

CHRISTOPH MÜLLER¹⁾

ŚRODOWISKOWE I TECHNICZNE ASPEKTY STOSOWANIA CEMENTÓW MIESZANYCH W BETONACH²⁾

STRESZCZENIE. Artykuł opracowano w wyniku współpracy instytucji i przedsiębiorstw z kilkunastu krajów europejskich realizowanej ramach Sieci Tematycznej ECOserve. Techniczne i środowiskowe uwarunkowania produkcji i stosowania cementów mieszanych w budownictwie przedstawiono w perspektywie europejskiej. Na podstawie danych niemieckich omówiono efektywność redukcji emisji CO₂ do atmosfery i zużycia energii przy produkcji cementów mieszanych. Przeanalizowano wpływ surowców odpadowych, takich jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy i kamień wapienny na właściwości cementów oraz na właściwości betonu. Omówiono korzyści ze stosowania cementów mieszanych oraz zagadnienia oddziaływania środowiskowego materiałów cementowych na grunt i wodę gruntową.

1. WSTĘP

1.1. PODSTAWOWE INFORMACJE

Proces produkcji cementu wymaga zużycia zarówno dużych ilości energii, jak i surowców. W europejskim przemyśle cementowym osiągnięto już praktycznie maksymalne możliwości obniżenia negatywnego wpływu produkcji cementu na środowisko

¹⁾ Dr. Ing. – Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), Düsseldorf, Niemcy

²⁾ praca powstała w wyniku współpracy w ramach Europejskiej Sieci Tematycznej ECOserve (ang. the paper was prepared as a result of the work done in ECOserve Thematic Network)

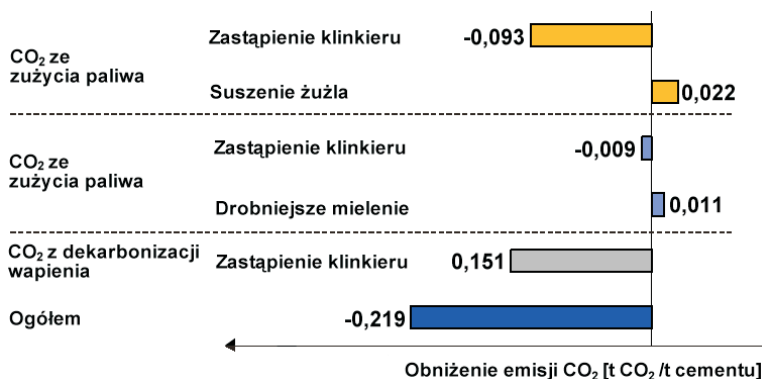
naturalne. Dalsze zmniejszanie tego negatywnego oddziaływania jest możliwe pod warunkiem obniżenia zawartości klinkieru w cemencie tj. poprzez produkcję i stosowanie cementów mieszanych. Do składników głównych cementu mogą należeć: granulowany żużel wielkopiecowy, popioły lotne z elektrowni/elektrociepłowni, naturalne i przemysłowe pucolany oraz wapienie. Produkcja cementów mieszanych skutkuje niższą emisją szkodliwych gazów i mniejszym zużyciem energii elektrycznej, ponieważ zapotrzebowanie na klinkier w tym energochłonnym procesie jest mniejsze.

Krajowe i europejskie normy cementowe (np. EN 197-1) pozwalają na częściowe zastąpienie klinkieru cementowego przez inne składniki. Szczególne znaczenie w całej Europie mają granulowane żużle wielkopiecowe, popioły lotne i niewyprażony kamień wapienny. Regionalnie są też dostępne inne surowce mineralne, które mogą być stosowane jako składniki cementu. Z uwagi na różnorodność tych składników warto przeanalizować właściwości wytwarzanych cementów oraz możliwości ich stosowania. Do określenia udziału klinkieru w cemencie stosuje się pojęcie wskaźnika klinkierowo-cementowego. W Niemczech, na przykład, średni współczynnik klinkierowo-cementowy wynosi obecnie 0,78 [1]. Na rysunku 1 przedstawiono efekty redukcji emisji CO₂ w wyniku zastąpienia klinkieru przez granulowany żużel wielkopiecowy (cement CEM II/B-S 32,5 z 35-cio procentowym udziałem żużla). Obliczenia przeprowadzono przy założeniu średniego zużycia paliwa 3500 MJ/t klinkieru, użycia węgla kamiennego jako paliwa i współczynnika emisji CO₂ dla wytworzenia energii 0,67 t CO₂/MWh, (dane charakterystyczne dane dla Niemiec). W tych warunkach produkcja jednej tony cementu portlandzkiego z użyciem 5 % siarczanów i 5 % drugorzędnych składników dodatkowych jest związana z całkowitą emisją CO₂ wynoszącą 0,842 t CO₂/t cementu (wliczając emisję związaną z produkcją energii elektrycznej). W wyniku zastąpienia 35 % klinkieru granulowanym żużlem wielkopiecowym, można osiągnąć obniżenie emisji CO₂ pochodzącej ze spalania paliwa o około 0,09 t CO₂/t. Dodatkowa energia cieplna jest jednak potrzebna do suszenia granulowanego żużla (około 0,02 t CO₂/t cementu) i ewentualnie do transportu żużla z huty do cementowni (tutaj pominięta). Obniżenie emisji CO₂ związanej z wytworzeniem elektryczności wskutek zastąpienia części klinkieru odpowiada wzrostowi emisji na skutek zwiększonego zapotrzebowania na pobór mocy z powodu drobniejszego mielenia cementu.

Zdecydowanie największe oszczędności uzyskuje się przy stosowaniu kamienia wapiennego – redukcja emisji CO₂ na skutek zastąpienia klinkieru o około 0,15 t CO₂/t cementu; całkowite zmniejszenie emisji wynosi ok. 26 % lub 0,22 t CO₂/t cementu.

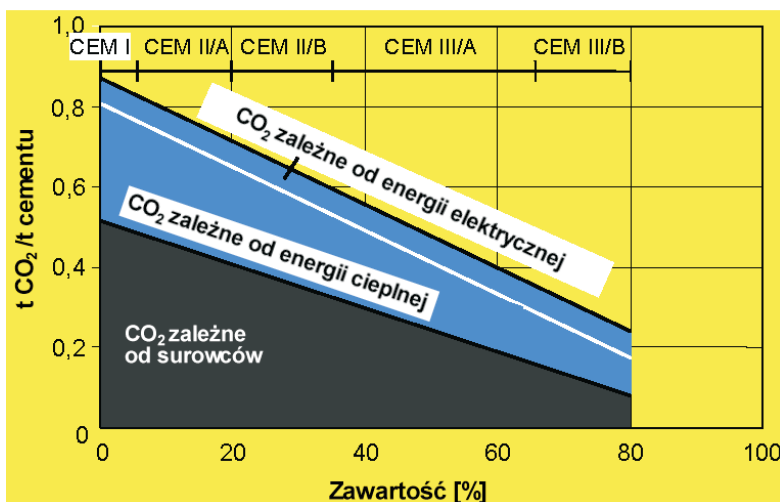
Na rysunku 2 zilustrowano schematycznie wielkość emisji CO₂ związanej z produkcją cementów mieszanych, w zależności od rodzaju surowców i rodzajów zużywanej energii, w funkcji zawartości innych składników cementu. Obliczenia przeprowadzono przy takich samych założeniach jak poprzednio. Wykres dotyczy cementów o klasie wytrzymałości na ściskanie 32,5 N/mm². Z rysunku wynika, że emisja CO₂ obniża się prawie liniowo wraz z zawartością pozostałych głównych składników cementu. Porównując emisję CO₂ związaną z energią stwierdza się możliwość ok. 54 % oszczędności

przy zastąpieniu 80% klinkieru przez granulowany żużel wielkopiecowy. Głównym tego powodem jest konieczność suszenia żużla oraz potrzeba drobniejszego mielenia cementu CEM III. Uwzględniając w bilansie emisję CO₂ związaną z surowcami możliwe oszczędności wynoszą 72%.



Rys. 1. Obniżenie emisji CO₂ do atmosfery w wyniku produkcji cementów mieszanych w Niemczech [1]

Fig.1. CO₂ reduction from the production of blended cements in Germany [1]



Rys.2. Emisja CO₂ przy produkcji cementów mieszanych w Niemczech w funkcji zawartości składników cementu poza klinkierem [1]

Fig.2. CO₂ emissions from the production of blended cements in Germany in function of main constituents content apart from clinker [1]

Emisja CO₂ przy produkcji cementu pochodzi z trzech niezależnych źródeł: z dekarbonizacji wapienia w piecach (około 525 kg CO₂ na tonę klinkieru), ze spalania węgla w piecach (około 335 kg CO₂ na tonę cementu) oraz ze zużycia elektryczności (około

50 kg CO₂ na tonę cementu). Należy zauważyć, że emisja CO₂ z ostatniego wymienionego źródła nie pokrywa się z Dyrektywą Europejską dotyczącą handlu emisjami, która to w zamierzeniu ma zmniejszyć bezpośrednią emisję CO₂ [2]. W 2003 roku przemysł cementowy w Unii Europejskiej wyprodukował około 194 milionów ton cementu i wyemitował około 0,75 tony CO₂ na tonę cementu poprzez bezpośrednią emisję (spalanie paliwa i dekarbonizacja surowców) oraz 0,05 tony CO₂ na tonę cementu przez pośrednią emisję (wykorzystanie elektryczności pochodzącej z elektrowni/elektrociepłowni). Zsumowana pośrednia i bezpośrednia emisja CO₂ wynosi około 0,8 tony CO₂ na tonę cementu [2].

W przemyśle cementowym znane są trzy sposoby możliwego zmniejszenia bezpośredniej emisji CO₂ w najbliższej przyszłości [2]:

- poprawa efektywności wykorzystania energii (możliwy wzrost wydajności wynosi maksymalnie 2%),
- zmniejszenie współczynnika klinkierowo-cementowego (przez wprowadzenie przemysłowych produktów ubocznych),
- wzrost zużycia paliw alternatywnych.

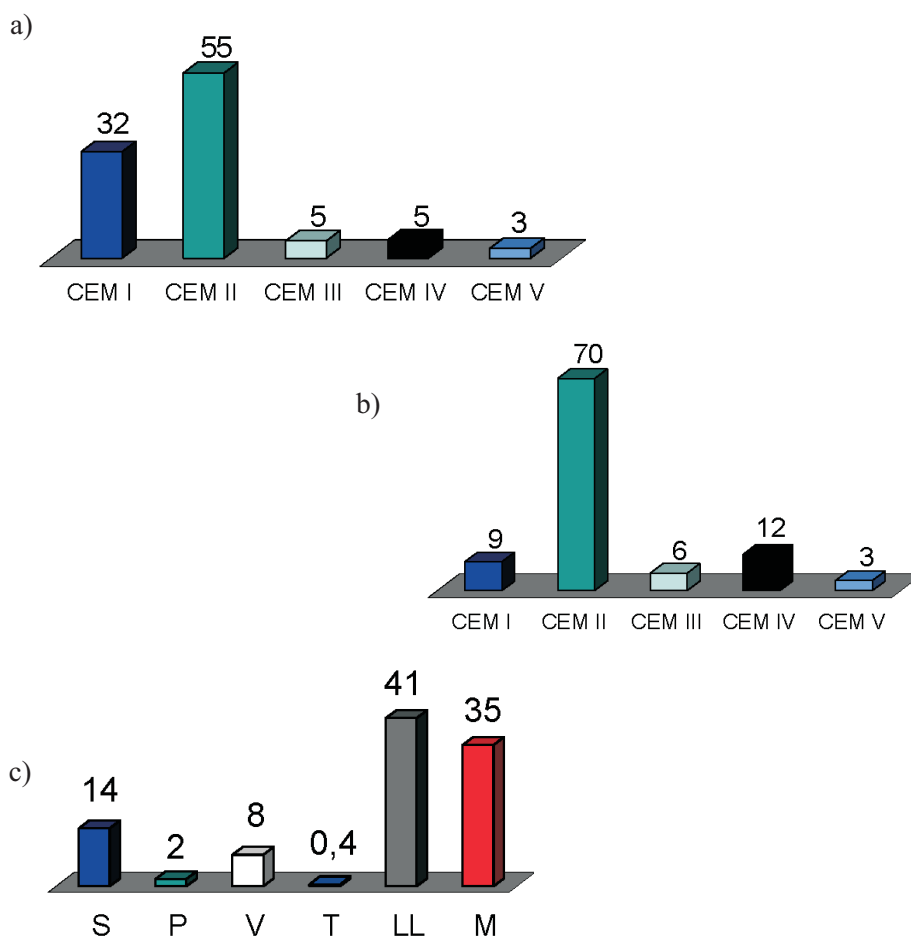
Udział przemysłu cementowego w Unii Europejskiej w całkowitej emisji CO₂ wynosi około 3%.

1.2. PRODUKCJA CEMENTÓW MIESZANYCH W EUROPIE

W krajach członkowskich Unii Europejskiej zauważa się dużą różnorodność produkcji cementów powszechnego użytku, różne są bowiem warunki produkcji, szczególne wymagania klimatyczne czy inne miejscowe warunki, włączając w to również praktykę budowlaną. Wyróżnia się 27 rodzajów cementu powszechnego użytku, które są zdefiniowane w europejskiej normie cementowej EN 197-1, określającej ich skład, wymagania i kryteria zgodności. Na podstawie zawartości innych składników niż klinkier, cementy są podzielone na pięć grup. Od kwietnia 2002 r. wszystkie cementy powszechnego użytku zostały oznakowane znakiem CE zgodnie z normą EN 197-2. Poza cementem portlandzkim CEM I wszystkie pozostałe cementy to cementy mieszane.

Z powodów ekologicznych i ekonomicznych w całej Europie następują zmiany w asortymencie produkowanych cementów. Cementy typu CEM I są coraz częściej zastępowane przez cementy typu CEM II zawierające inne składniki oprócz klinkieru portlandzkiego. Na rysunku 3 zestawiono wyniki sprzedaży różnych typów cementu na podstawie danych stowarzyszenia producentów cementu CEMBUREAU. W klasie wytrzymałości na ściskanie 52,5 cement portlandzki ciągle znajduje się na wysokiej pozycji, ale już w klasie 32,5 i 42,5 udział cementów CEM II znacznie przerasta inne rodzaje cementu. Ogólnie udział cementu portlandzkiego w krajach europejskich stowarzyszonych w CEMBUREAU stanowił w 2003 roku 32% rynku, natomiast udział cementów mieszanych wynosił około 64% (rys. 3a). W klasie wytrzymałości 32,5 udział w rynku cementu portlandzkiego wynosił jedynie 10%, podczas gdy udział cementów mieszanych wynosił około 90% (rys. 3b).

Wśród cementów mieszanych CEM II najczęściej produkowane są cementy portlandzkie wapienne oraz cementy CEM II-M z więcej niż z dwoma składnikami (rys. 3c).



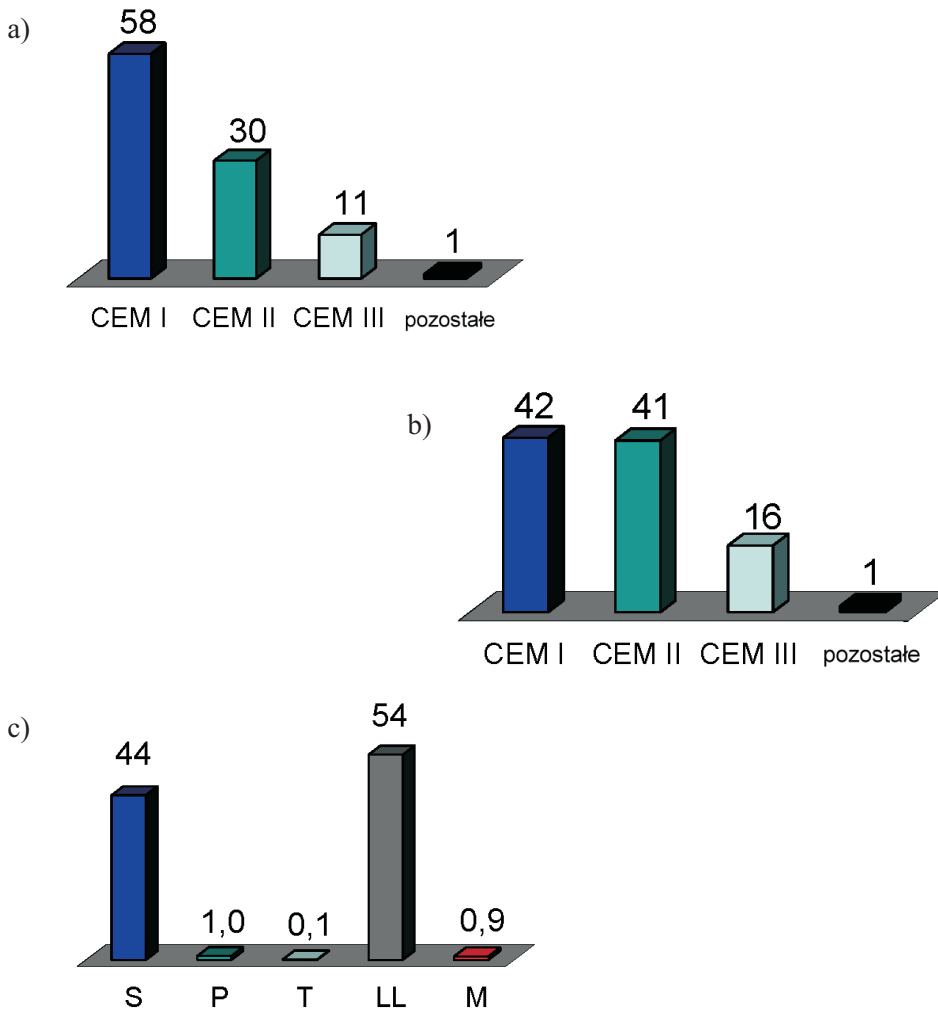
Rys.3. Procentowy udział różnych rodzajów cementu w rynku krajów europejskich stowarzyszonych w CEMBUREAU w 2003 roku (oznaczenia S, P, V, T, LL i M według normy EN 197-1)

a) dotyczy wszystkich klas cementów, b) dotyczy klasy wytrzymałości na ściskanie 32,5
c) dotyczy cementu CEM II klasy 32,5

Fig.3. Domestic market share of cement in CEMBUREAU countries in % (2003) - Source: CEMBUREAU (a: reference to all strength classes; b: reference to strength class 32.5; c: reference to CEM II of the strength class 32.5)

Duży wzrost udziału cementu CEM II-M zaobserwowano w ostatnich latach. W poszczególnych krajach europejskich obserwuje się wszakże pewne różnice, wynikające nie tylko z miejscowych warunków sprzedaży, ale także z ograniczeń stosowania niektórych cementów. Przykład dotyczący niemieckiego rynku cementu

pokazano na rysunku 4 na podstawie danych Niemieckiego Stowarzyszenia Cementowego (BDZ) w roku 2003 i 2004. W 2003 roku udział cementu portlandzkiego w rynku wynosił 58%, podczas gdy udział pozostałych cementów, tj. cementów mieszanych, około 42% (rys. 4a). W klasie wytrzymałości 32,5 w 2003 roku udział cementu portlandzkiego w rynku stanowił 42%, natomiast cementów mieszanych – ok. 58% (rys. 4b). W 2004 roku w grupie cementów mieszanych CEM II najpowszechniej stosowane były cementy wapienne, a także cementy żuźlowe CEM II-S (rys. 4c).



Rys.4 Procentowy udział różnych rodzajów cementu w rynku niemieckim w 2003 i 2004 roku
 a) dotyczy wszystkich klas cementów, b) dotyczy klasy wytrzymałości na ściskanie 32,5
 c) dotyczy cementu CEM II klasy 32,5

Fig.4. Domestic market share of cement in Germany in 2003/2004 in % (a: reference to all strength classes; b: reference to strength class 32.5; c: reference to CEM II of the strength class 32.5)

1.3. WYTYCZNE STOSOWANIA CEMENTÓW MIESZANYCH

Ponieważ większość cementów wytwarzanych czy używanych w Europie (rys. 3) stanowią cementy mieszane, doświadczenia w ich produkcji i stosowaniu są już znaczne. Czasami, pomimo spełnienia wymagań normy EN 197-1, zastosowania niektórych cementów mieszanych nie są dopuszczone w niektórych klasach ekspozycji z powodu braku odpowiednich praktycznych doświadczeń, udokumentowanych w odpowiednich krajowych aneksach do normy EN 206-1 lub z powodu braku danych doświadczalnych. W tabelicy 1 zestawiono zakres możliwych zastosowań cementów spełniających wymogi normy EN 197-1 w przypadku typowych zewnętrznych elementów w konstrukcjach betonowych nie narażonych na bezpośrednie działanie chlorków. Różnice w normach krajowych są wyraźnie widoczne, co świadczy to nie tylko o tradycyjnie różnej praktyce budowlanej, lecz również o różnym podejściu do krajowej regulacji normowej. Na przykład, w niemieckiej normie DIN 1045-2 znajdują się wytyczne stosowania wszystkich 27 podstawowych rodzajów cementów, w tym również cementów CEM II-M, lecz inny krajowy załącznik do normy EN 206-1 ogranicza zastosowania tylko do kilku rodzajów tych cementów – tych, które mają największy udział w rynku.

2. WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW MIESZANYCH

2.1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

Skład cementu ma wpływ na większość jego właściwości, między innymi na:

- rozkład wymiarów ziaren/powierzchnię właściwą,
- czas wiązania,
- wodożądność,
- przyrost wytrzymałości,
- ciepło hydratacji,
- zawartość alkaliów,
- jasność.

Poniżej przedstawiony jest wpływ różnych składników cementu (poza klinkierem portlandzkim na wymienione właściwości.

2.2. ROZKŁAD WYMIARÓW ZIAREN ORAZ POWIERZCHNIA WŁAŚCIWA

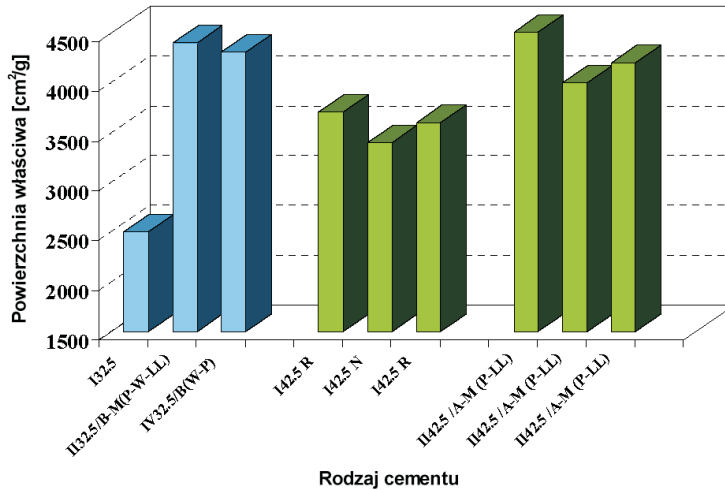
Cementy mieszane produkuje się na ogół z dwóch lub trzech składników głównych i ich uziarnienie jest parametrem decydującym o jakości; mają większą powierzchnię właściwą niż cement CEM I tej samej klasy, rys. 5 i 6. Dzięki temu można uzyskać poprawę urabialności mieszanki betonowej, szczególnie przy niskiej zawartości drobnych frakcji. Większa powierzchnia właściwa cementów mieszanych nie wpływa niekorzystnie na właściwości betonu.

Tablica 1. Zakres zastosowań cementów spełniających wymagania normy EN 197-1 w betonie zgodnym z EN 206-1 i krajowymi atkuszami uzupełniającymi. Przykład: Pionowe elementy ścian zewnętrznych nie narażonych na bezpośrednie oddziaływanie chlorków

Table 1. Areas of application of cements conforming to EN 197-1 in concrete conforming to EN 206-1 and varois national annexes – Example: Exposed vertical surface of inland concrete with no significant levels of external chlorides¹⁾

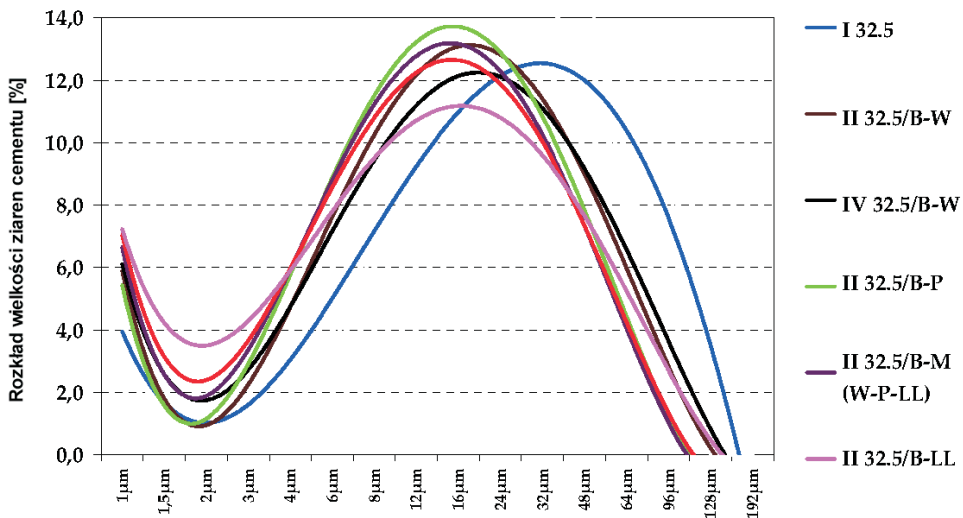
Kraj	Klasa ekspozycji	min f_c	max (w/c) _{eq}	min c	CEM I	CEM II												CEM III			CEM IV			CEM V															
						D		P/Q		V		W		T		LL		L		M		A	B	C	A	B	C	A	B	C									
						A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	C										
						A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C									
Austria	XC1+XF1	-	0,55	300	x	x	x																																
Belgia	EE3 (XC4+XF1)	C30/37	0,50	320	x	x	x	x																															
Czechy	XC1 do XC4 lub XF1	C30/37	0,50 lub 0,55	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																									
Dania	(XC2, XC3, XC4, XF1, XA1)	C25/30	0,55	150 ³⁾																																			
Finlandia	XC3 lub XC4, XF1	C25/30	0,60	250 ⁵⁾	x																																		
Niemcy	XC4 + XF1	C25/30	0,60	280	x	x	x	x	x																														
Irlandia	XC2 lub XC4 + XF1	C30/37 gdy XC4 + XF1	0,55	320																																			
Włochy	XC1	C25/30	0,60	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																							
	XC2 + XF1	C32/40	0,50	320	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																						
Luksemburg	XC4 + XF1	C25/30	0,60	280	x	x	x																																
Holandia	XC3	-	0,55	280	x	x																																	
	XC4 + XF1	-	0,50	300	x	x	x	x																															
Norwegia	XC4 + XF1	-	0,60	250	x	x	x	x																															
			0,60	280	x	x	x	x	x																														
Portugalia	XC4 + XF1 ¹¹⁾	C30/37	0,55	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																									

Na rys. 5 przedstawiono typowe wielkości powierzchni właściwej wg Blaina w przypadku greckich cementów CEM I i CEM II, natomiast rys. 6 ilustruje różny rozkład wielkości cząstek cementów CEM I, CEM II i CEM IV. Krzywe cementów mieszanych są przesunięte względem krzywej CEM I w kierunku drobniejszych cząstek.



Rys.5. Porównanie powierzchni właściwej wg Blaina w cm^2/g cementów CEM I i CEM II produkowanych w Grecji

Fig.5. Typical fineness (Blaine values in cm^2/g) for CEM I and CEM II produced in Greece (source: Titan cement)

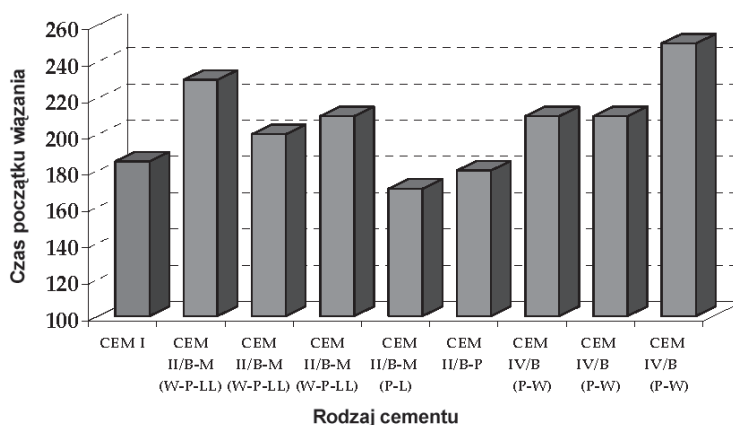


Rys.6. Różnicowy rozkład wielkości ziaren greckich cementów mieszanych w klasie wytrzymałości na ściskanie 32,5

Fig.6. Differential particle size distribution for different blended cements of strength class 32.5 in Greece (source: Titan cement)

2.3. CZAS WIĄZANIA

Im więcej składników głównych poza klinkierem portlandzkim w cementach mieszanych, tym bardziej wydłuża się ich czas wiązania. Na rys. 7 zestawiono czas początku wiązania cementów mieszanych klasy 32,5 na przykładzie cementów produkowanych w Grecji. Zmiana czasu wiązania nie jest problemem, ponieważ regulowana jest dodatkiem gipsu. Ogólnie, cementy mieszane mają tę przewagę, że przy ich produkcji potrzeba mniej dodatku opóźniającego wiązanie niż w przypadku cementów CEM I.



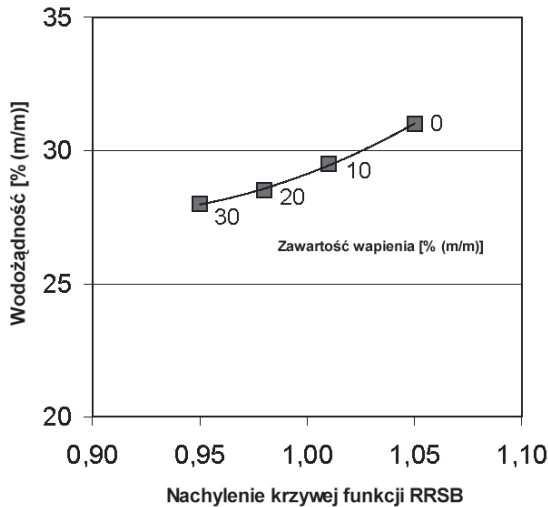
Rys.7. Czas początku wiązania różnych greckich cementów w klasie wytrzymałości 32,5
Fig.7. Initial setting time of different cements of strength class 32.5 produced in Greece
(source: Titan cement)

2.4. WODOŻĄDNOŚĆ

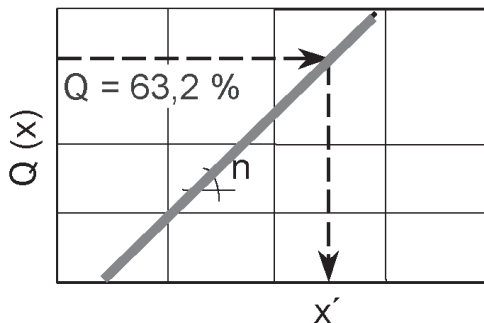
Wodożądność (określana zgodnie z EN 196-3) cementów mieszanych zawierających granulowany żużel wielkopiecowy może być nieco wyższa niż wodożądność cementów portlandzkich. Nie ma bezpośredniej korelacji między wodożądnością cementu wg EN 196-3 i urabialnością mieszanki betonowej, ponieważ z uwagi na znaczący wpływ innych składników mieszanki betonowej – kruszywa i domieszek. W przypadku cementu portlandzkiego wapiennego uziarnienie kamienia wapiennego korzystnie wpływa na wodożądność cementu [3 - 4]. Na rysunku 8 przedstawiono wodożądność w funkcji zawartości wapienia w cementach o jednakowej 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie (ok. 52 N/mm²).

Wodożądność obniża się wraz ze wzrostem zawartości wapienia w cemencie. Należy zauważyć, że w przypadku omawianych cementów portlandzkich wapiennych rozkład ich uziarnienia spłaszcza się wraz z rosnącą zawartością wapienia, tj. kąt nachylenia n funkcji RRSB zmniejsza się. Funkcja RRSB jest często używaną funkcją dystrybucji, która umożliwia aproksymację rozkładu wielkości ziaren o kształcie S w prostej formie logarytmicznego układu współrzędnych. Wartość funkcja RRSB określa położenie parametru x' i kąt nachylenia n (rys. 9). Parametr x' jest tym mniejszy im

większe jest rozdrobnienie cementu. Kąt nachylenia n opisuje szerokość rozkładu wielkości ziaren; jest większy przy węższym rozkładzie wielkości ziaren.



Rys.8. Wodożądność w funkcji nachylenia krzywej RRSB i zawartości wapienia w cemencie portlandzkim wapiennym [5]
Fig.8. Water demand as a function of the RRSB slope and the limestone content in Portland limestone cement [5]



$$Q(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{x'}\right)^n\right)$$

Rys.9. Graficzne przedstawienie funkcji RRSB
Fig.9. Illustration of the RRSB function

W wyniku zmniejszenia kąta nachylenia n , zmniejsza się objętość porów wypełnionych wodą, znajdujących się między cząstkami zmielonego klinkieru a drobnymi cząstkami wapienia w zaczynie cementowym. To może sprzyjać lepszej urabialności mieszanki betonowej.

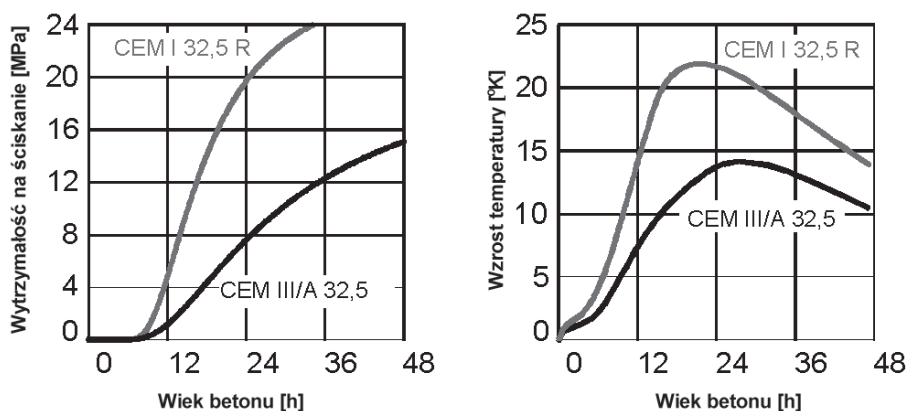
2.5. PRZYROST WYTRZYMAŁOŚCI

Przyjmując tę samą wymaganą 28-dniową wytrzymałość na ściskanie, wczesna wytrzymałość cementów z żużlem wielkopieczowym, popiołem lotnym czy naturalnymi pucolanami jest nieco niższa od wytrzymałości CEM I i obniża się wraz ze wzrostem zawartości ww. składników cementu. Korzyścią wynikająca z obecności żużla wielkopieczowego czy popiołu lotnego jest wyraźnie zaznaczone długotrwałe narastanie

wytrzymałości. Cementy wapienne charakteryzują się większym rozdrobnieniem ziaren i właśnie to jest główną przyczyną wczesnego narastania wytrzymałości [6].

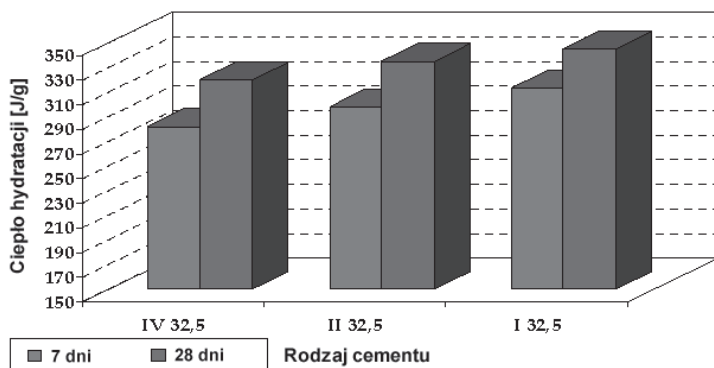
2.6. CIEPŁO HYDRATACJI

Ilość wytwarzanego ciepła jest zależna od chemicznego składu cementu, gdzie C_3A i C_3S w głównej mierze odpowiadają za szybkie tempo przyrostu ciepła. Udział żużła w cieple hydratacji został w przybliżeniu określony od 250 do 335 J/g, co stanowi około połowę ciepła wytwarzanego przez C_3S i około 30% – przez C_3A . Zaletą cementów mieszanych zawierających granulowany żużel wielkopiecowy jest obniżone ciepło hydratacji – efekt ten przynosi znaczne korzyści np. w przypadku betonowania masywnych bloków betonowych. Jak widać z rysunku 10, zauważalna jest wyraźna korelacja między narastaniem ciepła hydratacji a rozwojem wytrzymałości na ściskanie.



Rys.10. Narastanie wytrzymałości na ściskanie i wzrost temperatury betonu na cementach portlandzkim CEM I i na cementzie żużlowym CEM III/A ($c=330 \text{ kg/m}^3$; $w/c=0,50$; $T_c=T_e=20 \text{ }^\circ\text{C}$)
 Fig.10. Compressive strength development and heat of hydration of concrete using Portland cement CEM I and blastfurnace cement CEM III/A ($c=330 \text{ kg/m}^3$; $w/c=0.50$; $T_c=T_e=20 \text{ }^\circ\text{C}$),
 source: VDZ

Również cementy mieszane zawierające popiół lotny mają niższe ciepło hydratacji. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru ciepła hydratacji greckich cementów o klasie wytrzymałości na ściskanie 32,5. Niedawno cementy powszechnego użytku o niskim cieple hydratacji zostały znormalizowane w uzupełnieniu A1 do europejskiej normy cementowej. Cementy żużlowe o niskiej wczesnej wytrzymałości zostały osobno ujęte w EN 197-4. Cementy specjalne o bardzo niskim cieple hydratacji, np. na masywy betonowe, zostały znormalizowane w EN 14216. Cementy o składzie takim jak CEM III/B, CEM III/C, CEM IV/A+B i CEM V/A+B są określone jako cementy o bardzo małym cieple hydratacji VLH (ang. *Very Low Heat*), o klasie wytrzymałości na ściskanie równej 22,5 i narastaniu ciepła mniejszym niż 220 J/g.



Rys.11. Porównanie ciepła hydratacji cementów klasy wytrzymałości na ściskanie 32,5 produkowanych w Grecji

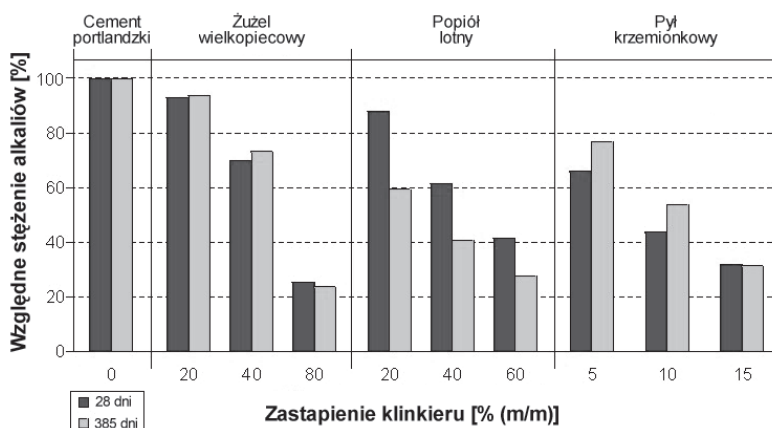
Fig.11. Heat of hydration of different cements of strength class 32.5 produced in Greece (source: Titan cement)

Dodatek wypełniacza wapiennego poprawia upakowanie ziaren w cemencie [7] i powoduje przyspieszenie hydratacji C_3S we wczesnym okresie dojrzewania [8]. Możliwym mechanizmem przyspieszenia hydratacji jest kształtowanie nowych miejsc nukleacji dla wodorotlenku wapnia [9]. Dodatek węgla wapnia również wpływa na hydratację C_3S poprzez wbudowanie w strukturę C-S-H [10].

2.7. ZAWARTOŚĆ ALKALIÓW

Efektywna zawartość alkaliów w cementach portlandzkich wzrasta liniowo wraz z podwyższeniem całkowitej zawartości alkaliów, natomiast w cementach zawierających inne składniki efektywna zawartość alkaliów może w różnym stopniu odbiegać od całkowitej zawartości. Wynika to z jednej strony ze zróżnicowania rozpuszczalności alkaliów zawartych w składnikach cementu, a ponadto z różnego stopnia absorpcji alkaliów przez produkty reakcji. Tak więc niskoalkaliczne cementy z żużlem wielkopiecowym np. w Niemczech mogą mieć wyższą całkowitą zawartość alkaliów w zależności od zawartości żużla wielkopiecowego w porównaniu do niskoalkalicznych cementów CEM I.

Bez względu na rodzaj zastosowanego głównego składnika cementu, zastąpienie klinkieru powoduje obniżenie alkaliczności roztworu porowego. Jednak stosowane składniki cementu różnią się znacząco pod względem ich skuteczności. Stężenie jonów alkalicznych w twardniejącym zaczynie cementowym zawierającym żużel wielkopiecowy nie powoduje proporcjonalnego obniżenia alkaliczności w stosunku do ilości zastąpionego klinkieru, lecz zmniejszenie następuje mniej wyraźnie. Część alkaliów pochodzących z żużla wielkopiecowego jest zawarta w roztworze porowym, jednak ich udział jest bardzo niewielki w porównaniu do alkaliów pochodzących z klinkieru. Z tego powodu wyraźne zmniejszenie stężenia jonów alkalicznych nie jest zauważalne dopóki zawartość żużla wielkopiecowego nie przekroczy 20% wagowo (rys. 12).



Rys.12. Zmiana stężenia jonów alkalicznych w roztworze porowym stwardniałego zaczynu cementowego spowodowana obecnością żużla wielkopieczowego, popiołu lotnego z węgla kamiennego i pyłów krzemionkowych w cemencie w różnych okresach hydratacji [11]

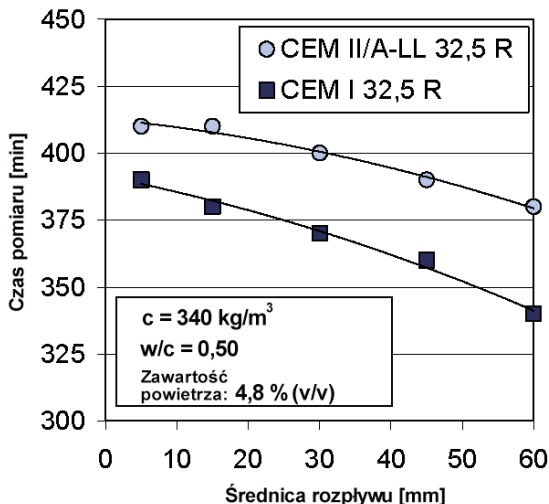
Fig.12. Change in the alkali ion concentration of the pore solution caused by blastfurnace slag, hard coal fly ash and silica fume after different hydration periods [11]

W ciągu 28 dni hydratacji, popiół lotny zawarty w cemencie wpływa na alkaliczność roztworu porowego w porównywalnym stopniu do żużla wielkopieczowego. Jednak między 28 i 365 dniem procesu hydratacji stężenie jonów alkalicznych jest znacznie zmniejszone. Alkaliczność roztworu porowego po 365 dniach jest niższa niż można by oczekiwać z uwagi na obniżenie ilości samego klinkieru. Niewspółmiernie duży spadek stężenia jonów alkalicznych zachodzi przy zastosowaniu pyłów krzemionkowych. Zastąpienie 15 % (wagowo) klinkieru przez pyły krzemionkowe powoduje zmniejszenie stężenia jonów alkalicznych do około 1/3 wyjściowego stężenia w stwardniałym zaczynie cementowym. Jednakże stwierdzono, że w miarę postępu hydratacji stężenie jonów alkalicznych w roztworze porowym wzrasta we wszystkich stwardniałych zaczynach cementowych zawierających pyły krzemionkowe [11].

3. WŁAŚCIWOŚCI BETONU Z CEMENTEM MIESZANYM

3.1. URABIALNOŚĆ MIESZANKI

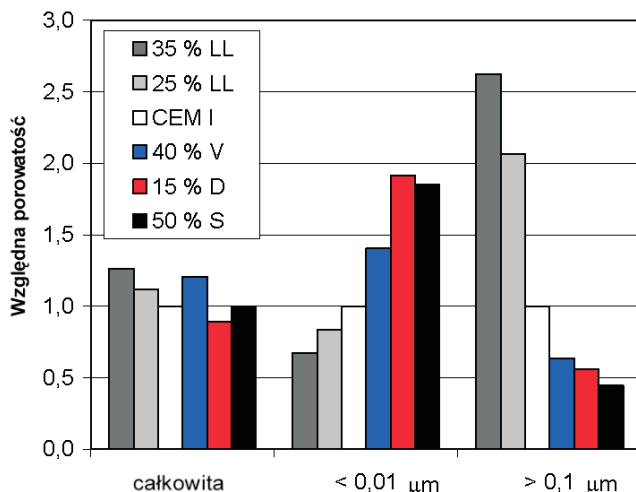
Wpływ mączki wapiennej na urabialność mieszanki betonowej jest przykładowo przedstawiony na rys. 13. Jak widać, początkowa średnica rozptyłu mieszanki wzrasta oraz tężenie mieszanki w tym przykładzie jest opóźnione w przypadku zastosowania cementu z dodatkiem wapienia. Przy założonej stałej ilości cementu i wody, beton z cementem mieszanym ma większą objętość zaczynu z powodu niższej gęstości cementu. Fakt ten korzystnie wpływa na urabialność mieszanki betonowej.



Rys.13. Średnica rozptywu mieszanki betonowej z domieszką napowietrzającą jako funkcja czasu i rodzaju cementu [5]
Fig.13. Flow diameter of fresh concrete as a function of time and the cement type [5]

3.2. POROWATOŚĆ I ROZKŁAD WIELKOŚCI PORÓW

Porowatość i rozkład wielkości porów w zaczynie cementowym mają istotne znaczenie z uwagi na wszystkie właściwości betonu – w szczególności z uwagi na trwałość. Na powyższe parametry wpływają poszczególne składniki cementu i ich różne zachowanie się w betonie (rys. 14).



Rys.14. Wpływ rodzaju cementu na całkowitą porowatość i na rozkład wielkości porów w zaczynie cementowym w porównaniu do zaczynu cementowego na czystym cementie portlandzkim, wg [12 - 13] (oznaczenia: cement zawierający wapień - LL, popiół lotny - V, pyły krzemionkowe - D, granulowany żużel wielkopiecowy - S)

Fig.14. Influence of cements containing limestone (LL), fly ash (V), silica fume (D) and ground granulated blastfurnce slag (S) on the total porosity and the pore size distribution of cement paste compared to cement paste with Portland cement [12 - 13]

Wysoka zawartość mączki wapiennej może prowadzić do większej porowatości i również do zwiększonej ilości porów kapilarnych powyżej $0,1 \mu\text{m}$. Zastosowanie pyłów krzemionkowych, dużych ilości popiołów lotnych czy granulowanego żużla wielkopieczowego powoduje zwiększenie ilości drobniejszych porów i obniżenie ilości porów kapilarnych, skutkując większą gęstością betonów zawierających powyższe cementy mieszane.

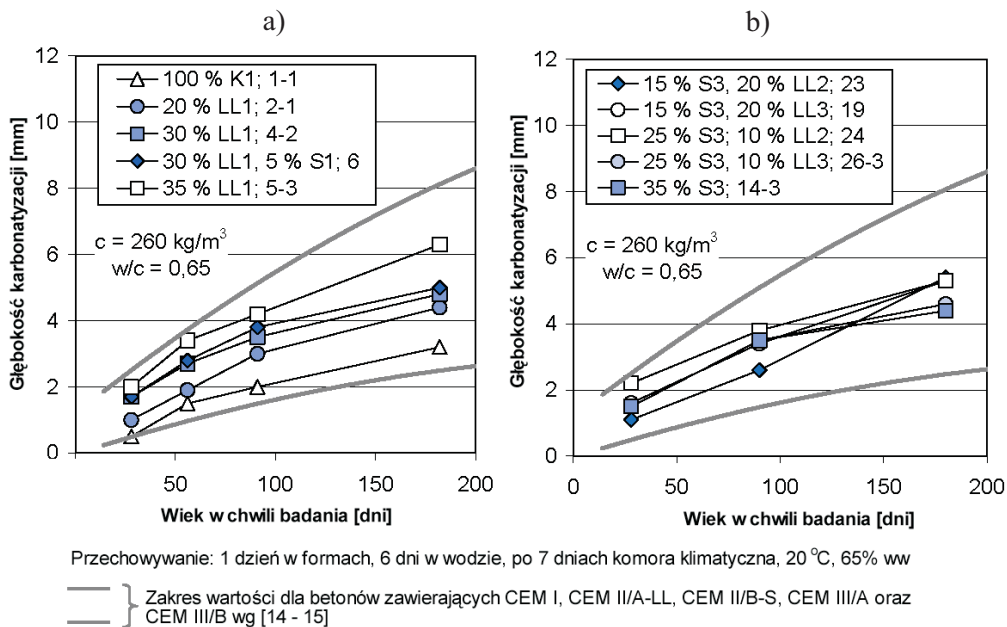
3.3. KARBONATYZACJA BETONU

Karbonatyzacja betonu jest procesem, w którym dwutlenek węgla z powietrza przenika do betonu i reaguje z wodorotlenkami, np. wodorotlenkiem wapnia, tworząc węglany. W reakcji z wodorotlenkiem wapnia, tworzy się węglan wapnia. W wyniku takiej reakcji odczyn pH roztworu porowego, która jest na ogół wyższy niż 12,5 z powodu rozpuszczonego $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i alkaliów, może obniżyć się poniżej 9 i wtedy następuje proces depasywacji zbrojenia. W warunkach wilgotnych i w obecności tlenu proces korozji może nastąpić w wyniku depasywacji spowodowanej niską wielkością odczynu pH. Jakość otuliny betonowej decyduje o ochronie przed korozją zbrojenia, przy czym o jakości otuliny decyduje jej grubość oraz odporność na przenikanie CO_2 , która jest w głównej mierze zależna od wskaźnika wodno-cementowego, od rodzaju cementu i zastosowanych dodatków. Szczególne znaczenie ma okres dojrzewania betonu i warunki pielęgnacji. Pomimo zaobserwowanych różnic głębokości karbonatyzacji betonu (rys. 15), stopień karbonatyzacji w betonach dobrej jakości, właściwie pielęgnowanych, przeznaczonych do zastosowań zewnętrznych ma praktycznie niewielkie znaczenie z powodu dyfuzji CO_2 i znaczącym spowolnieniem karbonatyzacji ze wzrostem wilgotności (rys. 16). Wewnątrz budynków, głębokość karbonatyzacji może być znacznie większa niż w przypadku powierzchni betonowych narażonych na działanie wody. Nawet przy większej głębokości karbonatyzacji w tym przypadku ryzyko korozji jest mniejsze z uwagi na niską wilgotność.

3.4. WNIKANIE CHLORKÓW

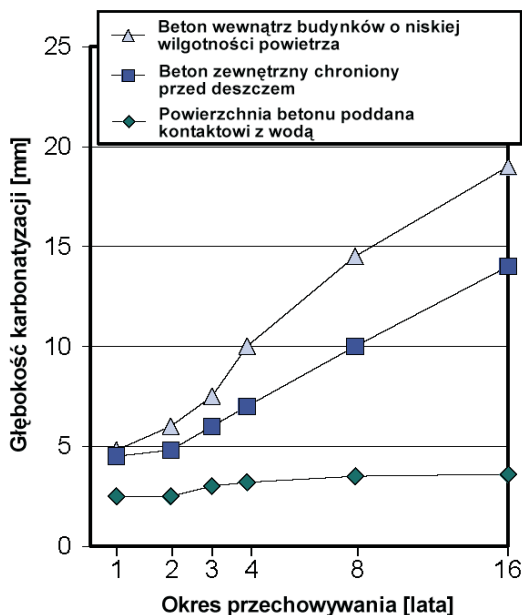
Chlorki wnikające w beton mogą pochodzić z soli stosowanych do odładzania nawierzchni, z wody morskiej bądź z powietrza. W obecności wilgoci i tlenu proces korozji nastąpić na skutek osiągnięcia krytycznej zawartości wolnych chlorków na powierzchni zbrojenia. Tak, jak w przypadku karbonatyzacji, jakość otuliny betonowej istotnie wpływa na ochronę zbrojenia.

Zastosowanie cementów zawierających żużel wielkopieczowy lub popiół lotny może powodować znaczący wzrost odporności na wnikanie chlorków (rys. 17 i 18). Fakt ten można przypisać zmniejszeniu ilości porów kapilarnych i większej ilości drobnych porów w zaczynie cementowym w przypadku cementów mieszanych (z żużlem wielkopieczowym lub popiołem lotnym, por. rys.14). Oprócz większej gęstości zapraw i betonów na cementach zawierających żużel wielkopieczowy, cementy te mogą chemicznie wiązać więcej chlorków wewnątrz fazy C-S-H niż w przypadku cementów portlandzkich [19].



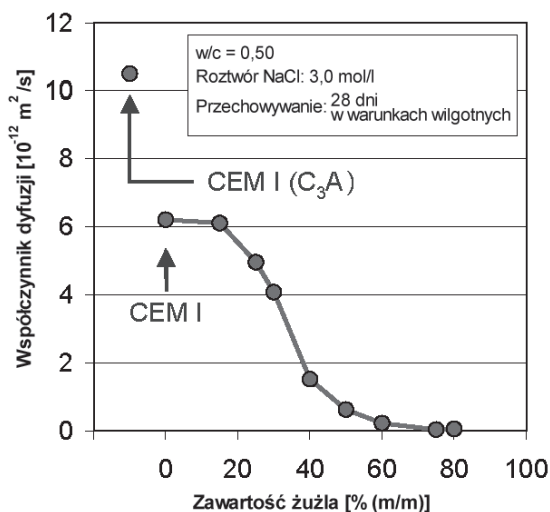
Rys.15. Wzrost głębokości karbonatyzacji w betonach na cementach portlandzkich, na cementach z dodatkiem wapienia (a) i na różnych mieszanych cementach (b) w funkcji czasu [12]

Fig.15. Development with time of the depth of carbonation in concretes made using Portland cement and Portland-limestone cements (a) and various Portland-composite cements (b) [12]; (storage: 1 day in the mould, 6 days under water, climatic chamber at 20 °C / 65 % r.h. from 7th day)

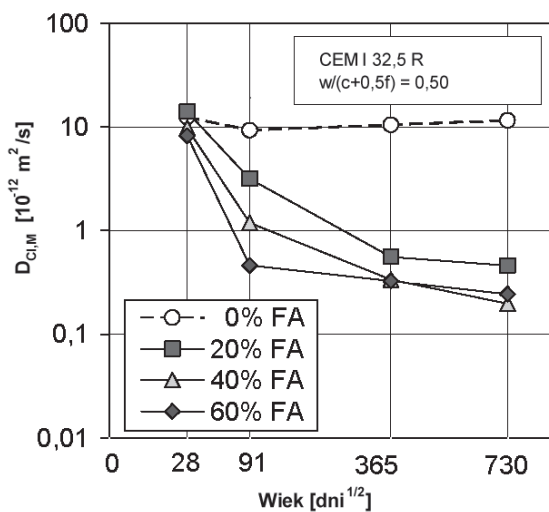


Rys.16. Wpływ warunków ekspozycji i czasu na głębokość karbonatyzacji betonu [16]

Fig.16. Influence of exposure conditions and time on carbonation depth [16]

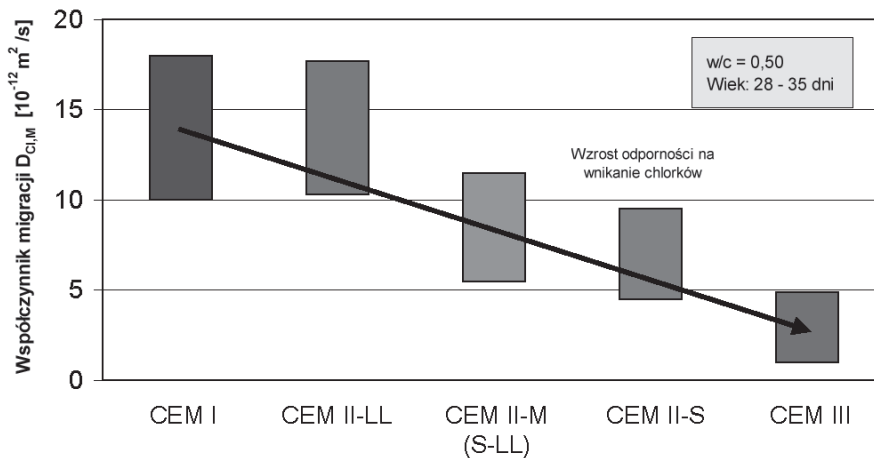


Rys.17. Wpływ granulowanego żużla wielkopieczowego na współczynnik dyfuzji chlorków [17]
 Fig.17. Influence of ggbs on the diffusion coefficient for chloride [17]



Rys.18. Wpływ popiołu lotnego (FA) na współczynnik migracji chlorków [18]
 Fig.18. Influence of fly ash (FA) on the migration coefficient for chloride [18]

Na rysunkach 18 i 19 przedstawiono doświadczalne wyniki badania współczynnika migracji chlorków, określonego w przyspieszonym badaniu, który również jest miarą odporności betonu na wnikanie chlorków. Przy określonym składzie betonu przy stosowaniu cementu portlandzkiego współczynnik migracji chlorków przeważnie zawiera się w przedziale od 10 do 18 $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. W przypadku cementów z dodatkiem wapienia, współczynnik migracji chlorków zależy od zawartości tego składnika, ale mniej więcej plasuje się w tym samym przedziale jak cementy portlandzkie, natomiast w przypadku cementów mieszanych zawierających wapień i granulowany żużel wielkopieczowy mieści się pomiędzy wartościami współczynnika określonego w przypadku cementu portlandzkiego i cementów żużlowych [20].



Rys.19. Współczynnik migracji chlorków $D_{Cl,M}$ w betonie o $w/c=0,50$ i zawartości cementu $c=320 \text{ kg/m}^3$ przy przechowywaniu w wodzie [20]

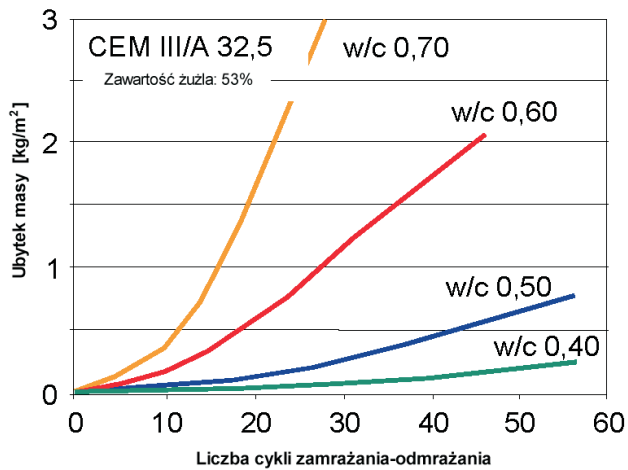
Fig.19. Chloride migration coefficient $D_{Cl,M}$ of concretes with $w/c = 0.50$ and $c = 320 \text{ kg/m}^3$ water storage [20]

Odporność betonu z cementów portlandzkich pucolanowych jest podobna jak w przypadku cementów z popiołem lotnym. Wydaje się, że naturalne pucolany są w stanie związać chlorki nawet, jakoś pucolan jest niska (jak w przypadku betonu na cementach CEM II/B-M 32,5 (P-W-LL)).

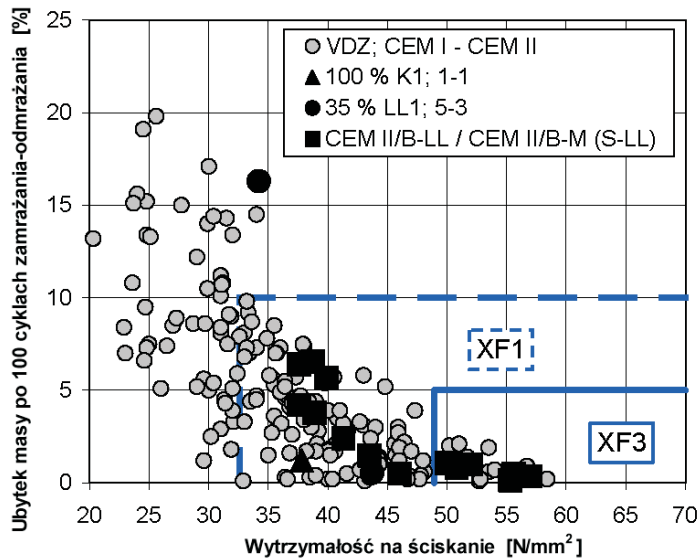
3.5. MROZODPORNOŚĆ BETONU

Beton stosowany do konstrukcji inżynierskich i nawierzchni z założenia powinien charakteryzować się odpowiednią trwałością, aby przeciwstawić się agresji środowiska. Jednym z najbardziej destrukcyjnych czynników pogodowych w wielu krajach europejskich jest cykliczne zamrażanie i odmrażanie wilgotnego betonu, szczególnie w obecności soli stosowanych do odładzania nawierzchni. Głównym czynnikiem wpływającym na mrozoodporność betonu jest porowatość, która z kolei jest uzależniona od współczynnika wodno-cementowego (rys. 20).

Znana jest zależność między współczynnikiem wodno-cementowym a wytrzymałością na ściskanie i również między wytrzymałością na ściskanie a odpornością na powierzchniowe łuszczenie – niezależnie od składu cementu (rys. 21). Na podstawie normy EN 206-1 i krajowych norm uzupełniających w wielu krajach europejskich możliwe jest stosowanie cementów mieszanych do betonów o wysokiej odporności na zamrażanie i odmrażanie.

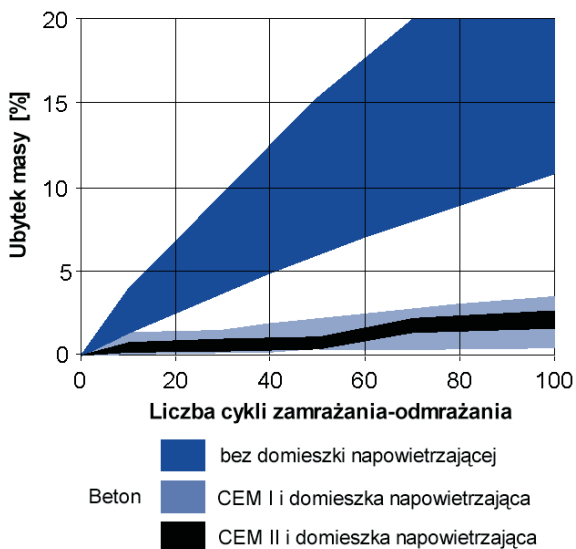


Rys.20. Powierzchniowe łuszczenie betonów badane wg metody CF zgodnie z prEN 12390-9 zależnie od współczynnika w/c [21]
 Fig.20. Scaling of concrete measured with CF test according to prEN 12390-9 dependent on the water to cement ratio [21]



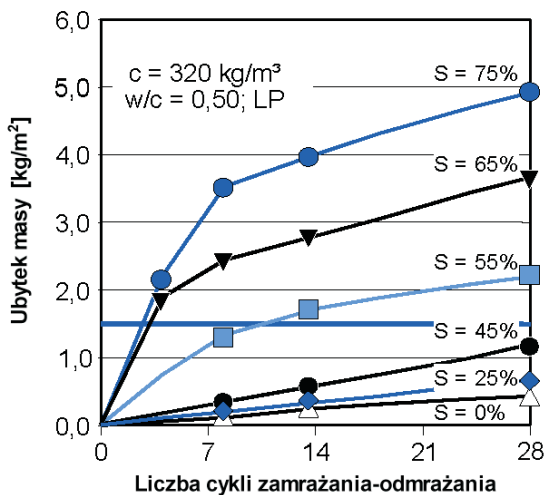
Rys.21. Zależność między powierzchniowym łuszczeniem (badanie wg *cube test*) a 28-dniową wytrzymałością na ściskanie
 Fig.21. Relationship between scaling (*cube test*) and the concrete compressive strength at 28 days [12]

Głównym czynnikiem wpływającym na odporność betonu na agresję mrozu i środków odladzających jest właściwa mikrostruktura porów powietrznych w zaczynie cementowym, uzyskiwana w wyniku stosowanie domieszki napowietrzającej (rys. 22). Odporność betonów wykonanych z cementów z dużą zawartością żuźla wielkopiecowego jest niższa niż odporność betonu z CEM I lub innych cementów mieszanych (rys. 23). Skutkiem tego jest wprowadzenie w niemieckiej normie uzupełniającej EN 206-1 ograniczenia użycia cementów żuźlowych w klasie ekspozycji XF4 do klasy wytrzymałości $\geq 42,5$ lub $32,5$ R, jeśli zawartość granulowanego żuźla wielkopiecowego jest $\leq 50\%$.

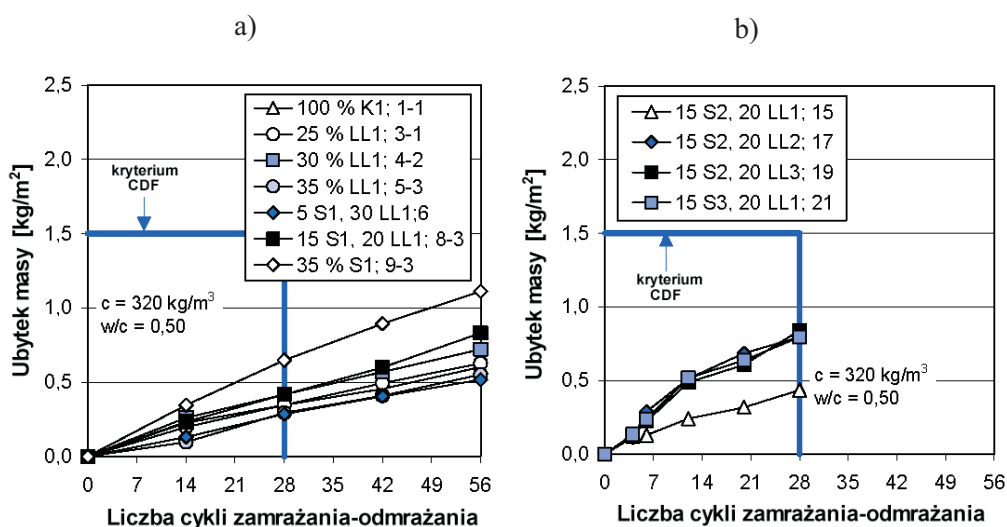


Rys.22. Ubytek masy betonu w funkcji liczby cykli zamrażania-odmrażania w 3% roztworze NaCl zgodnie z prEN 12390-9 (metoda kostkowa)
Fig.22. Scaling of concrete measured with cube test in 3% NaCl according to prEN 12390-9 (source: VDZ)

Rys.23. Ubytek masy betonu napowietrzonego w funkcji liczby cykli zamrażania-odmrażania zgodnie z prEN 12390-9 (metoda CDF) [22]
Fig.23. Scaling of air-entrained concrete measured with CDF test according to prEN 12390-9 [22]



Wysoka jakość warstwy przypowierzchniowej betonu (zaprawy) decydujący wpływ na wysoką odporność na powierzchniowe łuszczenie. Istotne znaczenie ma niski współczynnik wodno-cementowy, właściwe napowietrzenie oraz dokładna i długotrwała pielęgnacja betonu. Na rysunku 24 przedstawiono wyniki badania powierzchniowego łuszczenia różnych betonów napowietrzonych przy $w/c=0,50$. Beton z cementu portlandzkiego wapiennego oraz beton z cementu portlandzkiego wieloskładnikowego o zawartości żużla do 35% i wapienia wykazuje ubytek masy porównywalny do betonu wykonanego z cementu portlandzkiego.



Rys.24. Wyniki badania powierzchniowego łuszczenia betonu napowietzonego na cemencie portlandzkim, na cemencie z dodatkiem wapienia (a) i na różnych cementach mieszanych (b), badanie metodą CDF [12]

Fig.24. Scaling of air-entrained concrete made using Portland cement and Portland-limestone cements (a) or various Portland-composite cements (b), CDF-Test [12]

4. KORZYŚCI ZE STOSOWANIA CEMENTÓW MIESZANYCH

Stosowanie cementów mieszanych daje wiele korzyści zarówno wytwórcom cementów jak również producentom i odbiorcom betonu. Korzyścią dla środowiska jest ograniczenie określonych emisji CO_2 pochodzących z produkcji cementu i betonu. Cementy mieszane są również alternatywą do cementów portlandzkich z technicznego punktu widzenia. Wpływ jaki mają poszczególne podstawowe składniki cementu na właściwości betonu został omówiony w poprzednich rozdziałach na podstawie porównania betonu na cemencie portlandzkim i betonów na cementach mieszanych, zawierających m.in. wapień czy żużel wielkopiecowy. Żaden cement – w tym nawet cement portlandzki - nie zapewnia rozwiązania uniwersalnego. Porównanie pokazuje, że dodatnie i mniej korzystne cechy poszczególnych składników cementu wpływające na właściwości betonu (od urabialności przez przyrost wytrzymałości do

trwałości) są dosyć równomiernie rozłożone. Możliwość łączenia kilku podstawowych składników cementu umożliwia optymalizację właściwości i umożliwia spełnienie wysokich wymagań technicznych, obejmujących zarówno rozwój wytrzymałości betonu, jak również właściwą urabialność mieszanki oraz trwałość betonu.

Wytwórcy betonów na cementach mieszanych otrzymują zoptymalizowany i dobrej jakości cement z jednego źródła. Producenci cementu dysponują wiedzą na temat wytwarzania cementów mieszanych już od ponad dekady. Za przykład może służyć stosowanie cementów żuźlowych w Niemczech. Dzięki współpracy wytwórców cementu i producentów granulowanego żuźla wielkopiecowego kontrola jakości chemicznego i mineralogicznego składu granulowanego żuźla jest wykonywana przez cementownię i w razie potrzeby wprowadza się odpowiednie korekty. Przy produkcji cementu z dodatkiem żuźla wytwórcy mogą wykorzystać następujące sposoby modyfikacji właściwości cementu:

- zmiana stopnia rozdrobnienia klinkieru i granulowanego żuźla wielkopiecowego poprzez łączny przemiał lub bądź osobny i następne mieszanie,
- zmiana proporcji składników (zwiększenie bądź zmniejszenie zawartości żuźla),
- zmiana ilości i składu siarczanu wapnia.

Główne składniki cementu są dodaje się więc uwzględniając rozkład wielkości ich ziaren i zawartość siarczanów, dzięki czemu można starannie kontrolować czas wiązania.

5. INNE ASPEKTY ŚRODOWISKOWE

Zalety cementów mieszanych z uwagi na ograniczenie emisji CO₂ zostały już wcześniej omówione. Kwestią często podnoszoną, jest pytanie, jak zastosowanie innych składników cementu poza klinkierem wpływa na zachowanie betonu w kontakcie z gruntem, wodą gruntową czy wodą pitną. Powyższe kwestie należy uwzględnić analizując zjawisko wymywania (ługowania) betonu.

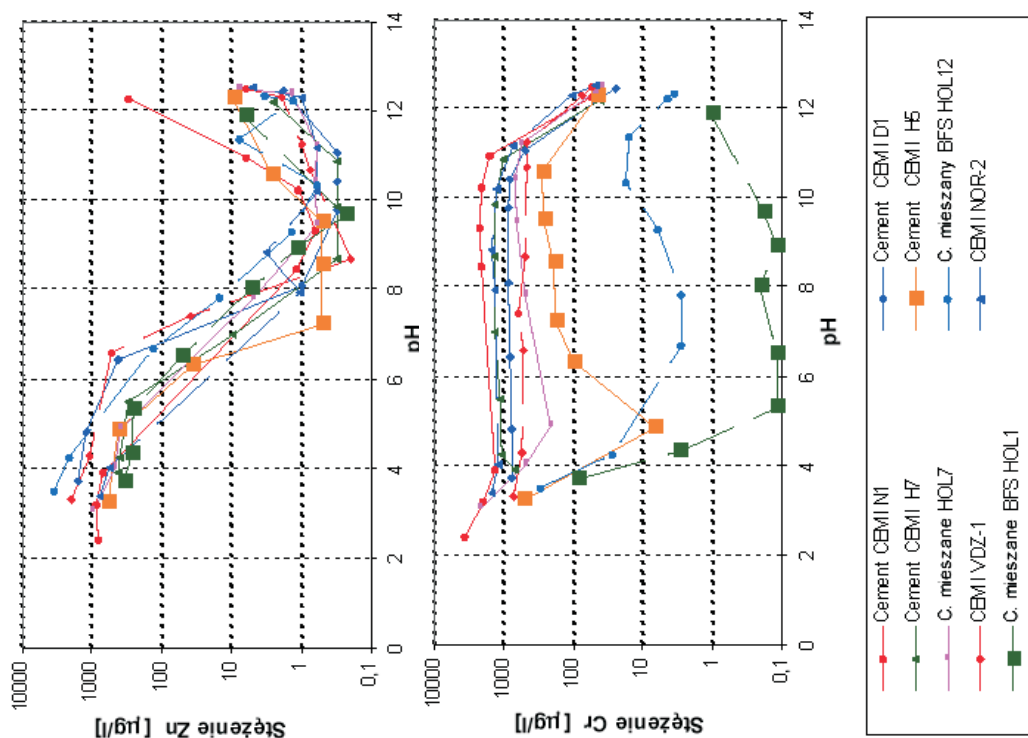
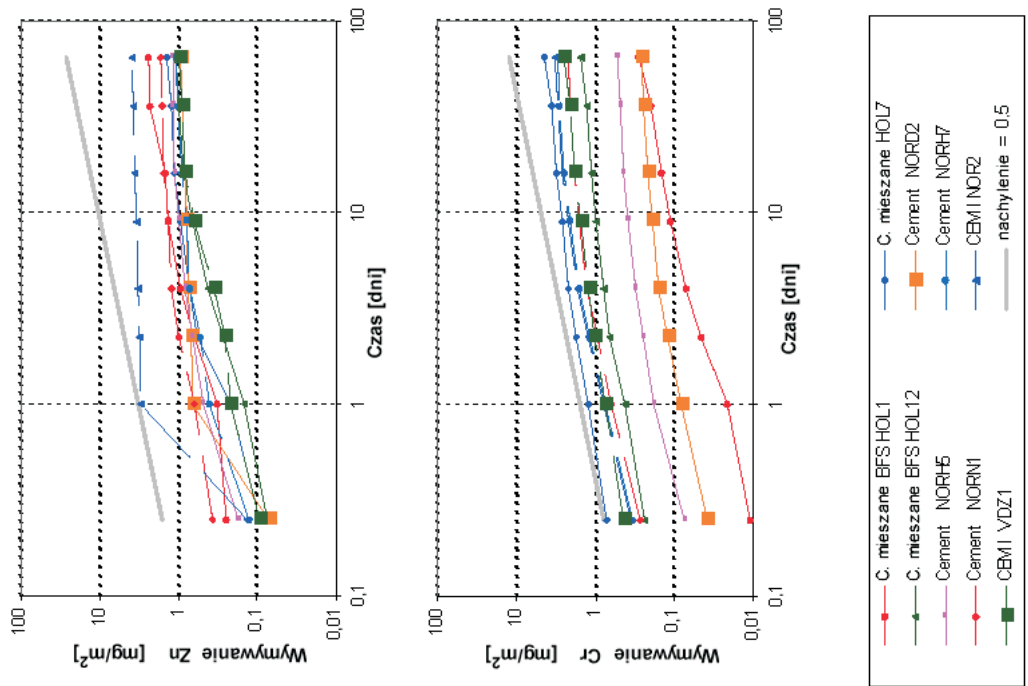
Wypłukiwanie metali ciężkich zawartych w betonie od dawna było przedmiotem badań doświadczalnych, prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych w Europie i Ameryce Północnej. Nawet w przypadku, gdy beton sztucznie „naszpikowano” metalami ciężkimi (zawartość aż ponad 1000 razy większa), wypłukiwanie zawsze było albo niemożliwe do zmierzenia albo okazywało się znacznie mniejsze, niż poziom dopuszczalny w przypadku wody pitnej. Tak więc wykazano, w niezależnych ośrodkach, że beton spełnia najbardziej rygorystyczne wymagania zdrowotne [2].

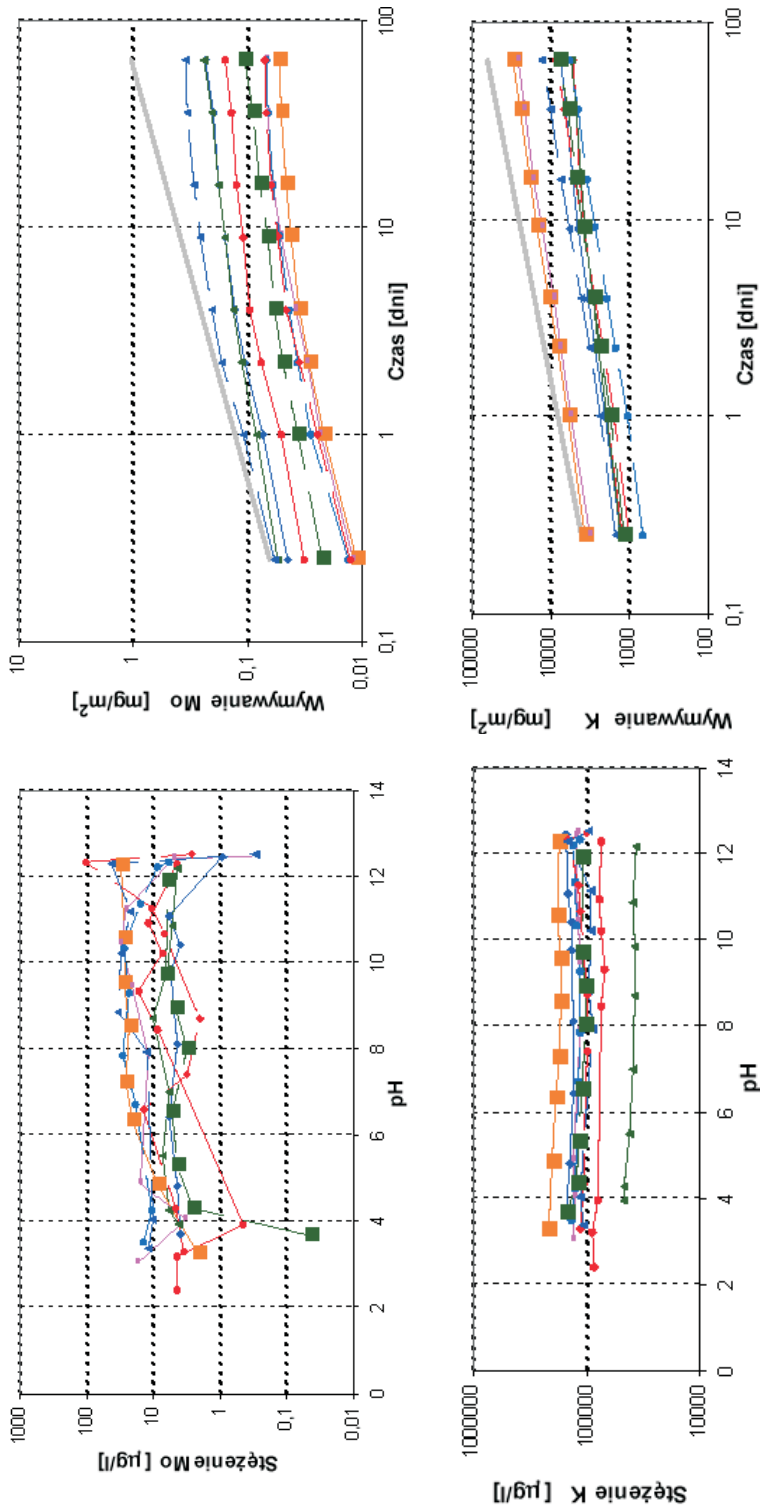
Problem środowiskowego oddziaływania materiałów cementowych na grunt i wodę gruntową ujmują podstawowe wymagania nr 3 Dyrektywy dotyczącej wyrobów budowlanych (ang. *construction product directive*, CPD). Całkowita zawartość substancji chemicznych w cemencie nie jest właściwością nadającą się do oceny oddziaływania na środowisko, z powodu istnienia dużych różnic w uwalnianiu substancji z zapraw cementowych z tych samych składników chemicznych. Określenie

środowiskowego oddziaływania na grunt i wodę gruntową są przeprowadza się poprzez badanie wymywania końcowego produktu, tj. nie na cemencie, lecz na próbkach zaprawy cementowej.

Przy ocenie stosowanych metod badawczych stwierdzono konieczność zasadniczo innego podejścia do przypadku materiałów ziarnistych i monolitycznych, [23 - 25]. W przypadku materiałów ziarnistych dominującym mechanizmem uwalniania jest perkolacja, a dla monolitycznych materiałów – procesy powierzchniowe i dyfuzja. Aby określić zmiany w uwalnianiu związków metali wynikających z zewnętrznych oddziaływań (np. karbonatyzacja, utlenianie) opracowano metodę badania wymywania w funkcji odczynu pH. Na rysunku 25 przedstawiono porównanie wyników wymywania cementu CEM I i cementów mieszanych. Zasadnicza różnica dotyczy wypłukiwania chromu Cr VI, które z powodu redukcyjnych właściwości żużla w przypadku cementów mieszanych z żużlem wielkopieczowym jest o wiele mniejsze niż w przypadku CEM I, a nawet mniejsze niż w cementach poddanych redukcji chromu poprzez zastosowanie dodatków. Na rysunku 26 przedstawiono wyniki badania odczynu pH i zdolności neutralizacji kwasów (ang. *Acid Neutralization Capacity*, ANC) przeprowadzone na tych samych zaprawach cementowych. Na podstawie wyników przedstawionych na obu rysunkach można stwierdzić, że:

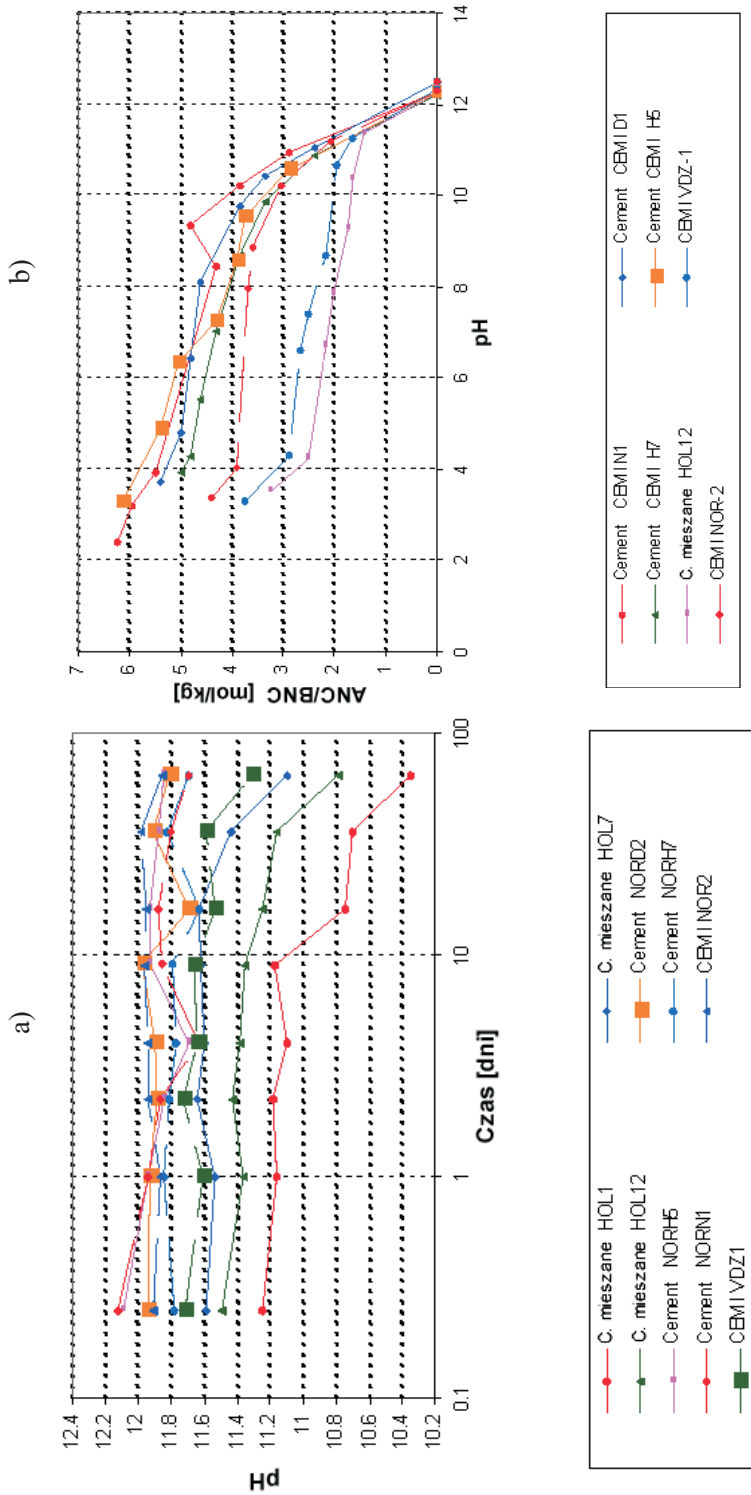
- Wymywanie głównych, mniejszych i śladowych składników ze cementów CEM I, CEM II, CEM III i CEM IV przebiega całkowicie systematycznie. Metoda badawcza, opis modelowy i sposób oceny wyników jest jednakowo słuszny w przypadku zapraw na cemencie portlandzkim i na cementach mieszanych.
- Cementy mieszane zawierające żużel wielkopieczowy charakteryzują się niskim poziomem wymywania chromu Cr VI, co wynika z redukcyjnych właściwości żużla wielkopieczowego, który przyczynia się do przemiany Cr VI wytworzonego w piecu cementowym w chrom Cr III.
- Zdolność neutralizacji kwasów ANC w zaprawach na cemencie mieszanym z żużlem wielkopieczowym jest przeważnie niższa niż ta na cementach portlandzkich.





Rys.25. Porównanie wymywania cynku, chromu, molibdenu i potasu z cementu CEM I i wybranych cementów mieszanych w funkcji odczynu pH

Fig.25. Comparison of leachability Zn, Cr, Mo, K from CEM I and a selection of blended cements as a function of pH



Rys.26. Odczyn pH w funkcji czasu (a) oraz zdolność neutralizacji kwasów ANC w funkcji pH (b) w cemencie CEM I i w cementach mieszanych
 Fig.26. Change of pH in time (a) and Acid Neutralization Capacity (ANC) as a function of pH (b) for CEM I and blended cements

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Hoening V., Schneider M.*: CO₂ Reduction in the Cement Industry. Process Technology of Cement Manufacturing / VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). - Düsseldorf : Verl. Bau Technik, 2003, 499-505
- [2] www.cembureau.be
- [3] *Opoczky L.*: Verlauf der Korngrößenverteilung bei der gemeinsamen Mahlung einer Klinker-Kalkstein-Mischung. Zement-Kalk-Gips, **45**, 12, 1992, 648- 651
- [4] *Tsivilis S., Tsimas S., Montsatsou A.*: Contribution to the problems arising from the grinding of multicomponent cements. Cement and Concrete Research, **22**, 1992, 95-102
- [5] *Ludwig H.M.*: Influence of process technology on the manufacture of market-oriented cements. Process Technology of Cement Manufacturing / VDZ Congress 2002 / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). - Düsseldorf : Verl. Bau Technik, 2003, 2-24
- [6] *Baron J., Douvre C.*: Technical and economical aspects of the use of limestone filler additions in cement. World Cement, April 1987
- [7] *Ellerbrock H.G., Spung S., Kuhlmann K.*: Particle size distribution and properties of cement: Part III. Influence of grinding process. Zem.-Kalk-Gips, **43**, 1, 1990, 13-19
- [8] *Ramachandran V.S.*: Admixture and addition interactions in the cement-water system. Cemento, **83**, 1, 1986, 13 - 38
- [9] *Soroka I., Stern W.*: Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement. Cem. Concr. Res., **6**, 3, 1976, 367-376
- [10] *Ramachandran V.S., Zhang C.*: Influence of CaCO₃ on hydration and microstructural characteristics of tricalcium silicate. Cemento, **83**, 3, 1986, 129-152
- [11] German Cement Works Association. Activity Report 2005
- [12] *Müller C., Lang E.*: Durability of concrete made with Portland-limestone and Portland composite cements CEM II-M (S-LL). Beton, **55** (2005), nr 3, 131-138; nr 4, 197-202; nr 5, 266 - 269
- [13] *Schießl P., Meng B.*: Neuer Ansatz zur Charakterisierung der Porenstruktur zementgebundener Baustoffe im Hinblick auf die Interpretation von Transportvorgängen. Aachen: Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 526, 1998
- [14] *Stark J., Wicht B.*: Dauerhaftigkeit von Beton. - Weimar: Hochschule für Architektur u. Bauwesen, Weimar, Schriften 100, 1995
- [15] *Manns W., Thielen G., Laskowski C.*: Bewertung der Ergebnisse von Prüfungen zur bauaufsichtlichen Zulassung von Portlandkalksteinzementen. Beton, **48**, 12, 1998, 779-784
- [16] *Bakker R.F.M., Roesink G.*: Zum Einfluss der Carbonatisierung und der Feuchte auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. Beton-Informationen, **31**, Heft 3/4, 1991, 32-35
- [17] *Brodersen H. A.*: Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton. Beton-Informationen, **23**, Heft 3, 1983, 36-38

- [18] *Wiens U., Müller C.*: Puzzolanität von Steinkohlenflugasche. Beton-Informationen, **40**, Heft 2/3, 2000, 27-35
- [19] *Gunkel H. P.*: Die Bindung des Chlorids im Zementstein und die Zusammensetzung chloridhaltiger Porenlösungen. Dissertation, Dortmund, 1992
- [20] *Müller C.*: Performance of Portland-composite cements, Cement International, **4**, 2, 2006
- [21] *Auberg R.*: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Essen: Universität Gesamthochschule. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, **6**, 1999
- [22] *Ludwig H.M.*: Zur Rolle der Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton. Dissertation, Universität (HAB) Weimar, Selbstverlag, 1996
- [23] *Kosson D.S., Van der Sloot H.A., Sanchez F., Garrabrants A.C.*: An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials. Environmental Engineering Science, **19**, 3, 2002, 159-204
- [24] Harmonization of leaching/extraction tests. Studies in Environmental Science, **70**. Eds H.A. Van der Sloot, L. Heasman, Ph Quevauviller. Elsevier Science, Amsterdam, 1997, 292
- [25] *Van der Sloot H.*: Environmental Impact to Soil and Groundwater through Leaching to Assess the Use of Alternative Materials in Cement Production and in Construction Applications – European Standardisation, regulatory developments and modeling. Proceedings of the Eco-Serve Seminar „Challenges for Sustainable Construction: the concrete approach”, Warsaw, 2006, 65-66

ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL ASPECTS OF THE APPLICATION OF BLENDED CEMENTS IN CONCRETE

Abstract

The paper presents results of the study performed within the European Thematic Network ECOserve (www.eco-serve.net). The production of blended cements in Europe and its applications in construction are analyzed in respect to environmental impact and technical properties. The efficiency of reduction of CO₂ emissions into the air and the use of energy for blended cement production is discussed using data e.g. from the German industry. The influence exerted by different main constituents of blended cement on concrete properties has been discussed on the basis of a comparison between concrete made from Portland cement and concretes made from cements containing, for example, limestone or blast furnace slag. The comparison shows that the advantages and disadvantages of the different main constituents for the properties of concrete, which extend from workability via strength development to durability characteristics, are distributed fairly evenly. The option of combining several main constituents makes blended cements particularly well suited for developing these cements into even more robust systems. A user of blended cements gets one optimized and quality controlled product from one source. The use of blended cements offers numerous benefits for the cement producer, the ready-mix-concrete producer and the end-user. The overall environmental benefit results from the reduction of the specific CO₂ emissions of cement and concrete. The topic of environmental impact from cement-based materials to soil and groundwater is also addressed. Leaching of major, minor and trace elements from all cement-based materials - CEM I, CEM II, CEM IV – is found quite systematic. Blended cements e.g. based on blast furnace slag feature low Cr VI leachability.