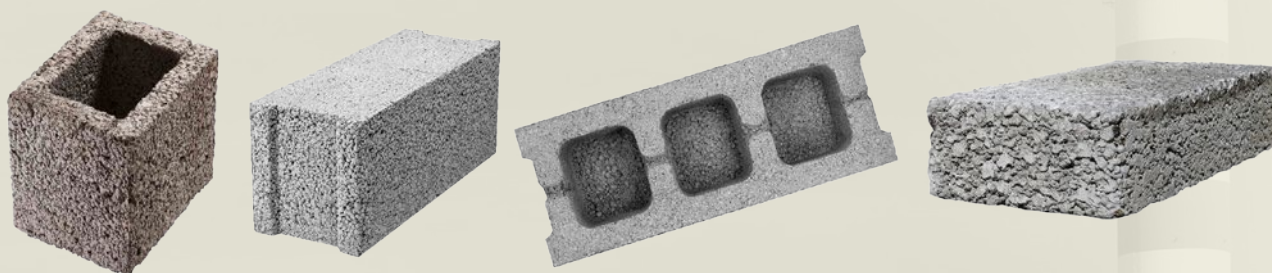


Beton lekki stosowany jest w różnych obszarach budownictwa, oprócz produkcji prefabrykatów drobno- i wielkowymiarowych (rys. 1), znajduje również zastosowanie w budownictwie monolitycznym. Pomimo szerokiej możliwości zastosowań konstrukcyjnych betonów lekkich, liczba realizacji jest stosunkowo niewielka, w porównaniu z liczbą obiektów wykonanych z betonu zwykłego. Powodów takiego stanu jest kilka:

- beton lekki jest materiałem wymagającym technologicznie,
- proces projektowania betonu lekkiego jest bardziej skomplikowany,
- dostępność kruszywa lekkiego jest ograniczona,
- produkcja betonu lekkiego wymaga dodatkowych zabiegów technologicznych, przez co obarczona jest większym ryzykiem błędu.



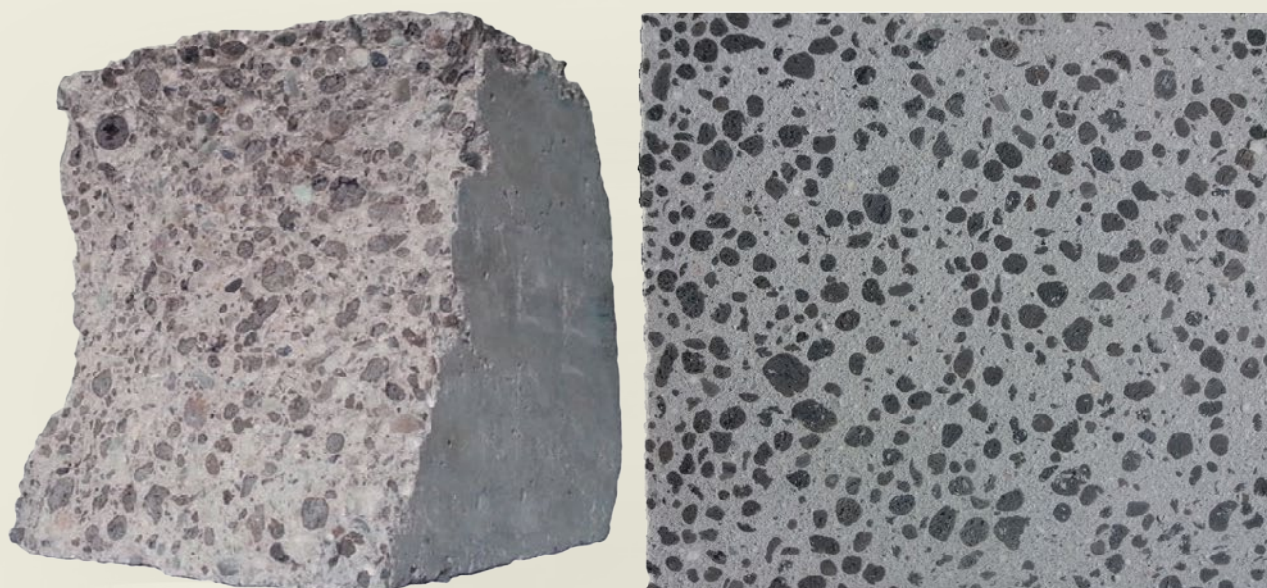
Rys. 1. Przykłady elementów prefabrykowanych z betonu lekkiego (www.leca.asia)

Norma PN-EN 206 jako definicję betonu lekkiego podaje, iż jest to beton o gęstości w stanie suchym nie mniejszej niż 800kg/m^3 i nie większej niż 2000kg/m^3 . Norma wprowadza klasyfikację betonu lekkiego ze względu na gęstość (tabela 1) oraz wytrzymałość na ściskanie (tabela 2).

Tabela 1. Klasy gęstości betonu lekkiego wg PN-EN 206+A1:2016

Klasa gęstości betonu lekkiego	Gęstość [kg/m^3] (badanie wg PN-EN 12390-7)	
	D 1,0	≥ 800
D 1,2	> 1000	≤ 1200
D 1,4	> 1200	≤ 1400
D 1,6	> 1400	≤ 1600
D 1,8	> 1600	≤ 1800
D 2,0	> 1800	≤ 2000

Beton lekki o strukturze zwartej znajduje zastosowanie głównie w prefabrykacji. Beton lekki jest produkowany z zastosowaniem, wyłącznie lub częściowo, kruszywa lekkiego (rys. 2). Norma PN-EN 1992 „Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu” dodatkowo precyzuje, że lekki beton kruszywowo do celów konstrukcyjnych musi mieć strukturę zwartą. Pod pojęciem betonu lekkiego o strukturze zwartej – która nie została zdefiniowana w dokumentach normalizacyjnych, należy rozumieć beton, który nie spełnia wymagań definicji normowej betonu o strukturze otwartej. Zgodnie z definicją podaną w normie PN-EN 1520 „Prefabrykowane elementy z betonu lekkiego kruszywowego o otwartej strukturze” beton lekki kruszywowo to beton o gęstości nie większej niż 2000 kg/m^3 , dodatkowo charakteryzujący się zawartością objętościową pustek międzyziarnowych powyżej 3%. Beton o strukturze otwartej wykonywany jest z kruszyw lekkich lub głównie z kruszyw lekkich, w którym zredukowana została zawartość kruszywa drobnego i/lub materiałów wiążących.



Rys. 2. Beton lekki o strukturze zwartej

Tabela 2. Klasy wytrzymałości na ściskanie betonu lekkiego wg PN-EN 206+A1:2016

Klasa wytrzymałości betonu lekkiego	Minimalna wytrzymałość charakterystyczna na próbka walcowych $f_{ck, cyl}$ [N/mm ²]	Minimalna wytrzymałość charakterystyczna na próbkach sześciennych $f_{ck, cube}$ [N/mm ²]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 67/77	70	77
LC 80/88	80	88

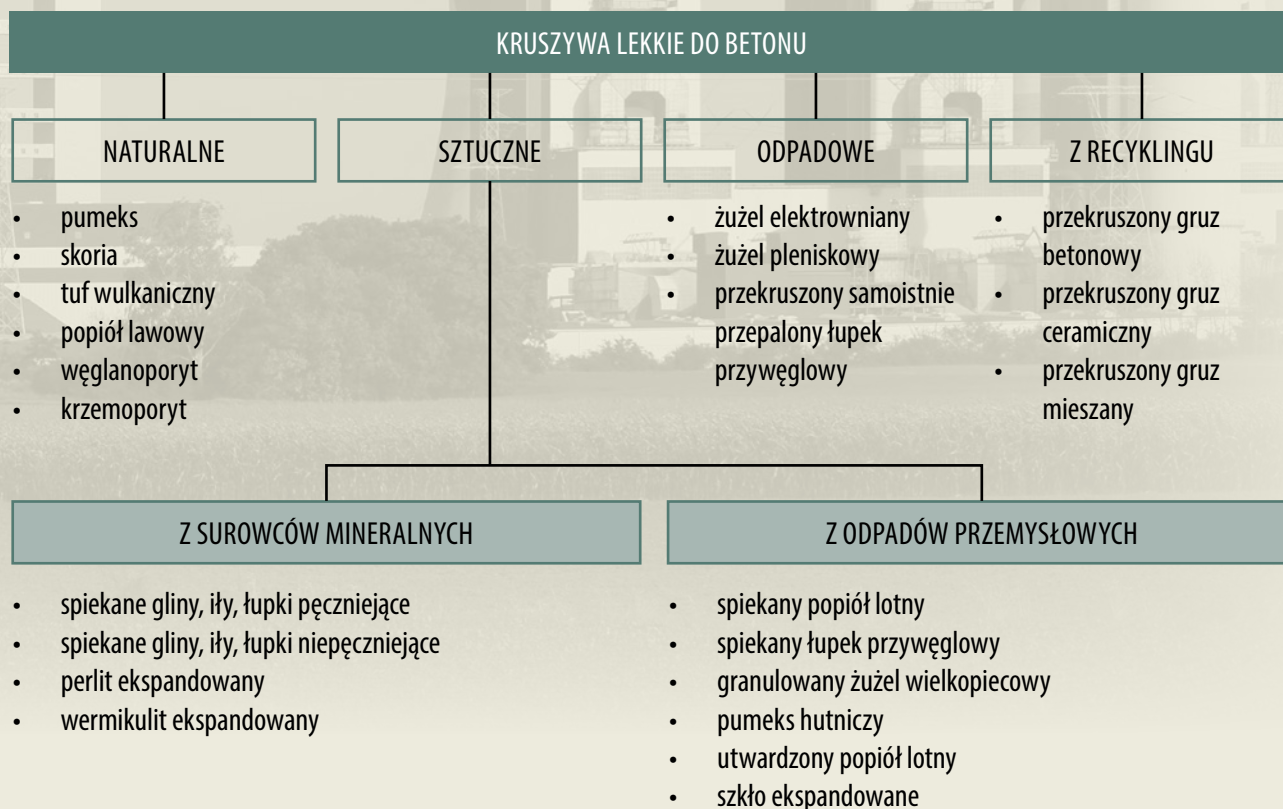
W funkcji konstrukcyjnej ($f_{ck, cube} \geq 15$ MPa) stosowany może być jedynie beton kruszywowy o strukturze zwartej z kruszywem mineralnym. Pomimo doświadczeń w stosowaniu wypełniaczy organicznych w produkcji betonu lekkiego, wykorzystywanych głównie w produkcji elementów prefabrykowanych (trociny, wióry, granulaty styropianowy), składniki te nie mogą być zaklasyfikowane jako kruszywo. W tabeli 3 przedstawiono systematykę betonów lekkich z uwagi na technologię produkcji oraz strukturę materiału.

Tabela 3. Systematyka betonów lekkich z uwagi na strukturę materiału

Betony lekkie ($D \leq 2000 \text{ kg/m}^3$)				
Betony lekkie kruszywowe		Beton komórkowy		
struktura zwarta	struktura otwarta	pianobeton, pianosilikat	gazobeton, gazosilikat	
z kruszywem organicznym			nieautoklawizowany	autoklawizowany
z kruszywem mineralnym				

Wysoka złożoność i trudność w zastosowaniu betonu lekkiego wynika przede wszystkim z cech wypełniacza stosowanego do produkcji, tj. kruszywa lekkiego. Wysoka porowatość (40÷80%) kruszyw stosowanych w technologii betonu lekkiego kruszywowego istotnie wpływa na zróżnicowanie gęstości ziaren, wahającej się w zakresie 300÷2000 kg/m³. Właściwości kruszyw lekkich różnią się w bardzo znacznym zakresie, nieporównywalnie szerszym niż w przypadku kruszyw zwykłych.

Ogólną przydatność kruszyw lekkich do betonu ustala się w oparciu o wytyczne normy PN-EN 13055 „Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy”. W Polsce, z uwagi na korzystne właściwości i dostępność, stosowane są kruszywa głównie sztuczne z glin spiekanych lub łupków pęczniejących oraz popiołów lotnych. Jednym z podstawowych parametrów kruszywa lekkiego, traktowanych jako kryterium przydatności do betonów konstrukcyjnych, jest gęstość ziaren. Do betonów lekkich konstrukcyjnych stosowane są głównie kruszywa pochodzenia mineralnego, o gęstości ziaren w stanie suchym nie większej niż 2000 kg/m³ lub gęstości nasypowej w stanie luźnym nie większej niż 1200 kg/m³. Z reguły stosuje się kruszywa o gęstości przekraczającej 900 kg/m³. Klasyfikację kruszyw lekkich, odpowiadającą podziałowi na cztery grupy według PN-EN 13055–1, przedstawiono na rys. 3, a przykłady kruszyw lekkich na rys. 4. W wielu przypadkach równie istotną cechą, jak gęstość, jest porowatość kruszyw lekkich, a szczególnie struktura tej porowatości. Kruszywa o podobnej gęstości ziaren mogą bowiem charakteryzować się znacząco różnymi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi. Z reguły proces spiekania kruszyw sztucznych gwarantuje ograniczenie porowatości otwartej, w szczególności w zewnętrznej powłoce ziaren, sprzyjając wzrostowi wytrzymałości oraz ograniczeniu nasiąkliwości.



Rys. 3. Klasyfikacja kruszyw lekkich do betonu



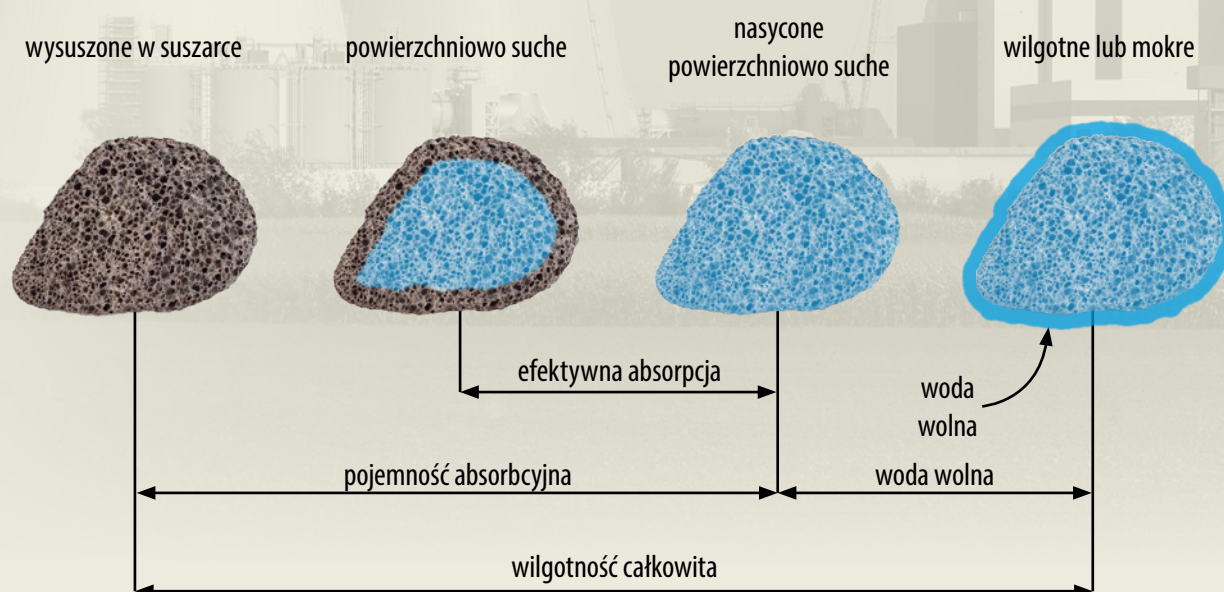
Rys. 4. Kruszywo lekkie a) naturalne - ziarno pumeksu, b) sztuczne z surowców mineralnych - spiekane z glin pęczniejących, c) odpadowe - szkło ekspandowane

Zależnie od zastosowanych surowców i technologii produkcji wśród kruszyw spiekanych dostępnych na rynku można wyróżnić takie, które charakteryzują się:

- w większości drobnymi porami zamkniętymi,
- w większości porami otwartymi znacznych rozmiarów,
- powierzchniowo głównie porami zamkniętymi, a we wnętrzu porami otwartymi.

W efekcie tak zróżnicowanej struktury stosowanych kruszyw lekkich ich nasiąkliwość waha się od 2 do ponad 45%. Wysoka nasiąkliwość kruszyw porowatych, niosąca ze sobą ryzyko utraty urabialności mieszanki, jest tą cechą, która w największym stopniu komplikuje proces wykonywania betonów lekkich. Istotna jest tu nie wartość maksymalna, a dynamika absorpcyjności wody w czasie. Szacuje się, że kruszywa lekkie w ciągu pierwszych kilku minut nasączenia są w stanie wchłonąć ilość wody odpowiadającą ok. 50÷95% ich nasiąkliwości po 1 godzinie. W zależności od dynamiki rozwoju nasiąkliwości w czasie, mieszanki betonowe na kruszywie lekkim wymagają różnych procedur i różnego czasu mieszania oraz wykazują odmienną podatność na ryzyko utraty urabialności, w zależności od rodzaju i właściwości kruszywa.

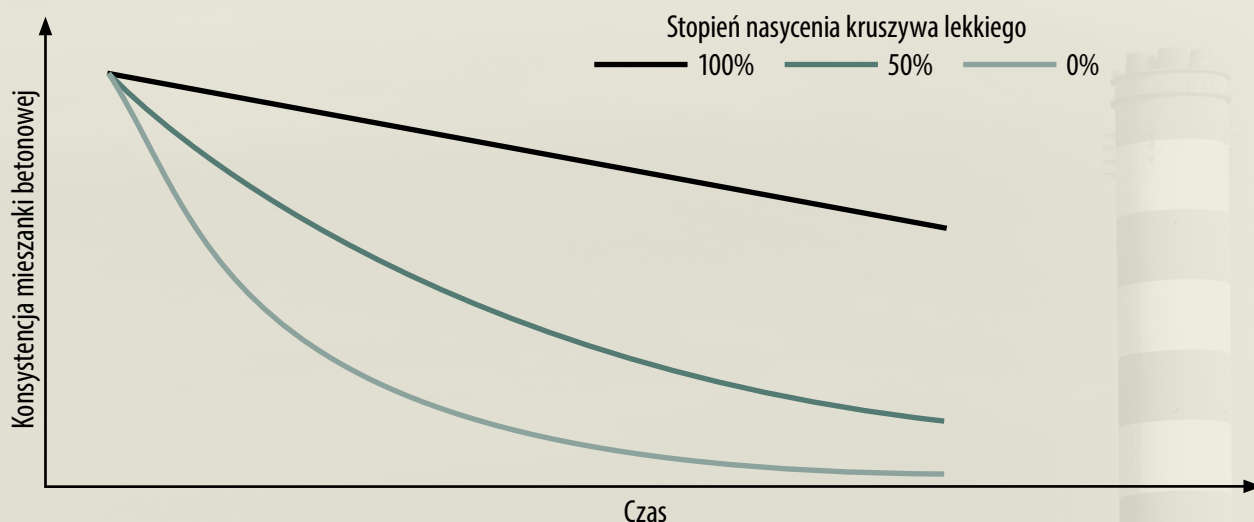
Nasiąkliwość kruszyw lekkich wynika przede wszystkim ze struktury ich porowatości, lecz zdeterminowana jest również poziomem wstępnej wilgotności i stanem wilgotności. W praktyce rzadko stosowane jest kruszywo lekkie w stanie suchym. Na rys. 5 schematycznie przedstawiono stany w jakich może znajdować się kruszywo: wysuszone w suszarce, powierzchniowo suche, nasycone powierzchniowo suche oraz wilgotne lub mokre.



Rys. 5. Stany wilgotnościowe kruszywa

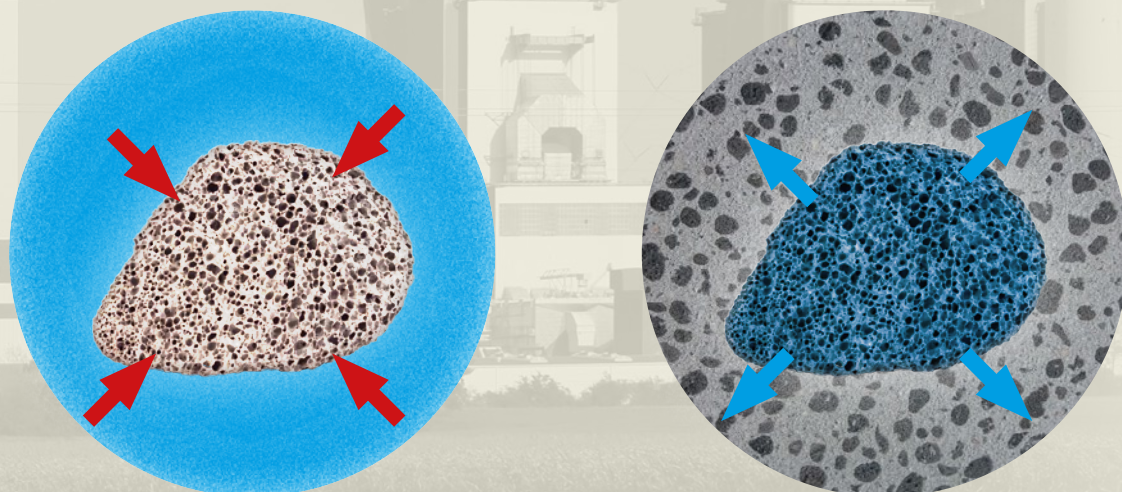
Stan wilgotnościowy kruszyw stosowanych do produkcji betonu lekkiego ma wpływ, zarówno na cechy mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Kruszywa lekkie o wysokiej nasiąkliwości nie w pełni nasycone, absorbują wodę z mieszanki betonowej powodując duży spadek konsystencji mieszanki w trakcie transportu (rys. 6). Wraz z wodą przez ziarna kruszywa absorbowana może

być również domieszka upłynniająca, z tego względu przywrócenie konsystencji wtórnym dozowaniem wody w ilości odpowiadającej zaabsorbowanej przez kruszywo nie jest wskazane. Z drugiej strony, wysoka nasiąkliwość kruszyw lekkich może zapewnić korzystny efekt. Woda zgromadzona w porach wewnętrznych kruszywa lekkiego stanowi bufor dla hydratacji cementu podczas twardnienia mieszanki betonowej, zapewniając wewnętrzną pielęgnację betonu (rys. 7).



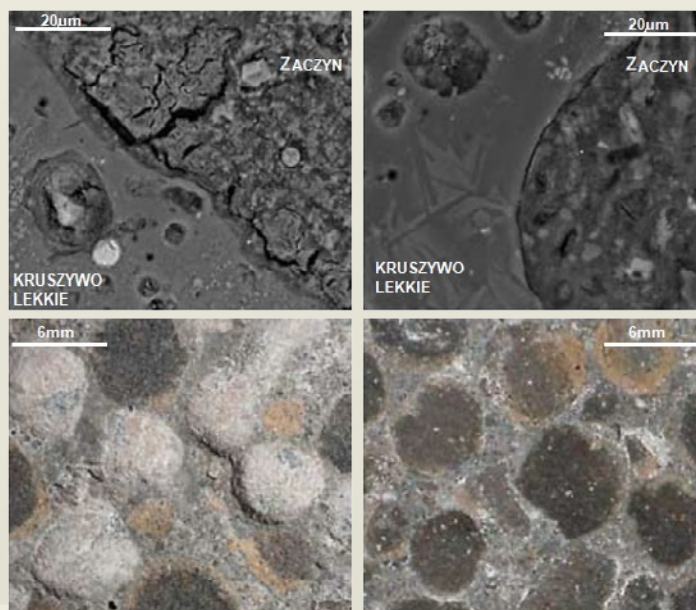
Rys. 6. Konsystencja mieszanki betonowej w zależności od stopnia nasycenia kruszywa lekkiego

W efekcie betony lekkie kruszywowe są mniej wrażliwe na niewłaściwą pielęgnację zewnętrzną. Natomiast proces wysychania betonów lekkich jest w związku z tym zdecydowanie dłuższy (w porównaniu do betonów zwykłych) i może mieć niekorzystny wpływ na właściwości użytkowe betonu.



Rys. 7. Pielęgnacja wewnętrzna betonu

W przypadku stosowania kruszywa lekkiego, po zabudowaniu betonu absorpcja wody przebiega dalej, co przyczynia się do zmniejszenia efektywnego współczynnika w/c mieszanki betonowej, w konsekwencji czego strefa przejściowa na styku ziarno-zaczyn cementowy ulega uszczelnieniu oraz zwiększa się przyczepność kruszywa do matrycy cementowej. W wielu przypadkach strefa stykowa okazuje się najmocniejszym elementem struktury betonów lekkich, ze względu na absorpcję nadmiaru wody w tych obszarach przez kruszywo oraz wnikanie zaczynu w pory powłoki zewnętrznej (rys. 8). Oprócz efektu fizycznego i mechanicznego, poprawa przyczepności zaczynu do kruszywa może wynikać również z przebiegu reakcji pucolanowej zachodzącej między składnikami kruszywa, a Ca(OH)_2 z hydratacji faz krzemianowych klinkieru portlandzkiego.



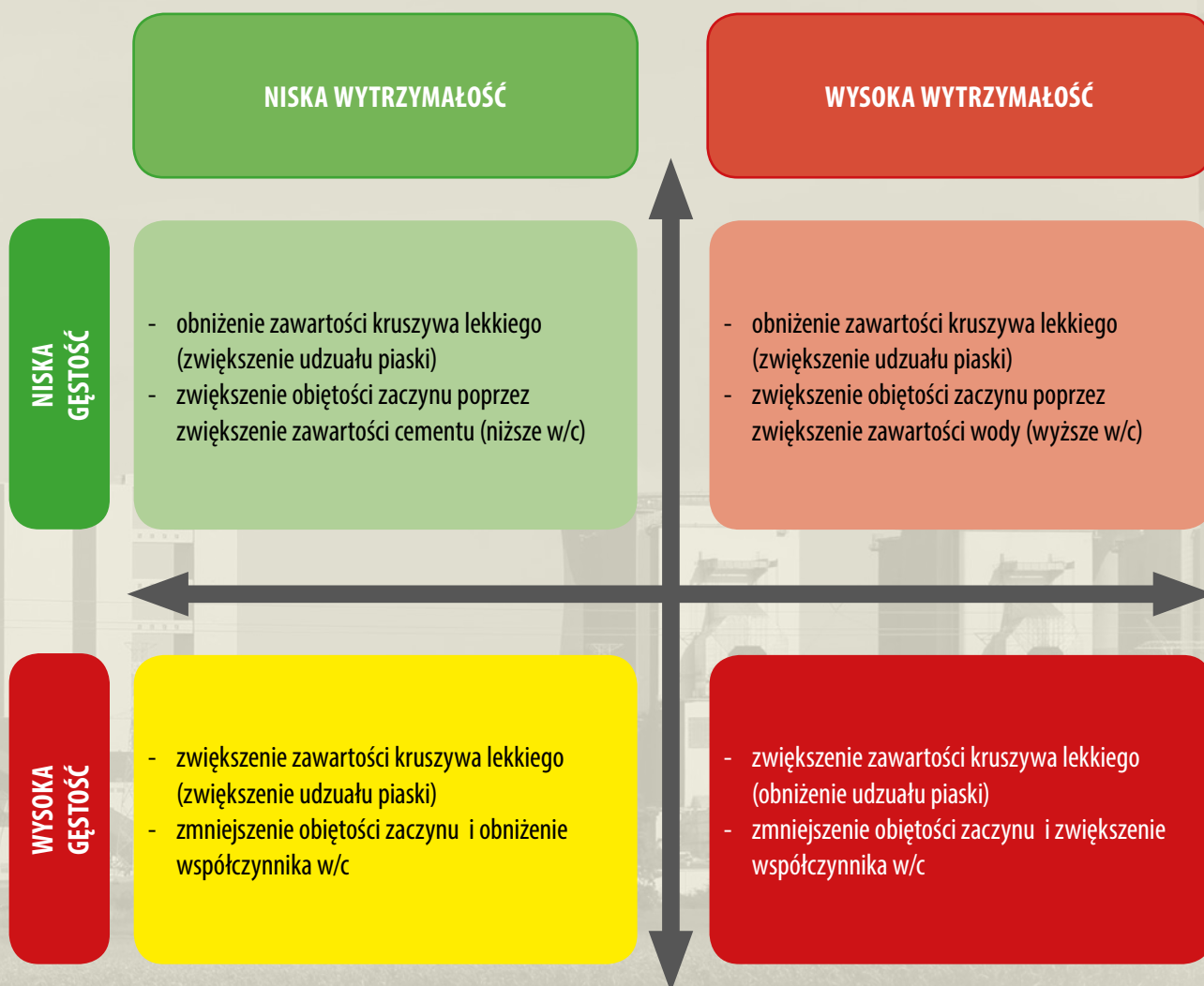
Rys. 8. Uszczelnienie matrycy cementowej w strefie przejściowej ziarno-zaczyn

Odpowiedni proces wstępnego nawilżenia kruszywa lekkiego, chociaż bardziej kłopotliwy w realizacji, umożliwia uzyskanie stabilnej urabialności mieszanki betonowej i odpowiedniej szczelności strefy stykowej. W przypadku betonów przewidzianych do transportu pompą, proces wstępnego nawilżenia prowadzony powinien być do pełnego nasycenia, tak aby wyeliminować ryzyko utarty urabialności mieszanki, a nawet zablokowania pompy. Podczas transportu mieszanki betonowej pompą jest ona poddawana oddziaływaniu podwyższonego ciśnienia, co dodatkowo niesie ryzyko segregacji mieszanki betonowej szczególnie w wyniku zmian ciśnienia panującego w rurze (zmiana średnicy rurociągu). Zapewnienie pompowności betonów lekkich wymaga ich odpowiedniej modyfikacji poprzez stosowanie dodatków mineralnych, głównie popiołu lotnego i mączek kamiennych oraz stosowania domieszek napowietrzających, upłynniających, ewentualnie zwiększających lepkość, mających na celu stabilizację mieszanki o znacznym stopniu płynności. Betony lekkie zwykle uzyskują pompowność przy konsystencji mierzonej opadem stożka ok. 200 mm lub metodą rozpląwu powyżej 650 mm. Warunkiem koniecznym uzyskania pompownego betonu lekkiego jest nawilżenie kruszywa. Nasiąkliwość kruszywa w warunkach atmosferycznych jest z reguły znacznie mniejsza niż pod ciśnieniem, a nasycenie przez zraszanie jest zwykle mniej efektywne niż nasączenie próżniowe, w związku z tym wymaga się znacznie dłuższego czasu nasycania kruszywa wodą. W zależności od rodzaju kruszywa i jego nasiąkliwości, wilgotność kruszywa powinna co najmniej odpowiadać jego nasiąkliwości po 24h, a zalecane jest po 72h. Pompowność betonu lekkiego prościej uzyskać stosując kruszywo o większej gęstości oraz mniejszym rozmiarze ziaren. Wytyczne amerykańskiego instytutu betonu ACI zalecają ograniczenie maksymalnego wymiaru ziarna do 19 mm oraz stosowanie kruszywa o gęstości ziaren nie mniejszej niż 1100 kg/m^3 . Dodatkowo, w celu zapewnienia dobrej pompowności, zaleca się ciągłą krzywą uziarnienia. W przypadku betonów konstrukcyjnych lekkich warunki te najczęściej spełnione są samoistnie.

Uzyskanie betonów lekkich samozagęszczalnych a w znacznym stopniu może ułatwić proces zabudowy, ponieważ zagęszczanie betonów lekkich w sposób klasyczny często obarczone jest ryzykiem segregacji (z uwagi na gęstość wypełniacza). Przy stosowaniu kruszyw lżejszych niż 2000 kg/m^3 , np. keramzytowych, uzyskanie samozagęszczalności może wiązać się z potrzebą zwiększenia lepkości w wyniku obniżenia współczynnika w/c i zastosowania większej ilości spoiwa. W przypadku znacznej modyfikacji składów betonu należy się liczyć z podwyższonym skurczem oraz pęczaniem. Należy zaznaczyć, że w przypadku betonów lekkich, ze względu na pielęgnację wewnętrzną, istnieje możliwość całkowitej eliminacji skurczu autogenicznego. Nierównomierne i wydłużone w czasie wysychanie elementów konstrukcyjnych z betonu lekkiego może być natomiast przyczyną niższej ($5\div 20\%$) wytrzymałości na rozciąganie. Betony lekkie z uwagi na większą jednorodność strukturalną są mniej podatne na zarysowania, zarówno od oddziaływań zewnętrznych (obciążeń), jak i wewnętrznych, w efekcie mogą pracować w konstrukcji obciążonej dynamicznie, cyklicznie i długoterminowo, z założoną trwałością. W szczególności betony lekkie mogą charakteryzować się wyższą mrozoodpornością i przepuszczalnością dla cieczy i gazów, jednakże pod warunkiem odpowiednio ograniczonego poziomu wstępnej wilgotności kruszywa.

Biorąc pod uwagę szeroki asortyment kruszyw lekkich oraz znaczny zakres zmienności ich właściwości, zrozumiałym jest fakt, że nie istnieje żadna metoda analityczna czy analityczno-doświadczalna pozwalająca projektować tego typu betony. Przy projektowaniu betonów lekkich należy oprócz założonej klasy wytrzymałości i trwałości, uwzględnić również gęstość betonu. W praktyce recepturę betonu lekkiego ustala się najczęściej doświadczalną metodą kolejnych przybliżeń. Wstępnie przyjmuje się skład mieszanki, który po wykonaniu próbnych zarobów i sprawdzeniu rzeczywistych proporcji składników, poddaje się ewentualnej korekcie. Możliwości kształtowania składu betonu lekkiego przedstawiono na rys. 9.

Betony lekkie, pomimo niskiej gęstości (do 2000 kg/m³), zależnie od rodzaju zastosowanego kruszywa mogą osiągać stosunkowo wysokie wytrzymałości na ściskanie, odpowiednie do realizacji zarówno typowych, jak i bardzo odpowiedzialnych konstrukcji. Dzięki zastosowaniu kruszyw lekkich nowej generacji oraz odpowiedniej modyfikacji składu betonu za pomocą dodatków i domieszek, istnieje możliwość uzyskania wytrzymałości na poziomie 140 MPa.



Rys. 9. Kształtowanie składu betonu lekkiego w zależności od założonych właściwości

Zastosowanie kruszywa porowatego powoduje, że w porównaniu do betonów z kruszywami zwykłymi tej samej klasy wytrzymałości, betony lekkie charakteryzują się:

- niższą gęstością (20÷40%),
- niższym współczynnikiem przewodzenia ciepła i rozszerzalności termicznej,
- lepszą ognioodpornością i dźwiękochłonnością,
- niższym modułem sprężystości (15÷60%),
- większym skurczem wysychania (10÷50%),
- lepszą jednorodnością struktury wynikającą z porównywalnych modułów sprężystości kruszywa i matrycy,
- liniowym charakterem odkształceń, a w efekcie opóźnionym zniszczeniem (na poziomie 85÷90% naprężeń maksymalnych),
- nagłym i eksplozywnym sposobem zniszczenia (nie wykazuje zdolności do przenoszenia naprężeń po przekroczeniu ich wartości maksymalnej).



Rys. 10. Most hybrydowy kompozytowo-betonowy w Białowej



Rys. 11. Wypełnienie kompozytowej belki nośnej mostu w Białowej betonem lekkim



Rys. 12. Płyta pomostu z betonu lekkiego