F., Jędrzejewska A., Sfikas I.P. et al., Enhanced massivity index based on evidence from case studies: Towards a robust pre-design assessment of early-age thermal cracking risk and practical recommendations, *Construction and Building Materials* 271/2021
- [3] PN EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [4] prEN 1992-1-1:2021 Draft of Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [5] De Schutter G., Taerwe L., General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement. *Cement and Concrete Research* 25(3)1995
- [6] Hansen P. F., Pedersen J., Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete, *Nordisk Betong* 21/1977
- [7] <https://www.gorazdze.pl/pl/Cementy-luzem> (dostęp z dnia 06.06.2022)
- [8] <https://www.cemex.pl/cement-luz> (dostęp z dnia 06.06.2022)
- [9] Kanstad T., Hammer T. A., Bjøntegaard Ø., Sellevold E. J., Mechanical properties of young concrete. Part II: Determination of model parameters and test program proposals, *Materials and Structures* 36/2003
- [10] Müller H. S., Acosta Urrea F., Background Document to Annex B of prEN 1992-1-1 (24.08.2021)
- [11] Zych M., Jędrzejewska A., Komentarz do Załącznika D prEN 1992-1-1 w zakresie odkształceń wymuszonych, *Inżynieria i Budownictwo* 11–12/2021
- [12] Kiernożycki W., *Betonowe konstrukcje masywne*, Polski Cement, Kraków, 2003
- [13] Raczkiewicz W., *Beton – materiał budowlany znany od wieków*, Przegląd Budowlany 10/2012
- [14] Lu T., Li Z., Huang H., Effect of supplementary materials on the autogenous shrinkage of cement paste. *Materials (Basel)* 13(15)2020
- [15] fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2013
- [16] Müller H. S., Acosta Urrea F., Background Document to Sections 5.1.1–5.1.5 of prEN 1992-1-1 (24.08.2021)
- [17] CEB-FIP Model Code 1978
- [18] De Schutter G., Taerwe L., Estimation of early-age thermal cracking tendency of massive concrete elements by means of equivalent thickness, *ACI Materials Journal* 93(5)1996