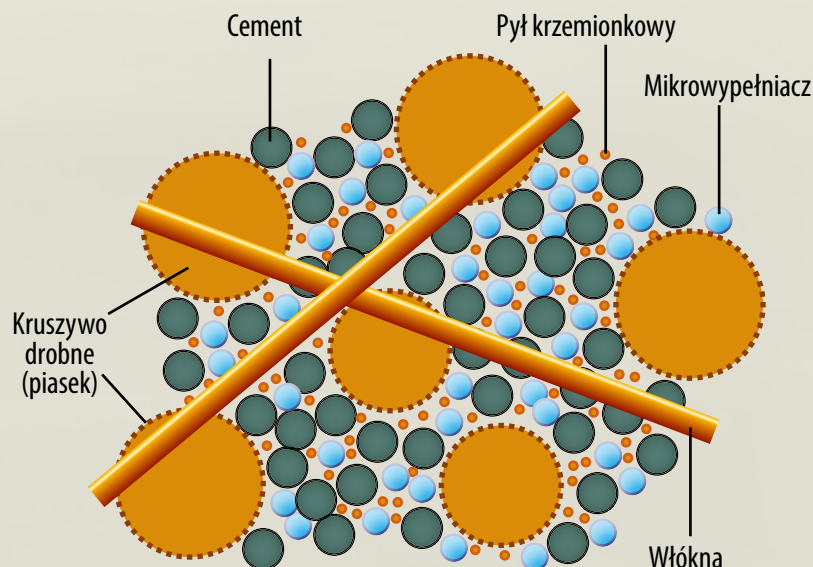
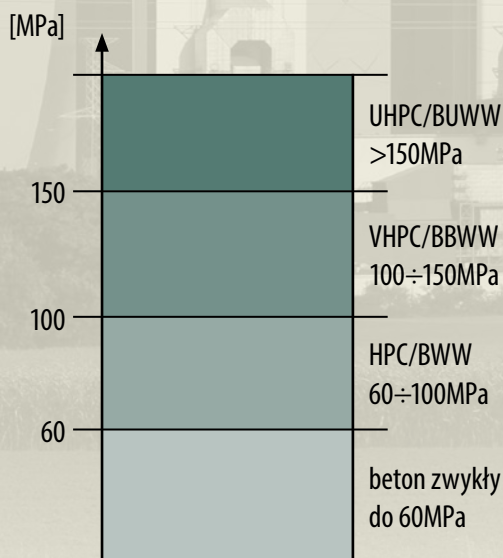


Beton wysokowartościowy (wysokiej wytrzymałości) jest pochodną betonu zwykłego, uzyskaną na drodze modyfikacji składu pod względem jakościowym i ilościowym, ukierunkowaną na redukcję słabych stron betonu zwykłego. Beton wysokowartościowy wykonywany jest z cementu wysokiej jakości, przy zachowaniu niskiego współczynnika wodno-cementowego (wodno-spoiwowego) oraz z zastosowaniem wysoce efektywnych domieszek chemicznych, głównie kształtujących właściwości reologiczne (plastyfikatorów i superplastyfikatorów), dodatków mineralnych, szczególnie pyłu krzemionkowego, jak również mikrowypełniaczy i włókien (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie składu betonu wysokowartościowego

Beton wysokowartościowy najczęściej definiuje się jako beton o charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa oznaczonej po 28 dniach dojrzewania, chociaż w aktualnej normie PN-EN 206 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” nie ma już takiego podziału. Na rys. 2 przedstawiono interpretację podziału betonów wysokowartościowych z uwagi na wytrzymałość na ściskanie.



Rys. 2. Podział betonu ze względu na wytrzymałość na ściskanie

Określenie betonu wysokowartościowego (BWW) nie jest tożsame z betonem wysokowytrzymałościowym, gdyż w betonie wysokowartościowym dodatkowym wymogiem, oprócz wysokiej wytrzymałości, jest wysoka trwałość wynikająca głównie ze szczelności (tabela 1). Betony BWW powinny charakteryzować się zatem:

- wysoką wytrzymałością na ściskanie > 60 MPa,
- dobrą urabialnością mieszanki betonowej,
- wysoką szczelnością (niską przepuszczalnością mediów ciekłych i gazowych),
- wysoką odpornością na działanie agresywnych czynników środowiskowych,

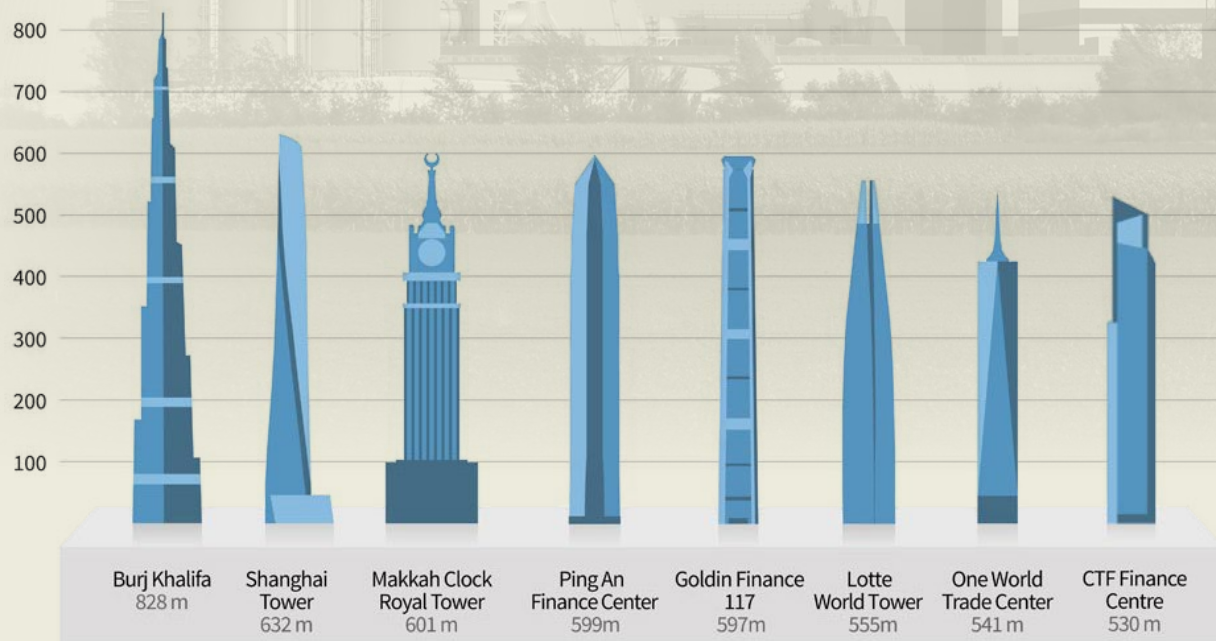
- odpornością na agresję chemiczną,
- mrozoodpornością,
- wodoszczelnością,
- niską nasiąkliwością,
- odpornością na ścieranie.

Stosowanie betonu wysokich wytrzymałości w konstrukcjach niesie ze sobą szereg korzyści (tabela 1), co umożliwiło budowę wielu budynków wysokościowych (rys. 3). W wyniku stosowania betonów BWW możliwe jest również ograniczenie ciężaru własnego konstrukcji przy zapewnieniu zachowania nośności elementów konstrukcyjnych (rys. 4).

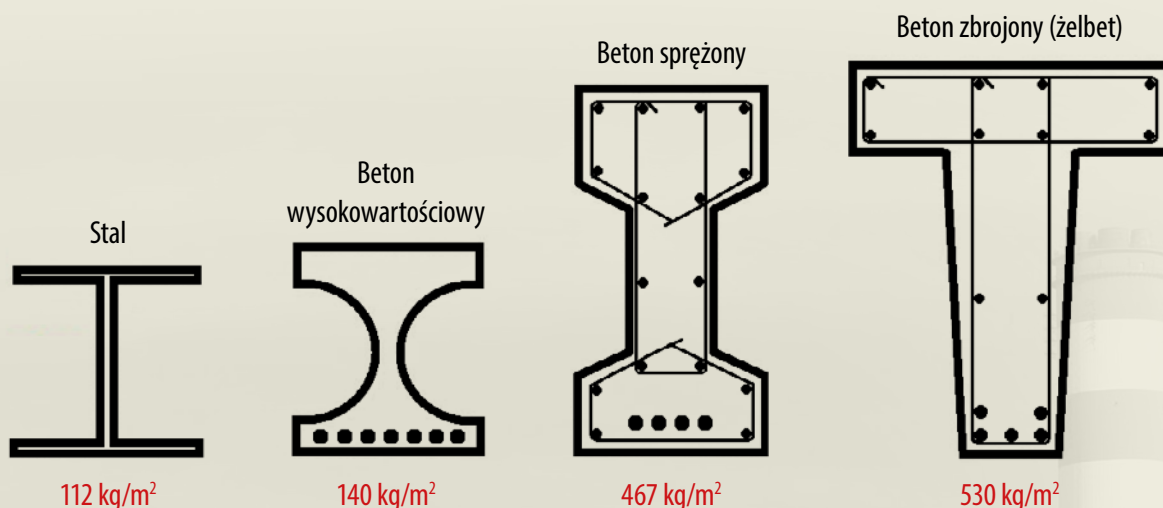
Tabela 1. Beton wysokich wytrzymałości w konstrukcjach

Rodzaj konstrukcji	Właściwości w porównaniu do betonów zwykłych
Mosty	Wyższa wczesna wytrzymałość, lepsza urabialność, większa trwałość, mniejsze odkształcenia, wysoka wytrzymałość końcowa
Konstrukcje morskie	Większa trwałość, wysoka wytrzymałość na ściskanie i ścinanie, lepsza urabialność, wyższa odporność na uderzenia oraz na ścieranie
Budynki wysokie	Wyższa wytrzymałość na ściskanie i ścinanie, lepsza urabialność, wyższa wytrzymałość wczesna, mniejsza odkształcalność
Tunele	Duża trwałość, wyższa wytrzymałość na ściskanie, wyższa wczesna wytrzymałość, wysoka szczelność
Nawierzchnie drogowe	Wyższa wytrzymałość na ścieranie i uderzenia, wyższa odporność na cykle zamrażania i odmrażania, duża wytrzymałość na ścinanie, trwałość, lepsza urabialność
Elementy prefabrykowane	Wyższa wytrzymałość wczesna, wyższa wytrzymałość na ściskanie i ścinanie, lepsza urabialność, mniejsza masa konstrukcji
Elementy odwodnienia	Wysoka trwałość i odporność na ścieranie, wyższa wytrzymałość na ściskanie, lepsza urabialność

Mimo, że koszt produkcji betonu BWW jest wyższy od zwykłych betonów, to może on zostać zrekompensowany przez oszczędności, które wynikają z jego stosowania. Wyższa wytrzymałość na ściskanie może obniżyć zapotrzebowanie ilościowe na beton (do 30%) oraz na stal zbrojeniową. Ponadto, szybki przyrost wytrzymałości betonu wysokowartościowego pozwala na wcześniejsze rozebranie i przeniesienie deskowań, co przekłada się na czas realizacji inwestycji. Konstrukcje wykonane przy użyciu betonu BWW charakteryzują się wysoką trwałością, co pozwala obniżyć koszty konserwacji i utrzymania w trakcie eksploatacji.



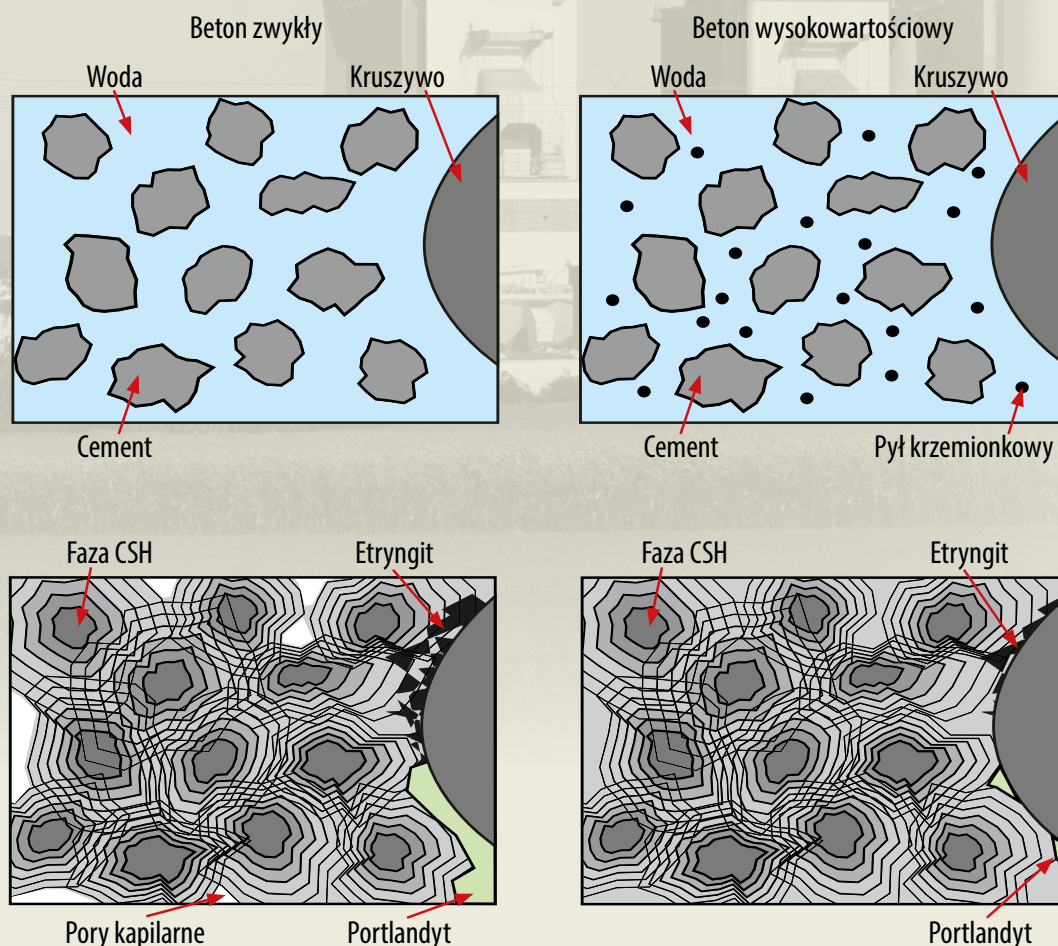
Rys. 3. Najwyższe budynki świata (www.emporis.com)



Rys. 4. Ciężar właściwy i proporcje przekrojów belek o tej samej nośności wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych

W betonach zwykłych najłagodniejszym ogniwem kompozytu jest strefa kontaktowa zaczyn – kruszywo. W betonach wysokowartościowych grubość i porowatość strefy przejściowej zaczyn-kruszywo ulega zmniejszeniu, co pozwala lepiej przenosić obciążenia pomiędzy zaczynem cementowym a kruszywem i skutkuje podwyższeniem wytrzymałości. W związku z tym w betonach wysokowartościowych to kruszywo staje się zazwyczaj najłagodniejszym ogniwem. Na rys. 5 przedstawiono mikrostrukturę betonu zwykłego i wysokowartościowego. Wysoka wytrzymałość betonu wysokowartościowego uzyskiwana jest poprzez:

- zmniejszenie porowatości,
- zwiększenie jednorodności,
- ograniczenie mikrospekkań w stwardniałym zaczynie i w strefie przejściowej zaczyn-kruszywo.



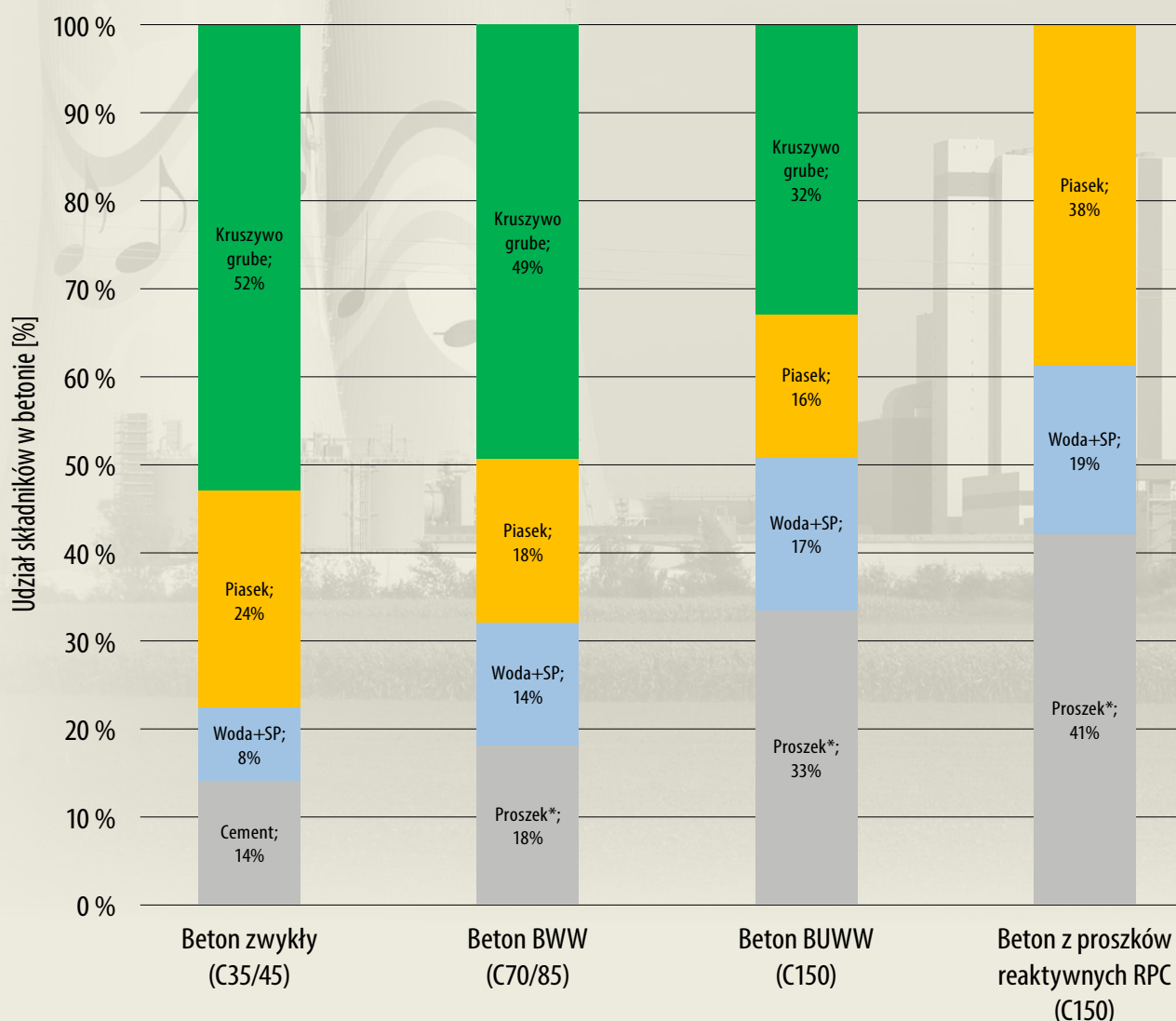
Rys. 5. Mikrostruktura betonu zwykłego w porównaniu do betonu wysokowartościowego

W projektowaniu betonu wysokowartościowego brak jest norm i jednolitych procedur, należy korzystać z ogólnych wytycznych oraz metod doświadczalnych. Przy projektowaniu składu betonu BWW należy stosować następujące założenia technologiczne:

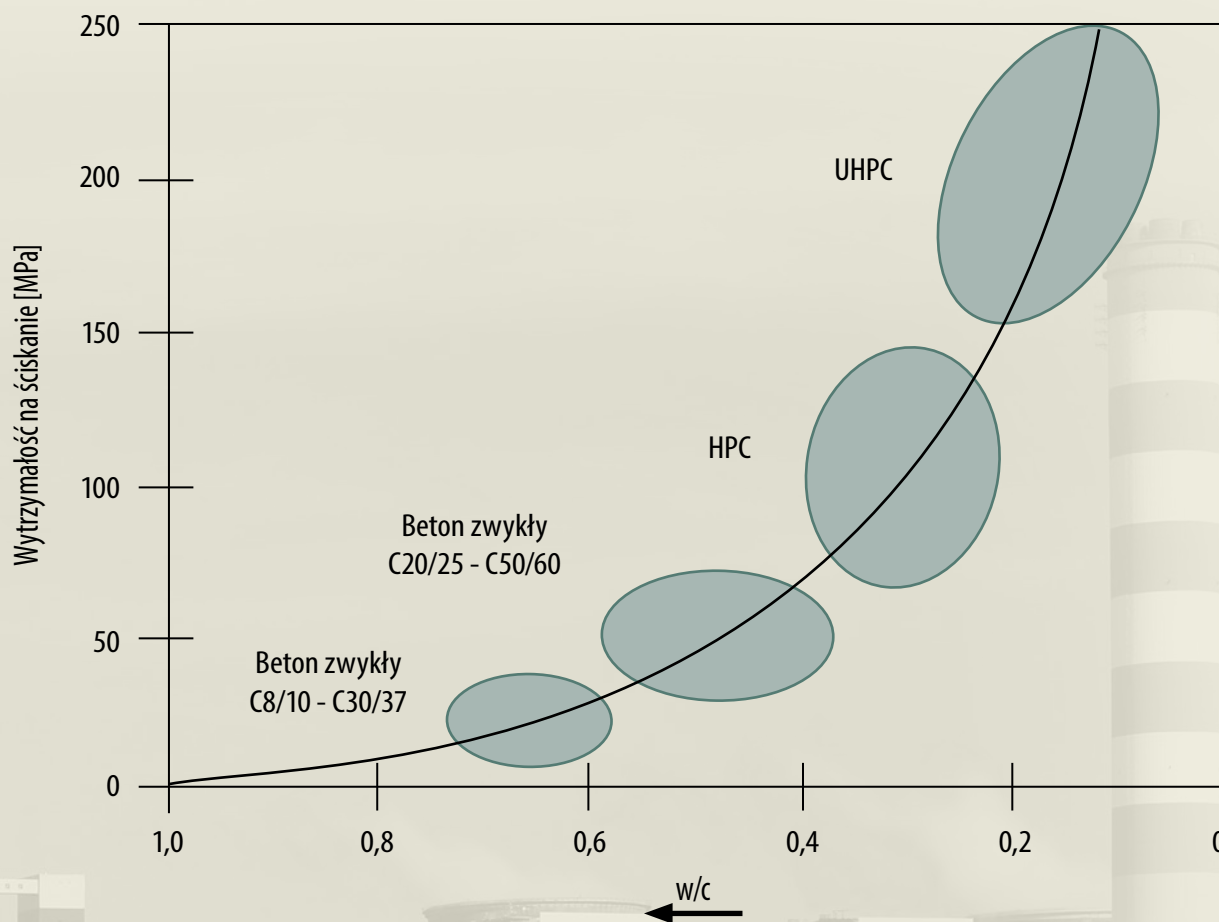
- przyjąć możliwie najniższy współczynnik w/c (w/s), dla BWW $0,35 \div 0,45$; dla BBWW $0,25 \div 0,35$,
- stosować cementy wysokiej jakości o stabilnych, powtarzalnych właściwościach, klasy wytrzymałości $\geq 42,5$,
- stosować kruszywa o bardzo dużej wytrzymałości mechanicznej oraz wysokiej jakości (brak zanieczyszczeń w postaci pyłów),
- stosować dodatki mające na celu uszczelnienie mikroporów poprzez wypełnienie stosu okrucowego fazą mikroziarnistą, zwiększenie szczelności oraz wypełnienie strefy na granicy zaczyn-kruszywo, np. pył krzemionkowy, nanokrzemionka, popiół lotny kategorii S,
- stosować domieszki silnie redukujące ilość wody (stężone polikarboksylany, PCE).

Przykładowe receptury betonów wysokich wytrzymałości przedstawiono na rys. 6. W produkcji betonu BWW należy stosować cementy powszechnego użytku (CEM I, CEM II, CEM III) klasy wytrzymałości co najmniej 42,5 stabilnej jakości i powtarzalnych właściwościach. W zależności od założonej klasy betonu ilość cementu powinna wynosić $450 \div 550 \text{ kg/m}^3$, dla BUWW nawet powyżej 700 kg/m^3 .

Podstawowym kierunkiem w dążeniu do osiągnięcia betonu wysokiej wytrzymałości i trwałości jest zapewnienie możliwie niskiego współczynnika wodno-cementowego, $w/c < 0,45$ (tabela 2, rys. 7). Dolna granica wielkości współczynnika w/c dla betonów ultra wysokowartościowych wynosi ok. 0,20, pod warunkiem osiągnięcia odpowiedniej urabialności mieszanki betonowej pozwalającej na prawidłowe zagęszczenie i zabudowę oraz warunków pielęgnacji zapewniających dostęp wody dla prawidłowego przebiegu procesu hydratacji cementu (spoiwa), np. poprzez pielęgnację wewnętrzną.



Rys. 6. Przykładowy skład (udział objętościowy) betonu zwykłego, BWW, BUWW i RPC (*- suma ilości cementu i dodatków mineralnych, SP – superplastyfikator)



Rys. 7. Zależność pomiędzy współczynnikiem w/c a wytrzymałością na ściskanie

Tabela 2. Wymagania dotyczące składu betonu wysokowartościowych

	Beton zwykły	Beton wysokowartościowy (HPC/BWW)	Beton bardzo wysokowartościowy (UHPC/BBWW)	Beton ultra wysokowartościowy (UHPC/BUWW)
Współczynnik w/c	> 0,45	0,45÷0,35	0,35÷0,25	< 0,25
Domieszki chemiczne	Stosowanie nie jest wymagane, ew. plastyfikator	Plastyfikator/ Superplastyfikator	Superplastyfikator	Superplastyfikator
Dodatki typu II	Stosowanie nie jest wymagane, ale zalecane	Popiół lotny	Pył krzemionkowy/ Popiół lotny*	Pył krzemionkowy Popiół lotny*
Mrozoodporność	Wymagane napowietrzenie betonu	Wymagane napowietrzenie betonu	Wymagane napowietrzenie betonu	Brak zamarzającej wody

* - można stosować również metakaolin/zmielony granulowany żużel wielkopiecowy

Z uwagi na znaczący udział kruszywa w objętości betonu, szczególnie istotne są jego właściwości, w tym wytrzymałość. Podstawą kwalifikacji kruszywa grubego do betonu wysokowartościowego są:

- wysokie parametry mechaniczne skały (wytrzymałość ≥ 150 MPa),
- ciągła krzywa uziarnienia (skład granulometryczny),
- kształt ziaren, optymalny jest zbliżony do kubicznego,
- zdefiniowana reaktywność alkaliczna (możliwość wystąpienia reakcji ASR).

Im wyższa jest zamierzona wytrzymałość na ściskanie betonu BWW, tym mniejszy powinien być maksymalny wymiar ziaren stosowanego kruszywa. Dla betonu klasy wytrzymałości do C60/75 należy ograniczyć maksymalny wymiar ziaren kruszywa do 24 mm, dla wytrzymałości powyżej 100 MPa do 20 mm, a dla betonów o wytrzymałości powyżej 150 MPa należy stosować kruszywo o maksymalnym rozmiarze ziaren 10÷12 mm. Niepożądane są ziarna płaskie i podłużne ze względu na słabą zdolność do przenoszenia obciążeń. Należy stosować kruszywo łamane o chropowatej powierzchni ziaren, korzystnie wpływające na przyczepność zaczynu do kruszywa. Wymagania jakościowe względem frakcji piaskowej kruszywa (0÷2 mm) nie odbiegają od wymagań dla piasku do betonu zwykłego. Preferowany jest piasek o uziarnieniu od 0,25 do 2 mm o ograniczonej do minimum zawartości frakcji pyłastej (z uwagi na wodożądność). Punkt piaskowy w stosie okruszonym powinien wynosić od 27 do 32%. Zalecane jest stosowanie piasków o tym samym pochodzeniu geologicznym, co kruszywo grube.

Najczęściej stosowanym dodatkiem do betonu wysokowartościowego jest pył krzemionkowy. Modyfikuje on szereg właściwości zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu BWW (wytrzymałość, porowatość, wodoszczelność, odporność na agresję chemiczną). Zalecane jest stosowanie pyłu krzemionkowego w składzie betonu, w ilości do 10%, w przeliczeniu na masę cementu, szczególnie dla betonów o projektowanej wytrzymałości na ściskanie powyżej 75 MPa (klasa wytrzymałości $\geq C60/75$). Przy stosowaniu pyłu krzemionkowego należy natomiast uwzględnić wzrost wodożądności mieszanki wynikający z wysokiego stopnia rozdrobnienia mikrokrzemionki (zawartość bardzo drobnych ziaren o rozwinętej powierzchni właściwej, tj. 14÷20 m²/g).

Stosowanie popiołów lotnych w składzie betonów BWW wymaga należytej kontroli ich właściwości tak, by były one wysokiej jakości, tj. o bardzo drobnych, sferycznych ziarnach, miałkości $\leq 12\%$ (kategoria S wg PN-EN 450-1), ze znaczną zawartością fazy szklistej oraz o jak najniższej zawartości strat prażenia $< 5,0\%$ (kategoria A wg PN-EN 450-1). Odpowiedni dobór popiołów lotnych pozwoli na zmniejszenie zawartości wody w betonie bez utraty urabialności, poprawę wytrzymałości w dłuższym okresie dojrzewania oraz obniżenie ciepła twardnienia betonu. Możliwe jest również opracowanie receptury i wykonanie betonu wysokiej wytrzymałości, zawierającego dwa lub więcej dodatki mineralne, np. pył krzemionkowy i popiół lotny krzemionkowy lub pył krzemionkowy i zmielony granulowany żużel wielkopiecowy.

Ponadto, w celu poprawy pewnych właściwości betonów wysokowartościowych (głównie mechanicznych) w ich składzie stosuje się różne rodzaje włókien, np. metalowe, polipropylenowe, szklane lub włókna węglowe w przypadku betonów ultra wysokowytrzymałościowych. W tabeli 3 przedstawiono wpływ poszczególnych rodzajów włókien na właściwości tego typu betonów.

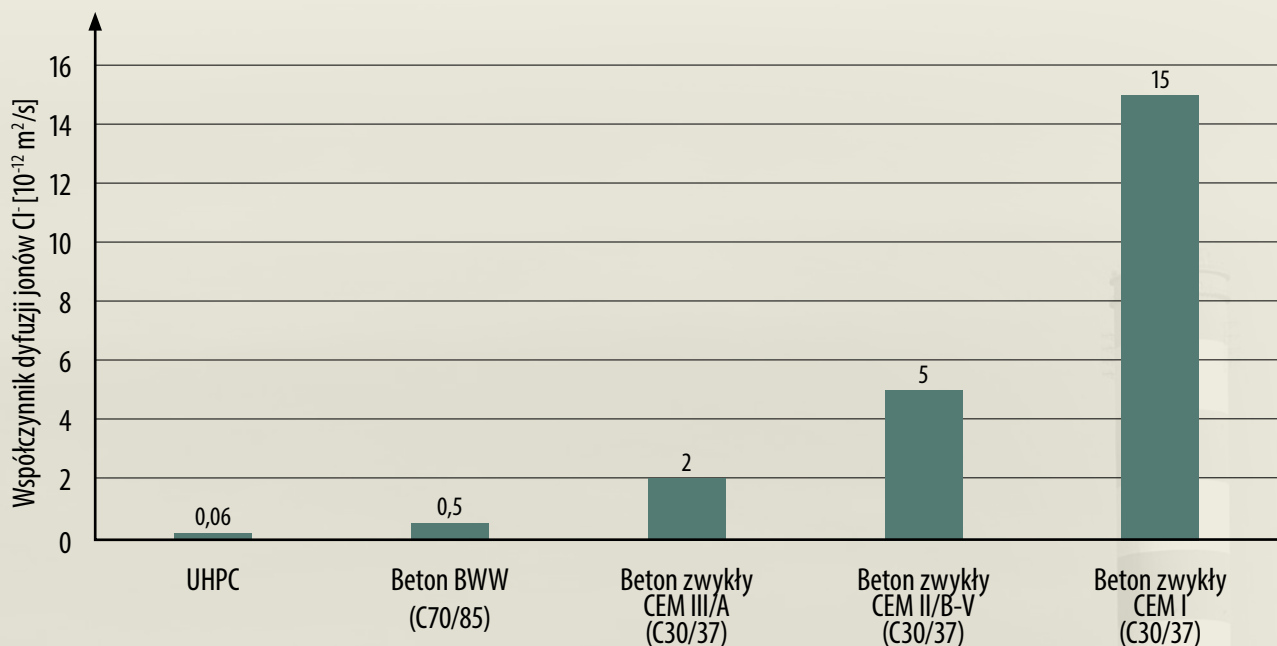
Tabela 3. Wpływ włókien na właściwości betonu wysokowytrzymałościowego

Rodzaj włókien		
Stalowe	Polipropylenowe	Szklane
<ul style="list-style-type: none"> wzrost energii pęknięcia, następująca poprawa ciągliwości wzrost wytrzymałości (na ściskanie i rozciąganie) redukcja tendencji do zarysowania 	<ul style="list-style-type: none"> spadek ilości mikrorys powstających podczas przyłożenia obciążenia poprawienie odporności ogniowej zmniejszenie wczesnego skurczu 	<ul style="list-style-type: none"> redukcja naprężeń własnych wewnątrz młodego betonu
<p>Na właściwości fibrobetonów wysokowytrzymałościowych wpływają, oprócz rodzaju włókien, także: długość włókien (długie lub krótkie), smukłość (stosunek długości do średnicy) oraz kształt włókien (proste, gładkie czy pofalowane).</p>		

W betonach wysokowartościowych koniecznym jest stosowanie domieszek uplastyczniających i upłynniających w celu uzyskania odpowiednich właściwości reologicznych przy bardzo niskim współczynniku wodno-cementowym. Redukując ilość wody należy zwiększyć ilość domieszki, czego skutkiem jest wzrost lepkości mieszanki. Redukcja wody oraz wzrost lepkości mieszanki prowadzi bardzo często do szybkiego spadku konsystencji w czasie, co może stwarzać duże utrudnienia na etapie transportu, pompowania i zabudowy mieszanki betonowej oraz negatywnie wpływać na jakość zabudowanego betonu w konstrukcji.

Uzyskanie specjalnych właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu wysokowartościowego może wymagać stosowania także innego rodzaju domieszek chemicznych, np. napowietrzających, przyspieszających wiązanie i twardnienie, zwiększających wiązliwość wody, itp. Podobnie, jak w przypadku betonu zwykłego, ich przydatność oraz kompatybilność należy sprawdzić doświadczalnie.

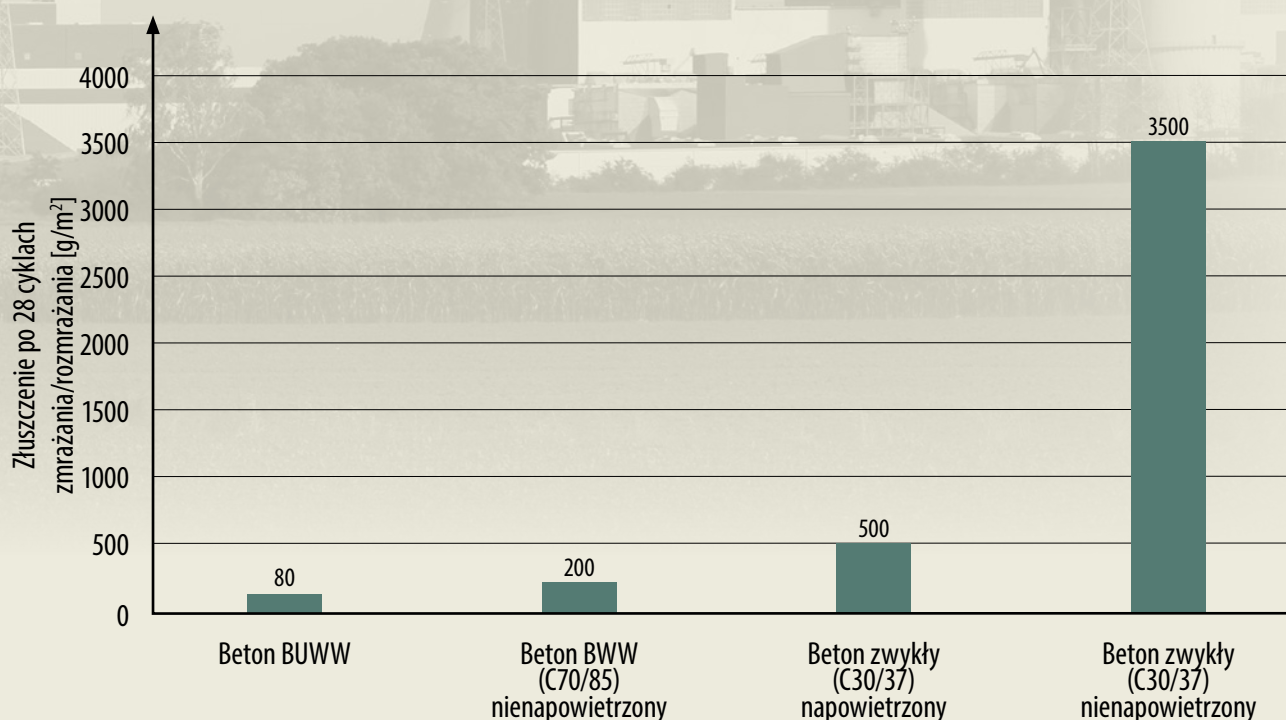
Betony wysokowartościowe, oprócz wysokiej wytrzymałości, charakteryzują się wysoką szczelnością, wynikająca z gęstej i praktycznie nieporowatej mikrostruktury, w tym także małej ilości porów kapilarnych (rys. 8). Przekłada się to w sposób korzystny na kształtowanie odporności betonów BWW na wnikanie agresywnych mediów ciekłych i gazowych, np. chlorków, CO₂, itp. Ograniczenie transportu mediów ciekłych przez beton jest korzystne również z uwagi na ograniczenie ryzyka wystąpienia reakcji alkalia-reaktywne kruszywo, ponieważ obecność wody (wilgoci) jest niezbędna dla przebiegu reakcji ASR.



Rys. 8. Współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych w betonie wysokowytrzymałościowym i zwykłym z różnymi cementami

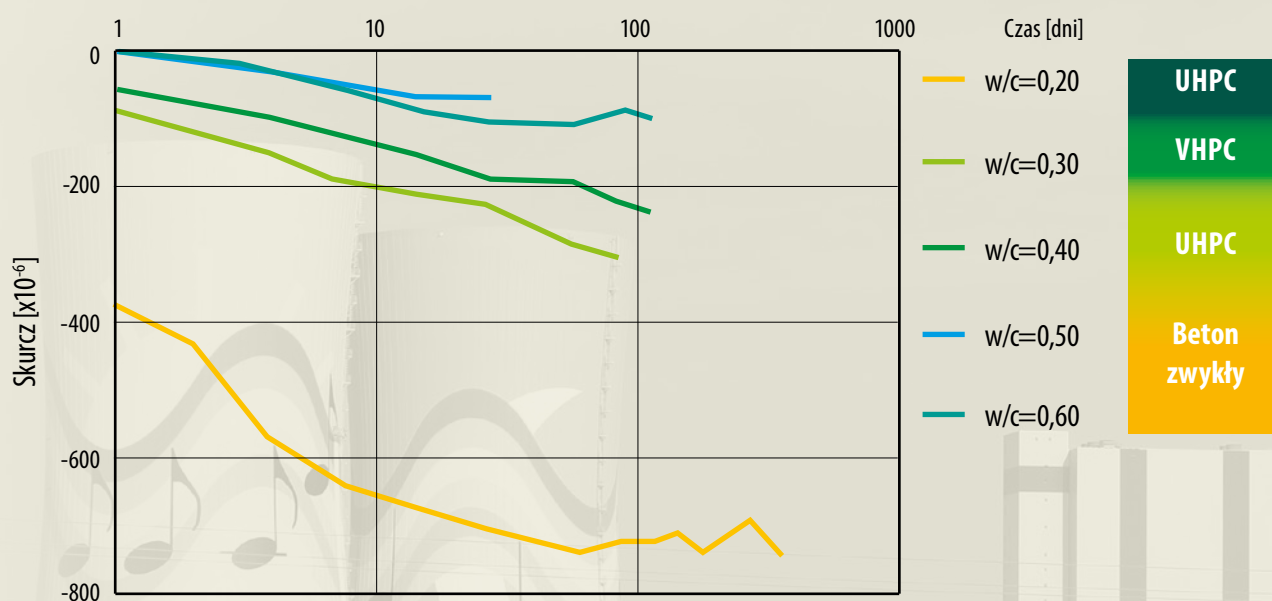
Betony wysokich wytrzymałości charakteryzują się ponadto wysoką mrozoodpornością (rys. 9). Wyniki licznych prac badawczych wskazują, że betony BBWW i BUWW charakteryzują się bardzo dobrą mrozoodpornością bez konieczności ich napowietrzenia, co wynika z bardzo niskiej porowatości całkowitej, małej ilości porów kapilarnych oraz wody wolnej, która mogłaby zamarzać.

Betony BWW, BBWW i BUWW charakteryzują się niższą odpornością na działanie wysokich temperatur niż betony zwykłe. Jednak betony wysokich wytrzymałości są wciąż materiałami niepalnymi i nierozprzestrzeniającymi ognia. Niższa odporność na działanie wysokich temperatur wynika z ich wysokiej szczelności, co uniemożliwia w przypadku działania wysokich temperatur odprowadzenia pary wodnej, powstającej we wnętrzu betonu. Wewnętrzne ciśnienie pary wodnej bardzo szybko osiąga wartości przekraczające wytrzymałość betonu rozciąganie (pomimo jej wysokiej wartości) i skutkuje powstawaniem odprysków powierzchniowych, a w konsekwencji awarii przy obciążeniu użytkowym. Odporność betonów wysokowartościowych na działanie wysokich temperatur można skutecznie zwiększyć poprzez zastosowanie włókien polipropylenowych, które w przypadku pożaru ulegają spaleni, pozostawiając pustki w strukturze betonu umożliwiające odparowanie wody.



Rys. 9. Mrozoodporność betonów (metoda CDF wg PKN-CEN/TS 12390-9)

W betonach wysokich wytrzymałości szczególnego znaczenia nabiera skurcz autogeniczny (tzw. samoczynny lub samoistny). Jest on konsekwencją „wyciągania” wody z porów kapilarnych podczas hydratacji cementu dotychczas niezhydratowanego. W zwykłym betonie o wysokim współczynniku w/c, np. większym niż 0,50 znajduje się więcej wody niż jest konieczne do pełnej hydratacji cementu i prawie nie występuje w nim skurcz samoistny. Natomiast w przypadku betonów wysokowartościowych może stanowić to poważny problem, jeżeli nie są poddane odpowiedniej pielęgnacji podczas procesu hydratacji. Możliwość wystąpienia skurczu samoistnego w betonach wysokowartościowych jest bardzo duża, gdyż ich typowy współczynnik w/c wynosi około 0,25÷0,30. Poza tym zawierają stosunkowo dużo cementu i dodatki mineralne oraz relatywnie małą ilość wody zarobowej. Po rozpoczęciu procesu hydratacji, przy niewielkiej wilgotności wewnętrznej (niskie w/c), wysuszenie kapilar może doprowadzić do wysokich naprężeń rozciągających, które kurczą stwardniały zaczyn cementowy (rys. 10). Wysoki skurcz autogeniczny i jego szybki rozwój zwiększa znacząco ryzyko powstania mikrospekna w betonie, zwłaszcza we wczesnym okresie, jeżeli element z niego wykonany jest pozbawiony swobody odkształceń.



Rys. 10. Wpływ współczynnika w/c na skurcz autogeniczny betonu

