

Aron Bentur, Ammon Katz

Technion, Izrael

Sidney Mindess

Uniwersytet w Brytyjskiej Kolumbii, Kanada

Przyszłość betonu

Wizja i wyzwania

Future of concrete

Vision and challenges

Appeared in Concrete Technology. Materials Science of Concrete Special Volume: Proceedings of the Anna Maria Workshops 2002, 2003 and 2004.

Edited by Jan Skalny, Sydney Mindess, and Andrew Boyd
Publish with permission of The American Concrete Society

1. Wstęp

Przewidywanie przyszłości jest trudnym zadaniem, a przyszłość betonu nie jest tutaj wyjątkiem. W rozważaniach na temat przyszłości możemy zastosować szereg podejść. W roku 2002 prognozowanie przyszłości zostało zaprezentowane w wyczerpującym sprawozdaniu „Przewodnik 2030: Technologiczny przewodnik przemysłu betonów Stanów Zjednoczonych” (1), w którym określono szeroki zakres przyszłościowych i rozwojowych technologii w pięciu głównych grupach: projektowanie i systemy konstrukcyjne, składniki betonu, wytwarzanie betonu, jego dostawę i wbudowywanie, naprawy i modernizację. Ten raport wyczerpujący cały zakres zagadnień poszczególnych technologii jest prawdopodobnie dobrze znany specjalistom i praktykom.

Biorąc pod uwagę ten znany dokument i zawarte w nim rozważania zdecydowaliśmy się napisać uzupełniające i nieco odmienne opracowanie, obejmujące w większym stopniu kierunki, które mogą przynieść zmiany, a następnie określić i rozważyć rodzaj różnych zmian, które mogą nastąpić. To podejście obejmuje w większym stopniu kierunki, które według nas mogą nastąpić i spowodować nowe rozwiązania technologiczne, niż poszczególne rozwiązania technologiczne, z których wiele zostało już opisanych w przewodniku 2030 (1).

Ponadto rozważając czynniki napędowe i wynikające stąd zmiany powinno się uwzględnić ramy czasowe. W naszych rozważaniach wprowadzimy rozróżnienie pomiędzy niezbyt odległą przyszłością (najbliższe 5 do 15 lat) i daleką przyszłością (więcej niż 15 lat). Największa część rozważań będzie skoncentrowana na niezbyt odległej przyszłości, dla której założymy, że zmiany będą wzrostowe¹.

1. Introduction

Prediction of the future is a difficult task, and the future of concrete is no exception. In making such predictions there are several routes one might consider. In 2002, a projection of the future was presented in a comprehensive report "Roadmap" 2030: The US Concrete Industry Technology Road Map (1), in which a wide range of future technologies and technological developments were identified, in five main categories: design and structural systems, constituent materials, concrete production, delivery and placement, and repair and rehabilitation. This report is very comprehensive in terms of the individual technologies, and the workshop participants are probably familiar with it.

In view of this available document and analysis, we decided to develop a complementary and somewhat different approach, which addresses more the trends which may drive changes, and thereafter identify, or speculate on the nature of changes that may occur. The approach taken will thus address more the trends which we think may take the place and drive new technological solutions, rather than identifying individual technological developments, many of which are already outlined in Roadmap 2030 (1).

In addition, when considering drivers and the resulting changes, one needs to take into account time frames. For the present discussion we will make the distinction between medium term (next 5 to 15 years) and long term (more than 15 years). Most of the discussion will focus on the medium term where we will assume that the changes are going to be incremental. By incremental we do not necessarily mean minor changes, but rather that construction with concrete will be based on relatively massive elements, with

¹ Pod pojęciem wzrostowe nie mamy na myśli mniejszych zmian lecz raczej, że konstrukcje betonowe będą się opierały na stosunkowo masywnych elementach o wymiarach przekroju w zakresie od 0,1 m do 0,3 m, znanych już dzisiaj.

Dla dalszej przyszłości być może powinniśmy uwzględnić zmiany zasadnicze, pociągające za sobą technologie pozwalające na wytwarzanie konstrukcji z tworzyw cementowych, których przekroje będą o rząd wielkości mniejsze. Takie zasadnicze zmiany pociągną za sobą zmniejszenie rocznego zużycia cementu z około 1 tony per capita do około 100 kg per capita. Tę skokową zmianę musimy brać pod uwagę jeżeli chcemy radykalnie zmniejszyć wpływ na środowisko towarzyszące produkcji tak ogromnych ilości materiałów (zrównoważony rozwój), jak również poprawę efektywności w wyniku wprowadzenia lekkich konstrukcji ze wszystkimi konsekwencjami, a przede wszystkim zmniejszenie pracochłonności i zużycia materiałów. Zmiany te będą wymagały zastosowania materiałów o zupełnie innych właściwościach niż obecnie znane betony. Ten rozwój trzeba rozważyć w znacznie szerszym kontekście, czy beton utrzyma swoją pozycję w dłuższym horyzoncie czasowym jako główny materiał konstrukcyjny lub czy utraci to znaczenie na rzecz nowego tworzywa.

2. Czynniki napędowe zmian

W celu lepszego zdefiniowania oceny przyszłości betonu i zdefiniowania problemów, które mają największe znaczenie dla przewidywanych zmian, korzystne będzie rozważenie roli betonu w łańcuchu wytwarzania i eksploatacji konstrukcji budowlanych oraz czynników napędowych zmian, które mogą wpłynąć na poszczególne ogniwa tego łańcucha.

Kluczowymi elementami tego łańcucha są:

- surowce i technologia betonu (projektowanie mieszanki i produkcja),
- projektowanie konstrukcji i specyfikacja betonu,
- budowanie z betonu,
- beton w trakcie okresu eksploatacji konstrukcji.

Głównymi czynnikami napędowymi wywołującymi zmianę są bez przerwy rosnące wymagania zrównoważonego rozwoju i efektywności. Aczkolwiek oba te terminy brzmią jak oklepane modne zwroty, mogą one jednak pomóc nam w ustaleniu najważniejszych obszarów, w których mogą zajść zmiany. Wstępną informację można uzyskać rozważając wpływ tych czynników napędowych na poszczególne ogniwa podane wyżej.

Surowce – zrównoważony rozwój jest tutaj głównym czynnikiem napędowym w świetle polityki i zarządzeń różnych państw oraz międzynarodowych porozumień i konieczności ochrony środowiska. Ta polityka wpływa decydująco na dostępność surowców do produkcji betonu i ich jakość, w szczególności na masowe składniki, do których należą cement i kruszywa. Wpływ tych czynników będzie oddziaływał także w przyszłości i zostanie omówiony poniżej, w szczególności w rozdziale dotyczącym technologii betonu.

Projektowanie konstrukcji i specyfikacja betonu – efektywność jest tutaj głównym czynnikiem napędowym; integracja projektowania składu betonu i konstrukcji (patrz rozdział 4) może być niezwykle

cross sectional dimensions in the range of 0.1 to 0.3 m, as we know it today.

In the long run we need perhaps to consider a radical step change which will provide the technologies with which we could produce structures with cementitious materials in which the cross section will be an order of magnitude smaller. Such a drastic change will be associated with the reduction in annual cement consumption from about 1 ton per capita to about 100 kg per capita. This "step jump" needs to be considered if we are to drastically reduce the environmental impact associated with the production of such huge quantities of materials (sustainability consideration), as well as improved efficiency, by moving to lightweight construction, with all of the relevant implications for manpower savings on top of resource and materials savings. This will require a material of drastically different properties than the concrete we know today. Such a development needs to be considered in a much wider context, whether concrete will maintain its position in the long run as the world's main construction material, or whether it may lose its place to an emerging new material.

2. Drivers for change

In order to better focus on the future of concrete and identify the issues which are of greatest significance for predicting changes, it might be useful to consider the role of concrete in the chain of production and use of structures and the drivers for change which may affect each of the links.

The key elements in this chain are:

- Raw materials and concrete technology (mix design and production)
- Structural design and concrete specification
- Construction with concrete
- Concrete during the service life of the structure

The main drivers for change are ever increasing requirements for sustainability and efficiency. Although these two sounds as buzzwords and "motherhood" statements, they can guide us in identifying and focusing on the more critical issues where change may occur. Preliminary focusing can be established by considering the impact of these drivers on the links in the chain outlined above.

Raw materials – Sustainability is the prime driver here, in view of national policies and regulations and international agreements on the need to preserve the environment. These policies are clearly affecting the availability of raw materials for concrete production and their quality, in particular the bulk components, cement and aggregates. The impact of these issues will affect the future and will be considered below, in particular in the section on concrete technology.

Structural designed and concrete specifications – Efficiency is the major driver here, integration of concrete materials design with structural design (see Section 4) can potentially be extremely ad-

korzystna.

Budowanie z betonu – efektywność jest także tutaj głównym czynnikiem napędowym, co prowadzi do znacznej poprawy właściwości świeżego betonu, z których ostatnio wprowadzonym jest beton samozagęszczalny. Beton może być wytwarzany i dostarczany za pomocą w pełni zmechanizowanych procesów (beton handlowy, pompowanie, itd.), które mogą zostać także zautomatyzowane. Czynniki napędowe oraz dynamiczny rozwój są wyraźnie wyznaczone i szeroko dyskutowane, szczególnie w świetle rozwoju zaawansowanych domieszek dyspergujących i modyfikujących reologię. Te zagadnienia nie zostaną z tego względu omówione w tym opracowaniu.

Beton w trakcie eksploatacji konstrukcji – zrównoważony rozwój jest tutaj głównym czynnikiem napędowym i wynikający stąd postęp technologiczny jest w znacznej mierze związany z trwałością i naprawami. Te dwa zagadnienia zostaną omówione w rozdziale 3.2.

Oczekiwane zmiany we wszystkich tych obszarach omówionych powyżej mają ścisłe powiązania z technologią. Jednak, aby ten rozwój nastąpił, konieczne jest stworzenie przychylniej atmosfery popierającej, która umożliwi ten postęp technologiczny i pozwoli na jego właściwe wykorzystanie. Być może najważniejszym zagadnieniem w tym obszarze jest lepsze zrozumienie zagadnienia użyteczności i unowocześnienie norm na beton (rozdział 5), oraz integracja składu betonu i konstrukcji (rozdział 4) i rozwój dobrze wykształconych kadr i ich szkolenie (rozdział 6). Wszystko to zostanie omówione poniżej.

3. Zrównoważony rozwój a technologia betonu

Można przewidywać, że w dłuższym okresie rozwinie się zintegrowane podejście do zrównoważonego rozwoju, opierające się na ilościowym oddziaływaniu całego procesu budowlanego na środowisko, uwzględniające różnorodne czynniki. Jedno takie podejście opiera się na obliczeniu charakterystycznych wskaźników przy wykorzystaniu metody oceny wpływu na środowisko (to jest obciążenia), jak to pokazano schematycznie na rysunku 1. Zastosowanie takiego podejścia zostało ostatnio przedstawione na przykładzie ilościowego wpływu na środowisko różnych czynników w okresie realizacji zbrojonych nawierzchni drogowych i porównania różnych technologii zbrojenia za pomocą stali i włókien (rysunek 2) (2). W tej ocenie wykorzystano metodę znaną jako „Eko-wskaźnik 99”. W tych obliczeniach wpływ na środowisko jest określony ilościowo w formie „punktów”, które przedstawiają znormalizowany wskaźnik z określoną wagą, wyrażający skumulowany wpływ w trzech obszarach: zdrowie ludzkie, eko-systemy i wyczerpywanie zasobów. To samo podejście może być rozszerzone na pełny okres życia konstrukcji, jak to pokazano w Tablicy 1. W przypadku zastosowania takiego podejścia można oczekiwać, że stanie się ono bodźcem dla rozwiązań innowacyjnych i wprowadzania nowych technologii (patrz dalsza dyskusja w rozdziale 7).

vantageous. The integration should address and take into consideration all the performance characteristics required from concrete, starting from early age up to long term durability performance.

Construction with concrete – Efficiency is the main driver here as well, and it leads to marked improvement in the properties of fresh concrete, with the most recent one being SCC. Concrete can be produced and delivered by fully mechanized processes (ready mix, pumping, etc.) which can be extended to be automated. The drivers and the dynamic developments are quite obvious and extensively reported, especially with regards to the development of advanced dispersants and rheology modifiers. These aspects will therefore not be addressed here.

Concrete during the service life of the structure – Sustainability is the main driver here, and the resulting technological developments are to a large extent in the area of durability and repair. These two aspects will be treated in Section 3.2. The expected changes in each of the areas identified above have clear-cut technological implications. However for such developments to take place, there will be a need to develop a "belt" of support, and an environment which will enable these technological advancements and innovations to occur and to be properly implemented. Perhaps the most important issues of this kind are the advancement of the performance concept and standards for concrete (Section 5), integration of materials and structural design (Section 4) and the development of skilled personnel and their training (Section 6). These will be highlighted below.

3. Sustainability and concrete technology

In the long run, one may predict that an integrated approach to sustainability will develop, based on the quantification of the environmental impact of the whole building process, by a variety of means. One such approach is based on calculation of characteristic indicators using a methodology to evaluate the environmental impact (i.e. load), as shown schematically in Figure 1. The application of such an approach was recently demonstrated, to quantify the environmental impact of various components in the construction stage of reinforced pavements, and to compare between different reinforcing technologies, steel and FRP (Figure 2) (2). In this evaluation a procedure known as Eco-indicator 99 was used. In this calculation, the environmental impact is quantified in terms of "points" which present a normalized and weighted indicator expressing the cumulative damage in three categories: human health, eco-systems and depletion of resources. The same approach can be extended to include the whole life cycle as is shown in Table 1. When such an approach will be implemented one may expect that it will provide incentive for innovation of new technologies (see additional discussion in Section 7).

The approach shown in Figure 1 and its quantification by Eco-indicator 99 represents the impact of sustainability from the societal point of view, and is often referred to as life cycle assessment (LCA). A more limited approach which represents the impact of

Podejście przedstawione na rysunku 1 i jego ujęcie ilościowe za pomocą „Eko-wskaźnika 99” pokazuje wpływ zrównoważonego rozwoju ze społecznego punktu widzenia, co jest często określane jako oszacowanie okresu życia. Nieco węższe podejście, które uwzględnia wpływ zrównoważonego rozwoju na decyzje inwestora, jest wyznaczony ilościowo w formie kosztów okresu życia, który jest narzędziem do porównania

Tablica 1 / Table 1

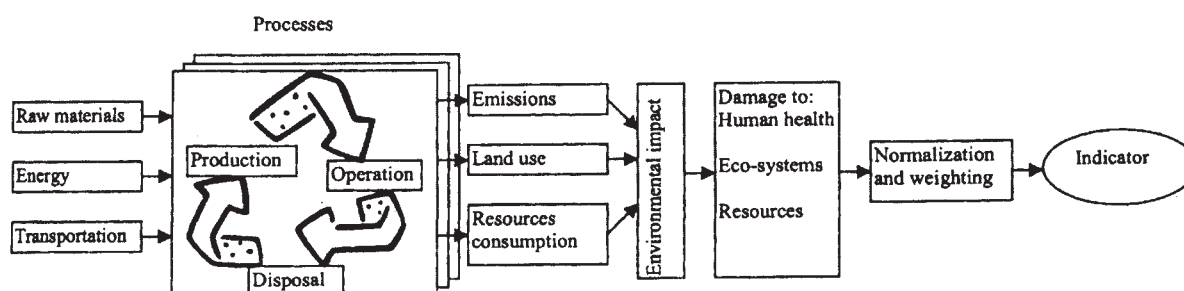
PORÓWNANIE WPŁYWU NA ŚRODOWISKO (EKO-WSKAŹNIK 99 PUNKTÓW) NAWIERZCHNI DROGOWYCH ZE ZBROJENIEM STALOWYM I POLIMERY ZBROJONE WŁÓKNAMI (KATZ (2))

COMPARISON OF ENVIRONMENTAL LOAD (ECO-INDICATOR 99 POINTS) OF STEEL AND FRP REINFORCED PAVEMENTS (AFTER KATZ (2))

Rodzaj zbrojenia Reinforcement type	Wpływ na środowisko, Eko-wskaźnik 99 punktów Environmental load, Eco-indicator 99 points			
	Realizacja Construction	Utrzymanie* Maintenance*	Wtórne wykorzystanie Disposal	Efekt sumaryczny Total
Stal/Steel	179000	N x 13200	6020	291000
Polimery zbrojone włóknami/FRP	117000	N/A	7680	124000

* Tylko część kosztów, dotyczy korozji zbrojenia; n = ilość napraw (n = 8)

*Only the part that refers to steel corrosion, n = number of maintenance activities (n = 8)



Rys. 1. Schemat przebiegu wpływu procesów wytwarzania betonu i budowy konstrukcji na środowisko

Fig. 1. Flow of environmental assessment of processes (after Katz [2])

różnych rozwiązań projektowych. To podejście określa ilościowo zalety ekonomiczne dla inwestora w długim okresie, jednak nie musi być zbieżne z ogólnymi korzystnymi wpływami na środowisko, określonymi metodą „oszacowania okresu życia”.

Można oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości taka pełna metoda „oszacowania okresu życia” nie będzie odgrywała dużej roli jako czynnik napędowy. Ponadto zajdą zmiany w wadze „punktów” w związku z podejmowanymi decyzjami politycznymi, jak na przykład ograniczenie emisji CO₂ (3). Omówimy niektóre z tych zmian, pod kątem ich wpływu na konstrukcje w dwóch różnych horyzontach czasowych: okres budowy i okres eksploatacji.

3.1. Okres budowy

W okresie budowy główny zakres rozważań będzie obejmował wpływ na środowisko i ekologię masowej produkcji surowców do betonu, głównie cementu i kruszyw. Problemy z tym związane takie jak tereny zajęte przez kamieniołomy, ekologiczne ograniczenia eksploatacji naturalnego piasku, zużycie energii na wypalanie, emisja CO₂ itd. są dobrze znane i udokumentowane (2-4), więc nie ma potrzeby ich opisywania.

Ograniczenia tego rodzaju przekształciły się obecnie w czynniki napędowe zmian poprzez wprowadzenie ustawowych ograniczeń, w ramach których musimy prowadzić produkcję surowców. Alternatywne rozwiązanie, możliwe do stosowania, opiera się na poli-

sustainability on the owner of the structure is quantified in terms of life cycle cost (LCC), which is used as a tool for comparing between different design options. This approach quantifies the long term economic advantages to the owner, but is not necessarily consistent with the overall environmental benefits to society by LCA methodologies.

It might be expected that in the near future such a comprehensive LCA driver will not have a marked impact. Yet, incremental changes will still take place in view of a range of "point" policies which are implemented such as limitations on CO₂ emissions (3). We will discuss some of these developments in terms of two different time scales of influences on the life of the structure: the construction stage and the service stage.

3.1. Construction stage

In the construction stage the main consideration would be largely the environmental and ecological impact of the production of massive quantities of raw materials for concrete, mainly cement and aggregates. The issues and problems involved, such as the use of land for quarrying, the ecological limitations on quarrying natural sand, energy consumption in burning, CO₂ emission, etc, are well known and documented (2-4) and there is no need to describe them here.

Constraints of this kind are being turned into actual drivers for

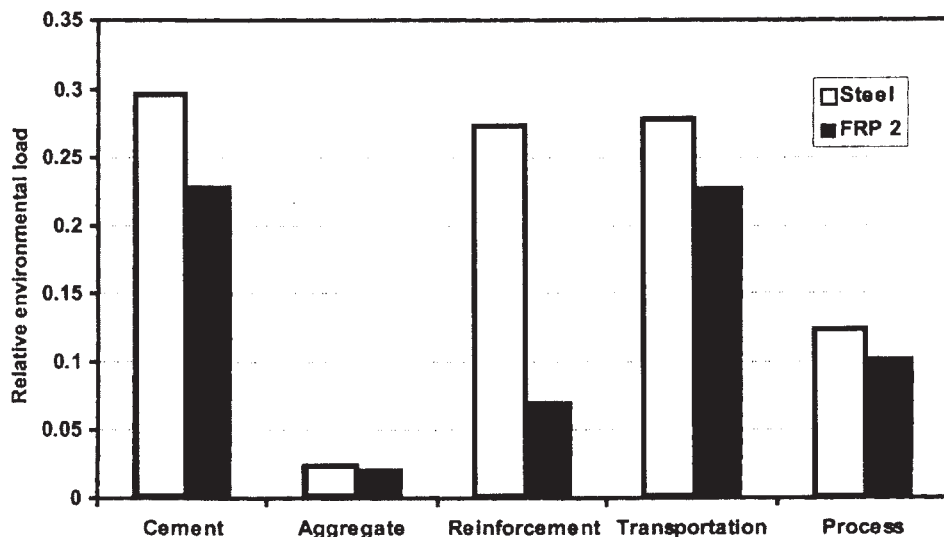
tyce wprowadzającej mniej ograniczeń ustawowych, która jednak wprowadza metodę oceny szkód dla środowiska wywołanych każdym procesem, pociągającą za sobą jego ograniczenie, jeżeli przekracza on wyznaczone wymagania, lub dającą punkty kredytowe, które mogą być przekształcone w zyski finansowe, jeżeli jest on przyjazny dla środowiska. To ostatnie podejście wprowadza bodźce optymalizujące, oparte na rozważaniach finansowych. Staje się ono powszechniejsze i będzie na pewno posiadało wpływ na przemysł betonów i związane z nim technologie.

Konsekwencje tych ograniczeń i polityki prowadzą najczęściej do poszukiwania rozwiązań związanych z nowocześniejszymi technologiami pozyskiwania surowców o podobnych właściwościach do obecnie stosowanych, lecz o zmniejszonym wpływie na środowisko. W przypadku cementu portlandzkiego już zastosowano szereg rozwiązań wariantowych (na przykład paliwa alternatywne, oszczędność energii w procesach produkcyjnych - wymienniki ciepła itd.). Dodatkowe kierunki rozwoju będą wymagały zmiany składu klinkieru i cementu, a przykładami są cementy belitowe, siarczanowo-glinianowe i o dużym udziale pucolan, żużli, popiołów lotnych.

Rozwój tych cementów o zmienionym składzie, a o tych samych właściwościach co obecnie stosowane, związany jest z wieloma trudnościami i będzie wymagał dużego wysiłku dla jego osiągnięcia oraz zmian w wielkoprzemysłowych procesach produkcyjnych. Warianty omówione tutaj, które jak przypuszczamy mają duże możliwości rozwoju w przyszłości, większe niż „walka” o utrzymanie właściwości surowców na poziomie obecnie stosowanych, my pozostawimy ich właściwości na boku, a zamiast tego postawimy na osiągnięcie wymaganych właściwości przez ich odniesienie do samego betonu. Musimy pamiętać, że nasz „produkt” jest betonem i najważniejsze są jego właściwości. Pośrednie jego składniki (cement, kruszywa, domieszki) są ogniwami w procesie produkcyjnym lecz nie są jego celem. Pożądane właściwości betonu mogą być łatwiej osiągnięte technicznie i z dobrym wynikiem ekonomicznym poprzez poprawę w jego projektowaniu, co zrównoważy gorszą jakość stosowanych surowców, w celu spełnienia wymagań i ograniczeń w stosunku do środowiska i ekologii.

Aby takie podejście można było realizować należy wprowadzić szereg zmian:

1. Specyfikacje i normy powinny zezwalać na produkcję betonu opierając się na właściwościach tego betonu, a nie na przepisach dotyczących betonu i ścisłych normach dotyczących surowców. Takie normy jakiego są potrzebne obecnie powinny mieć złączone wymagania w celu stworzenia możliwości stoso-



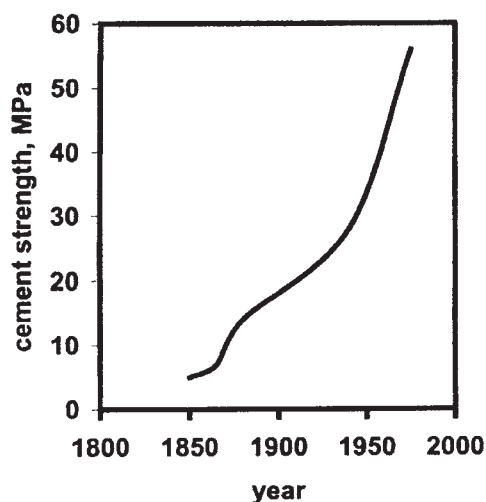
Rys. 2. Porównanie wpływu na środowisko nawierzchni z betonu zbrojonego stalą i polimerowej zbrojonej włóknami przy wykorzystaniu eko – wskaźnika 99

Fig. 2. Comparison of environmental load of pavement construction with steel and FRP reinforcement, using Eco-indicator 99 method, normalized to load of steel reinforced pavement (adopted from Katz [2])

change through legislation which sets limits within which we are forced to guide the production of raw materials. An alternative approach which is developing is based on setting policies having fewer legislative limitations but which instead take the course of evaluating the environmental damage of each

process, resulting in fines if it does not meet specified requirements, or providing credit points which can be turned into financial gains if it is environmentally friendly. The latter approach provides incentives for optimization based on direct financial considerations. It is becoming more common and will certainly have an impact on the concrete industry and resulting technologies.

The consequences of these limitations and policies lead most often to a search for solutions in which attempts are made to develop technologies for the production of raw materials of similar performance to the current ones, but with reduced environmental impact. In the case of Portland cement many of the potential options have already been largely utilized (e.g. alternative fuels, en-



Rys. 3. Rozwój właściwości cementu portlandzkiego określonej na podstawie wytrzymałości

Fig. 3. Development over time of performance of Portland cement as characterized by strength of 1 : 3 mortar cubes (adopted from Blezard, in ref. 5)

wania szerszego zakresu surowców i dopuszczenia niższych wymagań od obecnie osiąganych, jednak przy utrzymaniu dobrych właściwości użytkowych betonu.

2. Znajdzie konieczność rozwinięcia istniejących technologii, które mogłyby zapewnić osiąganie lepszych właściwości betonu (np. domieszki i wypełniacze).
3. Znajdzie konieczność wprowadzenia lepszych metod kontroli produkcji betonu i wykorzystania technologów o dużym doświadczeniu w projektowaniu mieszanki oraz kontroli jakości i zapewnienia jej osiągnięcia.

Wszystkie powyżej omówione zagadnienia pociągną za sobą podniesienie poziomu produkcji betonu, tak że stanie się ona znacznym ważniejszym członem w łańcuchu technologicznym procesu budowlanego. Będzie to miało wpływ na urządzenia produkcyjne oraz na fachowość zaangażowanych pracowników, to jest technologów w wytwórniach betonów.

Zmiany przedstawione powyżej nie wprowadzają całkowicie nowych koncepcji, jednak w celu spełnienia oczekiwań będą one musiały być rozwinięte i podniesione na wyższy poziom niż uważano dotychczas, jak to przedstawiono poniżej:

Sprecyzowanie właściwości użytkowych betonu: celowość wprowadzenia tej zmiany była poruszana od pewnego czasu. Pierwszym krokiem w tym kierunku było wprowadzenie w nowej formie europejskiej EN 206 wymagań w stosunku do stosowanych dodatków, które powinny zapewniać równoważną trwałość betonu. Ta koncepcja powinna objąć cały zakres właściwości. To rozwiązanie powinno stworzyć ramy dla przewodnika technicznego, jednak powinniśmy zachować ostrożność jeżeli chodzi o regulacje prawne. Know-how w zakresie stosowania gorszych materiałów lub betonów o niezwykle małej zawartości cementu w celu wytworzenia betonu o dobrej jakości, jest możliwe i są wskazówki, że takie metody, obchodzące obowiązujące przepisy, były stosowane. Przykładami są produkowane piaski o dużej zawartości pyłu i betony o niezwykle małej zawartości cementu, wszystkie spełniające wymagania w zakresie wytrzymałości. Specyfikacja właściwości użytkowych jest potrzebna w celu torowania drogi dla takiego podejścia, otwierającego drogę do innowacji w technologii betonu, a równocześnie stwarzającego ramy zapewniające zachowanie całego zakresu właściwości użytkowych betonu, a nie tylko jednej – wytrzymałości. Dodatkowy komentarz do tego problemu będzie przedstawiony w rozdziale 5.

Technologiczne możliwości pozwalające na produkcję betonu dobrej jakości z gorszych surowców i o mniejszej zawartości cementu:

Luka jaka powstanie pomiędzy obniżającymi się właściwościami surowców i potrzebą utrzymania dobrych właściwości betonu, a nawet ich poprawy, będzie wypełniona przez nowocześniejsze stosowanie domieszek. Stosowanie tych domieszek w połączeniu z nowoczesnymi metodami projektowania zrównoważy stosowanie gorszej jakości cementów i kruszyw oraz ułatwi szersze za-

oszczędności w procesie produkcji – preheaters, etc.). Additional developments will require modification in the clinker and cement composition, such as Belite cements, sulfoaluminate cements and high volume pozzolan, slag & fly ash binders are examples of this approach.

Development of such modified cements with the same performance as the current ones, is fraught with difficulty, and will require intensive development effort as well as modifications in large scale production processes. The alternative outlined here, which we believe is more likely to develop in the future, is that rather than "fighting" to maintain the level of performance of the current raw material, we will let their performance "slip", and instead achieve the performance required by adjustments to the concrete itself. We should keep in mind that our "product" is concrete, and it is its performance that we should be after. The intermediate ingredients (cement, aggregates, admixtures) are "links" in the production process but not its target. Technically and economically it may be easier to achieve the necessary performance by improving the design of the concrete itself, to compensate for lower performance raw materials, in order to meet environmental and ecological requirements and constraints.

If such an approach is to take place several changes will have to be made:

1. Specifications and standards will have to allow production of concrete based on performance specifications of the concrete itself rather than on a prescription for the concrete and strict standards for the raw materials. Such standards as are presently necessary could be relaxed, to allow a wider range of raw materials, by setting minimum values below the current ones, but maintaining the performance of the concrete they make.
2. There will be a need for expanding the current technologies that are available to provide better control of the concrete performance (e.g. admixture and filler technologies).
3. There will be a need for better quality control of the concrete production and for the involvement of highly trained technologists for the mix design and QC/QA.

All of the above imply upgrading imply the level of concrete production so that it becomes a much more important link in the technological chain within the construction process. This would have an impact on the production facilities as well as on the skill required from the personnel involved, i.e. the concrete plant technologists.

The changes highlighted above are not entirely new in the concept that they represent, but in order to meet the expectations addressed they will need to be expanded and upgraded to a higher level than has been considered so far, as outlined below:

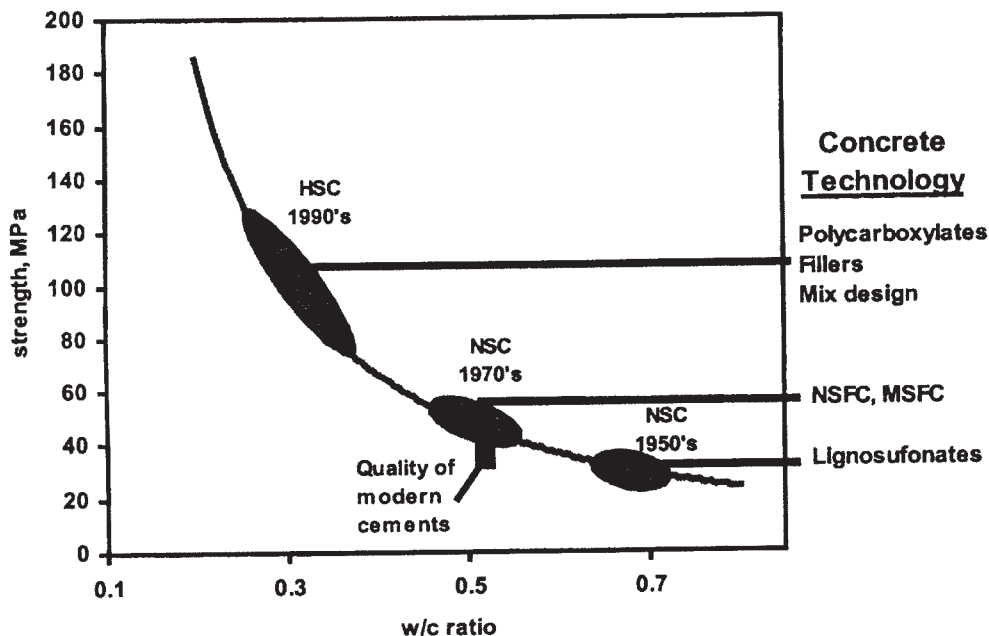
Performance specifications of concrete: the notion of implementing this concept has been around for some time. A first step in this direction has taken place in the new European Standard EN 206 with respect to the use of additions to provide equivalent durability

stosowanie dodatków mineralnych, jako zamienników cementu.

Te przewidywane zmiany nie są nowe jak można to wywnioskować z historycznej analizy rozwoju właściwości betonu z upływem czasu (4, 5). Wróćmy do połowy wieku XIX, kiedy beton z cementu portlandzkiego, jaki znamy w nowoczesnym ujęciu, stawiał pierwsze kroki. W tych czasach i w okresie prawie 100 lat, aż do połowy lat pięćdziesiątych, główny postęp we właściwościach betonu (to jest jego wytrzymałości) został osiągnięty w wyniku poprawy właściwości cementu portlandzkiego, jak to widać na przykładzie wytrzymałości (rysunek 3). To doprowadziło do sytuacji, w której beton klasy 30 do 40 MPa można było wytwarzać; jest to dzisiaj praktycznie typowy beton dla wielu zastosowań. Od lat pięćdziesiątych aż do dnia dzisiejszego nastąpił znaczny rozwój właściwości betonu, prowadzący do „wieku betonu” o dużej wytrzymałości; zostało to jednak osiągnięte nie poprzez zmianę jakości cementu, lecz poprzez zmianę składu betonu w wyniku stosowania domieszek i wypełniaczy (rysunek 4). Kluczowym czynnikiem w tym postępie był rozwój nowych generacji domieszek chemicznych połączony z lepszymi możliwościami technicznymi dokładnego utrzymywania składu betonu w wytwórni. Koncepcja, którą wysuwamy tutaj jest zgodna z tym postępowaniem, to jest odejściem od opierania się na właściwościach surowców, a rozwijanie technologii betonu na domieszkach i nowoczesnym projektowaniu mieszanki w wytwórniach betonu. Jednak kierunek, który przedstawiamy obejmuje tę samą „rodzinę” rozwiązań technicznych, w przypadku surowców o właściwościach zmieniających się w szerszym zakresie, w celu zachowania tych samych właściwości betonu, jak to schematycznie pokazano na rysunku 5.

Poziom wytwórni betonu i ich pracowników:

Zwiększenie stosowania kontroli jakości i jej zapewnienia w wytwórniach betonu jest ciągle trwającym procesem jak na to wska-



Rys. 4. Rozwój wytrzymałości betonu z biegiem lat w połączeniu z nowymi generacjami plastyfikatorów
Fig. 4. Development in concrete strength over time in conjunction with newer generations of dispersing admixture (adopted from ref. 6)

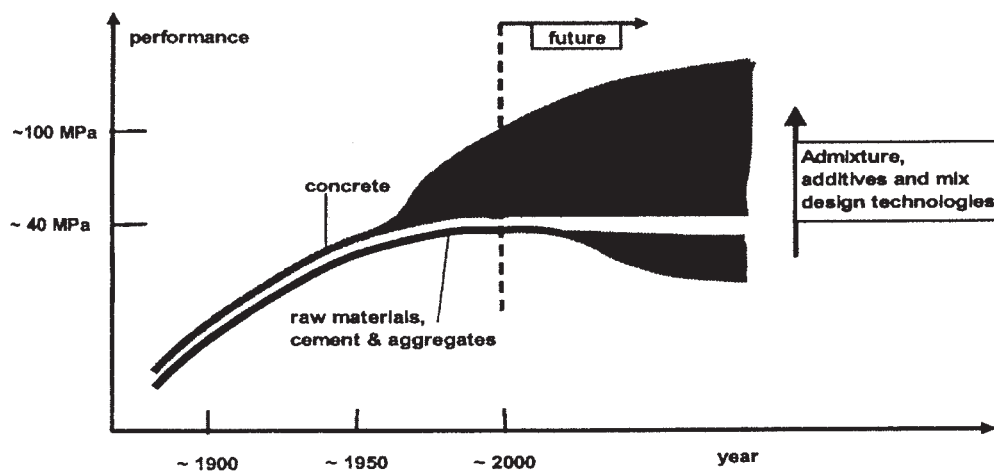
performance. This concept will need to be expanded to a whole range of properties. This development is required to provide a framework for technical guidance, but we should be aware of the significance of the "legal" implications. The know-how of using long performance raw materials or concretes of extremely low cement contents, to produce quality concrete is available, and there are indications that it is being used, by passing current regulations. Examples are manufactured sands of high fines content and concretes with extremely low cement contents, all complying with strength requirements. The performance specifications are required to pave the way for such approaches, providing room for innovation in concrete technology, and at the same time providing a framework to ensure that full range of performances is being met, and not just a single one such as strength. Additional discussion of this issue is provided in Section 5.

Technological means to enable the production of quality concrete with lower performance raw materials/low cement contents:

The gap that will open up between the declining properties of the raw materials and the demand to maintain the concrete performance and even improve it will be bridged by a much more advanced use of chemical admixtures. The use of these admixtures in combination with advanced mix design procedures will compensate for lower performance cements and lower performance aggregates and will facilitate greater use of mineral additives as substitutes for cement.

This predicted change is not entirely new, as might be concluded from some historical analysis of the development of concrete performance over time (4, 5). Let us go back to the mid- 19th century, when Portland cement concrete as we know it in the modern sense took its first strides. At that time, and over a period of almost 100 years, up to the mid-1950's, the major advance in concrete performance

(that is its strength) was achieved by enhancing the performance of the Portland cement as estimated by its strength (Figure 3). This brought us to the stage where 30 to 40 MPa concrete could readily be made; this is now more or less the "standard" concrete for many applications. Beyond the 1950's, till the present time, marked strides were made in many applications. Beyond the 1950's, till the present time, marked strides were made in improving concrete properties, bringing us to the age of high strength concrete; this however was largely achieved not by cement modifications, but by formulation of the concretes using dispersants and fillers (Figure 4). A key element in this progress was the development of new generations of chemical dispersants



Rys. 5. Schematyczny obraz poprawy jakości betonu i cementu do chwili obecnej i wizja przyszłościowa

Fig. 5. Schematic description of the development of the qualities of concretes and cements until recent times, and prediction to the future.

zują rosnące żądania ich certyfikacji, co już obowiązuje w niektórych krajach, zwłaszcza w Europie. Ta zachodząca zmiana ma wpływ na poziom stosowanych maszyn i angażowanie specjalistów, niezbędnych do technicznego kierowania wytwórnią. Kierunek przedstawiony tutaj jest zgodny z tą zmianą, jednak będzie wymagał szybszego postępu, szczególnie jeżeli chodzi o wysoki poziom technologów betonu pracujących w fabryce, którzy powinni być zdolni do stosowania większej liczby surowców, o większej zmienności, i do opanowania nowoczesnych metod projektowania oraz technologii wprowadzania domieszek w celu zapewnienia osiągania wymaganych właściwości betonu. Te zmiany będą miały także wpływ na organizację wytwórni, która powinna być dostosowana do zmiennego strumienia surowców, przy utrzymaniu na tym samym poziomie właściwości betonu i rozszerzenia nowoczesnych metod kontroli tych właściwości i jego składników. Badania reologiczne i kontrola jakości nabiorą szczególnego znaczenia (7).

Wizja zarysowana wcześniej sugeruje zasadnicze zmiany technologii produkcji betonu, tak w zakresie „hardware” maszyn, jak i „software” (fachowy personel i know-how) i oczywiście związane z tym koszty i zyski. Dodatkowy koszt związany ze skomplikowanym układem technologicznym wytwórni i jej bardziej fachowej załogi, a także z koniecznością stosowania zaawansowanych domieszek chemicznych może być zrównoważony co najmniej częściowo, możliwością stosowania większego zakresu surowców o gorszych właściwościach od obecnie używanych. Następnym równoważącym czynnikiem mogą być finansowe rekompensaty w przypadku stosowania materiałów bardziej przyjaznych dla środowiska. Te możliwości przewidywanego postępu w procesie produkcji betonu i wymaganych fachowców mogą być połączone ze zintegrowanym podejściem do projektowania konstrukcji i materiału, który pociągnie za sobą oszczędności, związane z wydaj-

combined with enhanced technical capabilities to properly formulate concrete in the plant. The concept that we are suggesting here is consistent with this development, that is of a shift from relying on the properties of the raw materials to a leveraging of the concrete technology by admixtures and advanced mix design in the concrete plant. The trend we are discussing, however, implies using a similar "family" of techniques to compensate for a wider range of raw materials properties in order to maintain the same concrete performance, as shown schematically in Figure 5.

Quality of the concrete production plants and their personnel:

The elevation of the QC/QA in concrete plants is an ongoing process, as indicated by the increasing requirements to certify concrete plants, that has been established as mandatory in some countries, especially in Europe. This ongoing change has its impact on the level of equipment and the professionals needed for technical management and operation of the plant. The trend predicted here is consistent with this change, but will force it to move several steps ahead, especially in terms of the need for high level concrete technologists within a plant to be able to accommodate more variable and a wider range materials and to master advanced design tools and admixture technology to assure the ability to meet the required performance of the concrete. This change may also have an impact on the organization of the plant, to be able to cope with a variable stream of raw materials and maintain concrete performance, and to do more advance testing of the properties of the concrete and its ingredients. Rheological evaluation and quality control may become essential (7).

The vision outlined above suggests a drastic change in the nature of concrete production in terms of the "hardware" (equipment) and "software" (skilled personnel and know-how), and obviously, the issue of cost and economy arises. The additional cost in the sophistication of the plant and its personnel, as well as the need to apply advanced chemicals, may be offset, at least partially, by the ability to use a wider range of raw materials with lower performance than the current ones. An additional balancing component may be the financial incentives which will favour the use of more environmentally friendly materials. These capabilities of the envisioned concrete production operation and personnel could be combined with an integrated approach for design of the structure and the material to bring about the cost savings which will result from efficient overall design (see Section 4).

nym projektowaniem (patrz rozdział 4).

3.2. Zrównoważony rozwój a beton w okresie eksploatacji

Zrównoważony rozwój w okresie eksploatacji jest zwykle oceniany ilościowo przy uwzględnieniu różnorodnych efektów związanych z trwałością konstrukcji. Na wierzchołku tej analizy „całkowitego cyklu życia” znajdują się różnorodne rozwiązania związane z konserwacją, takie jak ogrzewanie i wentylacja. W obrębie niniejszej dyskusji dotyczącej betonu my uwzględnimy tylko trwałość i naprawy.

3.2.1. Trwałość

Wiele badań dotyczyło trwałości betonu i żelbetu, a ich celem było wyjaśnienie mechanizmów destrukcji oraz opracowanie modeli ilościowych, które pozwalają na przewidzenie „cyklu życia” w różnych warunkach środowiskowych. Takie ilościowe podejście będzie bez wątpienia miało wpływ na projektowanie betonu w przyszłości. Trzeba jednak zaznaczyć, że te modele traktują beton z materialnego punktu widzenia, oceniając ilościowo wpływ penetracji w różnych warunkach (np. dyfuzji i podciągania kapilarnego) i analizując chemiczne reakcje, które zachodzą w przypadku penetracji różnych substancji (patrz odnośnik 8) i konsekwencje dla betonu i stali zbrojeniowej.

Tego rodzaju modele mają na celu identyfikację procesów na poziomie materiałów. Nie są one przeznaczone do rozważania zniszczeń, które mogą zajść w większej skali, obejmującej całą konstrukcję. Znany przykładem jest pęknięcie, które zależy od rodzaju betonu i ogólnego zarysu konstrukcji (to jest jego hamowanie w przypadku wywołanych skurczem naprężeń). Zwykle oznacza to, że ten rodzaj zagadnień, obejmujących właściwości użytkowe w długim horyzoncie czasowym powinien być rozpatrywany w trakcie projektowania konstrukcji przez projektanta. Powoduje to powstanie luki pomiędzy technologia materiałowcem i projektantem konstrukcji; rozwój i postęp na tym polu nie zawsze są skoordynowane i zharmonizowane wzajemnie.

W tych ramach możemy określić pęknięcie jako krytyczny problem, który w pewnym sensie jest interdyscyplinarny i będzie wymagał w przyszłości bardziej wszechstronnego i całościowego potraktowania. Wnikanie cieczy i gazów do betonu jest rozpatrywane tylko w aspekcie przepuszczalności i dyfuzyjności betonu. Jednakże, pęknięcie, nawet w akceptowalnym zakresie 0,1 do 0,3 mm będzie prowadziło do zwiększonego wnikania o rząd wielkości, jak to pokazano na rysunku 6, który stanowi kompilację na podstawie literatury. Problem pęknięcia jest znowu w czołowie głównie ze względu na lukę pomiędzy dyscyplinami materiałowymi i konstrukcyjnymi: w celu zmniejszenia przepuszczalności i dyfuzyjności i zwiększenia właściwości użytkowych po dłuższym okresie i tak zwanych wysoko wartościowych betonów (niski współczynnik w/s) opracowano technologię betonów, które wykazują imponującą nieprzepuszczalność, jednak z drugiej strony wykazują większą skłonność do pęknięcia ze względu na ich zwiększoną kruchość, skurcz autogeniczny (rysunek 7) i ciepło hydratacji. W pewnym sensie zastąpiliśmy jeden problem innym i obecnym proble-

3.2. Sustainability and concrete in the service stage

Sustainability in the service stage is usually quantified in terms of a variety of effects related to the durability of the structure. On top of this, comprehensive life cycle analysis takes into account a variety of maintenance related issues such as heating and ventilation. Within the context of the present discussion on concrete we will address only durability and repair.

3.2.1. Durability

The durability of concrete and reinforced concrete has been studied extensively, to resolve the mechanisms involved and to develop quantitative modelling to predict the life cycle under different environmental conditions. Such quantification will no doubt have an impact on our design of concrete in the future. It should be noted however, that these models usually address the concrete from the materials point of view, quantifying effects of penetration under different driving conditions (e.g. diffusion and capillary absorption) and analyzing the chemical interactions which occur due to the penetration of various species (e.g. ref. 8), and the consequences to the concrete and the reinforcing steel.

Models of this kind are inherently targeted to identify processes on the materials scale. They are not intended to consider distress that may occur on the larger scale of the structure. A noted example is cracking which depends on the nature of the concrete and the overall scheme of the structure (e.g. restraint in the case of shrinkage induced stresses). It is usually implied that this type of long term performance issues should be dealt with in the design of the structure, by the structural engineer. As a result, there is a gap between the materials technologist and the structural designer; developments and advancements in these fields are not always coordinated and harmonized with each other.

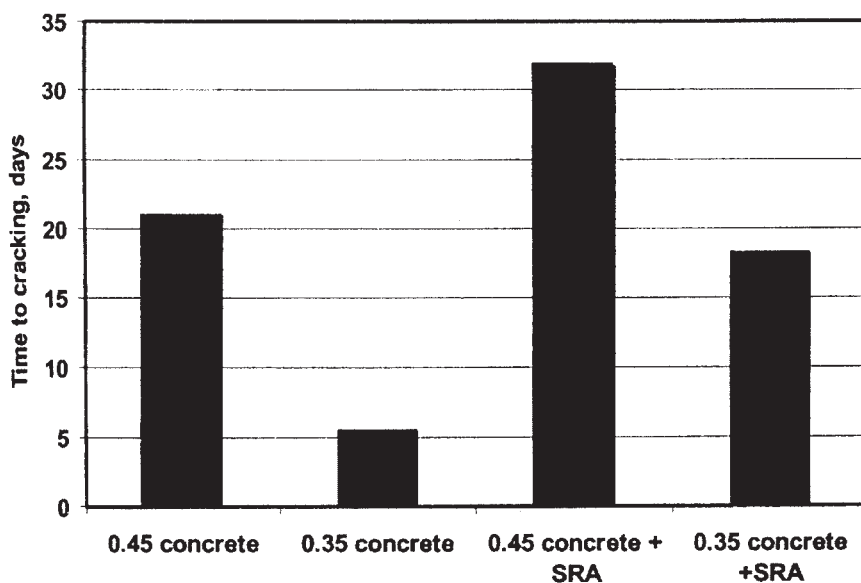
Within this framework, we may identify cracking as a critical issue, which somehow falls in between the disciplines, and will require in the future a more comprehensive and integrated treatment. The penetration of fluids and gases into concrete is considered only in terms of the permeability and diffusivity of the concrete. However, cracking, even in the acceptable range of 0.1 to 0.3 mm, will lead to increases in penetration by orders of magnitude, as seen in Figure 6, which shows data compiled from the literature. The cracking issue is back in the "headlines" due to a large extent to the gap between the materials and structures disciplines: in the drive to reduce permeability and diffusivity to enhance long term performance, the so-called high performance (low w/b ratio) concretes were developed which are very impressive in their impermeability, but on the other hand are more prone to cracking because of their increased brittleness, autogenous shrinkage (Figure 7) and thermal effects. To some extent we have replaced one problem with another, and the approach now is to take these concretes for granted (as the prime material for durable structures), and open a "new front" to combat cracking.

Cracking is one example of distress resulting from a combination of materials properties and the overall response of a structure (load-

mem jest przyjąć te betony traktując je jako oczywisty postęp (jako podstawowy materiał do trwałych konstrukcji) i podjąć nową „walkę” w celu pokonania pękania.

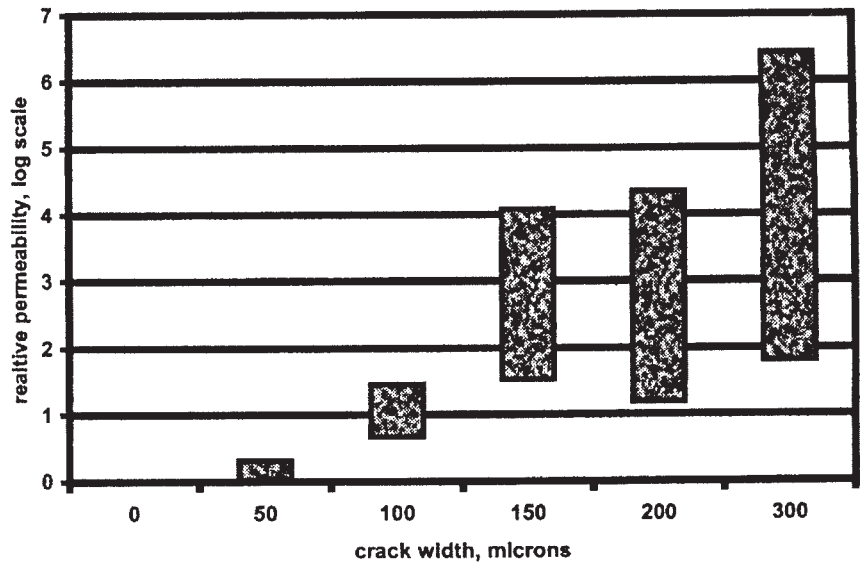
Pęknięcie jest przykładem niszczenia wywołanym kombinacją właściwości materiału i ogólnej reakcji konstrukcji (obciążenie, podparcie, ograniczenia). Logiczną i skuteczną drogą rozwiązywania trudności tego rodzaju jest integracja projektowania mieszanki i konstrukcji, w celu optymalizacji właściwości użytkowych betonu do specjalnych zastosowań, nie tylko z punktu widzenia wytrzymałości.

Podejście, które powinno być rozwijane w przyszłości, będzie wymagało znacznie bardziej zrównoważonego rozwiązania problemu penetracji poprzez równoczesne uwzględnianie przepuszczalności i pęknięcia. Zrównoważone podejście tego rodzaju może spowodować ponowne zdefiniowanie bardzo dobrych właściwości użytkowych, które nie powinny jedynie opierać się na wytrzymałości i przepuszczalności materiału. Można pomyśleć o alternatywie betonu o w/s w zakresie 0,40, które niewątpliwie mają mniejszą skłonność do pęknięcia, z dodatkowym zmniejszeniem właściwości transportowych tych betonów osiągniętymi innymi metodami jak to pokazano przykładowo na rysunku 8, prezentującym absorpcję kapilarną, a na rysunku 7 ograniczenia pęknięcia (ograniczony skurcz). W celu ułatwienia takiego podejścia, specyfikacja opierająca się na właściwościach użytkowych będzie musiała nabrać znacznie większego znaczenia (patrz punkt 5).



Rys. 7. Wpływ stosunku w/c i domieszek zmniejszających skurcz na czas pojawienia się pęknięć w metodzie usztywnionego pierścienia

Fig. 7. Effect of w/c ratio and shrinkage reducing admixtures on the time to cracking in a restrained shrinkage ring test (adopted from Attiogbe et al [9])



Rys. 6. Zakres zależności pomiędzy rozwartością rys i przepuszczalnością wyprowadzony na podstawie danych literaturowych

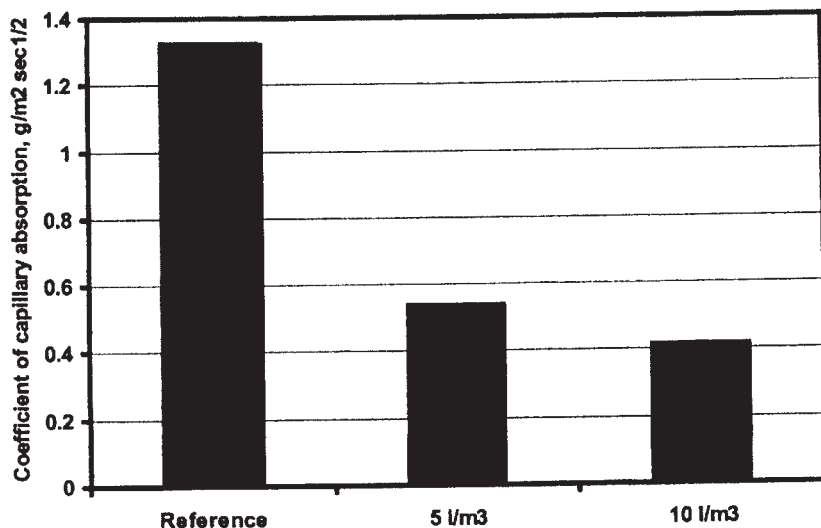
Fig. 6. Range of relations between crack width and permeability compiled from data in the literature (adopted from Ref. 6)

ing, support, restraint). The logical and efficient way to deal with problems of this kind is by integration of the concrete mix design with the structural design to optimize the performance of the concrete for the specific application, not only with respect to strength.

The approach that needs to be developed in the future will require a much more balanced treatment of penetration into concrete, by considering at the same time permeability and cracking. A balanced approach of this kind may result in re-definition of high performance so that it not based solely on the strength and permeability of the material. One could think of alternatives of having

concretes in the 0.40 w/b ratio range, which inherently crack less, with additional reduction in transport characteristics of these concretes achieved by other means, as demonstrated for example in Figure 8 for capillary absorption and in Figure 7 for crack control (reduced shrinkage). To facilitate such an approach, performance based specifications will have to assume a much more prominent role (see Section 5).

The integration of the materials with the structural design, which is essential not only for durability but also for economic reasons will be highlighted in Section 4. For this approach to be successful, there are needs on the structural side of the equation as well as on the materials side. The latter consistent with the requirements we have identified in Section 3.1, namely to be better able to tailor the concretes for a variety of properties. The professional level of the concrete technologist as well as the availability of means for such flexible tailoring (technologies and mix



Rys. 8. Wpływ zawartości domieszki impregnującej na absorpcję pary przez beton o $w/c = 0,4$

Fig. 8. Effect of damp proofing admixture content on the reduction in the absorption of o. 40 w/c ratio concretes (adopted from data of Berke and Li, in ref. 6)

Połączenie projektowania materiałów i konstrukcji, co ma podstawowe znaczenie nie tylko dla trwałości lecz również ze względów ekonomicznych, zostanie omówione w punkcie 4. Aby takie podejście zakończyło się powodzeniem, trzeba wprowadzić zmiany tak po stronie konstrukcji jak i po stronie materiałów.

To ostatnie jest zgodne z wymaganiami, które wymieniliśmy w punkcie 3.1., aby w większym stopniu przystosowywały właściwości betonu do różnorodnych zastosowań. Poziom zawodowy technologów betonu, jak również dostępność środków dla takiego zróżnicowanego kształtowania właściwości betonu (ekspertyzy obejmujące technologię i projektowanie mieszanki), staną się elementami kluczowymi. I tutaj także w świetle ograniczeń w dostępności i różnorodności masowych surowców do produkcji betonu (cement i kruszywa) kluczowymi składnikami będą domieszki i dodatki, które umożliwią takie elastyczne kształtowanie jego właściwości. Technologie stosowania domieszek i dodatków, które mogą wpływać na zwiększenie odporności na pęknięcie (zwiększenie plastyczności), skurcz, uszczelnienie i inne, staną się ważnymi czynnikami.

3.2.2. Konserwacja i naprawy

Jak w przypadku innych rodzajów konstrukcji, także konstrukcje betonowe wymagają prawidłowego programu konserwacji i napraw (jak pewnego razu młody student powiedział mi "beton nie jest na zawsze"). My często zapominamy, jakie to ma duże znaczenie. Według Li i Stanga (10) w krajach takich jak Japonia i Korea roczne wydatki na konserwację infrastruktury wkrótce przekroczą te na nowe konstrukcje, a Ameryka Północna nie jest od tego zbyt odległa. Na przykład szacuje się, że roczne koszty bezpośrednie konserwacji i zastępowania nowymi zniszczonych mostów z żelbetu w Stanach Zjednoczonych przekraczają 8 miliardów dolarów. Aczkolwiek beton jest zasadniczo trwałym materiałem, może jednak ulegać zniszczeniu z wielu powodów:

design expertise) will become key elements. Here too, in view of the limitations on the availability and diversity of the bulk raw materials for concrete making (cement and aggregates), a key component will be admixtures and additives which will enable such flexible tailoring. Admixture and additive technologies that can control strain softening (toughening), shrinkage, sealing and more, will become important elements.

3.2.2. Maintenance and repair

As with any other type of structure, concrete structures too require a regular program of maintenance and repair (as a young student once said to me "concrete is not forever"). We often forget how important this is. According to Li and Stang (10), in countries such as Japan and Korea the annual outlay for infrastructure maintenance will soon surpass that of new construction, and North America is not far behind. For instance, it is estimated that the annual direct cost of maintenance and replacement of deteriorated rein-

forced concrete bridges in the United States is in excess of \$8 billion. While concrete is basically, a durable material, it may begin eventually to deteriorate for a number of reasons:

- Poor construction practices, and in particular inadequate curing,
- Poor design of the structure (e.g., no provision for drainage, inadequate cover over the steel),
- Use of substandard materials without referring to their impact on properties other than strength,
- More aggressive environmental exposures than expected initially.

This would suggest that any designs for new concrete structures should have built into them requirements for a regular inspection and maintenance protocol, with well-defined criteria for when repairs should be undertaken.

The economic magnitude of this problem is such that we can begin to look at more innovative (and yes, more expensive) approaches to maintenance and repair. On the materials side, it may be desirable to use materials such as polymer modified fiber reinforced concretes (11), despite their relatively high cost, as they have excellent bonding properties, high strength, and sufficient ductility to withstand the inevitable stresses that arise when two unlike materials are bonded together (differential shrinkage and creep, differential elastic response to thermal or mechanical stresses). It might also be sensible to look at non-portland cement based materials for many repairs, such as fiber reinforced plastics (FRP) which may be sprayed on, or used as wraps.

There is also room to consider new generation of cement composites, and this will be further discussed in Section 7.

Within the context of maintenance we should consider the devel-

- zła realizacja konstrukcji, a w szczególności zła pielęgnacja,
- zły projekt konstrukcji (to jest nie zastosowanie odwodnienia, nieodpowiednia grubość otuliny),
- zastosowanie nienormowych materiałów i ograniczenie uwzględnienia ich wpływu na właściwości tylko do wytrzymałości,
- większy korozyjny wpływ środowiska niż przewidywany początkowo.

Wynika stąd wniosek, że każdy projekt nowej konstrukcji betonowej powinien zawierać wymagania dotyczące sporządzenia protokołów z inspekcji i konserwacji, zawierające ściśle określone kryteria kiedy powinny być przeprowadzone naprawy.

Ekonomiczne znaczenie tego problemu jest takie, że powinniśmy przypisać większą rolę konserwacjom i naprawom (i to oczywiście droższym). Z punktu widzenia materiałów może być pożądane stosowanie zbrojonych włóknami betonów z dodatkiem polimerów (11), pomimo ich wysokiej ceny, gdyż mają one doskonałe właściwości wiążące, dużą wytrzymałość i dostateczną plastyczność w celu pokonania nieuniknionych naprężeń, które powstają gdy dwa materiały o różnych właściwościach tworzą wiązanie (różny skurcz i pęcznienie, różna reakcja sprężysta na termiczne lub mechaniczne naprężenia). Może także być sensowne popatrzenie na inne poza portlandzkimi cementami materiały do wielu napraw, na przykład do natryskiwania lub stosowane jako otulina.

Jest także pole do omówienia nowej generacji kompozytów cementowych, co zostanie przeprowadzone w punkcie 7.

W kontekście konserwacji rozważymy rozwój „inteligentnych” betonów i „inteligentnych” konstrukcji. Na przykład pokazały się ostatnio sprawozdania (na przykład, odnośnik 12) o rozwoju opartych na krzemie układów mikroelektromechanicznych, które można zabetonować w konstrukcji w celu przekazywania danych o stanie konstrukcji w miarę upływu czasu. Są już konstrukcje wyposażone w konwencjonalne czujniki naprężeń, które rejestrują w sposób ciągły informacje dotyczące naprężeń. Jest to kierunek, który powinien stać się powszechniejszy w przyszłości.

4. Integracja projektowania składu betonu z projektowaniem konstrukcji

Imponujący i znaczny postęp w wydajności w jakimkolwiek produkcie technologicznym może być osiągnięty poprzez integrację dyscyplin, które są związane z technologią. Konstrukcje betonowe nie są tutaj wyjątkiem i jest miejsce na rozważenie tkwiących w takim podejściu potencjalnych możliwości. Obiecującą możliwością w tym zakresie jest integracja projektowania materiałowego i konstrukcyjnego w celu optymalizacji obu równocześnie. Wydaje się, że nastąpił rozwój w każdej z tych dyscyplin co wykazuje, że jest to realne i może przynieść znaczne korzyści przemysłowi. Z punktu widzenia stosowanych materiałów betoniarnia jest zdolna do produkowania betonu o bardzo różnym składzie i właściwościach, nawet w stosunkowo małych ilościach, co stwarza

opment of "smart" concrete and "smart" structures. For instance, there have been recent reports (e.g. Ref. 12) of the development of a silicon based microelectromechanical system that could be embedded in a concrete structure to transmit data about the structure's condition over time. There are already structures which are instrumented with more conventional strain gauges and which relay information on a continuous basis regarding strains. This is a trend which should become much more common in the future.

4. Integrating the concrete materials design with the structural design

Impressive and marked leaps in efficiency in any technological product can be achieved by integration of disciplines which are relevant to the technology. Concrete structures should be no exception, and there is room to consider the potential possibilities here. A promising option within this framework is the integration of the materials and structures design, to optimize the two at the same time. It seems that there are several developments in each of these disciplines which suggest that this is feasible and could yield impressive benefits to the industry.

From the materials points of view the concrete plant can potentially produce concretes of very different composition and properties, even in relatively small quantities, thus providing a degree of freedom for materials design which exceeds anything we are aware of in other construction materials, such as steel. The ability of having a "boutique" type operation, while keeping the advantages of scale, is based, and will be further enhanced, by improving our ability to use a wider range of raw materials for generating concretes of drastically different qualities. This is achieved by advances in admixture and additive technologies, combined with more sophisticated mix design tools, and by the mode of operation of modern concrete plants which is highly mechanized in terms of dispensing capabilities and computer controlled batching. The trends identified in Section 3 will strengthen these capabilities of the concrete production and design, not only by further advances in technology but also by the elevation of the professionalism of the personnel involved. The advancement of technological means combined with skilled technologists, able to provide mixes of various properties on demand, as well as a plant that can readily produce and batch by mechanized/automated means almost any concrete composition, will provide the flexibility and degree of freedom to the structural engineer to specify a range of properties for the concrete to enable optimization of the structure. This will, of course, require re-education of the structural engineers, so that they understand what they can actually demand of the concrete.

Traditionally, the structural design of concrete was based on inputs for mature concrete, mainly strength, modulus of elasticity, shrinkage and creep. To a large extent the requirements for durability and for early age characteristics (such as prevention of cracking and strength development) were superimposed at a later stage. Common examples, frequently cited, are the eventual specification of higher strength concrete to comply with durability re-

dodatkowy stopień swobody przy projektowaniu jego składu przekraczający wszystko z czym mamy do czynienia w przypadku innych materiałów konstrukcyjnych, takich jak stal. Możliwość posiadania procesu w rodzaju „boutique”², przy równoczesnym utrzymaniu zalet dużej skali, opiera się i będzie dalej rozwijana poprzez poprawę naszych możliwości stosowania szerszej palety surowców do wytwarzania betonów o bardzo różnej jakości. Zostanie to osiągnięte w wyniku postępu w technologiach stosowania domieszek i dodatków w powiązaniu z bardziej wyrafinowanymi narzędziami projektowania mieszanki i poprzez metodę pracy nowoczesnych betoniarni, które są w znacznym stopniu zmechanizowane w zakresie układów dozujących i skomputeryzowanego sporządzania zestawu. Kierunki wymienione w punkcie 3 wzmocnią te możliwości produkcji i projektowania betonu nie tylko przez dalszy postęp w technologii lecz także przez doskonalenie fachowości zatrudnionego personelu. Postęp w technologii połączony z pracą fachowych technologów zdolnych w razie potrzeby do wytwarzania mieszanek o różnych właściwościach, a także fabryka, która może wyprodukować za pomocą zmechanizowanych i zautomatyzowanych procesów zestaw betonu o niemal dowolnym składzie, dadzą większą elastyczność i swobodę konstruktorom w określaniu zakresu właściwości betonu, co pozwoli na optymalizację samych konstrukcji. Będzie to oczywiście wymagało reedukacji konstruktorów aby zrozumieli, czego mogą obecnie wymagać od betonu.

Tradycyjnie projektowanie konstrukcji z betonu opierało się na danych wyjściowych dotyczących dojrzałego betonu, a mianowicie wytrzymałości, modułu sprężystości, skurczu i pęcznienia. W znacznym zakresie wymagania dotyczące trwałości i wczesnych właściwości (takich jak zapobieganie pękaniu i przyrost wytrzymałości) były interpolowane dla późniejszego okresu. Powszechne przykłady, często cytowane, dotyczą stosowania betonu o większej wytrzymałości, w celu spełnienia wymagań dotyczących trwałości, podczas gdy projektowanie konstrukcji opierało się na betonie o normalnej wytrzymałości (a więc nie wykorzystywało wyższej wytrzymałości betonu, który ewentualnie może być zastosowany w konstrukcji) lub potrzeby zastosowania specjalnych technik (pielęgnacji, rur chłodzących itd.) w okresie wykonywania konstrukcji w celu zapobiegania powstawaniu spękań, (których prawdopodobnie można by uniknąć gdyby wziąć pod uwagę przy projektowaniu właściwości materiałów, które będą stosowane). Obecnie można usunąć ten rodzaj luk wykorzystując nasze lepsze zrozumienie rozwoju właściwości betonu z upływem czasu i możliwość ich modelowania przy wykorzystaniu inżynierii materiałowej (zmianę właściwości w funkcji czasu i warunków otoczenia, biorąc pod uwagę postęp hydratacji i rozwój mikrostruktury). Ta koncepcja w połączeniu z rozważaniami o wymianie ciepła i wilgoci dała wynik w postaci spektakularnego postępu w modelowaniu zachowania się betonu i rozwoju jego fizycznych właściwości w funkcji warunków środowiska.

Te ujęte liczbowo charakterystyki można wprowadzać do modeli projektowania konstrukcji (symulacja oparta na skończonych ele-

quirements, whereas the structural design is based on normal strength concrete (i.e. not taking advantage of the higher strength concrete that will be eventually used for construction), or the need to apply special techniques (curing, cooling pipes, etc.) in the construction stage to prevent cracking (i.e. could perhaps be avoided if considered in the design in conjunction with the materials to be used). This kind of gap can now be bridged, based on our much better understanding of the development of concrete properties over time and the ability to model them using materials science concepts (development of properties as a function of time and environmental conditions, taking into consideration the nature of hydration reactions and microstructure development). These concepts, combined with considerations of heat and moisture transfer, have resulted in impressive strides in modelling the behaviour of concrete and the development of its mechanical and physical characteristics as a function of environmental conditions.

These quantified characteristics may be incorporated into structural design models (finite element based simulations) which are comprehensive in the sense that they consider the overall structure and reinforcement, as well as the development of concrete properties from time zero, and can now be used for calculation of the behaviour of the structure over its whole life span, from construction to maturity. Such comprehensive modelling will be able to take as an input the properties of the concrete to assure the proper performance of the structure at early ages as well as at later ages, and thus come up with an optimized solution which includes materials and structural consideration over the entire life span. We see now some comprehensive design tools of this kind developed and implemented.

When fully implemented, such tools will potentially provide an incentive for the production of concretes with a large variety of properties, which will need to be tailored specifically for each project. This will in turn provide incentive for advances in concrete technology: (i) develop even better means for control of properties and (ii) skilled and professional concrete technologists in the industry to be able to comply with changing requirements for properties and to be involved in the design stage.

Examples demonstrating the nature of such development are given below, using one such emerging tool of finite simulations (Heat and MLS modulates by FEMASSE):

(a) Cracking in concrete floor/slab on grade (Figure 9) -

- The stress and strength curves for concretes of different strength grade are calculated, showing intersection of the curves (i.e. cracking) in the higher strength levels, but not in lower one.
- Conclusion: specification for higher strength in this case leads to cracking; solution - reinforcement, or alternatively specify the higher strength and require shrinkage control as an independent variable; this can be achieved by concrete mix design, shrinkage reducing admixture or other means

² autorom chodzi o produkcję małych ilości betonu o specyficznych właściwościach

mentach), które są kompletne w tym znaczeniu, że rozpatrują one całość konstrukcji i zbrojenia, jak również rozwój właściwości betonu od czasu zero i mogą obecnie być stosowane do obliczeń zachowania struktury w całym „cyklu życia”, od zbudowania do dojrzałego wieku. Takie modelowanie ujmujące całość zagadnienia może uwzględniać, jako dane wyjściowe, właściwości betonu w celu zapewnienia dobrych właściwości użytkowych konstrukcji w okresach początkowych, jak i w okresach późniejszych i w związku z tym stanowić optymalne rozwiązanie, które zawiera dane dotyczące materiałów i konstrukcji w okresie całego „cyklu życia”. Spotykamy obecnie tego rodzaju narzędzia do projektowania, ujmujące całość problemu, które zostały opracowane i zastosowane.

Przy pełnym wykorzystaniu takie narzędzia będą stanowiły potencjalną zachętę do wytwarzania betonów o szerokiej gamie właściwości, które będą dostosowane do każdego projektu. To z kolei będzie stanowiło zachętę do postępu w technologii betonu: (i) wprowadzenie jeszcze lepszych metod pozwalających na uzyskiwanie pożądanych właściwości i (ii) zatrudnianiu wykwalifikowanych profesjonalnych technologów betonu w przemyśle, którzy będą zdolni do sprostania zmieniającym się wymaganiom dotyczącym właściwości i będą mogli uczestniczyć w etapie prac projektowych.

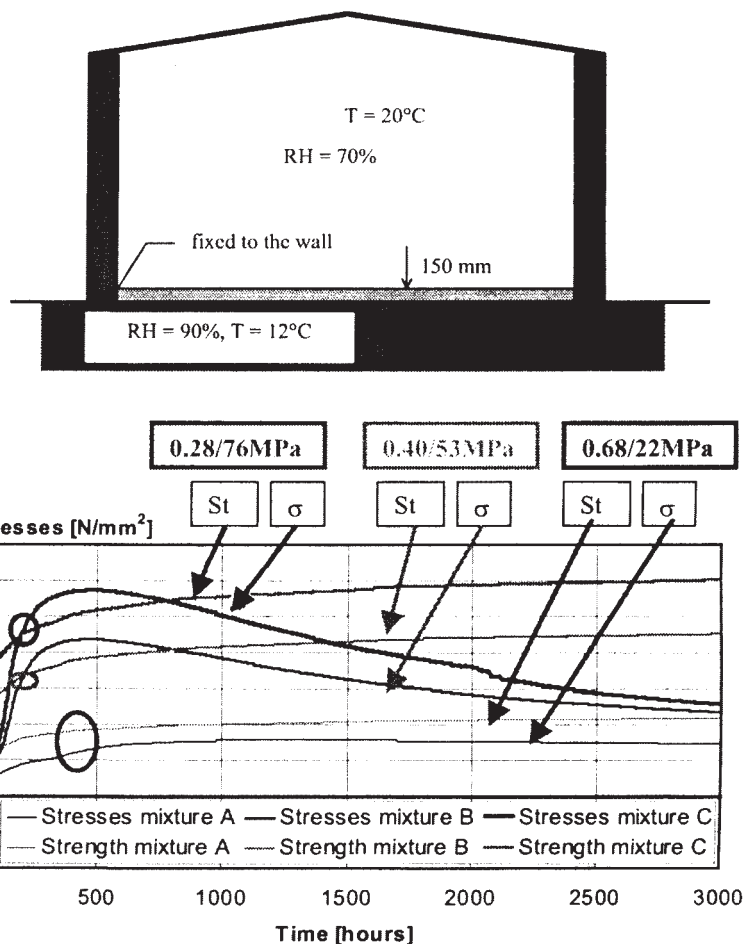
Przykłady pokazujące istotę takiego rozwoju podano niżej przy wykorzystaniu jednego z nowych narzędzi; symulację z zastosowaniem elementów skończonych (ciepło i modelowanie):

(a) Pęknięcie betonowej podłogi/płyty różnych klas betonu (rysunek 9):

- Krzywe naprężeń i wytrzymałości betonów o różnej klasie wytrzymałości zostały obliczone aby pokazać przecięcie krzywych (to znaczy pęknięcie) na wyższym poziomie wytrzymałości, lecz nie na niższym.
- Wniosek: skład zapewniający wyższą wytrzymałość w tym przypadku prowadzi do pęknięcia; rozwiązanie - zbrojenie, lub wariantowo przy wyższej wytrzymałości i ograniczeniu skurczu jako niezależnej zmiennej; można to osiągnąć projektując mieszankę betonową, domieszki zmniejszające skurcz lub wykorzystując inne metody

(b) Pęknięcie nawierzchni mostowej (rysunek 10) -

- Podwojenie tradycyjnego zbrojenia może być metodą ograniczenia pęknięcia i zmniejszenia rozwartości rys z około 0,4 mm do około 0,2 mm co jest do zaakceptowania.
- Wariantowym rozwiązaniem zmniejszenia rozwartości rys do około 0,2 mm i uniknięcie potrzeby podwojenia zbrojenia może opierać się na zmianie właściwości betonu przez domieszkę



Rys. 9. Symulacja pozwalająca na obliczenie rozwoju naprężeń (s) i wytrzymałości (st) w płycie (a), pokazująca przecięcie tych krzywych i pęknięcie betonu o większej wytrzymałości i mniejszym stosunku w/c i brak przecięcia w przypadku betonu (b) o mniejszej wytrzymałości

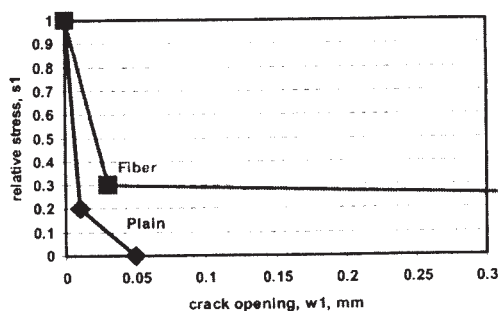
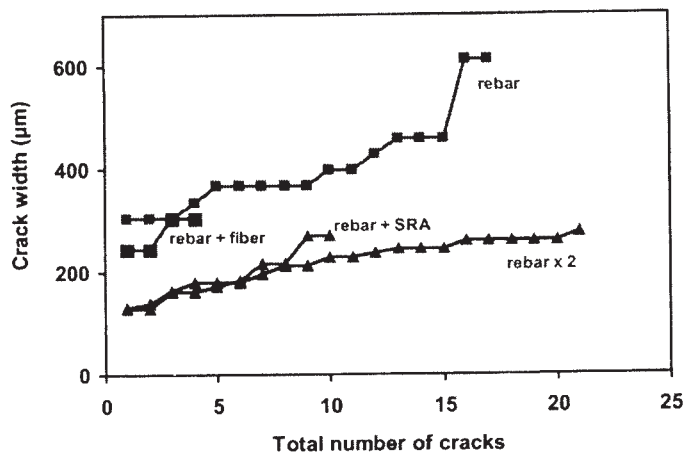
Fig. 9. Simulation to calculate the stresses (s) and strength (St) development in a slab (a) showing intersection and cracking in the higher strength-low w/c concrete and no-intersection at the lower strength concrete (b) (after Schlagen et al [14])

(b) Cracking in bridge decks (Figure 10) -

- Doubling of the conventional reinforcement can provide the means for crack control, to reduce it from level of about 0.4 mm width to about 0.2 mm, which is acceptable.
- Alternative solution to reduce the crack width to about 0.2 mm and avoid the need for doubling of the steel, can be based on modifying the concrete with shrinkage reducing admixture (reduction of 50% in free shrinkage) or by adding fibers to obtain a concrete with strain softening characteristics (Figure 10b)

5. Performance specifications

In recent years, as discussed above, we have made great advances in our ability to "tailor make" concretes for a wide range of special applications: concretes with compressive strengths greater than 200 MPa, self-consolidating concretes, tough and durable fiber reinforced concretes, polymer concretes, and so on. However, in producing such concretes, and even more so for the "normal" 20 to 35 MPa concretes that make up most of our concrete



Rys. 10. Symulacja pozwalająca na obliczenie rozwoju pęknięć w płycie mostowej (liczba i rozwarcie rys wzdłuż płyty - a) pokazująca wpływ podwojenia stali zbrojeniowej lub stosowania betonu o lepszych właściwościach (skurcz zmniejszony o 50% spowodowany stosowaniem domieszki zmniejszającej skurcz lub zbrojeniem włóknami w celu złagodzenia odkształceń w b)

Fig. 10. Simulation to calculate the development of cracks in bridge deck (number and width of cracks along the deck - a), showing the effect of doubling the steel reinforcing or using concretes of enhanced properties (shrinkage reduction by 50% using shrinkage reducing admixture or fiber reinforcement to obtain strain softening shown in b). Adopted from analysis of Li, W.R. Grace

zmniejszającą skurcz (zmniejszenie o 50% swobodnego skurczu) lub przez dodatek włókien w celu otrzymania betonu o zwiększonej odporności na pękanie (rysunek 10b).

5. Specyfikacja właściwości użytkowych

W ostatnich latach, jak to opisano wyżej, dokonano wielkiego postępu w umiejętności wytwarzania betonu „zrobionego na miarę” do szerokiego zakresu specjalnych zastosowań: betony o wytrzymałości na ściskanie większej niż 200 MPa, samozagęszczające się betony, twarde i wytrzymałe betony zbrojone włóknami, cementy polimerowe i inne. Jednakże, przy wytwarzaniu takich betonów, a nawet jeszcze bardziej „zwykłych” betonów klasy 20 do 35 MPa, które mają największy udział w obecnej produkcji, opierano się głównie na narzuconej specyfikacji. To jest, co najmniej w Ameryce Północnej, opieramy wymagania na takich wskaźnikach jak maksymalny współczynnik woda/spoiwo, rodzaj cementu, minimalna zawartość cementu, uziarnienie kruszywa, rodzaj i ilość dodatków oraz wypełniaczy, rodzaj a także ilość domieszek chemicznych.

production, we have relied mainly on prescriptive specifications. That is, at least in North America, we impose requirements on such things as maximum water/binder ratios, cement types, minimum cement contents, aggregate gradings, the type and amount of mineral admixtures and fillers, and the type and amount of chemical admixtures.

While prescriptive specifications such as these have worked reasonably well in the past, when the industry as a whole was much less sophisticated than it is now, and when the special concretes referred to above had not yet been developed, they have several major disadvantages:

- They are not, in any event, a guarantee of good, durable concrete (as evidence by the amount of "bad" concrete that we see, and by the growth in concrete-related construction litigation).
- They tend to inhibit the most efficient use of the materials potentially available to produce "good" concrete.
- They tend to stifle innovation.

It is thus essential that we move to performance based specifications for concrete, particularly in light of the economic and environmental pressures alluded to earlier. This would encourage the entire concrete industry (cement producers, concrete producers, design engineers and contractors) both to be more demanding in the concrete properties that they specify, and more imaginative and innovative in their selection of materials. This would also require the industry to extend the range of materials (admixtures, fillers, polymers, fibers, aggregates from industrial wastes, and so on) that are used. Performance based specifications would thus provide a means for introducing durability issues explicitly into the design both of the material and the structure.

There are, of course, some difficulties to be overcome before we can move entirely in this direction:

- The concrete industry as a whole is not ready to make the switch from prescriptive to performance specifications. In particular, there is a lack of properly trained personnel (this is especially true for small producers) to provide the necessary technical advice and QC/QA programs. Perhaps if there was a compulsory certification requirement for all concrete producers, which included a requirement for trained personnel, this would force them either to retrain their own people, or to bring in qualified engineers/technologists.
- There would have to be some procedures established for assigning responsibility for adequate concrete design. Currently, this "responsibility" is rather diffusely shared amongst the design engineer, the geotechnical engineer, the cement producer, the concrete supplier, the contractor, the concrete sub-trades, and perhaps others (each of whom is ready to blame all of the others for any problems that might arise). This benefits only the lawyers. It will become necessary to designate some individual as having ultimate responsibility for the quality of the concrete - an "engineer of record".

Podczas gdy narzucone specyfikacje analogiczne do powyższych, spełniały dobrze swoją rolę w przeszłości, w czasach gdy cały przemysł był znacznie mniej skomplikowany niż dzisiaj i gdy specjalne betony omówione wyżej nie były jeszcze wytwarzane, obecnie mają one szereg poważnych wad, a mianowicie:

- nie są one, w żadnym przypadku, gwarancją dobrego, trwałego betonu (jak to zarejestrowano w ilości „złych” betonów i we wzroście reklamacji dotyczących konstrukcji betonowych),
- powodują one ograniczenie najkorzystniejszego stosowania potencjalnie dostępnych materiałów do wytwarzania „dobrych” betonów,
- powodują hamowanie innowacyjności.

Proponowane przez nas wprowadzenie specyfikacji betonów opartej na właściwościach użytkowych ma więc zasadnicze znaczenie, szczególnie w świetle nacisków ekonomicznych, a także związanych z ochroną środowiska, wspomnianych wcześniej. Powinno to zachęcić szeroko rozumiany przemysł betonów (producentów cementu, producentów betonu, konstruktorów i inwestorów), jednym słowem wszystkich, aby zwiększyć wymagania w stosunku do właściwości betonów, których stosowanie przewidują i stać się bardziej twórczymi oraz postępowymi w wyborze materiałów. Zmusi to równocześnie przemysł do rozszerzenia rodzaju materiałów (domieszek, wypełniaczy, polimerów, włókien, kruszyw z odpadów przemysłowych itd.), które są stosowane. Specyfikacja oparta na właściwościach użytkowych powoduje potrzebę wprowadzenia zagadnień trwałości do projektowania, tak w zakresie materiałów, jak i konstrukcji.

Są oczywiście pewne problemy do rozwiązania nim będziemy mogli pójść całkowicie w tym kierunku:

- Cały przemysł betonów nie jest przygotowany do wykonywania takiego zwrotu od specyfikacji narzuconej do opartej na właściwościach użytkowych. W szczególności brak jest odpowiednio przygotowanych fachowców (odnosi się to szczególnie do małych wytwórców betonu) do wprowadzenia niezbędnych nowości technicznych i programów QC/QA³. Prawdopodobnie gdyby były obowiązkowe wymagania certyfikacyjne dla wszystkich producentów betonu, które zawierałyby wymagania dotyczące wyszkolonego personelu, zmusiłoby to wytwórców bądź do przeszkolenia załogi bądź do zatrudnienia wykwalifikowanych inżynierów-technologów.
- Powinna być pewna ilość wytwórców, wytypowanych do przyjęcia odpowiedzialności za prawidłowe projektowanie betonu. Obecnie ta „odpowiedzialność” jest raczej rozproszona pomiędzy projektantów, inżynierów od geotechniki, wytwórców cementu, dostawców betonu, inwestorów, pośredników w sprzedaży betonu, a być może jeszcze innych (każdy z nich jest gotów obciążyć pozostałych problemami, które mogą zaist-

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD DWÓCH HANDLOWYCH BRP

COMPOSITIONS OF SOME COMMERCIAL RPCS

Składnik Material	DUCTAL [®] (kg/m ³)	CEMTEC [®] _{multiscale} (kg/m ³)
Cement portlandzki Portland cement	710	1050.1
Pył krzemionkowy Silica fume	230	268.1
Mielony kwarc Crushed quartz	210	-
Piasek Sand	1020	514.3
Woda Water	140	180.3
Włókna Fibers	40 – 160 ^a	858 ^b
Superplastyfikator Superplasticizer	10	44

^a Either steel or polypropylene fibers (13 mm x 0.20 mm)

^b A mixture of three different geometries of steel fibers

- There would have to be developed better and quicker tests not only for the materials, but also for concrete durability. We would have to move far beyond our current reliance on the 28-day compressive strength as the sole arbiter of concrete performance. There are at the moment a large number of tests for various durability problems, but most are inadequate, in that they take too long, give ambiguous results, or only work in very particular circumstances. There needs to be a concerted research effort to develop better tests.

The challenge for us all, then, is to device a road map and a time line for moving to performance specifications. This step is essential if we are to use our materials efficiently and effectively.

6. Education and training

If we are to change the ways in which we produce and use concrete in any fundamental way, the drivers for change discussed above all share one need in common – a cadre of engineers and technologists who are concrete specialists. In spite of our increasingly sophisticated research activities, (and the publication of probably more than 5000(!) papers per year on concrete), we still are unable to consistently produce high performance concrete:

- There are frequent durability problems
- There is excessive cracking and spalling
- There are too many concrete failures

In addition to the lack of concrete specialists, we also, unfortunately, lack a properly trained skilled work force. We also do not seem to have an appropriate way of transferring knowledge from

³ kontrola i zapewnienie jakości

nieć). To daje tylko zysk prawnikom. Stanie się koniecznością wyznaczenie konkretnych osób ponoszących wyłączną odpowiedzialność za jakość betonu – taki „inżynier protokołu”.

- Powinny być opracowane lepsze i szybsze metody badawcze nie tylko materiałów, lecz także trwałości betonu. Musimy przejść znacznie dalej poza 28 dniowe wytrzymałości jako wyłącznej podstawy oceny właściwości użytkowych betonu. Znamy obecnie znaczną liczbę metod analizujących różne problemy trwałości, lecz większość jest nieodpowiednich, gdyż są one zbyt długotrwałe, dają niejasne wyniki, lub znajdują zastosowanie tylko w bardzo szczególnych warunkach. Jest potrzeba podjęcia wspólnego wysiłku w celu opracowania lepszych metod.

Wyzwaniem dla nas wszystkich jest więc opracowanie przewodnika i ścieżki czasowej, w której trzeba przejść do specyfikacji opartej na właściwościach użytkowych. Ten krok ma zasadnicze znaczenie jeżeli chcemy stosować materiały wydajnie i efektywnie.

6. Kształcenie i trening

Jeżeli mamy zmienić w sposób zasadniczy metody, na podstawie których wytwarzamy i stosujemy beton, wszystkie czynniki napędowe zmian przedyskutowane powyżej mają jeden wspólny warunek – posiadanie kadry inżynierów i technologów, którzy będą specjalistami w zakresie betonu. Pomimo rosnących skomplikowanych badań (i publikowania przypuszczalnie więcej niż 5000 (!) artykułów rocznie dotyczących betonu) w dalszym ciągu nie jesteśmy zdolni systematycznie produkować betonu o wysokich właściwościach użytkowych, a mianowicie:

- występują częste problemy z trwałością,
- występują nadmierne spękania i odspajanie,
- jest zbyt wiele betonów z wadami.

Dodatkowo obok braku specjalistów z zakresu betonu, także niestety jest za mało odpowiednio wyszkolonych robotników. Nie wydaje się także abyśmy mieli odpowiednie metody przekazywania wiedzy zdobytej w badaniach laboratoryjnych do praktyki; pozostaje w tym zakresie szeroka przepaść pomiędzy tym co wiemy i co robimy w praktyce. Oczywiście klasyczne publikacje prac badawczych w fachowych czasopismach nie wydają się skuteczne pod tym względem.

Niestety jest stosunkowo mało fachowców, którzy albo dobierają rodzaj betonu do różnych zastosowań, lub projektują konstrukcje betonowe i nawierzchnie drogowe, rozumiejących dobrze podstawowe właściwości betonu. Traktują oni raczej beton jako „czarną skrzynkę”, której właściwości mogą być zdefiniowane w pełni w oparciu o wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości i może jeszcze liczbę Poissona. Ten pogląd jest także nazbyt często umacniany przez przepisy projektowania konstrukcji w Ameryce Północnej, które są w pełni oparte na wytrzymałości, tylko z kilkoma zasadami zabezpieczenia przed zamrażaniem i rozmrażaniem,

the research laboratory to the field; there remains a wide gulf between what we know and what we do in practice. Certainly, the mere publication of research papers in the standard journals seems not to be effective in this regard.

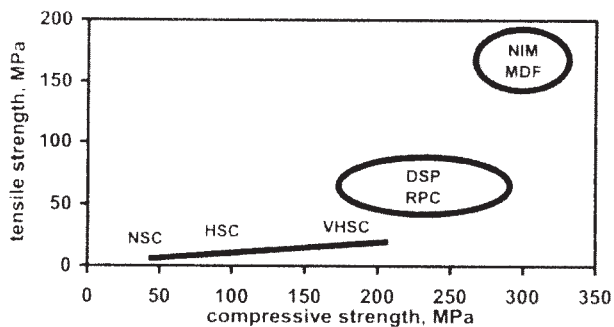
Unfortunately, relatively few of the professionals who either specify concrete for various applications or who design concrete structures and pavements understand the fundamental nature of concrete. Rather, they see concrete as a "black box" whose properties can be defined completely by its compressive strength, its elastic modulus, and perhaps its Poisson's ratio. This view is all too often reinforced by the North American structural design codes, which are entirely strength-based, with only a few prescriptive rules for freeze-thaw protection, for sulfate attack, and for concrete in "severe" environments. There are typically no explicit provisions for creep and shrinkage, though of course designers are expected to take these effects into consideration for deflection calculations. The concept of toughness is not considered at all, though this is why we add fibers to concrete.

People who truly understand concrete behaviour are in short supply. Decisions on material selection and construction practice are most often left to some combination of architects, engineers, materials suppliers and contractors, with no one apparently taking overall responsibility for the concrete. This state of affairs is a reflection on the way in which engineers who end up working with concrete are educated. They are, most commonly, civil engineers who have probably had only one or two courses on "materials on construction", of which only a part can be devoted to cement and concrete. Thus, for the other changes that we envisage to be able to happen, there is need for a new curriculum to train engineers and technologists specifically to work in the field of cementitious materials.

7. Long term developments

The vision outlined above "sketches" developments which are driven by needs of sustainability and efficiency. These developments, although significant in changing the industry, might be considered as incremental, in the sense that construction with concrete will be based to a large extent on the production of relatively bulk components with a cross section of the order of 0.1 m, as we know it today. These changes can be considered as part of a continuous development.

For the far future, a drastic development which might be considered dramatic and leading to a giant step change, will be feasible only if we can achieve a drastic change in the properties of concrete. Technically, it is feasible to obtain cementitious materials with high compressive and tensile strength which are ductile in nature (Figure 11). Achieving these properties with costs and production methods similar to current concrete can provide such a break-through. Whether this will happen and when, is difficult to predict. For such a change to happen, there will be a need not only to develop the new materials to be cost effective, but to ad-



Rys. 11. Zależność wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie klasycznego betonu i ostatnio opracowanych kompozytów o szczególnie dobrych właściwościach

Fig. 11. Relations between tensile and compressive strength of conventional concretes and newly developed high performance composites systems (after Bentur [5])

korozji siarczanowej w przypadku betonu eksploatowanego w różnych środowiskach. Typowy jest brak wytycznych dotyczących zabezpieczeń przed pękaniem i skurczem, chociaż oczywiście oczekuje się, że projektanci wezmą pod rozważenie te parametry do obliczeń odpowiednich zabezpieczeń. Podejście do problemu przez uwzględnienie odporności na pęknięcie nie jest brane pod uwagę, chociaż z tego powodu dodajemy włókna do betonu.

Ludzie, którzy naprawdę rozumieją zachowanie betonu są w mniejszości. Decyzje dotyczące doboru materiału i realizacji konstrukcji są przeważnie pozostawione zespołowi będącemu pewną kombinacją architektów, inżynierów, dostawców materiałów i inwestorów, z których żaden nie bierze pełnej odpowiedzialności za beton. Ten stan rzeczy jest odzwierciedleniem zakresu kształcenia inżynierów, którzy trafiają do przemysłu betonów. Są oni najczęściej inżynierami budownictwa, którzy prawdopodobnie przeszli jeden lub dwa kursy z przedmiotu „materiały budowlane”, z których tylko część może dotyczyć cementu i betonu. Stąd, pośród innych zmian, które wymieniliśmy jako prawdopodobne, jest potrzeba nowego programu szkolenia inżynierów i technologów, szczególnie do pracy w zakresie tworzyw cementowych.

7. Długofalowy plan rozwoju

Wizja przedstawiona wcześniej kreśli rozwój, którego czynnikami napędowymi są zrównoważony rozwój i wydajność. Ten rozwój, aczkolwiek ważny dla zmian w przemyśle, może być oceniony jako przyrost ilościowy w tym sensie, że budownictwo z betonu będzie oparte w znacznym zakresie na produkcji stosunkowo masowych elementów o przekroju poprzecznym rzędu 0,1 m, jakie znamy dzisiaj. Te zmiany mogą być traktowane jako część ciągłego rozwoju.

Dla odległej przyszłości radykalny rozwój, który można oceniać jako gwałtowny i prowadzący do gigantycznych zmian, jest wykonalny tylko pod warunkiem, że będziemy mogli osiągnąć duże zmiany właściwości betonu. Technicznie można otrzymać tworzywa cementowe o dużej wytrzymałości na ściskanie i zginanie, które

vance design and construction systems which will be drastically different from the ones we currently know, to enable construction with an order of magnitude less materials. In looking into such future, we have to be open to the option that these properties might be achieved with a completely different material which will replace concrete. However, here too, there would be a need for a simultaneous change in the materials, the design concept of the structure as well as the construction practices as we currently know them.

There is room however to consider a development which will accelerate the penetration of new cementitious composites and reinforcing systems even in conventional constructions. This may take place if an integrated approach to environmental impact will become mandatory. The implications for such a change on the feasibility of justifying the application of new construction technologies was demonstrated by Katz (2), for reinforced concrete pavements in which the environmental impact of steel reinforcement was compared with that of FRP reinforcement (Figure 2 and Table 1). Developments of this nature could pave the way for a range of new high performance cementitious composites such as those outlined below:

- Li and Stang (10) suggested that High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) might be used as the matrix in reinforced concrete structures. They argue that while HPFRCC (containing two or three percent by volume of fibers) might appear to be "prohibitively" expensive, if we factor in life-cycle costs, as well as the social and environmental costs of repair and replacement, then this should be feasible. Indeed, a whole family of similar materials with high fiber contents and very high strengths (both tensile and compressive) are beginning to appear on the market:
- RPC was developed in France in the early 1990s (15). The quite remarkable properties of this material (compressive strengths in excess of 600 MPa) were achieved by careful control of the concrete mixture, in particular the particle size distribution of all of the solid materials. Optimization of the particle size distribution leads to a mix approaching optimum density. RPC contains no coarse aggregate; indeed, the maximum aggregate size is 0.3 mm! This permits production of a more homogeneous material. For purposes of ductility, up to 5% by volume of steel fibers are added to the mix.
- A commercial development of RPC is now being marketed under the name of DUCTAL®. With steel fibers, compressive strengths are of the order of 150 to 180 MPa, with flexural strengths of about 32 MPa. These strengths are reduced by about 25% when polypropylene fibers are used. A somewhat similar French material, BSI®-CERACEM concrete was used to construct the toll gate roofs for the new Millau viaduct in the south of France (16).
- Another version of this technology, also developed in France, has been patented under the name of CEMTEC multiscale® (17). It is characterized by much higher cement and fiber con-

są z natury plastyczne (rysunek 11). Osiągnięcie tych właściwości przy utrzymaniu kosztów i metod produkcji betonu podobnych do obecnie stosowanych, może spowodować taki przełom. Czy taka zmiana nastąpi i kiedy jest trudne do przewidzenia. Aby takie zmiany zaszyły trzeba będzie nie tylko opracować nowe materiały wytwarzane po korzystnych kosztach, lecz także posunąć do przodu projektowanie i układy konstrukcyjne, które będą zupełnie różne od tych, znanych obecnie, tak aby konstrukcje zużywały o rząd wielkości mniej materiałów. Przewidując taką przyszłość musimy uwzględnić taką opcję, że w celu osiągnięcia tych właściwości trzeba będzie zastosować całkiem inny materiał, który zastąpi beton. Jednak, także tutaj, będzie potrzeba równoczesnej zmiany materiałów, koncepcji projektowania konstrukcji, a także praktyki budowlanej w stosunku do znanych obecnie.

Można jednak także wziąć pod uwagę wariant rozwoju, który przyspieszy wprowadzenie nowych kompozytów cementowych i układów zbrojenia, nawet w tradycyjnych konstrukcjach. Może to nastąpić, jeżeli zintegrowane uwzględnienie wpływu na środowisko stanie się obowiązkowe. Wpływ takich zmian uzasadniających wprowadzenia nowych technologii w budownictwie pokazał Katz (2) na przykładzie nawierzchni drogowej z żelbetu, w przypadku której wpływ na środowisko stali zbrojeniowej porównano z wpływem polimeru zbrojonego włóknami (rysunek 2 i tablica 1). Rozwój tego rodzaju może wytyczyć drogę dla kompozytów cementowych o nowych wysokich właściwościach użytkowych, a mianowicie:

- Li i Stang (10) sugerowali, że o wysokich właściwościach użytkowych zbrojone włóknami kompozyty cementowe (WWU-ZWKS) mogą być stosowane jako matryca w konstrukcjach z żelbetu. Twierdzili oni, że WWUZWKC (zawierające dwa do trzech procent objętościowych włókien) mogą okazać się tak drogie, że ich stosowanie nie będzie możliwe, natomiast jeżeli przeprowadzimy ocenę opartą na „cyklu życia”, jak również uwzględnimy społeczne i środowiskowe koszty napraw i wymiany, wówczas stanie się to w pełni realne. Rzeczywiście cała rodzina analogicznych materiałów o dużej zawartości włókien i bardzo wysokich wytrzymałościach (na ściskanie i na zginanie) zaczynają pojawiać się na rynku:
- Betony z reaktywnymi proszkami zostały opracowane we Francji we wczesnych latach dziewięćdziesiątych (15). Wybitne właściwości tego materiału (wytrzymałość na ściskanie przekraczająca 600 MPa) zostały osiągnięte w wyniku starannego dobrania mieszanki betonowej, w szczególności rozkładu wielkości ziaren we wszystkich stałych składnikach. Optymalizacja rozkładu ziarnowego cząstek prowadzi do najkorzystniejszej gęstości mieszanki, gdyż BRP nie zawiera grubego kruszywa; rzeczywiście maksymalny wymiar kruszywa wynosi 0,3 mm! Pozwala to na produkcję bardziej jednorodnego materiału. Ze względu na plastyczność do około 5% objętościowych włókien stalowych dodaje się do mieszanki.
- BRP jest obecnie wprowadzany na rynek pod nazwą DUCTAL®. Z dodatkiem stalowych włókien jego wytrzymałość na ściskanie jest rzędu 150 do 180 MPa, a na zginanie około 32

tents than DUCTAL®, though the underlying principles are the same. This material can achieve flexural strengths of about 60 MPa. It also has an extremely low permeability. For comparison, typical mix proportions for two of these materials are given in Table 2.

- Still another family of ultra high strength concretes was developed in Denmark in the 1980s. This material is referred to as CRC (Compact Reinforced Composite). It too is made with a very low water/binder ratio (~0.16 or less), and contains from 2 to 6% steel fibers, providing matrix strengths of 140 to 400 MPa. It differs from the materials described above in that it is also combined with closely spaced conventional steel reinforcement. It has been used mainly in precast elements such as staircases and balcony slabs (18) but has also been used in cast-in-place applications.
- There are other ultra high strength concretes that have been produced, and still others in the development stage. Their common features are a very low water/binder ratio, the use of silica fume and superplasticizers, high contents of fibers, limitations on the maximum aggregate size, and careful control of the particle size distribution. They also require very tight quality control both in their production and in their placement. Consequently, these materials are very expensive and the initial cost of construction is high. The application of such systems and the drive for the development of new ones will be dependent to a large extent on the changes in the societal values towards sustainability consideration which will be "translated" into "down to earth" quantitative requirements to design and build structures that will meet specified life cycle criteria and/or quantifiable environmental loads.

Literatura / References

1. Strategic Development Council, Roadmap 2030: The U.S. Concrete Industry Technology Road Map, USA, 2002.
2. A. Katz, Environmental impact of steel and FRP reinforced pavements, ASCE J. of Composites for Construction, in press.
3. E. Gartner, Industrially interesting approaches to "low CO2 cements, Cement and Concrete Research, 34, 2004, 1489-1498.
4. P.-C. Aitcin, Cements of yesterday and today, Concrete for tomorrow, Cement and Concrete research, 30, 200, 1349-1359.
5. A. Bentur, Cementitious materials - Nine millennia and a new century: Past, present and future, ASCE J. of Materials in Civil Engineering, 14, 2002, 2-22.
6. A. Bentur, High strength/high performance concrete for long term durability performance, Construction Specifier, 57, 2004, 66-72.
7. P. F. Banfill, The Rheology of fresh cement and concrete, Concrete Plant International, April 2004, 86-100.
8. J. Marchand, Modeling the behaviour of unsaturated cement systems exposed to aggressive chemical environments, Materials and Structures, 34, 2001, 195-200.
9. E. K. Attiogbe, H. T. See and M. A. Miltenberger, Cracking potential of concrete under restrained conditions, Advances in Cement and Concrete, Proceedings from the Engineering Foundation Conference, D. A. Lange,

MPa. Ta wytrzymałość ulega zmniejszeniu o około 25% w przypadku stosowania włókien polipropylenowych. Podobne francuskie tworzywo beton BSI®-CERACEM zastosowano w konstrukcji zadaszenia bramy nowego wiaduktu w Millau, na południu Francji (16).

- Inna odmiana tej technologii, także opracowana we Francji, została opatentowana pod nazwą CEMTECmultiscale® (17). Charakteryzuje się ona znacznie większą zawartością cementu i włókien niż DUCTAL®, aczkolwiek zasady są takie same. To tworzywo może osiągnąć wytrzymałość na zginanie wynoszącą około 60 MPa. Wykazuje ono również szczególnie małą przepuszczalność. Dla porównania typowy skład mieszanki tych dwóch tworzyw podano w tablicy 2.
- Inna rodzina betonów o ultra wysokiej wytrzymałości została opracowana w Danii, w latach osiemdziesiątych. Ten materiał został nazwany ZKZ (zagęszczony kompozyt zbrojony). On także ma bardzo mały współczynnik woda/spoiwo (~0,16 lub mniej) i zawiera od 2 do 6% włókien, osiągając wytrzymałość matrycy od 140 do 400 MPa. Różni się on od tworzyw opisanych powyżej tym, że zawiera klasyczne zbrojenie stalowe, gęsto rozmieszczone. Był on stosowany głównie w elementach prefabrykowanych takich jak klatki schodowe i płyty balkonowe (18), lecz był także stosowany w formowanych na miejscu konstrukcjach.
- Były wytwarzane inne betony o ultra wysokiej wytrzymałości i jeszcze inne są w stadium opracowania. Ich wspólną cechą jest bardzo mały współczynnik wodno-spoiwowy, stosowanie pyłu krzemionkowego i superplastyfikatorów, duża zawartość włókien, ograniczenie maksymalnego wymiaru kruszywa i staranna kontrola rozkładu wymiarowego cząstek. Wymagają one także bardzo starannej kontroli w produkcji i w trakcie betonowania. Jest zrozumiałe, że te tworzywa są bardzo drogie i początkowe koszty konstrukcji są wysokie. Zastosowanie takich rozwiązań i czynniki rozwojowe dla nowych rozwiązań zależą będą w znacznym stopniu od zmian społecznych wartości w zakresie rozważań o zrównoważonym rozwoju, które zostaną sprowadzone „na ziemię” w formie ilościowych wymagań dla projektowania i budowy konstrukcji, spełniających określone wymagania w zakresie „cyklu życia” i zdefiniowany ilościowo wpływ środowiska.

K. L. Scrivener and J. Marchand editors, The Engineering Foundation, 2003, 191-200.

10. V. C. Li and H. Stag, Elevating FRC material ductility to infrastructure durability, in M. di Prisco, R. Felicetti, G. A. Plizzari, Fibre reinforced Concretes BEFIB 2004, RILEM Proceedings PRO 39, RILEM Publications, Bagneux, France, 2004, Vol.1, 171-186.

11. H. Xu and S. Mindess, The flexural toughness of high strength fiber reinforced concrete with styrene-butadiene latex, in A. Zingoni, Progress in Structural Engineering, Mechanics and Computation, Proceedings of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, A. A. Palbema Publishers, 2004, Chapter No. 246 (CD-ROM).

12. J. Binns, Passive devices monitor bridges, buildings, Civil Engineering, July 2004, p. 33.

13. B. Baetens, E. Sclangen, T. van Beek, P. Roelfstra and J. Bijen, Computer simulation for concrete temperature control, Concrete International, December 2002, 43-48.

14. E. Schlangen, T. Lemmens and T. van Beek, Simulation of physical and mechanical processes in concrete floors and slabs, in Concrete Floors and Slabs, Proc. Int. Seminar, R. K. Dhir, editor, UK, 2002, 45-56.

15. P. Richard and M. H. Cheyrezy, Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, in Mehta, P. K. Concrete technology past, present and future, SP-144, Farmington Hills, MI, American Concrete Institute, 1994, 507-518.

16. T. Thibaux, Z. Hajar, A. Simon and S. Chanut, Construction of an ultra-high-performance fibre-reinforced concrete thin-shell structure over the Millau viaduct toll gates, in M. di Prisco, R. Felicetti and G. A. Plizzari, Fibre-reinforced concretes BEFIB 2004, Vol. 2, Bagneux, France, RILEM Publications, 2004, 1183-1192.

17. E. Parent and P. Rossi, A new multi-scale cement composite for civil engineering and building construction fields, in Advances in concrete through science and engineering, Bagneux, France, RILEM Publications, CD-ROM Paper No. 14, Hybrid-Fiber Session, 2004.

18. B. Aaarup, CRC - a special fibre reinforced high performance concrete, in Advances in concrete through science and engineering, Bagneux, France, RILEM Publications, CD-ROM Paper 13, Hybrid-Fiber Session, 2004.