

Beton w ok. 70% swojej objętości składa się z kruszywa (rys. 1). Zatem jego właściwości w istotny sposób przekładają się na właściwości mieszanki betonowej (konsystencja, urabialność i pompowalność oraz wydzielanie wody – bleeding) i stwardniałego betonu (wytrzymałość, wodoszczelność, nasiąkliwość, mrozoodporność oraz ścieralność). Właściwości kruszyw wynikają z cech skały macierzystej (gęstość, twardość, wytrzymałość) oraz z zastosowanej obróbki mechanicznej w procesie produkcji (kształt i wymiar ziaren, tekstura powierzchni). Przy doborze kruszywa do betonu należy kierować się zapisami normy PN-EN 206:2014 "Beton – wymagania, właściwości, produkcja i zgodność", uwzględniając:

- warunki realizacji robót,
- przeznaczenie betonu,
- warunki środowiska, na które będzie narażony beton (klasa ekspozycji),
- wymagania w zakresie odstoniętego kruszywa lub kruszywa stosowanego w przypadku mechanicznej obróbki powierzchni betonu.

Najważniejsze, z punktu widzenia technologii betonu, właściwości kruszyw to:

- skład ziarnowy,
- kształt i szorstkość ziaren,
- obecność zanieczyszczeń,
- nasiąkliwość,
- wytrzymałość/ścieralność,
- mrozoodporność,
- reaktywność (alkaliczna).

Podział ze względu na pochodzenie kruszyw do betonu wg normy PN-EN 12620+A1:2010 oraz kruszyw lekkich do betonu wg PN-EN 13055-1:2003 przedstawia rys. 2.

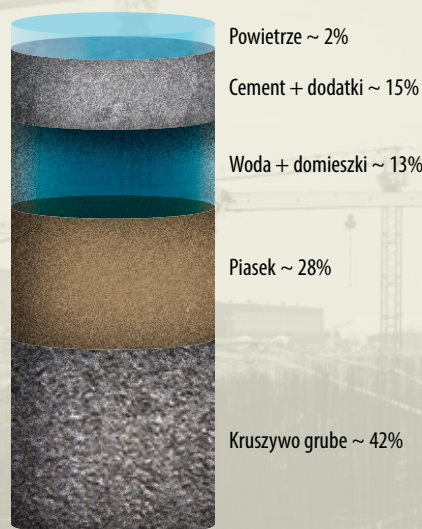
Ze względu na ciężar właściwy rozróżnia się kruszywa:

- lekkie –  $\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$ ,
- zwykłe –  $\rho = 2000 \div 3000 \text{ kg/m}^3$ ,
- ciężkie –  $\rho > 3000 \text{ kg/m}^3$ .

Wymiar kruszywa przyjmujemy poprzez określenie minimalnego (d) i maksymalnego (D) wymiaru ziarna wyrażonego jako d/D. Dopuszczalna jest obecność nadziarna (pewnej ilości ziaren, które pozostają na sicie o oczku równym D) i podziarna (ziaren przechodzących przez sito o oczku równym d).

Wyróżniamy kruszywa:

- drobne –  $D \leq 4 \text{ mm}$ ,
- grube –  $D \geq 4 \text{ mm}$  i  $d \geq 2 \text{ mm}$ ,
- naturalne 0/8 mm – kruszywa polodowcowe lub rzeczne,  $D \leq 8 \text{ mm}$ ,
- o uziarnieniu ciągłym – mieszanina kruszyw,  $D \leq 45 \text{ mm}$ .



Rys. 1. Objętościowy skład betonu

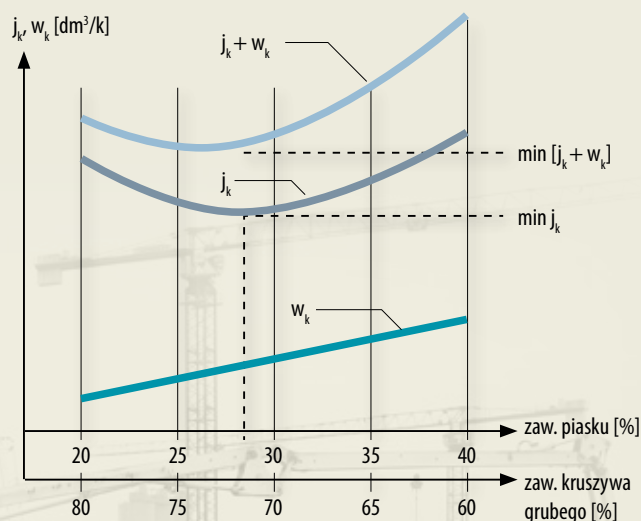


Rys. 2. Podział kruszyw

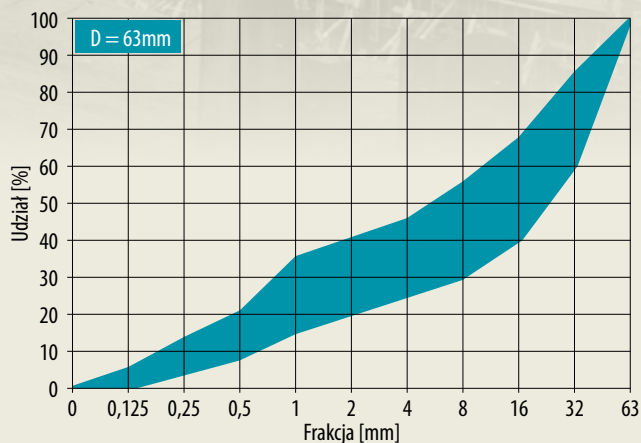
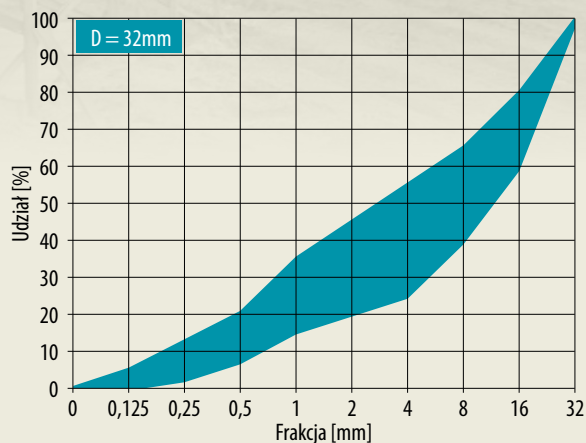
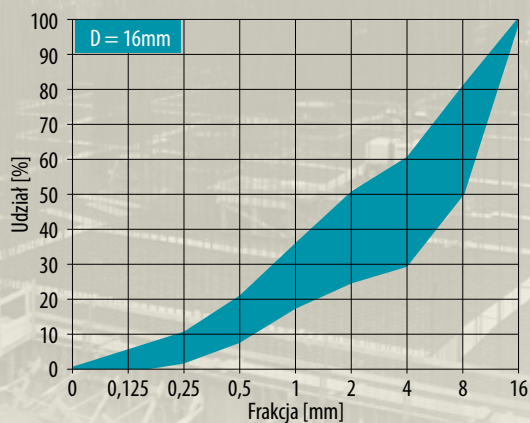
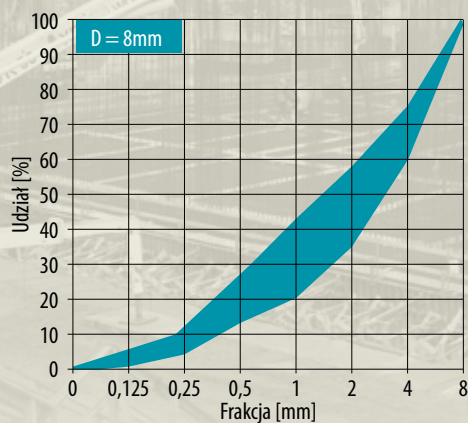
Mieszanka kruszywowa do betonu powinna zawierać kilka frakcji. W celu prawidłowego zaprojektowania mieszanki betonowej należy dobrać odpowiednie proporcje kruszywa grubego i piasku, tak aby tworzyły w betonie szczelny stos okruszowy. Uziarnienie kruszywa do betonu powinno zapewnić możliwie niskie zapotrzebowanie na zaczyn cementowy (cement i wodę) (rys. 3). Zapotrzebowanie to wynika głównie z dwóch cech kruszywa:

- jamistości (przepełnienie jam zaczynem),
- powierzchni zewnętrznej (otulenie powierzchni zaczynem), związanej z granulacją i wodozadržnością kruszywa.

Zarówno jamistość, jak i powierzchnię zewnętrzną należy zatem minimalizować (rys. 3). Równoczesne uzyskanie minimum tych dwóch wielkości nie jest jednak możliwe. Optymalnym rozwiązaniem jest kompromis, którego efektem są tzw. obszary właściwego uziarnienia, zawarte w specyfikacjach technicznych i literaturze specjalistycznej (rys. 4).



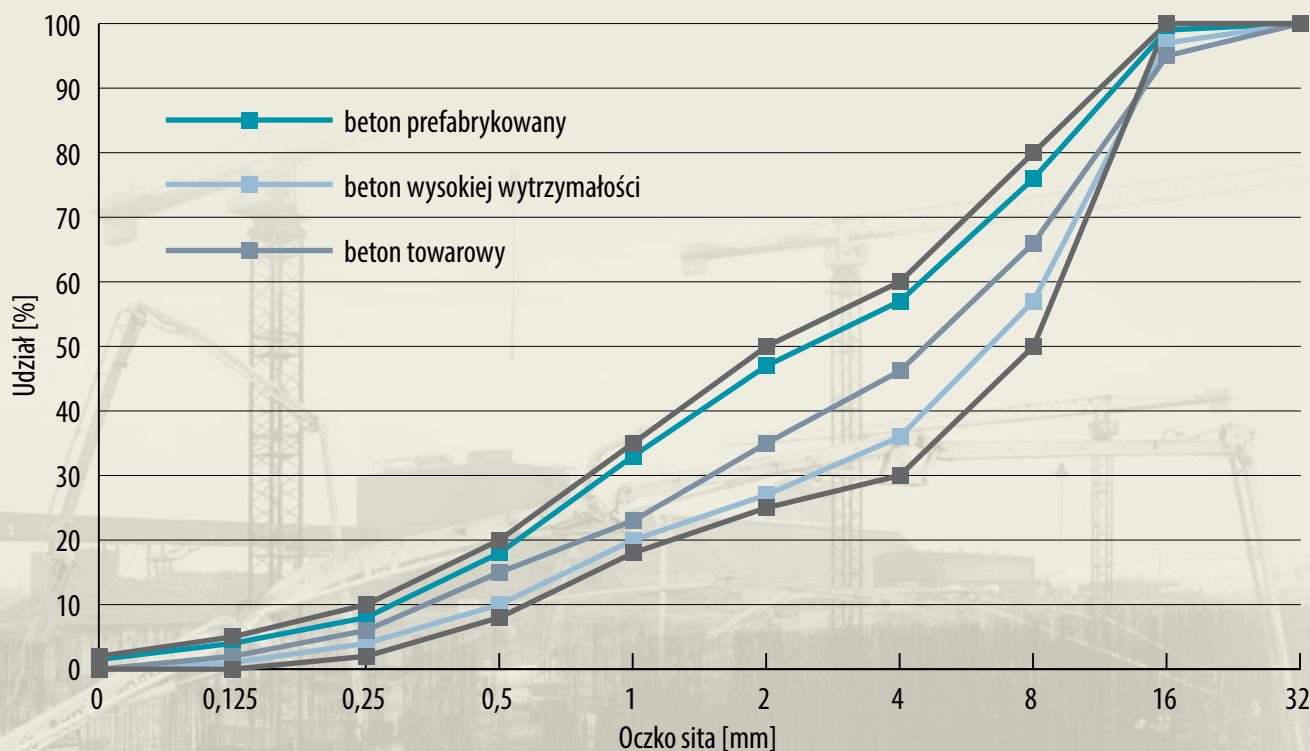
Rys. 3. Zmiany jamistości ( $j_k$ ) i wodozadržności ( $w_k$ ) kruszywa w zależności od zawartości piasku



Rys. 4. Obszary właściwego uziarnienia kruszywa w zależności od maksymalnego wymiaru ziaren  $D$

Na rys. 5 przedstawiono krzywe graniczne obszaru dobrego uziarnienia dla mieszanki kruszywowej do 16 mm (najczęściej stosowanej w kraju) wraz z przykładowymi krzywymi uziarnienia. Należy dążyć, aby dla betonów towarowych (C8/10–C30/37) krzywa uziarnienia przebiegała blisko środka obszaru dobrego uziarnienia, dla betonów wysokich wytrzymałości (> C35/45) – blisko dolnej granicy obszaru dobrego uziarnienia, a dla elementów prefabrykowanych (wysoka zawartość piasku) – blisko górnej granicy.





Rys. 5. Krzywe graniczne wg PN-B-06250:1988

Krzywa uziarnienia kruszywa zawarta w obszarze dobrego uziarnienia, gwarantuje właściwą urabialność i konsystencję mieszanki betonowej przy możliwie najmniejszym zużyciu wody i cementu (zaczynu) oraz minimalnej zawartości powietrza. Zapewnia także niską przepuszczalność betonu oraz mniejszy skurcz. Nieciągła krzywa uziarnienia niekorzystnie wpływa na właściwości betonu, może skutkować:

- niewłaściwą urabialnością betonu,
- problemami z pompowaniem i zagęszczaniem betonu,
- segregacją składników mieszanki betonowej,
- wysokim zużyciem cementu,
- wysoką zawartością porów w betonie,
- obniżeniem parametrów wytrzymałościowych i trwałościowych betonu.

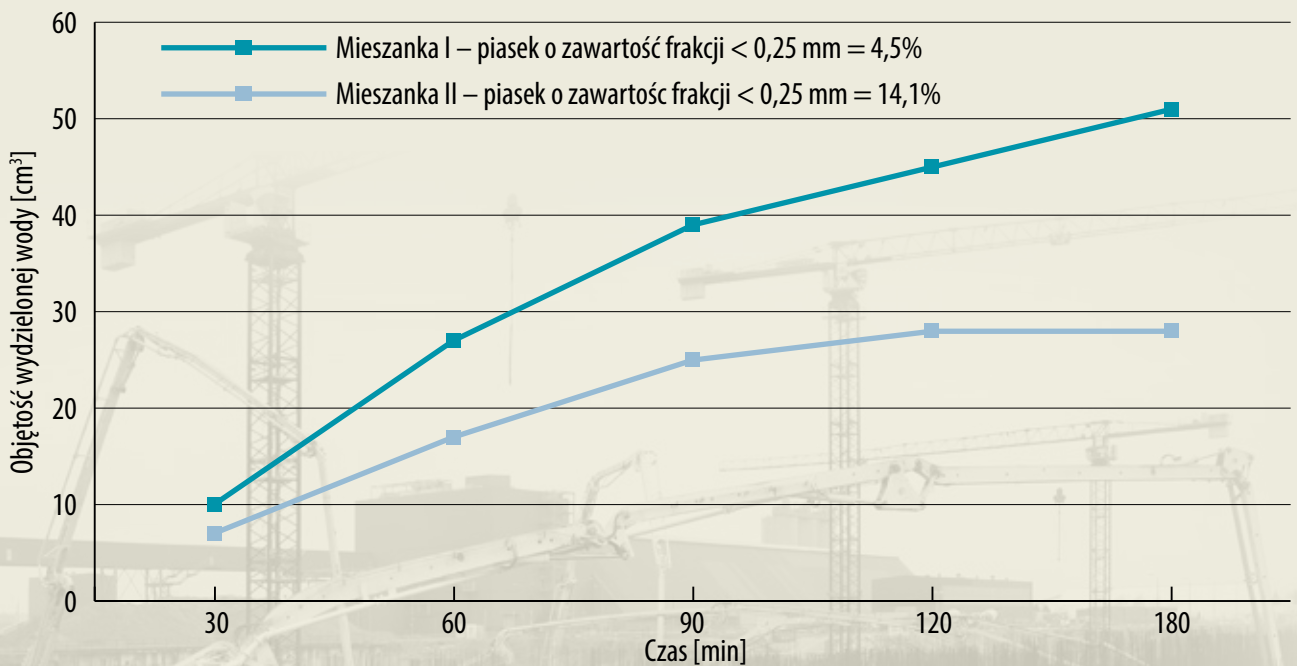
Maksymalny wymiar ziarna kruszywa w betonie zależy od:

- odległości między prętami zbrojenia:
  - maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie może być większy niż  $3/4$  odległości między prętami zbrojenia,
- wymiarów elementu lub konstrukcji:
  - maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie może być większy niż  $1/3$  najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego elementu,
- rodzaju betonu:
  - 0–16 mm – betony zwykłe,
  - 0–32 mm, 0–61 mm – betony masywne (obiekty hydrotechniczne, fundamenty wielkogabarytowe), betony posadzkowe,
  - 0–8 mm; 0–16 mm – kostka brukowa, betony prefabrykowane, nawierzchnie drogowe
  - 0–16 mm – betony samozagęszczalne.

Urabialność mieszanki betonowej zależy od zawartości cementu, punktu piaskowego (czyli zawartości ziaren poniżej 2 mm) oraz zawartości najdrobniejszych frakcji 0/0,25 mm. Dobór punktu piaskowego zależy od metody układania i zagęszczania mieszanki betonowej:

- 27–30% – betony zwykłe, betony układane za pomocą pojemników, wibratorów wgłębnych i powierzchniowych,
- 35–40% – betony prefabrykowane, betony układane za pomocą pomp, wibratorów wgłębnych i powierzchniowych,
- 45–60% – betony zagęszczane za pomocą wibroprasy (np. produkcja kostki brukowej).

Mieszanki betonowe o wysokim punkcie piaskowym charakteryzują się większą zawartością cementu i/lub koniecznością stosowania dodatków do betonu. Wyższy punkt piaskowy, z uwagi na większą objętość zaczynu, skutkuje większym skurczem.

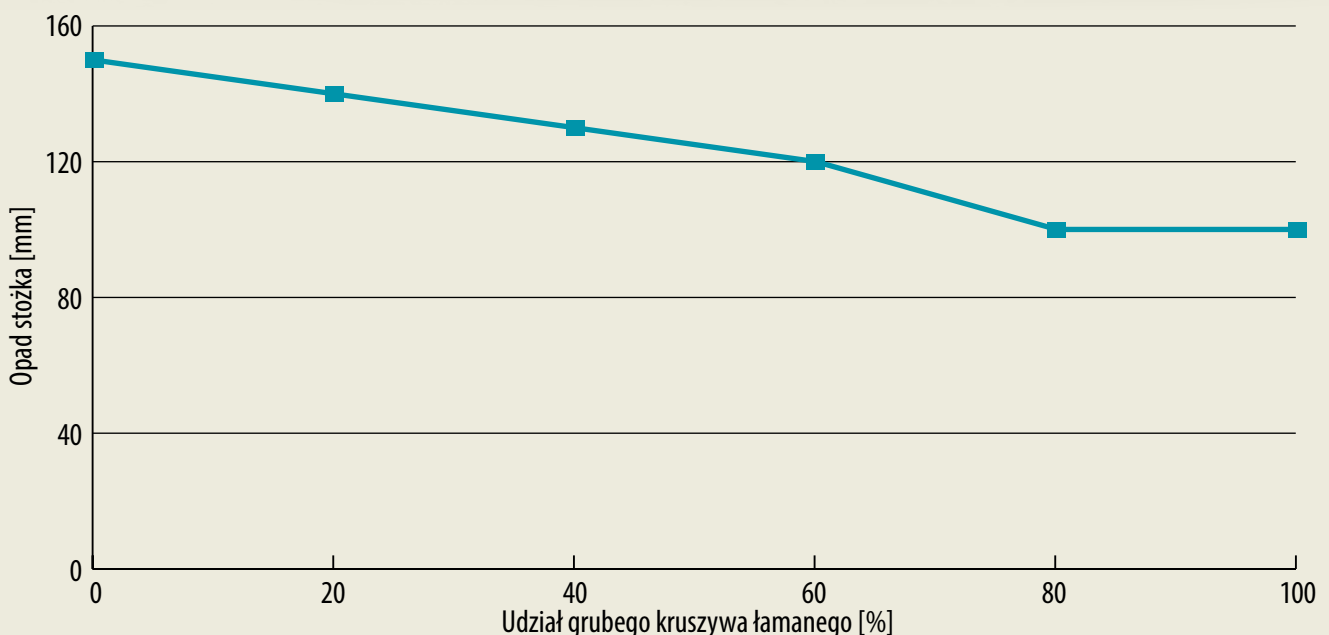


Rys. 6. Bleeding mieszanek betonowych zawierających piaski o różnej zawartości frakcji < 0,25 mm

Ponadto, wysoki punkt piaskowy nie zapewni dobrej urabialności mieszanki betonowej, jeśli kruszywo drobne pozbawione będzie ziaren poniżej 0,25 mm. Odpowiednia ilość frakcji 0/0,25 mm jest niezbędna przy podawaniu mieszanki betonowej pompami, a przy tym ogranicza wydzielanie wody (mleczka cementowego) z mieszanki betonowej – bleeding (rys. 6). Zjawisko bleedingu jest szczególnie niebezpieczne w przypadku betonu posadzkowego, gdyż powoduje znaczny wzrost współczynnika w/c w warstwie powierzchniowej. Wraz z wodą, na powierzchnię, może być wydzielana domieszka chemiczna i/lub np. niespalone części węgla z popiołu lotnego. Może to prowadzić do odparzenia warstwy górnej betonu, ponieważ osłabieniu ulega warstwa przejściowa pomiędzy podkładem betonowym, a posypką utwardzającą. Przy stosowaniu grubych „ostrych” piasków o niewielkiej zawartości frakcji poniżej 0,25 mm należy wprowadzać do mieszanki betonowej dodatek, np. popiołu lotnego, który uzupełnia skład ziarnowy kruszywa, tak aby był spełniony warunek dobrej urabialności:

$$0,6 < \frac{\text{cement} + \text{dodatki mineralne} + \text{frakcja } 0/0,5 \text{ mm} [\%]}{\text{frakcja } 0/2 \text{ mm} [\%]} < 1,05.$$

Piaski dla których zawartość ziaren < 0,25 mm waha się pomiędzy 12–18% zapewniają dobrą pompowalność i ograniczają wydzielanie mleczka cementowego z mieszanki betonowej.



Rys. 7. Konsystencja betonów o tym samym składzie i różnym udziale kruszywa łamanego



Kruszywa łamane charakteryzują się znacznie bardziej rozwiniętą powierzchnią ziaren, niż kruszywo żwirowe, co korzystnie wpływa na wytrzymałość strefy kontaktowej na styku zaczyn-kruszywo. Przekłada się to jednak w sposób niekorzystny na urabialność (konsystencję) mieszanki betonowej (rys. 7), ale przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości betonu.

Bardzo ważną cechą, obok wymiaru kruszywa, jest kształt ziaren. Jest on zależny od rodzaju skały macierzystej oraz od rodzaju obróbki mechanicznej (kruszywa łamane). Zawartość płaskich i wydłużonych ziaren powyżej 15% jest niekorzystna, ponieważ zwiększa się wodożądność mieszanki betonowej. Im bardziej kształt ziaren odbiega od okrągłego, tym więcej zaczynu cementowego jest potrzebne do ich otulenia. Ponadto, w trakcie układania i zagęszczania mieszanki betonowej ziarna układają się poziomo (rys. 8), co może prowadzić do tworzenia soczewek wodnych, w efekcie pod ziarnami tworzą się pory wpływające na obniżenie wytrzymałości i trwałości betonu.



Rys. 8. niekorzystny wpływ płaskich ziaren kruszywa

Obecność frakcji pylastej <0,063 mm obniża przyczepność między kruszywem a zaczynem cementowym, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia wytrzymałości betonu, szczególnie wytrzymałości na zginanie. Ważne jest zatem stosowanie kruszywa pozbawionego pyłów, części organicznych oraz cząstek minerałów ilastych (gliny).

Nasiąkliwość kruszywa może, ale nie musi mieć wpływu na jego mrozoodporność. Niektóre kruszywa (jurajskie wapienie, karbońskie piaskowce) czy kruszywa lekkie charakteryzują się nasiąkliwością powyżej 2%, mimo to mogą spełniać kryterium mrozoodporności. Stosowanie kruszywa o wysokiej nasiąkliwości może prowadzić do zwiększenia skurczu plastycznego betonu. Kruszywa te należy stosować w stanie nasyconym (np. keramzyt).

Mrozoodporność kruszywa decyduje o jego przydatności do stosowania w betonie narażonym na różne oddziaływania środowiskowe. W tabeli 1 przedstawiono sposób doboru kruszyw w zależności od warunków środowiskowych.

Tabela 1. Dobór kruszywa w zależności od kategorii mrozoodporności

Warunki środowiskowe	Klimat		
	śródziemnomorski	atlantycki	kontynentalny*
Brak mrozu i sucho	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań
Częściowe nasycenie, brak soli	brak wymagań	$F_4 / MS_{35}$	$F_2 / MS_{25}$
Stałe nasycenie, brak soli	brak wymagań	$F_2 / MS_{25}$	$F_1 / MS_{18}$
Stałe nasycenie, sól	$F_4 / MS_{35}$	$F_2 / MS_{25}$	$F_1 / MS_{18}$
Nawierzchnie lotnisk	$F_2 / MS_{25}$	$F_1 / MS_{18}$	$F_1 / MS_{18}$

F – mrozoodporność na podstawie ubytku masy po 10 cyklach zamrażania i rozmrażania  
MS – mrozoodporność na podstawie ubytku masy po 5 cyklach zanurzenia w roztworze  $MgSO_4$  i suszeniu w 110°C  
\*Kategoria kontynentalny może odnosić się również do Islandii, części Skandynawii i rejonów górzystych, w których występują surowe warunki zimowe

Wytrzymałość kruszywa bezpośrednio przekłada się na wytrzymałość stwardniałego betonu. Miernikiem wytrzymałości kruszyw jest odporność kruszywa:

- na rozdrabnianie (współczynnik Los Angeles LA),
- ścieranie (współczynnik mikro-Devala  $M_{DE}$ ),
- odporność na polerowanie (polerowalność PSV),
- odporność na ścieranie powierzchniowe (ścieralność AAV).

Poszczególne współczynniki określają właściwości mechaniczne kruszywa w powiązaniu z rodzajem skały. W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości współczynników dla różnych kruszyw. Stosowanie kruszyw charakteryzujących się wysoką odpornością na rozdrabnianie – niski współczynnik LA, konieczne jest w betonach, które narażone są na duże obciążenia mechaniczne i agresywne oddziaływanie środowiska (betony drogowe, mostowe, nawierzchnie lotniskowe). Stosowanie kruszyw o niskim współczynniku PSV



(polerowalność) zalecane jest z kolei w betonach nawierzchniowych (nawierzchnie drogowe, lotniskowe). W tabeli 3 przedstawiono wymagania dla kruszyw stosowanych do nawierzchni drogowych.

Tabela 2. Wytrzymałość kruszywa wg różnych współczynników

Rodzaj kruszywa	LA	$M_{DE}$	PSV	AAV
Bazalt	6–13	7–18	44–52	2–4
Granit	17–43	7–16	–	3
Żwir kwarcowy	16–34	6–23	43–53	1–3
Żwir magmowy	18–25	3–21	42–53	2–4
Wapień	24–30	18–38	42–43	–
Dolomit	11–25	7–18	41–47	7–10

Tabela 3. Wymagania dla kruszywa stosowanego do betonowych nawierzchni drogowych

Właściwość kruszywa	JWN KR1÷KR2	DWN KR3÷KR4	GWN, JWN KR3÷KR4	DWN KR5÷KR7	GWN KR5÷KR7
Odporność na rozdrabnianie (LA)	LA <sub>40</sub>	LA <sub>35</sub>	LA <sub>35</sub>	LA <sub>35</sub>	LA <sub>25</sub>
Odporność na polerowanie (PSV)	> PSV <sub>48</sub>	–	> PSV <sub>50</sub>	–	> PSV <sub>53</sub>
Mrozoodporność	najwyżej F <sub>2</sub>	najwyżej F <sub>1</sub>		najwyżej F <sub>1</sub>	
Mrozoodporność w 1% NaCl			≤ 6%		≤ 6%

JWN – jednowarstwowa nawierzchnia, DWN – dolna warstwa nawierzchni, GWN – górna warstwa nawierzchni

Reaktywność alkaliczna kruszyw to podatność pewnych rodzajów kruszyw na reakcję z alkalią zawartymi w betonach. Alkalia są wprowadzane do betonu ze składnikami betonu, głównie z cementem. Reaktywność to zjawisko złożone tak pod względem mogących występować typów reakcji alkalicznych, jak i różnorodności czynników mineralogicznych, chemicznych i atmosferycznych wpływających na ich wystąpienie i przebieg.

Kruszywa potencjalnie reaktywne alkalicznie nie powinny być stosowane w składzie betonu mostowego i drogowego.

