

Załącznik 3

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko: Daniel Wałach

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- a. 2000 r.: magister inżynier, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górniczy, kierunek Budownictwo, w zakresie Geotechnika i budownictwo specjalne, tytuł pracy magisterskiej: *Wpływ wstrząsów i drgań komunikacyjnych na odporność obiektów i budowli w aglomeracji miejskiej*. Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Majcherczyk.
- b. 2009 r.: doktor nauk technicznych, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, tytuł rozprawy doktorskiej: *Rozwarcie rys ukośnych w przypodporowej strefie belek wykonanych z betonu wysokowartościowego*. Promotor: dr hab. inż. Tadeusz Ciężak, prof. Politechniki Lubelskiej.

3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

- a. 01.10.2000 r. do 30.06.2009 r.: asystent naukowo-dydaktyczny w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej;
- b. 1.07.2009 r. do chwili obecnej: adiunkt w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. W Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):

a. Tytuł osiągnięcia naukowego:

Cykl publikacji powiązanych tematycznie:

Wybrane właściwości betonów wysokowartościowych (HPC) i samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych (HPSCC) w świetle zintegrowanego projektowania obiektów budowlanych

b. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

- [1] **Daniel Wałach** (2016): *Impact of the research conditions on the accuracy of the designation of high performance concrete strength parameters*. Archives of Civil Engineering Polish Academy of Sciences. Institute of Fundamental Technological Research. Committee for Civil Engineering. ISSN 1230-2945, vol. 62 iss. 4 pt. 1, s. 139-151.

Praca samodzielna. Wkład w powstanie pracy: 100%.

- [2] Piotr Dybeł, **Daniel Wałach** (2018): *Influence of silica fume content on bond behaviour of reinforcement in HPSCC*. Magazine of Concrete Research. ISSN 0024-9831, vol. 70 iss. 19, s. 973-983.

Mój wkład w powstanie pracy obejmował współopracowanie planu badań określającego ich cel i przebieg, w tym opracowanie zestawu receptur mieszanek betonowych, współwykonanie próbek badawczych oraz przeprowadzenie badań przyczepności stali zbrojeniowej do betonu wraz z analizą uzyskanych wyników. W zakresie redagowania tekstu, samodzielnie opracowałem rozdziały: „Introduction”, „Previous investigation” oraz współredagowałem części: „Analysis procedure”, „Results and discussion” oraz „Conclusions”.

Mój udział procentowy w pracy szacuję na: 50%.

- [3] Piotr Dybeł, **Daniel Wałach**, Krzysztof Ostrowski (2018): *The top-bar effect in specimens with a single casting point at one edge in high-performance self-compacting concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology. ISSN 1346-8014, vol. 16 no. 7, s. 282-292.

Mój udział w pracy obejmował współopracowanie koncepcji prac badawczych, częściowe wykonanie badań laboratoryjnych w zakresie badań przyczepności oraz przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników. W zakresie redakcyjnym, opracowałem rozdziały: „Introduction”, „Conclusions”, oraz współredagowałem części: „Experimental programme”, „Analysis procedure” oraz „Results and Discussion”.

Mój udział procentowy w pracy szacuję na: 40%.

- [4] **Daniel Wałach** (2016): *Impact of separated bottom ashes on the parameters of concrete mix and hardened concrete*. E3S Web of Conferences. ISSN 2267-1242, vol. 10 art. no. 00099, s. 1-7.

Praca samodzielna. Wkład w powstanie pracy: 100%.

- [5] **Daniel Wałach**, Marek Cała, Krzysztof Ostrowski, Justyna Jaskowska-Lemańska (2017): *Analiza wpływu separowanych popiołów dennych na mrozoodporność betonu*. Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym. ISSN 2299-8535, nr 1 (19), s. 47-54.

Mój wkład w powstanie pracy polegał na współpracowaniu planu badań w tym zaprojektowaniu składu mieszanek betonowych potrzebnych do osiągnięcia celu pracy, częściowym wykonaniu badań laboratoryjnych w zakresie badań mrozoodporności wraz z analizą uzyskanych wyników. W zakresie redakcji tekstu opracowałem rozdziały: „Wprowadzenie” i „Charakterystyka zastosowanych popiołów dennych”, jednocześnie uczestniczyłem w redagowaniu rozdziałów: „Program badań”, „Wyniki badań mrozoodporności” oraz „Podsumowanie”.

Mój udział procentowy w przygotowaniu pracy szacuję na: 60%.

- [6] Piotr Dybeł, **Daniel Wałach** (2017): *Evaluation of the development of bond strength between two concrete layers*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. ISSN 1757-8981, vol. 245 art. no. 032056, s. 1-8.

Mój wkład w powstanie pracy polegał na współpracowaniu koncepcji prac badawczych, współwykonaniu projektu składu zastosowanych w badaniach mieszanek betonowych, wykonaniu badań laboratoryjnych w zakresie badań nośności połączeń zespolonych wraz z analizą uzyskanych wyników. W zakresie redakcji tekstu opracowałem część wprowadzającą (rozdział 1) oraz współredagowałem rozdziały: „Experimental procedure” oraz „Results and Discussion”.

Mój udział procentowy w pracy szacuję na: 50%.

- [7] **Daniel Wałach** (2016): *Impact of delays during concreting of reinforced high-performance concrete beams*. Procedia Engineering. ISSN 1877-7058, vol. 161, s. 356-361.

Praca samodzielna. Wkład w powstanie pracy: 100%.

- [8] **Daniel Wałach** (2014): *Możliwości powtórnego wykorzystania kruszywa pochodzącego z recyklingu betonów wysokowartościowych*. Logistyka. ISSN 1231-5478, s. 14855-14864.

Praca samodzielna. Wkład w powstanie pracy: 100%.

- [9] **Daniel Wałach**, Joanna Sagan, Justyna Jaskowska-Lemańska (2017): *Environmental assessment in the integrated life cycle design of buildings*. Technical Transactions. ISSN 0011-4561, vol. 8, s. 143-151.

Mój wkład w powstanie pracy polegał na sformułowaniu problemu badawczego, współpracowaniu metody oceny aspektów środowiskowych oraz zaprojektowaniu analizowanej konstrukcji budowlanej. W zakresie redakcji tekstu opracowałem rozdziały: „Introduction”, „Example of environmental assessment at the engineering stage”, ponadto współredagowałem części: „Methods used to assess environmental impact of buildings”, „Summary and final conclusions”.

Mój udział procentowy w pracy szacuję na: 70%.

- [10] **Daniel Wałach**, Joanna Sagan, Magdalena Gicala (2017): *Assessment of material solutions of multi-level garage structure within integrated life cycle design process*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. ISSN 1757-8981, vol. 245 art. no. 072027, s. 1-9.

Mój wkład w powstanie pracy polegał na sformułowaniu problemu badawczego, współpracowaniu metody oceny aspektów środowiskowych i ekonomicznych, zaprojektowaniu analizowanej konstrukcji budowlanej. W obszarze redakcyjnym wykazałem się samodzielną pracą nad rozdziałami: „Introduction”, „Subject and scope of evaluation” oraz współredakcją części: „Results and discussion” i „Conclusions”.

Mój udział procentowy szacuję na: 70%.

- [11] **Daniel Wałach**, Piotr Dybeł, Joanna Sagan, Magdalena Gicala (2019): *Environmental performance of ordinary and new generation concrete structures — a comparative analysis*. Environmental Science and Pollution Research. ISSN 0944-1344 vol. 26, Issue: 4, s. 3980–3990.

Mój wkład w powstanie pracy polegał na sformułowaniu problemu badawczego, współpracowaniu metody oceny aspektów środowiskowych oraz zaprojektowaniu analizowanej konstrukcji budowlanej. W zakresie redagowania tekstu publikacji samodzielnie opracowałem rozdziały: „Introduction”, „Tools and methods” oraz „Conclusions”, jednocześnie współuczestniczyłem w redakcji części: „Composition of concrete mixtures”, „Environmental impact indicators”, „Description of the analysed structure” oraz „Results and discussion”.

Mój udział procentowy w obrębie pracy szacuję na: 70%.

c. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników:

Prezentowany cykl powiązanych tematycznie publikacji obejmuje jedenaście pozycji [4.b.1÷4.b.11], siedem z nich indeksowanych jest w bazach Web of Science (WoS) oraz Scopus [4.b.2÷4.b.4, 4.b.6, 4.b.7, 4.b.10, 4.b.11], cztery opublikowano w czasopismach znajdujących się na Liście Filadelfijskiej [4.b.1÷4.b.3, 4.b.11], z czego trzy z tych czasopism znajdują się w bazie Journal Citation Reports (JCR) [4.b.2÷4.b.3, 4.b.11], cztery publikacje znajdują się na liście B czasopism punktowanych MNiSW [4.b.1, 4.b.5, 4.b.8, 4.b.9].

Spośród prac stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy, cztery [4.b.4, 4.b.6, 4.b.7, 4.b.10] zostały zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach naukowych o tematyce zbieżnej z tematyką podjętych badań. Referaty zostały opublikowane w recenzowanych materiałach konferencyjnych indeksowanych w bazach Web of Science (WoS) oraz Scopus. Wymienione powyżej publikacje wchodzące w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie stanowią jedynie wybrane pozycje, pełny wykaz publikacji zaliczających się do mojego dorobku naukowego przedstawiono w Załączniku 4 do wniosku.

Wprowadzenie

Identyfikacja antropogenicznej degradacji środowiska doprowadziła do zmiany trendów społeczno-gospodarczych na świecie, czego konsekwencją jest idea zrównoważonego rozwoju

(*sustainable development*), która stała się w ostatnich latach centralnym punktem rozważań naukowych jak i wyzwaniem dla podmiotów gospodarczych (praktyków). W tym kontekście należy dostrzec istotny wpływ branży budowlanej na zmiany zachodzące w środowisku. Komisja Europejska (COM 445 2014) stwierdziła, że wznoszenie obiektów budowlanych wraz z ich użytkowaniem odpowiada za około połowę wszystkich wydobywanych surowców i zużycia energii oraz za około jedną trzecią zużycia wody w obszarze UE. Przedmiotowy sektor generuje również blisko jedną trzecią wszystkich odpadów oraz w sposób istotny przyczynia się do globalnej emisji GHG (gazów cieplarnianych).

Przytoczona statystyka podkreśla szczególną odpowiedzialność branży za wdrażanie zrównoważonych wzorców produkcyjnych w rozumieniu produkcji budowlanej, a więc uwzględniającą wszystkie jej etapy. Negatywne oddziaływanie obiektów budowlanych na środowisko przejawia się na każdym etapie cyklu życia budynku. W związku z powyższym, należy podkreślić kluczowość etapu projektowania w kształtowaniu zrównoważenia obiektu budowlanego ze względu na fakt, iż możliwości oddziaływania na charakterystyki eksploatacyjne w fazie projektowania są istotnie większe niż w fazie samej eksploatacji oraz budowy (wytwarzania).

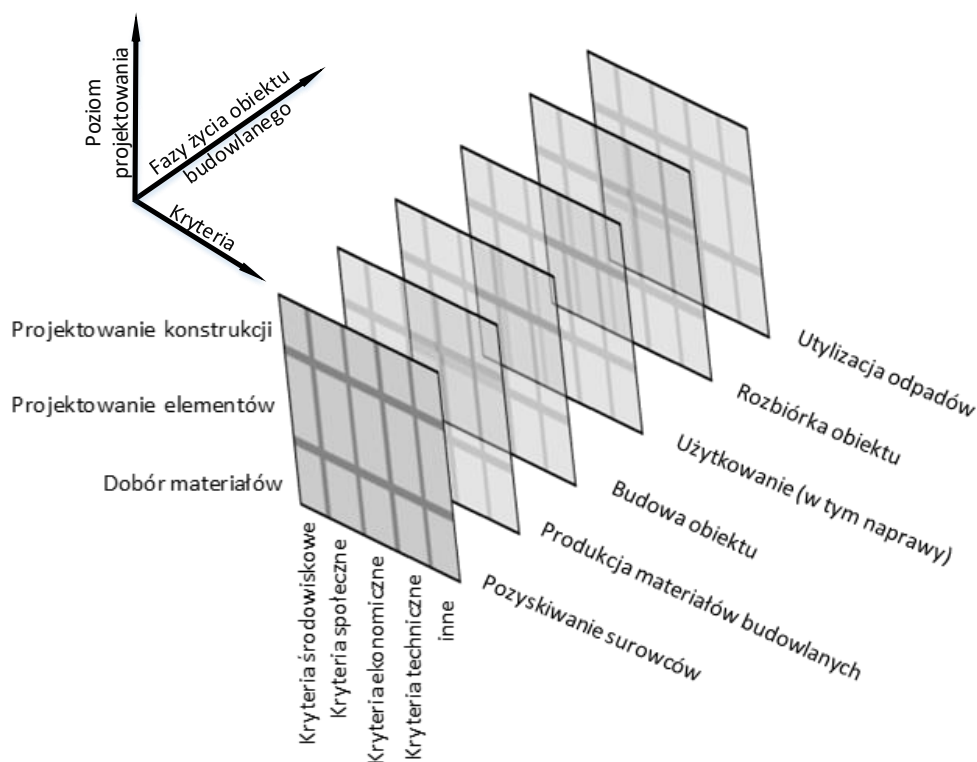
Z uwagi na potrzebę dostosowania rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych do standardów zrównoważonego rozwoju, niezbędna wydaje się być analiza i ocena zarówno istniejących technologii oraz tych wdrażanych i rozwijanych od niedawna. Ma to szczególne znaczenie w przypadku konstrukcji betonowych, które ze względu na czynniki materiałowo-kosztowe stanowią znaczący udział we wszystkich nowo budowanych obiektach. Należy zauważyć, że w samej Unii Europejskiej roczna produkcja betonu wynosi blisko 224 mln m³ (ERMCO 2014). Wraz ze wzrostem obciążeń oddziałujących na element betonowy, przy równoczesnej tendencji do zmniejszania przekrojów poprzecznych tych elementów, współczesna technologia betonów zwykłych okazuje się być niewystarczająca. Dlatego też, w ciągu ostatnich dziesięcioleci, nieustanny postęp w technologii betonu zaowocował opracowaniem betonów nowej generacji o znacznie ulepszonych właściwościach nie tylko pod względem wytrzymałości i trwałości, ale także reologii. Do takich betonów możemy zaliczyć między innymi beton wysokowartościowy (HPC) zwanym również wysokowytrzymałościowym oraz samozagęszczalny beton wysokowartościowy (HPSCC), który powstał na bazie koncepcji betonu samozagęszczalnego (SCC) i wysokowartościowego (HPC). Zgodnie ze statystyką prowadzoną i opublikowaną przez European Ready Mixed Concrete Organization, jedynie 11% betonu towarowego to beton wysokowartościowy HPC (ERMCO 2012). Analiza statystyk produkcji HPC przeprowadzona przez (Pacheco-Torgal 2014) wskazuje, że trendy te się nie zmieniają. Ograniczone wykorzystanie tego materiału, może wynikać z pochopnie wyciąganych wniosków o niskiej efektywności ekonomicznej i środowiskowej tej technologii, co jest często wynikiem prowadzenia analiz ograniczonych do wskaźników jednostkowych, wyznaczanych jedynie w obszarze produkcji tego typu betonów.

Prezentowane w moich pracach [4.b.9÷4.b.11] analizy, obejmujące zagadnienia wychodzące poza obszar produkcji betonu, przyczyniły się jednak do rosnącej świadomości współzależności wyników oceny technologii betonów wysokowartościowych od zbioru parametrów (odległości transportowych, dostawcy cementu i kruszywa, technologii i sposobu układania mieszanki, itp.). Wspomniana zależność jest wynikiem indywidualnego charakteru każdego przedsięwzięcia budowlanego, w obrębie którego można wyróżnić zbiór istotnych czynników wpływających ostatecznie na wynik oceny. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest ograniczona możliwość wyciągania generalnych wniosków o technologii oraz potrzeba prowadzenia analiz porównawczych każdorazowo w obrębie przedsięwzięcia, stosując współcześnie rozwijane podejście projektowe zwane zintegrowanym projektowaniem cyklu życia obiektu budowlanego.

Dotychczas w projektowaniu obiektów budowlanych dominującym aspektem były kwestie funkcjonalno-konstrukcyjne. Priorytet stanowiło uzyskanie rozwiązania konstrukcyjnego

o wymaganej charakterystyce, gwarantującego zaspokojenie potrzeb inwestora i użytkowników obiektu budowlanego, przy zachowaniu możliwie niskich nakładów inwestycyjnych. Przedział czasowy, w obrębie którego najczęściej rozpatrywano efektywność przyjętych rozwiązań, obejmował jedynie etap realizacji obiektu budowlanego oraz okres gwarancji. Niemniej jednak, na kanwie zrównoważonego rozwoju zrodziło się nowe podejście w projektowaniu, uwzględniające wszystkie wymagania stawiane zrównoważonemu budownictwu w jednym procesie projektowym, zwanym z języka angielskiego ILCD - *integrated life-cycle design*. Początkowo, w Polsce proces ten nazywano zintegrowanym projektowaniem na okres użytkowania (Ajdukiewicz 2011; Wałach, Sagan, and Jaskowska-Lemańska 2017). Jednak z uwagi na ramy oceny obejmujące wszystkie fazy życia obiektu od „kołyski po grób”, lepszym odpowiednikiem wydaje się być nazwa „**zintegrowane projektowanie cyklu życia obiektu budowlanego**”. Z uwagi na wielozłożowość nazwy, zarówno w tytule jak i w dalszej części opracowania zastosowano skróconą wersję nazwy tj. „**zintegrowane projektowanie**”.

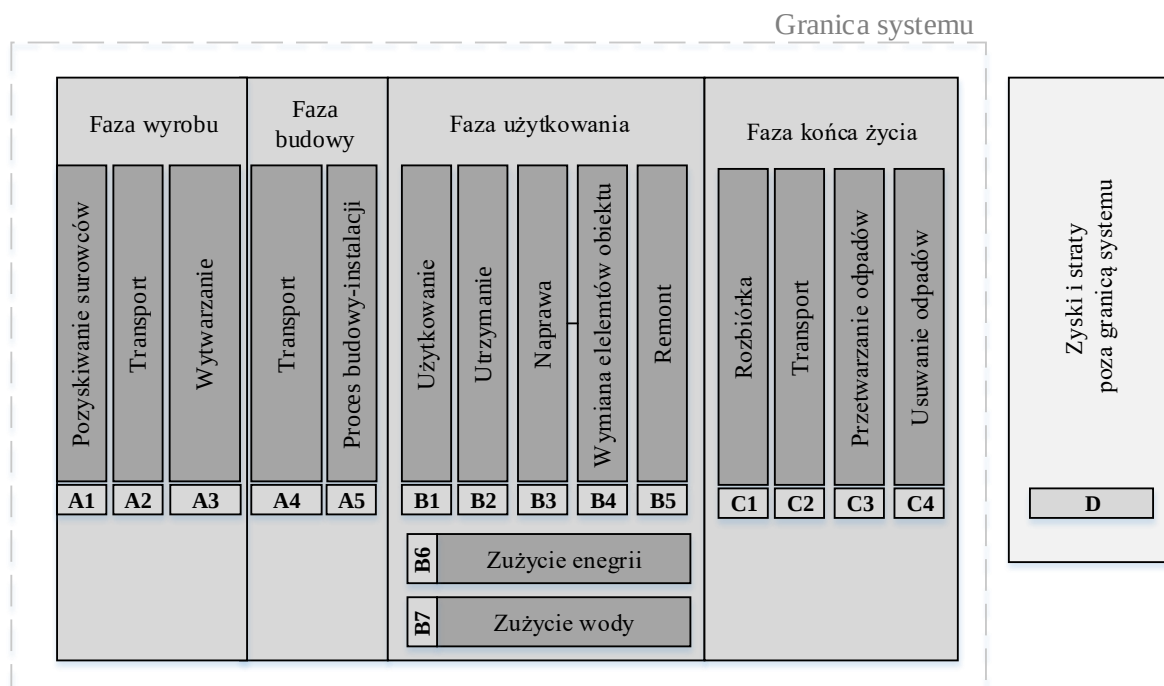
Nowe podejście łączy w sobie projektowanie obiektu na poziomie materiału, elementu konstrukcyjnego jak i całej konstrukcji, przy jednoczesnej ocenie rozwiązań projektowych w zakresie spełnienia **wymagań technicznych oraz efektywności w wymiarze ekonomicznym, środowiskowym oraz społecznym**. Uwzględnienie wyżej wymienionych wymagań w projektowaniu obiektów budowlanych, czyni proces projektowy złożonym oraz interdyscyplinarnym. Koncepcja zakłada podział cyklu życia obiektu budowlanego na moduły, w obrębie których dokonuje się ocen rozwiązań projektowych na trzech kolejnych poziomach projektowania (rys. 1). Tym samym projektowanie przyjmuje złożoną, trójwymiarową postać (Hajek et al. 2013).



Rys. 1. Model 3D zintegrowanego projektowania wg (Hajek et al. 2013)

Cykl życia obiektu budowlanego można podzielić na moduły informacyjne, które można traktować jako podsystemy, reprezentujące kolejne etapy jego życia począwszy od pozyskiwania surowców niezbędnych do produkcji wyrobów budowlanych po moduły związane z fazą końca życia, co opisuje norma PN-EN 15643-2:2011 *Zasady oceny właściwości środowiskowych*. W związku

z powyższym, strukturę systemu podlegającego ocenie w kontekście zintegrowanego projektowania przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura systemu budynku – moduły informacyjne wg PN-EN 15643-2:2011

Zintegrowane projektowanie nie zostało jeszcze upowszechnione w praktyce. Należy jednak zauważyć, że pomimo problemów z przeprowadzeniem takiego procesu, zdaje się on być podejściem właściwym i perspektywicznym, wymagającym jedynie dalszego rozwijania wiedzy i narzędzi w tym obszarze.

Do roku 2017 moje zainteresowania koncentrowały się na parametrach materiałowych betonów nowej generacji [4.b.1÷4.b.8], a więc w obszarze kryteriów technicznych zintegrowanego projektowania. Poznanie charakterystyki materiałowej betonów wysokowartościowych, zdobycie doświadczenia w projektowaniu ich receptur oraz znajomość pochodzenia półproduktów oraz procesów ich wytwarzania, przy jednoczesnej świadomości wyżej opisanych potrzeb oceny technologii w pozostałych wymiarach, doprowadziło mnie do postawienia hipotezy o wysokiej efektywności ekonomicznej i środowiskowej betonów nowej generacji w porównaniu z technologią betonu zwykłego (dotychczasowe badanie nie obejmują aspektu społecznego). Postawiona hipoteza wynika z szeregu cech materiałowych HPC i HPSCC, które można elastycznie kształtować za pośrednictwem składników i ich proporcji w mieszance betonowej. Ich wysoka wytrzymałość pozwala redukować przekroje elementów konstrukcyjnych, a w związku z tym ograniczyć zarówno eksploatację nieodnawialnych zasobów, jak i procesy transportowe półproduktów oraz samej mieszanki betonowej. Substytucja masy cementu m.in. materiałami pucolanowymi pochodzenia antropogenicznego, pozwala nie tylko ograniczać zużycie energochłonnego cementu, ale także zagospodarować materiał odpadowy. Trwałość tego materiału umożliwia wydłużenie okresu użytkowania obiektu przy równoczesnym ograniczeniu napraw. Wyżej wymienione oraz inne zalety betonów HPC i HPSCC, stwarzają potencjalną możliwość korzystnego kształtowania ich profilu środowiskowego i ekonomicznego. Można to zrealizować poprzez:

1. Projekt mieszanki betonowej, w tym:
 - dobór odpowiedniego rodzaju cementu,
 - dobór kruszywa,

- dobór dodatków i domieszek,
- stosowanie materiałów z recyklingu, i inne.
- 2. Projekt i dobór zbrojenia, tj.:
 - wybór rodzaju zbrojenia (stalowe lub z tworzyw sztucznych),
 - dobór jego średnicy, sposobu rozmieszczenia i ukształtowania (pręty odgięte, zbrojenie uzwojone, kotwienie zbrojenia, itp.).
- 3. Projekt konstrukcji, w tym:
 - wybór korzystniejszych, ze względu na założone naprężenia, schematów statycznych,
 - przyjęcie wymiarów do założonych funkcji budynku,
 - konstruowanie i wymiarowanie przekrojów, itp.
- 4. Dobór technologii betonowania i pielęgnacji betonu, a więc:
 - wybór sposobu transportu mieszanki betonowej,
 - wybór technologii betonowania,
 - dobór przerw roboczych,
 - dobór metody pielęgnacji świeżego betonu,
 - inne.

Niemniej jednak, aby opracowane rozwiązania oceniać i porównywać w pełni obiektywnie, należy stosować kompleksowe narzędzia i metody pozwalające na przeprowadzenie analiz w obrębie całego cyklu życia obiektu budowlanego. Przeprowadzone w moich pracach [4.b.9÷4.b.11] analizy potwierdzają jednak obserwacje Komisji Europejskiej (COM 445 2014) jak i agendy Organizacji Narodów Zjednoczonych skoncentrowanej na ochronie środowiska naturalnego UNEP (United Nations Environment Programme) (UNEP 2014) o braku m.in. narzędzi do oceny różnych wariantów inwestycji, niedostatecznej ilości danych w zakresie oddziaływania na środowisko poszczególnych procesów budowlanych oraz nieujednoliconej metodyki oceny. Dlatego też, dostrzegając potrzebę rozwijania wiedzy, metod i narzędzi w obrębie zintegrowanego projektowania konstrukcji, podjąłem się prowadzenia badań w tym obszarze ze szczególnym ukierunkowaniem na konstrukcje betonowe.

W nawiązaniu do przedstawionego celu naukowego w pracach [4.b.1÷4.b.8] przedstawiłem wyniki badań wybranych właściwości betonów HPC i HPSCC, pogłębiające wiedzę w zakresie spełnienia przez te materiały wymogów technicznych. Drugi omawiany obszar zagadnień, opisany w pracach [4.b.9÷4.b.11], dotyczy analizy efektywności finansowej i środowiskowej betonów wysokowartościowych, a więc pozostałych dwóch aspektów, jakie należy uwzględniać w procesie zintegrowanego projektowania, ze szczególnym akcentem kwestii środowiskowych.

Wybrane właściwości betonów HPC i HPSCC w świetle kryteriów technicznych

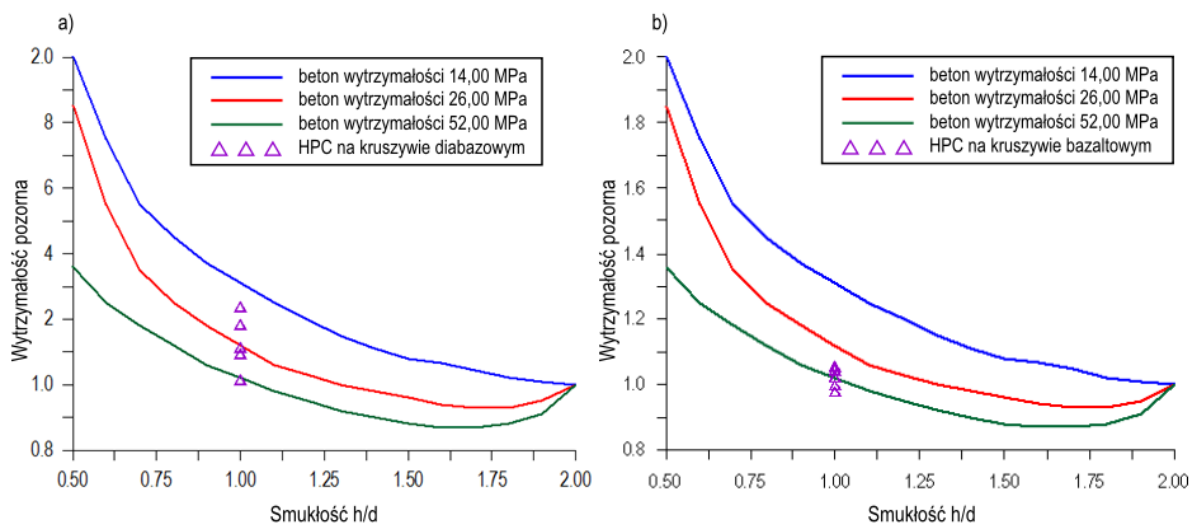
Metodyka badań wytrzymałości na ściskanie betonów HPC i HPSCC

Najważniejszą cechą betonów HPC i HPSCC cenioną przez projektantów, a odróżniającą je od betonów zwykłych, jest ich wysoka wytrzymałość. Wzrost nośności elementów konstrukcyjnych, pozwala na swobodniejsze kształtowanie architektury obiektów budowlanych, a określona przy tym wytrzymałość materiału wpływa na zachowanie jej stateczności, czyli stan graniczny nośności i użytkowości konstrukcji. Należy zauważyć, że w praktyce uzyskiwane wartości wytrzymałości betonów na ściskanie zależą nie tylko od samej ich mikrostruktury, ale również od warunków, w jakich parametr ten został określony. Odnosi się to m.in. do wielkości próbek oraz prędkości ich obciążania podczas prowadzonych badań.

Użycie mniejszych niż normowe próbek w badaniach wytrzymałościowych betonów o wysokiej wytrzymałości może być ważne w odniesieniu do wymaganej siły nacisku pras laboratoryjnych w kontekście ich technicznych możliwości. Badanie „małych” próbek może być również przydatne do

oceny stanu technicznego obiektów. Związane jest to z koniecznością pobierania rdzeni małosrednicowych używanych do określania wytrzymałości zastosowanego betonu. Wiedza na temat korelacji między różnymi wielkościami próbki pozwala na prawidłową ocenę wytrzymałości betonu w konstrukcji, ale również prawidłowo porównywać uzyskiwane wyniki badań. Analiza wytrzymałości betonu przy różnej prędkości działania obciążenia jest istotna dla oceny niezawodności elementów znajdujących się pod wpływem obciążeń zmiennych, w tym wyjątkowych. Kwestie te w odniesieniu do betonu zwykłego są powszechnie znane, ale w betonach HPC ze względu na ich mikrostrukturę i składniki możemy spodziewać się odmiennych zależności.

Przeprowadzone przeze mnie badania [4.b.1] wykazały, że w przypadku betonów HPC różnice wytrzymałości na ściskanie określone na próbkach walcowych o różnych smukłościach są zdecydowanie mniejsze niż w przypadku betonów zwykłych (rys. 3). Otrzymane wyniki badań potwierdzają teorię (Murdock and Kelser 1957), że wartości współczynników poprawkowych zależą również od wartości wytrzymałości betonu. Wytrzymałość betonu HPC jest, zatem, mniej podatna na zmiany proporcji próbki badawczej oraz jest mniej zależna od kształtu samej próbki. Z powyższych rozważań wynika, że w przypadku betonów wysokowartościowych wytrzymałość na ściskanie określana na próbkach walcowych o smukłościach mniejszych niż 2 nie odbiega znacząco od tych określanych na próbkach normowych o stosunku $h/d = 2$.

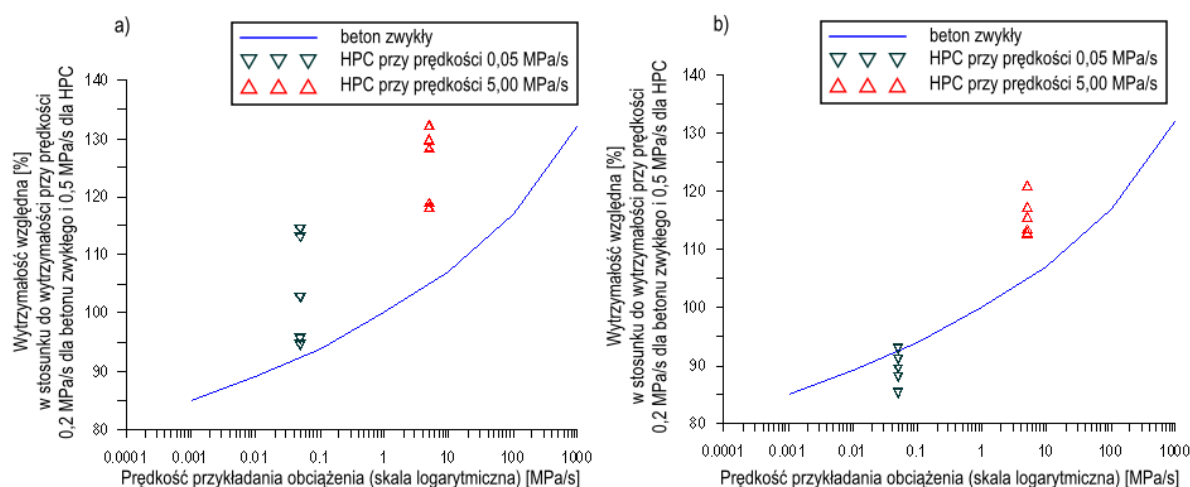


Rys. 3. Wpływ smukłości na wytrzymałość względną próbki walcowej wykonanej z betonu o różnych wytrzymałościach (Murdock and Kelser 1957) i badanego HPC: a) na kruszywie z diabazu, b) na kruszywie z bazaltu [4.b.1]

Uzyskane wyniki badań wykazały także, że w przypadku betonów wysokowartościowych wytrzymałość na ściskanie określana na „mniejszych” próbkach nie odbiega znacząco od tych określanych na próbkach normowych, czyli na próbkach kostkowych $15 \times 15 \times 15$ cm i walcach $\varnothing 15 \times 30$ cm. Może to być związane z faktem, iż w betonach HPC stosuje się kruszywa o znacznie mniejszych frakcjach w porównaniu do betonów zwykłych, co może wpływać m.in. na efekt ściany. Należy podkreślić, że przedmiotowy efekt jest tym wyraźniejszy, im większy jest stosunek powierzchni do objętości próbki. W przypadku badanych próbek kostkowych $10 \times 10 \times 10$ cm, wykonanych zarówno na diabazie jak i bazalcie, nie zarejestrowano istotnych różnic wytrzymałości w porównaniu do badań wykonanych na próbkach normowych $15 \times 15 \times 15$ cm. W przypadku próbek walcowych $\varnothing 5,5 \times 11$ cm różnice te wyniosły ok. 6% dla HPC wykonanego na diabazie oraz ok. 7% dla próbek wykonanych na bazalcie.

W odniesieniu do prędkości przykadanego obciążenia, w badanych betonach HPC zarejestrowano znacznie wyższy wzrost wytrzymałości przy tzw. „szybkim” badaniu niż w przypadku

betonów zwykłych (rys. 4). Dla próbek wykonanych na diabazie i badanych z prędkością 5,0 MPa/s uzyskano średnio 25% wzrost wytrzymałości w stosunku do próbek badanych z prędkością normową. Dla próbek wykonanych na bazalcie różnice te wyniosły ok. 16%. Zarówno w jednym jak i w drugim przypadku różnice te są znacząco większe niż w przypadku betonów zwykłych.



Rys. 4. Wpływ prędkości przykładania obciążenia na wytrzymałość względną próbki kostkowej wykonanej z betonu zwykłego (McHenry and Shideler 1956) i badanego HPC: a) na kruszywie z diabazu, b) na kruszywie z bazaltu [4.b.1]

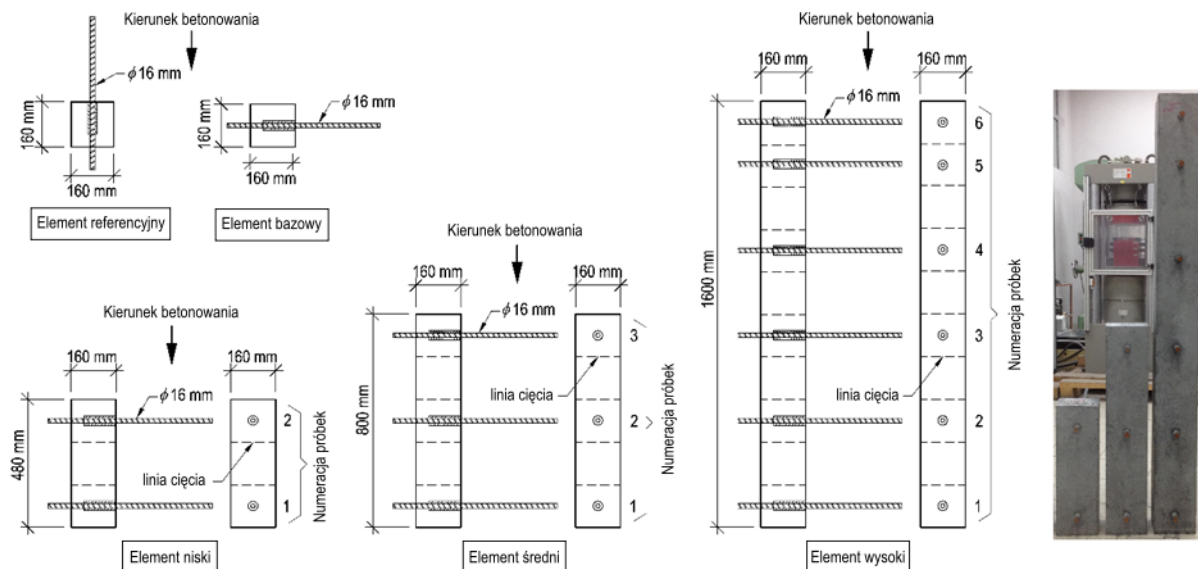
Uzyskane wyniki badań wytrzymałości HPC potwierdzają istotny wpływ prędkości przyrostu naprężeń na wynik badania przy prędkościach większych od normowych. Wzrost nośności zarejestrowany w HPC jest większy niż w betonie zwykłym i może to mieć istotne znaczenie w przypadku konstrukcji poddanych np. obciążeniom wyjątkowym.

Wpływ dodatków na wybrane właściwości betonów HPC i HPSCC

Uzyskanie wysokich wytrzymałości betonu, a także odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej, wymaga przyjęcia specyficznego składu i proporcji składników. Mieszanki betonu HPC i HPSCC charakteryzują się w stosunku do betonów zwykłych zwiększoną zawartością cementu portlandzkiego, domieszek upłynniających (SP) oraz reaktywnych dodatków mineralnych. Najczęściej stosowanym dodatkiem mineralnym do betonów wysokowartościowych jest pył krzemionkowy (SF) zwany również mikrokrzemionką, będący odpadem przemysłu hutniczego powstającym przy produkcji krzemu metalicznego, żelazokrzemu i innych stopów krzemowych. Z tego względu wynikają pewne korzyści środowiskowe z ich zastosowania, co szerzej opisano w dalszej części autoreferatu. Według szeregu prac, korzystne właściwości pucolanowe (techniczne) mikrokrzemionki tkwią w jej rozdrobnieniu, co skutkuje rozwiniętą powierzchnią właściwą, a więc większą reaktywnością i wypełnieniem porów występujących w betonie. Mikrokrzemionka w sposób radykalny zmniejsza porowatość strefy przejściowej zaczynu z powierzchnią pręta zbrojeniowego. Zwiększenie dodatku pyłu krzemionkowego (przy odpowiednim wskaźniku w/c) poprawia zatem przyczepność pierwotną betonu do prętów zbrojeniowych, to znaczy przyczepność typu adhezyjnego.

Literatura przedmiotu podaje, że dla elementów konstrukcyjnych wykonanych z betonów wysokowartościowych (wysokowytrzymałościowych) modyfikowanych pyłem krzemionkowym, zbrojenie usytuowane w górnej części elementu badawczego wykazuje zbliżoną lub większą wartość granicznych naprężeń przyczepności od prętów zlokalizowanych w jego dolnej części (Desnerck, De Schutter, and Taerwe 2010; Domone 2007; Dybeł and Furtak 2014). Rezultaty uzależnione są od ilości dodatku pyłu krzemionkowego oraz od ilości superplastyfikatora. Potwierdzenie przedstawionych wyżej wniosków uzyskałem w pracy [4.b.2]. Jednak w przeprowadzonym przeze mnie eksperymencie,

elementy badawcze były tak zaprojektowane (rys. 5), aby umożliwić zarówno analizę wpływu lokalizacji prętów zbrojeniowych na przyczepność betonu przy zmiennym udziale pyłu krzemionkowego (0, 5, 10 i 15% masy cementu), a także określić wpływ ciśnienia mieszanki betonowej poprzez znaczne zróżnicowanie wysokości betonowanych elementów (480 mm, 800 mm i 1600 mm).

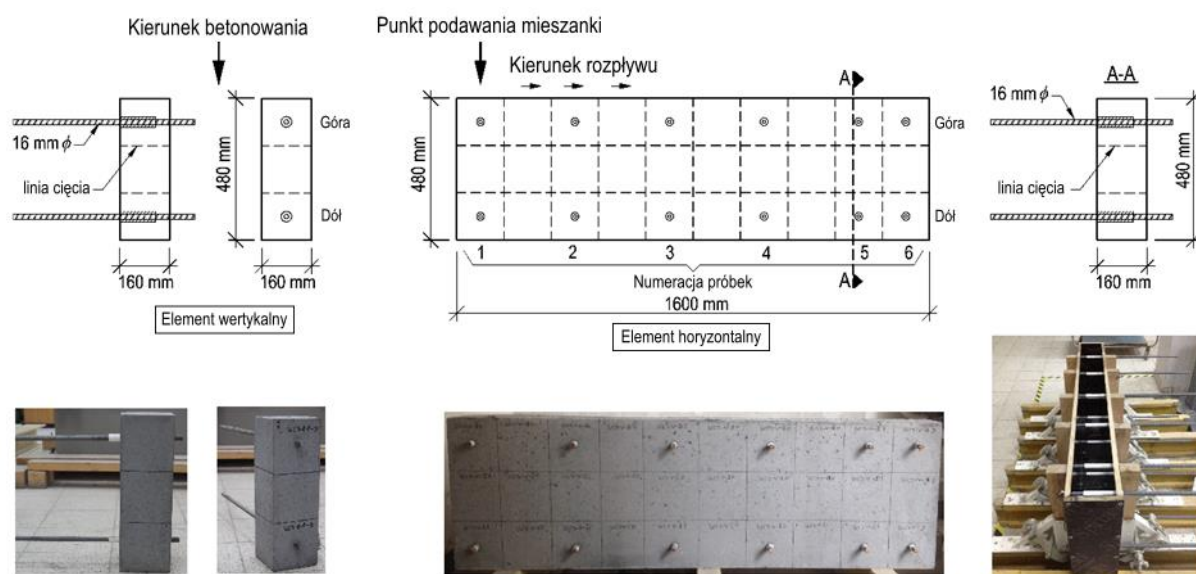


Rys. 5. Widok elementów badawczych i sposobu ich betonowania [4.b.2]

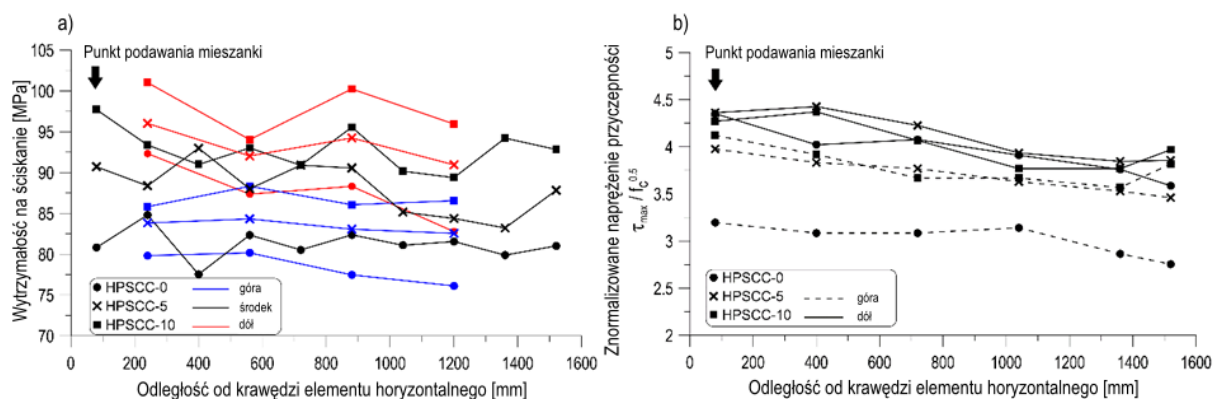
Zastosowanie pyłu krzemionkowego korzystnie wpłynęło na właściwości wiązań pomiędzy betonem i prętem zbrojeniowym położonym w górnej części elementów badawczych. Wzrost wartości granicznych naprężeń przyczepności uzależniony był od ilości dodatku pyłu krzemionkowego i wyniósł dla elementu niskiego od 6% do 13%, średniego od 8% do 15%, a dla elementu wysokiego od 18% do 30%. Związane jest to z poprawą spójności betonu, zmniejszeniem segregacji składników i wydzielania mleczka cementowego w górnej części elementów, czyli w miejscu zakończenia procesu betonowania. Dla prętów zbrojeniowych znajdujących się w dolnej części elementów, dodatek pyłu krzemionkowego spowodował niewielkie obniżenie wartości naprężeń przyczepności mimo większego ciśnienia samej mieszanki betonowej. W przeprowadzonych badaniach redukcja wyniosła do 8%.

Z uwagi na dostrzeżoną zmianę parametrów przyczepność wynikającą m.in. z segregacji składników mieszanki betonowej, w ramach kolejnych prac przeprowadziłem badanie wpływu czynników technologicznych związanych ze sposobem układania mieszanek betonu na wartość granicznych naprężeń przyczepności prętów oraz samej wytrzymałości na ściskanie betonu (rys. 6).

W pracy [4.b.3] udowodniłem m.in., że przy pojedynczym punkcie podawania mieszanki betonowej, betony HPSCC nie wykazują znacznego zróżnicowania wytrzymałości na ściskanie wzdłuż elementu (rys. 7a). Zanotowana średnia wartość redukcji wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich mieszanek użytych w eksperymencie wyniosła około 2%. Niemniej jednak, wykazałem, że w górnej części elementu na całej długości tworzy się strefa słabszej jakości betonu. Uśredniona wartość redukcji wytrzymałości na ściskanie próbek górnych względem próbek dolnych wyniosła 11%. Dodatkowo, redukcja ta okazała się zależeć od ilości zastosowanej mikrokrzemionki w betonie. Fizyczne podstawy tego zjawiska związane są ze szczególną formą segregacji związaną z samoczynnym odsączaniem wody wolnej, co w przypadku mieszanek betonowych zawierających większe ilości pyłu krzemionkowego wydaje się być procesem bardziej ograniczonym.



Rys. 6. Widok elementów badawczych i sposobu ich betonowania [4.b.3]



Rys. 7. Zmiana parametrów badanego elementu, a) wytrzymałości na ściskanie, b) naprężeń przyczepności [4.b.3]

Konsekwencją występowania redukcji wytrzymałości na ściskanie wraz z wysokością betonowanego elementu było uzyskanie spadku przyczepności, który w przybliżeniu przebiegał liniowo (rys. 7b). Próbkę dolną wykazały wyższe maksymalne jak i średnie naprężenia przyczepności od próbek górnych. Dodatkowo dla betonów zawierających pył krzemionkowy zaobserwowano wyhamowanie spadku, a nawet wzrost naprężeń przyczepności maksymalnych i średnich dla próbek dolnych i górnych znajdujących się przy przeciwległej krawędzi elementu od miejsca podawania betonu. Na podstawie powyższej obserwacji można wnioskować, że występuje w tym miejscu korzystny efekt dodatkowego przemieszczania się mieszanki betonowej zawierającej pył krzemionkowy w wyniku jej odbicia od deskowania. Otrzymane rezultaty pośrednio potwierdziły wcześniej otrzymane wyniki badań przyczepności [4.b.2] wykazując, że w przypadku betonów HPSCC najwyższe wartości przyczepności uzyskuje się w miejscu zakończenia procesu ich betonowania (podawania mieszanki betonowej).

Przeprowadzone przez ze mnie badania udowodniły również, że beton HPC bez dodatku pyłu krzemionkowego jest bardziej podatny na redukcję przyczepność prętów górnych. Minimalizacja wspomnianego efektu w przypadku betonów modyfikowanych pyłem krzemionkowym związana jest ze wzrostem spójności mieszanki, zmniejszeniem segregacji jej składników i wydzielania się mleczka cementowego. Zatem, można ogólnie stwierdzić, że wprowadzenie do mieszanki betonowej

wysokowartościowej dodatku pyłu krzemionkowego wpływa korzystnie na jakość warunków przyczepności. W związku z powyższym, celowym wydaje się stosowanie tego dodatku szczególnie jako częściowy zamiennik cementu, który ze względu na swój udział w mieszance betonowej oraz cenę jednostkową stanowi najdroższy składnik betonów nowej generacji.

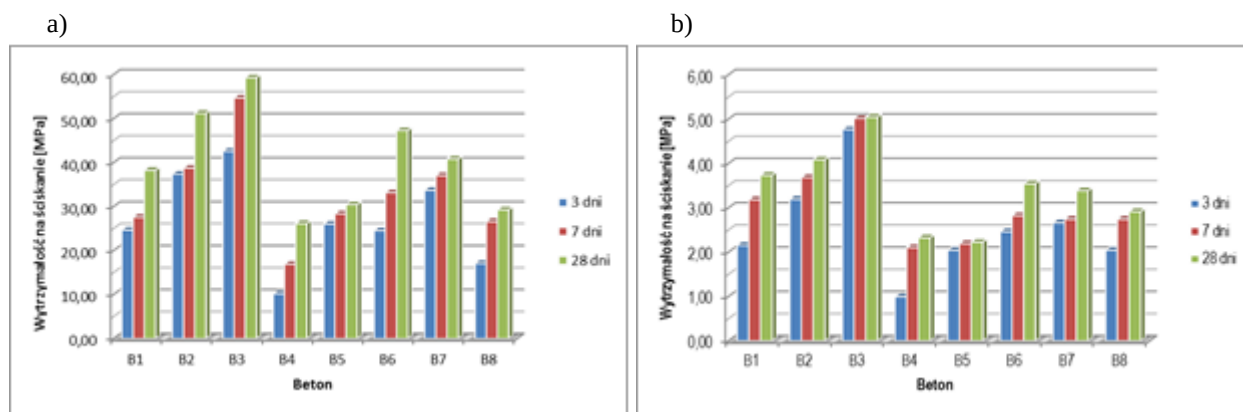
W celu poszukiwania rozwiązań obniżających koszty produkcji betonów wysokowartościowych, w dalszych pracach analizowałem możliwości wykorzystania do ich wytwarzania innych dodatków niż pył krzemionkowy. Ze względu na fakt, iż na rynku występują znaczne ilości ubocznych produktów spalania (popioły lotne i denne) powstających podczas produkcji energii elektrycznej, zasadnym okazało się sprawdzenie możliwości wykorzystania tych odpadów do produkcji betonów HPC i HPSCC. W przypadku popiołów lotnych opracowano już szereg możliwości ich wykorzystania, m.in. w produkcji cementu i betonu, ale również w innych gałęziach przemysłu. W odniesieniu do popiołów dennych nadal poszukuje się możliwości ich przemysłowego zagospodarowania, w tym w szeroko rozumianym budownictwie. Efektem obranego kierunku, byłoby zarówno zmniejszenie kosztów jednostkowych wykonania elementów czy produkcji betonów nowej generacji jak i korzystne zagospodarowanie ubocznych produktów spalania. W związku z powyższym, podjąłem prace, których celem było określenie wpływu dodatku popiołów dennych powstałych ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych (PDP) oraz fluidalnych (PDF) na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu [4.b.4, 4.b.5]. W badaniach wykorzystywano dwie frakcje odpadów o wielkości ziaren powyżej i poniżej 0,63 mm, które otrzymano w procesie separacji. Komponowanie całego stosu okruszowego stosowanego do wykonania analizowanych betonów przeprowadzono w oparciu o badania własne wcześniej wykonanych mieszanek betonowych oraz własności separowanych frakcji popiołów PDF i PDP (PDF>0,63, PDF<0,63, PDP>0,63, PDP<0,63) oraz popiołów nieseparowanych. Badania stwardniałych betonów w ramach pracy [4.b.4] uwzględniały określenie następujących właściwości:

- rozwoju wytrzymałości na ściskanie (f_c) w stanie jednoosiowego ściskania po 3, 7 i 28 dniach,
- rozwoju wytrzymałości na rozciąganie (f_t) przy rozłupywaniu po 3, 7 i 28 dniach,
- charakterystyki kruchości (f_c/f_t);
- gęstości pozornej po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania,
- nasiąkliwości wodą po 28 dniach.

Dodatkowo, w ramach pracy [4.b.5] przeprowadziłem badania wpływu rodzaju i zawartości popiołów dennych PDF i PDP w spoiwie cementowo-popiołowym oraz stosie okruszowym kruszywa na trwałość stwardniałych betonów, związanej z jego odpornością na działanie mrozu. Badanie mrozoodporności przeprowadziłem na betonach o tych samych recepturach, co w pracy [4.b.4], przy czym do mieszanek betonowych użyto cementu innego producenta.

Badania wykazały, że zastosowanie popiołów dennych frakcji >0,63 mm jako zamienników w stosie okruszowym kruszywa, powoduje wzrost wytrzymałości betonów na ściskanie. W przypadku popiołów PDF wzrost ten jest proporcjonalny do ilości zastosowanego popiołu, z kolei w przypadku popiołów PDP większy wzrost wytrzymałości na ściskanie zarejestrowano w przypadku jego 15% udziału w masie kruszywa, niż dla udziału 30%.

Najwyższy wzrost wytrzymałości (w stosunku do próbki referencyjnej) uzyskano dla betonu, w którym PDF>0,63 mm stanowił zamiennik 30% piasku i kruszywa grubego – wzrost ten wyniósł 54,91% i skutkował wytrzymałością na poziomie 59,33 MPa. Jednocześnie, wykonanie betonu według tej samej receptury, lecz na cemencie innego producenta [4.b.5], skutkowało uzyskaniem wytrzymałości na ściskanie równej 71,47 MPa. Analogiczne wyniki uzyskano w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie badanych betonów, co ilustruje rysunek 8.



Rys. 8. Przyrost wytrzymałości na ściskanie (a) i rozciąganie (b) badanych betonów [4.b.4]

Podsumowując pozostałe wyniki badań przedstawione w pracy [4.b.4], można stwierdzić, że wykonanie mieszanek betonowych z częściową zamianą cementu i kruszywa popiołami dennymi wymaga szczególnej staranności zwłaszcza w przypadku, gdy kruszywo zastępowane jest w znacznych ilościach popiołem frakcji $>0,63$ mm. Zamiana ta zasadniczo wpływa na urabialność mieszanek, stąd bardzo ważny jest staranny dobór rodzaju i ilości plastyfikatora, superplastyfikatora i/lub domieszki napowietrzającej. Zmniejszona urabialność mieszanek może w znacznym stopniu ograniczyć ich ewentualne przemysłowe wykorzystanie oraz powodować znikome korzyści ekonomiczne, w przypadku konieczności zastosowania znacznych ilości plastyfikatora i superplastyfikatora.

Ze względu na skład chemiczny badanych popiołów dennych, w przypadku substytucji cementu i kruszywa przedmiotowymi popiołami, konieczne wydaje się przeprowadzenie badań doświadczalnych, w celu określenia trwałości tego typu betonów. Zakres badań powinien uwzględniać:

- ocenę wpływu popiołów dennych na trwałość zapraw normowych i betonów w środowisku chlorkowym,
- ocenę wpływu popiołów dennych na trwałość zapraw normowych i betonów w środowisku siarczanowym,
- ocenę odporności betonu z popiołem dennym na przenikanie chlorków,
- ocenę odporności betonu z popiołem dennym na agresję mrozu i środków odladzających,
- ocenę wpływu popiołów dennych na przebieg karbonatyzacji betonu,
- ocenę wpływu popiołów dennych na korozję zbrojenia stalowego w betonie.

W odpowiedzi na postawione problemy dotyczące trwałości betonów, przeprowadziłem badania mrozoodporności tego typu betonów [4.b.5]. We wszystkich badanych próbkach po stu cyklach zamrażania-odmrażania nie stwierdzono pęknięć oraz ubytków masy większych niż 5%. Analizując wpływ zastosowanego popiołu dennego oraz jego frakcji na mrozoodporność badanych betonów, można zaobserwować znacznie bardziej korzystne oddziaływanie popiołu PDF $>0,63$ mm jako zamiennika piasku i kruszywa grubego. Betony zawierające popiół tego rodzaju cechowały się większą odpornością na działanie mrozu niż pozostałe betony. W przypadku mieszanek zawierających popiół nieseparowany PDF uzyskano największy spadek wytrzymałości, wynoszący 26%. W przypadku pozostałych mieszanek betonowych badania nie wykazały spadku mrozoodporności.

Uzyskane przeze mnie wyniki badań [4.b.2÷4.b.5] wskazują na możliwość wykonania betonów HPC i HPSCC, dla których modyfikacja składu różnego rodzaju dodatkami może skutkować m.in. obniżeniem cen jednostkowych tych betonów przy równocześnie korzystniejszym bilansie oddziaływania na środowisko tych materiałów. Stosowanie mikrokrzemionki w betonach nowej generacji dodatkowo poprawia własności fizyko-mechaniczne tych betonów, co w konsekwencji może

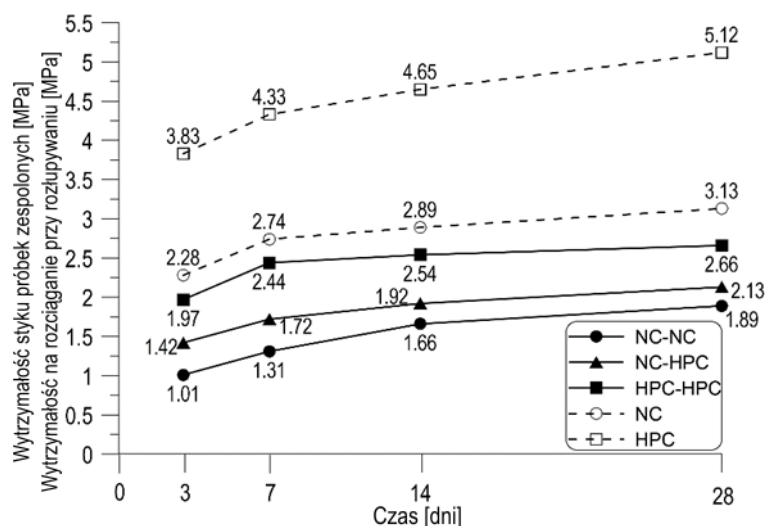
skutkować redukcją ilości zbrojenia w konstrukcjach wykonanych z tego typu betonów. W przypadku popiołów dennych w dalszych pracach badawczych należy określić ewentualne korzyści finansowe wynikające z redukcji ilości kruszywa w mieszance betonowej względem nakładów koniecznych do poniesienia na zastosowanie plastyfikatorów i superplastyfikatorów w celu uzyskania odpowiedniej urabialności tych mieszanek. Należy przy tym pamiętać, że na dzień dzisiejszy popioły denne klasyfikowane są jako uboczne produkty spalania, co powoduje że odbiór tych materiałów jest dotowany przez spółki energetyczne.

Technologiczne aspekty wykorzystania betonów HPC i HPSCC

Dalszy rozwój betonów HPC i HPSCC w dużej mierze zależy od umiejętnego wykorzystania ich właściwości. W celu najlepszego wykorzystania parametrów wytrzymałościowych betonów wysokowartościowych, zasadnym wydaje się użycie ich w konstrukcjach poddanych naprężeniom ściskającym. W przypadku elementów zginanych, ciekawą alternatywą wydają się być konstrukcje zespolone typu „beton-beton”, w których w strefach ściskanych można zastosować betony wysokiej wytrzymałości. W tego typu konstrukcjach, poszczególne części składowe przekroju zespolonego betonowane są w różnym czasie. Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku tzw. przerw technologicznych, które w wielu konstrukcjach są skutkiem ograniczeń technicznych bądź ludzkich.

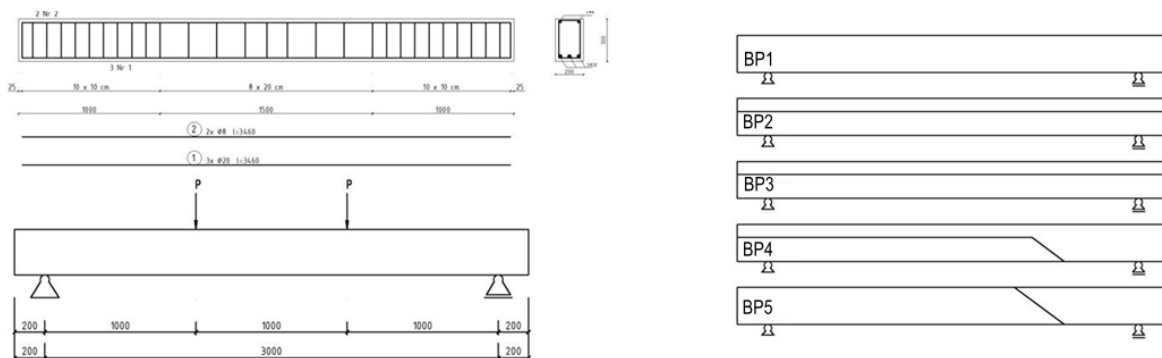
Istotą konstrukcji zespolonych typu „beton-beton” jest zapewnienie możliwie najlepszej współpracy łączonych betonów w przenoszeniu obciążeń. Podstawowym czynnikiem determinującym nośność zespolenia jest przyczepność między łączonymi betonami. Jest ona istotna nie tylko w okresie pełnej dojrzałości betonu, ale również w stadiach realizacyjnych, kiedy dobetonowana część zespolenia nie osiągnęła jeszcze pełnej wytrzymałości. Pomimo wielu badań dotyczących betonowych konstrukcji zespolonych, brak jest danych prezentujących nośność oraz rozwój zespolenia typu „beton-beton”, w którym wykorzystano betony nowej generacji. W związku z powyższym, mając na uwadze czynniki technologiczne związane z procesem betonowania oraz własności betonu HPC, w pracy [4.b.6] zaprezentowałem wyniki przeprowadzonych przeze mnie badań, których celem była ocena przyrostu wytrzymałości elementu zespolonego typu „beton-beton” (determinowana nośnością złącza) w czasie dojrzewania betonu uzupełniającego, wykonanego z betonu zwykłego (NC) lub wysokowartościowego (HPC). W ramach programu badawczego przygotowano modele doświadczalne składające się z betonowych elementów zespolonych z niezbrojonym stykiem. Badania przeprowadzono na elementach zespolonych typu NC-HPC i HPC-HPC oraz referencyjny NC-NC. Badanie nośności styku przeprowadzono na zespolonych kostkach sześciennych o wymiarach $150 \times 150 \times 150$ mm, poddanych rozciąganiu przez rozłupywanie po 3, 7, 14 oraz 28 dniach dojrzewania próbki zespolonej. W przeprowadzonych badaniach wykazałem, że podstawowym zjawiskiem pozwalającym na zespolenie betonów z niezbrojonym stykiem jest przyczepność naturalna, rozwijająca się wraz z procesem dojrzewania betonu uzupełniającego (rys. 9).

Względny przyrost nośności zespolenia typu HPC-HPC i NC-HPC okazał się zbliżony do względnego przyrostu wytrzymałości na rozciąganie betonu uzupełniającego. W przypadku zespolenia typu NC-NC nie zaobserwowano powyższej tendencji. Największe nośności styku zostały odnotowane w 28 dniu dojrzewania próbek zespolonych i wyniosły dla zespolenia typu HPC-HPC – 2.66 MPa, NC-HPC – 2.13 MPa i NC-NC – 1.89 MPa. W próbkach zespolonych NC-HPC obserwowano przebieg zniszczenia zarówno przez strefę przejściową jak i odspojenie materiału bazowego wykonanego z NC. Świadczy to o występowaniu dużej przyczepności matrycy spoiwowej HPC, zawierającej pył krzemionkowy, do betonu bazowego. Zaobserwowany model zniszczenia związany jest z oddziaływaniem fizykochemicznym bardzo drobnych cząstek amorficznej krzemionki, która powoduje zmniejszenie grubości i porowatości warstwy przejściowej oraz zbliża jej skład fazowy do zaczynu w matrycy.



Rys. 9. Przebieg rozwoju wytrzymałości styku próbek zespolonych - wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek [4.b.6]

Wzmocnienie strefy ściskanej betonem HPC elementów poddanych działaniu momentu zginającego może dawać satysfakcjonujące rezultaty w zakresie nośności takiego połączenia. Utworzone w ten sposób elementy konstrukcyjne o zmiennych parametrach materiałowych w przekroju stanowią ciekawą alternatywę w zakresie możliwości zmniejszenia kosztów jednostkowych zastosowanego betonu, w stosunku do przekrojów w całości wykonanych z betonów nowej generacji. Należy jednak zauważyć, że w zakresie nośności połączenia zespolenia typu „beton-beton”, otrzymane wyniki [4.b.6] wykazały jednoznacznie na osłabienie strefy kontaktowanej, dlatego koniecznym wydawało się określenie wpływu takiego zespolenia na nośność i użyteczność pełnowymiarowych elementów konstrukcyjnych. W tym celu w ramach pracy [4.b.7] przeprowadziłem badania na elementach belkowych wykonanych z HPC o wytrzymałości kostkowej równej 74,4 MPa i wymiarach $0,2 \times 0,3 \times 3,5$ m. Belkę referencyjną (BP1), wykonano podczas jednego cyklu betonowania. Belki BP2÷BP5 wykonano w dwóch etapach z 7-dniowym odstępem między betonowaniami. Belki BP2 i BP3 początkowo wylano do 2/3 wysokości, a następnie w przypadku belki BP3 powierzchnię skuto oraz oczyszczono szczotką drucianą. Powierzchnię belki BP2 nie poddano żadnym przygotowaniom do kolejnego betonowania. Belki BP4 i BP5 charakteryzowały się ukośną przerwą technologiczną różniącą się wysokością pierwszego betonowania. W obydwu przypadkach powierzchnie przerw skuto oraz oczyszczono szczotką drucianą przed kolejnym betonowaniem (rys. 10).



Rys. 10. Schemat zbrojenia oraz obciążenia elementów badawczych [4.b.7]

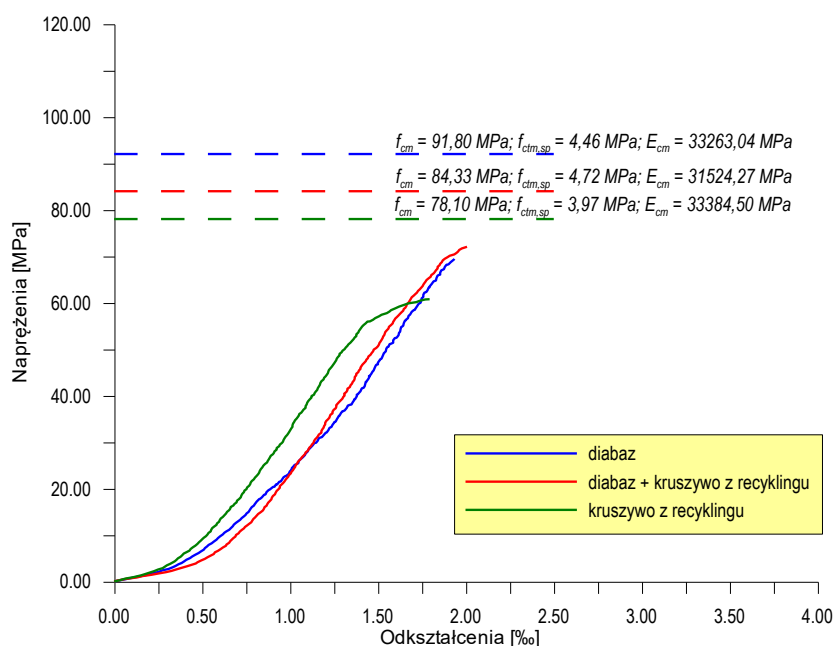
Badania wykazały, że wszystkie belki z zastosowaną przerwą technologiczną charakteryzowały się mniejszą nośnością na zginanie i ścinanie w porównaniu do belki referencyjnej BP1 – analogicznie

jak w przypadku badań nośności połączenia typu „beton-beton” przedstawionych w pracy [4.b.6]. Największy spadek nośności zarejestrowano w belce BP2, a najmniejszy w BP5. Wynika to bezpośrednio z umiejscowienia przerwy oraz sposobu przygotowania powierzchni belki przed wykonaniem drugiej części betonowania. W przypadku belki BP2 spadek nośności na zginanie wyniósł ok. 23%, a na ścinanie ok. 18%. W przypadku belki BP5 spadek nośności na zginanie wyniósł tylko 8%, przy prawie niezauważalnym spadku nośności na ścinanie. Przekroczenie granicznej wartości ugięcia SGU dla belek BP2, BP3 i BP4 nastąpiło przy obciążeniu $P = 60$ kN, a w przypadku belki BP5 oraz belki referencyjnej BP1 wartość ugięcia została przekroczona dopiero przy obciążeniu $P = 90$ kN. Wyniki potwierdzają istotny wpływ przerw technologicznych zarówno na ugięcia całkowite elementu jak i jego zarysowanie. Jedynie poprawne zastosowanie przerwy technologicznej oraz przygotowanie strefy zespolenia dało zadowalające rezultaty, co skutkowało niewielkim przyrostem ugięć względem belki referencyjnej. Natomiast pozostałe warianty wykonania styku, spowodowały znaczący wzrost wartości ugięcia całkowitego, co wynika z innej sztywności tych belek niż belki referencyjnej.

Wyniki prac [4.b.6, 4.b.7] pokazują, że tylko nieliczne rozwiązania stosowanych zespołów typu „beton-beton” pozwalają skutecznie wykorzystać wysoką wytrzymałość betów nowej generacji, przy czym układy te cechują się nierównomierną sztywnością na całej wysokości przekroju. W związku z powyższym koniecznym wydaje się stosowanie dodatkowego zbrojenia zszywającego w tego typu konstrukcjach.

Recykling betonów wysokowytrzymałościowych

Przedstawione publikacje [4.b.1÷4.b.7] w świetle zintegrowanego projektowania odnoszą się do fazy wytwarzania betonów nowej generacji (moduł A1, A3) oraz fazy budowy (moduł A5). Aktualna koncepcja zrównoważonego rozwoju wymaga jednak szerszego spojrzenia na cykl produkcji budowlanej, poprzez uwzględnienie w nim modułów końca życia obiektu wraz z procesami gospodarki odpadami, w tym ich odzysku (moduły C1, C3, C4, D). Cechy materiałowe stwardniałych betonów wysokowartościowych, umożliwiają poddanie ich procesom recyklingu, czego produktem jest kruszywo z recyklingu betonu (RCA). Uzyskany produkt może mieć szerokie zastosowanie w budownictwie, w tym do sporządzania nowych mieszanek betonowych, jako substytut naturalnego kruszywa grubego. W związku z powyższym, w pracy [4.b.8] podjąłem badania właściwości fizyko-mechanicznych betonów zawierających RCA. Badania przeprowadzono na trzech mieszankach betonowych o tej samej zawartości kruszywa grubego oraz stosunku w/c. Mieszanka referencyjna zawierała wyłącznie kruszywo naturalne, drugą mieszankę sporządzono na bazie kruszywa z recyklingu uzyskanego z betonu klasy C60/75, w trzeciej zaś oba kruszywa zmieszano w jednakowych proporcjach. Badania obejmowały określenie wytrzymałości na ściskanie f_{cm} , wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{ctm,sp}$ oraz modułu sprężystości podłużnej E_{cm} określonego w zakresie $\sigma_c = 0,0 \div 0,4 f_{cm}$. W badaniach stosowano próbki kostkowe o boku 100 mm, co w przypadku HPC wydaje się być dopuszczalne w świetle wyników badań opisanych w [4.b.1]. W badaniach odnotowałem spadek o 15% średniej wytrzymałości na ściskanie betonu wykonanego z kruszywa wtórnego w stosunku do betonu wykonanego na kruszywie naturalnym. Zastąpienie 50% kruszywa naturalnego kruszywem pochodzącym z recyklingu, spowodowało spadek wytrzymałości na ściskanie jedynie o 8%. Należy jednak podkreślić, że we wszystkich przypadkach uzyskano betony o wytrzymałościach spełniających wymagania stawiane HPC (rys. 11). W odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie nie odnotowano jednoznacznego wpływu zastosowanego rodzaju kruszywa.



Rys. 11. Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa badanych HPC [4.b.8]

W przypadku modułu sprężystości podłużnej, analogicznie jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie, rejestrowane wartości były zbliżone dla wszystkich betonów. W HPC „sztywność” materiału wynika w dużej mierze od zastosowanego kruszywa grubego, zastąpienie go kruszywem z recyklingu, w skład którego wchodzi zarówno ziarna kruszywa naturalnego jak i fragmenty matrycy o zbliżonej sztywności, nie powoduje istotnych zmian własności odkształceniowych HPC. Należy podkreślić, że w przypadku badanego betonu na bazie kruszywa wtórnego uzyskano znacznie mniejsze odchylenia wyników. Dodatkowo należy zauważyć, że otrzymane wartości modułów sprężystości podłużnej należy traktować szacunkowo, ze względu na badania próbek o smukłości równej 1.

Podsumowując przeprowadzone badania, można stwierdzić, że stosowanie recyklingu materiałów budowlanych (w tym betonu) jako elementu szeroko rozumianej logistyki odzysku, wydaje się być nieodzowne ze względu na zmieniające się przepisy prawa oraz ograniczone zasoby kruszyw naturalnych. Ograniczone stosowanie kruszyw wtórnych w Polsce może wynikać z licznych problemów związanych z normalizacją, właściwościami kruszyw i technologią przygotowania materiału, przy czym w ostatnich latach widać wyraźną zmianę w podejściu do tego problemu. W przypadku stosowania kruszyw wtórnych pochodzących z HPC nie jest konieczne wykorzystywanie zaawansowanych technologii przygotowania materiału ze względu na jego dobre pierwotne własności fizyko-mechaniczne oraz mechanizm niszczenia HPC.

HPC i HPSCC w świetle kryterium środowiskowego i ekonomicznego

Ocena oddziaływania na środowisko to usystematyzowany sposób postępowania polegający na interdyscyplinarnym identyfikowaniu i ocenie wpływu planowanych przedsięwzięć oraz ich alternatyw, na określony obszar i zachodzące na nim procesy. W zakresie przeprowadzania oceny środowiskowej budynków, obowiązującym podejściem jest technika LCA. Uważa się, że metoda ta jest jedną z najbardziej obiektywnych i dokładnych metod oceny środowiskowej z uwagi na jej wieloaspektowość oraz kompleksowość (Lesiuk, Oleszczuk, and Kuśmierz 2012). Ogólna metodyka oceny środowiskowej w całym okresie użytkowania została zdefiniowana w międzynarodowej normie ISO 14040:2009 *Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia - Zasady i struktura* jako „zebranie lub oszacowanie danych początkowych i wyników oraz potencjalnego oddziaływania na środowisko projektowanego systemu w całym okresie jego użytkowania”. Tym samym zasady i metody oceny

właściwości środowiskowych obiektów zawartych w PN-EN 15643-2:2011 *Zasady oceny właściwości środowiskowych* oraz PN-EN 15978:2012 *Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków - Metoda obliczania* oparte są na wspomnianych standardach ISO.

Pierwsze autorskie analizy konstrukcji betonowych [4.b.9 i 4.b.10], przeprowadzone w oparciu o wymagania normowe z zastosowaniem metody LCA, doprowadziły do wniosku o ograniczonej gotowości wytycznych do prowadzenia obiektywnych i porównywalnych analiz. Aktualnie tworzone są metody dotyczące wyznaczania wskaźników środowiskowych przede wszystkim na etapie produkcji materiałów budowlanych (moduły A1÷A3), czego efektem są deklaracje środowiskowe produktów (EPD). Normy w sposób jednoznaczny wskazują zbiór wskaźników środowiskowych, jakie należy uwzględnić w ocenie. Jednak nie podają wprost metod ich charakterystyki i normalizacji, a dalej wyznaczenia jednowartościowego wskaźnika oceny aspektu środowiskowego w procesie ważenia efektów środowiskowych. W ramach prowadzonych prac dostrzeżono również ograniczoną bazę danych o oddziaływaniu na środowisko pozostałych procesów budowlanych związanych z wznoszeniem obiektów, ich remontem, eksploatacją, rozbiórką, itp. W pracy [4.b.9] przedstawiłem więc własne, wypracowane podejście do prowadzenia oceny środowiskowej obiektów budowlanych poparte przykładem dotyczącym konstrukcji betonowych. Celem publikacji było syntetyczne przedstawienie procedury przeprowadzania oceny środowiskowej konstrukcji i jej upowszechnienie w środowisku inżynierów budownictwa.

Z kolei w pracach [4.b.10 i 4.b.11] zaprezentowałem kompilację tradycyjnego podejścia projektowego w zakresie spełnienia przez konstrukcję wymagań technicznych z oceną środowiskową wielu wariantów rozwiązań projektowych budynku biurowego oraz garażu wielopoziomowego. W ten sposób przedstawiona została w praktyce idea zintegrowanego projektowania. Wskazano również źródła danych oraz narzędzia, jakie można wykorzystać na potrzebę inwentaryzacji wskaźników dla procesów jednostkowych. Przeprowadzone analizy były również próbą oceny wybranych aspektów zintegrowanego projektowania technologii betonów wysokowartościowych na tle technologii betonu zwykłego.

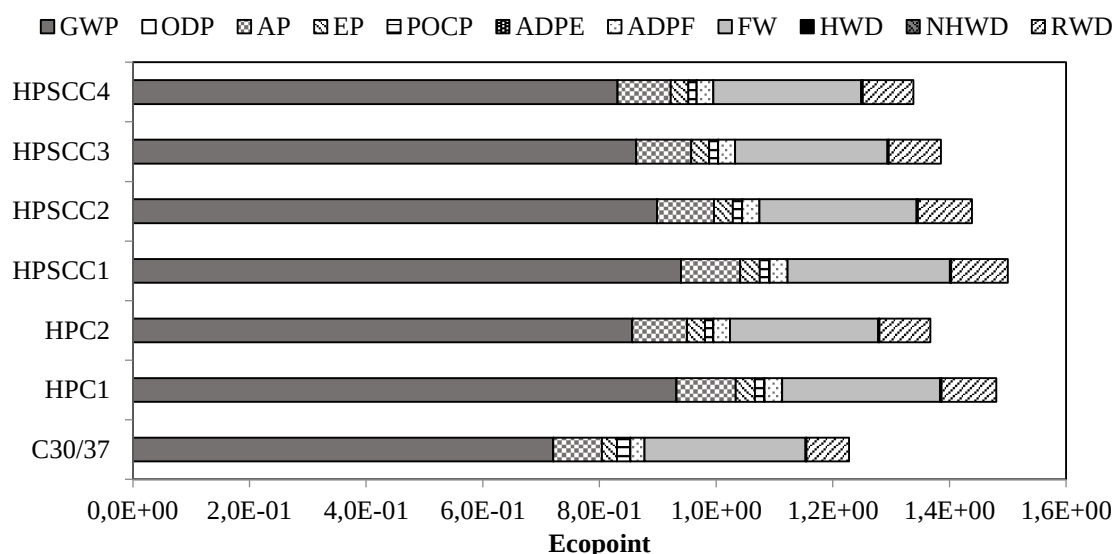
Najbardziej pogłębione badania o poszerzonych granicach oceny (moduł A1÷A5), stanowi praca [4.b.11], gdzie analizy objęły siedem mieszanek betonowych (tabela 1), których efektywność środowiskową określono w odniesieniu do 12-kondygnacyjnego budynku o przeznaczeniu biurowym.

Tabela 1. Składniki mieszanek betonowych [kg/m³] [4.b.11]

Składniki	NSC	HPC1	HPC2	HPSCC1	HPSCC2	HPSCC3	HPSCC4
Cement CEM I	380	500	455	500	476	455	435
Woda	190	160	160	160	160	160	160
Piasek 0/2 mm	580	668	668	840	840	840	840
Żwir 2/8	400	-	-	-	-	-	-
Żwir 8/16	860	-	-	-	-	-	-
Kruszywo bazaltowe 2/8 mm	-	1240	1240	990	990	990	990
Pył krzemionkowy	-	-	45	-	24	45	65
Superplastyfikator	3.8	3.25	4.05	5.55	5.85	6.15	7
Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	41.2	89.2	91.1	90.5	95.7	94.3	91.4
Współczynnik zmienności [%]	3.2	3.1	3.8	4.1	4.3	2.7	2.9

Uzyskane rezultaty pozwoliły na sformułowanie pewnych szczegółowych i ogólnych wniosków o technologii budownictwa monolitycznego opartego na betonach zwykłych oraz wysokowartościowych. Wyniki badań dowodzą, że dla założonych parametrów i granic systemów podlegających ocenie, konstrukcja betonowa w największym stopniu pogarsza jakość ekosystemu poprzez zjawisko globalnego ocieplenia, zużycie słodkiej wody oraz zakwaszenie. Istotny wpływ dla

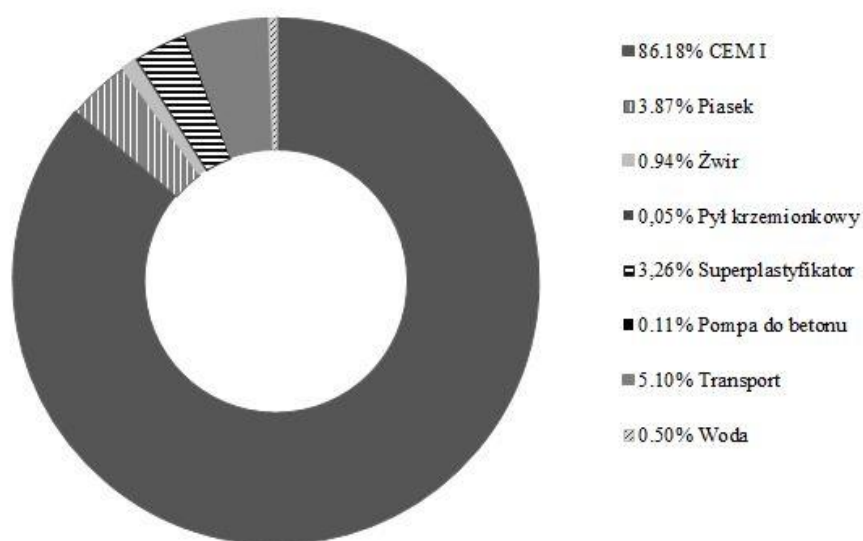
środowiska ma również emisja odpadów promieniotwórczych, pochodzących głównie ze spalania paliw stałych w procesie produkcji energii (rys. 12).



Rys. 12. Jednostkowe wskaźniki środowiskowe mieszanek betonowych na m³ [4.b.11]

W przeliczeniu na jednostkę objętości betonu, w zakresie analizowanych modułów A1÷A5, beton zwykły wykazał najmniejszy wpływ na środowisko ze wszystkich analizowanych mieszanek betonowych. Porównując wpływy pozostałych wariantów na środowisko, można zauważyć, że wraz ze spadkiem ilości cementu w mieszance betonowej, poprzez jego substytucję pyłem krzemionkowym, wartości Ecopoint maleją. W przypadku mieszanek HPSCC14 stwierdzono, że zastąpienie 10 kg cementu pyłem krzemionkowym zmniejsza wartość Ecopoint o ok. 1,7% (z uwzględnieniem odpowiedniego zwiększenia udziału superplastyfikatora).

Ostateczny wynik i przewaga NSC nad pozostałymi wariantami mieszanek jest, zatem, ściśle związana z wysokim udziałem cementu w betonie wysokowartościowym, którego produkcja skutkuje wysoką emisyjnością, zużyciem energii i wody. Biorąc pod uwagę wpływ cementu, kruszyw, procesów transportowych oraz zbiór innych komponentów i procesów związanych z produkcją betonu, zaobserwowano znaczną dominację cementu w wartości wskaźnika Ecopoint betonów (rys. 13).

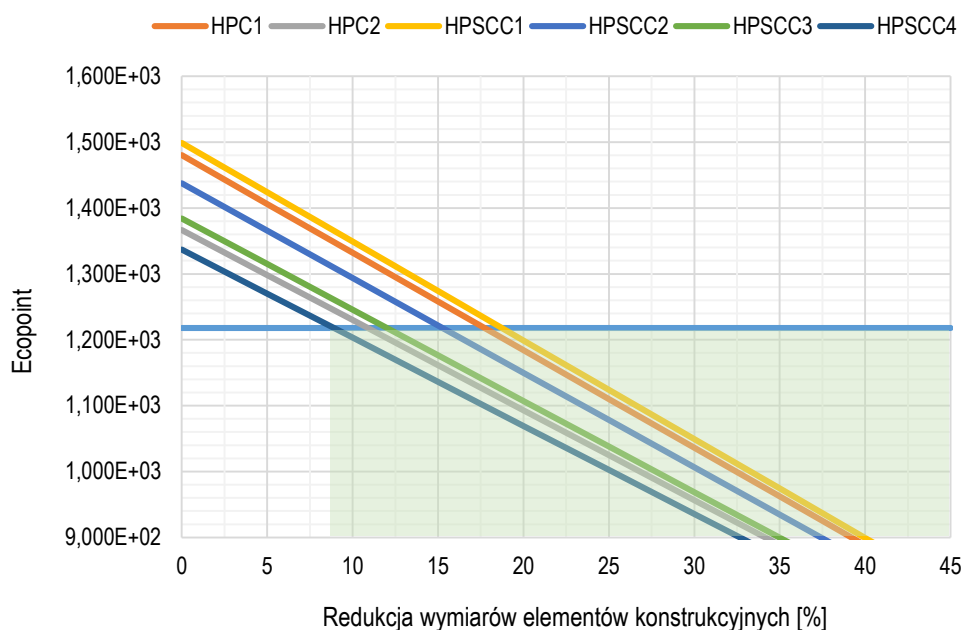


Rys. 13. Udział procesów i półproduktów mieszanki betonowej HPSCC4 w jej całkowitym wpływie na środowisko [4.b.11]

Podobne rezultaty, lecz w ograniczonym zakresie wskaźników środowiskowych, uzyskał (Marinković 2013). Istotną różnicę pomiędzy wynikami zaobserwowano jedynie w odniesieniu do wskaźników POCP i EP. W obu przypadkach wysoki udział w ich wartości mają procesy transportowe, co tłumaczy rozbieżności, które tkwią w zbiorze istotnych parametrów procesów transportowych takich jak dystans, klasa silnika, rodzaj drogi, itp.

Redukcję wartości Ecopoint w betonach wysokowartościowych można zapewnić poprzez częściową substytucję cementu pyłem krzemionkowym lub innym dodatkiem o właściwościach pucolanowych, co przedstawiłem w pracach [4.b.2÷4.b.5]. Wynika to z faktu, że mikrokrzemionka jest produktem ubocznym procesu wytwarzania krzemu metalicznego, żelazokrzemu i innych stopów krzemowych, stąd oddziaływania środowiskowe tego materiału powinny zostać wyznaczone w procedurze alokacji. Jednak różnica między wskaźnikiem GWP, pod względem alokacji ekonomicznej i braku alokacji, jest nieznacząca (Van den Heede and De Belie 2012). W związku z tym, do oddziaływań mikrokrzemionki na środowisko przypisuje się jedynie wpływy związane z załadunkiem tego materiału, jego składowaniem i transportem.

W analizowanej mieszance HPSCC4 ilość cementu została zmniejszona o 15%, co skutkowało zmniejszeniem wartości wskaźnika Ecopoint o około 11% (w porównaniu do HPSCC1). Dalsze korzyści środowiskowe uzyskiwane przez betony wysokowartościowe wynikają z redukcji wymiarów elementów konstrukcyjnych. Dzięki wyższej klasie betonów wysokiej wytrzymałości możliwe było zmniejszenie wymiarów elementów konstrukcyjnych w rozważanym obiekcie łącznie o 11,16%. Biorąc pod uwagę całą konstrukcję, ostatecznie najkorzystniejszym wariantem było więc użycie betonu HPSCC4 (EP = 3142), następnie HPC2 (EP = 3210) oraz NSC (EP = 3245). Wyniki badań uogólniono, czego efektem było określenie obszaru rozwiązań, w którym poprzez redukcję przekrojów elementów betonowych, technologia HPC i HPSCC odznaczała się wyższą efektywnością środowiskową niż technologia betonu zwykłego (rys. 14).



Rys. 14. Graniczny (minimalny) stopień redukcji analizowanych betonów nowej generacji względem betonu zwykłego C30/37 (linia pozioma) [4.b.11]

Wyniki analiz wskazują, że stosowanie betonów wysokowartościowych zasadne jest przy redukcji objętości elementów konstrukcyjnych powyżej 9% (dla rozważanych składów mieszanek oraz przy założonych parametrach). Taki wskaźnik redukcji przy zastosowaniu betonów nowej generacji, uzyskuje się przeważnie w elementach ściskanych.

W pracy [4.b.10] analizie poddano zarówno aspekt finansowy wykonania konstrukcji garażu wielopoziomowego w technologii betonu wysokowartościowego oraz betonu zwykłego. W tym podejściu przeanalizowano trzy warianty konstrukcji, dla których sprawdzono stany graniczne nośności (SGU) i użyteczności (SGN), co pozwoliło na określenie zużycia betonu oraz stali zbrojeniowej w poszczególnych przypadkach:

- wariant I – beton C30/37 zastosowany na płytę stropową o gr. 25 cm, słupy 35×35 cm oraz belki 35×70 cm,
- wariant II – beton C70/85 zastosowany na płytę stropową o gr. 25 cm, słupy 35×35 cm oraz belki 35×70 cm,
- wariant III – beton C70/85 zastosowany na płytę stropową o gr. 20 cm, słupy 30×30 cm oraz belki 30×60 cm.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najlepszym rozwiązaniem ze względów kosztowych jest wariant III obejmujący zredukowane przekroje elementów konstrukcyjnych wykonanych z HPC (C70/85) generujące mniejsze zużycie betonu. Zastosowanie HPC w tym przypadku spowodowało zmniejszenie ciężaru konstrukcji, co z kolei przełożyło się na odpowiednio niższe zapotrzebowanie na stal zbrojeniową. Zmiana klasy betonu na wyższą w stosunku do betonu zwykłego (wariant II), pomimo mniejszego zużycia stali powoduje wyższy koszt analizowanego wariantu. Jest to spowodowane przede wszystkim wyższą o 25% ceną jednostkową betonu HPC w stosunku do betonu zwykłego. Można zatem wnioskować, że w obiektach, w których rozważa się zmianę klasy betonu zwykłego na HPC bez równoczesnej redukcji wymiarów geometrycznych elementów, takie rozwiązanie jest nieopłacalne.

Podsumowanie i kierunki dalszych badań

Głównym osiągnięciem naukowym zrealizowanym w ramach przeprowadzonych przeze mnie badań jest połączenie ze sobą wielu zagadnień materiałowo-technologicznych dotyczących betonów wysokowartościowych w spójny zbiór prac, który obrazuje sposób prowadzenia całkowitej oceny projektowanych konstrukcji, przy równocześnie maksymalnym wykorzystaniu właściwości tych betonów. Prezentowany jednotematyczny cykl publikacji dotyczy zagadnień zrównoważonego budownictwa betonowego i zawiera osiągnięcia stanowiące istotny wkład w rozwój dyscypliny budownictwo. Należy podkreślić, że większość dociekań i rozważań zawartych w przedstawionym przeze mnie cyklu publikacji, to własne analizy i rezultaty. W tym kontekście, pozwala mi to na przedstawienie cyklu jako niezależnego i oryginalnego osiągnięcia naukowego.

W zakresie tematycznym dotyczącym technologii betonów HPC i HPSCC za szczególne dokonanie uważam wskazanie możliwości szerokiej modyfikacji składu tych betonów w celu maksymalnego wykorzystania ich właściwości, w kontekście obniżenia kosztów wykonania konstrukcji monolitycznych oraz redukcji ich negatywnego oddziaływania na środowisko.

Opracowany przeze mnie cykl publikacji nie miał tylko na celu oceny wybranych technologii HPC i HPSCC w aspekcie wymagań zrównoważonego rozwoju. Empiryczne doświadczenie procesu projektowego opartego na wymaganiach normowych dotyczących zrównoważonego budownictwa, pozwoliło na dokonanie oceny zarówno statusu gotowości wypracowanych dotychczas metod do ich aplikacji, jak i określenie jednoznaczności uzyskiwanych wyników i ich porównywalności. Przedstawiony przeze mnie dorobek publikacyjny może stanowić wytyczne dla projektantów w zakresie prowadzenia skutecznej oceny oddziaływania poszczególnych procesów budowlanych, a dalej zintegrowanego projektowania konstrukcji betonowych.

Przeprowadzone w ramach poszczególnych prac badania, obejmowały analizę środowiskową i kosztową rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych w technologii betonu zwykłego i wysokowartościowego (HPC i HPSCC) w obszarze modułów A1÷A5. Uzyskane wyniki dowodzą o konieczności oceny materiałów w budownictwie w kontekście ich bezpośredniego zastosowania w konstrukcji. Wartości wskaźników całkowitego oddziaływania betonów nowej generacji, obliczone dla jednostki objętości mieszanki betonowej, mogą prowadzić do błędnych wniosków na temat ich negatywnego wpływu na środowisko. Zastosowanie betonu o wysokiej wytrzymałości pozwala na zmniejszenie całkowitego oddziaływania konstrukcji na środowisko poprzez zmniejszenie wymiarów geometrycznych elementów konstrukcyjnych, co jest szczególnie widoczne w elementach ściskanych. Dlatego też, analizowanie różnych wariantów konstrukcyjno-materiałowych i obliczenie całkowitego oddziaływania elementu na środowisko jak i ich kosztów, przy uwzględnieniu charakterystyki pracy konstrukcji, jest właściwym podejściem do projektowania obiektów budowlanych. Z uwagi na zbiór parametrów warunkujących wynik oceny, analizy należy każdorazowo prowadzić indywidualnie w obrębie danego przedsięwzięcia.

Uogólnione wyniki pozwalają wskazać kierunek redukcji negatywnego wpływu konstrukcji betonowej na środowisko poprzez świadome wykorzystanie parametrów technicznych betonów nowej generacji oraz kształtowanie receptury mieszanek betonowych. Substytucja cementu alternatywnymi spoiwami, np. mikrokrzemionką lub popiołami, umożliwia obniżenie negatywnego oddziaływania betonu na środowisko oraz jednoczesną poprawę parametrów technicznych betonu. Przy łącznej rocznej produkcji betonu w UE wynoszącej 224 mln m³ (ERMCO 2014), zastąpienie cementu w mieszance betonowej alternatywnym spoiwem kolejno o 5%, 10% do 20% pozwala zredukować całkowitą emisję GHG w UE o kolejno 0,06%, 0,12% do 0,25%, co stanowi 11,3 milionów ton ekwiwalentu CO₂ rocznie.

Dalsze możliwości obniżenia wskaźnika środowiskowego betonu dotyczą technologii wytwarzania cementu oraz źródeł pozyskiwania energii (elektrownia węglowa, atomowa, wodna).

Należy jednak mieć świadomość, że zasadnicza część (50%) emisji dwutlenku węgla podczas produkcji cementu powstaje w procesie chemicznym zwanym kalcynacją, w ramach którego węglan wapnia rozkłada się na tlenek wapnia i dwutlenek węgla. Stąd też, substytucja cementu jest obiecującym kierunkiem obniżania wskaźników środowiskowych betonów nowej generacji.

Nie bez znaczenia dla środowiska pozostaje również proces transportu mieszanki betonowej oraz jej półproduktów. Na przykład odległość transportowa surowców (jako jeden z istotnych parametrów) często jest związana z położeniem złoża skalnego. W przypadku dużych odległości, efektywnym rozwiązaniem jest częściowa substytucja kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu betonu, dla którego odległości transportowe są znacznie mniejsze, bowiem gruz pochodzi z obiektów lokalnie poddawanych rozbiórce. Jak podaje (Mankelov et al. 2010) średnia odległość transportowa kruszywa naturalnego wynosi 40 km. Z kolei, odległość transportowa kruszywa z recyklingu betonu zawiera się w granicach 10÷30 km (Wittstock et al. 2012). W metodzie *replacing*, zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu nie wpływa w sposób istotny na pogorszenie parametrów wytrzymałościowych betonów, co dowiedziono w pracy [4.b.8]. Należy zauważyć, że w UE na cele konstrukcyjne zużywane jest 224 mln ton kruszywa rocznie (obliczono na podstawie średniego udziału kruszywa w mieszance betonowej). Uwzględniając, zatem, jedynie sam proces transportowy (w metodzie *replacing*) szacuje się, że sektor budowlany w UE jest w stanie zredukować emisje GHG o 87 750 ton ekwiwalentu CO₂ rocznie. Oczywiście, możliwe jest prowadzenie dalszych redukcji poszczególnych wskaźników środowiskowych w obszarze wskazanych parametrów. Powyższe przykłady wskazują kierunki i skalę możliwej redukcji oddziaływania technologii betonu przy zmianie podejścia projektowego.

Przedstawione podejście i uzyskane wyniki mogą stać się użytecznym narzędziem dla projektantów realizujących postulat zintegrowanego projektowania. Należy jednak podkreślić, że wyniki ocen zależą od zbioru parametrów, czynników normalizacji i wag, które mogą się zmieniać w czasie w zależności od skali oceny i problemów ekologicznych występujących w rozpatrywanym obszarze. Uzyskane wyniki nie są zatem ponadczasowe i uniwersalne, ale przedstawione podejście pokazuje możliwy kierunek zmniejszania oddziaływania sektora budowlanego na środowisko poprzez optymalizację strukturalną i materiałową, co powinno również prowadzić do kompromisu ekonomicznego i środowiskowego. Wymóg prawny przeprowadzenia tych optymalizacji w sektorze budowlanym mógłby stać się elementem strategii politycznej w dążeniu do realizacji celów UE na najbliższe lata.

W dalszej perspektywie planuje poszerzenie obszaru oceny technologii betonów wysokowartościowych o pozostałe moduły wraz z uwzględnieniem aspektu socjalnego, przy uwzględnieniu podkryteriów takich jak hałas, wibracje, zapylenie, co nabiera szczególnego znaczenia w modułach dotyczących końca życia obiektu budowlanego.

Z uwagi na brak jednoznacznych informacji o oddziaływaniu procesów budowlanych na środowisko w toku dalszych prac planuję opracować katalog modeli ich wyznaczania. Docelową perspektywę stanowi opracowanie interaktywnego narzędzia wspomagającego zintegrowany proces projektowania konstrukcji betonowych, oparty na modelach umożliwiających wyznaczanie wskaźników oceny wybranych wariantów projektowych i ich optymalizację.

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W trakcie swojej wieloletniej pracy naukowej zajmowałem się kilkoma, zasadniczo różniącymi się od siebie, tematami badawczymi. Poniżej przedstawiam je w osobnych podpunktach wraz ze stosownym opisem osiągnięć naukowych oraz przedstawieniem prac naukowych, w których te osiągnięcia zostały opublikowane (Załącznik 4, pkt. II). Uwzględniono wyłącznie dorobek po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

a. Betony nowej generacji

Po obronie doktoratu był to temat wiodący w mojej pracy naukowej. W prowadzonych analizach zasadniczo wyróżnić można trzy wątki: badania nad właściwościami betonów nowej generacji w różnych aspektach cyklu życia obiektu, badania związane z oddziaływaniem betonów na środowisko oraz zastosowania betonów w budownictwie podziemnym ze szczególnym uwzględnieniem obudów tuneli i szybów.

Wiodącym wątkiem były badania różnych właściwości mechanicznych betonów. W pracy [II.E.22] przedstawiono wpływ wielkości próbek na właściwości odkształceniowe betonów wysokowartościowych, z kolei w pracach [II.E.38, II.E.43] przedstawiono analizy związane z kolumnami wzmacnianymi włóknami węglowymi w aspekcie ich nośności i wytrzymałości jako elementy ściskane. Natomiast w pracy [II.E.39] znaleźć można ocenę zmian właściwości wytrzymałościowych wzdłuż wysokości elementów konstrukcyjnych dla betonów nowej generacji.

Istotnym zagadnieniem, które zaobserwowano w pracach dotyczących kolumn ściskanych okazał się wpływ kształtów ziaren kruszywa na parametry mechaniczne betonów nowej generacji. W pracy [II.A.1] przedstawiono wpływ morfologii ziaren kruszywa grubego na właściwości samozagęszczalnego betonu wysokowartościowego zbrojonego włóknami stalowymi (SCHPFRC). Przeprowadzenie kompleksowych analiz tego zagadnienia wymagało podjęcia współpracy z innymi ośrodkami akademickimi w kraju. Niewykluczone, że dalsze prace nad tym zagadnieniem pozwolą na bardziej efektywne projektowanie betonów nowej generacji.

Odrębnym zagadnieniem naukowym, którym zajmowałem się po obronie doktoratu, było zastosowanie betonów zwykłych oraz betonów nowej generacji w budownictwie podziemnym i tunelowym. W pracy [II.E.11] przedstawiono aspekty ekonomiczne stosowania betonów wysokowartościowych, z kolei praca [II.A.3] zawiera analizę zmian parametrów mechanicznych górotworu i ich wpływ na obudowę szybów. Ogólną koncepcję zastosowania betonów nowej generacji w budownictwie podziemnym przedstawiono w pracy [II.E.47]. W ramach wystąpień [II.I.17÷19] przedstawiałem zagadnienia współpracy masywu skalnego z betonową obudową tunelu drogowego w warunkach fliszu karpackiego, monitoringu tuneli w aspekcie optymalizacji stosowanych rozwiązań technicznych oraz wybrane problemy projektowania obudów tuneli ze szczególnym uwzględnieniem betonowej obudowy ostatecznej. Niewątpliwie jest to ciekawy i mało zbadany wątek naukowy, który planuję kontynuować.

b. Diagnostyka i wzmacnianie konstrukcji budowlanych

W ramach tego aspektu badawczego zajmowałem się głównie dwoma tematami. Do pierwszego z nich zaliczyć można aspekty związane z oceną stanu technicznego obiektów budowlanych wraz z narzędziami koniecznymi do jej prawidłowego wykonania. Drugim powiązanym zagadnieniem były procesy remontowe, w tym wzmacnianie i rekonstrukcja obiektów.

Początkowo, zajmowałem się zastosowaniem metod nieniszczących w diagnostyce różnych obiektów. Prace [II.E.19, II.E.27] przedstawiają możliwość zastosowania w/w metod w konstrukcjach betonowych budownictwa podziemnego, natomiast w pracy [II.E.26] omówiono je pod kątem zastosowania w budownictwie transportowym. Znajomość wpływu różnych czynników na wyniki badań nieniszczących jest niezbędna do poprawnej oceny stanu technicznego elementów konstrukcyjnych. O ile dla elementów betonowych te czynniki są znane, tak dla elementów drewnianych rozpoznanie tematu zdaje się być niewystarczające. Dlatego, w pracach [II.E.28, II.E.35÷36] przedstawiono możliwości stosowania metod nieniszczących w konstrukcjach drewnianych z uwzględnieniem m.in. takich czynników jak wilgotność drewna czy też kierunek badania względem przyrostów rocznych. Z kolei w pracy [II.E.41] przedstawiono aspekty zachowania zabytkowych konstrukcji murowych oraz narzędzi wspomagających ocenę ich stanu technicznego.

Dobra znajomość metod diagnostycznych oraz zasad pracy konstrukcji budowlanych i inżynierskich stanowi podstawę do określenia przyczyn awarii czy też katastrof budowlanych. W pracy [II.E.24] przedstawiono wpływ osiadania kanału wentylacyjnego na stan techniczny budynku nadszybia. Analizowano wpływ dodatkowego oddziaływania wywołanego przemieszczeniem się części lunety wentylacyjnej na elementy konstrukcyjne. Zjawisko to, ze względu na swój niekontrolowany i nieprzewidywalny charakter, skutkowało znaczącym ograniczeniem użytkowania analizowanego obiektu. Podobny charakter ma praca [II.A.2], która prezentuje ocenę nośności głowicy szybowej poddanej niezamierzonym obciążeniom wyjątkowym na podstawie analizy numerycznej. Z kolei w pracy [II.E.31] przedstawiono analizę katastrofy budowlanej konstrukcji więźby dachowej zabytkowego pałacu w Gorzanowie. W pracy zawarto ocenę stanu technicznego omawianego obiektu, zarejestrowane uszkodzenia oraz wyniki obliczeń numerycznych, na podstawie których określono główne przyczyny utraty stateczności konstrukcji. Praca [II.E.44] zawiera ocenę stanu technicznego zabytkowego kościoła pod wezwaniem Podwyższenia Krzyża Świętego w Podlegórze, zarejestrowane uszkodzenia oraz wyniki obliczeń numerycznych. W pracy uwzględniono numeryczną analizę stateczności zbocza, na którym posadowiono kościół oraz analizę statyczno-wytrzymałościową więźby dachowej, na podstawie których określono główne przyczyny powstania uszkodzeń.

Ważnym zagadnieniem następującym po określeniu przyczyn awarii są też wszelkie procesy remontowe. Ze względu na indywidualny charakter wielu konstrukcji projekty remontów, czy też wzmocnień obiektów po awarii, są zagadnieniem skomplikowanym oraz wartym dodatkowych analiz. W pracach [II.E.29, II.E.32, II.E.45] przedstawiono przykłady takich prac w zastosowaniu do obiektów podziemnych i przemysłowych, natomiast w pracach [II.E.23, II.E.30] w odniesieniu do obiektów zabytkowych.

Pewnego rodzaju podsumowanie tego wątku mojej pracy naukowej stanowią publikacje [II.E.37, II.E.42], w których przedstawiono metodologię oceny stanu technicznego obiektów zabytkowych z uwzględnieniem aspektów historycznych, architektonicznych oraz konstrukcyjno-budowlanych.

c. Logistyka w budownictwie

W ramach projektu badawczego „Zastosowanie koncepcji zarządzania łańcuchami dostaw (SCM) w przedsiębiorstwach budownictwa drogowego” nr 2124/B/T02/2011/40, którego kierownikiem była prof. dr hab. inż. Anna Sobotka, miałem okazję rozwijać swoje zainteresowania naukowe związane z szeroko pojętą logistyką w budownictwie. Projekt miał na celu rozpoznanie uwarunkowań możliwości zastosowania koncepcji SCM (*Supply Chain Management*) do projektowania i realizacji przedsięwzięcia budowlanego, w szczególności w drogownictwie. Przedmiotem badań były zadania i procesy logistyczne realizowane przez przedsiębiorstwa budowlane, wykonawców odcinków autostrad, dróg ekspresowych i obwodnic, gdyż ich obsługa logistyczna stanowi w dużym stopniu o powodzeniu przedsięwzięcia. Podsumowaniem w/w projektu badawczego niewątpliwie jest monografia [II.E.1] oraz publikacje konferencyjne [II.E.16, II.E.21]. Ogólną koncepcję stosowania metody zarządzania łańcuchem dostaw w procesie inwestycyjnym w budownictwie przedstawiono w pracy [II.E.15].

Realizacja przedsięwzięć drogowych stanowi duże wyzwanie pod względem technicznym, ekonomicznym oraz organizacyjnym. Wielkość przedsięwzięć i skomplikowane warunki realizacji robót liniowych i obiektów drogowych wymagają wsparcia dobrze przygotowaną logistyką. Badania procesów logistycznych w przedsiębiorstwach drogowych przedstawiono w pracach [II.E.17, II.E.20], z kolei w pracy [II.E.18] opisano zasady doboru modeli decyzyjnych możliwych do zastosowania przy zaopatrzeniu budowy drogi w kruszywo.

W nawiązaniu do powyższych badań oraz zainteresowań związanych z badaniami, remontami i wzmacnianiem obiektów zabytkowych i przemysłowych powstały dwie prace [II.E.25, II.E.34],

w których podjęto tematykę zakłóceń systemu logistycznego oraz logistyki odwrotnej. W pierwszej z nich dokonano charakterystyki oraz klasyfikacji logistyki w zakresie przepływów informacyjno-decyzyjnych, fizycznych oraz finansowych. W publikacji zwrócono uwagę na istotę przepływów informacji pomiędzy uczestnikami procesu produkcji budowlanej, w których zdiagnozowano częste zakłócenia wynikające z niedyspozycyjności powołanych jednostek eksperckich lub ich braku. Ponadto, wyróżniono i opisano zakłócenia wynikające z charakteru robót m.in. awarie budowlane spowodowane złym stanem technicznym obiektu, który nie został dostatecznie zbadany na etapie diagnozowania konstrukcji. W kolejnej pracy przedstawiono możliwości stosowania logistyki odzysku materiałów budowlanych w pracach związanych z remontami i modernizacją obiektów zabytkowych i historycznych. Na podstawie wywiadu eksperckiego oraz obserwacji własnych scharakteryzowano obszary, w których powtórne zastosowanie materiałów budowlanych w renowacji obiektów zabytkowych jest już stosowane oraz obszary, w których eksperci widzą możliwość zastosowania odpadów rozbiórkowych.

5. Podsumowanie dorobku naukowego

Na mój dorobek naukowy jako autora lub współautora publikacji po uzyskaniu stopnia doktora składają się 43 publikacje: 1 monografia (współautor), 7 artykułów w czasopismach z Listy Filadelfijskiej (Master Journal List) w tym 5 z części A listy MNiSW oraz 2 z części B listy MNiSW, 29 artykułów w czasopismach z części B listy MNiSW oraz 6 publikacji konferencyjnych uwzględnionych w bazie WoS. Ponadto jestem autorem lub współautorem 9 publikacji w czasopismach lub wydawnictwach spoza list MNiSW. Łączna uzyskana liczba punktów za publikacje po uzyskaniu stopnia doktora wg list MNiSW wynosi **466**.

Na dzień 03.04.2019 r., w bazie Web of Science, zaindeksowanych jest 14 spośród wszystkich moich prac naukowych, cytowanych łącznie 3 razy (bez samocytowań). Według tej bazy mój indeks Hirscha wynosi 1. Sumaryczny Impact Factor według Journal Citation Reports (JCR) wynosi natomiast **8,945**. Z kolei w tym samym dniu w bazie Scopus zaindeksowanych jest 13 spośród wszystkich moich prac naukowych, cytowanych łącznie 6 razy (bez samocytowań), indeks Hirscha wg tej bazy wynosi 2. W bazie Google Scholar zaindeksowanych jest 50 spośród wszystkich moich prac naukowych cytowanych łącznie 29 razy (w tym 6 samocytowań), indeks Hirscha wg tej bazy wynosi 3.

Zestawienie dorobku publikacyjnego, z podziałem na poszczególne lata prezentuje tabela 2. W tym okresie, swoje wyniki prezentowałem również na wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych.

Tabela 2. Zestawienie dorobku naukowego (po obronie doktoratu, tj. w latach 2009÷2019) z podziałem na poszczególne lata

Lata		Publikacje z list MNiSW	Liczba punktów wg list MNiSW	Publikacje z Listy Filadelfijskiej (Master Journal List)	IF (wg bazy Journal Citation Reports)	Publikacje pozostałe
Suma	52	43	466	7	8,945	9
2019	1	1*	30*	1	2,800**	-
2018	4	4*	85*	3	5,089**	-
2017	7	7	69	-	-	-
2016	11	10	106	1	-	1
2015	6	4	46	1	0,448	2
2014	8	8	73	-	-	-
2013	3	2	26	1	0,608	1

Lata		Publikacje z list MNiSW	Liczba punktów wg list MNiSW	Publikacje z Listy Filadelfijskiej (Master Journal List)	IF (wg bazy Journal Citation Reports)	Publikacje pozostałe
2012	7	4	15	-	-	3
2011	1	-	-	-	-	1
2010	2	2	12	-	-	-
2009	2	1	4	-	-	1

* Listy czasopism punktowanych MNiSW z dnia 26.01.2017 r. – ostatnia aktualna lista na dzień złożenia wniosku

** Impact Factor wg Journal Citation Reports (JCR) za rok 2017 r. – ostatnia aktualna lista na dzień złożenia wniosku

6. Literatura

- Ajdukiewicz, A. 2011. "Aspekty Trwałości i Wpływu Na Środowisko w Projektowaniu Konstrukcji Betonowych." *Przegląd Budowlany*, no. 2: 20–29.
- COM 445. 2014. "Komunikat Komisji Europejskiej Do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w Sprawie Możliwości Zasobooszczędności w Sektorze Budowlanym."
- Desnerck, P., G. De Schutter, and L. Taerwe. 2010. "Bond Behaviour of Reinforcing Bars in Selfcompacting Concrete: Experimental Determination by Using Beam Tests." *Materials and Structures* 43(1): 53–62.
- Domone, P. 2007. "A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete." *Cement & Concrete Composites* 29(1): 1–12.
- Dybel, P., and K. Furtak. 2014. "Effect of Silica Fume Content on the Bond Stiffness of Reinforcement Bars in High-Performance Concrete." *Cement, Wapno, Beton* 2: 106–13.
- ERMCO. 2012. "Ready-Mixed Concrete Industry Statistics. Year 2011."
- ERMCO. 2014. "Ready-Mixed Concrete Industry Statistics. Year 2013," no. July: 21.
- Hajek, Petr, Fiala Ctislav, Jensen Birit Buhr, and Lanikova Ivana. 2013. "Integrated Life Cycle Assessment of Concrete Structures," no. July: 64.
- Heede, P. Van den, and N. De Belie. 2012. "Strength Related Global Warming Potential of Fly Ash (+ Silica Fume) Concrete with(out) Mass/ Economic Allocation of the by-Products' Impact." *Proceedings of International Symposium on LCA and Construction-Civil Engineering and Buildings RILEM Proc*: 336–43.
- Lesiuk, A., P. Oleszczuk, and M. Kuśmierz. 2012. "Zastosowanie Techniki LCA w Ekologicznej Ocenie Produktów, Technologii i Gospodarce Odpadami." *Adsorbenty i Katalizatory. Wybrane Technologie a Środowisko. Uniwersytet Rzeszowski*, 453–66.
- Mankelov, J, D Oyo-Ita, and M Birkin. 2010. "Assessing the Carbon Footprint of Transporting Primary Aggregates." *Extractive Industry Geology*, 41–45.
- Marinković, S B. 2013. "3 - Life Cycle Assessment (LCA) Aspects of Concrete. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering."
- McHenry, D., and J.J. Shideler. 1956. "Review of Data on Effect of Speed in Mechanical Testing of Concrete." *ASTM* 185: 72–82.
- Murdock, J.W., and C.E. Kelser. 1957. "Effect of Length to Diameter Ratio of Specimen on the Apparent Compressive Strength of Concrete." *ASTM Bull*, 68–73.
- Pacheco-Torgal, F. 2014. *1 - Introduction to the Environmental Impact of Construction and Building Materials. Eco-Efficient Construction and Building Materials*. Woodhead Publishing Limited.
- UNEP. 2014. "UNEP Report Greening the Building Supply Chain."
- Wałach, Daniel, Joanna Sagan, and Justyna Jaskowska-Lemańska. 2017. "Environmental Assessment in the Integrated Life Cycle Design of Buildings Ocena Środowiskowa w Zintegrowanym Procesie Projektowania Obiektów Budowlanych," 143–51.
- Wittstock, Bastian, Johannes Gantner, Katrin Lenz Tom Saunders, Jane Anderson, Claire Carter, Zsoka Gyetvai, Johannes Kreißig, et al. 2012. "EeBGuide Guidance Document Part B: BUILDINGS ." *Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*, 1–360.

Daniel Wałach