

# Studium idei rozwoju betonu w XXI wieku

## 1. Wprowadzenie

Mija pierwsze dwudziestolecie XXI wieku, które przyniosło szereg działań istotnych dla rozwoju technologii betonu – znaczących w odbiorze ogólnospołecznym. W Polsce okazją do podsumowania [1] stały się X Dni Betonu zorganizowane po raz kolejny przez Stowarzyszenie Producentów Cementu. Wszystko zaczęło się w 2000 roku od konferencji „Beton na progu nowego milenium”. Konferencja ta zgromadziła 250 osób i przerodziła się w cykliczne spotkania – Dni Betonu. Dziesiąte spotkanie w 2018 roku zgromadziło ponad 1000 uczestników. Konferencjom towarzyszy wydanie monografii, ostatnio jest to wydawnictwo dwutomowe (rys. 1). Dniom Betonu towarzyszą wydawnictwa Polskiego Cementu, w tym dzieła tak znakomite jak „Właściwości betonu” (2000, 2012) Adama Neville’a [2] i towarzyszące im słowa „daję Wam tę książkę”, czy też tytułem przykładu „Chemia cementu i betonu” (2010) Wiesława Kurdowskiego [3], „Konstrukcje z betonu sprężonego” (2008) Andrzeja Ajdukiewicza [4], „Konstrukcje masywne” (2004) Włodzimierza Kiernożyckiego [5], od „ABC betonu” Jana Dei i współautorów [6] – poczynając (2002).

Dni Betonu stały się fascynującym forum wymiany myśli – są tu: budujący obiekty, producenci betonu i składników, inwestorzy, architekci, naukowcy, przedsiębiorcy. To skłania do wielu refleksji. Między innymi dlaczego właśnie beton i jaka jest przyszłość betonu. Beton zaspokaja istotne potrzeby społeczne. Trwałe dzieła cywilizacyjne – pomniki cywilizacji powstają w betonie. Ze względu na ogromne masy materiału używane przez budownictwo, składniki podstawowego materiału muszą być łatwo dostępne i występować w dużych skupiskach. W tej sytuacji trudno znaleźć konkurenta dla betonu [7]. Oczywiście można i trzeba szukać alternatywnych spoiw

[8]. Niemniej należy pamiętać, że zdanie memoriału wbudowanego na ścianie warsztatu twórcy cementu Josepha Aspdina, Portland Stones w Leeds: „cement portlandzki jest jednym z najważniejszych materiałów dla ludzkości” jest stale aktualne.

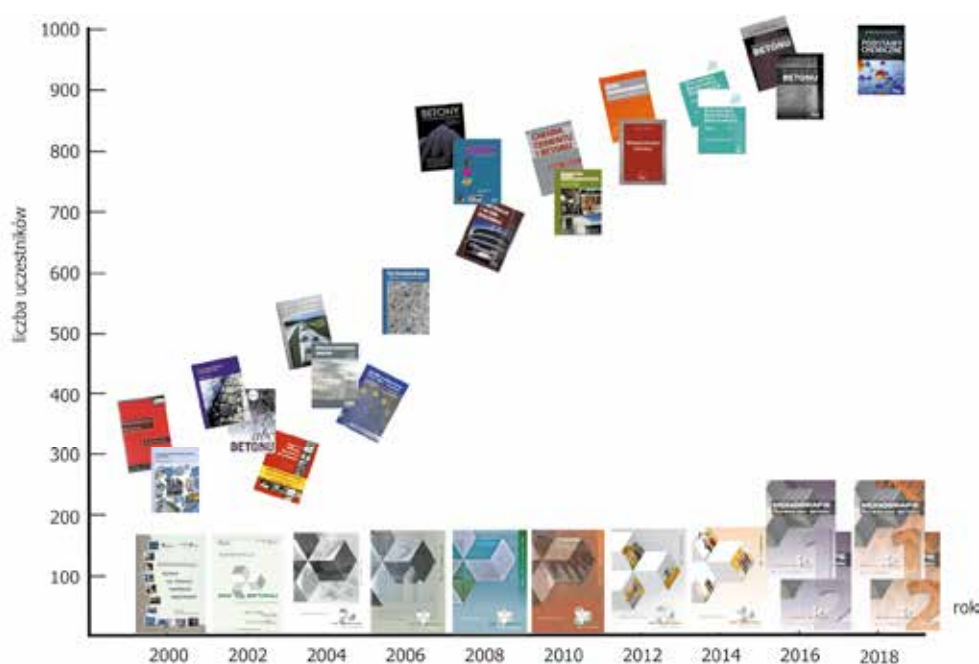
Konsekwencją tych wysokich kwantyfikatorów jest beton zrównoważony – a więc zaspokajający potrzeby współczesnych, nie ograniczając przyszłych pokoleń.

## 2. Beton zrównoważony jako ideał technologiczny

Powszechność i masowość produkcji i stosowania betonu (zużycie ok. 14 mld m<sup>3</sup> rocznie w skali świata) oznacza, że jest to przemysł zużywający ogromną masę surowców naturalnych, w tym mineralnych i wody oraz znaczne ilości energii. Największe obciążenie środowiska w cyklu życia betonu związane jest z wytworzeniem jego składników, w tym zwłaszcza w kontekście charakterystyk środowiskowych cementu, związanych z nakładem energii i emisją CO<sub>2</sub> podczas produkcji. Udział energii wbudowanej w całkowitym bilansie energetycznym życia obiektu budowlanego jest jednakże relatywnie mały – np. w odniesieniu do budynków mieszkalnych wynosi około 10-20% energii całkowitej. Gdyby zatem rozpatrywać część cyklu życia betonu w granicach od rozpoczęcia eksploatacji do wyczerpania jego użyteczności i wykorzystania jako surowca wtórnego, beton można by uznać za materiał nieobciążający środowiska w istotnym stopniu. Charakteryzuje go bowiem:

- brak emisji do środowiska
- relatywnie duża trwałość (kilkadziesiąt a nawet kilkaset lat)
- przydatność do recyklingu przy nakładzie energetycznym porównywalnym do produkcji kruszywa tamanego

Rys. 1. Wydawnictwa Polskiego Cementu towarzyszące Dniom Betonu



- brak negatywnych oddziaływań na środowisko w przypadku składowania jako odpadu
- zdolność do sekwestracji dwutlenku węgla z atmosfery w całym cyklu życia betonu
- szczególna relacja ciepła właściwego, przewodności cieplnej i gęstości, umożliwiająca pełnienie roli tzw. masy termicznej, która dzięki powolnej absorpcji, stabilnej akumulacji i powolnemu uwalnianiu ciepła z betonu do pomieszczeń korzystnie wpływa na bilans energetyczny – zapewnienie komfortu cieplnego budynku.

Teza, że beton jest materiałem bliskim ideałowi zrównoważenia, uzasadniona jest tym, że rozwój jego modyfikacji materiałowych i technologicznych zmierza do minimalizowania charakterystyk środowiskowych surowców, jak największego udziału surowców wtórnych i zwiększania trwałości obiektów z betonu [9]. Wskazane okoliczności doprowadziły do powstania szeregu określeń, takich jak green concrete, ekobeton itp., które można sprowadzić do wspólnego terminu beton zrównoważony.

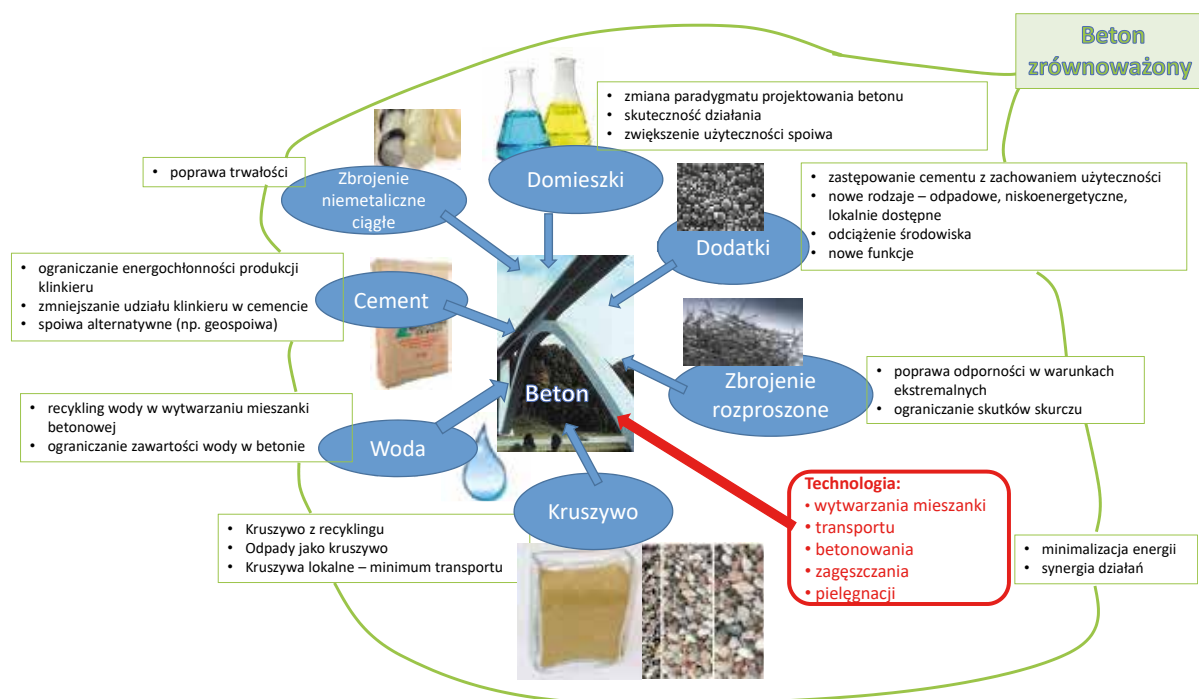
Hasło to weszło do powszechnego użycia w pierwszej dekadzie XXI wieku, a w przestrzeni europejskiej nabrało znaczenia formalnego w 2005 roku, wraz z powołaniem CEN TC 350 „Sustainability of construction works”. Naturalną konsekwencją tych dążeń jest kształtowanie betonu jako produktu o precyzyjnie zdefiniowanej użyteczności (taylor made material), co powinno zapewnić optymalizację materiałowo-technologiczną w układzie: użyteczność (w tym trwałość) – charakterystyka środowiskowa – spełnienie oczekiwań komfortu użytkownika w całym okresie eksploatacji [10].

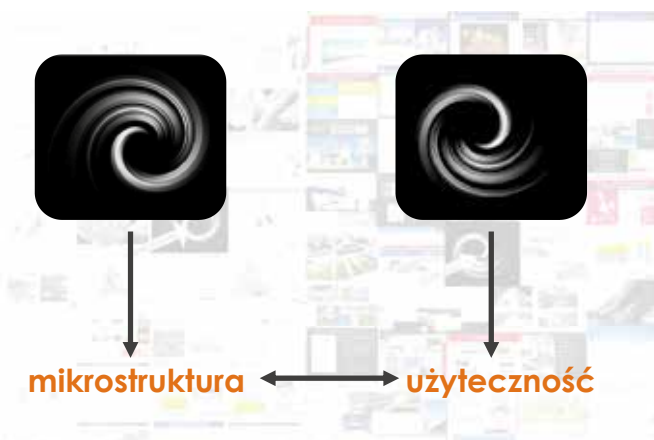
Ideał betonu zrównoważonego jest przesłanką nadrzędną ukierunkowującą działania ośrodków badawczych (rys. 2).

Nanoinżynieria betonu – rozwijana jest w dwóch aspektach – analizy i badania nanostruktury kompozytu w celu lepszego poznania mechanizmów sterowania właściwościami betonu oraz użycie nanomodifikatorów ulepszających właściwości kompozytu [11,12]. Kreowanie samoobsługowości (autotechnologiczności) betonu jest odpowiedzią na potrzebę minimalizowania kosztów i udziału czynnika ludzkiego. Niektóre

z aspektów samoobsługowości w ostatnim 20-leciu stały się prawie codziennością – jak np. beton samozagęszczalny. Inne aspekty samoobsługowości znalazły zastosowania niszowe; są nadal w sferze badań, tak jak na przykład betony samoczyszczące z dodatkiem nanotlenku tytanu czy samopielegnujące z dodatkiem SAP (super absorbent polymers) [13]. W sferze koncepcyjnej i doświadczalnej są betony samonaprawialne czy też samoleczące, zapewniające samoodtwarzanie się wystarczającej użyteczności nawet w bardzo długim okresie użytkowania. Wizja betonu samoobsługowego w wielu aspektach czyni beton podmiotem na polu ożywionym, inspiruje wyobraźnię i doprowadziła do rozważań o betonie inteligentnym [14]. Materiał inteligentny stanowi jednocześnie czujnik rejestrujący bodziec i aktywator odpowiednich przemian. Potrzeba nadania betonowi cech inteligencji jest wyzwaniem wynikającym z wymagań zrównoważonego rozwoju (trwałość, efekty środowiskowe, komfort użytkowania). Inteligencja, której oczekiwać by można w odniesieniu do betonu, to zdolność do zachowań podobnych, jakie przejawia skóra człowieka. Zdolność do reakcji na zmianę temperatury i termoregulacja, reakcja na nacisk i drgania, reakcja regeneracyjna na uszkodzenia, obrona przed czynnikami biologicznymi – to właściwości, w które kompozyty mineralne można wyposażyć już na obecnym etapie rozwoju technologicznego. Przewodniki i półprzewodniki w postaci włóknistej lub drobnziarnistej mogą stanowić sposób automonitoringu temperatury w masywach dzięki wykorzystaniu efektu Seebecka i zmian rezystancji. Nano- i mikro-dodatki (metaliczne lub węglowe) pozwalające na wykorzystanie efektu piezoelektrycznego mogą służyć automonitorowaniu obciążenia konstrukcji z betonu. Materiały zmienno fazowe organiczne i nieorganiczne zawarte w betonie przegrody mogą służyć optymalizacji energetycznej obiektu. Nanorurki węglowe mogą zostać wykorzystane jako procesory monitoringu przebiegu skurczu betonu oraz utraty przyczepności między zbrojeniem a betonem. Ideałem – obecnie jeszcze futurystycznym – byłby beton homeostatyczny, tzn. odznaczający się stałością parametrów wewnętrznych w zmieniających się warunkach użytkowania oraz

Rys. 2. Kierunki materiałowo-technologiczne zrównoważenia betonu





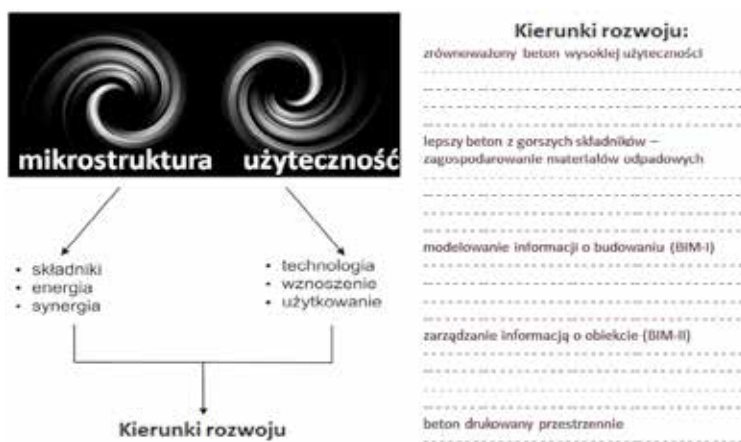
Rys. 3. Epicentra tematyczne w architekturze informacji o betonie [1]

zdolny do „samodiagnozy” i „samonaprawy” w przypadku utraty tego stanu równowagi.

W obszarze technologii wznoszenia obiektów z betonu poszukiwania elementów zrównowazenia to między innymi dynamiczny rozwój nowej generacji domieszek, ale także technika drukowania przestrzennego betonu. Domieszki wysoko rozgałęzionych polimerów, ostatnio – dendrymerycznych, umożliwiają sterowanie czasem zachowania odpowiedniej ciekłości/lepkości mieszanki betonowej [15]. Idea druku 3D, czyli budowania/produkcji/wytwarzania/wytlaczania obiektów budowlanych w zautomatyzowanym procesie „on site” stanowi swoiste połączenie idei prefabrykacji przyobiektovej i monolitycznego budowania z betonu. Atrakcyjność takiego rozwiązania polega na możliwości rezygnacji z korzystania z form/deskowań, ograniczeniu pracy człowieka do minimum i oszczędności czasu wznoszenia konstrukcji [16].

Idea „wiecznotrwałości” betonu, także silnie związana z wyzwaniami zrównoważonego rozwoju, legła u podstaw nowych rozwiązań materiałowych w zakresie niemetalicznego zbrojenia betonu. Idea zastosowania alternatywnego zbrojenia spełniającego funkcję konstrukcyjną, ale niepodatnego na korozję chemiczną jest w ostatnich latach wdrażana w konstrukcjach z betonu na różne sposoby. Zagrożenie korozyjne zbrojenia stalowego jest jednym z istotnych wyznaczników projektowanego czasu życia konstrukcji żelbetonowych, zwłaszcza w środowiskach oddziaływania chlorków, a także w warunkach karbonatyzacji. Zbrojenie niemetaliczne (z tworzyw sztucznych czy szkła alkalioodpornego) w postaci włókien nie zastępuje zbrojenia konstrukcyjnego, ale poprawia jego trwałość i odporność na ekstremalne oddziaływania, w tym m.in. odporność na zarysowania skurczowe, obciążenia dynamiczne

Rys. 4. Sprzężenie „mikrostruktura – użyteczność” jako kreator kierunków rozwoju [1]



i ogniowe. Ciągłe zbrojenie niemetaliczne w postaci prętów lub taśm z tworzywa sztucznego zbrojonych wewnątrz włóknami z materiału o dużym module sprężystości może stanowić alternatywę dla prętów stalowych [17, 18]. Zbrojenie takie, określane wspólnym skrótem FRP (Fiber Reinforced Polymer) wykonywane jest w postaci polimerowej matrycy zbrojonej ciągłym lub rozproszonym zbrojeniem z nici szklanej, bazyłowej, węglowej, aramidowej. Wadą tego typu zbrojenia jest znaczna odkształcalność prętów, która sprawia, że na równi ze stanem granicznym nośności decydujący staje się stan graniczny ugięć. Problem stanowi także technologia przygotowania zbrojenia, które w warunkach budowy praktycznie nie może podlegać gięciu. W eksploatacji konstrukcji kłopotliwym zagadnieniem jest także odporność zbrojenia niemetalicznego na wysokie temperatury.

Z pojęciem betonu zrównoważonego łączą się również oczekiwania estetyczne. Obecnie jesteśmy świadkami transformacji: ten okropny beton – piękny beton.

### 3. Użyteczność betonu wyznacza kierunki rozwoju

Odkrywcą „czarnych dziur” J. A. Wheeler głosi, że wszystkie rzeczy fizyczne są z natury teoretyczne, są informacją. Jeśli można to stwierdzenie zastosować do rzeczy tak konkretnej jak beton („be concrete on concrete”), to w architekturze informacji o betonie można się dopatrzeć dwóch epicentrow tematycznych, użyteczność i mikro(nano)struktura (rys. 3). Mikrostruktura warunkuje właściwości betonu. Użyteczność betonu dokumentuje możliwości techniczne zakłębte w betonie. Użyteczność betonu potwierdzona przez realizacje kreuje wymagania w zakresie technologii wytwarzania i wznoszenia, a także użytkowania. Optymizm udanych realizacji daje asumpt do nowych wyzwań. Badania i studia nad mikrostrukturą ukazują możliwości i ograniczenia nowych rozwiązań materiałowych.

Po stronie użyteczności wymagania stale rosną. Odpowiedzi po stronie mikrostruktury szukamy zwłaszcza poprzez dobór składników/modyfikatorów, zużywaną energię, a w szczególności współdziałanie między składnikami – synergiją [19].

W samym zbliżeniu mikrostruktura ↔ użyteczność można się dopatrywać układu synergistycznego – tworzącego wartości dodane. Możemy próbować odczytywać kierunki rozwoju (rys. 4). To przede wszystkim zrównoważony beton wysokiej użyteczności, ale także:

- lepszy beton z gorszych składników – zagospodarowanie materiałów odpadowych. To jest konieczność cywilizacyjna
- modelowanie informacji o budowaniu i zarządzanie informacją o obiekcie
- beton drukowany przestrzennie.

### 4. Wiodące idee

Idee powinny wyprzedzać innowacje [20]. W sprzężeniu „mikrostruktura-użyteczność” można się również dopatrywać – często tylko intuicyjnie odczytywanego – źródła wiodących idei. W sensie dosłownym jest to linia ciągła od nano-elementów strukturalnych do kilometrów dróg betonowych. Należy zauważyć, że sprzężenie „mikrostruktura – użyteczność” to układ samowzbudzający się: Użyteczność ↔ mikrostruktura, wyzwania ↔ uwarunkowania,

wymagania ↔ modyfikowanie.

Mamy do czynienia ze swoją wstęgą Möbiusa. Jest to łańcuch bez końca. Możemy starać się odczytać wiodące idee – na dziś (rys.5):

- zrównoważenie
- niezawodność i trwałość
- samoobsługowość
- budowanie w obiegu zamkniętym
- proenergetyczne użytkowanie
- beton homeostatyczny
- beton cyfrowy
- drukowanie przestrzenne betonu
- inteligentne konstrukcje z betonu.

Dwa nowe określenia to beton homeostatyczny i beton cyfrowy. Znaczenie betonu homeostatycznego zostało już wyjaśnione w rozdziale 3. Beton cyfrowy to byłby taki beton, którego wartości cech są określone nie w postaci zbiorów półzamkniętych, nie mniej niż, nie więcej niż, ale na podstawie wymagań obustronnie ograniczonych, przy małej rozpiętości zakresu – „w punkt!”

### 5. Podsumowanie

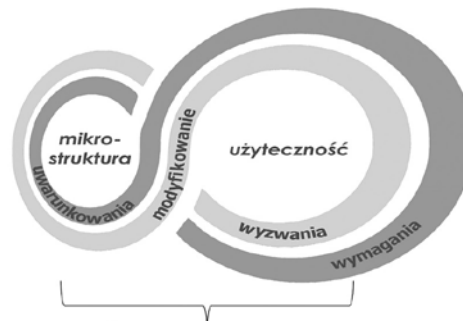
Przyjmując istnienie sprzężenia „mikrostruktura – użyteczność” jako szczególnej wstęgi Möbiusa, należałoby oczekiwać ciągłej aczkolwiek rozłożonej w czasie zmiany paradygmatu rozwoju betonu (rys. 6). I rzeczywiście, patrząc retrospektywnie, można wyróżnić: beton dużej wytrzymałości – beton dużej trwałości – beton zrównoważony – beton o zdefiniowanej użyteczności. Jest przy tym znaczące, że hasła poprzednie nie tracą aktualności, a zostają niejako zaabsorbowane przez nowy termin.

Pytanie, czy beton przyszłości to beton cyfrowy (ang. digital concrete), pozostaje otwarte, niemniej jest fascynujące.

**Lech Czarnecki**  
**Instytut Techniki Budowlanej Warszawa**  
**Piotr Woyciechowski**  
**Politechnika Warszawska**

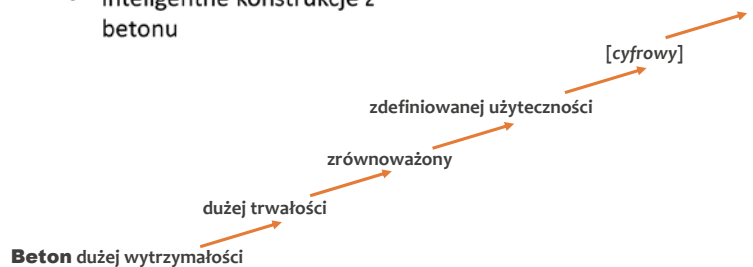
#### Literatura

1. Czarnecki L., Woyciechowski P., 10 Dni Betonu w XXI wieku, SPC 2018
2. Neville A., Właściwości betonu, SPC 2002, SPC 2012
3. Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, SPC Kraków 2010
4. Ajdukiewicz A., Konstrukcje z betonu sprężonego, SPC Kraków 2008
5. Kiernożycki W., Betonowe konstrukcje masywne, SPC Kraków 2004
6. Deja J. i inni: abc betonu, SPC Kraków 2002
7. Scrivener K., Kierunki rozwoju cementu i betonu, Dni Betonu: Tradycja i nowoczesność, Konferencja Wista 10-12.10 2016, SPC Kraków 2016
8. Scrivener K., Kirkpatrick R., Innovation in use and research on cementitious material, Cement and Concrete Research, 38, 2, 2008
9. Deja J., Kołodziej Ł., Cementy i betony dla budownictwa przyszłości, 63 Konferencja KLIW PAN i KN PZITB, Krynica Zdrój, 17-22 września 2017 r.
10. Czarnecki L., Sokołowska J.J. Material model and revealing the truth, Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences. Vol. 63, No. 1, 7-14, 2015
11. Czarnecki L., Nanotechnologia w budownictwie, Przegląd Budowlany 1/2011, 40-53
12. Horszczaruk E. Rola nanokrzemionki w kształtowaniu właściwości betonów i zapraw cementowych, Dni



#### wiodące idee:

- zrównoważenie
- niezawodność i trwałość
- samoobsługowość
- budowanie w obiegu zamkniętym
- pro-energetyczne użytkowanie
- beton homeostatyczny
- beton cyfrowy
- drukowanie przestrzenne betonu
- inteligentne konstrukcje z betonu



**Beton dużej wytrzymałości**

Betonu: Tradycja i nowoczesność, Konferencja Wista 8-10.10 2018, SPC Kraków 2018

Rys. 6. Zmiana paradygmatu rozwoju betonu

13. Woyciechowski P. P., Kalinowski M., The Influence of Dosing Method and Material Characteristics of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Effectiveness of the Concrete Internal Curing, w: Materials, Vol. 11, No. 9, 1-21, 2018
14. Pichór W., Betony inteligentne, Dni Betonu: Tradycja i nowoczesność, Konferencja Wista 10-12.10 2016, SPC Kraków 2016
15. Łukowski P., Modyfikacje betonu, SPC Kraków 2016
16. Olek J., Betonowe konstrukcje na zamówienie w druku 3D, Dni Betonu: Tradycja i nowoczesność, Konferencja Wista 8-10.10 2018, SPC Kraków 2018
17. Mossakowski P., Garbacz A., Radomski W., Alternatywne zbrojenie betonu kompozytami FRP – zagadnienie kompatybilności, Dni Betonu: Tradycja i nowoczesność, Konferencja Wista 13-15.10 2014, SPC Kraków 2014
18. Kotynia R., Michel J., Staśkiewicz Ch., Czaderski M., Motavalli M., Pionierskie wzmocnienie kablobetonowych dźwigarów przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych kotwionych metodą gradientową w mocie przez rzekę Pisię w Szczercowskiej Woli, Dni Betonu: Tradycja i nowoczesność, Konferencja Wista 13-15.10 2014, SPC Kraków 2014
19. Flaga K., Beton jako kompozyt, Konferencja Beton na progu nowego milenium, Kraków 9-10 listopada 2000
20. Czarnecki L., Deja J., Furtak K., Halicka A., Kapliński O., Kaszyńska M., Kruk M., Kuczyński K., Szczechowiak E., Śliwiński J., Idee kształtujące innowacyjne wyzwania techniki budowlanej. Kierunki rozwoju., Materiały Budowlane 7/2017, str. 34-39