

Prof. Lech Czarnecki<sup>1</sup>, Prof. Harald Justnes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

<sup>2</sup> SINTEF Building and Infrastructure, Trondheim, Norway

## Zrównoważony, trwały beton

### Sustainable & durable concrete

#### 1. Wprowadzenie

Postulat zrównoważonego rozwoju aspiruje do wiodącej idei cywilizacyjnej. Rozwój zrównoważony to taki rozwój, który **zaspokajając potrzeby obecne nie ograniczy przyszłym pokoleniom możliwości zaspokojenia ich potrzeb...** (ONZ, 1987) (1). Pojęcie „zrównoważonego rozwoju” jest najczęściej spotykanym określeniem występującym w opracowaniach o charakterze prognozy. Wynika z przesłanek filozoficznych, ale także staje się koniecznością cywilizacyjną. Termin „zrównoważony rozwój” stanowi odpowiednik angielskiego „sustainable development”. W znaczeniu leksykalnym żadne ze znaczeń nie odnosi się do **zrównoważenia**. „Sustain” oznacza „to keep in existence” i w polskim tłumaczeniu oznaczałoby **nieprzerwany, trwały**. Można zauważyć, że w języku polskim podkreślane jest znaczenie uwarunkowań rozwoju (zrównoważony), a w języku angielskim – oczekiwanych skutków (nieustający). Podobnie w języku rosyjskim: *устойчивое развитие*. W innych językach europejskich podkreślana jest raczej trwałość rozwoju: *développement durable* (French), *Nachhaltige Entwicklung* (German), *sviluppo sostenibile* (Italian), *duurzame ontwikkeling* (Netherlands), *Desenvolvimento Sustentável* (Portuguese), *desarrollo sostenible* (Spanish), *bærekraftig utvikling* (Norwegian) (2). W odniesieniu do budownictwa „Zrównoważony rozwój” w literaturze polskiej zwykle określa się jako „budownictwo spełniające wymagania zrównoważonego rozwoju”. Takie ujęcie oddaje wielkość idei zrównoważonego rozwoju, która jako jeden z elementów obejmuje budownictwo. Mankament stanowi, że jest

#### 1. Introduction

The notion of sustainable development aspires to the role of a leading civilization idea. Sustainable development **“implies meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”** (1). The term is the most frequently found expression in forecasts and similar studies. It follows from philosophical premises, but also civilization necessity. In Polish, equivalent of sustainable development is “zrównoważony rozwój”, there is no lexical reference to sustainability. “To sustain” means “to keep in existence” and thus – a more literal translation of the term into Polish would incorporate an adjective with the meaning of “constant” or “permanent”. That was the case in the first Polish publications addressing the issue, which were published a dozen or so years ago. It is noteworthy that – at that time – a representative of the Building Research Institute brought that matter up (2) translating the Polish term “zrównoważony rozwój” literally, we could end up with “equable development”. As can be seen, the Polish version focuses on the determinant of the development (equable), whereas the English term – on the expected results (sustainable). In other languages, e.g., *développement durable* (French), *Nachhaltige Entwicklung* (German), *sviluppo sostenibile* (Italian), *duurzame ontwikkeling* (Netherlands), *Desenvolvimento Sustentável* (Portuguese), *устойчивое развитие* (Russian), *desarrollo sostenible* (Spanish), *bærekraftig utvikling* (Norwegian) also rather the aspect of long-term durable development is stressed. The term “sustainable development” in the construction-related Polish literature is usually

to termin bardzo rozbudowany. Nieco krócej ujmując to „Zrównoważony rozwój w budownictwie”. W literaturze anglosaskiej często spotyka się znacznie prostsze ujęcie zarówno w odniesieniu do obiektów: sustainable house, sustainable city, sustainable structure, jak i w odniesieniu do działań: sustainable transport, sustainable design, sustainable living. Wydaje się, że również w języku polskim ten ciąg pojęciowy „budownictwo spełniające wymagania zrównoważonego rozwoju – zrównoważony rozwój w budownictwie – zrównoważony rozwój budownictwa” doczekał się finalnie formy „**zrównoważone budownictwo**” – „**zrównoważony materiał budowlany – zrównoważony beton**” (3).

## 2. Definiowanie zrównoważonego budownictwa i zrównoważonego materiału budowlanego

Zważywszy, że budownictwo pochłania rocznie ok. 40% wytworzonej energii i przerabianej masy zaadresowanie postulatów „zrównoważoności” do budownictwa stało się oczywiste. Rok 2011 okazał

used to refer to the “construction that meets the requirements of sustainable development”. This idea was incorporated into the name of the conference that was organized by the Building Research Institute in collaboration with the Warsaw University of Technology and the National Energy Conservation Agency in 2002. The approach reflects the conceptual scope of sustainable development, which includes the construction industry as one of its many elements. The drawback is the complexity of the term. A shorter version is used in the current conference name - Sustainable Development in Construction. In English literature, much simpler terms are often used, both for structures (sustainable house, sustainable city, and sustainable structure) and actions (sustainable transport, sustainable design, and sustainable living). It seems that in the Polish language the sequence of “construction that meets the requirements of sustainable development → sustainable development in construction → sustainable development of construction” may also find its final form in “**sustainable construction**” – “sustainable material” - “sustainable concrete”(3).

Tablica 1

### ZRÓWNOWAŻONE BUDOWNICTWO OD KONCEPCJI DO EUROPEJSKIEGO ROZPORZĄDZENIA

<b>Koncepcja:</b> G.H. Brundtland, ONZ, 1997. Taki rozwój, który zaspokajając potrzeby obecne nie ograniczy przyszłym pokoleniom możliwości zaspokojenia ich potrzeb		
<b>Zasada:</b> H. Daly, 1996 [4]		
Konsumpcja surowców/powstawanie zanieczyszczeń i odpadów	Oddziaływanie środowiskowe	Zrównoważenie
Większa niż naturalne odtwarzanie/regenerowanie	degradacja	brak
Równa potencjałowi odtwarzania/regeneracji	równowaga	stan ustalony
Mniejsza niż potencjał odtwarzania/regeneracji	odnawianie	rozwój
<b>Konstytucja RP,</b> 1997 „Rzeczpospolita Polska ... strzeże dziedzictwa narodowego oraz zapewnia ochronę środowiska, kierując się zasadą zrównoważonego rozwoju.”		
<b>Ustawa o ochronie środowiska,</b> 2001 Taki rozwój społeczno-gospodarczy, w którym w celu zrównoważenia szans dostępu do środowiska poszczególnych społeczeństw lub ich obywateli – zarówno współczesnych, jak i przyszłych pokoleń – następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości procesów przyrodniczych.		
<b>Construction Products Regulation,</b> CPR–UE 305/2011 Rozporządzenie Parlamentu i Rady Europejskiej: obiekty budowlane powinny być zaprojektowane, wykonane i rozebrane w taki sposób, aby wykorzystanie zasobów naturalnych było zrównoważone i zapewniało w szczególności: ponowne wykorzystanie lub recykling obiektów budowlanych oraz wchodzących w ich skład materiałów i części po rozbiórce; trwałość obiektów budowlanych wykorzystanie w obiektach budowlanych przyjaznych środowisku surowców i materiałów wtórnych.		

Table 1

### SUSTAINABLE CONSTRUCTION: FROM CONCEPT TO EUROPEAN CONSTRUCTION PRODUCT REGULATION, CPR

<b>Concept:</b> G.H. Brundtland, UN, 1997. “Development that by satisfying the current needs would not limit the ability of satisfying needs of next generations”		
<b>Principle:</b> H. Daly, 1996 [4]		
Consumption of sources/wastes and by-products production	Environment Impact	Sustainability
Faster than natural regeneration	Degradation	None
Equal to regenerative potential	Balance	Steady state
Slower than regenerative potential	Regeneration	Development
<b>CEN TC350 European Standard Committee for Standardization: Sustainability of Construction Works, 2005</b> (see Table 4)		
<b>Construction Product Regulation CPR-UE 305/2011:</b> The construction works must be designed, built and demolished in such way that the use of natural sources is sustainable and, in particular, ensures the following: a) reuse of recyclability of the construction works, their materials and parts after demolition; b) durability of the construction works; c) use of environmentally compatible raw and secondary materials in the construction works.		

Tablica 2 / Table 2

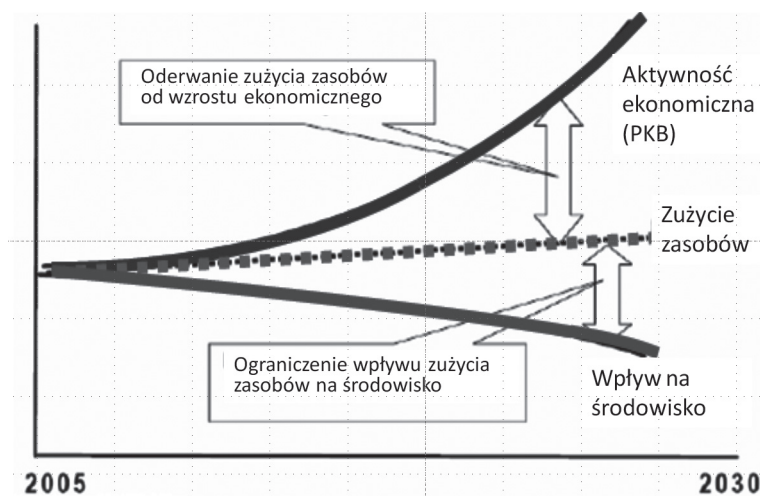
WYMAGANIA PODSTAWOWE OD OBIEKTU BUDOWLANEGO (6)

BASIC REQUIREMENTS FOR CONSTRUCTION WORKS (6)

CPR 305/2011		EPD 89/106/EWG					
		1	2	3	4	5	6
1	Nośność i stateczność / Mechanical and resistance stability	O					
2	Bezpieczeństwo pożarowe / Safety in case of fire		O				
3	Higiena, zdrowie, środowisko / Hygiene, health, environment			X			
4	Bezpieczeństwo użytkowania i dostępność obiektów / Safety and accessibility in use				X		
5	Ochrona przed hałasem / Protection against noise					O	
6	Oszczędność energii i izolacyjność cieplna / Energy economy and heat retention						X
7	Zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych / Sustainable use of natural sources	Nowe wymaganie New requirement					

X – wymaganie zmienione/changed requirement

O – wymaganie niezmienione/ unchanged requirement



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie idei zrównoważonego rozwoju (7)

Fig. 1. Schematic presentation of the idea of sustainable development (7)

się przełomowy, gdyż rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej [305/2011 z 9 marca 2011r. (5)] została wprowadzona nowa wersja wymagań podstawowych obiektów budowlanych. Wśród nich nowe wymaganie 7 zatytułowane: **Zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych** (Tablica 1). Nowe sformułowania związane z ochroną zasobów naturalnych pojawiły się również w 3 wymaganiu podstawowym „**Higiena, zdrowie i środowisko**”, a także w 6 wymaganiu podstawowym „**Oszczędność energii i izolacyjność cieplna**”.

Obiekty budowlane powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby podczas ich budowy, użytkowania i rozbiórki nie stanowiły w ciągu ich całego cyklu życia zagrożenia dla higieny, zdrowia oraz bezpieczeństwa ich użytkowników lub sąsiadów oraz nie wywierały nadmiernego wpływu na środowisko ani na klimat, w szczególności przez (Tablica 2):

## 2. Defining sustainable construction and sustainable material

The construction industry uses 42% of all generated power and emits 35% of all greenhouse gases. The branch of the concrete industry alone uses 20 billion tonnes of aggregates, 1.5 billion tonnes of cement and 800 million tonnes of water per year. That is a lot of matter. Implementing the principles of sustainable development in construction is a necessity, which has found its official acknowledgment in an initiative of the European Commission. It took a quarter of century since Brundtland's concept until an adequate regulation has been implemented (Table 1). In March 2011 the new version (5) of Basic Requirements for Construction Works, CPR (Table 2), has been announced.

In general categories, the sustainable product means: minimum matter (energy + mass) consumed during the whole life cycle “from cradle to grave” and minimum negative environmental impact, as well as ensuring a comfort of using. In economic terms it means decoupling of resource use from economic growth and decoupling of environmental impact from resource use (Fig. 1) (7). Of course, this is high idealization and sounds rather utopian, however, the idea is tempting. This “decoupling” means also “more for less” – more economic output for less environmental and social impact. In categories addressed to a concrete it means a demand for “better” concrete, but made with inferior raw materials. Neville has frequently stressed in his book (8), that a good and wrong concrete is often made from the same ingredients. The question arises to solve this paradox in opposite way. This is not impossible, although, difficult. It will require the development and improvement of design and materials optimization methods, including a better understanding and utilization of synergy mechanisms (the

- wydzielanie toksycznych gazów;
- emisję niebezpiecznych substancji, lotnych związków organicznych, gazów cieplarnianych lub niebezpiecznych cząstek do powietrza wewnątrz i na zewnątrz obiektu budowlanego;
- emisję niebezpiecznego promieniowania;
- wydzielanie niebezpiecznych substancji do wody gruntowej, wód morskich, wód powierzchniowych lub gleby;
- niewłaściwe odprowadzanie ścieków, emisję gazów spalinyowych lub niewłaściwe usuwanie odpadów stałych i płynnych;
- zawilgocenia w części obiektów budowlanych lub na powierzchniach w obrębie tych obiektów.

W kategoriach ogólnych, „zrównoważony wyrób” to minimum materii (energia + masa) zużytej podczas całego okresu użytkowania „od kołyski po grób” i minimum negatywnego oddziaływania na środowisko przy zapewnieniu komfortu użytkownika (Rysunek 1) (7). W kategoriach ekonomicznych oznacza to „rozsprzęgnięcie” wzrostu ekonomicznego od zużycia zasobów naturalnych i negatywnego oddziaływania na środowisko. Oczywiście jest to utopijnie brzmiąca idealizacja, lecz równocześnie bardzo pięknie brzmiąca idea. To „rozsprzęgnięcie” oznacza „więcej za mniej” – wzrost dochodu narodowego przy zmniejszonych negatywnych skutkach środowiskowych i społecznych. W odniesieniu do betonu oznacza to oczekiwanie „lepszego betonu” z gorszych składników A. M. Neville często powtarza w swojej książce (8), że dobry i zły beton można otrzymać z tych samych materiałów wyjściowych. Powstaje zadanie rozwiązania tego paradoksu w pewnym stopniu odwrotnie. To nie jest niemożliwe, ale trudne. Będzie wymagało doskonalenia i dalszego rozwoju metod projektowania i optymalizacji materiałowej łącznie z lepszym zrozumieniem i wykorzystaniem mechanizmu synergii (korzystne współdziałanie pomiędzy różnymi składnikami). Można przewidywać, że zrównoważony beton przyszłości to:

- „lepszy beton” z gorszych składników,
- beton projektowany na zasadzie użyteczności wyrobu nie zaś według „recepty” przypisanej do jego składników,
- będą to znacznie częściej „betony wysokiej użyteczności i wysokiej wytrzymałości”, niż „betony zwykłe”,
- beton o podwyższonej trwałości,
- będzie to też niestety, droższy beton (9).

W praktyce oznacza to konieczność rozważenia w aspekcie „zrównoważoności” wielu obszarów związanych z użytkowaniem betonu (10):

- pozyskiwanie i transport surowców,
- zagospodarowanie terenów po zakończeniu wydobycia,
- wytwarzanie i transport betonu towarowego i elementów prefabrykowanych,
- użytkowanie i utrzymanie obiektów podczas całego okresu życia,
- powtórne użycia i recyklicacja elementów betonowych.

Tylko niektóre z tych zagadnień omówiono w tym artykule.

beneficial interactions amongst various ingredients). Based on the foregoing, then, it may be predicted that the concrete sustainable of the future is likely to have the following characteristics:

- it will be a “better” concrete, but made with inferior raw materials,
- it will be designed on the basis of performance rather than prescriptive specifications,
- high strength and high performance concretes will be more common, even for “ordinary” applications,
- it will contain more industrial waste materials, including recycled concrete aggregate,
- it will be more durable,
- unfortunately, it will probably also be more expensive (9).

In practise, this means that there are a wide range of sustainability issues to consider throughout concrete’s life cycle (10):

- the productions and transport of raw materials,
- the long term management of our operations and the restoration of our mineral extraction sites,
- the productions and transport of ready-mixed concrete and precast concrete products,
- the process of constructing concrete buildings and other structures,
- the operational performance of concrete buildings and structures during use,
- the reuse, recycling and disposal of concrete from end of life buildings and structures.

Some of those issues are considered in the paper.

### 3. Performance based buildings – performance based materials (3, 9)

The idea of usefulness in the construction industry has a long tradition. Some aspects of the approach may be found in the Code of Hammurabi (1955 BC), and the writings of Vitruvius (dated 20-10 BC). However, only recently has there been the **performance concept**, i.e. evaluation and selection of materials according to their usefulness, becoming increasingly appreciated throughout the construction industry. In the European standard for concrete, which is accepted as a Polish standard (PN-EN 206-1), and in many other standards, the notion was used in the title. The idea of performance was well grasped in the US building regulations of 1925 (11):

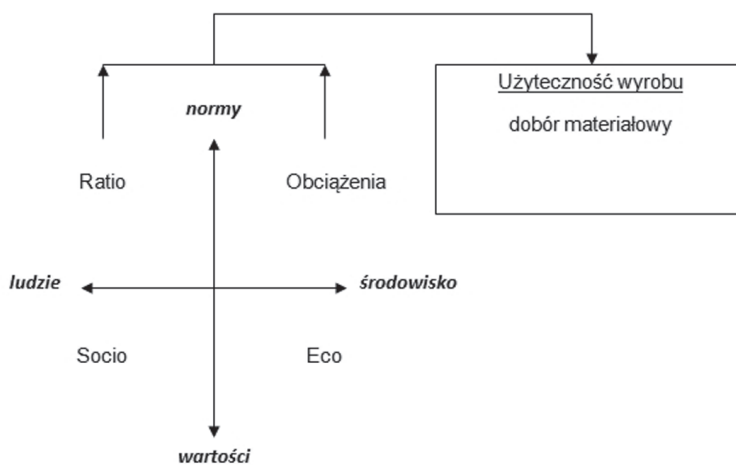
*“Whenever possible, requirements should be stated in terms of performance, based upon test results for service conditions, rather than in dimensions, detailed methods, or specific materials. Otherwise new materials, or new assemblies of common materials, which would meet construction demands satisfactorily and economically, might be restricted from use, thus obstructing progress in the industry.”*

### 3. Użyteczność w budownictwie jako wymaganie zrównoważonego rozwoju (3, 9)

Idea użyteczności w budownictwie ma bardzo długie tradycje. Aspektów takiego podejścia można się dopatrywać już w Kodeksie Hammurabiego (1955 p.Chr.), a także u Witruwiusza (20-10 p.Chr.). Jednak dopiero ostatnio **performance concept**, czyli ocena i dobór materiału według użyteczności zyskuje coraz większe uznanie w budownictwie. W normie europejskiej o statusie normy polskiej, dotyczącej betonu (PN-EN 206-1), jak i w wielu innych normach, pojęcie to zostało podniesione do rangi tytułu. Właściwe zrozumienie znaczenia idei użyteczności zostało sformułowane w amerykańskich przepisach budowlanych w 1925 r. (11):

„wszędzie, gdzie to możliwe, wymagania powinny być formułowane w kategoriach użyteczności, opartych na wynikach badań odniesionych do warunków użytkowania, a nie w kategoriach materiałowych odniesionych do składników i metody wytwarzania. W przeciwnym razie nowe materiały lub nowe systemy materiałowe (nowe zestawy materiałów znanych), które mogłyby spełniać wymagania techniczne i są zadowalające pod względem ekonomicznym, będą napotykały bariery hamujące postęp techniki.”

Te stwierdzenia są ważne po dzień dzisiejszy, a w świetle wymagań zrównoważonego rozwoju nabierają szczególnej aktualności, stając się wręcz koniecznością. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do rozwiązań materiałowych o charakterze substytucyjnym (alternatywne surowce), a także w odniesieniu do wyrobów budowlanych opartych na składnikach pochodzących z recyklicacji. Ponadto, zrównoważony rozwój narzuca konieczność uwzględnienia dodatkowych wymagań/ograniczeń (rysunek 2 i tablica 3). Ograniczeniem jest również fakt, że cechy techniczne niewykorzystane w danym zastosowaniu bądź reprezentujące wartości nadmiarowe stanowią nieracjonalny koszt (nakład energetycz-



Rys. 2. Zdefiniowanie użyteczności wyrobu budowlanego jako pochodnej podstawowych zasad zrównoważonego rozwoju [na podstawie (16)]

Fig. 2. Defining the performance of a construction product as a derivative of basic principles of sustainable development [based on (16)]

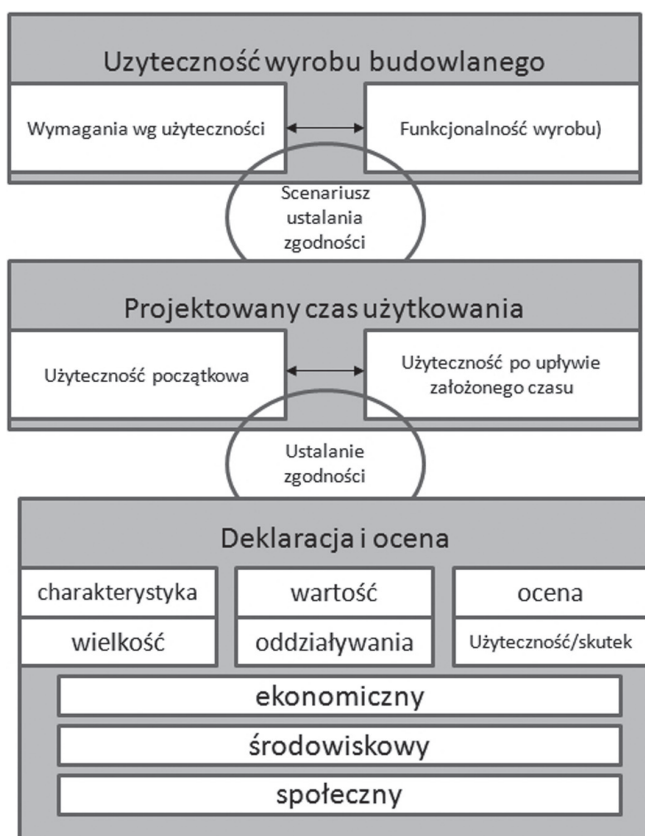
The above statements have not lost their validity, and – in light of the sustainable development requirements – they have even become a particularly current necessity. It is especially significant with regard to substitute material solutions (alternative raw materials), and to those construction materials and products that are based on recycled ingredients or components. Moreover, sustainable development imposes the need to consider additional requirements and/or restrictions (Fig. 2 and Table 3). A restriction is also a situation when certain technical properties are not used in a given application or when they are redundant, and thereby generate irrational costs (energy input). This implies that there is a need (12) or even an obligation to develop a new research area (and knowledge/skills) to define the performance in terms of the properly selected (type and level) technical properties. The final decision on the choice of a material solution, as a rule, will require an analysis or optimization involving a number of criteria. There are examples of this approach in the literature, e.g. the *polyoptimal* method of designing environmentally-friendly buildings (13) consid-

Tablica 3 / Table 3

MATRYCA SFORMUŁOWANIA DODATKOWYCH WYMAGAŃ W OBSZARZE ZAPEWNIENIA ZRÓWNOWAŻONEJ UŻYTECZNOŚCI MATERIAŁOWEJ [NA PODST. (16)]

FORMULATION MATRIX FOR THE ADDITIONAL REQUIREMENTS TO ENSURE SUSTAINABLE MATERIAL PERFORMANCE [BASED ON (16)]

Ekologia / Ecology		Ekonomia / Economy		Aspekty społeczne / Social aspects		Zapewnienie zrównoważonej użyteczności materiałowej Assurance of sustainable material performance
Emisja? Emission?	↗	Koszt/użyteczność Cost/performance	→	Wspólne podejmowanie decyzji Joint decision making	↗	
Użycie zasobów naturalnych? Use of natural resources?	↗	Sklonność do ponoszenia kosztów Tendency to incur costs	↗	Jawność, Odpowiedzialność Transparency, Responsibility	↗	
Bio-zróżnicowanie? Bio-diversification?	↗	Efektywność organizacji Organisational efficiency	→	Bezpieczeństwo, zdrowie, dobre samopoczucie Safety, health, and good mental state	↗	
System zrównoważony – ekologia Balanced system – ecology	↗	System zrównoważony - ekonomia Balanced system – economy	↗	System zrównoważony – aspekty społeczne Balanced system – social aspects	↗	



Rys. 3. Ocena zrównoważoności wyrobu budowlanego z wykorzystaniem pojęcia użyteczności (15)

Fig. 3. Sustainability assessment process based upon performance (15)

ny). Wynika stąd potrzeba (12), a nawet konieczność rozwoju nowego obszaru badań (i wiedzy – umiejętności) definiowania użyteczności w kategoriach odpowiednio dobranych (rodzaj i poziom) cech technicznych (rysunek 3). Ostateczny dobór rozwiązania materiałowego będzie z reguły wymagał analizy/optimalizacji wielokryterialnej. Przykłady takiego podejścia można znaleźć w literaturze, np. polioptymalna metoda projektowania budynków przyjaznych środowisku (13) uwzględnia wartości skumulowanej energii całkowitej i emisji CO<sub>2</sub> dla materiałów budowlanych i głównych technologii. Powinno to stać się jedną z istotnych działalności wiodących instytutów badawczych w zakresie budownictwa.

Przykładem poszukiwań zdefiniowania zrównoważonej użyteczności jest opracowanie A. Panka „Metody oceny oddziaływań na środowisko obiektów budowlanych” (14), stanowiące przewodnik dla audytorów. W ramach prac Komitetu CEN TC-350 wprowadzono rozbudowane pojęcie „integrated building performance” (tablica 4). Członkowie Polskiego Komitetu Technicznego PKN/KT 307 „Zrównoważone Budownictwo” - Komitetu zwierciadlanego w stosunku do CEN TC – 350 są głęboko zaangażowani w ambitne zadania

ers the values of the total accumulated energy and CO<sub>2</sub> emission of construction materials and main technologies. It should become one of the fundamental activities of the leading research institutes in the field of the construction industry. The examples of the pursuit of a definition of sustainable performance are usually methods of assessing the environmental impact of buildings (14), which are used as manual for auditors. Environmental, social, and economic indicators for assessment of sustainability of construction works have been elaborated by European Standard Committee TC350 (Table 4). The idea of usefulness in the construction industry has a long tradition. Performance concept is becoming increasingly appreciated throughout the construction industry (Fig. 3).

The members of the Polish Technical Committee of Standardization PKN KT 307 under the name ‘Zrównoważone Budownictwo’ – the mirror Committee to the CEN/TC 350 are fascinated by the ambitious CEN 350 task – to create on the standardization way the conditions for sustainable development which did not exist until now in any country. Experience of the past does not exist and all efforts are future oriented. The Polish members are very conscious that the activity could be the way of Europe for sustainable recovery and raises its potential to go beyond. They recognize very well that decoupling of resource use from economic growth and decoupling of environmental impact from resource use are the historical challenge and the most likely civilization necessity. As the result of the PKN/KT 307 Committee efforts three basic European Standards will obtain the status of the Polish Standard. There are:

Table 4

EUROPEAN STANDARDIZATION PROGRAMME, CEN TC350

Framework level	Indicators for		
	Environmental performance	Social performance	Economic performance
Framework level	EN 15643-1 Sustainability Assessment of Buildings – General Framework		
Framework level	EN 15643-2 Framework for Environmental Performance	EN 15643-3 Framework for Social Performance	EN 15643-4 Framework for Economic Performance
Building level	EN 15978 Assessment of Environmental Performance	WI 015 Assessment of Social Performance	Assessment of Economic Performance Life Cycle Costing (ISO 15686-5)
Product level	EN 15804 Environmental Product Declarations	<i>At present, technical information related to some aspects of social and economic performance are included under the provisions of EN 15804 to form part of EPD</i>	

- PN-EN 15643-1:2010 Sustainability of construction works – Sustainability assessment of buildings – Part 1: General framework
- PN-EN 15643-2:2010 Sustainability of construction works – Assessment of buildings – Part 2: Framework for the assessment of environmental performance
- PN-EN 15804:2011 Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products.

Tablica 4

UWARUNKOWANIA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU BUDOWNICTWA - NORMY

UWARUNKOWANIA zrównoważonego rozwoju budownictwa			
materiałowe	energetyczne	środowiskowe	społeczne/ekonomiczne
Wyroby o dobrze zdefiniowanej użyteczności; dobór według użyteczności – „performance concept”	Budynki netto zero-energetyczne	Minimum obciążeń dla środowiska; minimum zużycia materii (trwałość, recykliczacja, a powtórne użycie)	Komfort użytkownika
<b>PN-EN 15643-1:2010</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena zrównoważoności budynków – cz. 1. Postanowienia ogólne			
<b>EN 15978:2011</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków – Metoda obliczania*		<b>FprEN 15643-3</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 3: Postanowienia dotyczące oceny społecznych właściwości użytkowych*	
<b>prEN 15804</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Środowiskowe deklaracje wyrobu – Zasady kategoryzacji wyrobu*	<b>PN-EN 15643-2:2011</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 2. Postanowienia dotyczące oceny środowiskowych właściwości użytkowych		<b>FprEN 15643-4</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena budynków – Część 4: Postanowienia dotyczące oceny ekonomicznych właściwości użytkowych *
<b>EN 15492:2011</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Środowiskowe deklaracje wyrobu – Format komunikatu: biznes-biznes*			<b>prEN 16309</b> Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena społecznych właściwości użytkowych budynków – Metody*

wykreowania zrównoważonego rozwoju budownictwa na drodze normalizacyjnej. Należy podkreślić, że tradycyjne działania normalizacyjne to „całkowanie” doświadczeń z przeszłości. W tym przypadku zrównoważony rozwój nie został nigdzie dotychczas osiągnięty, postanowienia normowe mają między innymi go „wymusić”. Jest to historyczna szansa i najprawdopodobniej cywilizacyjna konieczność.

Staraniem Komitetu Technicznego 307 trzy podstawowe europejskie normy środowiskowe uzyskały status normy polskiej i zostaną opublikowane w polskiej wersji językowej. Są to:

- PN – EN 15643-2: Zrównoważenie obiektów,
- PN – EN 15643-1: Zrównoważenie obiektów budowlanych – ocena zrównoważoności budynków - część 1 – zasady ogólne; część 2 – zasady oceny właściwości środowiskowych,
- PN – EN 15804: Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu - podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.

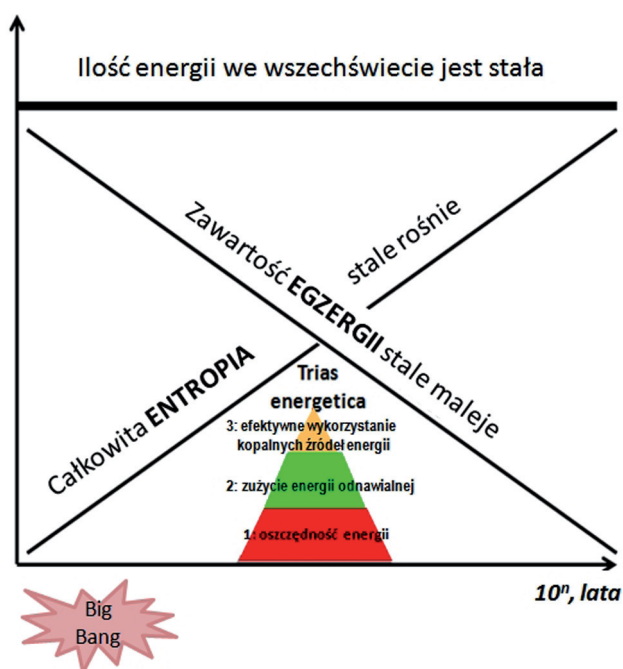
Tradycyjnie jakość betonu była oceniana poprzez wytrzymałość na ściskanie - „mocniejszy” beton był traktowany jako lepszy we wszystkich aspektach. Okazało się to ułomne. Obserwuje się coraz bardziej zdecydowane przesunięcie od wytrzymałości do szeroko rozumianej użyteczności, obejmującej takie cechy jak: szczelność, odporność na ścieranie, odporność na korozję mrozową i korozję chemiczną (17). Są to cechy decydujące o trwałości. Ostatnio rozwój betonów samozagęszczalnych SCC spowodował iż szczególnie ważne stały się właściwości reologiczne mieszanki betonowej. Takie oczekiwania w połączeniu z koniecznością uwzględnienia trzech klas kontroli wykonania zdefiniowanych w PN-EN 13670, towarzyszą obecnie podjętej nowelizacji europejskiej normy betonowej PN-EN 206 (18). Zrównoważony beton przyszłości będzie definiowany w kategoriach cech technicznych, a nie w kate-

Traditionally, concrete quality was assessed primarily in terms of its compressive strength; it was assumed that making concrete “stronger” made it better in all aspects. However, as it became apparent that this assumption was flawed, attention began to turn away from a mere reliance on strength to considerations of the *usefulness* (in the broad meaning of the term) of a particular concrete, represented by properties such as: water tightness, resistance to abrasion, freeze-thaw resistance, and resistance to chemical aggression. These properties were then referred to the anticipated time of usage – *i.e.*, the durability (or life cycle) of the concrete. This has led to the ever more frequent utilisation of concrete with not only high strength but also high durability, often referred to as High Performance Concrete (HPC) (17). More recently, with the development of self-compacting concrete (SCC), the rheological properties of the fresh concrete have become important to design considerations. This change in the approach to the design and execution of

concrete construction (18) is particularly evident in the European standard relating to concrete, such as EN 206. In the future, the market share of *Defined Performance Concrete* [19], that is concrete with performance values specific to a particular project, will continue to grow, as the industry becomes more sophisticated both in defining concrete properties of importance and in their measurement. It remains a challenge to formulate performance criteria for various applications; in other words, a set of properties and values of critical importance for specific applications. Obviously, the fundamental requirements that must be met include: structural safety; fire protection; safety of use; health and environmental protection; noise and vibration protection, and energy and thermal savings, and overall economy [5]. The durability requirements make it imperative to ensure the usability of the structure throughout the period of service life – at minimum fifty years. Concrete construction should be made subordinate to the principles of sustainable development. This means that contemporary needs will have to be satisfied without endangering the opportunities of future generations. Shortly speaking, it means a shift of prescribed concrete (“prescriptive in nature”) towards performance (designed) concrete sustainable oriented. The concrete which will be defined on the base of its technical properties and not in terms of its composition; a concrete with known properties, but with better selected values. The European Standard EN 206 creates such an opportunity.

#### 4. Exergy as environmental measure

Sustainability as the relatively new category is difficult to characterize and environment interactions are difficult to model quantitatively (20). Beyond a doubt it an infinite economic growth which underlies the sustainability theory, they validation of this hypothesis requires the availability resources. From other point of view, a generated



Rys. 4. Piramida energetyczna i Energia, Egzergia, Entropia we wszechświecie na osi czasu

Fig. 4. Trias energetica and Energy, Exergy and Entropy in Universe versus time line

goriach składu (19). Wyzwaniem pozostaje sformułowanie kryteriów użyteczności do różnych zastosowań, to znaczy zbioru cech i ich wartości decydujących o przydatności w danym zastosowaniu.

#### 4. Exergia jako miara środowiskowa

Zrównoważoność jako względnie nowe pojęcie jest trudne do opisanego a oddziaływania środowiskowe są trudne do ilościowego ujęcia modelowego (20). Różne wątpliwości towarzyszą założeniu stałego rozwoju przyświecającego teorii zrównoważoności. Wymaga to przyjęcia stałej dostępności zasobów, a z drugiej strony oczywistym ograniczeniem są powstające odpady przemysłowe. Stąd postulat zarówno minimalizacji zużycia materii jak i ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowiska. Koncepcja egzergii jako miary oddziaływań środowiskowych wydaje się pożyteczną i wielce obiecującą próbą jednolitego ujęcia termodynamicznego tego zagadnienia. Zgodnie z pierwszym prawem termodynamiki energia nie powstaje ani nie znika, może tylko zmieniać swoją postać. Nie oznacza to jednakże, iż nie występują tu problemy (21). Nie możemy prosto przekształcać jednej formy energii w inną; procesom rzeczywistym zawsze towarzyszy wzrost entropii (rysunek 4). Innymi słowami, tylko część energii może być wykorzystywana jako praca użyteczna, odpowiada to energii użytecznej – egzergii. Oddziaływanie pomiędzy dowolnym systemem a jego środowiskiem, może być analizowane na podstawie wymiany energii (np. na sposób ciepła) i transportu (przepływ) masy. Z użyciem pojęcia egzergii sformułowano (22) trzy warunki zrównoważonego rozwoju:

- konsumpcja egzergii nie może wyprzedzać jej powstawania,
- efektywne wykorzystanie źródeł egzergii, oznacza wykorzystanie procesów o najmniejszej możliwej entropii,

waste from the industry seems to lead to the obvious limitation of the environment. A uniform accounting based on thermodynamic approach seems to be adequate or at least promising. The concept of exergy is an interesting basis for the development of a measure of an assessment of environmental building performance. The first law of thermodynamics states that the energy never disappears. Only its form can change. However, this does not mean that there is no energy problem at all (21). We cannot simply transfer one form of energy into another; real process only takes place if entropy is created (Fig. 4). In other words, there is only a part of energy that can be transferred into useful work; useful energy - exergy. The relationship between any system and its environment could be examined by the exchange of energy (in the form of heat) and the transport (flow) of mass.

To preserve the future for next generations there are now three conditions to the use of exergy (22):

- exergy may not be consumed faster than its development rate;
- we have to work very efficiently with the exergy sources: the less entropy we generate the more efficient is the technology process;
- emission of the exergy may not cause any danger to the eco-sphere.

There are two types of exergy sources in the eco-sphere: sources and deposits. The whole system stays working because of the continuous input of solar-exergy. Due to the sun, the eco-system has renewable characteristics. All living systems are part of flow of energy and matter. They receive energy and matter at low entropy and emit it at high entropy. Thereby a net inflow of exergy is maintained, which keeps the system alive (21). In the case of coal used for heating, we extract coal with high exergy (low entropy) from the environment and return to the environment a low exergy (high entropy) ash waste. The situation is radically changed if a fly ash is used for concrete (see chapter 6). Utilization of the exergy concept often requires careful consideration of the choice of reference environment, due to the fact that unlimited reservoirs do not exist in the real world. Exergy is only physical concept which can be used to describe the reality in which we live. All utilization of resources and disposal of waste product affect nature. This effect is significantly related to the amount of exergy in the utilized resources or the disposed waste.

#### 5. Durability of concrete (23)

The thermodynamic considerations presented in the previous chapter not only leads to the conclusion that sustainability is a necessity, but also that a material destruction process is inevitable (permanent tendency to decrease exergy and increase entropy). It is obvious at least by engineering intuition, that construction durability is a significant component of sustainability. It has been argued in the introduction to this study that "sustainable concrete" and "durable concrete" have been even treated as synonyms. The concrete durability requirements were the particular subject of the revision during the preparation process of the standard EN



- wykorzystanie exergii nie może stanowić zagrożenia dla ekosfery.

Źródłem exergii są zasoby naturalne. System jest zasilany energią słoneczną. Dzięki promieniowaniu słonecznemu eko – system ma odnawialną charakterystykę.

Wszystkie żywe organizmy uczestniczą w przepływie energii i masy; otrzymują energię i masę o niskiej entropii, a są źródłem entropii wysokiej (21). W przypadku węgla użytego do ogrzewania, pozyskujemy ze złoża węgla o wysokiej exergii (niska entropia), a do środowiska powraca popiół o małej exergii i dużej entropii – jako produkt odpadowy. Sytuacja ulega radykalnej zmianie, jeśli elektrociepłowniczy popiół lotny jest spożytkowany w betonie (por. rozdział 6). Stosowanie pojęcia exergii z reguły wymaga starannego zdefiniowania środowiska. Istotny jest taki dobór procesu, aby pochłaniał minimum exergii i generował jak najmniej entropii. W świecie rzeczywistym nie istnieją niewyczerpane źródła. Utylizacja zasobów, powstawanie odpadów, zawsze oddziałują na środowisko. To oddziaływanie jest w sposób istotny powiązane ze zmianą exergii (21).

## 5. Trwałość betonu (23)

Z punktu widzenia termodynamiki zaprezentowanego w poprzednim rozdziale wynika nie tylko konkluzja o konieczności „zrównoważenia”, ale także o nieuchronności procesów destrukcji materiałów (stałe dążenie do obniżenia exergii i stały wzrost entropii). Jest oczywiste intuicyjnie, że trwałość obiektów budowlanych jest istotnym składnikiem zrównoważonego rozwoju. We wprowadzeniu do niniejszego artykułu dyskutowano nawet traktowanie pojęć „zrównoważony beton”- „trwały beton” jako zamiennych. Nowe sformułowania wymagań podstawowych CPR 305/2011 (por. rozdział 2) nie pozostawiają wątpliwości. Trwałość obiektów jest ważnym elementem kształtowania zrównoważonego budownictwa, jednakże zrównoważenie jest pojęciem szerszym. Wymaganie trwałości betonu (minimum 50 lat) było ważną przesłanką przy opracowywaniu europejskiej normy betonowej EN 206 – 2000. Obecnie po 12 latach jej stosowania, w chwili kiedy przystąpiono do jej nowelizacji, istotna jest odpowiedź, czy normowe ustalenia w wystarczającym stopniu zapewniają trwałość betonu w przewidywanych warunkach w założonym czasie użytkowania. W wielu publikacjach definiujących „zrównoważony beton 21 wieku” podkreśla się podstawowe znaczenie trwałości (24). R. N. Swamy sugeruje nawet odwrócenie paradygmatu „Trwałość dzięki wytrzymałości” na „Wytrzymałość poprzez trwałość” (25). W jaki sposób EN 206 zapewnia przynajmniej 50 letni okres użytkowania betonu, zakładając jedynie umiarkowane działania w zakresie utrzymania obiektu? Czy obecnie narzędzia są wystarczające? Oczywiście żadna norma nie wymaga od użytkownika zrozumienia praw, które stanowiły podstawę sformułowania wymagań. Racjonalne wyjaśnienie przyjętych wymagań, zapewnia jednakże skuteczne wykorzystanie normy. W normie znajdujemy stanowcze zapewnienie: „jeśli beton spełnia wymagania dotyczące wartości granicznych, należy uznać, że beton w konstrukcji spełnia wymagania trwałości dla

206 - 2000. The standard EN 206 is being used for twelve years. The aim of the study is to confirm whether the standard controlling tools of concrete durability is sufficient to assure concrete usefulness in its predicted service life. It is particularly important that in various publications defined “sustainable concrete” for the 21<sup>st</sup> Century significance of durability (24). R. N. Swamy (25) suggests even to shift a paradigm from “Durability through Strength” into “Strength through Durability”. How in this context looks EN 206? The specification of durability has been given into consideration in aspect of performance approach. Intended service life time of concrete in structure according to the EN 206 should be at least 50 years, including moderate maintenance. How the EN ensures that? Is it enough? None standard demands the understanding of basic law for established requirements, however, rational justification of the given requirements makes the progress in standard implementation and effective usage. In the standard a strong belief is expressed that: *if the concrete is in conformity with the limiting values, the concrete in the structure shall be deemed to satisfy the durability requirements for the intended use in the specific environmental condition.*

The statement however is made conditional upon the provision of:

- the appropriated exposure class was selected (XO – no risk of corrosion or attack, XC – corrosion induced by carbonation, XD – corrosion induced by chlorides other than from sea water, XS – corrosion induced by chlorides from sea water, XF – freeze – thaw attack with or without de-icing agents, XA – chemical attack, XM – abrasion attack),
- the concrete is properly placed, compacted, cured,
- the concrete has the adequate minimum cover to reinforcement,
- the anticipated maintenance is applied.

Assuming that all these requirements are executed and concrete constituent materials are properly selected in qualitative way: what are the standard measures to ensure concrete durability? There are just three material parameters (Table 5):

- maximum water/cement ratio w/c; if aggressive risk is higher, w/c should be lower,
- minimum cement content C; if aggressive risk is higher, C should be higher,
- minimum concrete compressive strength class (optional); higher risk – higher compressive strength,

and if relevant:

- minimum air-content of the concrete.

The most potential destructive weather factors are freezing and thawing, especially when the concrete is wet and has deicing chemicals. Deterioration is caused by freezing of water and it results in subsequent expansion (+9%) in the paste or the aggregate grains or both. The improvement of resistant to freeze and thaw is recommended in standard:

- low water/cement ratio,
- addition of an air entrainment admixture.

przewidywanego zastosowania w danym środowisku”.

To stwierdzenie jest prawdziwe, jeśli zostały dodatkowo spełnione następujące warunki:

- klasy ekspozycji zostały właściwie dobrane (X0 - brak zagrożenia agresją środowiska, XC – korozja spowodowana karbonatyzacją, XD – korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej, XS – korozja spowodowana chlorkami z wody morskiej, XF – korozja mrozowa bez środków odladzających lub ze środkami odladzającymi, XA – agresja chemiczna, XM – agresja wywołana ścieraniem),
- beton został właściwie ułożony, zagęszczony i pielęgnowany,
- betonowa otulina zbrojenia jest odpowiednia,
- przeprowadzono właściwe zabiegi w zakresie utrzymania.

W normie wyróżniono tylko trzy parametry materiałowe mające zapewnić trwałość, a mianowicie (Tablica 5):

Tablica 5 / Table 5

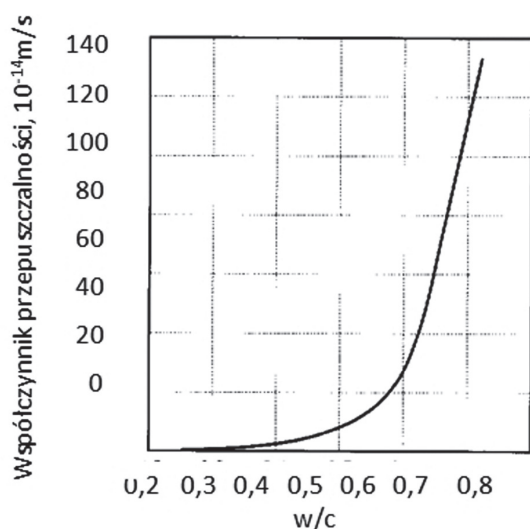
KLASY EKSPOZYCJI I ZALECANE GRANICZNE CHARAKTERYSTYKI SKŁADU I WŁAŚCIWOŚCI BETONU  
EXPOSURE CLASSES AND RECOMMENDED LIMITING VALUES FOR COMPOSITION AND PROPERTIES OF CONCRETE

Lp. No.	Klasa ekspozycji Exposure class	max. wskaźnik wodno-cementowy $w/c_{min}$ max water/cement, w/c	min. zawartość cementu, $C_{min}$ , kg/m <sup>3</sup> min. cement content, C kg/m <sup>3</sup>	min. klasa wytrzymałości min. strength class
1.	X0	--	--	C12/15
2.	XC1	0,65	260	C20/25
3.	XC2	0,60	280	C25/30
4.	XC3	0,55	280	C30/37
5.	XC4	0,50	300	C30/37
6.	XS1	0,50	300	C30/37
7.	XS2	0,45	320	C35/45
8.	XS3	0,45	340	C35/45
9.	XD1	0,55	300	C30/37
10.	XD2	0,55	300	C30/37
11.	XD3	0,45	320	C35/45
12.	XF1 <sup>a)</sup>	0,55	300	C30/37
13.	XF2 <sup>a,b)</sup>	0,55	300	C30/37
14.	XF3 <sup>a,b)</sup>	0,50	320	C30/37
15.	XF4 <sup>a,b)</sup>	0,45	340	C30/37
16.	XA1	0,55	300	C30/37
17.	XA2 <sup>c)</sup>	0,50	320	C30/37
18.	XA3 <sup>c)</sup>	0,45	360	C35/45
19.	XM1	0,55	300	C30/37
20.	XM2	0,55	300	C30/37
21.	XM3	0,45	320	C35/45

a) minimalna zawartość powietrza:/minimum air content: 4%

b) kruszywo o wystarczającej mrozoodporności/aggregate with sufficient freeze-thaw resistance (EN 12260)

c) cement siarczanoodporny/sulfate-resisting cement



Rys. 5. Przybliżona zależność: współczynnik przepuszczalności - wskaźnik wodno-cementowy (26)

Fig. 5. Approximate relation: permeability coefficient vs. water/cement ratio (26)

However, there are actions of conflict. Contents of concrete with low water-cement ratio are less porous and in consequence are less permeable (Fig. 5) – more durable and a compressive strength also increases. Air entrained concrete (with low water-cement ratio) is highly resistant to freezing and thawing. The microscopic air bubbles in the paste provide chambers for the water and ice to enter and thus release the generated hydraulic pressure. However, the improvement of freeze-thaw is redeemed by decrease (sometimes even to 30%) of mechanical strength. The art of building goal is to find the proper compromise in the multi-direction space:

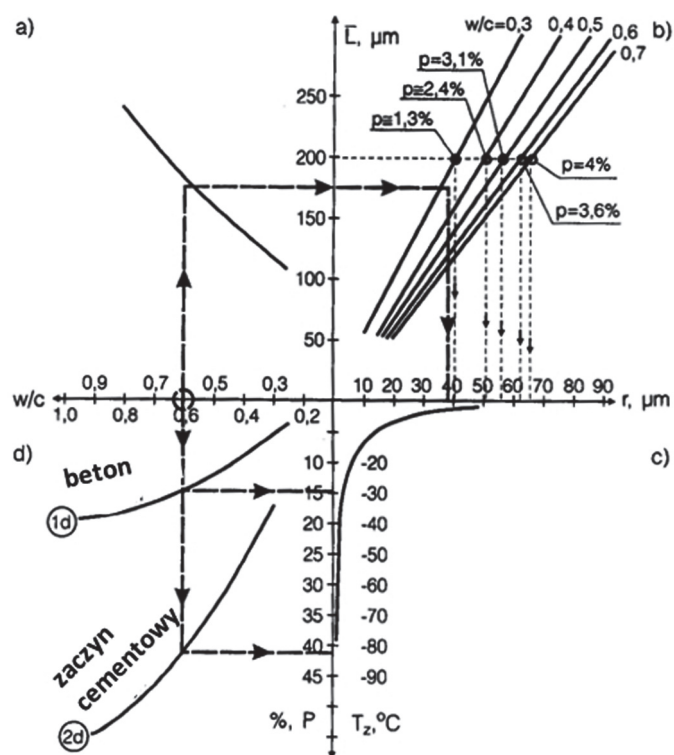
- material components,
- technological parameters,
- technical properties,
- performance requirements.

The standard does not make suggestions in this field. The air entrained concrete microstructure is decided upon freeze-thaw resistance (Fig. 6). The diameter of pores and space pores distribution, so called spacing factor,  $\bar{L}$ , are extremely important. From the point of concrete durability the pore diameter should be below

- maksymalny współczynnik wodno-cementowy w/c; jeśli zagrożenie agresją jest większe to w/c powinno być mniejsze,
- minimalna zawartość cementu C; jeżeli zagrożenie jest większe to C powinno być większe,
- minimalna wytrzymałość na ściskanie (klasa wytrzymałości betonu); jeśli wyższe zagrożenie to wyższa klasa wytrzymałości,
- dodatkowo w przypadku zagrożenia korozją mrozową ( $\geq XF2$ )-napowietrzenie betonu.

Najczęstszą przyczyną destrukcji betonu jest korozja mrozowa, zwłaszcza gdy beton jest zawilgocony i stosowane są środki odładzające. Zwiększenie objętości (+9%) zamarzającej wody powoduje lokalne zniszczenia w utwardzonym spoiwie betonu, bądź w ziarnach kruszywa, bądź w obu tych składnikach. Dla poprawy odporności na skutki cyklicznego zamrażania i odmrażania, norma zaleca: obniżenie w/c i zastosowanie domieszek napowietrzających. Oddziaływania te pozostają w pozornym konflikcie. Beton o mniejszym w/c jest mniej porowaty (rysunek 5), w konsekwencji o większej szczelności, wzrasta także wytrzymałość na ściskanie. Wprowadzenie do takiego betonu mikropęcherzyków powietrza tworzy w systemie kapilarnym stwardniałego spoiwa szereg mikroziorników, do których przemieszcza się woda wypychana przez lód, zmniejszając ciśnienie wewnętrzne generowane wzrostem objętości zamarzającej wody. Poprawa mrozoodporności jest okupiona spadkiem (czasami nawet 30%) wytrzymałości na ściskanie. Celem sztuki budowlanej jest znalezienie właściwego kompromisu w wielowymiarowej przestrzeni: parametry materiałowe, parametry technologiczne, użyteczność betonu – właściwości technologiczne mieszanki betonowej i właściwości techniczne betonu. Norma w tym zakresie nie czyni żadnych sugestii. O skuteczności napowietrzenia zdecyduje uzyskana mikrostruktura porów (rysunek 6): średnica porów i ich przestrzenne rozproszenie. Średnica porów powinna być mniejsza od 60  $\mu\text{m}$  – wówczas występuje obniżenie temperatury zamrażania w porach. Rozmieszczenie porów charakteryzuje się za pomocą wskaźnika,  $\bar{L}$  – jest to średnia, największa odległość dowolnego punktu wewnątrz przestrzeni zaczynu cementowego od najbliższej krawędzi pora. Wskaźnik rozmieszczenia porów nie może być większy niż 400  $\mu\text{m}$ , korzystnie poniżej 200  $\mu\text{m}$ .

Duża szczelność betonu jest również niezmiernie ważna w przypadku narażenia na agresję chemiczną, np. betony zagłębione w gruntach lub zanurzone w wodzie gruntowej. W przypadku występowania w środowisku jonów siarczanowych, w szczególności o stężeniu odpowiadającym klasie ekspozycji średnio-agresywnej lub wyższej, konieczne jest – zgodnie z normą – stosowanie cementów siarczanoodpornych. Stal zbrojeniowa w żelbecie jest chroniona przez wysoce alkaliczną (zwykle  $\text{pH} \geq 12,5$ ) otulinę betonową. W tych warunkach na powierzchni stali tworzy się pasywna ochronna warstwa tlenkowa. W obecności chlorków penetrujących z wody morskiej lub środków odładzających warstwa ochronna może ulec uszkodzeniu, zapoczątkowując proces elektrochemicznego roztwarzania stali. Utrata właściwości ochronnych następuje również w wyniku postępującego procesu karbonatyzacji betonu. Karbonatyzacja to chemiczna reak-



Rys. 6. Wpływ współczynnika w/c na wskaźnik rozmieszczenia porów,  $\bar{L}$  (a) i porowatość betonu (1d) i zaczynu cementowego (2d); wskaźnik rozmieszczenia porów vs. średnica porów (b); temperatura zamarzania wody w betonie vs. średnica porów  $T_z$  9c) – wzorowane wg (18, 26, 27)

Fig. 6. The influence of water-cement ratio, w/c upon spacing factor,  $\bar{L}$  (a) and porosity of concrete (1d) and cement paste (2d); spacing factor, ... vs. pore radius (b); freezing temperature of water in concrete vs. pore radius,  $T_z$  [modeled acc. to (18, 26, 27)]

60  $\mu\text{m}$ ; in result the freezing temperature of water in concrete decreases. The spacing factor,  $\bar{L}$ , should be no more than 400  $\mu\text{m}$ , preferably below 200  $\mu\text{m}$ .

The concrete with low permeability is also important when it is exposed to chemical attack, e.g. from natural soils and ground water. Concrete protects embedded steel from corrosion through its highly alkaline nature. The high pH environment in concrete (usually greater than 12.5) causes a passive and non-corroding protective oxide film to form on a steel. However, the presence of chloride ions from deicers or seawater can destroy or penetrate the film. Once the chloride corrosion threshold is reached, an electric cell is formed along the steel or between steel bars and the electrochemical process of steel corrosion begins. When  $\text{SO}_4^{2-}$  leads to exposure classes, moderate or highly aggressive, it is essential to use sulphate-resisting cement. Damage of reinforced concrete is often caused by corrosion of steel reinforcements due to the carbonation process – the chemical reaction of atmospheric  $\text{CO}_2$  with calcium hydroxide from cement hydration. The main negative effect of carbonation is decreasing of concrete pH and in consequence loss of the protection of rebars (Fig. 7). The authors found (28) and statistically confirmed that the concrete carbonation is self-terminating process. The finite carbonation depth in concrete,  $h$ , can be described as a hyperbolic function of time,  $t$ :

cja wodorotlenku wapnia powstałego w wyniku hydratacji cementu z atmosferycznym dwutlenkiem węgla CO<sub>2</sub>. Głównym skutkiem negatywnym jest zmniejszanie alkaliczności betonu i w konsekwencji utrata właściwości ochronnych wobec stali (rysunek 7). Ostatnio (28) statystycznie potwierdzono, że karbonatyzacja ma cechy procesu samoograniczającego się w czasie. Głębokość karbonatyzacji w zależności od czasu może być opisana hiperboliczną funkcją:

$$h = A - B \cdot t^{-0.5} \quad [1]$$

gdzie:  $h$  – głębokość karbonatyzacji,  $t$  – czas ekspozycji.

Maksymalną głębokość karbonatyzacji wyznacza asymptota  $A$ :

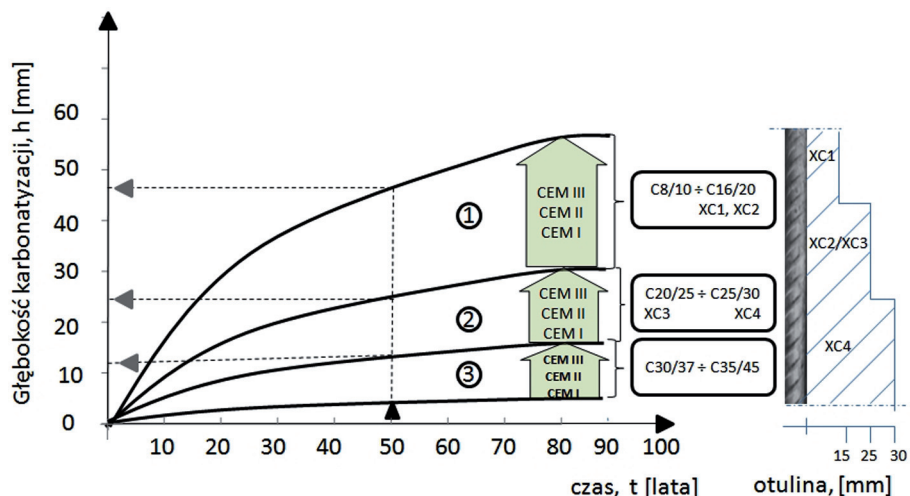
$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = A \quad [2]$$

Jeśli zaprojektowana grubość otuliny betonowej przekracza wartość asymptoty  $A$ , wówczas nie powinno wystąpić zagrożenie utraty trwałości żelbetu w wyniku karbonatyzacji. Potwierdza to istotność właściwego dobrania minimum grubości otuliny betonowej zbrojenia. Ze względu na trwałość betonu parametrami sterującymi są  $(w/c)_{\min}$  i  $C_{\min}$ . Pole wyznaczone przez iloczyn  $(w/c)_{\min} \cdot C_{\min}$  w ciągu ostatnich kilkunastu lat istotnie się przesunęło w kierunku wyższej zawartości cementu i mniejszego wskaźnika wodno-cementowego. Minimalna wytrzymałość na ściskanie,  $f_{c,\min}$  spełnia funkcję wskaźnika kontrolnego – jest wielkością wynikową. Potwierdzenie klasy wytrzymałości betonu zapewnia także, że potencjalny proces destrukcji rozpocznie się przy odpowiednio wysokiej wytrzymałości mechanicznej.

Przeczytanie ze zrozumieniem normy EN 206 po 12 latach jej stosowania potwierdza trafność przyjętych w niej narzędzi kształtowania trwałości betonu. Są to:

- właściwy dobór składników,
- uzyskanie odpowiedniej szczelności betonu przez dobór właściwego wskaźnika wodno-cementowego,
- ukształtowanie odpowiedniej mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego przez zastosowanie domieszek napowietrzających (odpowiednio niskie  $w/c$ ) dla zapewnienia odporności na korozję mrozową,
- poprawę odporności chemicznej przez właściwy jakościowy i ilościowy dobór spoiwa cementowego (cement siarczanoodporny).

Wszystkie te rozważania wskazują na decydujące w każdym przypadku znaczenie właściwego doboru klas ekspozycji. Istnieje potrzeba opracowania dla projektantów przewodnika doboru klas ekspozycji, a w miarę gromadzenia nowych doświadczeń, zapewne także opracowanie nowych klas ekspozycji, np. zagrożenia wzmocnionym promieniowaniem, czy też zagrożenia wybuchem.



Rys. 7. Oszacowanie postępu karbonatyzacji w betonie zwykłym różnych klas wytrzymałości: niskiej (1), średniej (2) i wysokiej (3) z uwzględnieniem rodzaju cementu (CEM I – Portlandzki, CEM II – popiołowy, CEM III – hutniczy) oraz minimalna grubość otuliny dla żelbetu w klasach ekspozycji z grupy XC (23)

Fig. 7. Estimation of carbonation progress in ordinary concrete of different strength class: low (1), medium (2) and top (3) with respect to cement type (CEM I – Ordinary Portland Cement, CEM II – Fly Ash Cement, CEM III – Ground Granulated Blast-furnace Slag Cement) and minimum cover thickness for reinforced concrete in XC group classes of exposition (23)

$$h = A - B \cdot t^{-0.5} \quad [1]$$

with a minimum depth of carbonation done by the asymptote of this function with the equitation:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = A \quad [2]$$

If the designed concrete cover exceeds the  $A$  value in the equation there should be no risk of loss of durability due to the carbonation. This statement could be useful as an experimental tool in designing concrete construction. It confirms the importance of the standard requirement: *the concrete has the minimum cover to reinforcement*.

From the point of the concrete durability the  $(w/c)_{\min}$  and  $C_{\min}$  are the steering parameters of the concrete durability. Accordingly to that the field restricted by  $(w/c)_{\min} \times C_{\min}$  significantly changed in comparison with the past. It shifted towards concrete with higher cement content and lower water-cement ratio. The  $(f_c)_{\min}$  – minimum strength class has a function of the control factor – it is the result value. Although, the conformation of the given concrete class strength makes sure that the potential destruction process will start from the adequate high mechanical strength. The reading with understanding (hopefully) the EN 206 after 12 years of using confirms that the standard specified the useful tools to control the concrete durability. There are:

- adequate selection of components,
- ensuring the low permeability due to the adequate water-cement ratio,
- shaping the suitable cement paste microstructure by air entrainment additives (and adequate  $w/c$  as well) to assure suitable freeze-thaw resistance,
- improve chemical resistance due to the adequate selection of cement binder in quantitative and qualitative way.

## 6. Sposoby zwiększenia zrównowżenia współczesnego betonu

### 6.1. Metody zwiększania stopnia zrównowżenia betonu

Przemysł cementowy już poczynił wielkie wysiłki na drodze zrównowżenia wyrobu: ograniczając emisję pyłów, zmniejszając kaloryczność procesu klinkieryzacji, zmniejszając zużycie węgla i stosując produkty odpadowe jako surowce energetyczne (zużyte opony) oraz zagospodarowując odpady energetyki i hutnictwa (popioły lotne i żużle). W oferowanym asortymencie rośnie udział cementów wieloskładnikowych, w których klinkier cementowy jest częściowo zastąpiony przez dodatki mineralne. Około 30% masy wytwarzanych cementów stanowią w różnym stopniu przetworzone odpady przemysłowe, bądź wykorzystywane do produkcji klinkieru (popioły lotne, odpady żelazonośne, odpady kamienia wapiennego) bądź jako dodatki w produkcji cementu (żużle hutnicze, popioły lotne, gips energetyczny i odpadowy). W odniesieniu do betonu jako wyrobu końcowego, wbudowanego w obiekt budowlany, wiele jeszcze może być uczynione, każdorazowo zależy to od danych warunków zastosowania – wytyczną jest ukierunkowanie na „użyteczność”. Możliwe są tu (łącznie lub pojedynczo) różne sposoby postępowania:

1. Zwiększenie udziału dodatków mineralnych i taki ich dobór aby wykorzystać zjawiska synergii dla zwiększenia trwałości i wytrzymałości,
2. Racjonalne stosowanie upłynniaczy w sposób ukierunkowany na zwiększenie zrównowżoności,
3. Umożliwienie przez odpowiedni dobór spoiwa wykorzystania lokalnego kruszywa i w konsekwencji ograniczenie transportu kruszywa,
4. Wytwarzanie betonu z kruszywa z rozbieranych obiektów,
5. Stosowanie betonu o zwiększonej trwałości, co umożliwi zmniejszenie nakładów na utrzymanie i pozwoli na wydłużenie czasu użytkowania,
6. Stosowanie – tam gdzie to uzasadnione – elementów o mniejszym przekroju, lecz z betonu o większej wytrzymałości; więcej cementu w 1 m<sup>3</sup>, ale mniej m<sup>3</sup> betonu,
7. Wykorzystanie pojemności cieplnej betonu do racjonalizowanej gospodarki energią w ogrzewaniu i chłodzeniu pomieszczeń.

Niektóre z tych metod scharakteryzowano bliżej w dalszej części pracy. Najskuteczniejszym sposobem ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> okazuje się – jak dotychczas – stosowanie cementów wieloskładnikowych i zwiększanie udziału dodatków mineralnych w betonie, w szczególności żużli wielkopieczowych i popiołów lotnych. Ostatnio w związku z rozwojem betonów samozagęszczonych wzrasta udział kamienia wapiennego.

### 6.2. Betony o wysokiej zawartości popiołów, HVFAC<sup>1</sup>

Betony o wysokiej zawartości popiołu, HVFAC to najbardziej skuteczny sposób uzyskiwania zrównowżonego betonu (29, 31).

<sup>1</sup> HVFAC – High Volume Fly Ash Concrete

Perhaps only the lack of direct control of the freezing-thawing resistance remains as the sign of question or weak point with respect to concrete durability. All above considerations give the good evidence that the selection of the appropriate exposure class is extremely crucial action. There is still the need for precise guideline, moreover, the need for further development the exposure class classification.

## 6. Measures of up-grading a sustainability of contemporary concrete

### 6.1. Routes making concrete more sustainable

A lot is done by cement producers to reduce the global carbon footprint, in particular to replace coal with waste having a calorific value equivalent to (fossil) fuel and by making blended cement where parts of the clinker are replaced with supplementary cementing materials (SCMs). However, cement is a bulk product that should cover a wide range of applications and serve different customers, giving limitations on clinker replacements.

Concrete, on the other hand, is the end product where the performance criteria are already specified and depending on application more can be done to increase its sustainability.

In order to make concrete more sustainable one may work along one or more of the following routes;

1. Replacing cement in concrete with larger amounts of supplementary cementing materials (SCMs) than usual, leading to synergic reactions enhancing strength and durability,
2. Producing leaner concrete with less cement per cubic meter utilizing plasticizers,
3. Making concrete with local aggregate by suitable cement replacements, thus avoiding long transport of aggregate,
4. Making concrete with recycled aggregate from demolished concrete structures,
5. Making more durable concrete with less maintenance and longer service life,
6. Making slimmer structures with high strength concrete. More cement per cubic meter, but less cubic meters,
7. Utilizing the heat capacity of bare concrete to save energy for heating/cooling of offices/housing.

Some of those routes are characterized closer in the study. Replacing parts of the cement in concrete with SCMs, or making blended cement where clinker is partly replaced with SCMs, is the fastest short term remedy to reduce CO<sub>2</sub> emissions from the cement and concrete industry. Blast furnace slags as latent hydraulic SCMs or pozzolana consuming calcium hydroxide; e.g. fly ash, are the most common ones. Waste limestone powder is also used as filler, in particular in self-compacting concrete (SCC).

HVFAC pozwala na:

- zmniejszenie konsumpcji zasobów naturalnych,
- zmniejszenie udziału cementu portlandzkiego,
- istotne zwiększenie trwałości.

We współczesnych wznoszonych konstrukcjach częstą praktyką jest stosowanie betonów o zawartości 25-30% masy popiołów lotnych, zwłaszcza w konstrukcjach masywnych, gdzie zastosowanie spoiwa o mniejszym cieple hydratacji pozwala zmniejszyć ryzyko wystąpienia rys termicznych. Wprowadzenie popiołu lotnego do składu betonu zwiększa jego odporność chemiczną, w tym na agresję siarczanową, zmniejsza także podatność na alkaliczną reakcję kruszywa (29). Rzadko jednakże obecnie dopuszcza się stosowanie HVFAC o zawartości 50% i więcej popiołów lotnych (30), przede wszystkim ze względu na opóźnienie przyrostu wytrzymałości w wczesnym okresie i zmniejszoną odporność na działanie mrozu (do 90 dni) (31, 32). Skutecznym środkiem zaradczym jest istotne zmniejszenie współczynnika wodno-cementowego i zastosowanie kruszywa o właściwie dobranej granulacji (30).

### 6.3. Energetycznie modyfikowany cement EMC

Intensywne mielenie powoduje rozwinięcie powierzchni reagentów i w konsekwencji zwiększenie podatności do reakcji i szybkości reakcji (33). Od początku lat 90-tych prowadzone są prace nad mieleniem cementu z różnymi dodatkami i uzyskaniem Energetycznie Modyfikowanych Cementów, EMC<sup>2</sup> (www.emccement.com) (34-48). Jest to również sposobem poprawy przyrostu wytrzymałości w wczesnym okresie dojrzewania. Ta technologia polega na wymieszaniu cementu z odpowiednimi dodatkami mineralnymi i intensywnym mieleniu, podczas którego mieszanka zostaje poddana naprężeniom udarowym i ścinającym (młyny planetarne i wibracyjne). W wyniku tego procesu uzyskuje się:

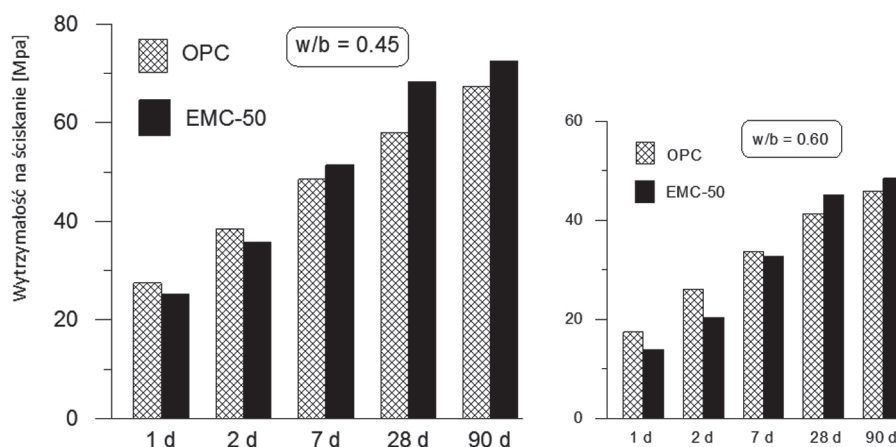
- poprawę zdolności wiążących spoiwa, w połączeniu z wzrostem aktywności pucolanowej popiołów lotnych,
- i/lub poprawę chemicznej reaktywności żużli wielkopiecowych,
- i/lub częściowe przywrócenie aktywności hydraulicznej betonu z recyklingu w wyniku „otwarcia” niezhidratyzowanych ziaren cementu.

Uzyskany produkt ma właściwości techniczne zbliżone lub lepsze od cech cementu pierwotnego. Zależnie od użytych składników 50 do 85% klinkieru portlandzkiego może być zastąpiona w betonie.

Tą metodą otrzymuje się:

- EMC z kwarcem; EMC 50,
- EMC z popiołami lotnymi; EMC 50 FA,

<sup>2</sup> EMC – Energetically Modified Cement



Rys. 8. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie (próbki sześciennie o boku 100 mm) zgodnie z ISO 4012

Fig. 8. Compressive strength tests (100 mm cube) according to ISO 4012; comparison of EMC 50Q and OPC

### 6.2. High – Volume Fly Ash Concrete

The High – Volume Fly Ash Concrete, HVFAC is the most effective way for sustainable development. HVFC addresses all three basic sustainability issues:

- diminution of virgin materials consumption,
- diminution of Portland cement content,
- increasing of durability.

In the modern construction practice amounts of fly ash on the order 25-30% by mass are commonly used and particularly recommended when there is a concern for thermal cracking, alkali-silica expansion, or sulphate attack (29). However, already existing technological bases for concrete with 50% or even more cement replacement by fly ash (30-32), HVFAC is not readily accepted by the construction industry due to a slower rate of strength development at early age. This problem could be overcome to some extent through a serious reduction in the water – cement, w/c ratio by using a suitable super-plasticizers and proper selection of aggregate grading (30).

### 6.3. Energetically Modified Cement, EMC

While ordinary grinding will increase the fineness and thereby the reactivity by increasing the surface area where reaction can take place (33), *mechanical activation* is thought to change the surface of the solid material on an atomic level enhancing its reactivity. Such a measure to enhance early strength can be energetic modification by special grinding (www.emccement.com) as for Energetically Modified Cement (EMC) extensively studied from the beginning of 1990s produced by high intensive grinding/activation of ordinary Portland cement (OPC) altogether with different types of fillers (34-48). The EMC technology consists of processing a blend of Ordinary Portland Cement, OPC and a filler through multiple high intensity grinding mills, where impact and shear stresses are applied to the solid phase (planetary mills, vibrating mills, etc.). The following could be achieved by the milling process: (1) improved binding capacity of OPC fraction in combination with

Tablica 6 / Table 6

ZUŻYCIE ENERGII OPC VS. EMC 50FA

ENERGY CONSUMPTION OPC VS. EMC

Cement	OPC	EMC (50% FA)
Produkcja klinkieru: Clinker production energy: <i>energia cieplna / thermal burning energy</i>	3.16 GJ/tonę (878 kWh/tonę) 100%	1.58 GJ/tonę (50% klinkier) 50%
Zużycie energii elektrycznej do produkcji cementu: Electric energy for grinding cement:	100 kWh/tonę	(50% OPC) 50 kWh/tonę
Electrical energy EMC process:	0	38 kWh/tonę
Energia procesu EMC: <i>Electrical power:</i>	100%	88% (38+50 = 88)
<i>Energia całkowita</i> <i>Total energy</i>	$(100\% \cdot 878 + 100\% \cdot 100) / (878 + 100) = 100\%$	$(50\% \cdot 878 + 88\% \cdot 100) / (878 + 100) = 54\%$

- EMC z żużlami wielkopieczowymi,
- EMC – z aktywną pucolaną.

H. Justnes i współpracownicy (46) badali kompozyty typu EMC o zawartości 20 i 50% kwarcu (73,9% SiO<sub>2</sub>). Wykazano, że mieszanka betonowa z EMC 50 nie różni się wyraźniej od betonu z macierzystym cementem w odniesieniu do takich cech, jak: urabialność, trwałość, napowietrzenie, czas wiązania. Konieczna zawartość superplastifikatora Highty 150, o stężeniu 40% dla osiągnięcia odpowiedniej konsystencji przy danym w/b jest nieco większa niż dla mieszanki cementowej. Ciepło hydratacji jest takie samo jak w przypadku mieszanki cementowej. W zestawieniu z przebiegiem wzrostu wytrzymałości betonu (rysunek 8), potwierdza to znaczącą aktywację klinkieru cementowego, a prawdopodobnie także kwarcu. Potwierdzają to również długotrwałe (950 dni) pomiary zawartości wodorotlenku wapnia w stwardniałym zaczynie (48).

Badany przez H. Justnesa i współpracowników (47) EMC zawierający 30% popiołów lotnych wykazał po 1 dniu dojrzewania wytrzymałości 37 MPa w porównaniu do 5 MPa dla tej samej mieszanki nie poddanej intensywnemu mieleniu i 10 MPa w przypadku betonu cementowego. EMC zawierający 50 i 70% popiołu lotnego odznaczał się odpowiednio wytrzymałością 15 i 11 MPa po 1 dniu dojrzewania. Jest to wytrzymałość wystarczająca do rozformowywania elementów prefabrykowanych i dla zapewnienia właściwego postępu robót budowlanych. Wykazano (47), że przy zastosowaniu EMC z 50% dodatkiem popiołu lotnego oszczędność energii wynosi 46%, a zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> wynosi co najmniej 40% w porównaniu do betonu zwykłego (Tablica 6).

Metodą EMC jest również otrzymywana reaktywna pucolana EMFA, której składnikami są: 95% popiołu lotnego i 5% cementu portlandzkiego. Ta pucolana może być stosowana do wytwarzania betonu w konwencjonalnych betoniarkach. W ten sposób można otrzymywać betony o zawartości 70% popiołu lotnego (por. roz-

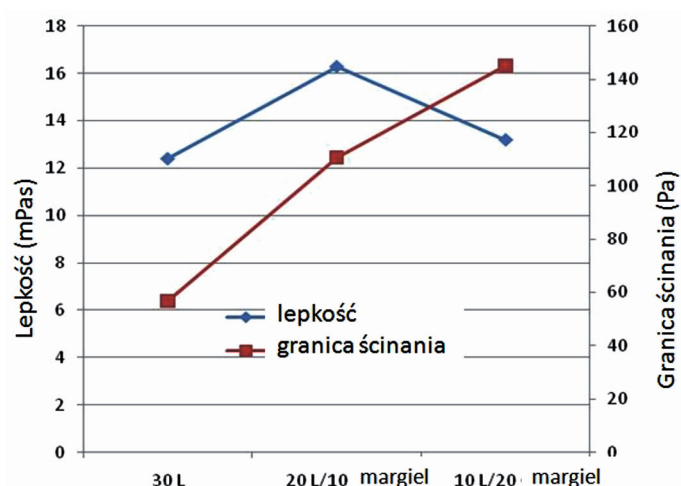
(II) increased pozzolanic activity of fly ash, and/or (III) improved of blast furnace slag, and/or (IV) creation of hydraulic activity of recycled concrete due to opening cement unhydrated grains. The resulting cement products have a performance equal or better than the parent OPC. According to the EMC process between 50 to 85% of Portland clinker in concrete can be replacement depending on raw material composition. There are:

- EMC cements with Quartz, EMC 50Q,
- EMC cements with Fly Ash, EMC 50FA, EMC 70FA,
- EMC cements with blast furnace slag,
- EMC highly reactive *pozzolans*.

*Energy modified cement (EMC) with quartz* – H. Justnes et al (46) studied EMC produced with 20 (EMC-20) and 50% (EMC-50) quartz rich (73.9 % SiO<sub>2</sub>) mine tailing replacing cement. Evidently concrete with EMC-50 is not significantly different from the OPC used to make it with respect to

the important fresh concrete properties like workability, stability, air content and setting time. However, the dosage of superplasticizer (Mighty 150, 40% solution) needed to produce the required consistency at each w/b-ratio was somewhat higher for the EMC mixes than for the OPC reference mixes. The EMC-50 generated a total heat per unit weight equal to the heat of the reference OPC cement liberation, which in combination with the strength development (Fig. 8) of EMC concrete, indicates significant chemical activation of the Portland clinker and possibly quartz components in EMC as indicated by calcium hydroxide content for paste specimens stored for 950 days (48). A bridge made by EMC with 50% quartz was actually built as a feasibility demonstration in 1998 in Sweden.

*Energy modified cement with fly ash* – H. Justnes et al (47) showed that it is feasible to make an EMC with 30% fly ash with 1 day



Rys. 9. Lepkość plastyczna i granica ścinania dla mieszanki samozagęszczalnej (SCC) o znacznym stopniu zastąpienia mączki wapiennej (L) przez kalcynowane margle, wg Justnes et al. (49)

Fig. 9. The viscosity and flexural stress of SCC where limestone powder (L) is increasingly replaced by calcined blue clay (Clay). Plotted after Justnes et al (49)

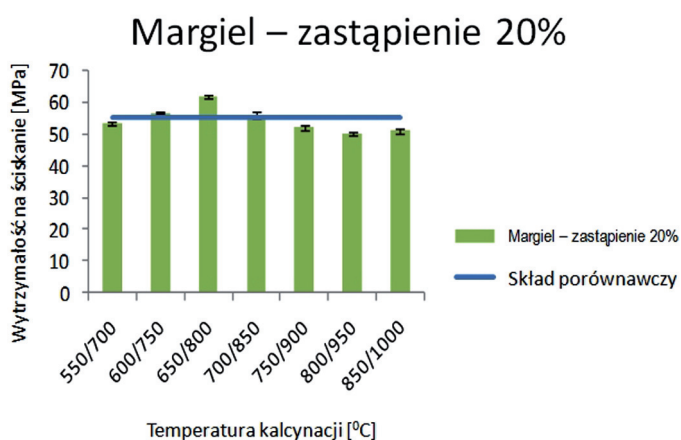
dział 6.2). Doświadczenia w Teksasie (45) wskazują, że nawierzchnie z betonu zawierającego tęgą pucolanę i płyty betonowe z tego kompozytu układane na gruncie odznaczają się mniejszą tendencją do zarysowania niż betony tradycyjne.

#### 6.4. Kalcynowane margle jako skuteczna pucolana

Żuźle wielkopieczowe i popioły lotne są w Europie szeroko stosowane do produkcji betonu, a nawet w niektórych rejonach odczuwa się deficyt tych ostatnich. Rzadziej stosuje się inne dodatki pucolanowe, takie jak pył krzemionkowy i metakaolinit. Te ostatnie mają korzystny wpływ na zmniejszanie emisji CO<sub>2</sub>, jednakże są drogie i trudnodostępne. Prowadzone są intensywne badania w celu znalezienia odpowiednich zamienników. Jedną z możliwości stanowią kalcynowane gliny i margle. Wykorzystuje się te surowce, która okazały się nie przydatne do wytwarzania cegieł lub lekkich kruszyw. Surowce te (gliny, margle) podaje się kalcynacji w 150-800°C. Justnes i współpracownicy (49) stosowali wypalane margle jako częściowy zamiennik pyłu wapiennego w betonach samozagęszczalnych. Wprowadzenie tego dodatku powodowało zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, przy uwzględnieniu małych zmian lepkości mieszanki betonowej (rysunek 9).

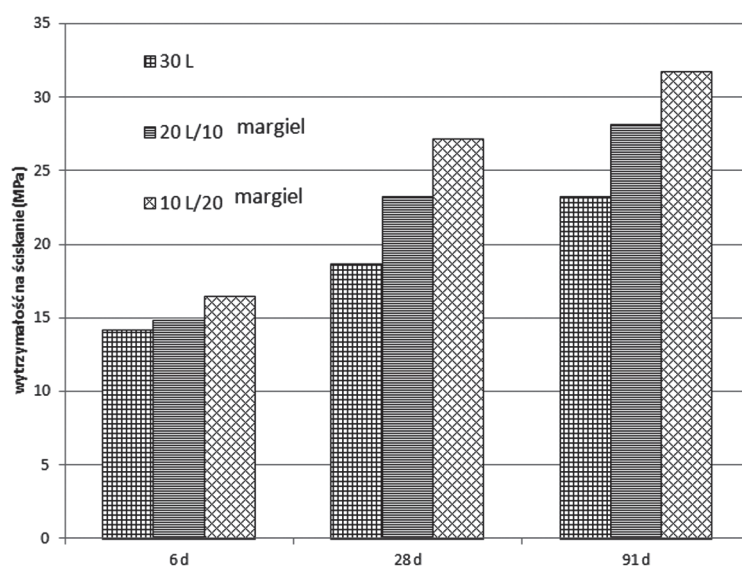
Wytrzymałość na ściskanie betonów z kalcynowanym marglem była większa po różnym okresie *t* (6, 28, 91 dni) betonu (rysunek 10, 11). Podobnie korzystne wyniki uzyskano w wielkoprzemysłowej próbie, zastępując do 50% cementu kalcynowanym marglem (rysunek 12, 13). Po 28 dniach modyfikowany beton osiąga praktycznie tę samą wytrzymałość jak beton referencyjny; wytrzymałość po 1 dniu wynosi około 10 MPa, co wystarcza do rozformowania elementów prefabrykowanych.

Przeprowadzenie próby w skali wielkoprzemysłowej potwierdza, że zastąpienie aż 50% cementu kalcynowanym marglem pozwala uzyskiwać wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach zbliżoną



Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy, w której 20% cementu zastąpiono kalcynowanym marglem, w funkcji temperatury kalcynacji marglu; linia pozioma – skład porównawczy

Fig. 11. Compressive strength of mortars with 20 % replacement of cement by calcined marl as a function of calcination temperature of the marl. Horizontal line = reference level

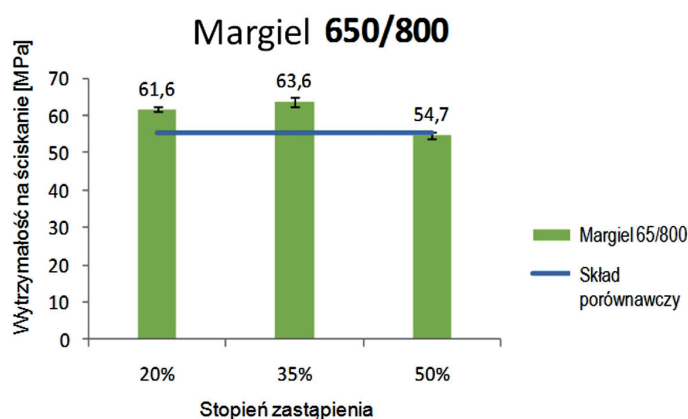


Rys. 10. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu o znacznym stopniu zastąpienia mączki wapiennej (L) przez kalcynowany margiel, wg Justnes et al. (49)

Fig. 10. The compressive strength evolution of SCC where limestone powder (L) is increasingly replaced by calcined blue clay (Clay). Plotted after Justnes et al (49)

strength of 37 MPa as opposed to 5 MPa for a blend for the same components and 10 MPa for an OPC. EMCs with 50 and 70% replacement of cement by fly ash and had 1 day strengths of 15 and 11 MPa, respectively, which should be sufficient for formwork removal and ensure the usual construction progress. H. Justnes et al (47) calculated that an energy saving of 46% and at least 40% savings in CO<sub>2</sub> emission were possible for an EMC with 50% fly ash replacing cement relative to an OPC (Table 6).

*Energy modified fly ash as highly reactive pozzolans* - A commercial energetically modified product - fly ash with +5% cement treated in the vibration mill (called EMFA here) that can be added together with Portland cement in the production of a concrete in a conventional mixer has been introduced in Texas, USA (45). The amount of fly ash can be increased from about 20% with untreated fly ash



Rys. 12. Wytrzymałość na ściskanie zapraw, w których 20, 35 i 50% cementu zastąpiono marglem kalcynowanym w temperaturze 800°C. Skład porównawczy stanowi zaprawa zawierająca 100% cementu portlandzkiego o wytrzymałości zaznaczonej linią poziomą

Fig. 12. Compressive strength of mortars with 20, 35 and 50 % replacement of cement by marl calcined at 800°C. Reference is mortar based on 100% OPC with strength level according to the horizontal line



do wytrzymałości betonu referencyjnego. Wytrzymałość kiludniowa jest natomiast wyraźnie mniejsza (rysunek 13). W wielu zastosowaniach może się to okazać ograniczeniem.

### 6.5. Zrównoważony beton „odchudzony” przez użycie upłynniaczy

Dobrze znane metody stosowania upłynniaczy mogą również służyć do prostego zwiększenia zrównoważenia konstrukcji. Jeden spośród trzech znanych sposobów stosowania upłynniaczy – jako domieszki zmniejszającej w/c, powoduje wzrost zrównoważenia przy zachowaniu tej samej urabialności i wytrzymałości, jaką ma beton wyjściowy (rysunek 14).

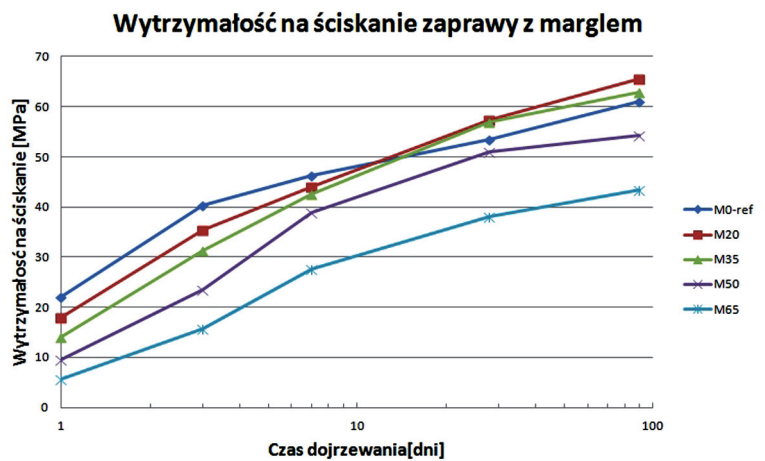
Taka metoda wykorzystania domieszek przynosi zarówno efekt ekonomiczny jak i proekologiczny. Można zgrubnie oszacować, że wprowadzając do mieszanki betonowej 1 kg nowoczesnego superplastyfikatora z grupy polikarboksylianów, uzyskuje się zmniejszenie wody o 20 kg w 1 m<sup>3</sup> betonu. Przykładowo, dla betonu o zawartości cementu, C = 350 kg/m<sup>3</sup> i w/c = 0,60 dodanie 1,8 kg/m<sup>3</sup> tej domieszki spowoduje; przy zachowaniu tego samego w/c :

- oszczędność wody,  $\Delta W = 1,8 \times 20 = 36 \text{ kg/m}^3$
- oszczędność cementu,  $\Delta C = \Delta W / 0,6 = 36 / 0,6 = 60 \text{ kg/m}^3$ .

W rezultacie do wytworzenia 1 m<sup>3</sup> betonu zużyto 174 kg wody zamiast 210 kg, oszczędność 36 kg; oraz 290 kg cementu zamiast 350 kg, oszczędność 60 kg. Zaoszczędzono 17% obu tych składników. Znając potencjalną oszczędność wody, podane obliczenia można przeprowadzić dla różnych domieszek upłynniających. W charakterystykach technicznych upłynniaczy zwykle jest podawana zawartość domieszki, która po dodaniu do mieszanki betonowej o konsystencji 30 mm, oznaczonej metodą opadu stożka, pozwoli na uzyskanie konsystencji odpowiadającej 200 mm. J. Collepari (50) potwierdził doświadczalnie te teoretyczne rozważania (tablica 7).

### 7. Czy nanotechnologia jest przyszłością zrównoważonego betonu?

Wielka idea – to z definicji (52) połączenie istniejących poglądów w nowy sposób. Zrównoważony rozwój, który zakłada zaspokajanie potrzeb współczesnych bez uszczerbku dla przyszłych pokoleń (1), stał się wiodącą ideą cywilizacyjną (15). W konsekwencji inżynierowie muszą być przygotowani nie tylko na odpowiedź „jak?”, ale także na sprostanie wyzwaniu „dlaczego?” (53). Nanotechnologia to obszar badań i rozwoju poświę-



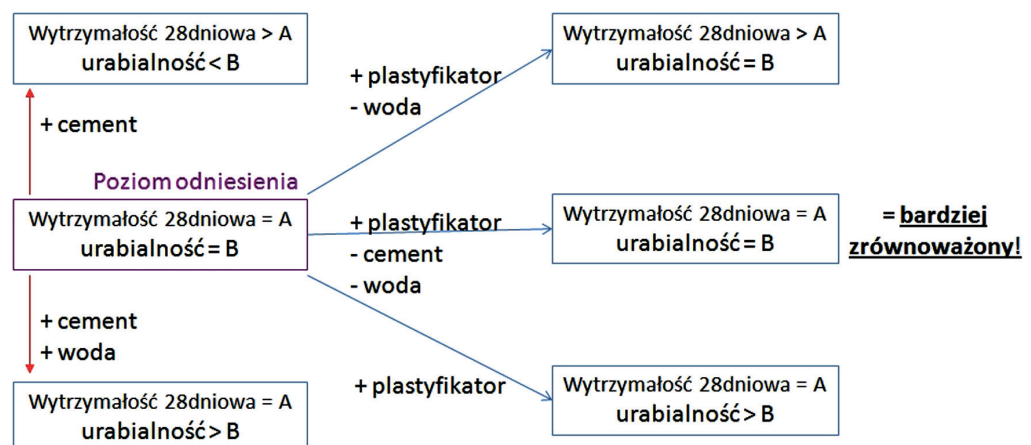
Rys. 13. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy dojrzewającej w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 90%, w której część cementu zastąpiono różnymi ilościami przemysłowo kalcynowanym marglem (dane niepublikowane)

Fig. 13. Compressive strength of mortar cured at 20°C and 90% RH in which cement was replaced with various amounts of industrially calcined marl

to the level of 70% with modified fly ash maintaining the required strength level. One interesting field observation using concrete produced with EMFA was that there seems to be significantly less appearance of cracks when producing slabs on ground and highway paving in comparison with the general experience using traditional concretes.

### 6.4. Calcined marl as effective pozzolan

There has been a search for large volumes of unexploited resources. H. Justnes et al. (49) also found that calcareous clay or marl unsuitable for clay industries (brick and LWA) can become an effective pozzolana when calcined at 750-850°C. Calcined blue clay was tested as stabilizer for SCC by replacing limestone filler. As can be seen (Fig. 9), increasing clay replacement, increased yield stress while the viscosity was relatively stable in comparison. In addition, the compressive strength increased with increasing clay replacement at all ages tested (Fig. 10). The starting point was 30 vol% limestone filler and then 1/3 and 2/3 of this was replaced with calcined clay. Compressive strengths of mortar where ce-



Rys. 14. Schemat różnych metod wykorzystania domieszek zmniejszających zawartość wody zarobowej w betonie (50)

Fig. 14. A sketch of different ways of utilizing water reducing agents (WRA) in concrete technology (50)

cony sterowaniu właściwościami materiału na

poziomie nanostruktury ( $\leq 100\text{nm}$ ). Od początku wieku nanotechnologia stała się, po technologii ciała stałego i biotechnologii, kolejną mega-tendencją o znaczącym oddziaływaniu społecznym (rysunek 15) (54). Te dwa stwierdzenia odnośnie do wiodącej idei cywilizacyjnej i do dominującego kierunku w rozwoju technologii stanowią podstawę pytania sformułowanego w tytule rozdziału. Uogólniona krzywa rozwoju betonu (rysunek 16a) przedstawia zarówno postęp jakościowy, reprezentowany przez kształtowanie się w 155 latach wytrzymałości betonu, jak i rozwój ilościowy mierzony wzrostem produkcji betonu oraz unaocznia, iż siłą napędzającą ten proces jest wzrost demograficzny. Nasuwa się pytanie, czy w przyszłości będzie podobnie? Czy nadal postęp będzie miał charakter eksponencjalny i tak ostro wznoszący się w górę? Czy będzie nadal możliwe opisanie wzrostu ilościowego i jakościowego tą samą funkcją, czy też rzędne wytrzymałości i wielkości produkcji zaczną się rozdzielać? Wzrost demograficzny będzie również w przyszłości wywierał znaczący nacisk na rozwój ilościowy betonu; zapewne wystąpi większe zróżnicowanie geograficzne. Już obecnie w Azji wytwarza się ponad trzykrotnie więcej cementu niż w Europie. Eksperti przewidują, że do 2050 roku populacja wzrośnie do 10 mld i na tym poziomie osiągnie stabilizację (55). W tym czasie (2050) przewiduje się, że produkcja betonu osiągnie maksimum (18 mld ton/rok) i zacznie stopniowo maleć. To zmniejszanie po 2050 roku, będzie zależało też od tego jak intensywnie w ciągu najbliższych 50 lat będziemy wdrażać zasady zrównoważonego rozwoju i w jakim stopniu uda się uzyskać poprawę trwałości (rysunek 17). Analiza krzywej rozwoju betonu (rysunek 16a) pokazuje, że podstawowy mechanizm wzrostu wytrzymałości mechanicznej betonu uległ już wyczerpaniu. Na przestrzeni lat, dzięki wprowadzeniu coraz nowszych generacji domieszek upłynniających małą współczynnik wodno-cementowy. Wartość  $w/c=0,20$  jest już mniejsza od wyznaczonej przez Powersa ilości niezbędnej do hydratacji cementu. Minimalna wielkość ziaren w betonie osiąga poziom nano i jest bliska wartości granicznej (rysunek 18). Powstaje jednak pytanie czy dalsze rekordy wytrzymałości mechanicznej są konieczne i technicznie uzasadnione? Dążeniem wszakże jest beton o dobrze zdefiniowanej użyteczności, właściwościach odpowiednio dobranych do danego zastosowania.

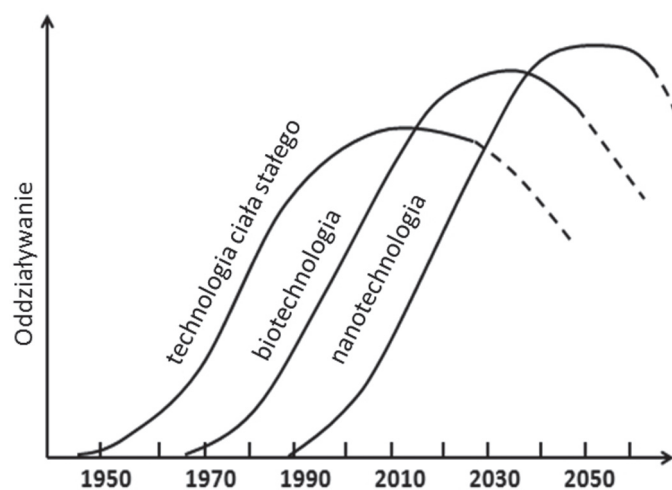
Oczekuje się nowych odmian betonu o innej równowadze: wytrzymałość na rozciąganie – wytrzymałość na ściskanie; wytrzymałych, ale nie kruchych. Należy oczekiwać dalszego poszukiwania synergii: włókno – polimer, a także rozwoju „betonów tekstylnych”- „textile concrete”. Obecnie dalszy rozwój jest możliwy przez nanomodyfikację, między innymi przez nanomonitoring rozmieszczania polimerów w mikrostrukturze betonu (56), a także wprowadzania innych nanomodyfikatorów. Biorąc pod uwagę, że wytrzymałość „nanorurek” fulerenu jest około 5000 razy większa, a moduł sprężystości 20 razy większy od odpowiednich cech

Tablica 7 / Table 7

EFEKT ZASTOSOWANIA WRA (51)

RECIPE EXAMPLE WITH REDUCED BINDER UTILIZING WRA (51)

Składnik/Component, kg/m <sup>3</sup>	Beton referencyjny Reference	WRA-mix
CEM II A-V 42,5 N	350	297 (-15%)
0-4 mm piasek/sand	915	982
4-16 mm żwir/gravel	395	424
16-32 mm żwir/gravel	483	519
Woda/Water	210	178
WRA (PCS)	-	1.8
Property		
w/c	0.60	0.60
kruszywo/cement aggregate/cement	5.1	6.5
konsystencja, opad stożka/slump, mm	230	240
wytrzymałość na ściskanie/strength at 28 d, MPa	36	37



Rys. 15. Mega tendencja w technologii (54)

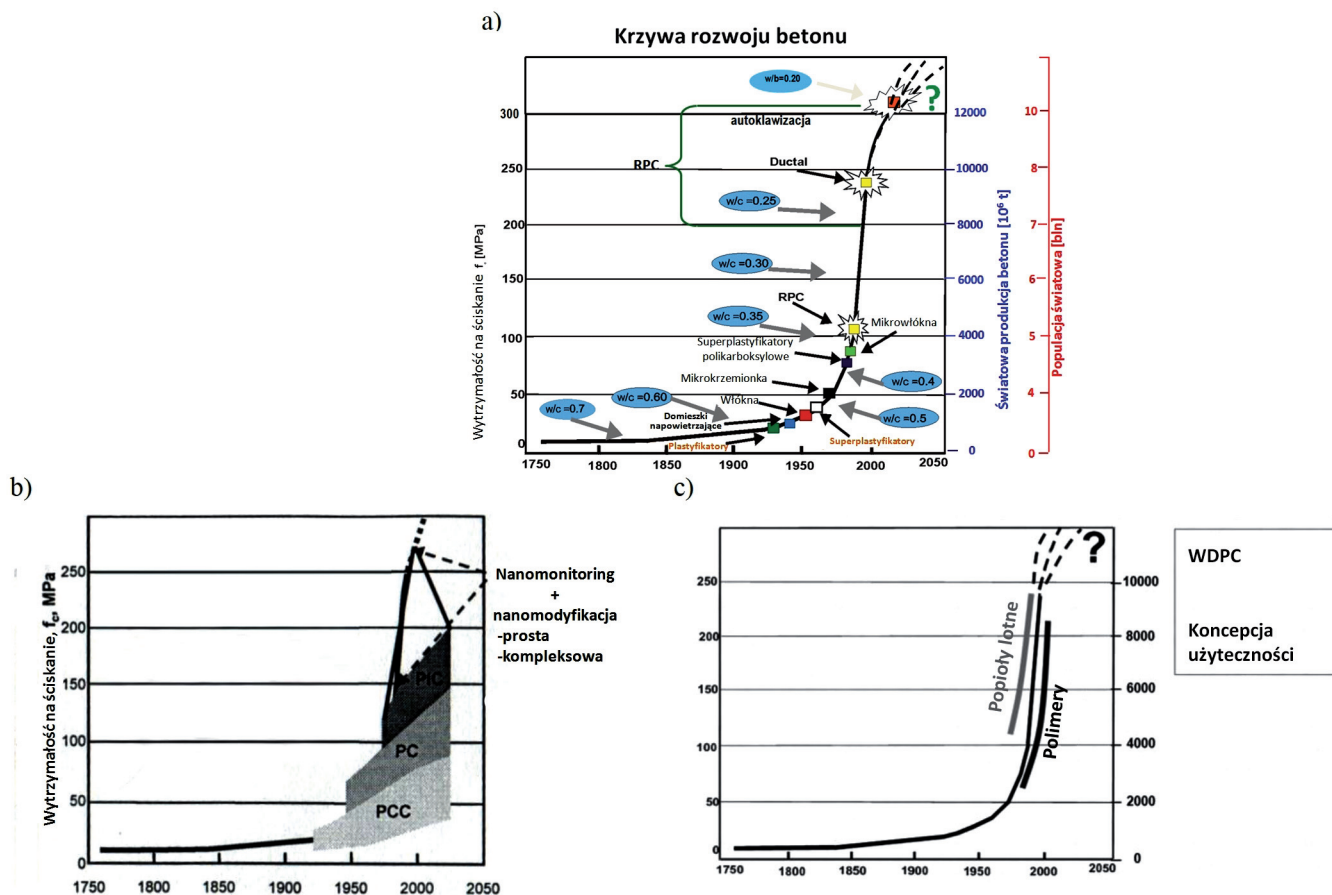
Fig. 15. Waves of technology affecting society (54)

ment was partly replaced with marl calcined in pilot scale rotary kiln as a function of calcination temperature (Figs. 10, 11). Note that a 50% replacement of cement by calcined marl achieved the same strength as the reference at 28 days and sufficient strength (about 10 MPa) for demoulding at 1 day when cured at 20°C and 90% RH. The compressive strengths of mortar with cement partly replaced by marl calcined in full scale (industrial) rotary kiln is plotted as a function of replacement level and age (Fig. 12).

### 6.5. Leaner sustainable concrete by use of plasticizers or superplasticizers

The well-known way of use superplasticizers could also serve as simple adding of sustainability to a construction. The principal different ways of using plasticizers or water reducing admixtures (WRAs) in concrete technology is sketched in Fig. 14. However, the most sustainable way is to save cement and water while maintaining strength and workability relative to reference without WRA.

Most concrete producers use WRA to save cement for economic reasons, but at the same time it gives ecological benefits towards more sustainable construction. As a rule of thumb with modern polycarboxylate based superplasticizers (PCS); 1 kg PCS reduces



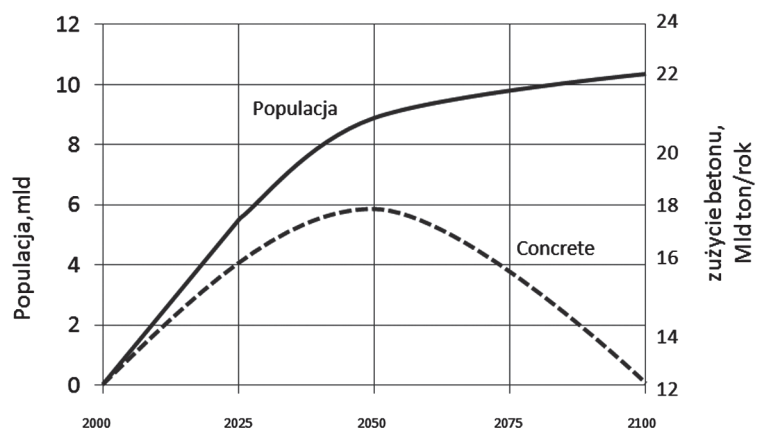
Rys. 16 a) Uogólniona krzywa betonu, b) betony polimerowe zlokalizowane na krzywej betonu, c) krzywa betonu z symbolicznym zaznaczeniem betonów zawierających popioły lotne wspomagane polimerem

Fig. 16. a) The generalized concrete development curve, b) Concrete-Polymer Composites located on the concrete curve, c) Concrete curve with symbolically marked use of fly ash and supported with polymer

stali, można przewidywać jak bardzo efektywna byłaby tego rodzaju modyfikacja. Stosowanie nanomodifikatorów wiąże się ze szczególnymi implikacjami, między innymi koniecznością operowania materiałami o bardzo rozwiniętej powierzchni wewnętrznej, o dużym udziale atomów powierzchniowych. Decyduje to o istotnym zwiększaniu aktywności i reaktywności (57). W polimerowych kompozytach betonowych, polimer jest najdroższym składnikiem – uzasadnia to nanomonitoring, aby właściwa ilość polimeru znalazła się na odpowiednim miejscu (58). Badania skupiają się głównie na otrzymaniu odmian „samoobsługowych”: samooczyszczające, samonaprawialne, o wysokiej przyczepności oraz proekologicznych takich jak reduktory zanieczyszczeń powietrza czy nano-porowate izolacje (59). To jest ciągle stadium poszukiwań, lecz zaawansowanych i obiecujących. Nie ma wątpliwości, że „nano-potencjał” jest zawarty w betonie, jakkolwiek nie jest to jeszcze w pełni dowiedzione. Jako konkluzja nasuwa się stwierdzenie, że równoważność jest koniecznością dla betonu, a nanotechnologia szansą dla przyszłości betonu.

## 8. Zamiast wniosków

Rocznie ukazuje się ponad 3 miliony publikacji, a ponad 5 tysięcy związanych z betonem (1); różnej jakości informacje zawarte są w tym zbiorze. To obrazuje skalę trudności związaną z przygoto-



Rys. 17 Prognoza wzrostu populacji i wytwarzania betonu (55)

Fig. 17. Forecast of future population growth and concrete consumption (55)

20 kg water per  $m^3$  concrete. Using this rule for a concrete recipe with 350 kg cement and 1.8 kg PCS / $m^3$  and keeping  $w/c = 0.60$  constant, means then 290 kg cement (i.e. 60 kg or 17% cement saved). Similar calculations can be done for any WRA knowing how many litre water can be saved per kg WRA (often stated by the admixture producer). The recipe is often economically optimized by having cement and water to a slump of 30 mm and then adding WRA to obtain a 200 mm slump.

waniem artykułu przeglądowego. Autorzy wyrażają nadzieję, że zaprezentowane studium zostanie życzliwie przyjęte przez społeczność inżynierską, okaże się pożyteczne i warte chwili zastanowienia nad dalszym rozwojem zrównoważonego betonu.

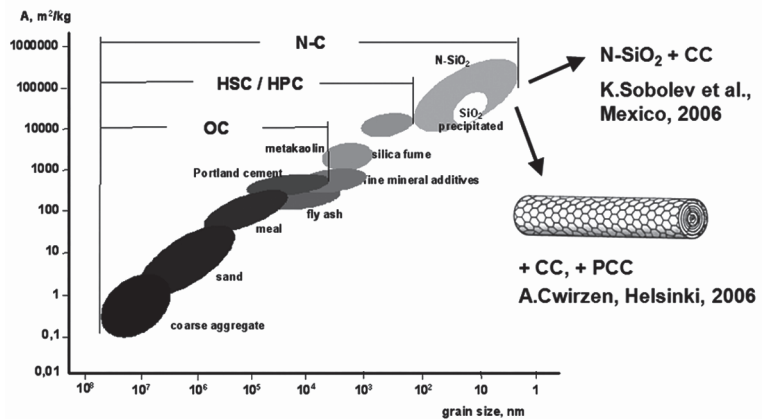
## Podziękowania

Autorzy składają podziękowania dr Piotrowi Woyciechowskiemu za Jego twórczą i wnikliwą pomoc przy przygotowaniu niniejszego artykułu.

## Literatura / References

1. G. H. Brundtland: Report of the World Commission on Environment and Development. General Assembly Resolution 42/187. United Nations, 1987.
2. S. Wierzbicki: Budownictwo a stały rozwój środowiska ludzkiego, s. 19, VII Ogólnopolska Interdyscyplinarna Konf. Nauk.-Tech.: Ekologia a budownictwo, 1985.
3. L. Czarnecki, M. Kaproń: Sustainable construction as Research Area. *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.* 17, 2, (2010).
4. H. Daly: *Beyond Growth: The economics of sustainable development*, Boston, Beacon Press, 1996.
5. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011, Laying down harmonized conditions for marketing of construction products and repealing, Council Directive 89/106/EEC.
6. J. Fangrat: Jak zagadnienia środowiskowe zmieniają wymagania podstawowe dotyczące obiektów budowlanych. *Materiały Budowlane* 4, 12 (2012).
7. A. Ilomäki: European horizontal standards for sustainability of buildings – one system in Europe, [ftp.cen.eu/cen](http://ftp.cen.eu/cen).
8. A.M. Neville: *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków 2000.
9. L. Czarnecki, W. Kurdowski, S. Mindes: Future development in concrete, in "Developments in the formulation and reinforcement of concrete", p. 270, edit. S. Mindes, Woodhead Publishing 2008.
10. J. Porritt: *Concrete Industry Sustainability Performance Report*. The Concrete Center, Surrey, UK 2009.
11. J. Gross: *Developments in the application of the performance concept in building*. NIST, Washington 1985.
12. R. Becker: Research and development needs for better implementation of the performance concept in building. *Automation in Construction*, p. 525, 1999.
13. D. Olędzka, A. Węglarz, K. Żmijewski: Projektowanie polioptymalnych budynków przyjaznych środowisku, *Izolacje*, 9 22 (2007).
14. Panek: *Metody oceny oddziaływania na środowisko obiektów budowlanych*. Biblioteka Monitoring Środowiska, Warszawa 2002.
15. W. Trynity: CEN 350 – Sustainability of Construction Works: a view on sustainability assessment, [www.lensebuildings.com](http://www.lensebuildings.com).
16. P. Lahti: *Towards Sustainable Urban Infrastructure*, ESC, COST, p. 335, 2006.
17. P.C. Aitcin: *The Art and Science of Durable High-Performance Concrete*. Proceedings of the Nelu Spiratos Symposium Committee for Organization of CANMET/ACI Conference, p. 57, 2003.
18. L. Czarnecki et al.: *Beton według normy PN-EN 206-1 - komentarz*. Polski Cement, Kraków 2004.
19. J. Walraven: From High Strength, through High Performance, to Defined Performance Concrete, Proceedings of Conf. High Strength/ High Performance Concrete, Leipzig 2002.

## Simple nanomodification



Rys. 18. Powierzchnia właściwa w zależności o wielkości ziarna [wg (56)]

Fig. 18. Specific surface depending on the grain size [acc. to (56)]

M. Collepardi (51) showed experimentally that the rule of thumb above is valid (Table 7).

## 7. Is nanotechnology the future of sustainable concrete?

The big idea – by definition (52) – is when existing ideas come together in new ways. In fact, sustainable development, which *implies meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs* (1), became a leading civilization idea (15). In consequence, engineers must be prepared to respond not only to the material question of “how” but also to be able to successfully cope with the spiritual challenges of “why” (53). From another point of view, since the beginning of the century the *nanotechnology* has become a dominant wave of technology significantly affecting the society (Fig. 15). Nanotechnology is an emerging field of research and development dedicated to increasing the control over material structures of nanoscale size ( $\leq 100$  nm) in at least one dimension (54). Those two statements on the basic civilization idea and the significant wave of technology make the base for the question included in the chapter title. The concrete development curve, shown in Fig. 16a, presents the progress in both concrete quality (represented by the increase in the compressive strength of concrete over time), and concrete quantity (denoted by the increase in concrete production). Clearly, the driving force behind this process is demographic growth. However, this begs the question – will the situation be similar in future? Will progress continue to be exponential and characterised by an upward trend? Will it still be possible to describe both quantitative and qualitative growth by the same curve, or will the ordinates of strength and production volume begin to separate?

A demographic growth will exert a considerable influence on the quantitative development of concrete. Experts believe that, by the year 2050, the world population will increase to about 10 billion before it enters a stable phase (55). Thereafter the concrete consumption may drop depending on how seriously will be treat a sustainable development by itself and enhancement of the du-

20. E. Coatanea et al.: Analysis of the concept of sustainability: definition of conditions for using exergy as a uniform environmental metric. Proceedings of LCE 2006, pp. 81-86

21. G. Wall: Exergy – a useful concept within resource accounting. Report 77-42. Institute of Theoretical Physics. Chalmers University. Göteborg 1977.

22. J. Dewulf, H. Van Langenhove: Concrete technology concerning durability. Publication of Engineers, no 3, p. 42, 2001 (in Dutch).

23. L. Czarniecki, P. Woyciechowski: Durability of concrete according to the European Standard EN 206. Proceedings of ICDC 2012.

24. K. Mehta, R.W. Burrows: Building durable structures in the 21<sup>st</sup> century. The Indian Concrete Journal, p. 437 (2001).

25. R.N. Swamy: Sustainable concrete for the 21<sup>st</sup> century: Concept of Strength through Durability. University of Sheffield, UK.

26. J. Śliwiński: Zwykły beton – projektowanie i podstawowe właściwości. Polski Cement, Kraków 1999.

27. Z. Rusin: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków 2000.

28. L. Czarniecki, P. Woyciechowski: Concrete Carbonation as Limited Process and its Relevance to Concrete Cover Thickness. ACI Materials Journal 109, No 3, p. 275 (2012).

29. Z. Giergiczyński: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych. Wyd. Politechniki Krakowskiej 2006.

30. K. Mehta: High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development. University of California, USA 2005.

31. W. Jackiewicz-Rek, P. Woyciechowski: Ocena przydatności na karbonatację napowietrzonych betonów z dużą zawartością popiołów. Cement Wapno Beton, 78, 249 (2011).

32. W. Jackiewicz-Rek: Kształtowanie mrozoodporności betonów wysokopopiołowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej (rozprawa doktorska), Warszawa 2010.

33. K. De Weerd, E. Sellevold, K.O. Kjellsen, and H. Justnes: Fly ash – Limestone Ternary Cements – Effect of Component Fineness. Adv. Cem. Res., 23, 4, p. 203 (2011).

34. V. Ronin, and J.-E. Jonasson, Investigation of the effective winter concreting with the usage of energetically modified cement (EMC) - material science aspects. Report 1994:03, Div. Structural Engineering Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

35. V. Ronin, and J.-E. Jonasson: High strength and high performance concrete with use of EMC hardening at cold climate conditions. Proc. Int. Conf. Concrete under Severe Conditions, Sapporo, Japan, August 1995.

36. V. Ronin et al.: Method of producing cement. European Patent EP 0 696 261 B1, p. 13, 1997.

37. V. Ronin, J.-E. Jonasson, and H. Hedlund: Advanced modification technologies of the Portland cement based binders for different high performance applications. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Congr. Chemistry of Cement, p. 8, Ed. by H. Justnes, Gothenburg June 1997.

38. J.-E. Jonasson, V. Ronin, and H. Hedlund: High strength concrete with energetically modified cement and modelling of shrinkage caused by self-desiccation. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, France, August 1996, Presses Pont et Chaussées, p. 245 Paris 1996.

39. K. H. Rao, V. Ronin and K. S. E. Forsberg: High performance energetically modified Portland blast-furnace cements. Proc. 10<sup>th</sup> Intl. Congr. Chemistry of Cement, Ed. by H. Justnes, Gothenburg 1997.

40. P. Groth, and V. Ronin: Influence of Energetically Modified Cement on Interfacial Bond and Fracture Toughness in Cement-Based Fibre Reinforced Composites, 5<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Cement, Sandefjord, Ed. by I. Holand and E. J. Sellevold, Norwegian Concrete Association, p. 1114, Oslo 1999.

41. H. Hedlund, V. Ronin, and J.-E. Jonasson: Ecological Effective High Performance Cement Based Binders”, 5<sup>th</sup> International Symposium on Utili-

ability of structures during the next 50 years (Fig. 17). Analysis of the concrete development curve (Fig. 16a) gives us the evidence that the fundamental mechanism of a mechanical strength increase is already exhausted. The water-cement ratio is on the level of 0.20, which is even lower than that found by Powers for Portland cement hydration. The minimal size of grains is also close to the limit (Fig. 18). However, the question arises if we need more records on mechanical strength of concrete. We should look for concrete with Well Defined Performance, WDPC. Sustainable concrete means a concrete with the known properties but with well selected values; good-quality concrete from inferior raw materials. Furthermore, work will continue on producing concrete with much higher ratios of tensile to compressive strength through the utilization of fibres and/or polymers. There also will be more utilization of textile reinforced concrete; that is concrete reinforced with specially designed meshes of fibres. These materials characterize with high coherent strengths and possess a considerable amount of ductility. They are particularly suited for applications such as protective walls (alas, an important consideration in today's world). Indeed, *survivability*, the ability to survive a terrorist attack or a natural catastrophe, is becoming a more frequent requirement for structural materials. Currently, further development in cement concrete technology is possible through nanomodification, while in polymer-cement concrete technology it is possible through nanomonitoring of polymer arrangement (56). Tensile strength of nanotubes was taken into consideration and it showed that it is about 5000 times stronger than that of steel. Moreover, their elasticity modulus is 20 times higher than that of steel and only a small amount of such nanotubes should be very effective.

There are several implications of using nano-size modifiers (57):

- huge surface area,
- specific surface phase,
- relaxed positions of atoms,
- new surface properties,
- modified properties of the interiors.

In concrete - polymer composites, the polymer is the most expensive component which justifies the concept of the nanomonitoring of polymer arrangement (58). Researchers are focused mainly on the self-cleaning, self-repairing, high-adhesive, active products, such as air pollution reducer and nano-porous insulation products (59). Progress has been done also with nano-coating on concrete. This is still at the stage of expectations, however, with very promising outlook. There is no doubt, even that is not well proved yet, that nano-potential is embedded in concrete.

In conclusion, sustainability is a necessity for concrete and nanotechnology is the chance for the future of concrete.

## 8. Instead conclusions

Over 3 million scientific papers are written every year and more than 5 thousand are involved with concrete (1). Information and

lization of High Strength/High Performance Cement, Sandefjord, Ed. by I. Holand and E. J. Sellevold, Norwegian Concrete Association, p. 1144, Oslo 1999.

42. K. Johansson, C. Larsson, O. N. Antzutkin, W. Forsling, K. H. Rao, and V. Ronin: Kinetics of the hydration reactions in the cement paste with mechanochemically modified cement  $^{29}\text{Si}$  magic-angle-spinning NMR study. *Cem. Concr. Res.* **29** p. 1575 (1999).

43. E. J. Sellevold,: Summary and Evaluation of SINTEF test results on Energetically Modified Cements (EMC), SINTEF, Report Number STF22 F98764, 1998-09-18.

44. H. Justnes, L. Elfgren, and V. Ronin: Mechanism for Performance of Energetically Modified Cement versus Corresponding Blended Cement. *Cem. Concr. Res.*, **35**, p. 315 (2005).

45. H. Justnes, V. Ronin, and J.-E. Jonasson: Performance of Energetically Modified Cement (EMC) and Highly Reactive Pozzolan based on Fly Ash", Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on cement & Concrete (ISCC) and CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Vol. 1, p. 361, Xi'an, China 2006.

46. H. Justnes, P.A. Dahl, V. Ronin, J.E. Jonasson and L. Elfgren: Microstructure and Performance of Energetically Modified Cement (EMC) with High Filler Content. *Cem. Concr. Comp.*, **29**, p. 533 (2007).

47. H. Justnes, V. Ronin, J.-E. Jonasson and L. Elfgren: Mechanochemical Technology: Synthesis of Energetically Modified Cements (EMC) with High Volume Fly ash Content. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, Canada 2007.

48. H. Justnes, V. Ronin, J.-E. Jonasson and L. Elfgren: Mechanochemical Technology: Energetically Modified Cements (EMC) with High Volume Quartz or Fly Ash. Proceedings of International Conference on Sustainability in the Cement and Concrete Industry, p. 163, Lillehammer, Norway 2007.

49. H. Justnes, T. Østnor, K. De Weerd, and H. Vikan: Calcined Marl and clay as mineral addition for more sustainable concrete structures, Proceedings of the 36<sup>th</sup> International Conference on Our World in Concrete & Structures, p. 10, Singapore.

50. M.R. Rixom and N.P. Malivaganam: *Chemical Admixtures for Concrete*, 2<sup>nd</sup> Ed., Spon Press 1999.

51. M. Collepardi: Combined use of chemical admixtures and polymer macro-fibres in crack-free industrial concrete floors without wire-mesh. Proceedings of the Jean Péra Symposium on Special Cements and Sustainability Issues, Ed. Kamal H. Khayat, 9<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, p. 53, Warszawa 2007.

52. [www.biggerbrains.com](http://www.biggerbrains.com)

53. Z. Cywiński: Zrównoważony rozwój a historia i dziedzictwo budownictwa, *Pismo PG*, Vol. 7 (2007).

54. A. Ten Volde: *Nanotechnology: Towards a Molecular Construction Kit*, STT60, Netherlands 1998.

55. K. Mehta: Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. *Concrete International*, 7, p. 23, 2002.

56. L. Czarnecki, H. Schorn: Nanomonitoring of polymer-cement concrete microstructure. *Int. J. of Restoration of Buildings and Monuments*, No 3, p. 141, 2007.

57. K. Sobolev, M. Ferrada-Gutierrez, How nanotechnology can change the concrete world: Part 2. *American Ceramic Society Bulletin*, No 11, p. 16 (2005).

58. F. Van Broekhuizen, P. Van Broekhuizen: *Nano-products in the European Construction Industry – State of the Art 2009 Report* commissioned by EFBWW and FIEC, Amsterdam, 2009.

59. L. Czarnecki, K.J. Kurzydłowski: *Nanomateriały budowlane. Materiały Budowlane*, 5, str. 76 (2012).

misinformation are both present in this overwhelming data. This presents the scale of challenge encountered in the preparation of the review. Authors would like to express the believing, that this study will be accepted by engineer's community as useful and worth a moment of reflection for further sustainable concrete development.

## Acknowledgment

The authors thank Dr Piotr Woyciechowski for his careful and creative assistance with preparing the paper.