

Cement,
kruszywa,
beton
w ofercie
Grupy Góraźdże

2022

Poradnik został opracowany przez zespół
Centrum Technologicznego Betotech Sp. z o.o. w składzie:

dr inż. Batóg Maciej
dr inż. Dziuk Damian
dr inż. Golda Artur
dr inż. Synowiec Katarzyna
mgr inż. Bakalarz Jakub
mgr inż. Gębusia Kamil
mgr inż. Żugaj Ewelina

na podstawie pomysłu prof. dr hab. inż. Zbigniewa Giergicznego

Spis treści

1.	O nas	7
1.1.	Prezentacja koncernu HeidelbergMaterials	8
1.2.	Góraźdże Cement S.A.	8
1.2.1.	Cementownia Góraźdże.....	9
1.2.2.	Przemiałownia Ekocem.....	12
1.3.	Góraźdże Beton Sp. z o.o.....	13
1.4.	Góraźdże Kruszywa Sp. z o.o.	15
1.5.	Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.....	16
2.	Oferta handlowa Grupy Góraźdże.....	19
2.1.	Oferta handlowa Góraźdże Cement S.A.	20
2.2.	Oferta handlowa Góraźdże Beton Sp. z o.o.....	28
2.3.	Oferta handlowa Góraźdże Kruszywa Sp. z o.o.....	38
2.4.	Oferta i możliwości badawcze Centrum Technologicznego Betotech Sp. z o.o.....	45

3.	Cement i Spoiwa Specjalne	59
3.1.	Wymagania podstawowe.....	60
3.1.1.	PN-EN 197-1 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”	61
3.1.2.	PN-EN 197-5 „Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI”	76
3.1.3.	PN-B-19707 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”	79
3.1.4.	PN-EN 14216 „Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji”	82
3.1.5.	Inne dokumenty normalizacyjne	86
3.1.6.	Europejskie i krajowe oceny techniczne	87
3.2.	Właściwości cementów Górażdże Cement S.A.....	95
3.2.1.	Czas wiązania.....	95
3.2.2.	Ciepło hydratacji.....	96
3.2.3.	Wytrzymałość na ściskanie.....	99
3.2.4.	Wpływ współczynnika w/c na wytrzymałość na ściskanie	101
3.2.5.	Wpływ temperatury na szybkość przyrostu wytrzymałości na ściskanie cementu	104
3.2.6.	Odporność na agresję chemiczną.....	107
3.2.7.	Barwa cementu	116
3.2.8.	Gęstość właściwa i ciężar nasypowy cementu.....	117
3.2.9.	Temperatura cementu	118
3.2.10.	Stałość objętości.....	120
3.2.11.	Skurcz	120
3.3.	Środki ostrożności przy pracy z cementem	122
3.4.	Cement w zrównoważonym budownictwie.....	124
3.5.	Ocena cyklu życia (LCA) cementu	131
3.6.	Cement w obszarach zastosowań.....	138
3.6.1.	Cement w produkcji betonu towarowego	138
3.6.2.	Cement w produkcji prefabrykatów i galanterii betonowej.....	140
3.6.3.	Cement w betonie masywnym i hydrotechnicznym	149
3.6.4.	Cement w wykonawstwie posadzek betonowych	152
3.6.5.	Cement w budowie dróg i mostów	153
3.6.6.	Cement w produkcji suchych zapraw i tynków.....	158
3.7.	Cementy Górażdże Cement S.A. - przykłady zastosowań	159
3.8.	Właściwości i zastosowanie cementu wapniowo siarczanoglinianowego (CSA).....	162

3.8.1.	Właściwości chemiczne	163
3.8.2.	Właściwości fizyczne i mechaniczne	165
3.8.3.	Kierunki zastosowań cementu wapniowo siarczanoglinianowego.....	168
3.9.	Właściwości hydraulicznych spoiw drogowych.....	171
3.9.1.	Właściwości fizyko-mechaniczne spoiw drogowych MULTICRETE.....	171
3.9.2.	Przykłady zastosowań hydraulicznych spoiw drogowych Multicrete.....	172
4.	Kruszywo	175
4.1.	Wymagania podstawowe.....	176
4.1.1.	PN-EN 12620 Kruszywa do betonu	177
4.2.	Metody badań	204
5.	Beton	205
5.1.	Podstawowe wymagania dla betonu	206
5.1.1.	Klasy ekspozycji związane z oddziaływaniem środowiska.....	206
5.1.2.	Wymagania dotyczące składników betonu	212
5.1.3.	Mieszanka betonowa	264
5.1.4.	Właściwości betonu stwardniałego	289
5.1.5.	Specyfikacja betonu	322
5.1.6.	Dostawa mieszanki betonowej.....	324
5.1.7.	Kontrola i kryteria zgodności betonu zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265	327
5.2.	Beton i jego rodzaje	339
5.2.1.	Podstawowe wytyczne projektowania składu betonu	340
5.2.2.	Metody projektowania betonów zwykłych	342
5.2.3.	Projektowanie betonów samozagęszczalnych SCC	347
5.2.4.	Współczynnik w/c a właściwości betonu	349
5.2.5.	Betony specjalne.....	351
5.3.	Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego	460
5.3.1.	Deskowania i środki antyadhezyjne	460
5.3.2.	Transport i układanie mieszanki betonowej	463
5.3.3.	Zagęszczanie mieszanki betonowej	466
5.3.4.	Betonowanie w warunkach obniżonych temperatur	470
5.3.5.	Pielęgnacja betonu.....	474
5.3.6.	Wykwity węglanowe.....	501
	Literatura	505

1 | O nas

1.1. Prezentacja koncernu HeidelbergMaterials

HeidelbergMaterials to międzynarodowy koncern, jeden z największych na świecie producentów materiałów budowlanych. Firma jest obecna w ponad 50 krajach na sześciu kontynentach.

Główna działalność obejmuje produkcję i dystrybucję cementu i kruszyw, kluczowych surowców do produkcji betonu. Podstawową ofertę asortymentową uzupełniają działania związane z produkcją betonu towarowego, wyrobów betonowych i prefabrykatów betonowych. W niektórych krajach koncern zajmuje się też produkcją asfaltu.

HeidelbergMaterials jest obecnie wiceliderem na światowym rynku kruszyw, drugim największym producentem cementu na świecie oraz zajmuje trzecie miejsce w produkcji betonu towarowego. Swój długoterminowy sukces koncern buduje w oparciu o zrównoważone praktyki biznesowe. Obejmują one takie obszary, jak: zapewnienie dostępu do złóż surowców, wydajne i innowacyjne procesy produkcyjne, rozwój nowych produktów i wykorzystanie alternatywnych surowców oraz paliw.

W Polsce koncern rozpoczął swoją działalność w połowie lat 90. inwestując w przedsiębiorstwa działające na polskim rynku materiałów budowlanych. W efekcie tych działań Górażdże funkcjonują dziś na rynku jako grupa powiązanych kapitałowo spółek zajmujących się kompleksową produkcją cementu, betonu i kruszyw. Działalność Grupy Górażdże obejmuje trzy linie biznesowe:

- Górażdże Cement,
- Górażdże Beton,
- Górażdże Kruszywa.

1.2. Górażdże Cement S.A.

Górażdże Cement S.A. jest spółką macierzystą Grupy Górażdże. Jest największym w kraju producentem cementu. Oferuje na rynku cementy powszechnego użytku i specjalne, tj. cementy portlandzkie CEM I, cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II, cementy hutnicze CEM III, cementy pucolanowe CEM IV oraz cementy wieloskładnikowe CEM V, a także hydrauliczne spoiwa drogowe i produkty dla geotechniki.

Oferowane cementy i spoiwa produkowane są w dwóch zakładach:

- Cementowni Góraździe, zlokalizowanej w Choruli k/ Opola,
- Przemiałowni Ekocem w Dąbrowie Górniczej.

W skład spółki wchodzi również dwie kopalnie: Góraździe i Folwark, gdzie wydobywany jest kamień wapienny i margiel – podstawowe surowce do produkcji klinkieru portlandzkiego.

Zakres działalności Góraździe Cement S.A. obejmuje kompleksową obsługę Klientów w zakresie:

- sprzedaży cementu,
- organizacji transportu do Klienta,
- doradztwa technologicznego,
- promocji i reklamy.

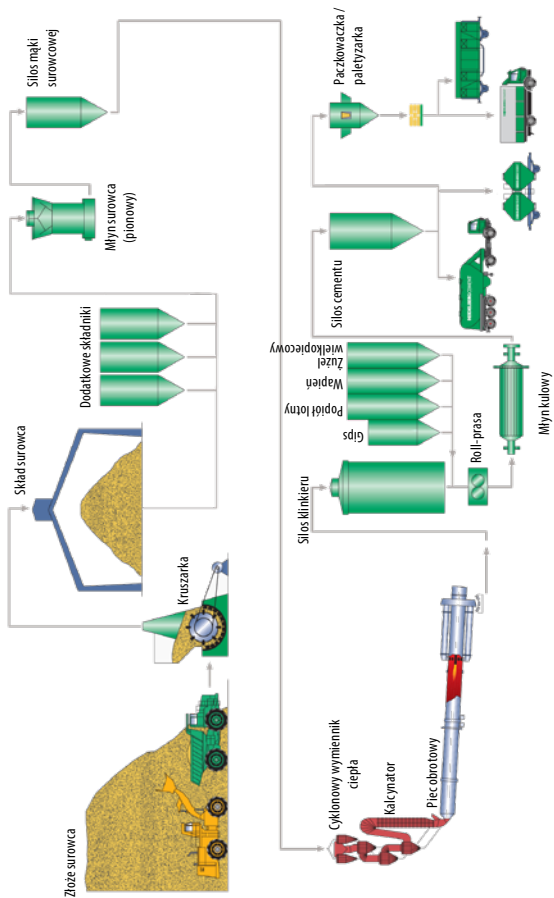
1.2.1. Cementownia Góraździe

Cementownia Góraździe położona jest w miejscowości Chorula, w pobliżu Opola. Cementownię wybudowano według projektu duńskiej firmy F.L. Smidth i oddano do eksploatacji w 1977r. Na przestrzeni lat w zakładzie zrealizowano wiele inwestycji rozwojowych i modernizacyjnych.

Cementownia Góraździe dysponuje dwiema liniami technologicznymi (2 piece obrotowe) do wypału klinkieru portlandzkiego. Podstawowymi surowcami stosowanymi do produkcji klinkieru są wapień i margiel, pozyskiwane w dwóch kopalniach (Góraździe i Folwark). Dodatkowo zakład wyposażony jest w 4 młyny cementu. Produkcja cementu odbywa się poprzez wspólny przebieg klinkieru i regulatora czasu wiązania (siarczanu wapnia) oraz, w zależności od rodzaju cementu, innych składników głównych, np. granulowanego żużla wielkopieczowego (S), popiołu lotnego krzemionkowego (V) lub kamienia wapiennego (LL). Schemat produkcji cementu w Cementowni Góraździe pokazano na rys. 1.1.

Jakość cementów produkowanych w Cementowni Góraździe jest pod stałą kontrolą Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych Centrum Szkoła i Materiałów Budowlanych w Krakowie.



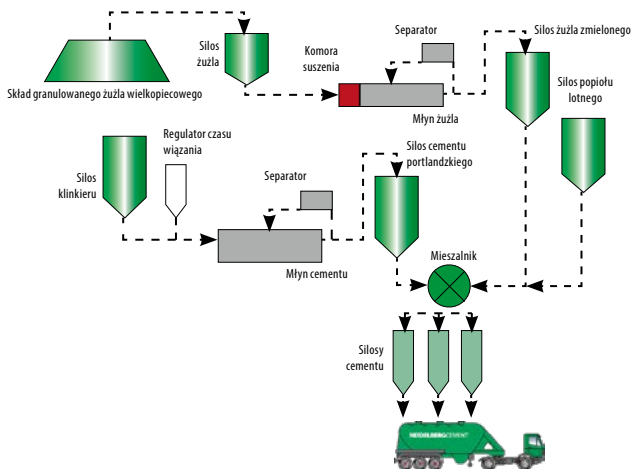


Rys. 1.1. Schemat produkcji klinkieru i cementu w Cementowni Górażdże

1.2.2. Przemiałownia Ekocem

Zakład zlokalizowany jest w przemysłowej części Dąbrowy Górniczej na terenie Katowickiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej. Wybudowany został na przełomie lat 1999/2000. Do produkcji cementów stosowane są głównie klinkier portlandzki z Cementowni Górażdzie i granulowany żużel wielkopiecowy z ArcelorMittal Poland S.A. Zakład wyposażony jest w dwa młyny kulowe, z których pierwszy młyn służy do przemiału granulowanego żużla wielkopiecowego, drugi to młyn cementu, który służy do przemiału klinkieru i półproduktów. Dzięki wbudowanemu w zespół silosów mieszalnikowi istnieje techniczna możliwość wyprodukowania cementów i spoiw o odpowiednio dobranym udziale składników (schemat przedstawia rys. 1.2).

Nadzór zewnętrzny nad jakością produkowanych cementów jest prowadzony przez Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych Centrum Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie.



Rys. 1.2. Schemat produkcji cementu z użyciem dwóch odrębnych układów mieląco-suszących

1.3. Góraźdże Beton Sp. z o.o.

Spółka Góraźdże Beton Sp. z o.o. to jeden z największych producentów betonu towarowego w Polsce. Z firmą powiązane są zakłady produkcyjne BT TopBeton Sp. z o.o. Linia biznesowa Góraźdże Beton obejmuje sieć ponad 40 wytwórni betonu, zlokalizowanych na terenie całego kraju, na obszarach o dużej dynamice i wysokim potencjale rozwoju ekonomicznego, m.in. w Warszawie, Poznaniu, na Dolnym i Górnym Śląsku (rys. 1.3).

13

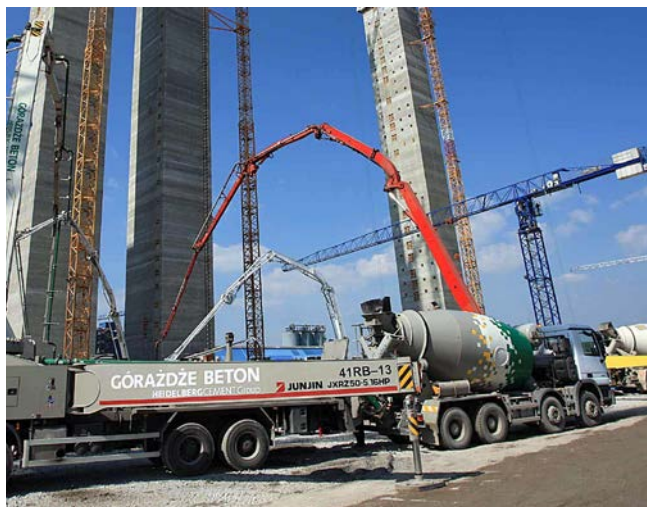


Rys. 1.3. Rozmieszczenie wytwórni betonu towarowego Góraźdże Beton Sp. z o.o.

Wszystkie wytwórnie betonu wyposażone są w komputerowe systemy sterowania procesem produkcji oraz nowoczesne, innowacyjne urządzenia, które zapewniają wytwarzanie wysokiej jakości mieszanek betonowych i gwarantują utrzymanie powtarzalności wymaganych parametrów. Wysoki standard produkcji wspiera dodatkowo wdrożony system Zakładowej Kontroli Produkcji. Nadzór technologiczny nad jakością produkcji w wytwórniach Góraźdże Beton prowadzony jest przez Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o. Uzupełnienie podstawowej działalności Góraźdże Beton stanowią usługi transportu i pompowania mieszanki betonowej oraz doradztwa w zakresie zastosowania oferowanych produktów.



Góraźdże Beton na bieżąco monitoruje poziom hałasu, zapylenia oraz jakości wód, ograniczając niekorzystny wpływ procesu produkcyjnego na środowisko. Wyniki badań potwierdziły wysoki poziom sprawności urządzeń produkcyjnych i zostały zaakceptowane przez kompetentnych rzeczoznawców oraz służby ochrony środowiska. Wytwórnie posiadają operaty ochrony środowiska – dokumenty będące świadectwem ciągłej, proekologicznej polityki.



1.4. Góraźdże Kruszywa Sp. z o.o.

Góraźdże Kruszywa Sp. z o.o. jest jednym z największych w kraju producentów kruszyw naturalnych. Linia biznesowa Góraźdże Kruszywa obejmuje 17 kopalni surowców mineralnych zlokalizowanych głównie na terenie południowo-zachodniej i północno-wschodniej Polski (rys. 1.4). Zautomatyzowane zakłady dysponują nowoczesnym sprzętem do wydobywania kruszywa spod lustra wody, są wyposażone w urządzenia do przeróbki i uszlachetniania kruszyw.

Asortyment produkcji obejmuje szeroką gamę kruszyw naturalnych (żwiru i piaski), kruszywa naturalne łamane oraz kruszywa specjalne. Kruszywa, wydobywane w góraźdżańskich kopalniach, znajdują zastosowanie przy produkcji betonu towarowego i betonów specjalnych, elementów betonowych, suchych zapraw i tynków.

W celu zapewnienia wymaganych właściwości produktów, spółka prowadzi badania jakości we własnym zakresie, realizowane we współpracy z Centrum Technologicznym Betotech Sp. z o.o., jak również zleca ich wykonanie wyspecjalizowanym jednostkom zewnętrznym. Wszystkie produkty znakowane są znakiem CE, a ocena stałości właściwości użytkowych jest wykonywana w systemie 2+.

Spółka oferuje również usługi logistyczne oraz doradztwo technologiczne. Swoją działalność Góraźdże Kruszywa łączy z troską o środowisko naturalne, nadając poeksploatacyjnym terenom nowe przyjazne otoczeniu oblicze.





Rys. 1.4. Lokalizacja kopalni kruszyw Górażdże Kruszywa Sp. z o.o

1.5. Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.

W strukturach Grupy Górażdże działalność prowadzi także Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o., zapewniające profesjonalne doradztwo oraz badania produktów Grupy Górażdże. Strategia spółki zorientowana jest głównie na wsparcie skierowane do spółek należących do Grupy Górażdże oraz prowadzenie działań rynkowych, ukierunkowanych na pomoc Klientom Grupy Górażdże. Centrum Technologiczne Betotech spełnia trzy zasadnicze funkcje:

- laboratorium zakładowego, prowadzącego bieżącą kontrolę jakości produkcji Górażdże Beton i Górażdże Kruszywa oraz nadzór systemów Zakładowej Kontroli Produkcji,
- jednostki badawczo-rozwojowej, w ramach której prowadzone są prace nad nowymi produktami i technologiami dla wszystkich linii biznesowych Grupy Górażdże,
- centrum usług technologicznych dla partnerów biznesowych Grupy Górażdże.



Centrum Technologiczne Betotech dostarcza niezbędnej wiedzy technologicznej oraz rozwiązań, które wydatnie wpływają na pozycję Grupy Górażdże oraz poszerzenie oferty produktowej. W ramach prowadzonych działań rozwijana jest także współpraca z globalnym działem R&D w strukturach HeidelbergMaterials. Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o. skupia w swojej strukturze regionalne laboratoria wraz z terenowymi punktami kontroli oraz Laboratorium Materiałów Budowlanych w Choruli akredytowane przez PCA w zakresie badań cementu, betonu i kruszyw zgodnie z zakresem AB 829 (rys. 1.5).



Rys. 1.5. Laboratoria Centrum Technologicznego Betotech Sp. z o.o.

2

Oferta handlowa Grupy Górażdże

2.1. Oferta handlowa Górażdże Cement S.A.

Górażdże Cement S.A. oferuje następujące rodzaje cementu:

- **cement portlandzki CEM I**
 - cement portlandzki CEM I 42,5R
 - cement portlandzki CEM I 42,5R-NA
 - cement portlandzki CEM I 42,5N-NA
 - cement portlandzki CEM I 52,5R
- **cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II**
 - cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R
 - cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M (V-LL) 32,5R
 - cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-V) 42,5N
 - cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N
- **cement hutniczy CEM III**
 - cement hutniczy CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA
- **cement pucolanowy CEM IV**
 - cement pucolanowy CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA
- **cement wieloskładnikowy CEM V**
 - cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA
 - cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA
- **cement zawierający nanometryczny TiO_2 (TioCem®)**
 - cement portlandzki żużłowy biały CEM I 52,5N (i.active Ultra White)
 - cement portlandzki żużłowy CEM II/A-S 42,5R (tx) TioCem®
- **cement i klinkier wapniowo siarczanoglinianowy CSA**
 - i.tech ALI CEM GREEN – cement wapniowo siarczanoglinianowy
 - i.tech ALI PRE GREEN - klinkier wapniowo siarczanoglinianowy

W tabeli 2.1 przedstawiono podstawowe właściwości cementów oferowanych przez Górażdże Cement S.A.

Tabela 2.1. Właściwości cementów

Rodzaj cementu	Statość objętości	Początek czasu wiązania	Wytrzymałość na ściskanie			Ciepło hydratacji po 41 godzinach
			po 2 dniach	po 7 dniach	po 28 dniach	
	mm	min	MPa			J/g
Cement portlandzki CEM I 42,5R	0,6	182	28,7	45,9	59,0	334
Cement portlandzki CEM I 42,5R-NA	0,4	172	26,5	45,3	59,6	308
Cement portlandzki CEM I 42,5N-NA	0,8	201	26,3	45,0	59,2	302
Cement portlandzki CEM I 52,5R	0,6	156	36,1	55,0	66,0	386
Cement portlandzki popiółowy CEM II/B-V 32,5R	0,5	313	17,0	31,7	44,9	258
Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M (V-LL) 32,5R	0,6	205	19,2	31,1	42,1	246
Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (S-V) 42,5N	0,6	240	18,2	34,1	50,1	288
Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	0,6	172	27,9	46,0	61,2	316
Cement hutniczy CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	0,5	210	15,4	30,4	57,6	228
Cement pucolanowy CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA	0,7	275	17,4	29,8	42,4	248
Cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA	0,5	271	14,7	29,7	44,8	236
Cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	0,4	254	16,5	31,6	47,5	242
Cement portlandzki biały CEM I 52,5N (tx) TioCem® white	0,2	235	39,6	54,9	65,3	nb
Cement wapniowo siarczonożelazowy AliCEM	nb	10	48,4	65,7	76,0	nb

Oferowane cementy charakteryzują się właściwościami specjalnymi zgodnymi z wymaganiami norm PN-EN 197-1 (LH, SR) i PN-B-19707 (NA/HSR), są to:

- cement portlandzki niskoalkaliczny CEM I 42,5R-NA,
- cement portlandzki niskoalkaliczny CEM I 42,5N-NA,
- cement hutniczy o niskim cieple hydratacji, odporny na siarczany, niskoalkaliczny CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA,
- cement pucolanowy o niskim cieple hydratacji, niskoalkaliczny CEM IV/B (V) 32,5N-LH/NA,
- cement wieloskładnikowy o niskim cieple hydratacji, odporny na siarczany, niskoalkaliczny CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA,
- cement wieloskładnikowy o niskim cieple hydratacji, odporny na siarczany, niskoalkaliczny CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA,

Asortyment cementów workowanych (wzory graficzne worków przedstawia rys. 2.1) produkowanych przez Górażdże Cement S.A. obejmuje 9 produktów, dostępnych na rynku pod nazwą handlową:

- **PREMIUM 42,5R**
- **MASTER 42,5N**
- **MULTI 32,5**
- **MULTI.e 32,5**
- **EKO+ 32,5**
- **PROFI 32,5**
- **ADEPT 32,5**
- **TECHNIK 32,5**
- **SOLID 32,5**
- **UNI 32,5**

UWAGA:

Normy PN-EN 197-1 i PN-B 19707 nie definiują kolorów rozpoznawczych worków w zależności od rodzaju i klasy wytrzymałości cementu.



Rys. 2.1. Cemynty workowane w ofercie Górażdże Cement S.A.

Górażdże Cement S.A. oferuje również hydrauliczne spoiwa drogowe Multicrete. Produkowane są głównie z zastosowaniem mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego oraz specjalnie wyselekcjonowanych dodatków hydraulicznych i pucolanowych. Spoiwa MULTICRETE® są produkowane jako spoiwa o szybkim przyroście wytrzymałości w następujących klasach:

- hydrauliczne spoiwo drogowe **MULTICRETE®** zgodne z Krajową Oceną Techniczną Nr IBDiM-KOT-2018/0130:
 - MULTICRETE® 5,0
 - MULTICRETE® 12,5
 - MULTICRETE® 22,5
- hydrauliczne spoiwo drogowe szybkowiążące **MULTICRETE®** zgodne z normą PN-EN 13282-1:
 - MULTICRETE® 22,5 HRB E3
 - MULTICRETE® 32,5 HRB E4

Hydrauliczne spoiwa drogowe dedykowane są do zastosowania w materiałach do wykonywania warstw konstrukcyjnych: podbudów pomocniczych i zasadniczych, warstw odcinających, wzmacniających i ulepszonego podłoża oraz wykorzystywane w robotach ziemnych, budowie dróg, trakcji kolejowych, lotnisk i innych rodzajów infrastruktury.

W ofercie Górażdże Cement S.A. dostępne są także produkty przeznaczone do zastosowania jako spoiwo do zawieszin na przesłony przeciwfiltracyjne GRUNT-MIX. Produkowane są w 3 odmianach:

- **GRUNT-MIX® DW**, przeznaczony do wykonania przesłon przeciwfiltracyjnych realizowanych metodą szczelinową (wykop wąskoprzestrzenny),
- **GRUNT-MIX® DSM**, przeznaczona do wykonywania przesłon przeciwfiltracyjnych w technologii wgłębnego mieszania,
- **GRUNT-MIX® 12,5R**, komponent do przygotowania zawiesziny twardniejącej z bentonitem dodawanym na miejscu budowy.

Górażdże Cement S.A. oferuje także workowane zaprawy budowlane, (suche mieszanki). W ofercie dostępne są (rys. 2.2):

- **zaprawa murarska**, zalecana do murowania na tradycyjne, grube spoiny z cegieł, pustaków oraz innych materiałów ceramicznych, betonowych bądź wapienno-piaskowych na zewnątrz i wewnątrz budynków, charakteryzuje się bardzo dobrą urabialnością, plastycznością i wysoką przyczepnością,

- **zaprawa tynkarska**, zaprawa cementowo-wapienna zalecana do wykonywania tradycyjnych wypraw tynkarskich wewnętrznych i zewnętrznych, na ścianach i stropach betonowych, z elementów ceramicznych, betonów lekkich, przydatna do wykonywania tynków jedno- jak i wielowarstwowych, po zarobieniu wodą tworzy jednorodną masę tynkarską o bardzo dobrej urabialności i przyczepności do podłoża, jest mrozo- i wodoodporna,
- **wylewka betonowa**, przeznaczona do wykonywania podkładów podłogowych oraz warstw dociskowych podkładowych, kształtujących spadek wewnątrz i na zewnątrz budynków, w tym również na tarasach i balkonach, przydatna do układania na wszystkich podłożach na spoiwach hydraulicznych, warstwach paroizolacji lub izolacji przeciwwilgociowej oraz na izolacjach termicznych i akustycznych, również do wykonywania podkładów z ogrzewaniem podłogowym, po zarobieniu wodą charakteryzuje się plastycznością oraz dobrą przyczepnością, po stwardnieniu mrozoodporna, o dużej wytrzymałości na obciążenia.



Rys. 2.2. Zaprawy budowlane oferowane przez Góraźdże Cement S.A.

Dokumentacja i oznakowanie towarzyszące produktom oferowanym przez Góraźdże Cement S.A.

Szczegółowe informacje dotyczące właściwości oraz dokumentacja dotycząca cementów, spoiw i zapraw oferowanych przez Góraźdże Cement S.A. dostępne są na stronie internetowej: www.gorazdze.pl. Góraźdże Cement S.A. udostępnia swoim Klientom następujące dokumenty dotyczące:

- a) cementów:
- deklarację właściwości użytkowych (rys. 2.3),
 - krajową deklarację właściwości użytkowych,
 - aktualne informacje techniczne dotyczące właściwości cementów,
 - kartę charakterystyki,
 - certyfikat stałości właściwości użytkowych (rys. 2.3),
 - certyfikat na zgodność z krajową normą na cementy specjalne,
 - informację dotyczącą REACH,
- b) zapraw:
- deklarację właściwości użytkowych,
 - kartę charakterystyki,
 - kartę techniczną.

GÓRAŹDZE CEMENT
HESR/HSR/NA/CE

DECLARACJA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH
Nr 1487-CPR-027-14

1. Nazwa i adres podmiotu odpowiedzialnego za wydanie:
Górażdże Cement S.A. ul. Cementowa 1, 47-116 Górażdże

2. Zastosowane normy techniczne lub odwołanie do:
Przygotowanie betonu, zaprawy i innych elementów dla budownictwa i do pracochłonnych wyrobów budowlanych.

3. Problem:
Górażdże Cement S.A. Chorzów, ul. Cementowa 1, 47-116 Górażdże
Cementownia Chorzów w Chorzowie, ul. Cementowa 1, 47-116 Górażdże

4. System i/ lub metody badania i pomiaru użytych w badaniach:
Badania TA

5. Metoda oceny zgodności:
EN 197-1:2011
Zgodność z krajową deklaracją właściwości użytkowych
Krajowy Certyfikat (Materiały Budowlane), ul. Piłsudskiego 8, 42-414 Katowice
Jednostka notyfikowana nr 1487

6. Deklaracja właściwości użytkowych

Właściwość użytkowa	Wymagane minimum	Wartość deklarowana
Współczynnik przemieszczenia	Współczynnik przemieszczenia ≤ 0,025	Współczynnik przemieszczenia ≤ 0,025
Współczynnik rozprężenia	Współczynnik rozprężenia ≤ 0,025	Współczynnik rozprężenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025

Właściwości użytkowe deklarowane zgodnie z art. 10 i art. 11 załącznika 1 do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 czerwca 2011 r. (rozporządzenie Komisji (UE) nr 305/2011) w sprawie europejskiej deklaracji właściwości użytkowych i europejskiej deklaracji zgodności z EN 197-1:2011

W Katowicach, dnia 14.08.2014 r.

Właściciel przedsiębiorstwa
Władysław Adamczyk
Chorzów, 14.08.2014 r.

Instytut Cementów i Materiałów Budowlanych
Jednostka notyfikowana nr 1487

Odział Siatki i Materiałów Budowlanych w Krakowie
GÓRAŹDZE CEMENT S.A. ul. Cementowa 1
47-116 Górażdże w Chorzowie

CERTYFIKAT STAŁOŚCI WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH
1487-CPR-027-14

Zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 18 marca 2011 roku (rozporządzenie Komisji (UE) nr 305/2011) w sprawie europejskiej deklaracji właściwości użytkowych i europejskiej deklaracji zgodności z EN 197-1:2011

Cement hutniczy EN 197-1
CEM III/A 42,5 N - LH

1. Nazwa i adres podmiotu odpowiedzialnego za wydanie:
Górażdże Cement S.A. ul. Cementowa 1, 47-116 Górażdże

2. Zastosowane normy techniczne lub odwołanie do:
Przygotowanie betonu, zaprawy i innych elementów dla budownictwa i do pracochłonnych wyrobów budowlanych.

3. Problem:
Górażdże Cement S.A. Chorzów, ul. Cementowa 1, 47-116 Górażdże
Cementownia Chorzów w Chorzowie, ul. Cementowa 1, 47-116 Górażdże

4. System i/ lub metody badania i pomiaru użytych w badaniach:
Badania TA

5. Metoda oceny zgodności:
EN 197-1:2011
Zgodność z krajową deklaracją właściwości użytkowych
Krajowy Certyfikat (Materiały Budowlane), ul. Piłsudskiego 8, 42-414 Katowice
Jednostka notyfikowana nr 1487

6. Deklaracja właściwości użytkowych

Właściwość użytkowa	Wymagane minimum	Wartość deklarowana
Współczynnik przemieszczenia	Współczynnik przemieszczenia ≤ 0,025	Współczynnik przemieszczenia ≤ 0,025
Współczynnik rozprężenia	Współczynnik rozprężenia ≤ 0,025	Współczynnik rozprężenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025
Współczynnik odkształcenia	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025	Współczynnik odkształcenia ≤ 0,025

Właściwości użytkowe deklarowane zgodnie z art. 10 i art. 11 załącznika 1 do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 czerwca 2011 r. (rozporządzenie Komisji (UE) nr 305/2011) w sprawie europejskiej deklaracji właściwości użytkowych i europejskiej deklaracji zgodności z EN 197-1:2011

W Katowicach, dnia 14.08.2014 r.

Właściciel przedsiębiorstwa
Władysław Adamczyk
Chorzów, 14.08.2014 r.

Rys. 2.3. Przykładowe dokumenty towarzyszące dla cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA

Wszystkie oferowane przez Górażdże Cement S.A. cementy spełniają wymagania norm PN-EN 197-1 są znakowane znakiem CE. Cementy spełniające wymagania normy krajowej PN-B-19707 (cementy HSR i NA) są znakowane znakiem budowlanym B. Oznakowanie CE oraz znak budowlany wraz z wymaganymi informacjami

są umieszczane na workach oraz dokumentach dostawy WZ (rys. 2.4). Hydrauliczne spoiwa drogowe w ofercie Górażdże Cement S.A. znakowane są znakiem budowlanym B (zgodność z Krajową Oceną Techniczną Nr IBDiM-KOT-2018/013 lub znakiem CE (zgodność z normą PN-EN 13282-1) Zaprawy budowlane z oferty Górażdże Cement S.A. spełniają wymagania norm: PN-EN 998-1 (zaprawa tynkarska), PN-EN 998-2 (zaprawa murarska) i PN-EN 13813 (wylewka betonowa) i są oznakowane znakiem CE.



Rys. 2.4. Wzór oznakowania wyrobów budowlanych

Cementy workowane oferowane przez Górażdże Cement S.A. są dodatkowo oznakowane znakiem jakości Pewny Cement (rys. 2.5), który przyznawany jest przez Kapitułę za spełnienie najwyższych norm i specyfikacji technicznych dotyczących właściwości cementu na wszystkich etapach: produkcji, konfekcjonowania i dystrybucji.



Rys. 2.5. Znak Pewny Cement

2.2. Oferta handlowa Górażdże Beton Sp. z o.o.

Oferta handlowa Górażdże Beton obejmuje:

- **betony towarowe:**

- betony zwykłe,
- betony ciężkie,
- betony lekkie,
- betony wysokowartościowe (BWW),
- betony podwodne,
- betony na stabilizację i podbudowę,
- betony do produkcji prefabrykatów betonowych,
- jastrychy,

beton 
towarowy

- **zaprawy murarskie:**

- klasy M5,
- klasy M10,
- klasy M15,

zaprawy 

- **specjalne produkty betonowe:**

- **ECOCRETE®** - beton przyjazny środowisku,
- **EASYBET®**
 - samozagęszczalny - sam się odpowietrza i zagęszcza pod własnym ciężarem (nie wymaga wibrowania), szczelnie wypełnia formy, dokładnie otula zbrojenie,
 - kolorowy/architektoniczny - nowoczesny beton samo-zagęszczalny, a jednocześnie beton architektoniczny, nie wymaga malowania ani nakładania dodatkowych powłok,
- **INFRABET®**
 - drogowy - beton cementowy na nawierzchnie drogowe,
 - mostowy - beton do zastosowań w budowie drogowych obiektów inżynierskich, np. mostów, przepustów, it.
- **ANHIMENT®** - płynny jastrych produkowany na bazie gipsu lub anhydrytu,

Uzupełnienie oferty produktowej Górażdże Beton stanowią usługi transportu i pompowania mieszanki betonowej oraz doradztwa w zakresie zastosowania oferowanych produktów.

ECOCRETE®

ECOCRETE® to beton przyjazny środowisku. Realizując strategię zrównoważonego rozwoju Górażdże Beton oferuje serię betonów, w których poprzez odpowiedni dobór składników i kontrolę procesu produkcji, zminimalizowano wpływ na środowisko. Beton ECOCRETE® może być stosowany w miejsce betonu zwykłego, do wykonywania:

- stropów,
- ścian,
- fundamentów budynków,
- słupów,
- wylewek wewnątrz budynków.



ECOCRETE® wykorzystuje także najnowsze osiągnięcia w dziedzinie domieszek do betonu. Występuje w dwóch odmianach - z 50 oraz 60 % redukcją emisji CO₂ na m³ betonu w stosunku do produktów bazowych opartych o cement portlandzki CEM I.

Nadzór nad produkcją ECOCRETE® odbywa się z zastosowaniem certyfikowanego systemu kontroli produkcji, zgodnego z normą PN-EN 206. Proces produkcji objęty został pierwszym w Polsce certyfikatem Concrete Sustainability Council - ogólnosięwiatowym wielokryterialnym system certyfikacji, który potwierdza zrównoważone zarządzanie zasobami w całym procesie produkcji betonu.

ecocrete®

29

Właściwości betonów ECOCRETE®:

- klasa ekspozycji od XC1 do XC4, XF1, XD1, XA1,
- konsystencja S3,
- klasa wytrzymałości na ściskanie C25/30, C30/37, C35/45,
- maksymalna zawartość chlorków (klasa) Cl 0,40 oraz 0,20*
- maksymalny wymiar kruszywa D_{max} 16 mm,
- reakcja na obciążenie Euro A1

* - dla klasy wytrzymałości C35/45

EASYBET®

- architektoniczny,
- samozagęszczalny,
- kolorowy.

Współczesna inżynieria materiałowa otwiera nowe możliwości wykorzystania właściwości betonu jako materiału konstrukcyjnego oraz kształtowania z niego formy budowli. Pod



nazwą beton architektoniczny (fasadowy, elewacyjny) rozumie się powierzchnie betonowe o zdefiniowanych wymaganiach pod względem wyglądu. Beton taki gwarantuje dotrzymanie parametrów trwałości i wytrzymałości przy równoczesnym uzyskaniu estetycznych powierzchni, niewymagających pokrycia warstwą tynku lub inną powłoką wykończeniową. Aby osiągać ten cel, należy zapewnić szczególną staranność na etapie produkcji i zabudowy betonu.

Rodzaje betonu architektonicznego zależne są od zastosowania technik uzyskania faktury jego powierzchni lub ich kombinacji:

- pozostawienie betonu w naturalnej formie,
- mechaniczne fakturowanie,
- chemiczne opóźnianie wiązania powierzchni,

Zastosowania EASYBET® samozagęszczalny:

Betony EASYBET® samozagęszczalne stosowane są tam, gdzie zagęszczanie tradycyjne, ze względu na dużą ilość i gęsto rozłożone zbrojenie, nie jest możliwe. Może być stosowany:

- w elementach wielkogabarytowych – utrudnione lub niemożliwe wibrowanie,
- do prefabrykacji - eliminacja wibrowania,
- jako beton stropowy lub posadzkowy – właściwości samopoziomujące,
- jako beton architektoniczny – przyjmowanie kształtu lub faktury deskowania,
- w produkcji sprężonych zbiorników na ciecz, w budownictwie tunelowym.

Zalety systemu betonów EASYBET® samozagęszczalny:

- dokładne odwzorowanie, powierzchni form, bez raków i pęcherzy,
- możliwość betonowania bardzo skomplikowanych kształtów,
- lepsza przyczepność do zbrojenia w porównaniu do betonów zwykłych,
- możliwość pompowania betonu „od dołu” konstrukcji,
- eliminacja hałasu związana z brakiem wibracji elementu, ograniczenie pracochłonności.

Beton architektoniczny ze względu na swoje walory estetyczne może być oferowany także jako beton kolorowy, barwiony w masie. Takim rozwiązaniem jest system trwałego barwienia betonu EASYBET® kolorowy, pozwalający na znajdowanie nowych środków wyrazu w architekturze, a także zmieniający sposób podejścia do projektowania poprzez wykorzystanie barwy betonu bez nakładania powłok. EASYBET® kolorowy to znacznie więcej niż beton z dodatkiem pigmentu. Przykładem jest beton architektoniczny wraz z całą procedurą postępowania, zaczynając od projektowania betonu a kończąc na prawidłowym zabudowaniu mieszanki betonowej i pielęgnacji.

Zalety systemu betonów barwionych EASYBET® kolorowy:

- redukcja kosztów (brak konieczności malowania konstrukcji betonowej),
- stałość koloru w okresie eksploatacji (również w miejscach odprysków),
- skrócenie czasu realizacji konstrukcji,
- brak problemów wynikających z pylenia pigmentów proszkowych,
- duża stabilność i brak sedymentacji pigmentów,
- stabilność w barwieniu kolejnych dostaw mieszanki betonowej,
- łatwość podczas czyszczenia sprzętu i urządzeń po zakończeniu innej produkcji,
- brak konieczności instalowania dodatkowych urządzeń dozujących, możliwość dozowania domieszki barwiącej bezpośrednio do betonowożu.

easybet ≈
kolorowy

Główne obszary zastosowania EASYBET®

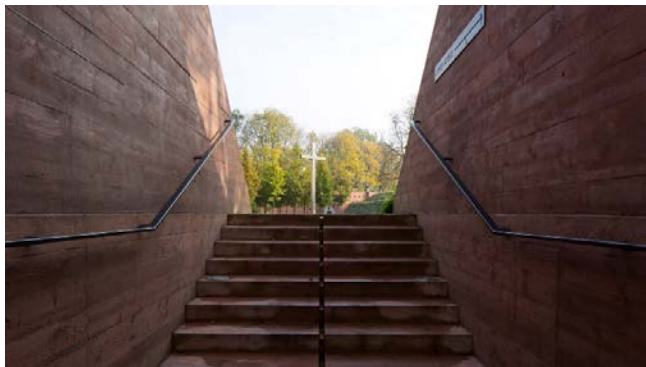
System betonów architektonicznych oraz barwionych zapewnia szeroką paletę barw, co pozwala na spełnienie oczekiwań zarówno inwestorów, jak i projektantów w różnych obszarach stosowania w budownictwie. System betonów EASYBET® może być wykorzystywany do produkcji i wykonywania m.in.:

- elementów konstrukcji wylewanych „na mokro” z betonu towarowego,
- elementów prefabrykowanych wykonywanych w różnych technologiach,
- posadzek betonowych,
- betonowych elementów drobnowymiarowych,
- elementów „małej architektury”.

Zasady postępowania z betonami kolorowymi są takie same jak dla betonów architektonicznych, szczególną uwagę należy zwrócić na ochronę młodego betonu. Pielęgnacja betonu, jako czynnik decydujący o wyglądzie powierzchni betonu, powinna być szczegółowo opisana w dokumentacji technicznej i procedurach wykonawczych.



Rys. 2.6. Przykład zastosowania betonu EASYBET® (Centrum Jana Pawła II w Krakowie)



Rys. 2.7. Przykład zastosowania betonu EASYBET® (Muzeum Katyńskie w Warszawie)

INFRABET® drogowy

Wszystkie drogi projektowane są na określony czas użytkowania. Przeważnie okres ten wynosi 20 lat dla nawierzchni bitumicznych, a 30 lat dla nawierzchni betonowych. Jednak

w praktyce okres użytkowania dróg asfaltowych, bez remontów, nie przekracza 10 lat, a nawierzchnia betonowa może być eksploatowana 50 lat i dłużej.

Uzyskanie wysokiej jakości nawierzchni betonowej (nawierzchni drogowych, lotniskowych, przemysłowych) wymaga odpowiedniego zaprojektowania i wykonania mieszanki betonowej, a co za tym idzie doboru odpowiedniej jakości składników. Podczas układania nawierzchni oraz po jej ułożeniu beton wymaga starannej pielęgnacji i konserwacji.

infrabet®
drogowy

Właściwości betonu INFRABET® drogowy:

- spełnia wymagania klasy ekspozycji XF4,
- odporny na ścieranie w klasie ekspozycji XM,
- minimalna klasa wytrzymałości betonu C 30/37,
- maksymalny współczynnik w/c = 0,45,
- kruszywo zgodne z wymaganiami normy PN-EN 12620+A1:2010 o odpowiedniej odporności na zamrażanie/odmrażanie,
- stopień wodoszczelności min. W8,
- stopień mrozoodporności min. F150 oraz FT2.

Zalety systemu betonów INFRABET® drogowy:

- zdolność do przenoszenia obciążeń, także obciążeń punktowych,
- brak zjawiska koleinowania,
- dobra nośność,
- wysoka odporność na odkształcenia termiczne,
- jasny kolor (poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego, redukcja kosztów oświetlenia),
- bezpieczeństwo wynikające z dużej przyczepności i szorstkości nawierzchni,
- niskie koszty konserwacji i utrzymania nawierzchni.

INFRABET® mostowy

Beton tego rodzaju stosowany jest w konstrukcjach mostowych, gdzie istotna jest trwałość cyklu życia: odporność na działanie mrozu, odporność na agresję chemiczną, itp.

infrabet®
mostowy

Właściwości betonu INFRABET® mostowy:

- odporność na działanie mrozu w obecności środków odładzających (FT2),
- stopień wodoszczelności min. W8,
- zastosowanie odpowiednich kruszyw łamanych,
- współczynnik w/c < 0,50,
- stopień konsystencji S2/S3 dla betonów zwykłych oraz SF1/SF2 dla betonów samozagęszczalnych (SCC),
- wysoka odporność na ścieranie,
- klasa wytrzymałości na ściskanie od C30/37,

34



Rys. 2.8. Budowa obiektów inżynierskich w ciągu autostrady A1 odcinek Świerklany – Gorzycki



Rys. 2.9. Przebudowany układ komunikacyjny przy terminalu na lotnisku Kraków - Balice

ANHIMENT®

Anhyment jest mieszanką o konsystencji płynnej, produkowaną na bazie gipsu budowlanego lub anhydrytu, piasku, wody oraz dodatków i domieszek chemicznych. Właściwości Anhymentu pokazano w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Właściwości fizyko-mechaniczne Anhymentu

Właściwości	Klasa wytrzymałości na ściskanie C20÷C30 wg PN-EN 13813
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	powyżej 4 MPa
Możliwość chodzenia po nawierzchni	po ok. 24 godzinach
Możliwość obciążania nawierzchni	po ok. 4-5 dniach
Możliwość układania paroszczelnych wykładzin (płytki, PVC)	po ok. 4 tygodniach; wilgotność końcowa 0,5%
Możliwość układania wykładzin paroprzepuszczalnych	wilgotność końcowa 1,0%
Obliczeniowa przewodność cieplna λ_e	ok. 1,2 W/(m ² K)
Palność	materiał niepalny
Odczyn pH w stanie suchym	7
Gęstość	2,0-2,2 kg/dm ³ w stanie suchym
Rozpoczęcie ogrzewania przy ogrzewaniu podłogowym	po 7 dniach
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	0,012 mm/mK
Uwaga: właściwości są zależne od warunków atmosferycznych i na budowie oraz od użytych materiałów wiążących i dotyczą warstwy o grubości 4 cm	

Zastosowanie systemu ANHYMENT®

Jastrychy anhydrytowe znajdują zastosowanie przy budowie nowych obiektów budowlanych, przy modernizacji starych obiektów, w obiektach przemysłowych, biurowych i mieszkalnych typu pomieszczeń, także pomieszczeń wilgotnych (pralnie, kuchnie, łazienki).

Do wylewania płynnego jastrychu stosuje się pompy o niewielkich rozmiarach, a technologia pompowania i podawania jastrychu powoduje, że znajduje on zastosowanie w miejscach, gdzie nie można stosować ciężkiego sprzętu budowlanego. Wylewanie jastrychu nie powoduje zanieczyszczeń pomieszczeń i placu budowy (rys. 2.10).

Zalety stosowania systemu ANHYMENT®:

- wysokie właściwości wytrzymałościowe,
- jednorodna i szczelna struktura bez pustek powietrznych,
- nie wymaga zbrojenia,
- możliwość uzyskania dużych powierzchni bez dylatacji przeciwskurczowych,
- możliwość chodzenia po jastrychu już po 24 godzinach od wylania,
- idealny przy ogrzewaniu podłogowym,
- możliwość uzyskania równych powierzchni, dzięki płynnej konsystencji i samopoziomowaniu się,
- skrócenie czasu wykonania posadzki (wydajność ok. 100m²/h),
- materiał bezpieczny dla zdrowia.



Rys. 2.10. Wylewanie płynnego jastrychu

Dokumentacja i oznakowanie towarzyszące produktom oferowanym przez Górażdże Beton Sp. z o.o.

Zgodnie z ustawą o wyrobach budowlanych oraz rozporządzeniem w sprawie deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych i sposobu znakowania ich znakiem budowlanym, wszystkie węzły betonowe linii Górażdże Beton posiadają **certyfikat Zakładowej Kontroli Produkcji** (rys. 2.11), a produkowane betony i mieszanki związane hydraulicznie podlegają ocenie i weryfikacji stałości właściwości użytkowych wyrobów budowlanych **w systemie 2+**.

Wszystkie betony oferowane przez Górażdże Beton Sp. z o.o. spełniają wymagania norm PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265, a mieszanki związane hydraulicznie spełniają wymagania serii norm PN-EN 14227 i zostały wydane dla nich krajowe deklaracje właściwości użytkowych (rys. 2.12).

Wyroby podlegające normom zharmonizowanym: zaprawy budowlane oraz podkłady podłogowe znakowane są oznakowaniem CE i wydana jest dla nich deklaracja właściwości użytkowych. Kopie deklaracji właściwości użytkowych oraz krajowych deklaracji właściwości użytkowych dostępne są na stronie internetowej: **deklaracjebg.pl**. Oznakowanie CE lub znak budowlany wraz z wymaganymi informacjami są umieszczane na dokumentach dostawy WZ.



Rys. 2.11. Certyfikaty ZKP wytwórni betonu towarowego dla: a) betonu towarowego, b) mieszanki związanej hydraulicznie, c) zaprawy murarskiej

Rys. 2.12. Przykładowa krajowa deklaracja właściwości użytkowych betonów i deklaracji właściwości użytkowych zapraw oferowanych w linii Górażdże Beton

2.3. Oferta handlowa Górażdże Kruszywa Sp. z o.o.

Oferta handlowa Górażdże Kruszywa obejmuje:

- **kruszywa naturalne**
 - piaski 0/1; 0/2; 0/4;
 - żwiry 1/4; 2/8; 8/16; 2/16; 16/31,5; 31,5/63 mm (rys. 2.12),
 - mieszanki pisakowo-żwirowe (kruszywo o uziarnieniu naturalnym 0/8 lub ciągłym: 0/4; 0/16; 0/31,5 mm),
 - pospółka,
 - otoczaki,
- **kruszywa naturalne łamane**
 - kruszywo wapienne 0/31,5; 0/63; 31,5/63 mm,
 - mieszanka wapienna 0/10 mm,
- **kruszywa specjalne**
 - piasek 0/2 extra (piasek o bardzo wysokim stopniu czystości),
 - piasek formierski 0/1 mm,
 - piasek kwarcowy-suszony 0/0,5; 0,5/1,0; 0/1 mm,
 - piasek z atestem higienicznym 0/1 mm,
 - piasek 0/2 CBR (piasek o wysokiej zawartość frakcji < 0,5mm),

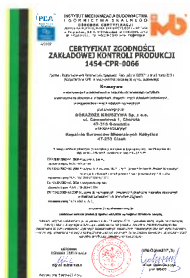
Kruszywa w ofercie Górażdże Kruszywa spełniają wymagania norm:

- PN-EN 12620+A1:2010 „Kruszywa do betonu”,
- PN-EN 13139 „Kruszywa do zapraw”,
- PN-EN 13242+A1:2010 „Kruszywa do niezwiązanych i hydraulicznie związanych materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym”,
- PN-EN 13043 „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”.



Rys. 2.13. Kruszywa w ofercie Górażdże Kruszywa: piasek 0/2 mm, żwir 2/8 mm, żwir 8/16

Wszystkie produkty Górażdże Kruszywa posiadają deklarację właściwości użytkowych i są znakowane znakiem CE. Ocena właściwości kruszyw produkowanych we wszystkich kopalniach dokonywana jest w systemie oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych 2+. Każda kopalnia posiada wdrożony system Zakładowej Kontroli Produkcji, który został potwierdzony certyfikatem (rys. 2.14) wydanym przez Ośrodek Certyfikacji Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego z Warszawy (jednostka notyfikowana nr 1454). Bieżący nadzór i kontrola jakości kruszyw prowadzona jest przez Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.



Rys. 2.14. Certyfikat ZKP dla Kopalni Surowców Mineralnych Ruda

KRUSZYWA NATURALNE

Piaski

Piasek to naturalny materiał drobnoziarnisty, który jest luźną skałą osadową złożoną przede wszystkim z kwarcu. W ofercie Górażdże Kruszywa Sp. z o.o. znajdują się piaski o uziarnieniu: 0/0,5; 0/1; 0/2; 0/4; 1/4 mm.

Zastosowanie

Piaski mają szerokie zastosowanie w różnych segmentach budownictwa, a przede wszystkim:

- do produkcji różnego rodzaju betonu, w tym betonu towarowego i prefabrykatów budowlanych (kostka brukowa, krawężniki, bloczki fundamentowe, kręgi betonowe, ogrodzenia betonowe, belki stropowe, palisady, obrzeża, płyty drogowe, płyty chodnikowe),
- do produkcji zapraw murarskich, tynkarskich w budownictwie przemysłowym i mieszkaniowym,
- do produkcji suchych zapraw tynkarskich, klejów,
- do produkcji podsypki cementowo-piaskowych,
- do wykonywania ziemnych robót budowlanych tj. trwałych nasypów, zasypywania wykopów w budownictwie drogowym,
- do robót budowlanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym, np. jako podsypka (podbudowa) pod kostką brukową i betonową,
- do zimowego utrzymania dróg i chodników,
- do warstw filtracyjnych,
- do aranżacji terenów sportowo-rekreacyjnych (plaże, boiska do piłki plażowej, itp.).

Żwiry

Żwiry to naturalny materiał gruboziarnisty, który jest okruszoną skałą w luźnej postaci, złożoną z obtoczonych okruszków skał i minerałów o średnicy ziaren większych od 2 mm i dochodzących do 63 mm. Oferowane są w frakcjach 1/4; 2/8; 8/16; 2/16; 16/31,5; 31,5/63 mm.

Zastosowanie

Żwiry znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie i drogownictwie:

- do produkcji betonu zwykłego, jak również:
 - betonu architektonicznego,

- betonu posadzkowego,
- betonu samozagęszczalnego,
- betonu hydrotechnicznego,
- do produkcji masywnych elementów betonowych,
- do produkcji galanterii i prefabrykatów budowlanych,
- w przemyśle materiałów autoklawizowanych,
- do produkcji podbudów z chudego betonu,
- do wykonywania robót budowlanych jako materiał na podbudowy, nasypy, umocnienia gruntów,
- do wykonywania robót budowlanych jako materiał filtracyjny, drenażowy, do opasek melioracyjnych wokół budynków,
- materiał dekoracyjny w ogrodnictwie, przy tworzeniu zielonej architektury.

Mieszanki pisakowo-żwirowe

Kruszywa o uziarnieniu naturalnym (0/8 mm) lub ciągłym (0/4; 0/16; 0/31,5 mm) - to wielofrakcyjny materiał naturalny, będący mieszanką piasku i żwiru o uziarnieniu granicznym od 0,063 mm do 31,5 mm. Skład granulometryczny mieszanek waha się w zależności od oferowanego asortymentu w przedziale: 0/4; 0/8; 0/16; 0/31,5 mm.

Zastosowanie

Ze względu na dobre właściwości mechaniczne i filtracyjne, wysoki współczynnik zagęszczenia oraz dużą nośność, mieszanki znajdują szerokie zastosowanie w drogownictwie i budownictwie:

- jako materiał do wykonywania nasypów (kolejowych, drogowych), zasypywania wykopów,
- jako materiał do wymiany podłoża pod skomplikowane obiekty budowlane oraz podbudowę pod fundamenty,
- do wykonania warstw odsączających nasypów drogowych oraz warstw filtracyjnych przy budowie autostrad i oczyszczalni ścieków,
- do produkcji betonów i prefabrykatów budowlanych,
- na podbudowy pod kostkę betonową i granitową, ze względu na właściwości zagęszczające nadaje się również do budowy i remontów nawierzchni dróg gruntowych, polnych i leśnych.

Pospółka

Pospółka to wielofrakcyjny materiał naturalny, pozyskiwany bezpośrednio ze złoża.

Zastosowanie

Pospółka, ze względu na dobre właściwości mechaniczne i filtracyjne, wysoki współczynnik zagęszczenia oraz dużą nośność, znajduje szerokie zastosowanie w drogownictwie i budownictwie:

- jako materiał do wykonywania nasypów (kolejowych, drogowych), zasypywania wykopów,
- jako materiał do wymiany podłoża pod skomplikowane obiekty budowlane oraz podbudowę pod fundamenty,
- do wykonania warstw odsączających nasypów drogowych oraz warstw filtracyjnych przy budowie autostrad i oczyszczalni ścieków,
- do produkcji betonu,
- na podbudowy pod kostkę betonową i granitową, do budowy i remontów nawierzchni dróg gruntowych, polnych i leśnych.

Otoczaki

Otoczaki, naturalnie ukształtowane kamienie o wymiarach większych od 63 mm, które znajduje zastosowanie:

- jako materiał dekoracyjny, do aranżacji ogrodów, tarasów, alejek, ścieżek, parków, oczek wodnych, skalników, itp.,
- do budowy ogrodzeń, palenisk, kwietników,
- do budowy elementów gabionowych o unikalnym surowym, a jednocześnie ekologicznym charakterze.

KRUSZYWA NATURALNE ŁAMANE

Kruszywa wapienne

Kruszywo wapienne o barwie jasnoszarej lub żółtawej, frakcji ziarnowej: 0/31,5; 0/63 i 31,5/63 mm. Stosowane jest do:

- mieszanek stabilizacyjnych i mrozoodpornych,
- jako warstwa pomocnicza i mrozoodporna oraz warstwa zasadnicza podbudowy dróg.

Mieszanka wapienna

Kruszywo wapienne barwy jasnoszarej lub żółtawej o uziarnieniu ciągłym 0/10 mm. Znajduje zastosowanie:

- przy stabilizacji gruntu,
- jako dodatek drugorzędny w składzie cementu.

KRUSZYWA SPECJALNE

Kruszywo 0/2 extra

Kruszywo 0/2 extra (piasek extra) jest kruszywem drobnym, naturalnym wykorzystywanym do produkcji wyrobów, w których nie dopuszczalna jest zawartość części organicznych. Produkt charakteryzuje się stabilnymi właściwościami fizyko-chemicznymi oraz wysoką czystością, co wynika ze sposobu jego uszlachetniania w procesie na mokro, przy użyciu separatora fluidalnego.

Zastosowanie kruszywa 0/2 extra:

- do produkcji dachówek betonowych,
- do betonu posadzkowego,
- do betonów zwykłych i specjalnych,
- do wielkowymiarowych wyrobów betonowych prefabrykowanych,
- do sporządzania zapraw murarskich i tynkarskich,
- do wykonawstwa specjalistycznych robót inżynierskich.

Kruszywo 0/2 extra z uwagi na bardzo wysoki stopień czystości wykorzystywane jest przede wszystkim do produkcji dachówki betonowej i spełnia wszystkie wymagania związane z tym zastosowaniem, a mianowicie:

- stabilny skład ziarnowy w przedziale 0/2 mm,
- całkowity brak zanieczyszczeń organicznych.

Piasek formierski 0/1 mm

Piasek formierski 0/1 mm jest kruszywem drobnym, naturalnym o wysokiej zawartości kwarcu, w przedziale 96-98,5%.

Zastosowanie piasku formierskiego

Zaletą tego piasku jest bardzo wysoka zawartość kwarcu, co pozwala na jego wykorzystanie do produkcji odlewniczych materiałów formierskich, tj. do sporządzania mas formierskich dla odlewów stalowych, żeliwnych i z metali nieżelaznych.

Piasek formierski 0/1 można również stosować do:

- betonów zwykłych i specjalnych,
- produkcji prefabrykatów betonowych,
- produkcji zapraw murarskich i tynkarskich,
- specjalistycznych robót inżynierskich.

Piasek kwarcowy suszony

Piasek kwarcowy suszony dostępny jest we frakcjach ziarnowych: 0/0,5; 0,5/1,0; 0/1 mm. Charakteryzuje się wysoką zawartością kwarcu, w przedziale 96-98%. Piaski kwarcowe suszone oferowane są luzem, w workach foliowych po 25 kg oraz big-bagach.

Zastosowanie piasku kwarcowego suszonego

Właściwości piasków suszonych, takie jak: uziarnienie, wysoka temperatura spiekania, wysoka twardość i wytrzymałość powoduje, że piasek ten jest wysoko ceniony w zastosowaniu:

- do produkcji gotowych tynków, klejów, zapraw (chemia budowlana)
- do kotłów fluidalnych,
- jako wypełniacz nowoczesnych nawierzchni boisk sportowych,
- do posadzek żywicznych i antykorozyjnych,
- do piaskowania powierzchni metalicznych.

Piasek kwarcowy suszony wykorzystywany jest również do sporządzania zapraw murarskich i tynkarskich.

Piasek z atestem higienicznym 0/1 mm

Piasek z atestem higienicznym 0/1 mm to piasek kwarcowy suszony o uziarnieniu od 0,063 mm do 1,0 mm. Produkt posiada **ATEST HIGIENICZNY BK/B/0909/01/2018** wydany przez Państwowy Zakład Higieny. Oferowany jest w workach 25 kg oraz w big-bagach. Istnieje również możliwość, na życzenie klienta, realizacji dostaw frakcji piasku: 0/0,5; 0,5/1,0; 0/1 mm w big-bagach.

Zastosowanie:

- do piaskownic,
- budowa boisk siatkówki plażowej,
- roboty ogólnobudowlane,
- zaprawy murarsko-tynkarskie,
- piaskowanie, usuwanie starych farb i rdzy z metalu,
- obsypki rur kanalizacyjnych, kabli energetycznych,
- filtrowanie wody z drobnych zanieczyszczeń,
- aranżacja ogrodów, tworzenie dekoracji w ogrodzie,
- wypełnianie akwariów, kuwet dla zwierząt.

Piasek 0/2 CBR

Piasek 0/2 CBR jest kruszywem naturalnym, drobnoziarnistym, pochodzenia rzecznoego, o stabilnym składzie ziarnowym i wysokiej zawartości kwarcu (>92%). Piasek CBR zawiera od 55 do 80% frakcji poniżej 0,5 mm, co klasyfikuje go w grupie najdrobniejszych kruszyw, wg wymagań normy PN-EN 12620+A1:2010.

Zastosowanie piasku CBR

Ze względu na wysoki współczynnik zagęszczenia piasek CBR stosuje się:

- jako materiał do wykonywania nasypów (kolejowych, drogowych),
- do zasypywania i uszczelniania wykopów,
- jako materiał do wymiany podłoża,
- do produkcji betonów i prefabrykatów budowlanych,
- jako podbudowa pod kostkę betonową i granitową,
- do remontów dróg gruntowych, polnych i leśnych.

2.4. Oferta i możliwości badawcze Centrum Technologicznego Betotech Sp. z o.o.

Usługi laboratoryjne dla Klientów spoza Grupy Góraźdże prowadzone są przez Laboratorium Materiałów Budowlanych CT Betotech, które jest zlokalizowane przy Cementowni Góraźdże w Choruli. Na większość najczęściej wykonywanych badań laboratorium posiada akredytację PCA zgodnie z zakresem AB 829. Aktualny zakres akredytacji można pobrać na stronie www.betotech.pl lub na stronach PCA (www.pca.gov.pl). Pełny zakres możliwości badawczych przedstawiono na stronie www.betotech.pl. W dalszej części zaprezentowano wybrane wyposażenie laboratorium, które pozwala na wykonywanie badań cementu, betonu i kruszyw w bardzo szerokim zakresie. Najnowsze wyposażenie na potrzeby realizacji prac badawczo - rozwojowych zostało zakupione w ramach projektu dofinansowanego z Funduszy Europejskich według umowy POIR.02.01.00-00-0058/20 „Rozbudowa Centrum Badawczo – Rozwojowego Grupy Góraźdże w Choruli”.

W pracowni chemii analitycznej (rys. 2.15) znajduje się wyposażenie pozwalające

jące na określenie składu chemicznego cementu, składników oraz surowców do jego produkcji metodą wg PN-EN 196-2.



Rys. 2.15. Pracownia chemii analitycznej

Dodatkowe wyposażenie w obszarze analizy składu chemicznego surowców stanowi spektrometr (rys. 2.16) działający w oparciu o technikę fluorescencji rentgenowskiej (XRF). Pozwala on na szybką analizę składu pierwiastkowego analizowanego materiału, np. surowców, cementów, kruszyw. Przygotowanie próbek do analiz metodą XRF umożliwia automatyczna stapiarka laboratoryjna (rys. 2.17).



Rys. 2.16. Spektrometr XRF do określania składu chemicznego



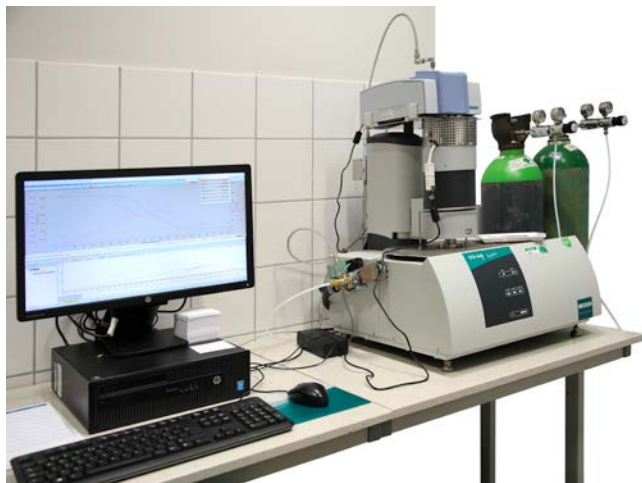
Rys. 2.17. Stapiarka do przygotowania próbek do analizy XRF

Z praktycznego punktu widzenia, obok składu chemicznego, istotna jest również znajomość składu mineralnego surowców. W tym celu Laboratorium Materiałów Budowlanych w Choruli wyposażono w urządzenie do analiza składu mineralnego, tj. spektrometr dyfrakcji rentgenowskiej XRD (rys. 2.18).

Dodatkowym wyposażeniem jest aparat do analizy termogravimetrycznej – analizator TG/DSC (rys. 2.19), który pozwala na określenie efektów cieplnych oraz zmiany masy wynikających ze składu chemicznego i mineralnego badanej próbki w połączeniu z identyfikacją rodzaju emitowanych gazów podczas badania.



Rys. 2.18. Spektrometr XRD do określania składu mineralnego



Rys. 2.19. Aparat do analizy termograwimetrycznej TG/DSC

Laboratorium dysponuje również pracownią badań kalorymetrycznych (rys. 2.20) wyposażoną w trzy niezależne kalometry umożliwiające badanie ciepła twardnienia metodą izotermiczną wg PN-EN 196-11 oraz metodą semi-adiabatyczną wg PN-EN 196-9.



Rys. 2.20. Pracownia badań kalorymetrycznych

W ocenie właściwości fizycznych surowców i materiałów kluczowym parametrem jest gęstość właściwa. Szybkie i dokładne określenie gęstości właściwej materiałów o uziarnieniu do 8,0 mm umożliwia piknometr gazowy (rys. 2.21). Metoda pomiaru polega na określeniu objętości gazu (hel) wypełniającego całą pomiarową o określonej pojemności i masie próbki.



Rys. 2.21. Piknometr gazowy

Oprócz gęstości właściwej równie istotna jest znajomość uziarnienia (rozkładu wielkości cząstek) badanych materiałów. Możliwość szybkiego określenia składu ziarnowego materiałów o bardzo drobnych ziarnach (cement, popiół lotny, mączka wapienna) daje analizator wielkości cząstek, tj. granulometr (rys. 2.22).



Rys. 2.22. Granulometr (do oznaczenia składu ziarnowego)

Właściwości cementów i innych surowców, najczęściej analizowane są na podstawie parametrów zapraw, mieszanek betonowych i stwardniałych betonów. Niezbędnym wyposażeniem w laboratorium jest zatem mieszarka (rys. 2.23), która umożliwia przygotowanie zapraw wg dowolnego (wcześniej wprowadzonego) programu oraz własnych trybów mieszania, zapewniając kontrolę lepkości. Funkcja ta pozwala wstępnie określić efektywność działania domieszek upłynniających oraz porównać wodożądność nowych cementów i dodatków do betonu (popiół lotny, mączka wapienna).

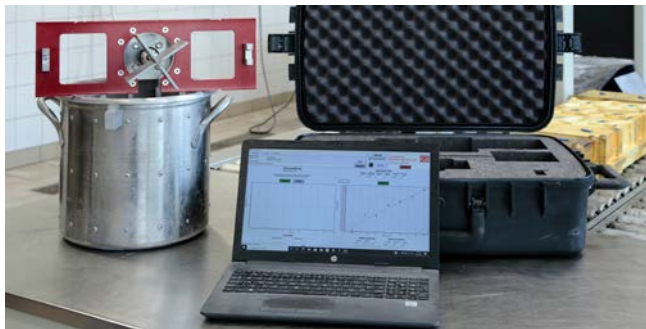
Pracownia badań mieszanki betonowej wyposażona jest w szereg urządzeń pozwalających na określenie dodatkowych właściwości oprócz konsystencji, zawartości powietrza czy gęstości.

Właściwości reologiczne mieszanek można zweryfikować przy użyciu aparatów nazywanych reometrami. Na wyposażeniu Laboratorium Materiałów Budowlanych w Choruli są dwa urządzenia tego typu.



Rys. 2.23. Mieszarka do zapraw

Reometr przedstawiony na rys. 2.24 przeznaczony do badań właściwości reologicznych mieszanek betonowych o uziarnieniu do 31,5mm. Pozwala na wyznaczenie lepkości plastycznej i granicy płynięcia mieszanki betonowej w warunkach laboratoryjnych oraz w zakładzie produkcyjnym lub w warunkach budowy.



Rys. 2.24. Reometr do badań mieszanki betonowej

Viskomat XL (rys. 2.25) jest urządzeniem, które w precyzyjny sposób pozwala na określenie wpływu cementu, domieszki czy dodatku na urabialność mieszanki betonowej o uziarnieniu do 8mm. Aparat ten pozwala wyznaczyć właściwości reologiczne takie jak granica płynięcia i lepkość plastyczna w warunkach precyzyjnie kontrolowanej temperatury.



Rys. 2.25. Viskomat XL do badań właściwości reologicznych zapraw i mieszanki betonowej

Aparat AVA (Air Void Analyzer – rys. 2.26) daje możliwość szybkiej weryfikacji poprawności napowietrzenia mieszanki betonowej, zarówno pod względem ilości – sumy porów powietrznych, jak i jakości – rozkładu ich wielkości. Wstępna analiza, pozwala z dużym prawdopodobieństwem określić, czy beton okaże się mrozoodporny. Urządzenie pozwala również na weryfikację kompatybilności układu zastosowanych domieszek (napowietrzająca + upłynniająca) z cementem.



Rys. 2.26. Urządzenie AVA do badania charakterystyki napowietrzenia mieszanki betonowej

W zakresie badań wytrzymałości zapraw i betonów Centrum Technologiczne Beto-tech oprócz typowych urządzeń do badania wytrzymałości na ściskanie, zginanie i rozłupywanie posiada, również prasę pozwalającą na wykonywanie bardziej skomplikowanych badań właściwości mechanicznych betonów. Prasa hydrauliczna do badania wytrzymałości na zginanie 300kN (rys. 2.27) daje możliwości oznaczenia:

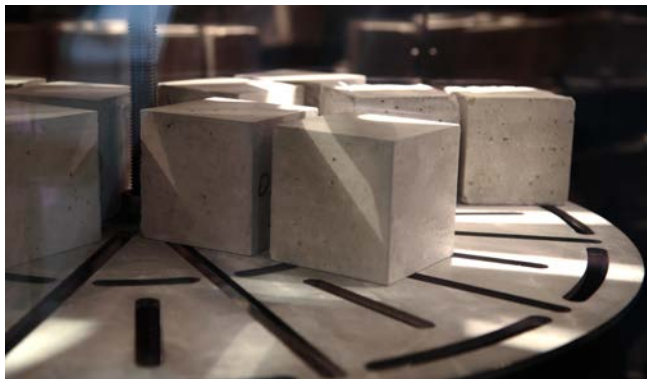
- wytrzymałości na zginanie (maksymalnej i resztkowej) betonu wg PN-EN 14488-3,
- wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu – określenie granicy proporcjonalności LOP wg PN-EN 14651+A1:2007,
- zdolności pochłaniania energii dla płyt zbrojonych włóknami wg PN-EN 14488-5,
- wytrzymałości na zginanie płyt włókno-cementowych wg PN-EN 12467+A2:2018-06.

Ponadto urządzenie jest wyposażone w czujniki dające możliwość odczytu przemieszczenia i odkształcenia próbki w trakcie obciążania (proporcjonalnie do przyrostu siły).



Rys. 2.27. Prasa do badania wytrzymałości na zginanie

Ocena odporności betonu na czynniki korozyjne jest ważnym aspektem oceny jakości (trwałości) betonu. W laboratorium jest również pracownia badań trwałościowych. Na wyposażeniu tej pracowni jest komora pozwalającą na przyspieszenie procesu karbonatyzacji betonu (rys. 2.28) w kontrolowany sposób zgodnie z PN-EN 12390-12. Symulacja przyspieszonego dojrzewania betonu w komorze pozwala na ocenę odporności betonu na karbonatyzację w czasie 70 dni, co odpowiada narażeniu betonu na działanie dwutlenku węgla w warunkach naturalnych przez około 50 lat.



Rys. 2.28. Próbkę betonu w komorze do przyspieszonej karbonatyzacji

Przy pomocy zestawu do badania przenikalności jonów chlorkowych (rys. 2.29) można uzupełnić ocenę właściwości betonu pod względem zdolności ochrony stali zbrojeniowej określając szczelność i przepuszczalność jego mikrostruktury.



Rys. 2.29. Zestaw do badania przenikalności jonów chlorkowych

Aby ocenić trwałości mrozoodporności betonu kluczowe jest określenie charakterystyki napowietrzenia betonu. Wg normy PN-EN 480-11 stosuje się urządzenia pozwalające na optyczną analizę zglądu próbki (rys. 2.30) oraz oprogramowanie pozwalające na obliczenie całkowitej zawartości porów powietrza, mikroporów oraz wskaźnika ich rozmieszczenia. Przeprowadzone wg tej metody badanie pozwala na weryfikację skuteczności działania domieszek napowietrzających oraz potencjału betonu w zakresie mrozoodporności.



Rys. 2.30. Badanie charakterystyki napowietrzenia stwardniałego betonu

W pracowni badań mrozoodporności (rys. 2.30) znajdują się cztery niezależne automatyczne komory do prowadzenia badań mrozoodporności. Dzięki temu laboratorium może jednocześnie wykonywać badania mrozoodporności betonu metodą zwykłą wg PN-B-06265 załącznik N, mrozoodporności betonu w obecności środków wg PN-B-06265 załącznik O, a także mrozoodporności kruszyw wg PN-EN 1367-1.



Rys. 2.31. Pracownia badań mrozoodporności



Rys. 2.32. Komora do badań reaktywności kruszyw

Laboratorium Materiałów Budowlanych CT Betotech wykonuje również badania reaktywności alkalicznej kruszyw wg aktualnych wytycznych GDDKiA zgodnie z procedurami PB/1/18 (metoda przyśpieszona) i PB/2/18 (metoda długoterminowa). Na rys. 2.32 pokazano komorę wilgotnością wykorzystywaną w badania reaktywności kruszyw wg PB/2/18.

Centrum Technologiczne Betotech dysponuje również laboratorium mobilnym (rys. 2.33, 2.34), które jest wyposażone w podstawowy zestaw urządzeń umożliwiających przeprowadzenie badań kruszywa i mieszanki betonowej w miejscu produkcji lub bezpośrednio przed rozładunkiem mieszanki na budowie. Zaangażowanie laboratorium mobilnego w zakładzie produkcji betonu pozwala na szybki i kontrolowany transfer technologii z etapu badań w laboratorium na warunki przemysłowe.



Rys. 2.33. Laboratorium mobilne



Rys. 2.34. Laboratorium mobilne

3

Cement
i Spoiwa
Specjalne

3.1. Wymagania podstawowe

Podstawowe wymagania dotyczące właściwości cementów zawarte są w przedmiotowych normach:

- PN-EN 197-1 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”,
- PN-EN 197-2 „Cement. Część 2: Ocena i weryfikacja stałości właściwości użytkowych”,
- PN-EN 197-5 „Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI”,
- PN-B-19707 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”
- PN-EN 14216 „Cement – Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji”

PN-EN 197-1

- właściwości mechaniczne
- właściwości fizyczne
- właściwości chemiczne
- właściwości specjalne, tj. odporność na siarczaną SR, niskie ciepło hydratacji LH

PN-EN 197-2

- ocena i weryfikacja stałości właściwości użytkowych cementu

PN-EN 197-5

- właściwości cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M i cementów wieloskładnikowych CEM VI

PN-B-19707

- właściwości specjalne, tj. niska zawartość alkaliów NA, odporność na siarczaną HSR (poza zakresem normy PN-EN 197-1)

PN-EN 14216

- właściwości cementów o bardzo niskim cieple hydratacji VLH

3.1.1. PN-EN 197-1 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”

Norma PN-EN 197-1 określa podstawowe wymagania względem składu i właściwości, niezbędne wymagania dotyczące trwałości oraz podaje kryteria zgodności. Definicja każdego cementu uwzględnia proporcje w jakich poszczególne składniki są zestawiane w celu jego wytworzenia. Każdy rodzaj cementu może być produkowany w trzech klasach wytrzymałości normowej.

3.1.1.1. Składniki cementu

Cement zgodnie z normą PN-EN 197-1 oznaczany jest CEM – jest to spoiwo hydrauliczne, tj. drobno zmielony materiał nieorganiczny, który po zmieszaniu z wodą daje zaczyn, wiążący i twardniejący w wyniku reakcji i procesów hydratacji, który po stwardnieniu pozostaje wytrzymały i trwały także pod wodą.

Cement zgodny z PN-EN 197-1 odpowiednio odmierzony i zmieszany z kruszywem i wodą powinien tworzyć beton lub zaprawę, które wystarczająco długo zachowują urabialność i po określonym czasie powinny uzyskać ustalony poziom wytrzymałości, jak również powinny zachować długotrwałą stałość objętości.

W skład cementu powszechnego użytku wchodzi:

- **składniki główne** – specjalnie dobrane materiały nieorganiczne, których udział przekracza 5,0% masy w stosunku do sumy masy wszystkich składników głównych i składników drugorzędnych,
- **składniki drugorzędne** – specjalnie dobrane materiały nieorganiczne, których udział w stosunku do sumy wszystkich składników głównych i składników drugorzędnych nie przekracza 5,0% masy. Składniki drugorzędne powinny być odpowiednio przygotowane, czyli wyselekcjonowane, ujednorodnione, wysuszone i rozdrobnione w zależności od postaci, w jakiej są uzyskiwane lub dostarczane. Nie powinny one zwiększać wodozjadności cementu, osłabiać w żaden sposób trwałości betonu lub zaprawy, lub obniżyć odporności na korozję zbrojenia,
- **siarczan wapnia** – dodawany do innych składników podczas wytwarzania cementu. Pełni rolę regulatora czasu wiązania cementu. Siarczan wapnia może występować jako gips (dwuwodny siarczan wapnia, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), półhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) lub anhydryt (bezwodny siarczan wapnia, CaSO_4), bądź jako ich mieszanina. Gips i anhydryt występują jako materiały natu-

ralne. Siarczan wapnia jest również dostępny jako produkt uboczny pewnych procesów przemysłowych, np. jako produkt odsiarczania spalin w energetyce (REA-gips),

- **dodatki** – stosowane w celu poprawy wytwarzania bądź właściwości cementu. Całkowita ilość dodatków nie powinna przekraczać 1,0% masy cementu (z wyjątkiem pigmentów). Ilość dodatków organicznych w przeliczeniu na stan suchy nie może przekraczać 0,2% masy cementu. Większe ilości dodatków mogą być dodawane do składu cementów pod warunkiem, że maksymalna ilość, w %, będzie deklarowana na opakowaniu i/lub dokumencie dostawy. Dodatki takie nie powinny powodować korozji zbrojenia lub pogarszać właściwości cementu, betonu oraz zaprawy.

SKŁADNIKI GŁÓWNE

Klinkier cementu portlandzkiego (K) – materiał hydrauliczny składający się z krzemianów wapnia ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ i $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) oraz glinianów ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) i glinianożelazianów wapnia ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Wytwarzany jest przez spiekanie surowców zawierających: tlenek wapnia (CaO), dwutlenek krzemu (SiO_2), tlenek glinu (Al_2O_3), tlenek żelaza (Fe_2O_3) i niewielkie ilości innych materiałów.

Wymagania:

- zawartość krzemianów wapnia ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ i $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) i pozostałości zawierającej glin i żelazo związane w fazach klinkierowych $\geq 67\%$ masy,
- stosunek masy $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 2$,
- zawartość tlenku magnezu $\text{MgO} \leq 5,0\%$ masy.

Granulowany żużel wielkopiecowy (S) – jest wytwarzany przez gwałtowne chłodzenie płynnego żużla o odpowiednim składzie, otrzymywanego przy wytopieniu rudy żelaza w wielkim piecu. Jest to materiał, który wykazuje właściwości hydrauliczne po odpowiedniej aktywacji.

Wymagania:

- zawartość fazy szklistej $\geq 67\%$ masy,
- zawartość $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 \geq 67\%$ masy,
- stosunek masy $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 > 1$.

Pucolana (P, Q) – materiały pochodzenia naturalnego lub przemysłowego, krzemianowe lub glino-krzemianowe lub stanowiące zestawienie obydwu. Pucolany

po zmieszaniu z wodą same nie twardnieją, lecz drobno zmielone i w obecności wody reagują w normalnej temperaturze otoczenia z rozpuszczonym wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)_2 , tworząc związki krzemianów wapnia i glinianów wapnia o rosnącej wytrzymałości. Związki te są podobne do związków, które tworzą się podczas twardnienia materiałów hydraulicznych. Pucolany zawierają reaktywny dwutlenek krzemu (SiO_2) i tlenek glinu (Al_2O_3). Pozostałość zawiera tlenek żelaza (Fe_2O_3) oraz inne tlenki.

Pucolany mogą być dwojakiego rodzaju:

Pucolana naturalna (P) – materiał pochodzenia wulkanicznego lub skały osadowe o odpowiednim składzie chemiczno-mineralogicznym,

Pucolana naturalna wypalana (Q) – materiały pochodzenia wulkanicznego, gliny, łupki lub skały osadowe, aktywowane przez obróbkę termiczną.

Wymagania:

- zawartość reaktywnego $\text{SiO}_2 \geq 25,0\%$ masy.

Popioły lotne (V, W) – popiół lotny to drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymywany jest przez elektrostatyczne lub mechaniczne osadzanie pylistych cząstek spalin z palenisk opalanych pyłem węglowym, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych. Popiół otrzymywany innymi metodami nie powinien być stosowany w cemencie zgodnym z normą PN-EN 197-1.

Norma wyróżnia dwa rodzaje popiołów lotnych:

Popiół lotny krzemionkowy (V) – charakteryzuje się właściwościami pucolanowymi, składa się z reaktywnego dwutlenku krzemu (SiO_2) i tlenku glinu (Al_2O_3). Pozostałość zawiera tlenek żelaza (Fe_2O_3) i inne związki.

Wymagania:

- udział reaktywnego $\text{CaO} < 10,0\%$ masy,
- zawartość wolnego $\text{CaO} \leq 1,0\%$ masy (jeżeli zawartość wolnego CaO mieści się w przedziale 1,0–2,5% masy, należy wtedy wykonać badania stałości objętości mieszaniny: 30% masy popiołu i 70% masy cementu CEM I; zmiana objętości nie może przekroczyć 10 mm),
- zawartość reaktywnego $\text{SiO}_2 \geq 25\%$ masy,
- zawartość strat prażenia (ilość niespalonego węgla), oznaczana zgodnie

z PN-EN 196-2 (przy czasie prażenia wynoszącym 1h), powinna się mieścić w jednym z następujących przedziałów:

- od 0 do 5,0% masy,
- od 2 do 7,0% masy,
- od 4 do 9,0% masy.

Górną granicę straty prażenia popiołu lotnego stosowanego jako składnik główny do produkcji cementu należy podać na opakowaniu i/lub w dokumencie dostawy.

Popiół lotny wapienny (W) – charakteryzuje się właściwościami hydraulicznymi i/lub pucolanowymi, Składa się z reaktywnego tlenku wapnia (CaO), reaktywnego dwutlenku krzemu (SiO_2) i tlenku glinu (Al_2O_3). Pozostałość zawiera tlenek żelaza (Fe_2O_3) i inne związki.

Wymagania:

- udział reaktywnego $\text{CaO} \geq 10,0\%$ masy,
- zawartość reaktywnego $\text{SiO}_2 \geq 25\%$ masy (jeżeli udział reaktywnego CaO mieści się w przedziale 10 – 15% masy),
- jeżeli zawartość reaktywnego $\text{CaO} > 15\%$ masy, to zaprawa normowa z popiołu powinna wykazywać wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach $\geq 10,0$ MPa,
- stałość objętości ≤ 10 mm (mieszanina 30% masy zmielonego popiołu i 70% masy cementu CEM I zgodnego z PN-EN 197-1).
- zawartość strat prażenia (ilość niespalonego węgla), oznaczana zgodnie z PN-EN 196-2 (lecz przy czasie prażenia wynoszącym 1h), powinna się mieścić w jednym z następujących przedziałów:
 - od 0 do 5,0% masy,
 - od 2 do 7,0% masy,
 - od 4 do 9,0% masy.

Górną granicę straty prażenia popiołu lotnego stosowanego jako składnik główny do produkcji cementu należy podać na opakowaniu i/lub w dokumencie dostawy.

Łupek palony (T) – wytwarzany jest w specjalnym piecu w temperaturze około 800°C . Ze względu na skład materiału naturalnego i proces wytwarzania łupek palony zawiera fazy klinkierowe, głównie krzemian dwuwapniowy oraz glinian jednowapniowy. Zawiera również, oprócz niewielkich ilości wolnego tlenku wapnia i siarczanu wapnia, większe ilości tlenków o reaktywności pucolanowej, szczególnie dwutlenek krzemu. W konsekwencji, w drobno zmielonym stanie, łupek palony wykazuje wyraźne właściwości hydrauliczne, podobnie jak cement portlandzki oraz dodatkowo, właściwości pucolanowe.

Wymagania:

- zaprawa wykonana ze zmielonego łupka palonego powinien wykazywać wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach $\geq 25,0$ MPa,
- stałość objętości ≤ 10 mm (mieszanka 30% masy zmielonego łupka palonego i 70% masy cementu CEM I zgodnego z PN-EN 197-1).

Wapień (L, LL) – surowiec pochodzenia naturalnego, kamień wapienny.

Wymagania:

- zawartość węgla wapnia $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ masy,
- zawartość gliny (iłów), oznaczona metodą adsorpcji błękitu metylowego zgodnie z normą PN-EN 933-9, nie powinna przekraczać 1,2g/100g wapienia,
- stopień rozdrobnienia wapienia do badań ok. 5000cm²/g wg Blaine'a,
- całkowita zawartość węgla organicznego (TOC) powinna spełniać jedno z kryteriów:
 - LL : nie powinna przekraczać 0,20% masy,
 - L : nie powinna przekraczać 0,50% masy.

Pył krzemionkowy (D) – składa się z bardzo drobnych kulistych cząstek o zawartości krzemionki bezpostaciowej co najmniej w 85%. Powstaje podczas redukcji kwarcu wysokiej czystości w obecności węgla w elektrycznych piecach łukowych przy produkcji krzemu lub stopów żelazokrzemu.

Wymagania:

- zawartość krzemu pierwiastkowego Si $\leq 0,4\%$ masy,
- strata prażenia przy czasie prażenia 1 godziny, $\leq 4,0\%$ masy,
- powierzchnia właściwa (BET) ≥ 15 m²/g.

3.1.1.2. Rodzaje i skład cementów powszechnego użytku

Norma PN-EN 197-1 wyróżnia następujące rodzaje cementów:

- **CEM I** cement portlandzki
- **CEM II** cement portlandzki wieloskładnikowy
- **CEM III** cement hutniczy
- **CEM IV** cement pucolanowy
- **CEM V** cement wieloskładnikowy

Z uwagi na zawartość składników głównych, innych niż klinkier portlandzki, w składzie cementu, wyróżnia się trzy odmiany: A, B i C (tabela 3.1).

Tabela 3.1. Rodzaje cementów powszechnego użytku

Nazwa cementu	Oznaczenie cementu wg PN-EN 197-1	Maksymalna zawartość nieklinkierowych składników głównych [% masy]
Cement portlandzki	CEM I	-
Cement portlandzki wieloskładnikowy	CEM II/A	20
	CEM II/B	35
Cement hutniczy	CEM III/A	65
	CEM III/B	80
	CEM III/C	95
Cement pucolanowy	CEM IV/A	35
	CEM IV/B	55
Cement wieloskładnikowy	CEM V/A	60
	CEM V/B	80

Składnikami głównymi cementu mogą być, obok klinkieru portlandzkiego, składniki wymienione w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Składniki główne cementów powszechnego użytku

Nazwa składnika	Oznaczenie składnika
Granulowany żużel wielkopiecowy	S
Popiół lotny krzemionkowy	V
Popiół lotny wapienny	W
Pucolana naturalna	P
Pucolana przemysłowa	Q
Łupek palony	T
Wapień	L, LL
Pył krzemionkowy	D

Rodzaje i skład cementów powszechnego użytku pokazano w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Rodzaje i skład cementów powszechnego użytku

Główne rodzaje	Nazwa	Skład (% masy ^{*)}											Składniki drugorzędne		
		Składniki główne								Wapień					
		K	S	D ³⁾	P	Q	V	W	T	L	LL				
klinkier		żużel wielko- płecowy	pył krze- miłkowy	naturalna	wypalana	krzemionkowy	wapienny	łupek palony							
CEM I	cement portlandzki	CEM I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	cement portlandzki żużlowy	CEM II/A-S	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	cement portlandzki krzemionkowy	CEM II/A-D	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	cement portlandzki pucolanowy	CEM II/A-P	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	cement portlandzki popielowy	CEM II/B-Q	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	cement portlandzki popielowy	CEM II/B-V	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II/A-W		-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-W	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	

CEM II	cement portlandzki tufkowy	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	cement portlandzki wapienny	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
cement portlandzki wieloskładnikowy ^d	CEM II/A-M	80-88	<-----	-----	12-20	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	<-----	-----	-----	-----	-----	-----	21-35	-----	-----	0-5	
CEM III	cement hutniczy	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	cement pucolanowy ^d	CEM IV/A	65-89	-	<-----	-----	11-35	-----	-----	-----	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<-----	-----	-----	-----	-----	36-55	-----	0-5	
CEM V	cement wieloskładnikowy ^d	CEM V/A	40-64	18-30	-	<-----	-----	-----	-----	-----	-----	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<-----	-----	-----	-----	-----	-----	0-5	

a) Wartości w tabeli odnoszą się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych

b) Udział pyłu krzemionkowego jest ograniczony do 10%

c) W cementach portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A-M i CEM II/B-M, w cementach pucolanowych CEM IV/A i CEM IV/B i w cementach wieloskładnikowych CEM V/A i CEM V/B główne składniki inne niż klinkier należy deklorować poprzez oznaczenie cementu

3.1.1.3. Właściwości fizyko-mechaniczne cementu

WYMAGANIA MECHANICZNE

Wytrzymałość normowa

Wytrzymałość normowa cementu jest to wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (wyrażona w N/mm²; 1 MPa = 1N/mm²), oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1, powinna spełniać wymagania podane w tabeli 3.4.

Norma PN-EN 197-1 rozróżnia trzy klasy wytrzymałości normowej:

- klasa 32,5,
- klasa 42,5,
- klasa 52,5.

Wytrzymałość wczesna

Wytrzymałość wczesna cementu jest to wytrzymałość na ściskanie albo po 2 albo po 7 dniach, oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1, powinna spełniać wymagania podane w tabeli 3.4.

Zgodnie z normą PN-EN 197-1 dla każdej z klas wytrzymałości normowej można przypisać trzy klasy wytrzymałości wczesnej:

- klasa o niskiej wytrzymałości wczesnej **oznaczona symbolem L**
- klasa o normalnej wytrzymałości wczesnej **oznaczona symbolem N**
- klasa o wysokiej wytrzymałości wczesnej **oznaczona symbolem R**

Klasa L odnosi się tylko do cementów hutniczych CEM III.

WYMAGANIA FIZYCZNE

Początek czasu wiązania

Cement wg normy PN-EN 197-1 powinien charakteryzować się określonym początkiem czasu wiązania. Wymagany normą minimalny czas początku wiązania, dla poszczególnych klas wytrzymałości, podano w tabeli 3.4.

Stołość objętości

Wszystkie cementy powszechnego użytku zgodne z normą PN-EN 197-1 muszą wykazywać stołość objętości. Warunek ten jest spełniony, jeżeli oznaczone metodą Le Chateliera zmiany objętości są mniejsze niż 10 mm (tabela 3.4).

Tabela 3.4. Właściwości mechaniczne i fizyczne cementów

Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Początek czasu wiązania	Stażność objętości	
	Wytrzymałość wczesna		Wytrzymałość normowa			
	2 dni	7 dni	28 dni	[min]	[mm]	
32,5 L ^{a)}	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	–	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	–				
42,5 L ^{a)}	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	–				
42,5 R	≥ 20,0	–				
52,5 L ^{a)}	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	–				
52,5 R	≥ 30,0	–				

a) klasa wytrzymałości definiowana tylko dla cementów hutniczych CEM III

3.1.1.4. Właściwości chemiczne

Wymagania normy PN-EN 197-1 względem właściwości chemicznych cementów podano w tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Wymagania chemiczne dla cementów powszechnego użytku

Właściwość	Metoda badania	Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Wymagania ^{a)} [%]
Strata prażenia	PN-EN 196-2	CEM I CEM III	wszystkie	≤ 5,0
Pozostałość nierozpuszczalna	PN-EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM III	wszystkie	≤ 5,0
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	PN-EN 196-2	CEM I CEM II ^{c)}	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5
		CEM IV CEM V	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0
		CEM III ^{d)}	wszystkie	
Zawartość chlorków	PN-EN 196-2	wszystkie ^{e)}	wszystkie	≤ 0,10 ^{f)}
Pucolanowość	PN-EN 196-5	CEM IV	wszystkie	wynik pozytywny

a) Wymagania podano jako %masy gotowego cementu.
 b) Oznaczenie pozostałości nierozpuszczalnej w kwasie chlorowodorowym i węglanie sodu.
 c) Cement rodzaju CEM II/B-T i CEM II/B-M z udziałem T > 20% może zawierać do 4,5% SO₃ dla wszystkich klas wytrzymałości.
 d) Cement rodzaju CEM III/C może zawierać do 4,5% siarczanów.
 e) Cement rodzaju CEM III może zawierać więcej niż 0,10% chlorków, lecz wówczas maksymalną zawartość chlorków należy podać na opakowaniu i/lub w dokumencie dostawy.
 f) Do zastosowań do betonu sprężonego mogą być produkowane cementy, w których wartość wymagania dotycząca zawartości chlorków jest niższa. Wówczas wartość 0,10% należy zastąpić tą niższą wartością i podać ją w dokumencie dostawy.

3.1.1.5. Właściwości specjalne wg PN-EN 197-1

ODPORNOŚĆ NA SIARCZANY - SR

Norma PN-EN 197-1 definiuje 7 cementów powszechnego użytku odpornych na siarczany (oznaczenie SR), pogrupowanych w następujący sposób:

- a) Cement portlandzki odporny na siarczany:
- CEM I-SR 0 – cement portlandzki odporny na siarczany (wymaganie zawartości C₃A w klinkierze = 0%),
 - CEM I-SR 3 – cement portlandzki odporny na siarczany (wymaganie zawartości C₃A w klinkierze ≤ 3%),
 - CEM I-SR 5 – cement portlandzki odporny na siarczany (wymaganie zawartości C₃A w klinkierze ≤ 5%),

- b) Cement hutniczy odporny na siarczany:
- CEM III/B-SR – cement hutniczy odporny na siarczany (brak wymagań odnośnie zawartości C_3A w klinkierze),
 - CEM III/C-SR – cement hutniczy odporny na siarczany (brak wymagań odnośnie zawartości C_3A w klinkierze),
- c) Cement pucoalanowy odporny na siarczany:
- CEM IV/A-SR – cement pucoalanowy odporny na siarczany (wymaganie zawartości C_3A w klinkierze $\leq 9\%$),
 - CEM IV/B-SR – cement pucoalanowy odporny na siarczany (wymaganie zawartości C_3A w klinkierze $\leq 9\%$).

Skład każdego z siedmiu wyrobów z grupy cementów powszechnego użytku odpornych na siarczany podano w tabeli 3.6. W celu rozróżnienia cementów odpornych na siarczany norma PN-EN 197-1 wprowadza dodatkowe oznaczenia: SR 0, SR 3, SR 5 dla cementów CEM I i SR dla cementów CEM III i CEM IV.

Tabela 3.6. Rodzaje i skład cementów powszechnego użytku odpornych na siarczany SR

Rodzaj cementu	Nazwa		Skład (% masy ^{a)})				
			Składniki główne				Składniki drugorzędne
			klinkier	Żużel wielkopiecowy	Pucolana naturalna	popiół lotny krzemionkowy	
CEM I	Cement portlandzki odporny na siarczany	CEM I-SR 0	95–100	–	–	–	0–5
		CEM I-SR 3					
		CEM I-SR 5					
CEM III	Cement hutniczy odporny na siarczany	CEM III/B-SR	20–34	66–80	–	–	0–5
		CEM III/C-SR	5–19	81–95	–	–	0–5
CEM IV	Cement pucoalanowy odporny na siarczany ^{b)}	CEM IV/A-SR	65–79	–	<--- 21–35 --->		0–5
		CEM IV/B-SR	45–64	–	<--- 36–55 --->		0–5

a) Wartości w tablicy odnoszą się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych.
b) W cementach pucoalanowych odpornych na siarczany CEM IV/A-SR i CEM IV/B-SR – główne składniki inne niż klinkier należy deklarować poprzez oznaczenie cementu.

Wymagania w zakresie właściwości chemicznych cementów odpornych na siarczaną SR wg normy PN-EN 197-1 podano w tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Wymagania chemiczne dla cementów SR wg PN-EN 197-1

Właściwość	Metoda badania	Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Wymagania ^{a)}
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	EN 196-2	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5 ^{b)}	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,0%
		CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 3,5%
C ₃ A w klinkierze ^{c)}	EN 196-2 ^{d)}	CEM I-SR 0	wszystkie	= 0%
		CEM I-SR 3		≤ 3,0%
		CEM I-SR 5		≤ 5,0%
	— ^{e)}	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR		≤ 9,0%
Pucolanowość	EN 196-5	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	wszystkie	wynik pozytywny po 8 dniach

a) Wymagania podano jako procent masy gotowego cementu.
 b) Dla szczególnych zastosowań cementy CEM I-SR 5 mogą być produkowane zgodnie z wyższą zawartością siarczanów. W takich przypadkach wartość liczbowa zawartości siarczanów należy zdeklarować w dokumencie dostawy.
 c) Metoda oznaczania zawartości C₃A w klinkierze z analizy gotowego cementu jest w trakcie opracowywania w CEN/TC 51.
 d) W szczególnym przypadku cementów CEM I, dopuszcza się obliczanie zawartości C₃A w klinkierze z analizy chemicznej cementu. Zawartość C₃A należy obliczyć z równania: C₃A = 2,65 A - 1,69 F.
 e) Do czasu zakończenia prac nad metodą badania, zawartości C₃A w klinkierze należy oznaczać na podstawie analizy klinkieru, w ramach wykonywanej przez producenta zakładowej kontroli produkcji.

NISKIE CIEPŁO HYDRATAcji – LH

Norma PN-EN 197-1 określa dodatkowo wymagania dla cementu o niskim ciepłe hydratacji (oznaczenie LH), które podano w tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Wymagania dla cementów o niskim ciepłe hydratacji

Rodzaj cementu LH	Wymagania
CEM I CEM II CEM III CEM IV CEM V	Ciepło hydratacji po 41 godzinach ≤ 270 J/g (oznaczone metodą semiadiabatyczną wg PN-EN 196-9)
	Ciepło hydratacji po 7 dniach ≤ 270 J/g (oznaczone metodą ciepła rozpuszczania wg PN-EN 196-8)

3.1.1.6. Wymagania dotyczące trwałości

W wielu zastosowaniach, szczególnie w surowych warunkach środowiskowych, wybór cementu ma wpływ na trwałość betonu, zaprawy i zaczynów (tj. mrozoodporność, odporność chemiczną i ochronę zbrojenia przed korozją).

Wybór cementu zgodnego z PN-EN 197-1, w szczególności w odniesieniu do rodzaju i klasy wytrzymałości dla różnych zastosowań i klas ekspozycji (rozdz. 5), powinien uwzględniać odpowiednie normy i/lub przepisy dotyczące betonu lub zaprawy obowiązujące w miejscu stosowania.

Cementy powszechnego użytku o niskiej wytrzymałości wczesnej mogą wymagać dodatkowych środków ostrożności w ich stosowaniu, tj. przedłużenia czasu rozformowywania i ochrony podczas niekorzystnych warunków pogodowych. We wszystkich pozostałych przypadkach ich właściwości i przydatność do stosowania będzie podobna do innych cementów powszechnego użytku, tego samego rodzaju i klasy wytrzymałości normowej.

3.1.1.7. Oznaczenie cementu

Cementy powszechnego użytku należy oznaczać przez, co najmniej, nazwę rodzaju cementu (CEM I ÷ V) oraz liczb 32,5, 42,5 lub 52,5 wskazujących klasę wytrzymałości. W celu wskazania klasy wytrzymałości wczesnej należy dodać odpowiednio literę N, R lub L. Cementy odporne na siarczany należy dodatkowo identyfikować symbolem SR. Cementy, które nie są objęte zakresem normy PN-EN 197-1 w odniesieniu do ich właściwości odporności na siarczany lecz, zgodnie z normami krajowymi, są uznane za cementy odporne na siarczany, nie należy identyfikować symbolem SR.

PRZYKŁAD 1

Cement portlandzki, o klasie wytrzymałości 42,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej jest identyfikowany przez:

Cement portlandzki EN 197-1 – CEM I 42,5R

PRZYKŁAD 2

Cement portlandzki wapienny, zawierający 6–20% masy wapienia, o zawartości TOC nieprzekraczającej 0,50% masy (L), o klasie wytrzymałości 32,5 i normalnej wytrzymałości wczesnej jest identyfikowany przez:

Cement portlandzki wapienny EN 197-1 – CEM II/A-L 32,5N

PRZYKŁAD 3

Cement portlandzki wieloskładnikowy zawierający granulowany żużel wielkopiecowy (S), popiół lotny krzemionkowy (V) i wapień (L) w łącznej ilości 12–20% masy, o klasie wytrzymałości 32,5 i o wysokiej wytrzymałości wczesnej jest identyfikowany przez:

Cement portlandzki wieloskładnikowy EN 197-1 – CEM II/A-M (S-V-L) 32,5R

PRZYKŁAD 4

Cement wieloskładnikowy zawierający 18–30% masy granulowanego żużla wielkopiecowego (S) i 18–30% masy popiołu lotnego krzemionkowego (V), o klasie wytrzymałości 32,5 i normalnej wytrzymałości wczesnej jest identyfikowany jako:

Cement wieloskładnikowy EN 197-1 – CEM V/A (S-V) 32,5N

PRZYKŁAD 5

Cement hutniczy zawierający 66–80% masy granulowanego żużla wielkopiecowego oraz 20–34% klinkieru, o klasie wytrzymałościowej 32,5, normalnym przyroście wytrzymałości wczesnej i niskim cieple hydratacji (LH) i odporny na siarczany jest identyfikowany jako:

Cement hutniczy EN 197-1 – CEM III/B 32,5N – LH/SR

PRZYKŁAD 6

Cement portlandzki o klasie wytrzymałości 42,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej, odporny na siarczany i przy zawartości C_3A w klinkierze $\leq 3\%$, jest oznaczany przez:

Cement portlandzki EN 197-1 – CEM I 42,5R – SR 3

PRZYKŁAD 7

Cement pucolanowy zawierający pomiędzy 21–35% masy pucolany naturalnej (P), o klasie wytrzymałości 32,5 i normalnej wytrzymałości wczesnej, odporny na siarczany i przy zawartości C_3A w klinkierze $\leq 9\%$, spełniający wymagania pucolanowości, jest oznaczany przez:

Cement pucolanowy EN 197-1 – CEM IV/A (P) 32,5N – SR

PRZYKŁAD 8

Cement hutniczy zawierający granulowany żużel wielkopiecowy S w ilości pomiędzy 81–95%, o klasie wytrzymałości 32,5 i niskiej wytrzymałości wczesnej, o niskim cieple hydratacji i odporny na siarczany:

Cement hutniczy EN 197-1 – CEM III/C 32,5L – LH/SR

3.1.2. PN-EN 197-5 „Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI”

Norma PN-EN 197-5 definiuje 5 rodzajów cementów w 2 grupach:

- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M,
- cement wieloskładnikowy CEM VI.

Skład cementów zgodnych z PN-EN 197-5 podano w tabeli 3.9. Składniki powinny spełniać wymagania normy PN-EN 197-1 (rodz. 3.1.1.1), jednakże w przypadku wapienia (L,LL) znajdują zastosowanie poniższe wymagania:

- zawartość węgla wapnia $\text{CaCO}_3 \geq 40\%$ masy,
- zawartość węgla wapnia i magnezu $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 \geq 75\%$ masy.

Cementy zgodne z normą PN-EN 197-5 w zakresie właściwości mechanicznych i fizycznych powinny spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 197-1. Dodatkowo cementy CEM II/C-M i CEM VI mogą być produkowane w klasie o niskiej wytrzymałości wczesnej L.

Wymagania chemiczne dla cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M są takie same jak w PN-EN 197-1. Natomiast wymagania dla cementów wieloskładnikowych CEM VI przedstawiono w tabeli 3.10.

Norma PN-EN 197-5 jest normą europejską niezharmonizowaną, co powoduje, że cementy CEM II/C-M i CEM VI nie mogą być znakowane znakiem CE zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. Cementy CEM II/C-M i CEM VI mogą być znakowane znakiem budowlanym B zgodnie z wymaganiami Rozporządzenia Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z dnia 4 grudnia 2020r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie sposobu deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych oraz sposobu znakowania ich znakiem budowlanym (Dz.U. 2020 poz. 2297).

Tabela 3.9. Rodzaje i skład cementów wg PN-EN 197-5

Rodzaj cementu		Nazwa		Skład (% masy ^{a)})												Składniki drugorzędne
				Składniki główne												
				Klinkier	żużel wielkopieczowy	pył krzemionkowy	pucolana		popiół lotny		tupek palony		wapień		L ^{d)}	
naturalna	wypalana	krzemionkowy	wapienny				T	V	W	Q	P					
CEM II	cement portlandzki wieloskładnikowy ^{b)}	CEM II/C-M	50-64	K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L ^{d)}	LL ^{d)}	0-5		
		CEM VI	cement wieloskładnikowy	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM VI	cement wieloskładnikowy	CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5		
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5		
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
<----- 36-50 ----->																

a) Wartości w tabeli odnoszą się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych

b) W przypadku stosowania pyłu krzemionkowego udział pyłu krzemionkowego jest ograniczony do 6-10 % masy

c) W przypadku stosowania wapienia, udział wapienia (suma L, LL) jest ograniczony do 6-20 % masy

d) Liczba głównych składników i innych niż klinkier jest ograniczona do dwóch. Te składniki główne należy deklorować poprzez oznaczenie cementu

Tabela 3.10 . Wymagania chemiczne dla cementów wg PN-EN 197-5

Właściwość	Metoda badania	Klasa wytrzymałości	Wymagania ^{a)} [%]
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	PN-EN 196-2	wszystkie	≤ 4,0 ^{b)}
Zawartość chlorków	PN-EN 196-2	wszystkie	≤ 0,10 ^{c)}

a) Wymagania podano jako % masy gotowego cementu
 c) Cement CEM II/B-T i CEM II/B-M (T > 20%) może zawierać do 4,5% siarczanów (jako SO₃) dla wszystkich klas wytrzymałości
 e) Cement rodzaju CEM III może zawierać więcej niż 0,10% chlorków, lecz wówczas maksymalną zawartość chlorków należy podać na opakowaniu i/lub w dokumencie dostawy

3.1.2.1. Oznaczenia cementów

Cementy zgodne z PN-EN 197-5 należy oznaczać przez, co najmniej, nazwę rodzaju cementu (CEM II/C-M, CEM VI) oraz liczby 32,5, 42,5 lub 52,5 wskazującej klasę wytrzymałości normowej. W celu wskazania klasy wytrzymałości wczesnej należy dodać odpowiednio literę N, R lub L.

PRZYKŁAD 1

Cement portlandzki wieloskładnikowy zawierający 16-44 % masy popiołu lotnego krzemionkowego (V) i 6-20 % masy wapienia (LL), w klasie wytrzymałości 32,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej, o niskim cieple hydratacji jest oznaczony:

Cement portlandzki wieloskładnikowy EN 197-5 – CEM II/C-M (V-LL) 32,5R-LH

PRZYKŁAD 2

Cement portlandzki wieloskładnikowy zawierający 6-44 % masy granulowanego żuźla wielkopieczowego (S) i 6-44 % masy krzemionkowego popiołu lotnego (V), w klasie wytrzymałości 42,5 o normalnej wytrzymałości wczesnej, o niskim cieple hydratacji jest oznaczony:

Cement portlandzki wieloskładnikowy EN 197-5 – CEM II/C-M (S-V) 42,5N-LH

PRZYKŁAD 3

Cement wieloskładnikowy zawierający 31-59 % masy granulowanego żuźla wielkopieczowego (S) i 6-20 % masy wapienia (L), klasie wytrzymałości 32,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej jest oznaczony:

Cement wieloskładnikowy EN 197-5 – CEM VI (S-L) 32,5 R

3.1.3. PN-B-19707 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”

Przedmiotem krajowej normy PN-B-19707 są cementy specjalne, których cechami użytkowymi są:

- odporność na siarczany - HSR,
- niska zawartość alkaliów - NA.

3.1.3.1. Klasyfikacja cementów ze względu na właściwości specjalne

CEMENT ODPORNY NA SIARCZANY – HSR

Cement odporny na siarczany HSR jest to cement powszechnego użytku, spełniający dodatkowo wymagania dotyczące odporności na siarczany, umożliwiające projektowanie i wykonywanie konstrukcji trwałych w warunkach agresji siarczanowej, nieuwzględniony w grupie cementów odpornych na siarczany SR objętych normą PN-EN 197-1. Cement odporny na siarczany HSR powinien spełniać wymagania normy PN-EN 197-1 oraz dodatkowe, podane w tabeli 3.11.

Tabela 3.11. Skład i wymagania cementu odpornego na siarczany HSR

Rodzaj cementu HSR	Skład cementu - wymagania dodatkowe ^{a)}	Wymagania	
CEM II/A-V CEM II/A-S CEM II/A-M (S-V) CEM II/B-S	–	Wielkość ekspansji w roztworze Na ₂ SO ₄ po 52 tygodniach ≤ 0,5% ^{d)}	Zawartość glinianu trójwapniowego ^{d)} C ₃ A ≤ 5%
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{b)} V ≥ 25%		–
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego b) V ≥ 20%		–
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S ≤ 49%		Zawartość glinianu trójwapniowego ^{d)} C ₃ A ≤ 9%
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S ≥ 50%		–
CEM V/A (S-V) CEM V/B (S-V)	–		–

a) Wymagania podstawowe dotyczące składu wg PN-EN 197-1, tabela 3.3.
b) Popiół lotny krzemionkowy (V) powinien spełniać wymagania zawarte w PN-EN 197-1, dodatkowo strata prażenia nie może przekraczać 5,0% masy, oznaczana zgodnie z PN-EN 196-2, lecz przy czasie prażenia wynoszącym 1h
c) Badanie sprawdzające
d) Zawartość glinianu trójwapniowego C₃A wyliczona z równania: C₃A = 2,65 x Al₂O₃ - 1,69 x Fe₂O₃, na podstawie zawartości Al₂O₃ i Fe₂O₃ oznaczanych wg PN-EN 196-2

CEMENT NISKOALKALICZNY – NA

Cement niskoalkaliczny NA jest to cement powszechnego użytku, spełniający dodatkowo wymagania dotyczące zawartości alkaliów, umożliwiające projektowanie i wykonywanie konstrukcji odpornych na uszkodzenia w wyniku korozyjnego oddziaływania alkaliów aktywnych w betonie. Cement niskoalkaliczny NA powinien spełniać wymagania normy PN-EN 197-1 oraz dodatkowe wymagania podane w tabeli 3.12.

Tabela 3.12. Skład i wymagania cementu niskoalkalicznego NA

Rodzaj cementu NA	Skład cementu - wymagania dodatkowe ^{a)}	Całkowita zawartość alkaliów wyrażona jako $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{\text{b)}$
CEM I CEM II/A-LL	–	$\leq 0,60\%$
CEM II/A-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} V $\geq 14\%$	$\leq 1,20\%$
CEM II/A-S	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\geq 14\%$	$\leq 0,70\%$
CEM II/A-M (S-V)	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) $\geq 14\%$	$\leq 1,20\%$
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} V $\geq 25\%$	$\leq 1,50\%$
CEM II/B-S	–	$\leq 0,80\%$
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} V $\geq 20\%$	$\leq 1,30\%$
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\leq 49\%$	$\leq 0,95\%$
	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S $\geq 50\%$	$\leq 1,10\%$
CEM III/B CEM III/C	–	$\leq 2,00\%$
CEM IV/A (V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} V $\geq 25\%$	$\leq 1,50\%$
CEM IV/B (V)	–	$\leq 2,00\%$
CEM V/A (S-V)	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) $\leq 49\%$	$\leq 1,60\%$
	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^{c)} i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) $\geq 50\%$	$\leq 2,00\%$
CEM V/B (S-V)	–	$\leq 2,00\%$

a) Wymagania podstawowe dotyczące składu wg PN-EN 197-1, tablica 3.3
b) Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ określana wg PN-EN 196-2.
c) Popiół lotny krzemionkowy (V) powinien spełniać wymagania zawarte PN-EN 197-1, strata prażenia nie może przekraczać 5,0% masy, oznaczana zgodnie z PN-EN 196-2, lecz przy czasie prażenia wynoszącym 1h.

3.1.3.2. Oznaczenia cementów

Oznaczenie cementu spełniającego wymagania normy PN-B-19707 powinno zawierać co najmniej rodzaj i oznaczenie cementu wg PN-EN 197-1, numer normy, opis liczbowo-literowy wskazujący klasę wytrzymałości oraz oznaczenie właściwości specjalnych (HSR, NA).

PRZYKŁAD 1

Oznaczenie cementu portlandzkiego popiołowego, zawierającego 25–35% masy popiołu lotnego krzemionkowego (V), o klasie wytrzymałości 32,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej (R) oraz odpornego na siarczany (HSR):

Cement portlandzki popiołowy PN-B-19707 – CEM II/B-V 32,5 R – HSR

PRZYKŁAD 2

Oznaczenie cementu hutniczego, zawierającego 50–65% masy granulowanego żużla wielkopieczowego (S), o klasie wytrzymałości 32,5 i normalnej wytrzymałości wczesnej (N), o niskim cieple hydratacji (LH), odpornego na siarczany (HSR) i niskoalkalicznego (NA):

Cement hutniczy PN-B-19707 – CEM III/A 32,5 N – LH/HSR/NA

PRZYKŁAD 3

Oznaczenie cementu portlandzkiego wieloskładnikowego, zawierającego co najmniej 20% masy popiołu lotnego krzemionkowego (V) i nie więcej niż 16% masy granulowanego żużla wielkopieczowego (S), o klasie wytrzymałości 32,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej (R), odpornego na siarczany (HSR) i niskoalkalicznego (NA):

Cement portlandzki wieloskładnikowy PN-B-19707 – CEM II/B-M (S-V) 32,5R – HSR/NA

PRZYKŁAD 4

Oznaczenie cementu hutniczego, zawierającego 66–80% masy granulowanego żużla wielkopieczowego (S), o klasie wytrzymałości 32,5 i niskiej wytrzymałości wczesnej (L), o niskim cieple hydratacji (LH), odpornego na siarczany (SR) i niskoalkalicznego (NA):

Cement hutniczy PN-B-19707 – CEM III/B 32,5 L – LH/SR/NA

PRZYKŁAD 5

Oznaczenie cementu portlandzkiego, wyprodukowanego z klinkieru o zawartości glinianu trójwapniowego C_3A nie przekraczającej 3% masy, o klasie wytrzymałości 42,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej (R), odpornego na siarczany (SR) i niskoalkalicznego (NA):

cement portlandzki PN-B-19707 – CEM I 42,5 R – SR 3/NA

3.1.4. PN-EN 14216 „Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji”

Cement o bardzo niskim cieple hydratacji zgodnie z normą PN-EN 14216 oznaczany jest VLH – jest to spoiwo hydrauliczne, tj. drobno zmielony materiał nieorganiczny, który po zmieszaniu z wodą daje zaczyn, wiążący i twardniejący w wyniku reakcji i procesów hydratacji, który po stwardnieniu pozostaje wytrzymały i trwały także pod wodą. Zachodzące reakcje i procesy z uwagi na skład, stopień zmielenia lub reaktywność składników proces hydratacji jest wolniejszy. Składniki cementów o bardzo niskim cieple hydratacji są takie same jak w przypadku cementów powszechnego użytku. Powinny one odpowiadać wymaganiom zawartym w normie PN-EN 197-1 (patrz 3.1.1.1.).

3.1.4.1. Rodzaje i skład cementów VLH

Cementy specjalne o bardzo niskim cieple hydratacji dzielą się na 3 rodzaje:

- VLH III – cement hutniczy
- VLH IV – cement pucolanowy
- VLH V – cement wieloskładnikowy

W tabeli 3.13 podano wymagania odnośnie składu cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji.

Tabela 3.13. Rodzaje i skład cementu o bardzo niskim ciepłe hydratacji

Rodzaj cementu	Nazwa	Skład (% masy ^{a)})										Składniki drugorzędne		
		klinkier	żuzel wielkopieczowy	pył krzemionkowy	pucolana		popiół lotny		W	V	Q		P	D ^{b)}
					naturalna	wypalana	krzemionkowy	wapienny						
VLH III	cement hutniczy	VLH III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		VLH III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
VLH IV	cement pucolanowy ^{d)}	VLH IV/A	65-89	-	<-----	11-35	----->	-	-	-	-	-	-	0-5
		VLH IV/B	45-64	-	<-----	36-55	----->	-	-	-	-	-	-	0-5
VLH V	cement wieloskładnikowy ^{e)}	VLH V/A	40-64	18-30	-	<-----	18-30	----->	-	-	-	-	-	0-5
		VLH V/B	20-38	31-50	-	<-----	31-50	----->	-	-	-	-	-	0-5

a) Wartości w tabeli odnoszą się do sumy składników głównych i drugorzędnych.

b) Udział pyłu krzemionkowego jest ograniczony do 10%.

c) W cementach pucolanowych VLH IV/A i VLH IV/B oraz w cementach wieloskładnikowych VLH V/A i VLH V/B - główne składniki inne niż klinkier należy deklaruować poprzez oznaczenie cementu

3.1.4.2. Wymagania mechaniczne i fizyczne

Wytrzymałość normowa

Wytrzymałość normowa cementu o bardzo niskim cieple hydratacji jest to wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1, powinna spełniać wymagania wg tabeli 3.14.

Norma PN-EN 14216 definiuje tylko jedną klasę wytrzymałości normowej (określaną po 28 dniach dojrzewania) – klasę 22,5.

Cechą charakterystyczną tego rodzaju cementów jest znaczny przyrost wytrzymałości w późniejszym okresie dojrzewania (po 56, 90 dniach).

Początek czasu wiązania

Początek czasu wiązania oznaczony zgodnie z PN-EN 196-3, powinien spełniać wymagania wg tabeli 3.14.

Stażność objętości

Rozszerzalność oznaczona zgodnie z PN-EN 196-3, powinna spełniać wymagania wg tabeli 3.14.

Tabela 3.14. Właściwości mechaniczne i fizyczne cementów VLH

Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 28 dniach	Początek czasu wiązania [min]	Stażność objętości [mm]	
22,5	≥22,5	≤42,5	≥75	≤10

Ciepło hydratacji

Ciepło hydratacji cementów o bardzo niskim cieple hydratacji nie powinno przekroczyć wartości charakterystycznej 220 J/g oznaczane wg PN-EN 196-8 po 7 dniach lub wg PN-EN 196-9 po 41 godzinach (tabela 3.15)

Tabela 3.15. Wymagania dla cementów VLH

Rodzaj cementu VLH	Wymagania – ciepło hydratacji
VLH III VLH IV VLH V	≤ 220 J/g po 41 godzinach (oznaczone metodą semiadiabatyczną wg PN-EN 196-9)
	≤220 J/g po 7 dniach (oznaczone metodą ciepła rozpuszczania wg PN-EN 196-8)

3.1.4.3. Wymagania chemiczne

Wymagania w zakresie właściwości chemicznych cementów o bardzo niskim cieple hydratacji VLH wg normy PN-EN 14216 podano w tabeli 3.16.

Tabela 3.16. Wymagania chemiczne dla cementów VLH

Właściwość	Metoda badania	Rodzaj cementu	Wymagania ^{a)}
Strata prażenia	EN 196-2	VLH III	≤ 5,0%
Pozostałość nierozpuszczalna	EN 196-2 ^{b)}	VLH III	≤ 5,0%
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	EN 196-2	VLH IV, VLH V	≤ 3,5%
		VLH III/B	4,0%
		VLH III/C	≤ 4,5%
Zawartość chlorków	EN 196-21	wszystkie ^{c)}	≤ 0,10%
Pucolanowość	EN 196-5	VLH IV	wynik pozytywny

a) Wymagania podano jako % masy gotowego cementu
b) Oznaczanie pozostałości nierozpuszczalnej w kwasie chlorowodorowym i węglanie sodu
c) Cement rodzaju VLH III może zawierać więcej niż 0,10% chlorków, wówczas maksymalną zawartość chlorków należy podać na opakowaniu i/lub w dokumencie dostawy

3.1.4.4. Wymagania dotyczące trwałości

W wielu zastosowaniach, szczególnie w surowych warunkach środowiskowych, wybór cementu ma wpływ na trwałość betonu, zaprawy i zaczynów (tj. mrozoodporność, odporność chemiczną i ochronę zbrojenia przed korozją). Wybór cementu zgodnego z PN-EN 14216, szczególnie pod względem rodzaju dla różnych zastosowań i klas ekspozycji, powinien uwzględniać odpowiednie normy i/lub przepisy dotyczące betonu lub zaprawy przyjęte w miejscu stosowania. Zaprawa lub beton wykonany z cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji wymagają szczególnej ochrony przed wysychaniem i karbonatyzacją podczas pielęgnacji.

3.1.4.5. Oznaczenia cementów

Oznaczenie cementu spełniającego wymagania normy PN-EN 14216 „Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji” powinno zawierać nazwę, rodzaju cementu oraz liczbę 22,5 wskazującą klasę wytrzymałości normowej.

PRZYKŁAD 1

Cement specjalny o bardzo niskim cieple zawierający granulowany żużel wielkopiecowy (S) w ilości 81%–95%, o klasie wytrzymałości 22,5 i o bardzo niskim cieple hydratacji jest oznaczony w sposób następujący:

Cement specjalny hutniczy o bardzo niskim cieple hydratacji EN 14216 – VLH III/C 22,5

PRZYKŁAD 2

Cement specjalny o bardzo niskim cieple zawierający pucolanę naturalną (P) w ilości 36%–55%, o klasie wytrzymałości 22,5 i o bardzo niskim cieple hydratacji jest oznaczony w sposób następujący:

Cement specjalny pucolanowy o bardzo niskim cieple hydratacji EN 14216 – VLH IV/B (P) 22,5

PRZYKŁAD 3

Cement specjalny o bardzo niskim cieple, zawierający granulowany żużel wielkopiecowy (S) w ilości 18%–30% i popiół lotny krzemionkowy (V), w ilości 18%–30% masy, o klasie wytrzymałości 22,5 i o bardzo niskim cieple hydratacji jest oznaczony w sposób następujący:

Cement specjalny wieloskładnikowy o bardzo niskim cieple hydratacji EN 14216 – VLH V/A (S-V) 22,5

3.1.5. Inne dokumenty normalizacyjne

Oprócz wymienionych w rozdziałach 3.1.1.-3.1.4. norm zawierających wymagania dla cementów powszechnego użytku, cementów specjalnych czy cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji, w krajach Unii Europejskiej, w tym także w Polsce aktualnie funkcjonują następujące normy:

- Norma PN-EN 413-1 „Cement murarski – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności”, w której określono definicje i skład cementów murarskich, powszechnie używanych w Europie do produkcji zapraw murarskich i tynkarskich oraz do obrzutek i tynków (do oceny zgodności cementów murarskich stosowana jest norma PN-EN 413-2). Należy zaznaczyć, że zgodnie z normą na beton PN-EN 206 ten rodzaj cementu nie powinien być stosowany w produkcji betonu.
- Norma PN-EN 15743 „Cement supersiarczanowy – Skład, wymagania i kryteria zgodności”, w której zdefiniowano i podano wymagania dotyczące

cementu supersiarczanowego i jego składników. Norma określa wymagania mechaniczne, fizyczne i chemiczne oraz kryteria zgodności.

- Norma PN-EN 14647 „Cement glinowo-wapniowy – Skład, wymagania i kryteria zgodności”, w której określono definicje i skład cementu glinowo-wapniowego. W normie podano wymagania dotyczące właściwości mechanicznych, fizycznych i chemicznych, jak również kryteria zgodności i zasady zgodności.

3.1.6. Europejskie i krajowe oceny techniczne

Europejskie i krajowe oceny techniczne (dawniej aprobaty) są dokumentami dobrowolnymi wydawanymi na wniosek producenta wyrobu budowlanego. Na podstawie tych dokumentów producent może wprowadzać wyrób do obrotu i znakować znakiem CE (Europejska Ocena Techniczna) lub znakiem budowlanym B (Krajowa Ocena Techniczna).

Podstawą do opracowania Europejskiej Oceny Technicznej (z ang. ETA) są Europejskie Dokumenty Oceny (z ang. EAD) odniesienia do których zostały opublikowane w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej.

Właściwości wyrobów budowlanych, w tym cementu, mogą być deklarowane na terenie europejskiego obszaru gospodarczego również na podstawie Europejskiej Oceny Technicznej (dawniej Europejskiej Aprobaty Technicznej).

Europejska Ocena Techniczna jest wydawana na wniosek producenta dla każdego wyrobu budowlanego nieobjętego lub nie w pełni objętego normą zharmonizowaną, którego właściwości użytkowe w odniesieniu do jego zasadniczych charakterystyk nie mogą być w pełni ocenione zgodnie z istniejącą normą zharmonizowaną, ponieważ między innymi:

- a) dany wyrób nie jest objęty zakresem żadnej istniejącej normy zharmonizowanej;
- b) w odniesieniu do co najmniej jednej zasadniczej charakterystyki tego wyrobu metoda oceny przewidziana w normie zharmonizowanej nie jest właściwa; lub
- c) norma zharmonizowana nie przewiduje żadnej metody oceny w odniesieniu do co najmniej jednej zasadniczej charakterystyki tego wyrobu.

Kwestię opracowywania i wydawania Europejskich Ocen Technicznych reguluje Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia

9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG.

Analogicznie, jak dla Europejskiej Oceny Technicznej, na terenie Rzeczypospolitej Polskiej właściwości wyrobu budowlanego mogą być deklarowane na podstawie Krajowej Oceny Technicznej (dawniej Krajowej Aprobataj Technicznej). Krajową ocenę techniczną wydaje się dla wyrobu budowlanego:

- a) nieobjętego zakresem przedmiotowym Polskiej Normy wyrobu, albo
- b) jeżeli w odniesieniu do co najmniej jednej zasadniczej charakterystyki wyrobu budowlanego metoda oceny przewidziana w Polskiej Normie wyrobu nie jest właściwa, albo
- c) jeżeli Polska Norma wyrobu nie przewiduje metody oceny w odniesieniu do co najmniej jednej zasadniczej charakterystyki wyrobu budowlanego.

Kwestię opracowywania i wydawania Krajowych Ocen Technicznych reguluje Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych (Dz.U. 2004 Nr 92 poz. 881) z późniejszymi zmianami.

3.1.6.1. Europejski Dokument Oceny EAD 150009-00-0301 „Cement żuźłowy CEM III/A z oceną odporności na siarczany (SR) i opcjonalnie niskiej zawartości efektywnych alkaliów (LA) i/lub niskim ciepłe hydratacji (LH)

Europejski Dokument Oceny nr EAD 150009-00-0301 definiuje i podaje wymagania dla właściwości specjalnych cementu hutniczego CEM III/A nie objętych zakresem normy PN-EN 197-1, tj. odporności na siarczany (SR) i/lub niskiej zawartości efektywnych alkaliów (LA). Cement równocześnie musi spełniać wszystkie wymagania normy PN-EN 197-1 dla cementów żuźłowych CEM III/A.

RODZAJE I SKŁAD

Europejska Dokument Oceny nr EAD 150009-00-0301 definiuje tylko jeden rodzaj cementu CEM III/A. W tabeli 3.17 podano wymagania odnośnie składu cementu wg EAD 150009-00-0301.

Tabela 3.17. Rodzaje i skład cementu o bardzo niskim cieple hydratacji

Rodzaj	Nazwa	Skład (% masy ^{a)})		
		Składniki główne		Składniki drugorzędne
		klinkier portlandzki	granulowany żużel wielkopiecowy ^{a)}	
		K	S	
CEM III/A	cement hutniczy	35÷50	45÷65	0÷5

a) zawiera ≥ 90% masy żużla zeszkłonego i (CaO+MgO)/SiO₂ ≥ 1,2

WYMAGANIA MECHANICZNE I FIZYCZNE

Wytrzymałość normowa

Wytrzymałość normowa cementu zgodnego z EAD 150009-00-0301 jest to wytrzymałość na ściskanie określana po 28 dniach dojrzewania, oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1, powinna spełniać wymagania zgodnie z tabelą 3.18.

Wytrzymałość wczesna

Wytrzymałość wczesna cementu zgodnego EAD 150009-00-0301 jest to wytrzymałość na ściskanie albo po 2 albo po 7 dniach, oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1, powinna spełniać wymagania zgodnie z tabelą 3.18.

Początek czasu wiązania

Początek czasu wiązania oznaczony zgodnie z PN-EN 196-3, powinien spełniać wymagania wg tabelą 3.18.

Stałość objętości

Rozszerzalność oznaczona zgodnie z PN-EN 196-3, powinna spełniać wymagania wg tabeli 3.18

Tabela 3.18. Właściwości mechaniczne i fizyczne cementów zgodnych z EAD 150009-00-0301

Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Początek czasu wiązania [min]	Stożność objętości [mm]
	po 2 dniach	po 7 dniach	po 28 dniach		
42,5 N	≥ 10,0	–	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	–			
52,5 L	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	≥ 45
52,5 N	≥ 20,0	–			
52,5 R	≥ 30,0	–			

WYMAGANIA CHEMICZNE

Wymagania Europejskiej Oceny Technicznej EAD 150009-00-0301 w zakresie właściwości chemicznych cementów podano w tabeli 3.19.

Tabela 3.19. Wymagania chemiczne dla cementów zgodnych z EAD 150009-00-0301

Właściwość	Metoda badania	Klasa wytrzymałości	Wymagania ^{a)} [%]
Strata prażenia	PN-EN 196-2	wszystkie	≤ 5,0
Pozostałość nierozpuszczalna	PN-EN 196-2	wszystkie	≤ 5,0
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	PN-EN 196-2	wszystkie	≤ 4,0
Zawartość chlorków	EN 196-2	wszystkie	≤ 0,10

a) Wymagania podano jako % masy gotowego cementu

ODPORNOŚĆ NA SIARCZANY (SR)

Odporność na siarczany określona po 90 i 180 dniach poprzez oznaczenie ekspansji i dynamicznego modułu sprężystości wg metodyki opisanej w EAD 150009-00-0301 Annex B dla beleczek normowych przechowywanych w roztworach Na₂SO₄ i w nasyconym roztworze Ca(OH)₂ w temp. 5°C i 20°C w porównaniu do cementów odniesienia (CEM I 42,5R i CEM III/B 42,5N-LH/SR) musi zostać zadeklarowana w procesie opracowywania europejskiej oceny technicznej.

ZAWARTOŚĆ EFEKTYWNYCH ALKALIÓW (LA)

Europejska Ocena Techniczna nr EAD 150009-00-0301 określa dodatkowo wymagania dla cementu CEM III/A o niskiej zawartości efektywnych alkaliów (LA), które podano w tabeli 3.20.

Tabela 3.20. Skład i wymagania dla CEM III/A o niskiej zawartości efektywnych alkaliów (LA)

Rodzaj cementu NA	Skład cementu - wymagania dodatkowe ^{a)}	Całkowita zawartość alkaliów wyrażona jako Na ₂ O _{eq} ^{b)}
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopieczowego S = 45÷49%	≤ 0,95%
	udział granulowanego żużla wielkopieczowego S ≥ 50%	≤ 1,10%
a) Wymagania podstawowe dotyczące składu wg PN-EN 197-1. b) Zawartość Na ₂ O _{eq} określana wg PN-EN 196-2.		

CIEPŁO HYDRATACJI

Europejska Ocena Techniczna nr EAD 150009-00-0301 określa dodatkowo wymagania dla cementu CEM III/A o niskim cieple hydratacji (oznaczenie LH), które podano w tabeli 3.8.

3.1.6.2. Europejski Dokument Oceny EAD 150001-00-0301 „Cement wapieniowo siarczanoglinianyowy”

Europejska Ocena Techniczna nr EAD 15001-00-0301 definiuje i podaje wymagania i właściwości dla cementu wapieniowo-siarczanoglinianowego.

SKŁADNIKI I SKŁAD

W skład cementu zgodnie z tabelą 3.21 wchodzi użytek wchodzą:

- **składniki główne** – materiały nieorganiczne takie jak klinkier wapieniowo siarczanoglinianyowy, cement portlandzki CEM I, cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II, siarczan wapnia oraz wapień, których udział przekracza 5,0% masy w stosunku do sumy masy wszystkich składników głównych i składników drugorzędnych,
- **składniki drugorzędne** – są materiały nieorganiczne pochodzące z produkcji klinkieru wapieniowo siarczanoglinianowego i/lub klinkieru portlandzkiego lub naturalne mineralne materiały nieorganiczne lub składniki drugorzędne wymienione w normie PN-EN 197-1,
- **dodatki** – składniki spełniające wymagania normy PN-EN 197-1

Składniki główne

- **Klinkier wapieniowo siarcznoglinianyowy** - materiał hydrauliczny składający się głównie z C₄A₃SO₃ lub C₄A₃\$ (Ye'elimit). Zawartość C₄A₃SO₃ nie powinna

być mniejsza niż 45%, a resztę stanowią krzemiany wapnia ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) oraz inne składniki. Wytwarzany jest przez spiekanie ściśle wyselekcjonowanego zestawu surowców zawierających: tlenek wapnia (CaO), dwutlenek krzemu (SiO_2), tlenek glinu (Al_2O_3), tlenek żelaza (Fe_2O_3), tlenek siarki (SO_3) i niewielkie ilości innych materiałów.

- **Cement portlandzki CEM I i cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II** spełniający wymagania normy PN-EN 197-1
- **Siarczan wapnia** - dodawany do innych składników podczas wytwarzania cementu. Pełni rolę regulatora czasu wiązania cementu. Siarczan wapnia może występować jako gips (dwuwodny siarczan wapnia, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), półhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) lub anhydryt (bezwodny siarczan wapnia, CaSO_4), bądź jako ich mieszanina. Gips i anhydryt występują jako materiały naturalne. Siarczan wapnia jest również dostępny jako produkt uboczny pewnych procesów przemysłowych, np. jako produkt odsiarczania spalin w energetyce (reagips).
- **Wapień - kamień wapienny (L, LL)**, powinien spełniać wymagania:
 - zawartość węgla wapnia $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ masy,
 - zawartość gliny (iłów), oznaczona metodą adsorpcji błękitu metylowego wg normy PN-EN 933-9, nie powinna przekraczać 1,2g/100g wapienia,
 - stopień rozdrobnienia wapienia do badań powinien wynosić ok. 5000cm²/g wg Blaine'a,
 - całkowita zawartość węgla organicznego (TOC) powinna spełniać jedno z kryteriów:
 - LL : nie powinna przekraczać 0,20% masy,
 - L : nie powinna przekraczać 0,50% masy.

Tabela 3.21. Skład cementu wg EAD 150001-00-0301

Skład (% masy ^{a)})				
Składniki główne				Składniki drugorzędne
Klinkier wapieniowo siarczognielinowy	Cement portlandzki CEM I lub portlandzki wieloskładnikowy CEM II	Siarczan wapnia	Wapień	
20÷90	0÷80	0÷30	0÷30	0÷5
a) Wartości odnoszą się do sumy składników głównych i składników drugorzędnych				

WYMAGANIA MECHANICZNE I FIZYCZNE

Wytrzymałość normowa

Wytrzymałość normowa cementu zgodnego EAD 150001-00-0301 jest to wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1, powinna spełniać wymagania zgodnie z tabelą 3.22.

Wytrzymałość wczesna

Wytrzymałość wczesna cementu zgodnego EAD 150001-00-0301 jest to wytrzymałość na ściskanie określona w przedziale od 1 do 24 godzin, oznaczona zgodnie z PN-EN 196-1. Producent deklaruje wytrzymałość wczesną cementu oraz czas po którym została osiągnięta.

Początek czasu wiązania

Początek czasu wiązania oznaczony zgodnie z PN-EN 196-3, powinien zostać zadeklarowany przez producenta. Dopuszcza się zmianę wartości współczynnika wodno-cementowego przy oznaczaniu czasu wiązania, wówczas producent musi zadeklarować nową wartość.

Staość objętości

Cement wapieniowo siarczognielinowy zgodny z EAD 150001-00-0301 powinien charakteryzować się stałością objętości. Warunek ten jest spełniony, jeżeli zmiany objętości są mniejsze niż $\leq 10\text{mm}$ (tabela 3.22).

Powierzchnia właściwa i gęstość

Powierzchnia właściwa i gęstość określona zgodnie z PN-EN 196-6, wartości należy zadeklarować.

Skurcz

Wielkość skurczu określonego zgodnie procedurą opisaną w NF P 15-433 należy deklарować.

Tabela 3.22. Właściwości mechaniczne i fizyczne cementu wapniowo siarczogninianowego

Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		Początek czasu wiązania ²⁾ [min]	Stałość objętości ²⁾ [mm]	
	po czasie $t \leq t \leq 24h$	po 28 dniach			
32,5	Wartość deklarowana wraz czasem t	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	Wartość deklarowana	≤ 10
42,5		$\geq 42,5$	$\leq 62,5$		
52,5		$\geq 52,5$	–		

1) Ze względu na bardzo krótki czas wiązania dopuszcza się stosowanie domieszki opóźniającej w takim przypadku należy podać jej rodzaj i zastosowaną ilość
2) dopuszcza się zmianę współczynnika w/c, należy podać jego wartość

WYMAGANIA CHEMICZNE

Wymagania w zakresie właściwości chemicznych cementów zgodnych z dokumentem EAD 150001-00-0301 podano tabeli 3.23.

Tabela 3. 23. Wymagania chemiczne dla cementów wapniowo siarczogninianowych

Właściwość	Metoda badania	Klasa wytrzymałości	Wymagania [%]
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	PN-EN 196-2	wszystkie	>4,0
Zawartość chlorków			$\leq 0,10$

3.2. Właściwości cementów Górażdże Cement S.A.

Wymagania względem właściwości cementów powszechnego użytku określone są w normach PN-EN 197-1 i PN-EN 197-5. W zakresie normy określone są właściwości, jakimi powinny charakteryzować się cementy, tj. wymagania fizyczne, mechaniczne i chemiczne, jak również niezbędne wymagania dotyczące składu i trwałości.

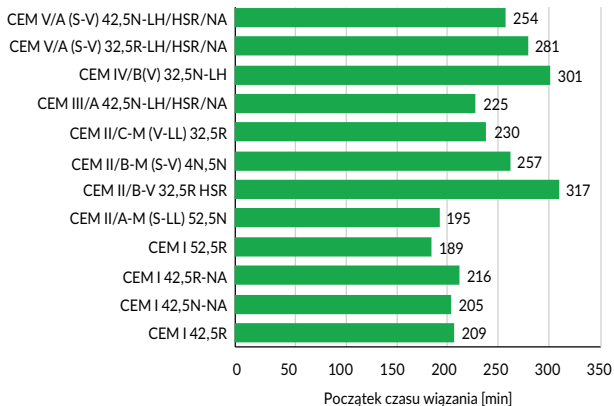
3.2.1. Czas wiązania

Cement powinien charakteryzować się określonym początkiem czasu wiązania. Biorąc pod uwagę skład i właściwości fizyko-mechaniczne cementu, a także warunki dojrzewania można zauważyć pewne prawidłowości:

- cementy zawierające nieklinkierowe składniki główne (CEM II ÷ CEM VI) charakteryzują się wydłużonym czasem wiązania w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I,
- cementy wyższych klas wytrzymałości charakteryzują się krótszym czasem początku wiązania,
- obniżona temperatura zewnętrzna powoduje wydłużenie czasu wiązania, przy czym stosowanie cementów CEM II÷CEM VI zwiększa ten efekt,
- wyższy współczynnik w/c skutkuje wydłużeniem czasu wiązania cementu.

Wyniki badań przedstawione na rys. 3.1 potwierdzają przedstawione zależności. W okresie letnim (wysokie temperatury) w miejsce cementów portlandzkich CEM I zaleca się stosowanie cementów CEM II÷CEM V w tej samej klasie wytrzymałości. Jakość betonu nie ulegnie zmianie, natomiast w dłuższym okresie czasu zachowane zostaną właściwości reologiczne (konsystencja, urabialność) mieszanki betonowej.

Informacja o czasie wiązania cementu jest bardzo ważna z praktycznego punktu widzenia. Zazwyczaj betony zawierające cementy o wydłużonym czasie wiązania zachowują urabialność w dłuższym okresie, co jest istotne, kiedy beton musi być dostarczany na większe odległości lub prace budowlane prowadzone są w okresie podwyższonych temperatur (w okresie letnim).



Rys. 3.1. Początek czasu wiązania cementów Górażdże Cement S.A

3.2.2. Ciepło hydratacji

Reakcja cementu z wodą ma charakter egzotermiczny, tzn. przebiega z wydzielaniem ciepła, które podnosi temperaturę betonu. Ilość wydzielanego ciepła zależy od:

- składu mineralnego klinkieru portlandzkiego,
- ilości i rodzaju pozostałych składników,
- stopnia rozdrobnienia cementu (powierzchni właściwej),
- klasy wytrzymałości cementu.

Największy wpływ na ilość wydzielanego ciepła ma ilość oraz skład mineralny klinkieru portlandzkiego w cemencie. Klinkier portlandzki składa się z 4 podstawowych faz (tabela 3.24):

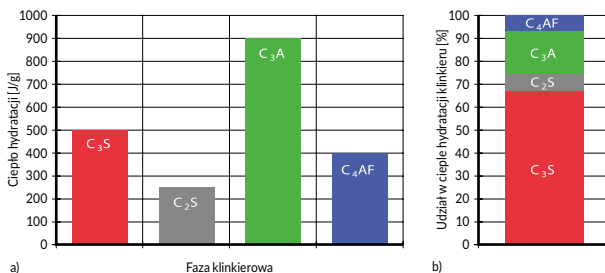
- alitu - krzemianu trójwapniowego (C_3S),
- belitu - krzemianu dwuwapniowego (C_2S),
- glinianu trójwapniowego (C_3A),
- fazy glinożelazianowej (C_4AF).

Tabela 3. 24. Charakterystyka głównych faz klinkieru portlandzkiego

Nazwa	Wzór chemiczny	Zapis uproszczony	Ciepło hydratacji [J/g]	Średni udział w składzie klinkieru [%]
Krzemian trójwapniowy (Alit)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	500	65
Krzemian dwuwapniowy (Belit)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	250	14
Glinian trójwapniowy	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	900	10
Faza glikożelazianowa (Brownmilleryt)	$\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5$	C_4AF	400	8

Na rys. 3.2 przedstawiono ilość wydzielanego ciepła podczas hydratacji poszczególnych faz klinkierowych. Najwyższym ciepłem hydratacji spośród faz klinkierowych charakteryzuje się glinian trójwapniowy (C_3A). Z uwagi na średni skład mineralny klinkieru, największy wpływ na sumaryczną ilość wydzielanego ciepła ma faza C_3S (krzemian trójwapniowy - alit), którego udział w składzie klinkieru jest największy (tabela 3.24, rys. 3.2)

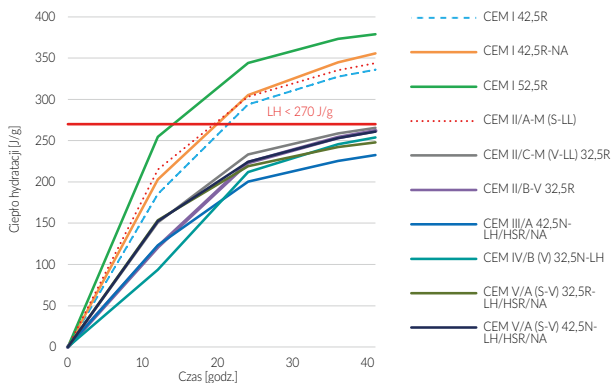
Ilość wydzielanego ciepła w procesach wiązania i twardnienia cementu przekłada się na przyrost wytrzymałości, szczególnie w początkowym okresie. Orientacyjne ilości wydzielonego ciepła, dla cementów w poszczególnych klasach wytrzymałości, podano w tabeli 3.25 i przedstawiono na rys. 3.3.



Rys. 3.2. Ciepło hydratacji faz klinkierowych (a) oraz ich udział w całkowitym cieple hydratacji klinkieru portlandzkiego (b)

Tabela 3.25. Ciepło hydratacji cementu

Klasa wytrzymałości cementu	Tempo wydzielania ciepła i narastania wytrzymałości	Ciepło twardnienia cementu [J/g] oznaczone w temperaturze 18-21°C po upływie dni			
		1	3	7	28
32,5N	powolne	60-175	125-250	150-300	200 - 375
32,5R 42,5N	normalne	125-200	200 - 335	275 - 375	300-425
42,5R 52,5N 52,5R	szybkie	200 - 275	300-350	325 - 375	375-425



Rys. 3.3. Ciepło hydratacji cementów Górażdże Cement S.A.

Znajomość efektów cieplnych związanych z procesem hydratacji cementu jest niezwykle istotna w przypadku wykonywania betonowych elementów masowych, np. w budownictwie hydrotechnicznym, oczyszczalniach ścieków, przy budowie fundamentów, podpór mostów, itp. Powstanie dużych różnic temperatur pomiędzy powierzchnią elementu betonowego a jego wnętrzem, może skutkować wystąpieniem naprężeń termicznych w konsekwencji prowadzących do spękań. Przyjmuje się, że dopuszczalna różnica temperatury na odległości 1 m w elemencie betonowym, nie powinna przekraczać 20°C.

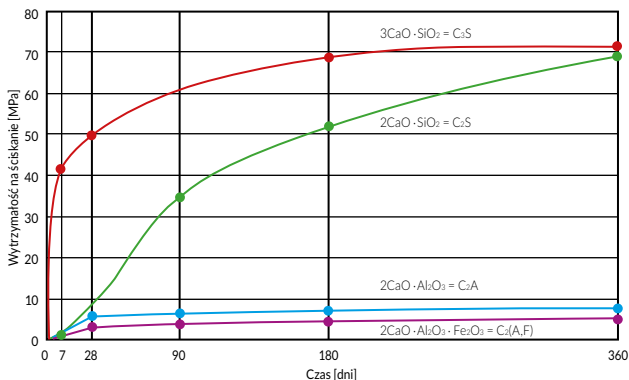
Stosowanie cementów o niskim ciepłe hydratacji (LH) lub o bardzo niskim

cieple hydratacji (VLH) minimalizuje ryzyko powstania naprężeń termicznych w betonie. Wymagania dla cementów LH oraz dla cementów VLH przedstawiono w rozdziale 3.1

3.2.3. Wytrzymałość na ściskanie

Na proces wiązania i twardnienia cementu składają się z równoległe przebiegające procesy chemiczne i fizyczne. Do podstawowych czynników wpływających na szybkość tych reakcji należą: skład mineralny klinkieru, zawartość i rodzaj regulatora czasu wiązania, rozdrobnienie cementu, ilość i rodzaj składników nieklinkierowych w cemencie, a także współczynnik w/c i temperatura.

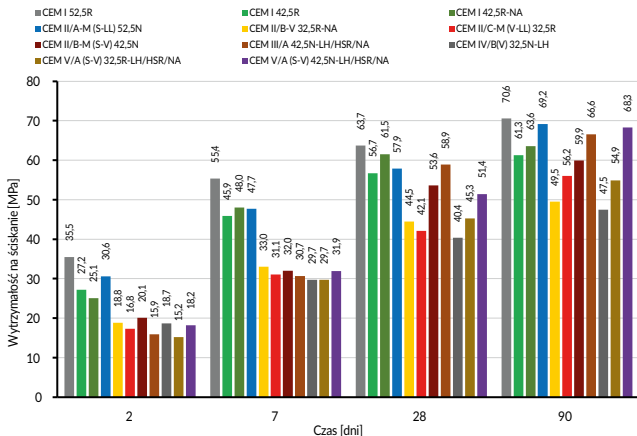
Szybkość reakcji hydratacji cementu, a w efekcie przyrost wytrzymałości, jest silnie związany ze składem fazowym klinkieru. Największy wpływ na wytrzymałość cementu ma zawartość krzemianów wapnia (rys. 3.4).



Rys. 3. 4. Rozwój w czasie wytrzymałości na ściskanie faz klinkierowych

Dynamika narastania wytrzymałości cementu w okresie początkowym ma wpływ na przebieg realizacji robót budowlanych i produkcji elementów prefabrykowanych (możliwość szybszego rozformowania elementów, zwiększenie rotacji form, wytrzymałość transportową oraz wytrzymałość normową). Najwyższą wytrzymałością wczesną na ściskanie, charakteryzują się cementy portlandzkie

CEM I oraz cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A, np. cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N (rys. 3.5). Z kolei cementy z wyższą zawartością składników nieklinkierowych (CEM II/B÷CEM V/A,B) charakteryzują się niższą wytrzymałością wczesną, której poziom zależy od udziału poszczególnych składników oraz klasy wytrzymałości cementu (cementy klas wytrzymałości 42,5 i 52,5 charakteryzują się wyższą wytrzymałością początkową).



Rys. 3. 5. Wytrzymałość na ściskanie cementów Górażdże Cement S.A.

W późniejszych okresach twardnienia (28, 90 dni) cementy CEM II÷CEM V, szczególnie z żużlem wielkopiecowym (S) i popiołem lotnym (V), charakteryzują się wyższą wytrzymałością niż cement portlandzki tej samej klasy wytrzymałości (rys. 3.5).

Dalszy przyrost wytrzymałości cementów CEM II÷CEM V, obserwowany jest nawet po wielu latach (tabela 3.26). Z tego względu badanie właściwości trwałościowych betonu z cementów CEM II ÷ CEM V (nasiąkliwość, penetracja wody pod ciśnieniem, mrozoodporność, odporność na agresję chemiczną) należy wykonywać po 56 lub 90 dniach, w tzw. czasie równoważnym (tabela 3.27) co znalazło odzwierciedlenie w zapisach normy PN-B-06265.

Tabela 3.26. Wytrzymałość betonu z cementu hutniczego CEM III

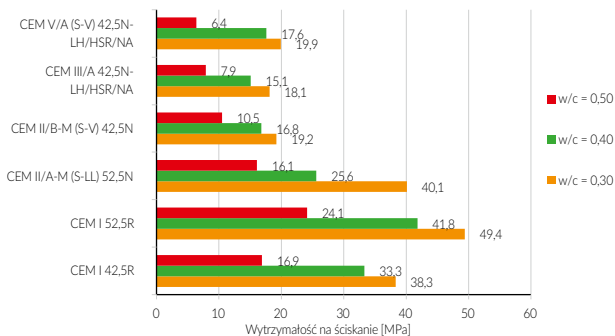
Obiekt	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Wiek betonu [lata]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Przyrost wytrzymałości [%]
Oczyszczalnia	41	18	59	44
Wieża chłodnicza	40	19	61	53
Zapora wodna	40	23	80	100
Śluza	29	25	54	86
Śluza odwadniająca	30	25	55	83

Tabela 3.27. Czas równoważny

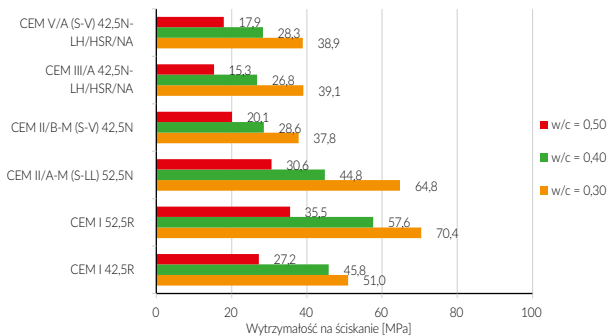
Rodzaj cementu	Czas równoważny [dni]
CEM I (R), CEM II/A (R)	28
CEM I (N) CEM II/A (N) CEM II/B (N,R) CEM IV/A	56
CEM II/C-M CEM III CEM IV/B CEM V CEM VI VLH III, VLH IV, VLH V	90

3.2.4. Wpływ współczynnika w/c na wytrzymałość na ściskanie

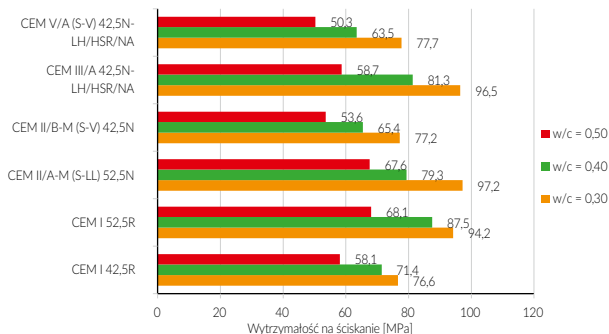
Istotnym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej jest wielkość współczynnika wodno-cementowego (w/c). Na rys. 3.6 ÷ 3.8 pokazano wpływ w/c na wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych po 1, 2 i 28 dniach dojrzewania. Przy niskim współczynniku w/c, dla zapewnienia odpowiedniej konsystencji zaprawy konieczne jest stosowanie domieszek uplastyczniających i uptynniających.



Rys. 3.6. Wpływ w/c na wytrzymałość zapraw cementowych po 1 dniu twardnienia

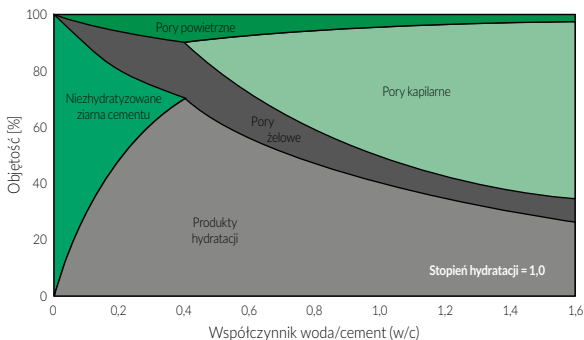


Rys. 3.7. Wpływ w/c na wytrzymałość zapraw cementowych po 2 dniach twardnienia



Rys. 3. 8. Wpływ w/c na wytrzymałość zapraw cementowych po 28 dniach twardnienia

Wzrost wytrzymałości zaprawy cementowej w wyniku obniżenia współczynnika w/c związany jest ze zwiększeniem gęstości i zmniejszeniem porowatości (zwłaszcza kapilarnej) matrycy cementowej (rys. 3.9). Mniejsza porowatość zaczynu cementowego, skutkuje również zmniejszeniem wnikania/dyfuzji czynników korozyjnych, co przekłada się na wyższą trwałość kompozytów cementowych.



Rys. 3.9. Wpływ w/c na strukturę matrycy cementowej

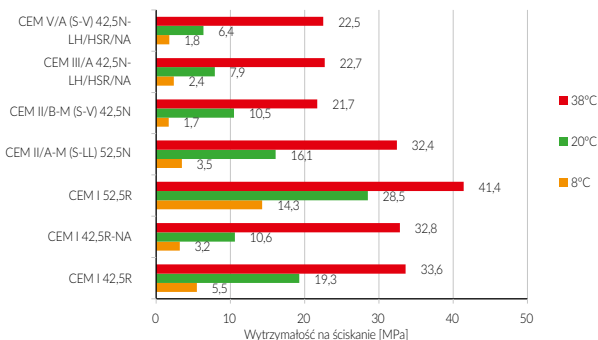
3.2.5. Wpływ temperatury na szybkość przyrostu wytrzymałości na ściskanie cementu

Zachowanie właściwości mieszanki betonowej w czasie oraz właściwości stwardniałego betonu w konstrukcji są w znacznym stopniu zależne od temperatury. Laboratoryjne badania cech wytrzymałościowych zapraw normowych i betonów przeprowadza się w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Jednak w praktyce budowlanej betony wykonywane są w różnych temperaturach w zależności od pory roku, ważna jest zatem świadomość podstawowych zależności:

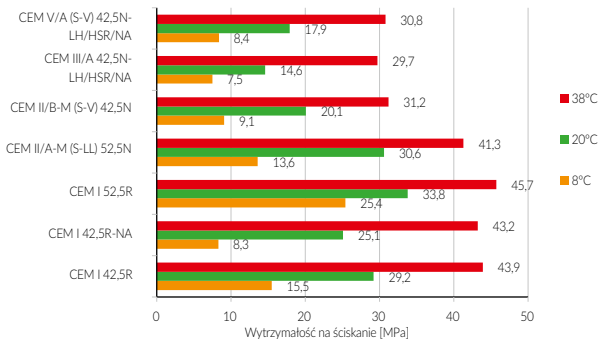
- podwyższona temperatura otoczenia skutkuje szybszym przyrostem wytrzymałości zapraw i betonów, skróceniem czasu wiązania cementu, ale też szybszym odparowaniem wody z powierzchni betonu,
- obniżona temperatura otoczenia skutkuje spowolnieniem przyrostu wytrzymałości oraz wydłużeniem czasu wiązania cementu,
- zwiększeniem tendencji do osiadania mieszanki i zjawiska odsączenia wody (bleedingu),
- w niskich temperaturach możliwe jest zamarzanie wody zarobowej, a w efekcie nawet uszkodzenie / destrukcja struktury betonu.

Oprócz odpowiedniego doboru rodzaju cementu do wykonywania betonu w określonych warunkach temperaturowych niezbędna jest przede wszystkim właściwa pielęgnacja betonu.

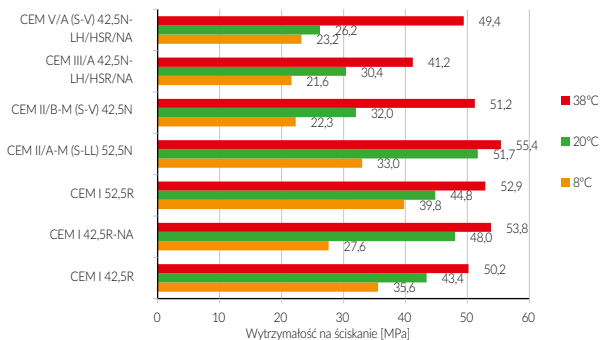
Na rys. 3.10÷3.15 przedstawiono wpływ temperatury dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie zapraw normowych wykonanych z cementów z oferty Górażdże Cement S.A.



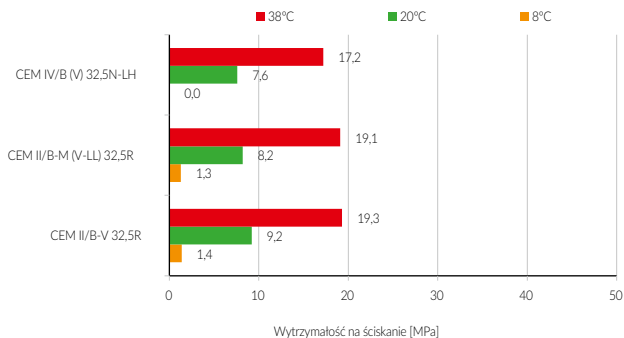
Rys. 3.10. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów klasy 42,5 i 52,5 po 1 dniu twardnienia



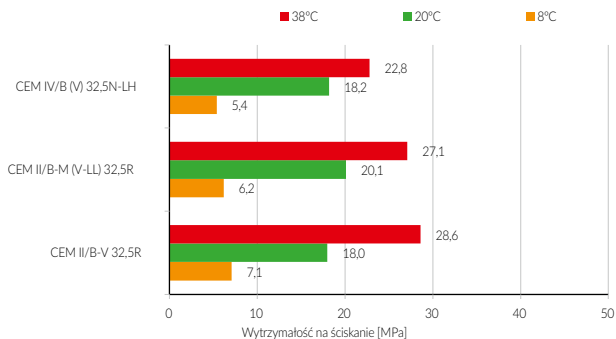
Rys. 3.11. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów klasy 42,5 i 52,5 po 2 dniach twardnienia



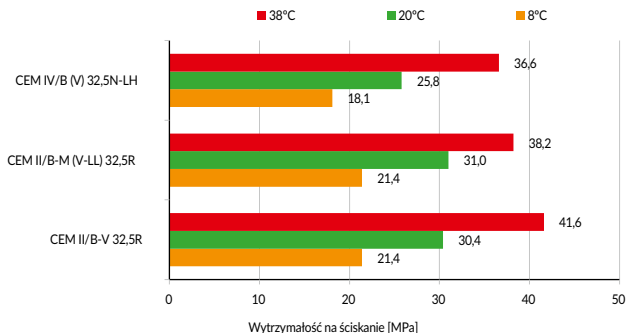
Rys. 3.12. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów klasy 42,5 i 52,5 po 7 dniach twardnienia



Rys. 3.13. Wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów klasy 32,5 po 1 dniu twardnienia w różnych temperaturach



Rys. 3.14. Wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów klasy 32,5 po 2 dniach twardnienia w różnych temperaturach

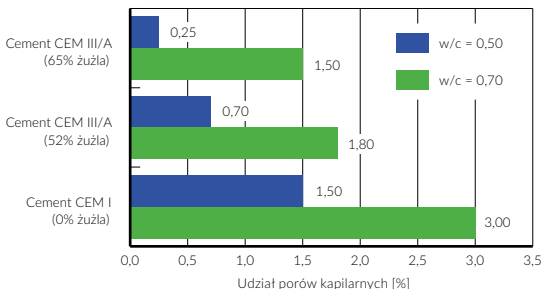


Rys. 3.15. Wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów klasy 32,5 po 7 dniach twardnienia w różnych temperaturach

3.2.6. Odporność na agresję chemiczną

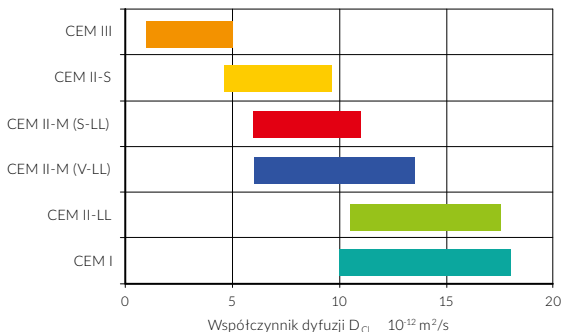
O odporności kompozytów cementowych (zaczynów, zapraw, betonów) na korozyjne oddziaływanie środowiska decyduje wiele złożonych czynników, przy czym szczególną uwagę należy zwrócić na: gęstość, strukturę porowatości oraz przepuszczalność matrycy cementowej. Podwyższoną odpornością na agresję chemiczną w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I, charakteryzują się kompozyty z cementów zawierających nieklinkierowe składniki główne (CEM II ÷ CEM V). Decydują o tym przede wszystkim następujące czynniki:

- zmiana mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego w wyniku aktywności pucolanowej i/lub hydraulicznej składnika nieklinkierowego (granulowanego żużla wielkopiecowego, popiołu lotnego),
- doszczelnienie struktury przez najdrobniejsze ziarna, np. cząstki popiołu lotnego (tzw. efekt pyłowy),
- ograniczenie w składzie cementu zawartości faz klinkierowych podatnych na korozję, tj. glinianu trójwapieniowego C_3A , co wiąże się ze zmniejszeniem udziału klinkieru w składzie cementu,
- zmniejszenie zawartości wodorotlenku wapnia $Ca(OH)_2$ w stwardniałej matrycy, na rzecz zwiększonego udziału żelowej fazy C-S-H o niskim stosunku C/S. Zwiększona szczelność betonu, w którym zmniejszeniu ulega przede wszystkim porowatość kapilarna zaczynu (rys. 3.16), skutkuje utrudnieniem dyfuzji jonów agresywnych w głąb struktury.



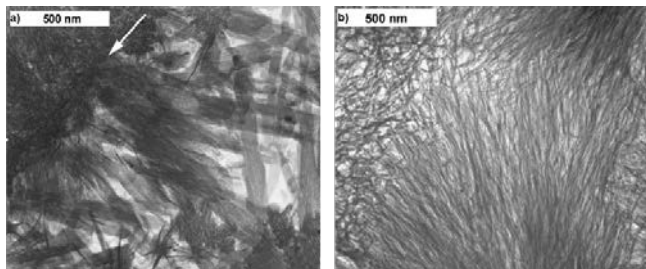
Rys. 3.16. Udział porów kapilarnych w 12-letnim betonie z cementu o różnej zawartości granulowanego żużla wielkopieczowego

Na rys. 3.17 przedstawiono współczynniki dyfuzji jonów chlorkowych w betonach wykonanych z użyciem różnych rodzajów cementów. W porównaniu z cementem portlandzkim CEM I, cementy zawierające składniki nieklinkierowe (granulowany żużel wielkopieczowy S, popiół lotny V, kamień wapienny LL) charakteryzują się niższą przepuszczalnością chlorków.

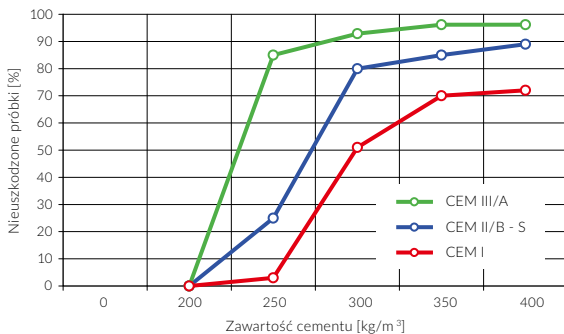


Rys. 3.17. Wpływ cementu na współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych w betonach po 28 dniach twardnienia w wodzie (w/c=0,5; zawartość cementu - 320 kg/m³)

Stosowanie cementów zawierających nieklinkierowe składniki główne (granolowany żużel wielkopiecowy, popiół lotny) i wynikająca z tego faktu wysoka szczelność betonu (rys. 3.18), zapewnia trwałość konstrukcji betonowych eksploatowanych w środowiskach korozyjnych: siarczanowych, magnezjowych, chlorkowych, wodach bogatych w agresywny CO₂, soli amonowych, kwasów nieorganicznych i organicznych, wodach morskich (rys. 3.19), kopalnianych, itp.



Rys. 3.18. Struktura matrycy cementowej (w/c = 0,5) a) cement portlandzki CEM I po 8 latach, b) cement hutniczy CEM III/B po 1 roku



Rys. 3.19. Wpływ rodzaju cementu na odporność betonu w środowisku sztucznej wody morskiej

Wymagania w zakresie właściwości i składu dla cementu odpornego na siarczany SR wg PN-EN 197-1 lub HSR wg PN-B-19707 oraz cementu o niskiej zawartości aktywnych alkaliów NA wg PN-B-19707 opisują przedmiotowe normy (patrz rozdział 3.1).

3.2.6.1. Cement odporny na siarczany (SR/HSR)

Cementy odporne na siarczany (SR/HSR) zalecane są do stosowania w betonie, narażonym na oddziaływanie w okresie eksploatacji agresywnego środowiska siarczanowego, tzn. gdy obecność siarczanów w glebie lub wodzie gruntowej wskazuje na klasę ekspozycji XA2 lub XA3 (tabela 3.28).

Tabela 3.28. Agresja chemiczna według PN-EN 206

Oznaczenie klasy ekspozycji	Opis środowiska Przykłady występowania klas ekspozycji	Wartości graniczne składu betonu			
		Maks. w/c ¹⁾	Min. zawartość cementu ¹⁾	Min. klasa wytrzymałości betonu	Inne wymagania
Agresja chemiczna XA²⁾					
XA1	Słaba agresja chemiczna Fundamenty narażone na wpływ wód gruntowych Podpory mostowe w nurtach rzek	0,55	300 kg/m ³	C30/37	–
XA2	Umiarkowana agresja chemiczna Rury i studnie kanalizacyjne, nawierzchnie stacji paliw	0,50	320 kg/m ³	C30/37	Cementy odporne na siarczany SR/HSR ³⁾
XA3	Silna agresja chemiczna Kolektory sieci kanalizacyjnej, osadniki w oczyszczalniach ścieków	0,45	360 kg/m ³	C35/45	
<p>1) W przypadku stosowania koncepcji współczynnika k maksymalny współczynnik w/c oraz minimalną zawartość cementu modyfikuje się zgodnie z PN-EN 206 p 5.2.5.2</p> <p>2) Środowisko agresywne chemicznie należy kwalifikować do odpowiedniej klasy ekspozycji (XA1 do XA3) na podstawie wartości granicznych podanych w tabeli 3.29. W przypadku, gdy zawartość siarczanów (SO₄²⁻) w środowisku pracy betonu wskazuje na klasy ekspozycji XA2 lub XA3 należy stosować cement odporny na siarczany SR zgodny z EN 197-1 lub HSR zgodny z PN-B-19707</p>					

Tabela 3.29. Wartości graniczne dla klas ekspozycji dotyczących agresji chemicznej XA

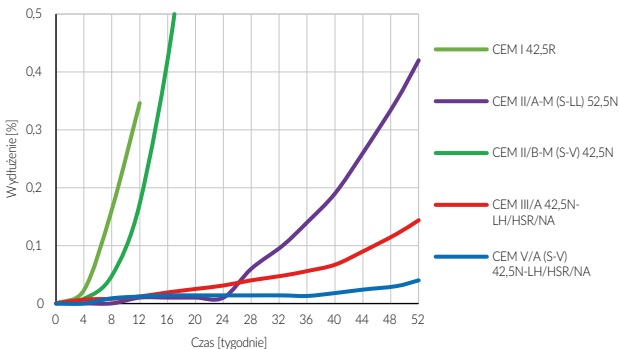
Właściwość chemiczna	Metoda badawcza	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥ 200 i ≤ 600	> 600 i ≤ 3000	> 3000 i ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 i ≥ 5,5	< 5,5 i ≥ 4,5	< 4,5 i ≥ 4,0
CO ₂ mg/l agresywne	prEN 13577	≥ 15 i ≤ 40	> 40 i ≤ 100	> 100 aż do nasycenia
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 / ISO 7150-2	≥ 15 i ≤ 30	> 30 i ≤ 60	> 60 i ≤ 100
Mg ₂ ⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 300 i ≤ 1000	> 1000 i ≤ 3000	> 3000 aż do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ mg/l ¹⁾ całkowite	EN 196-2 ²⁾	≥ 200 i ≤ 3000 ³⁾	> 3000 i ≤ 12000 ³⁾	> 12000 i ≤ 24000
Kwasowość ml/kg	prEN 16502	> 200 Baumann Gully	niespotykane w praktyce	
1) Grunty gliniaste o przepuszczalności ≤ 10 ⁻⁵ m/s mogą być przesunięte do niższej klasy. 2) Metoda badawcza poleca ekstrakcję SO ₄ ²⁻ kwasem solnym, alternatywnie można wykonywać to wodą, jeżeli są odpowiednie doświadczenia w rejonie, w którym beton jest stosowany. 3) Granicę 3000mg/kg należy obniżyć do 2000mg/kg, gdy jest niebezpieczeństwo kumulowania się jonów siarczanowych w betonie w wyniku cyklicznego schnięcia i nawilżania lub podciągania kapilarnego				

Warto zwrócić uwagę, iż w tabeli 3.29 nie ma żadnych zapisów dotyczących korozji chlorkowej. Natomiast bardzo często specyfikujący, zwłaszcza w przypadku obiektów w inżynierii komunikacyjnej (mostów, wiaduktów) i betonowych nawierzchni drogowych, zalecają stosowanie w klasie ekspozycji XD3 (korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej, np. ze środków odladzających) cementu portlandzkiego CEM I odpornego na siarczany SR3 lub SR5. Niestety nie uzasadniają merytorycznie wyboru cementu odpornego na siarczany SR do betonu narażonego na działanie chlorków (środki odladzające do zimowego utrzymania dróg to głównie NaCl i CaCl₂).

Stosowanie cementów odpornych na siarczany (SR lub HSR) wiąże się z ograniczeniem zawartości glinianu trójwapniowego C₃A. Chlorki wykazują znacznie mniejszą wymywalność z zaczynów o dużej zawartości C₃A, gdyż jony chlorowe łączą się z glinianami wapniowymi tworząc sól Friedela wg reakcji:

Chlorki (NaCl, CaCl₂) + C₃A = C₃A·CaCl₂·10H₂O (sól Friedela)

Zawartość chlorków w cemencie wg PN-EN 197-1 nie powinna przekraczać 0,10%, ograniczenie to wynika z konieczności zachowania warunków pasywacji stali zbrojeniowej.



Rys. 3.20. Odporność na korozję siarczanową zapraw z wybranych cementów

Na rys. 3.20 pokazano wyniki badań odporności cementów na agresję siarczanową prowadzonych w roztworze siarczanu sodu o stężeniu SO_4^{2-} ($16,0 \pm 0,5$ g/l), zgodnie z metodyką badań zawartą w normie PN-B-19707.



Rys. 3.21. Beleczki z zaprawy z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R po 52 tygodniach przebywania w roztworze Na_2SO_4 (liczne rysy i spękania)

Zaprawa wykonana z cementu CEM I uległa destrukcji po 12 tygodniach przebywania w środowisku korozyjnym (rys. 3.20, 3.21), w przypadku zaprawy z cementów CEM II/A-M (S-LL) 52,5N i CEM II/B-M (S-V) 42,5N stwierdzono nadmierną ekspansję (znacznemu wydłużeniu w odniesieniu do kryterium normowego $\Delta l_{\max}=0,5\%$). Zaprawy wykonane z cementów odpornych na siarczany (HSR wg PN-B-19707) wykazały bardzo niewielkie zmiany długości, nawet po 52 tygodniach przebywania w środowisku korozyjnym (rys. 3.22).



Rys. 3.22. Beleczyki z zapraw z cementu CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA po 52 tygodniach przebywania w roztworze Na_2SO_4

3.2.6.2. Cement o niskiej zawartości alkaliów (NA)

Alkalia (jony sodu Na^+ i potasu K^+) obecne w roztworze porowym betonu, których głównym źródłem jest cement, ale też woda zarobowa, domieszki chemiczne, dodatki do betonu, mogą wchodzić w reakcję z reaktywnymi formami krzemionki, występującymi w kruszywie, jak np. opal, chalcedon, czy trydymit. W wyniku przebiegu reakcji alkalia-krzemionka (ASR), mogą powstać ekspansywne produkty, które w skrajnych przypadkach prowadzą do zniszczenia betonu (patrz rozdział 5.2). Reakcję ASR można opisać jako proces dwuetapowy:

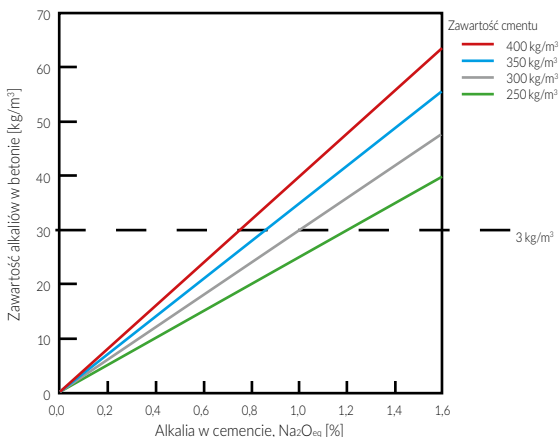
- alkalia + reaktywna krzemionka \rightarrow żel alkaliczno-krzemionkowy,
- żel alkaliczno-krzemionkowy + wilgoć \rightarrow zwiększanie objętości (pęcznienie).

Przebieg reakcji alkalia-krzemionka (ASR) jest bardzo powolny, a jej negatywne następstwa mogą się ujawnić dopiero po kilku latach. Szybkość przebiegu tej reakcji zależy od wielu czynników, do których można zaliczyć, m.in.: ilość reaktywnej krzemionki i jej rozdrobnienie, stężenie jonów sodu i potasu w fazie ciekłej w porach betonu, itp.

Jednym ze sposobów na ograniczenie możliwości wystąpienia tego negatyw-

tego zjawiska jest stosowanie cementów specjalnych niskoalkalicznych NA, w których zawartość alkaliów aktywnych (w przeliczeniu na ekwiwalent alkaliczny $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$) jest ograniczona wymaganiami normy PN-B-19707 (tabela 3.30). Należy zwrócić uwagę, że podane w tabeli 3.30 wymagania dotyczące maksymalnej zawartości alkaliów w cementach CEM II÷CEM V w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ są wynikiem dużej zawartości związków sodu i potasu szczególnie w popiołach lotnych krzemionkowych i granulowanym żużlu wielkopiecowym. Jednakże bardzo mała wymywalność alkaliów, zarówno z popiołów lotnych, jak i granulowanego żużla wielkopiecowego, gwarantuje, że zawartość alkaliów czynnych (dostępnych w porach betonu do przebiegu reakcji reaktywne kruszywo - alkalia) w każdym cemencie niskoalkalicznym NA popiołowo-żużlowym jest poniżej $\leq 0,6\%$ (tabela 3.30), co umożliwi projektowanie i wykonywanie konstrukcji odpornych na korozję alkaliczną w betonie.

W wytycznych niektórych krajów europejskich (Wielka Brytania, Belgia, Holandia) dopuszczalna zawartość aktywnych alkaliów odnosi się do betonu, powinna spełniać wymaganie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} < 3,0 \text{ kg}/1\text{m}^3$ betonu (rys. 3.23). Spełnienie tego wymagania zapewnia trwałość, nawet jeżeli w składzie betonu zastosowano kruszywo reaktywne.



Rys. 3.23. Zawartość alkaliów w 1m^3 betonu, w zależności od zawartości cementu w betonie i alkaliów w cemencie

Tabela 3. 30. Cementy niskoalkaliczne NA wg PN-B 19707 oraz zawartość alkaliów aktywnych

Rodzaj cementu NA	Skład cementu - wymagania dodatkowe ^{a)}	Zawartość alkaliów jako Na ₂ O ^{b)} [% masy]	Alkalia aktywne ^{d)} Na ₂ O [% masy]
CEM I CEM II/A-LL	–	<0,60	0,30-0,47
CEM II/A-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} V > 14%	<1,20	0,51
CEM II/A-S	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S > 14%	<0,70	0,48
CEM II/A-M (S-V)	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) > 14%	<1,20	0,47
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} V > 25%	<1,50	0,52
CEM II/B-S	–	<0,80	0,48
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} V > 20%	<1,30	0,51
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S < 49%	<0,95	0,28
CEM III/B CEM III/C	udział granulowanego żużla wielkopiecowego S > 50%	<1,10	0,34
CEM IV/A (V)	–	<2,00	0,18-0,25
CEM IV/B (V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} V > 25%	<1,50	0,48
CEM V/A (S-V)	–	<2,00	0,36
	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) < 49%	<1,60	0,28
	udział sumy popiołu lotnego krzemionkowego ^{d)} i granulowanego żużla wielkopiecowego (S+V) > 50%	<2,00	0,16
CEM V/B (S-V)	–	<2,00	0,16-0,21

a) Wymagania podstawowe dotyczące składu wg PN-EN 197-1
b) Zawartość Na₂O_{eq} określana wg PN-EN 196-2
c) Popiół lotny krzemionkowy (V) powinien spełniać wymagania zawarte w PN-EN 197-1, dodatkowo strata prażenia nie może przekraczać 5,0% masy, oznaczana zgodnie z PN-EN 196-2, przy czasie prażenia wynoszącym 1 h wg ASTM C 114-04

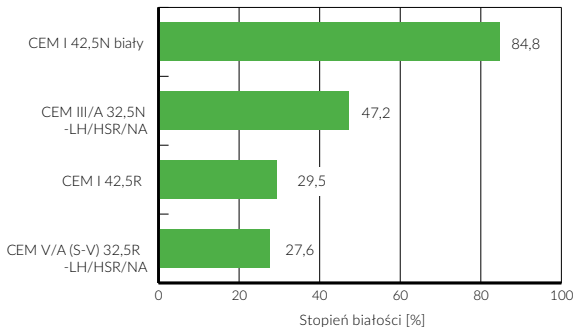
3.2.7. Barwa cementu

Barwa nie jest właściwością normową cementów powszechnego użytku. Wymagania co do barwy stawiane są tylko cementom białym, dla których określa się stopień białości wg PN-B-30010.

Barwa cementu zależy od wielu czynników: rodzaju użytych surowców w produkcji klinkieru cementowego, technologii produkcji cementu, zastosowanych dodatków mineralnych i stopnia zmielenia cementu (powierzchni właściwej). Cementy zawierające dodatek popiołu lotnego zazwyczaj posiadają barwę ciemną, która jest efektem obecności niespalonego węgla w składzie popiołu. Z kolei barwa jasna jest charakterystyczna dla cementów z wysoką zawartością granulowanego żużla wielopieczowego np. cement hutniczy CEM III/A (rys. 3.24). Stopień rozdrobnienia również wpływa na barwę cementu - im wyższa powierzchnia właściwa cementu tym barwa jaśniejsza. Na rys. 3.25 pokazano stopień białości cementów „szarych” w porównaniu do cementu białego.



Rys. 3.24. Wpływ zawartości granulowanego żużla wielopieczowego na barwę cementu



Rys. 3.25. Porównanie stopnia białości wybranych cementów

3.2.8. Gęstość właściwa i ciężar nasypowy cementu

Gęstość właściwa cementu jest w głównej mierze uzależniona od jego składu, czyli zawartości klinkieru portlandzkiego i nieklinkierowych składników głównych. Cementy CEM II÷CEM V zawierające popiół lotny i/lub granulowany żużel wielkopieczowy charakteryzują się niższą gęstością właściwą niż cement portlandzki CEM I (tabela 3.31). Należy mieć na uwadze, że zastosowanie w produkcji betonu, np. cementu hutniczego CEM III w tej samej ilości (udział masowy), co cementu portlandzkiego CEM I, spowoduje wprowadzenie większej objętości cementu (zaczynu), co wpłynie na poprawę urabialności i pompowności mieszanki betonowej.

Znajomość ciężaru nasypowego (gęstości nasypowej) cementu jest szczególnie istotna ze względu na pakowanie, przechowywanie i transport cementu, np. odpowiedni dobór objętości (wymiarów) worka, pojemność cementonaczepy, pojemność silosów do składowania cementu luzem.

Ciężar nasypowy jest przede wszystkim uzależniony od stopnia zagęszczenia cementu, niemniej w poszczególnych rodzajach cementu obserwuje się podobne zależności jak opisane dla gęstości właściwej. Zazwyczaj ciężar nasypowy cementu w stanie luźnym wynosi: 0,9-1,2 kg/dm³, a dla cementu w stanie zagęszczonym 1,4 - 1,9 kg/dm³.

Tabela 3.31. Gęstość właściwa cementów i składników

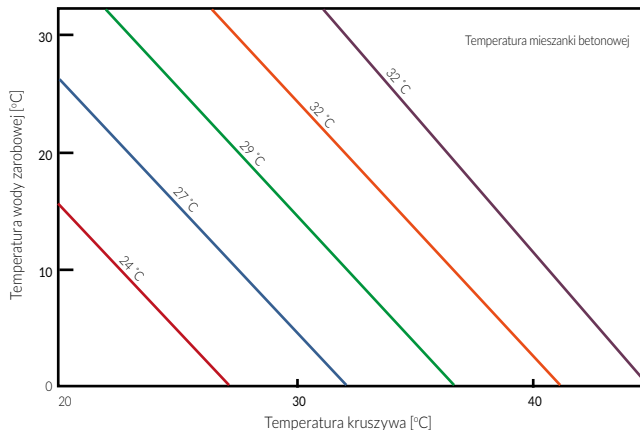
Cement / składnik cementu	Gęstość właściwa [kg/dm ³]	Objętość 100 kg [dm ³]
Klinkier portlandzki	3,10	32,3
Popiół lotny krzemionkowy	2,21	45,2
Mielony żużel wielkopiecowy	2,92	34,2
Mielony kamień wapienny	2,75	36,4
CEM I 42,5R	3,10	32,3
CEM I 42,5R-NA	3,11	32,2
CEM I 52,5R	3,11	32,2
CEM II/A-M (S-LL) 52,5N	3,07	32,6
CEM II/B-V 32,5R	2,78	36,0
CEM II/C-M (V-LL) 32,5R	2,92	34,2
CEM II/B-M (S-V) 42,5N	2,97	33,7
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	3,00	33,3
CEM IV/B(V) 32,5N-LH	2,68	37,3
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA	2,90	33,9
CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA	2,91	34,5

3.2.9. Temperatura cementu

Temperatura cementu nie jest właściwością normową. W okresie letnim oraz w pełni sezonu budowlanego odbierany z cementowni cement może mieć wyższą temperaturę niż w okresie zimowym. Jest to związane wysokim zapotrzebowaniem na cement, a zatem bardzo krótkim czasem przechowywania cementu w silosach w cementowni. Cement po zakończeniu procesu produkcji (na wyjściu z młyna) może mieć temperaturę $90 \div 130^{\circ}\text{C}$. Temperatura cementu nie ma jednak bezpośredniego wpływu na jego właściwości, pośrednio może jednak wpływać na właściwości mieszanki betonowej. Podwyższona o 10°C temperatura cementu powoduje podniesienie temperatury mieszanki betonowej o ok. 1°C . Aby zapewnić stabilną temperaturę cementu na potrzeby produkcyjne (beton) należy z wyprzedzeniem zgromadzić odpowiednią ilość cementu w silosach, tak by uniknąć stosowania do produkcji cementu dostarczonego bezpośrednio z cementowni.

Należy zwrócić uwagę, że w okresie letnim również pozostałe składniki mieszanki

betonowej mogą mieć podwyższoną temperaturę (rys. 3.26). Największy udział objętościowy w mieszance betonowej mają kruszywa (70÷80%), które w znacznym stopniu podnoszą jej temperaturę. Aby obniżyć temperaturę betonu zwykłego o 1°C, temperaturę kruszyw należy obniżyć tylko o 1,5°C, przy czym temperaturę cementu o 8,2°C, a temperaturę wody o 4,9°C. Zatem wpływ temperatury cementu na ogólną temperaturę mieszanki betonowej jest mniejszy niż w przypadku innych składników betonu.



Rys. 3.26. Wpływ temperatury składników na temperaturę mieszanki betonowej

Przyczyną tego efektu są proporcje składników w betonie, a przede wszystkim właściwości termiczne poszczególnych składników. Cement charakteryzuje się bardzo niską pojemnością cieplną (0,92 kJ/kg·K), przez co, pobiera i oddaje ciepło bardzo intensywnie. Kruszywa mają zwykle zbliżoną pojemność cieplną, ciepło właściwe wody jest z kolei bardzo wysokie (4,184 kJ/kg·K), co oznacza, że może magazynować duże ilości ciepła.

3.2.10. Stałość objętości

Stałość objętości jest miarą zmian objętości (pęcznienia) zaczynu cementowego o konsystencji normowej po 24 godz. dojrzewania i 3h przebywania w łaźni wodnej doprowadzonej do wrzenia.

Głównym czynnikiem, który ma wpływ na pęcznienie kompozytów cementowych jest obecność spieczonych ziaren tlenku wapnia (CaO) i/lub tlenku magnezu (MgO) w składzie cementu (klinkieru). Tlenki te w powolnej reakcji z wodą tworzą odpowiednio wodorotlenek wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i wodorotlenek magnezu $\text{Mg}(\text{OH})_2$ zwiększając tym samym objętość. W wyniku zwiększonej objętości produktów reakcji w stosunku do objętości składników, przebieg tej reakcji o stwardniałej matrycy cementowej, może prowadzić do wzrostu lokalnych naprężeń, co może spowodować powstawanie odprysków, spękań, a w efekcie obniżenie trwałości. Wszystkie cementy zgodne z wymaganiami normy PN-EN 197-1 muszą spełnić kryterium stałość objętości. Stałość objętości cementu jest zachowana, jeżeli rozszerzalność jest mniejsza niż 10 mm.

3.2.11. Skurcz

Skurcz jest zjawiskiem zmniejszenia objętości zaczynu cementowego wywołanym złożonymi procesami fizyko-chemicznymi. W zależności od przyczyny wywołującej te procesy wyróżnia się:

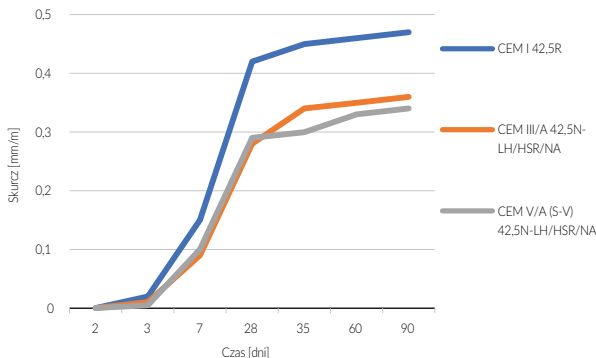
- skurcz od wysychania będący skutkiem wysychania (utrata wody przyłączonej w reakcjach lub odparowania) twardniejącego zaczynu cementowego,
- skurcz autogeniczny powstały w wyniku zmian chemicznych oraz strukturalnych zachodzących w „młodym” zaczynie cementowym,
- skurcz plastyczny, będący wynikiem niewłaściwej pielęgnacji
- skurcz termiczny występujący w efekcie powstających naprężeń termicznych pomiędzy powierzchnią a wnętrzem betonu.

Skurcz nie jest wadą jakościową cementu, może być natomiast wynikiem błędnego wykonawstwa. Zmiany skurczowe pojawiają się w twardniejącym zaczynie cementowym i wywoływane są szeregiem złożonych czynników. Skurcz zależy od temperatury i wilgotności, natomiast nie jest związany z obciążeniem konstrukcji. Wielkość skurczu zależy, m.in. od:

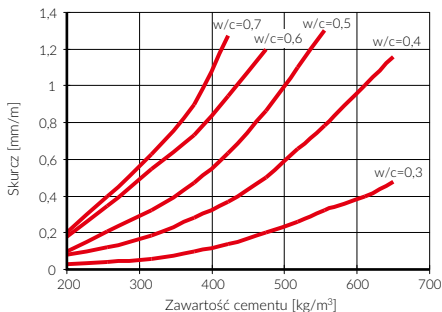
- ilości i rodzaju cementu (rys. 3.27)
- współczynnika w/c (rys. 3.28),
- zawartości kruszywa (rys. 3.29) i składu ziarnowego,

- warunków termiczno-wilgotnościowych otoczenia,
- właściwej pielęgnacji betonu.

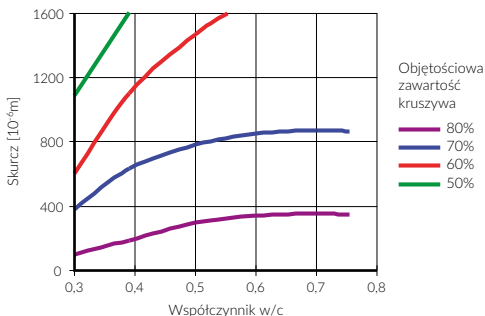
Na rys. 3.27 przedstawiono skurcz zapraw normowych wykonanych z cementów Górażdże Cement S.A. Najmniejszy skurcz wykazują zaprawy wykonane z cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy i popiół lotny. Z kolei zaprawy z cementów portlandzkich CEM I charakteryzują się wyższym skurczem.



Rys. 3.27. Skurcz normowych zapraw cementowych



Rys. 3.28. Wpływ zawartości cementu i współczynnika w/c na skurcz betonu



Rys. 3.29. Wpływ wartości współczynnika w/c i zawartości kruszywa na skurcz betonu

3.3. Środki ostrożności przy pracy z cementem

Cement jest klasyfikowany jako preparat stwarzający potencjalne niebezpieczeństwo dla zdrowia, co wiąże się z drażniącym działaniem pyłu cementowego na oczy, układ oddechowy i skórę. Aby nie narazić się na podobne zagrożenia należy unikać wdychania pyłu cementowego, chronić oczy oraz skórę przed bezpośrednim kontaktem z cementem.

Sz szczególnie niebezpieczny jest kontakt cementu z oczami lub jego obecność w drogach oddechowych. W przypadku przedostania się cementu do dróg oddechowych należy zapewnić poszkodowanemu dostęp świeżego powietrza. Jeżeli wystąpią trudności z oddychaniem konieczne jest wezwanie pomocy lekarskiej. Przedostanie się pyłu cementowego do oczu wymaga przemywania ich dużą ilością wody (unikać silnego strumienia wody, ze względu na ryzyko uszkodzenia rogówki). Jeżeli objawy podrażnienia utrzymują się, należy wezwać lekarza.

Zagrożenie dla zdrowia stanowi zawarty w cemencie rozpuszczalny w wodzie chrom (VI), który może wywoływać reakcje alergiczne. Jego maksymalny poziom ograniczany jest za pomocą środków redukujących i wynosi 2 mg/kg całkowitej suchej masy. Szczególną ostrożność należy także zachować przy kontakcie z mieszanką betonową (zaczynem cementowym), ponieważ jednym z podstawowych produktów reakcji cementu z wodą jest wodorotlenek wapnia Ca(OH)_2 .

W efekcie zaczyn cementowy (mieszanka betonowa) posiada silnie zasadowy odczyn (pH 12÷12,5), co przy kontakcie z oczami lub skórą prowadzi do podrażnień. Podczas pracy z cementem należy koniecznie unikać kontaktu zaczynu ze skórą lub oczami. Indywidualne środki ostrożności, jak noszenie rękawic czy okularów ochronnych, są nieodzowne przy pracy z betonem.

Według Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin, zmieniające i uchylające dyrektywy 67/548/EWG i 1999/45/WE oraz zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1907/2006, każda partia cementu luzem lub każdy worek posiada etykietę, zawierającą informację o zagrożeniach wynikających z kontaktu z cementem oraz warunkach jego bezpiecznego stosowania. Etykieta zawiera również znak i symbol ostrzegawczy określający kategorię niebezpieczeństwa, co zaprezentowano na rys. 3.30.



Rodzaj zagrożenia:

Powoduje poważne uszkodzenie oczu.
Działa drażniąco na skórę.
Może powodować reakcję alergiczną skóry.
Może powodować podrażnienie dróg oddechowych.

Środki ostrożności

Chronić przed dziećmi.
Stosować rękawice ochronne/odzież ochronną/ochronę oczu/ochronę twarzy.
W PRZYPADKU DOSTANIA SIĘ DO OCZU:
Ostrożnie płukać wodą przez kilka minut.
Wyjąć soczewki kontaktowe, jeżeli są i można je łatwo usunąć. Nadal płukać.
Natychniać skontaktować się z OSRODKIEM ZATRUCIEK/lekarzem.
W PRZYPADKU KONTAKTU ZE SKÓRĄ: umyć dużą ilością wody.

W przypadku wystąpienia podrażnienia skóry lub wysypki: Zasięgnąć porady/zgłosić się pod opiekę lekarza
Unikać wdychania pyłu/dymu/gazu/mgły/par/rozpylonej cieczy.

W PRZYPADKU DOSTANIA SIĘ DO DRÓG ODDECHOWYCH: wyprowadzić lub wynieść poszkodowanego na świeże powietrze i zapewnić mu warunki do swobodnego oddychania.
W przypadku złego samopoczucia skontaktować się z OSRODKIEM ZATRUCIEK/lekarzem.
Zawartość/pojemnik usuwać do uprawnionego odbiorcy odpadów stosownie do bieżących regulacji prawnych

Dodatkowe informacje
Kontakt skóry z mokrym cementem, mieszanką betonową lub zaprawą może powodować podrażnienie, zapalenia lub poważne uszkodzenia skóry.
Może spowodować uszkodzenie produktów z aluminium lub innych metali nieśluzochetnych.
Substancja: cement zawierający klinkier portlandzki Nr EINECS: 266-043-4; Nr CAS: 65997-15-1
pyły z produkcji cementu portlandzkiego Nr EINECS: 270-659-9; Nr CAS: 68475-76-3



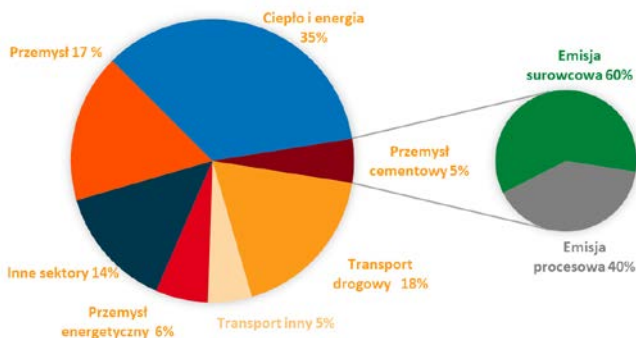
Niebezpieczeństwo

W przypadku wystąpienia podrażnienia skóry lub wysypki: Zasięgnąć porady/zgłosić się pod opiekę lekarza
Unikać wdychania pyłu/dymu/gazu/mgły/par/rozpylonej cieczy.

Rys. 3.30. Przykładowe oznakowanie dotyczące zagrożeń przy stosowaniu cementu

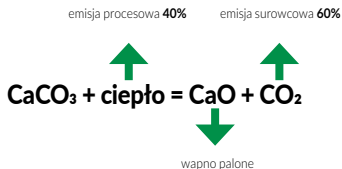
3.4. Cement w zrównoważonym budownictwie

Produkcja cementu jest procesem wysoce energochłonnym i wysoce emisyjnym (głównie emisja CO₂). Wynika to z procesów fizycznych i chemicznych zachodzących podczas przetwarzania surowców wapiennych w klinkier cementu portlandzkiego, których nie da się uniknąć nawet przy maksymalnej optymalizacji całego procesu produkcyjnego. Obecnie przemysł cementowy jest trzecim co do wielkości przemysłowym konsumentem energii, a jego produkcja odpowiada za 5 % globalnej antropogenicznej emisji CO₂ (rys. 3.31).



Rys. 3.31. Udział emisji CO₂ pochodzącego z przemysłu cementowego w odniesieniu do całkowitej antropogenicznej emisji CO₂

Produkcja cementu i wapna ma unikalny profil emisyjny (rys. 3.32), ponieważ większość gazów powodujących efekt cieplarniany nie jest emitowana w związku z uzyskiwaniem energii ze spalnego paliwa, ale pochodzi z samych surowców. Około 60% łącznej emisji CO₂ z wytwarzania klinkieru (emisja surowcowa) uwalnia się bezpośrednio na skutek przetwarzania wapienia. Większość z pozostałych 40% pochodzi ze spalania paliwa (emisja procesowa) w piecu w celu osiągnięcia wysokich temperatur koniecznych do powstania minerałów klinkierowych. Pośrednia emisja ze zużycia energii elektrycznej stanowi około 6% łącznej emisji CO₂.



Rys. 3.32. Profil emisyjny produkcji cementu

Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Cementowego CEMBUREAU przygotowało Mapę Drogową (rys. 3.33), która zakłada ograniczenie emisji CO₂ przez producentów cementu i betonu o ok. 40% w 2030 r. i osiągnięcie neutralności klimatycznej w 2050 r.



Rys. 3.33. Mapa drogowa do neutralności klimatycznej w 2050 r.

Cel ten będzie realizowany m.in. przez:

- poprawę efektywności energetycznej,
- stosowanie paliw alternatywnych,
- stosowanie składników nieklinkierowych do cementu,

- optymalizację projektowania mieszanek betonowych,
- technologie wychwytywania i magazynowania (CCS) lub wykorzystania CO₂ (CCU).

Produkcja cementu wymaga nakładów energii na kilku etapach, od rozdrabniania surowców przez produkcję klinkieru, aż po mielenie. Zastąpienie starszych urządzeń technologią bardziej nowoczesną i sprawną oraz ciągła modernizacja istniejących cementowni przyczynia się do poprawy parametrów energetycznych. Zapotrzebowanie na energię elektryczną można obniżyć na przykład przez zastosowanie ulepszonych technik mielenia oraz procesów odzyskiwania ciepła odpadowego, a także wykorzystanie nowoczesnej technologii chłodzenia klinkieru i napędów o zmiennej prędkości.

STOSOWANIE PALIW ALTERNATYWNYCH

Produkcja cementu jest energochłonna, a obecnie jako źródło paliwa wykorzystywana jest kombinacja węgla, biomasy i odpadów. Wykorzystanie paliw alternatywnych takich jak biomasa lub odpady ma natychmiastowy wpływ na profil emisyjny przemysłu, który chociaż już wykorzystuje duże ilości takich materiałów, to może je jeszcze zwiększyć w przyszłości. Unikalny proces i potrzeby energetyczne przemysłu cementowego umożliwiają wykorzystanie mixów paliwowych, które nie byłyby odpowiednie dla wielu innych branż. Możliwość mieszania paliw kopalnych, takich jak węgiel lub gaz z odpadami, biomasą i przemysłowymi produktami ubocznymi, jest korzystna zarówno z punktu widzenia efektywności zasobowej, jak i bezpieczeństwa dostaw. Cementownie pozwalają eliminować odpady w sposób bezpieczny dla środowiska. Dzieje się tak, dzięki właściwościom procesu produkcji klinkieru cementowego, który pozwala na wykorzystanie zamiast paliw kopalnych, paliw alternatywnych, produkowanych z odpadów. Nie są to czyste odpady, ale odpady przekształcone w paliwo alternatywne RDF, o określonej jakości i kaloryczności. Tak przygotowane paliwo podawane jest do pieca cementowego. Przewagą zakładów cementowych w termicznym zagospodarowaniu odpadów jest bardzo wysoka temperatura panująca w piecu cementowym, przekraczająca 1400°C. Kolejną zaletą jest fakt, iż dzięki tak wysokiej temperaturze proces współspalania jest bezodpadowy. Wszystkie substancje powstające podczas spalania paliwa alternatywnego zostają wbudowane w skład klinkieru cementowego, stanowiąc ok. 4% jego składu. To odróżnia piece cementowe od spalarni odpadów. Jest to tzw. proces co-processingu, pozwalający nie tylko na odzysk energii termicznej, ale także wykorzystanie części nieorganicznych w docelowym produkcie. Nowo-

czesne instalacje w cementowniach i surowe limity emisyjne zapewniają bardzo bezpieczne i efektywne współspalanie paliw alternatywnych. Zastępowanie węgla paliwami alternatywnymi, które obecnie jest na poziomie 70%, obniża także emisję CO₂, co jest ważne w dążeniu do neutralności emisyjnej.

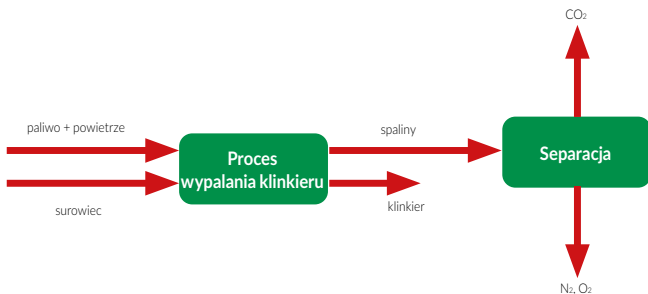
STOSOWANIE SKŁADNIKÓW NIEKLINKIEROWYCH DO CEMENTU

Redukcja wskaźnika klinkierowego jest zdecydowanie najbardziej efektywnym środkiem redukcji emisji CO₂ w procesie produkcji cementu, ponieważ obejmuje zarówno emisję CO₂ pochodzącą z surowców, jak i ze spalania paliwa. W roku 2017 wskaźnik klinkierowy cementu wynosił w Europie 77%. Oznacza to, że średnio 23% klinkieru zastępowano materiałami nieklinkierowymi takimi jak granulowany żużel wielkopiecowy (S) oraz popiół lotny (V, W). Innymi stosowanymi składnikami cementu są pucolany naturalne (P), kamień wapienny (L, LL) lub palony łupek bitumiczny (T). Ze względu na zmniejszającą się dostępność granulowanego żużla wielkopiecowego i popiołu lotnego, które są najczęściej stosowanymi nieklinkierowymi składnikami cementu, przemysł cementowy poszukuje alternatywnych rozwiązań, np. cementy zawierające gliny kalcynowane (Q) lub wdraża cementy zawierające w składzie dwa lub więcej nieklinkierowe składniki główne.

TECHNOLOGIE WYCHWYTYWANIA I MAGAZYNOWANIA (CCS) ORAZ WYKORZYSTANIA CO₂ (CCU)

Jednym z alternatywnych rozwiązań jest wychwytywanie CO₂ u źródła, a następnie ponowne wykorzystanie lub składowanie. Obecnie prowadzone są projekty badawcze mające na celu przeanalizowanie wykonalności stosowania wychwytywania CO₂ w przemyśle cementowym. Pierwszą z badanych koncepcji jest technologia post-combustion (rys. 3.34, 3.35) – po procesie spalania następuje oddzielenie CO₂ od gazów odlotowych, dzięki czemu można osiągnąć wskaźnik wychwytywania na poziomie 95%, czystość CO₂ może wynosić nawet 99%, co umożliwi natychmiastowe dalsze sprężanie i transport. Wychwytywanie po spalaniu wymaga usunięcia CO₂ z gazów odlotowych, składających się głównie z N₂ i CO₂ przed emisją do atmosfery. Wychwytywanie po spalaniu jest możliwe do zrealizowania w krótkim czasie, ponieważ w wiele z proponowanych technologii można doposażyć istniejące cementownie wykorzystujące paliwa kopalne do zasilania pieca obrotowego. Technologia post-combustion oparta jest na chemicznych i fizycznych sorbentach oraz membranach. Separacja CO₂ ze spalin zaczyna się po odpyleniu oraz

oczyszczeniu spalin z tlenków siarki. Spaliny ulegają również dodatkowemu odwodnieniu i schłodzeniu. Przygotowane w ten sposób spaliny kierowane są do absorbera, w którym sorbent wiąże się z dwutlenkiem węgla. Rolę sorbentu pełnią różne rodzaje amin lub amoniaku. Po redukcji dwutlenku węgla spaliny kierowane są do komina, a następnie odprowadzane są do atmosfery.



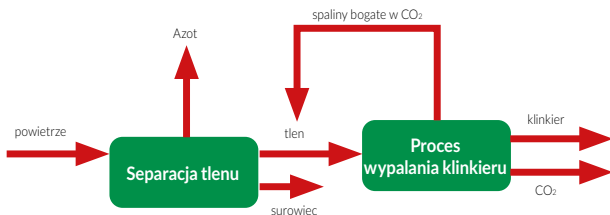
Rys. 3.34. Technologia separacji dwutlenku węgla po procesie spalania (post-combustion)



Rys. 3.35. Instalacja do wychwytywania dwutlenku węgla (post-combustion) w cementowni HeidelbergCement Norcem w Brevik (Norwegia).

Druga technologia to oxyfuel combustion (rys. 3.36, 3.37) – polegająca na spalaniu paliwa w czystym tlenie zamiast powietrza, pozwalająca uzyskać stosunkowo czysty strumień CO₂. W technologii oxyfuel azot jest oddzielany od powietrza do

spalania przed jego wprowadzeniem do pieca cementowego, dzięki czemu piec pracuje z czystym tlenem jako utleniaczem. Gazy wylotowe z pieca mają wysoką koncentrację CO_2 , w idealnym przypadku składają się tylko z CO_2 i pary wodnej. Wstępna obróbka powietrza do spalania w celu usunięcia azotu odbywa się w instalacji separacji. Aby utrzymać właściwą temperaturę płomienia i umożliwić dobry jego rozkład w celu efektywnego ogrzania wsadu do pieca, część spalin wzbogaconych w CO_2 jest cyrkulowana, a natężenie recyrkulacji określa przepływ gazu przez system pieca i stężenie tlenu w utleniaczu. Część gazu piecowego wzbogaconego w CO_2 jest usuwana z pętli recyrkulacyjnej, oczyszczana, dalej przetwarzana w jednostce sprężania i przygotowywana do transportu.



Rys. 3.36. Technologia spalania paliwa w czystym tlenie (oxyfuel combustion)

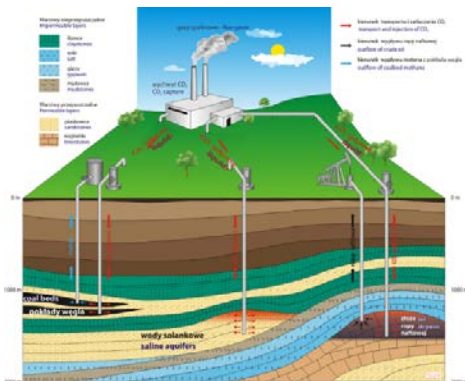


Rys. 3.37. Projekt Catch4Climate oparty o technologię oxyfuel combustion (Mergelstetten, Niemcy)

Wyróżnia się dwie główne metody deponowania CO_2 (rys. 3.38), tj. głębokie geologiczne składowanie oraz mineralna karbonatyzacja. Magazynowanie

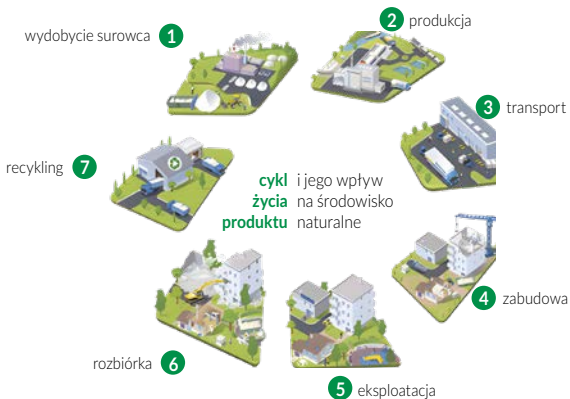
w głębokich formacjach geologicznych znane jest również jako geo-sekwestracja. W tej technice CO₂ jest przekształcany pod wysokim ciśnieniem w formę ciekłą – stan nadkrytyczny CO₂. Dwutlenek węgla w stanie nadkrytycznym zachowuje się jak rzadka ciecz i jest wstrzykiwany bezpośrednio do skał osadowych. Skały te mogą znajdować się na starych polach naftowych, gazowych lub w formacjach solnych - skałach z porowatymi przestrzeniami wypełnionymi słoną wodą. Trudne do wydobycia pokłady węgla i niektóre skały wulkaniczne są również sugerowanymi miejscami składowania. Różne struktury fizyczne zapobiegają wydostawaniu się CO₂ na powierzchnię. Należą do nich nieprzepuszczalne „skały płonne” i mechanizmy pułapek geochemicznych. Do sposobów składowania CO₂, które obecnie są testowane lub wykorzystywane można zaliczyć:

- technologię EOR (Enhanced Oil Recovery) tj. wstrzykiwanie CO₂ do będących u kresu eksploatacji pól naftowych w celu zwiększenia wydobycia ropy. Opcja ta jest atrakcyjna dla składowania CO₂, ponieważ koszty zatłaczania mogą być częściowo zrekompensowane przez sprzedaż dodatkowo wydobytej ropy. Jednakże późniejsze spalanie dodatkowej ropy odzyskanej dzięki EOR zrównoważy znaczną lub całkowitą redukcję emisji CO₂.
- technologię ECBM (enhanced coal-bed methane), gdzie wykorzystuje się pokłady węgla zalegające zbyt głęboko lub które są trudne do wydobycia, do których CO₂ jest wstrzykiwany, a następnie absorbowany przez węgiel. Podczas tego procesu węgiel uwalnia wcześniej zaabsorbowany metan (CH₄), który może być następnie odzyskany. Sprzedaż CH₄ może zrównoważyć część kosztów składowania CO₂. Jednakże, podobnie jak w przypadku EOR, spalanie powstałego CH₄ spowodowałoby produkcję CO₂, co zmniejszyłoby niektóre korzyści wynikające ze składowania pierwotnego CO₂.
- składowanie mineralne, gdzie wychwycony CO₂ wchodzi w reakcję z naturalnie występującymi minerałami żelaza (Fe), magnezu (Mg) i wapnia (Ca). Nazywa się to „mineralną karbonatyzacją” i zachodzi naturalnie w procesie wietrzenia skał. Takie minerały występują powszechnie i są bardzo stabilne. W związku z tym nie dochodzi do ponownego uwalniania CO₂ do atmosfery. Jednak te reakcje karbonatyzacji są bardzo powolne w normalnych warunkach i aby je przyspieszyć, potrzebna byłaby energia do podniesienia temperatury i ciśnienia do odpowiedniego poziomu.



Rys. 3.38. Metody składowania CO₂

3.5. Ocena cyklu życia (LCA) cementu



Rys. 3.39. Etapy cyklu życia produktów

W celu oceny technologii, produktów czy usług i ich oddziaływania na środowisko stosuje się metodę LCA (Life Cycle Assessment). Metoda ta pozwala na ocenę rzeczywistego wpływu wyrobów, usług, instalacji lub procesów na środowisko i wybór najmniej uciążliwej technologii na wszystkich etapach życia wyrobu, materiału czy procesu (rys. 3.39).

Kategoriami wpływu na środowisko są między innymi zużycie zasobów naturalnych, zdrowie ludzkie, czy też skutki ekologiczne. W wyniku analizy LCA otrzymuje się profil środowiskowy, który zawiera informacje o poszczególnych etapach życia, jak również o wydajności całego cyklu.

Dokumentem szczegółowo opisującym oddziaływanie produktu na środowisko podczas jego całego cyklu życia (LCA), od pozyskania materiałów, przez etap produkcji, transport, montaż, użytkowanie, aż do utylizacji i recyklingu jest Deklaracja Środowiskowa Produktu (EPD - Environmental Product Declaration). Produkty z deklaracją EPD są wykorzystywane podczas budowy obiektów, dla których uzyskiwane są certyfikaty zrównoważonego budownictwa (systemy DGNB, LEED, BREEAM i inne).

Deklaracje środowiskowe produktu są dokumentami przygotowanymi w oparciu o kryteria i procedury zawarte w normach:

- PN-EN ISO 14020 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Zasady ogólne”
- PN-EN ISO 14024 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Etykietowanie środowiskowe I typu. Zasady i procedury”
- PN-EN ISO 14021 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Własne stwierdzenia środowiskowe (Etykietowanie środowiskowe II typu)
- PN ISO 14025 „Etykiety i deklaracje środowiskowe. Deklaracje środowiskowe III typu. Zasady i procedury”.

Deklaracje środowiskowe III typu, zgodnie z postanowieniami normy, zawierają dane ilościowe na temat oddziaływań środowiskowych produktu w ciągu całego jego cyklu życia lub na poszczególnych jego etapach. Deklaracja środowiskowa jest weryfikowana przez stronę trzecią, co zapewnia jej wiarygodność. Z uwagi na szczegółowość oraz bardziej techniczny sposób prezentowania informacji, podstawowym przeznaczeniem deklaracji środowiskowych III typu jest usprawnienie komunikacji pomiędzy przedsiębiorcami na różnym szczeblu łańcucha produkcji (choćby zawarte w nich dane mogą być przydatne również dla konsumentów końcowych). Dla wyrobów, które samodzielnie nie posiadają określonej funkcjonalności, a jedynie mogą być używane jako półprodukty dla różnego typu bardziej złożonych wyrobów, nie jest możliwe określenie oddzia-

tywania na środowisko w całym ich cyklu życia, ponieważ nie da się określić jakiego produktu częścią się staną, a co za tym idzie, jak będą użytkowane, demontowane itp. Deklaracja środowiskowa dla tego typu produktów obejmuje tylko tą część ich cyklu życia, która jest możliwa do określenia na podstawie wiarygodnych przesłanek. Z tych powodów deklaracje środowiskowe typu III są najczęściej stosowane w przemyśle materiałów budowlanych. W przypadku materiałów budowlanych sposób sporządzania deklaracji jest dodatkowo regulowany następującymi normami:

- PN-EN 15804+A2:2020 „Zrównoważenie obiektów budowlanych. Deklaracje środowiskowe wyrobu. Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych”
- PN-EN 16908 „Cement i wapno budowlane. Deklaracje środowiskowe wyrobów. Zasady kategoryzacji wyrobów będące uzupełnieniem postanowień PN-EN 15804”

Zgodnie ww. normami cykl życia określają kolejne i powiązane ze sobą etapy systemu wyrobu (tabela 3.32), od pozyskania lub wytworzenia surowca z zasobów naturalnych do ostatecznej likwidacji, które się dzieli na:

- Faza wyrobu (A1 – A3) – obejmuje oddziaływania związane z wydobywaniem surowców, ich transportu do miejsca, w którym będą produkowane i energii pierwotnej wykorzystywanej z przekształcenia surowców na wyroby budowlane, które posłużą do wybudowania obiektu.
- Faza budowy (A4 i A5) – zawiera procesy od bram fabryki wyrobów budowlanych do praktycznego zakończenia prac budowlanych. Zawiera wszelki transport materiałów i produktów, w tym pośrednie magazynowanie i dystrybucję, a także procesy związane z budową i wznoszeniem obiektu.
- Faza użytkowania (B1 – B7) – uwzględnia okres od zakończenia prac budowlanych do rozbiórki budynku. Mieści szeroki zakres źródeł emisji związanych z eksploatacją budynku, wliczając ogrzewanie, chłodzenie, zużycie energii elektrycznej, zaopatrzenie w wodę czy konserwacje (w tym czyszczenie, naprawę i wymianę instalacji budynkowych).
- Faza końca życia (C1 – C4) – rozpoczyna się, gdy budynek jest wycofany z użytku i nie będzie użytkowny w przyszłości. Obejmuje swym zakresem rozbiórkę oraz wszelkie oddziaływanie spowodowane transportem podczas rozbiórki.
- Wpływy zewnętrzne (D) – rozbiórkę obiektu należy traktować jako proces, który stanowi źródło materiałów, wyrobów, elementów, które mogą być ponownie wykorzystane, poddane recyklingowi lub odzyskane.

Tabela 3.32. Etapy oceny cyklu życia wyrobu

Faza wyrobu			Faza wznoszenia		Faza użytkowania					Faza końca cyklu życia				Poza cyklem
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Wydobycie i wytworzenie surowców	Transport	Produkcja wyrobu	Transport	Instalacja, wbudowanie	Użytkowanie	Konserwacja	Naprawa	Wymiana	Odnowienie	Rozbiórka / wyburzenie	Transport	Recykling / ponowne użycie	Składowanie	Ponowne użycie
					B6 Zużycie energii									Wpływy zewnętrzne
					B7 Zużycie wody									

W przypadku cementu deklarację środowiskową EPD sporządza się w fazach wyrobu od pobrania surowców do bramy fabryki A1-A3, gdyż za rodzaj finalnego zastosowania producent cementu nie odpowiada i nie jest w stanie dla etapów od A4 do D przedstawić miarodajnych danych. Parametry opisujące oddziaływanie środowiskowe w EPD przedstawia się na jednostkę funkcjonalną wyrobu, w przypadku cementu na jednostkę masy, tj. 1 tonę lub 1 kg. Wyniki oceny środowiskowej cementów CEM I – CEM V zawarte w EPD przygotowanym na zlecenie Stowarzyszenia Producentów Cementu przedstawiono w tabeli 3.33.

Tabela 3.33. EPD przygotowane na zlecenie Stowarzyszenia Producentów Cementu

Parametry opisujące oddziaływanie środowiskowe: (JF) 1 kg						
Oddziaływanie środowiskowe	Jednostka	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
Globalne ocieplenie	brutto ¹	0,812	0,648	0,452	0,536	0,549
	netto ²	0,710	0,571	0,405	0,473	0,485
Uszczuplenie ozonu		3,71E-08	3,01E-08	3E-08	2,31E-08	2,74E-08
Zakwaszenie gleby i wody		0,00079	0,00073	0,0010	0,00052	0,00059
Fotochemiczne tworzenie ozonu		0,00079	0,00069	0,00061	0,00054	0,00042
Eutrofizacja		0,00010	8,68E-05	6,82E-05	6,5E-05	6,85E-05
Uszczuplenie zasobów abiotycznych – pierwiastki		0,00029	0,00024	0,0017	0,0019	0,0015
Uszczuplenie zasobów abiotycznych – paliwa kopalne		3,58	3,06	3,02	2,32	2,32

Parametry opisujące zużycie zasobów: (JF) 1 kg

Aspekty środowiskowe	Jednostka	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
Zużycie odnawialnej energii pierwotnej, z wyłączeniem jej zasobów jako surowce	MJ	INA ³	INA	INA	INA	INA
Zużycie zasobów odnawialnej energii pierwotnej stosowane jako surowce	MJ	INA	INA	INA	INA	INA
Całkowite zużycie zasobów odnawialnej energii pierwotnej ⁵	MJ	0,15	0,15	0,20	0,095	0,11
Zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej, z wyłączeniem jej zasobów jako surowce	MJ	INA	INA	INA	INA	INA
Zużycie zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej stosowane jako surowce	MJ	INA	INA	INA	INA	INA
Całkowite zużycie zasobów nieodnawialnej energii pierwotnej ⁵	MJ	4,08	3,51	3,43	2,67	2,57
Zużycie materiałów wtórnych	kg	0,074	0,056	0,034	0,046	0,047
Zużycie odnawialnych paliw wtórnych	MJ	0,88	0,67	0,41	0,55	0,56
Zużycie nieodnawialnych paliw wtórnych	MJ	1,28	0,97	0,60	0,79	0,81
Zużycie zasobów słodkiej wody ⁴	m ³	0,0086	0,0066	0,0041	0,0053	0,0054

Inne informacje środowiskowe opisujące kategorie odpadów: (JF) 1 kg

Aspekty środowiskowe	Jednostka	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
Odpady niebezpieczne, usunięte	kg	0,0001	9,08E ⁻⁰⁵	7,35E ⁻⁰⁵	7,34E ⁻⁰⁵	4,04E ⁻⁰⁵
Usunięte odpady inne niż niebezpieczne	kg	0,017	0,016	0,023	0,012	0,013
Odpady radioaktywne, usunięte	kg	0	7,17E ⁻⁰⁸	0	0	0
Materiały do ponownego użycia	kg	0	0	0	0	0
Materiały do recyklingu	kg	6,27E ⁻¹⁰	5,48E ⁻¹⁰	3,92E ⁻¹⁰	1,33E ⁻¹⁰	2,98E ⁻¹⁰
Materiały do odzyskiwania energii	kg	0	0	0	0	0
Energia eksportowana	MJ	0	0	0	0	0

¹Globalne ocieplenie brutto - bez uwzględniania emisji biogenicznych z paliw alternatywnych; ²Globalne ocieplenie netto - bez uwzględniania emisji z paliw alternatywnych; ³JNA - wskaźnik nie oznaczony (Indicator Not Assessed); ⁴Zużycie wody głównie z procesu produkcji energii elektrycznej; ⁵energii pierwotnej i zasobów energii pierwotnej stosowanej jako surowce

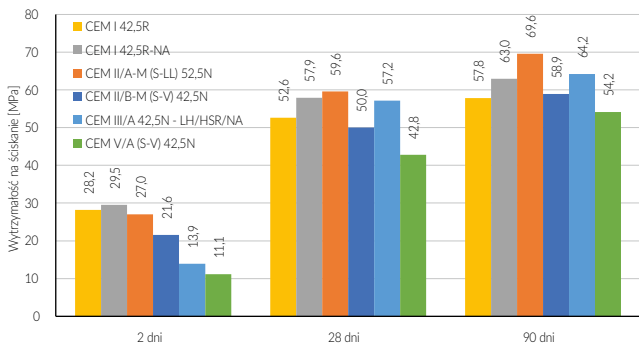
3.6. Cement w obszarach zastosowań

3.6.1. Cement w produkcji betonu towarowego

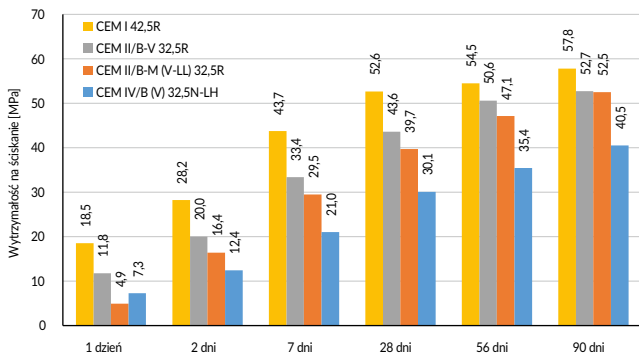
W produkcji betonu towarowego, o doborze rodzaju i klasy cementu, decyduje zazwyczaj specyfikowana klasa wytrzymałości betonu oraz warunki środowiskowe (klasa ekspozycji), w jakich beton będzie eksploatowany. Decydując się na wybór określonego rodzaju cementu należy uwzględnić również czas transportu mieszanki betonowej, sposób jej zabudowy i zagęszczania, a także warunki pielęgnacji. Wymagania dla stwardniałego betonu są określone przez projektanta, natomiast właściwości mieszanki betonowej, zależą od rodzaju konstrukcji, techniki układania i zagęszczania oraz warunków transportu. Przystępując do projektowania składu mieszanki betonowej należy uwzględnić te wszystkie czynniki i tak dobrać skład betonu, aby było to działanie optymalne z punktu widzenia ekonomicznego i technicznego.

Kierując się projektowaną klasą betonu, zwykle dla betonu klasy $\leq C25/30$ stosowane są cementy 32,5, natomiast w przypadku klas betonu $\geq C30/37$ dobiera się cementy wyższych wytrzymałości, tj. 42,5 lub 52,5. Biorąc pod uwagę rodzaj cementu, w miejsce cementów portlandzkich CEM I z powodzeniem stosowane mogą być cementy z grup CEM II, CEM III, CEM V. Możliwość ich zastosowania potwierdzają wyniki badań wytrzymałości betonów na ściskanie przedstawione na rys. 3.40 i 3.41. W składzie poszczególnych betonów zmianie ulegał jedynie rodzaj cementu, natomiast ilość pozostałych składników była niezmienna. Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że wytrzymałość betonów wykonanych przy użyciu cementów CEM II, CEM III i CEM V w okresie wczesnym (po 2 dniach) jest niższa, ale po 28 i 90 dniach przekracza wytrzymałości betonów wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I. Beton wykonany z cementów wieloskładnikowych w późniejszym okresie czasu charakteryzuje się wyższą trwałością niż beton z cementu portlandzkiego. Z tego względu badania trwałościowe betonu na cementach CEM II ÷ CEM V (nasiąkliwość, penetracja wody pod ciśnieniem, mrozoodporność, odporność na agresję chemiczną) należy wykonywać po 56 lub 90 dniach.

W przypadku betonu towarowego należy również mieć na uwadze utrzymanie w trakcie produkcji i układania mieszanki betonowej zaprojektowanego współczynnika w/c.



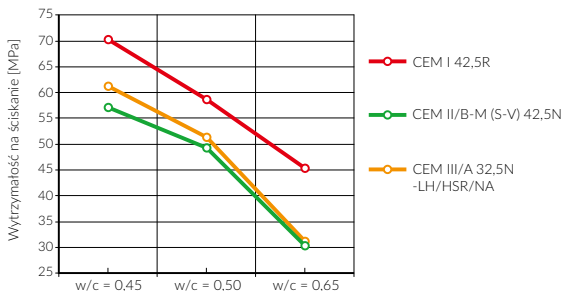
Rys. 3.40. Wytrzymałość na ściskanie betonów po 2,28 i 90 dniach ($w/c=0,55$; zawartość cementu 300 kg/m^3)



Rys. 3.41. Wytrzymałość na ściskanie betonów po 2,28 i 90 dniach ($w/c=0,55$; zawartość cementu 300 kg/m^3)

Zwiększenie ilości wody w mieszance betonowej, przy nieziennej ilości cementu (zwiększenie w/c), skutkuje spadkiem wytrzymałości betonu. W praktyce często dochodzi do nadmiernego, niekontrolowanego dozowania wody w celu „poprawy” ciekłości mieszanki. Takie działanie może w konsekwencji

obniżyć klasę wytrzymałości betonu w stosunku do projektowanej i wpłynąć negatywnie na bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji (rys. 3.42).



Rys. 3.42. Wpływ współczynnika w/c na wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania (zawartość cementu 350kg/m³)

3.6.2. Cement w produkcji prefabrykatów i galanterii betonowej

Cementy stosowane w produkcji prefabrykatów i galanterii betonowej (kostka brukowa, krawężniki, obrzeża, palisady, dachówki cementowe) powinny charakteryzować się wysoką wytrzymałością wczesną. Pozwala to na szybką rotację form lub podkładów oraz bezpieczne magazynowanie i paletyzowanie elementów uformowanych.

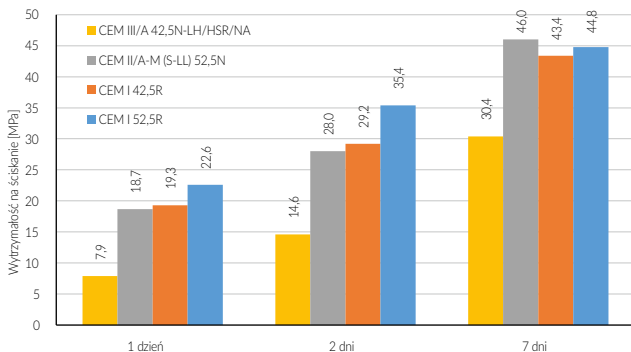
W technologii produkcji elementów prefabrykowanych wyróżnia się:

- wytrzymałość umożliwiającą bezpieczne rozformowanie elementu bez uszkodzeń i jego transport na miejsce dojrzewania,
- wytrzymałość składowania umożliwiającą ustawienie elementów w stosie, która określana jest jako połowa wytrzymałości po 28 dniach,
- wytrzymałość montażową umożliwiającą przewóz na miejsce wbudowania i montaż konstrukcji, która wynosi min. 70% wytrzymałości po 28 dniach.

Jednym ze sposobów spełnienia wymagań technologicznych i jakościowych przewidzianych dla elementów prefabrykowanych jest właściwe zaprojektowanie mieszanki betonowej, szczególnie właściwy dobór cementu i jego ilości. Najczęściej wymagane właściwości prefabrykatów w okresie początkowym osiąga się poprzez:

- stosowanie cementu wysokiej klasy wczesnej i normowej (42,5R; 52,5N; 52,5R),
- przyspieszanie procesu wiązania cementu poprzez stosowanie domieszek chemicznych, co jest istotne zwłaszcza przy obniżonych temperaturach dojrzewania betonu,
- obniżenie współczynnika w/c poprzez stosowanie domieszek chemicznych,
- stosowanie obróbki cieplnej betonu.

Cementy zalecanych klas wytrzymałości charakteryzują się szybkim przyrostem wytrzymałości wczesnej, wysoką wytrzymałością normową oraz wysokim ciepłem hydratacji. Nie bez znaczenia jest fakt, że w przypadku stosowania cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II lub cementu hutniczego CEM III uzyskuje się także podwyższoną trwałość elementów prefabrykowanych oraz lepszą urabialność mieszanki betonowej. Cementy zawierające granulowany żużel wielopieczowy charakteryzują się jaśniejszą barwą, co jest istotne zwłaszcza przy wykonywaniu barwionych prefabrykatów betonowych. Szybkość narastania wytrzymałości wczesnej zapraw wykonanych z cementów portlandzkich CEM I oraz cementów CEM II i CEM III klasy wytrzymałości 42,5 i 52,5 przedstawia rys. 3.43.

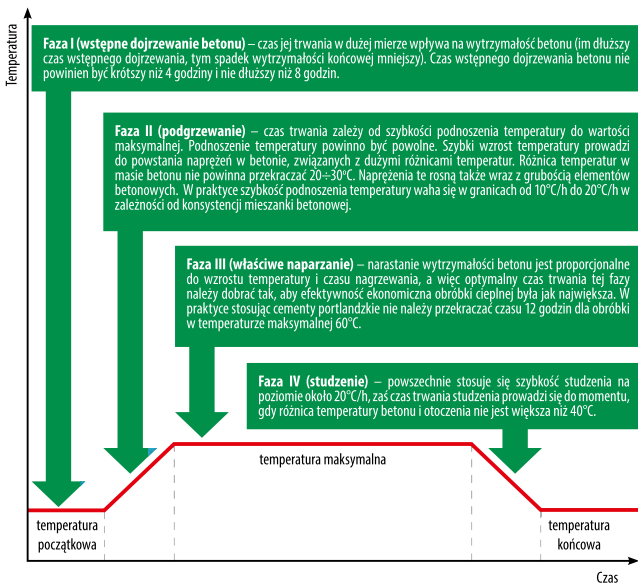


Rys. 3.43. Przyrost wczesnej wytrzymałości na ściskanie normowych zapraw cementowych

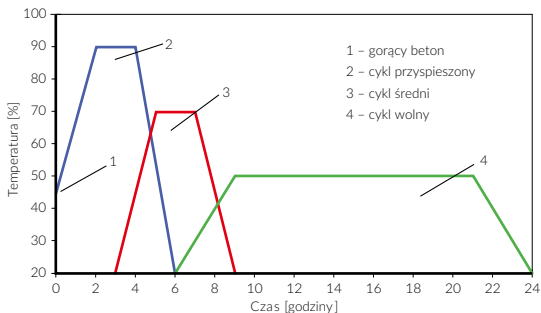
Sposobem na poprawę wytrzymałości wczesnej prefabrykatów jest stosowanie obróbki cieplnej. Najczęściej stosowanymi metodami są:

- niskoprężne naparzenie,
- przyspieszona karbonatyzacja i dojrzewanie w komorze VAPOR.

Inne rodzaje obróbki cieplnej to formowanie na gorąco, elektonagrzewanie oraz nagrzewanie promieniowaniem podczerwonym. Podczas niskoprężnego naparzenia czynnikiem przyspieszającym hydratację cementu jest temperatura i wilgotność. W procesie tym wyróżniamy 4 fazy – rys. 3.44, które mogą być realizowane w różnych cyklach – rys. 3.45.

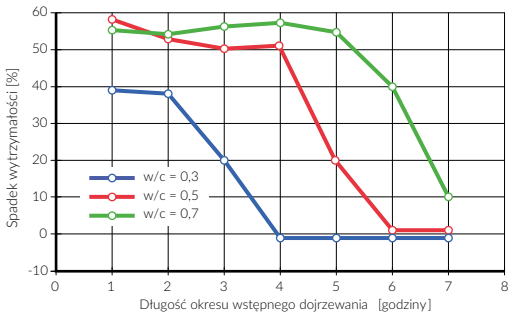


Rys. 3.44. Schemat technologiczny obróbki cieplnej

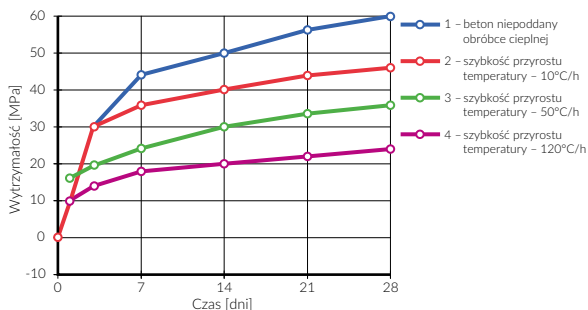


Rys. 3.45. Cykle niskoprężnego naparzenia

Przebieg procesu niskoprężnego naparzenia ma wpływ na końcową wytrzymałość stwardniałego betonu (spadek wytrzymałości). Potwierdzają to wyniki badań przedstawione na rys. 3.46÷3.48.

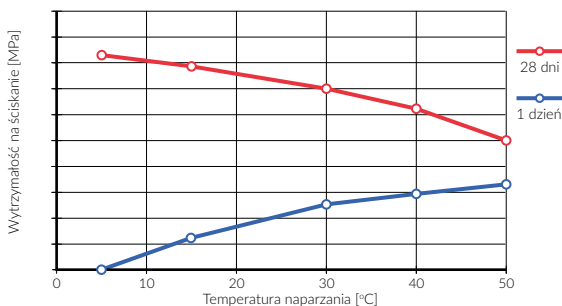


Rys. 3.46. Wpływ czasu wstępnego dojrzewania na wytrzymałość betonu



Rys. 3.47. Wpływ przyrostu temperatury na wytrzymałość betonu

Obróbka cieplna betonu pozwala osiągnąć podwyższone wytrzymałości wczesne. Skutkuje to jednak obniżeniem końcowej wytrzymałości. Spadek wytrzymałości końcowej betonu można ograniczyć poprzez wydłużenie czasu wstępnego dojrzewania. Należy także dobrać optymalną szybkość przyrostu temperatury, zgodnie z zasadą, że im wolniejszy przyrost temperatury, tym wyższe wytrzymałości końcowe. Ponadto, wyniki badań przedstawione na rys. 3.48 pokazują, że optymalizacja procesu obróbki cieplnej musi uwzględnić optymalną temperaturę naparzenia. Zbyt wysoka temperatura odbije się znacznym spadkiem wytrzymałości końcowych.



Rys. 3.48. Wpływ temperatury naparzenia na wytrzymałość betonu

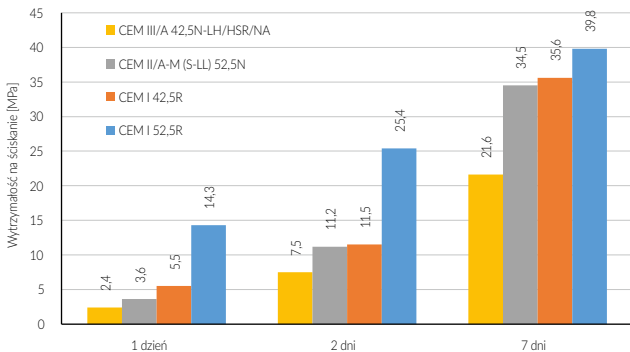
Duże znaczenie w procesie obróbki cieplnej ma zawartość składników nieklinierowych w cemencie, np. popioły lotne, granulowany żużel wielkopiecowy. Podwyższona temperatura przyspiesza reakcję składników żużla i popiołu z wodorotlenkiem wapnia. W związku z tym wytrzymałość betonu z udziałem takich cementów po obróbce cieplnej będzie znacznie wyższa niż wytrzymałość betonu dojrzewającego w naturalnych warunkach.

Innym rodzajem obróbki cieplnej jest technologia VAPOR, która jest połączeniem naparzania niskoprężnego z przyspieszonym procesem karbonatyzacji betonu. Proces ten jest prowadzony w komorach o podwyższonej temperaturze (45°C), wilgotności (85%) oraz podwyższonej zawartości dwutlenku węgla. Gwarantuje to uzyskanie, po 24 godzinach dojrzewania, wytrzymałości betonu na poziomie 70% wytrzymałości projektowanej. Dodatkowo, podwyższona zawartość dwutlenku węgla w komorach, w których dojrzewa beton, powoduje przyspieszenie procesu przejścia wodorotlenku wapnia Ca(OH)_2 , w węglan wapnia CaCO_3 , czego rezultatem jest:

- zwiększenie szczelności zewnętrznej warstwy betonu, poprzez zmniejszenie wymiaru kapilar,
- przypowierzchniowe zwiększenie wytrzymałości betonu,
- znaczne ograniczenie na powierzchni elementów tzw. „wtórnych wykwitów węglanowych”.

Technologia VAPOR najczęściej stosowana jest w produkcji galanterii betonowej (kostka brukowa, palisady, obrzeża, itp.), zwłaszcza barwionej.

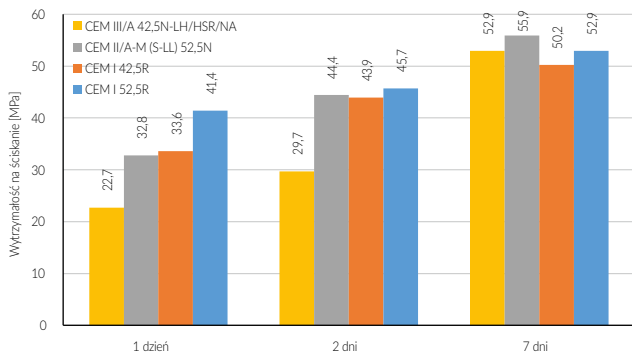
W przypadku obniżonej temperatury dojrzewania zapraw (8°C) przyrost wytrzymałości wczesnej na ściskanie jest wolniejszy dla wszystkich rodzajów cementów, co pokazano na rys. 3.49 Najwyższy poziom wytrzymałości, w warunkach obniżonych temperatur dojrzewania, osiągnany jest przez cementy portlandzkie CEM I 52,5R i CEM I 42,5R oraz cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N.



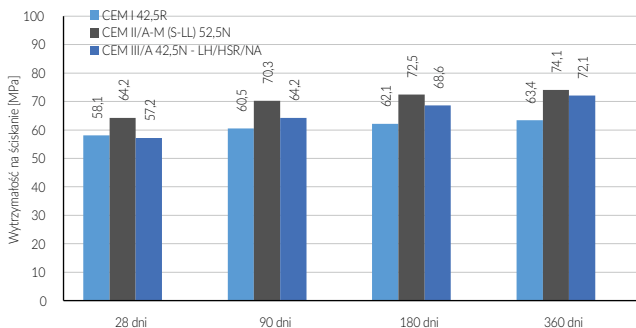
Rys. 3.49. Wytrzymałość na ściskanie normowych zapraw cementowych w temp. +8°C

Podwyższenie temperatury dojrzewania do 38°C znacznie przyspiesza proces twardnienia zapraw cementowych, zwłaszcza wykonanych z cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy (rys. 3.50). W takich warunkach dojrzewania, tj. w okresie od maja do końca września, stosowanie cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA jest uzasadnione technologicznie i ekonomicznie.

Normowa wytrzymałość na ściskanie (28 dni) cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy, takich jak cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5N lub cementy hutnicze CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA jest zbliżona lub wyższa w porównaniu z wytrzymałością cementu portlandzkiego CEM I. W późniejszych okresach przyrost wytrzymałości cementów żużlowych i hutniczych jest znacznie większy niż cementów CEM I – rys. 3.51.



Rys. 3.50. Wytrzymałość na ściskanie normowych zapraw cementowych w temp. +38°C



Rys. 3.51. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych po 28 dniach i w dłuższych okresach twardnienia w temperaturze +20°C

Przyrost wytrzymałości zapraw i betonów w długich okresach twardnienia jest związany z tworzeniem się zwartej struktury betonu, co zapewnia wysoką trwałość obiektom budowlanym, nawet po wielu latach eksploatacji. Efekty te są szczególnie widoczne przy stosowaniu cementu hutniczego CEM III. Z tego powodu w przypadku prefabrykatów narażonych na agresywne wpływy środo-

wiska elementy zbiorników w oczyszczalniach ścieków, elementy nabrzeży morskich, itp.) wskazane jest stosowanie cementu CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA. Właściwie wykonane elementy prefabrykowane, przy użyciu omawianych cementów, charakteryzują się, wysoką szczelnością oraz podwyższoną odpornością na agresywne działanie czynników chemicznych (rys. 3.52).

Dużym problemem producentów prefabrykatów betonowych są powstające na ich powierzchni wykwit węglanowe. Stosowanie cementów z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego, np. CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA zmniejsza tendencję do występowania wykwitów. Spowodowane jest to ograniczeniem zawartości klinkieru w składzie cementu oraz zmniejszoną porowatością, a za razem zwiększoną szczelnością stwardniałego betonu. Zmiany w strukturze twardniejącego betonu spowodowane są tym, że aktywne składniki granulowanego żużla wielkopieczowego reagują z Ca(OH)_2 pochodzącym z hydratacji faz krzemianowych klinkieru. Produktem tej reakcji jest dodatkowa ilość żelowej fazy C-S-H, która wypełnia kapilary powstałe przez związanie i/lub odparowanie wody. W ten sposób zmianie ulega struktura porów, zwiększa się ilość bardzo drobnych porów żelowych, które są zamknięte dla cieczy, a zmniejszeniu ulega ilość porów kapilarnych odpowiedzialnych za transport czynników korozyjnych do wnętrza betonu (patrz rozdział 5.5).



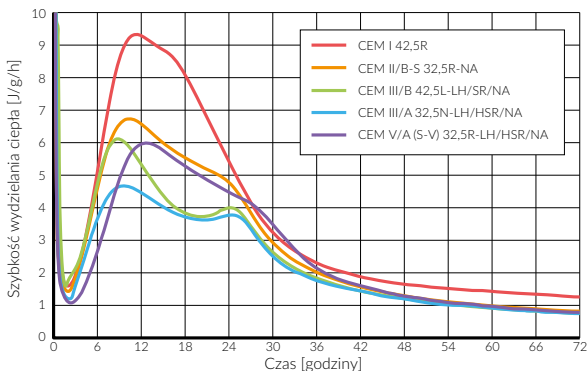
Rys. 3.52. Prefabrykowane rury betonowe – zastosowano CEM II/A-S 52,5N

3.6.3. Cement w betonie masywnym i hydrotechnicznym

Pod pojęciem beton masywny (o dużej objętości) należy rozumieć konstrukcje (elementy) o niskim stosunku powierzchni do objętości występujące w budownictwie hydrotechnicznym, oczyszczalniach ścieków, przy budowie fundamentów, podpór mostów, itp. Cement stosowany w wykonawstwie do tego rodzaju konstrukcji powinien charakteryzować się:

- niskim ciepłem hydratacji (LH) lub bardzo niskim ciepłem hydratacji (VLH),
- podwyższoną odpornością na agresję chemiczną,
- wydłużonym początkiem czasu wiązania (praca w terenie, dalekie odległości, warunki zabudowy).

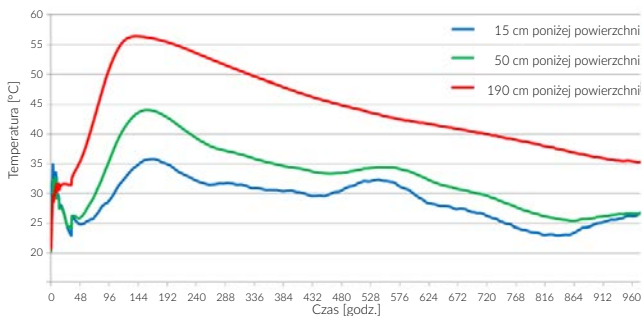
Cement o takiej charakterystyce można uzyskać na drodze modyfikacji składu mineralnego klinkieru (ograniczona zawartość C_3S i C_3A) lub w efekcie zastosowania nieklinkierowych składników głównych. Takimi spoiwami są cementy hutnicze CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA, CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA, cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA. Są to idealne materiały wiążące dla potrzeb budowy elementów masywnych, co potwierdzają wyniki badań zaprezentowane na rys. 3.53. Stosowanie cementów CEM III÷CEM V pozwala ograniczyć ilość wydzielanego ciepła w trakcie hydratacji cementu, przez co ogranicza się powstawanie rys termicznych i w znaczący sposób poprawia trwałość.



Rys. 3.53. Szybkość wydzielania ciepła w zależności od rodzaju cementu

Przykładem zastosowania cementów o niskim ciepłe hydratacji (LH) jest realizacja fundamentów kotłowni nowych bloków energetycznych w elektrowni Opolu. Wykonano dwie płyty żelbetowe o wymiarach 83x78m, grubości 3,0 - 3,5m. Łączna objętość zabudowanej mieszanki betonowej wyniosła 18 460 m³, w każdym z fundamentów. Termin realizacji fundamentu kotłowni bloku nr 6 przypadła w okresie 21÷25 lipca, przy temperaturach zewnętrznych 25÷35°C. Kontrola temperatury w twardniejącym betonie była prowadzona przez 40 dni za pomocą systemu pomiarowego połączonego z czujnikami temperatury o dokładności 0,1°C (rys. 3.54).

Zastosowanie cementu hutniczego CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA w połączeniu z popiołem lotnym (33%) oraz odpowiednia pielęgnacja pozwoliły ograniczyć różnicę temperatur między powierzchnią a wnętrzem płyty. Maksymalna różnica temperatury w twardniejącym betonie wyniosła 14,2°C/m. W efekcie gradient temperatury (Δt) nie przekroczył dopuszczalnej wartości 20°C/m, ograniczone zostało ryzyko powstania naprężeń termicznych, które mogłyby spowodować spękania betonu.



Rys. 3.54. Temperatura betonu w płycie fundamentowej kotłowni w Elektrowni Opolu

Szczególną uwagę przy produkcji betonu masywnego (rys. 3.55) i hydrotechnicznego należy zwrócić na projektowanie, wykonanie i zabudowę betonu w obiekcie. W celu uzyskania dobrego jakościowo betonu niezbędne jest stosowanie domieszek chemicznych, zwłaszcza superplastyfikatorów, które redukują zawartość wody w mieszance betonowej. Bardzo ważna jest także właściwa pielęgnacja poprzez tradycyjne zraszanie wodą, pokrywanie folią i matami oraz

nanoszenie powłok wodoszczelnych przez rozpylanie. W przypadku betonów masywnych i hydrotechnicznych zaleca się wydłużyć okres pielęgnacji wilgotnościowej nawet do 2 tygodni (patrz rozdział 5.7).

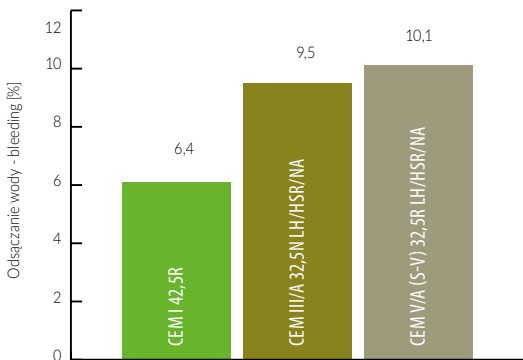


Rys. 3.55. Elektrownia Opole – zastosowano CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA

3.6.4. Cement w wykonawstwie posadzek betonowych

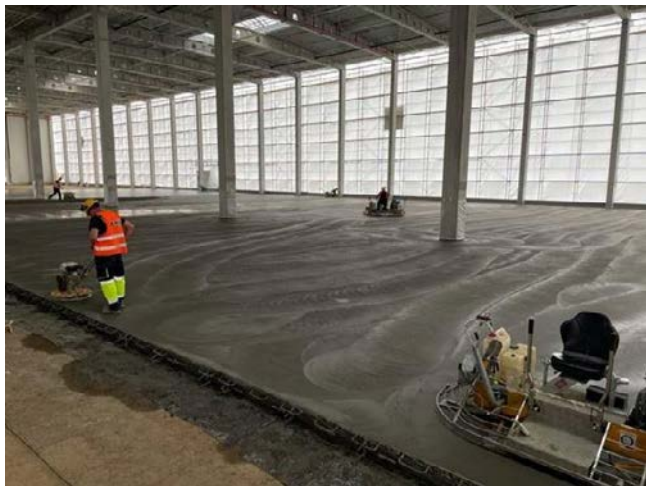
Jakość i trwałość betonu posadzkowego zależy od wielu czynników technologicznych. Ważna jest także świadomość, że mieszanka betonowa przeznaczona do wykonania posadzki powinna spełniać wiele dodatkowych wymagań, które nie są specyfikowane w przypadku betonu towarowego.

Posadzki betonowe najczęściej wykonuje się z betonu klasy C20/25 ÷ C35/45. Zalecane klasy wytrzymałości cementu to 32,5 (R, N) lub 42,5N. Rodzaj cementu należy dobrać uwzględniając temperaturę otoczenia, projektowaną klasę wytrzymałości betonu oraz klasę ekspozycji (warunki środowiskowe pracy betonu). W przypadku wysokich temperatur otoczenia i korozyjnego oddziaływania środowiska wskazane jest stosowanie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM III/A, B, lub cementów hutniczych CEM III. Cementy te, w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I, charakteryzują się wydłużonym czasem wiązania i opóźnionym przyrostem wytrzymałości (w poszczególnych klasach wytrzymałości), co jest bardzo korzystne w przypadku wykonywania posadzek utwardzanych powierzchniowo. Wydłużony czas wiązania przekłada się na dłuższy okres, w którym można nanieść posypkę utwardzającą. Cementy zawierające nieklinkierowe składniki główne poprawiają także urabialność mieszanki betonowej, ograniczają wydzielanie wody na powierzchnię wykonywanej posadzki (bleeding – rys. 3.56) oraz korzystnie wpływają na szczelność stwardniałego betonu.



Rys. 3.56. Wpływ rodzaju cementu na „bleeding”

W przypadku stosowania cementów CEM II/B-M (S-V) 42,5N i CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA bardzo ważną rolę odgrywa odpowiednia pielęgnacja wilgotnościowa wykonanej posadzki i terminowe wykonywanie szczelin dylatacyjnych.



Rys. 3.57. Betonowa posadzka przemysłowa – zastosowano CEM II/B-M (S-V) 42,5N

3.6.5. Cement w budowie dróg i mostów

Beton stosowany do budowy dróg i mostów musi charakteryzować się wysoką jakością, ponieważ poddawany jest dużym obciążeniom mechanicznym oraz działaniu zmiennych temperatur i środków odładzających. Beton konstrukcyjny i nawierzchniowy powinien spełniać wymagania określone we Wzorcowych Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWIORB), tzn. być zaprojektowany z odpowiedniej jakości materiałów (cementu, kruszyw niereaktywnych), prawidłowo wykonany i zagęszczony oraz odpowiednio pielęgnowany.

Warunki doboru cementu, zawarte w WWIORB, opierają się na rodzaju i funkcji elementu konstrukcji w drogowym obiekcie inżynierskim oraz warunkach środowiskowych (klasach ekspozycji wg PN-EN 206), w jakich będą pracować. Wymagania

te przedstawiono w tabeli 3.34 i 3.35. Zaktualizowane WWiORB rozszerzają asortyment cementów możliwych do zastosowania w inżynierii komunikacyjnej. Najistotniejszą zmianą jest dopuszczenie do stosowania w betonie nawierzchniowym cementów portlandzkich CEM I o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$, cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II oraz cementów hutniczych CEM III.

Dodatkowo ogólna specyfikacja techniczna dla nawierzchni betonowych podaje zasady stosowania cementów o właściwościach specjalnych, tj.:

- cementów niskoalkalicznych NA wg normy PN-B-19707, które należy stosować jeżeli wyniki badania reaktywności kruszywa będą niejednoznaczne (wyniki na górnej granicy kategorii RO – kruszywo niereaktywne lub w kategorii R1 – kruszywo umiarkowanie reaktywne),
- cementów odpornych na siarczan SR wg normy PN-EN 197-1 lub HSR wg normy PN-B 19707, które należy stosować, jeżeli w trakcie użytkowania nawierzchni betonowej może zaistnieć ryzyko wystąpienia agresji siarczanowej – klasy ekspozycji XA2 i XA3 wg PN-EN 206.

Zgodnie z decyzją Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad WWiORB stanowią obowiązującą podstawę opracowania szczegółowej specyfikacji, stosowanej jako dokument przetargowy i kontraktowy przy zlecaniu i realizacji robót na drogach krajowych. Zalecane są także do wykorzystania przy zlecaniu robót na drogach wojewódzkich, powiatowych i gminnych (<http://www.gddkia.gov.pl>).

Tabela 3.34. Wymagania WWiORB dla betonu konstrukcyjnego

Rodzaj betonu	Wymagania dla cementu
Beton konstrukcyjny	<ul style="list-style-type: none"> – cement portlandzki CEM I, spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki niskoalkaliczny CEM I – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707; – cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S, spełniający wymagania PN-EN 197-1; – cement portlandzki żuźlowy niskoalkaliczny CEM II/A-S – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707; – cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL), spełniający wymagania PNEN 197-1; – cement portlandzki wieloskładnikowy niskoalkaliczny CEM II/A-M (S-LL) – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707; – cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-V), spełniający wymagania PNEN 197-1; – cement portlandzki wieloskładnikowy niskoalkaliczny CEM II/A-M (S-V) – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707; – cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S, spełniający wymagania PN-EN 197-1; – cement portlandzki żuźlowy niskoalkaliczny CEM II/B-S – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707; – cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V, spełniający wymagania PN-EN 197-1; – cement portlandzki popiołowy niskoalkaliczny CEM II/A-V – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707; – cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL klasy wytrzymałościowej 42,5 i wyższej, spełniający wymagania PN-EN 197-1; – cement portlandzki wapienny niskoalkaliczny CEM II/A-LL- NA klasy wytrzymałościowej 42,5 i wyższej, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707.
Beton konstrukcyjny sprężony	cement portlandzki CEM I
Beton konstrukcyjny masywny	<p>Zaleca się stosowanie cementów o niskim cieple hydratacji LH. Dopuszcza się cement hutniczy CEM III/A-NA (dla elementów narażonych na oddziaływanie środowiska w klasie ekspozycji XF4 należy spełnić dodatkowe wymagania: klasa wytrzymałości cementu $\geq 42,5$ lub klasa wytrzymałości cementu $\geq 32,5$ R z zawartością granulowanego żuźla wielkopieczowego $\leq 50\%$)</p> <p>W fundamentach masywnych dopuszcza się stosowanie cementu wieloskładnikowego CEM V/A (S-V) LH</p>
Beton konstrukcyjny w klasach ekspozycji XA2, XA3	należy stosować cementy odporne na siarczany SR wg PN-EN 197-1 lub HSR spełniające wymagania normy PN-B 19707, zalecane do stosowania w klasie ekspozycji XA2 i XA3 w warunkach agresji siarczanowej wg PN-B 06265
Do betonu klasy wytrzymałości na ściskanie wyższej niż C30/37 powinien być stosowany cement klasy nie niższej niż 42,5	

Tabela 3.35. Wymagania WWIORB dotyczące cementu dla betonowych nawierzchni drogowych

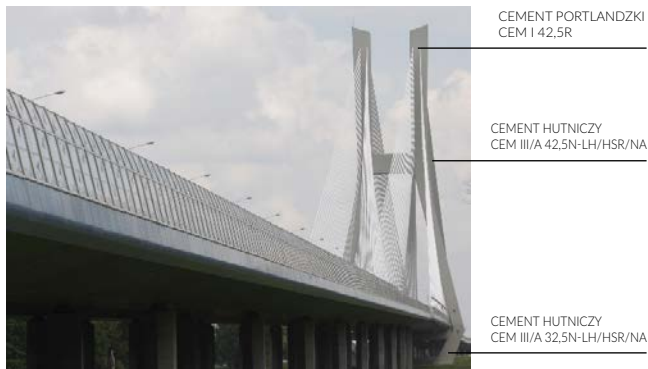
Rodzaj nawierzchni	Rodzaj cementu	Wymagania specjalne	Kategoria ruchu
<p>Nawierzchnia dwuwarstwowa, gdy górna i dolna warstwa są z różnych mieszanek, a górna warstwa jest z kruszywem odkrytym.</p> <p>Nawierzchnia dwuwarstwowa gdy górna i dolna warstwa są z tej samej mieszanki.</p> <p>Nawierzchnia jednowarstwowa</p>	<p>Cement portlandzki: - CEM I 32,5 N - CEM I 32,5 R</p>	<p>Początek wiązania wg PN-EN 196-3 \geq 120 minut Stopień zmielenia wg PN-EN 1196-6 \leq 3500 cm²/g Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 Na₂O_{eq} \leq 0,80 %</p>	KR5÷KR7
	<p>Cement portlandzki: - CEM I 42,5 N - CEM I 42,5 R</p>	<p>Początek wiązania wg PN-EN 196-3 \geq 90 minut Stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 \leq 3800 cm²/g Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 Na₂O_{eq} \leq 0,80 %</p>	
	<p>Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S</p> <p>Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S</p>	<p>Początek wiązania wg PN-EN 196-3 \geq 120 minut Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 Na₂O_{eq} \leq 0,80 %</p>	
<p>Nawierzchnia dwuwarstwowa, gdy górna i dolna warstwa są z tej samej mieszanki.</p> <p>Nawierzchnia jednowarstwowa.</p>	<p>Cement portlandzki: - CEM I 32,5 N - CEM I 32,5 R</p>	<p>Początek wiązania wg PN-EN 196-3 \geq 120 minut Stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 \leq 3500 cm²/g Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 Na₂O_{eq} \leq 0,80 %</p>	KR1÷KR4
	<p>Cement portlandzki: - CEM I 42,5 N - CEM I 42,5 R</p> <p>Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S</p>	<p>Początek wiązania wg PN-EN 196-3 \geq 90 minut Stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 \leq 3800 cm²/g Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 Na₂O_{eq} \leq 0,80 %</p> <p>Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 Na₂O_{eq} \leq 0,80 %</p>	

Rodzaj nawierzchni	Rodzaj cementu	Wymagania specjalne	Kategorie ruchu
<p>Nawierzchnia dwuwarstwowa, gdy górna i dolna warstwa są z tej samej mieszanki.</p> <p>Nawierzchnia jednowarstwowa.</p>	Cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL	Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$	KR1÷KR3
	Cement portlandzki popiołowy CEM III/A-V ¹⁾	Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,20\%$	
	Cement portlandzki wielokładnikowy CEM II/A-M (S-V) ¹⁾	Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,20\%$	
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S	Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,90\%$	KR1÷KR4
	Cement portlandzki wielokładnikowy CEM II/A-M (S-LL)	Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$	
	Cement hutniczy CEM III/A ²⁾	Zawartość alkaliów wg PN-EN 196-2 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,05\%$	

1) jeśli nawierzchnia nie będzie poddawana działaniu środków odciążających; strata prażenia popiołolatnego użytego do produkcji cementu nie więcej niż 5% (kategoria A wg PN-EN 450-1)

2) min. klasa wytrzymałości cementu 42,5

Przykładem rozsądnego podejścia przy doborze cementu do konstrukcji betonowej w inżynierii komunikacyjnej jest wykonanie pylonu Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu (rys. 3.58).



Rys. 3.58. Pylon Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu – dobór cementu

W budowie fundamentów pylonu (beton C30/37), ze względu na ich masywność zastosowano cement o niskim cieple hydratacji LH dodatkowo odpornym na agresję siarczanową HSR – cement hutniczy CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA. Podstawę pylonu (beton C50/60) wykonano z cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA, co pozwoliło na właściwe betonowanie w technologii ślizgowej. Natomiast górny poziom pylonu (beton C50/60), w którym zakotwiono wanty, wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Jest to przykład racjonalnego wykorzystania właściwości użytkowych poszczególnych cementów. W efekcie usprawniono proces budowy i zapewniono odpowiednią trwałość całej konstrukcji pylonu.

3.6.6. Cement w produkcji suchych zapraw i tynków

Producenci suchych zapraw i tynków najczęściej korzystają z cementów portlandzkich CEM I. Wynika to z wieloletnich doświadczeń i przyzwyczajajeń, ustabilizowanej produkcji opartej na tego rodzaju cemencie. Alternatywnie można stosować cementy portlandzkie wieloskładnikowe, np. CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, lub cement hutniczy CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA. Zmianę rodzaju cementu należy poprzedzić próbami technologicznymi.

3.7. Cementy Góraźdże Cement S.A. - przykłady zastosowań

Cementy oferowane przez Góraźdże Cement S.A. od wielu lat są z powodzeniem stosowane w różnych dziedzinach budownictwa. Wysoka jakość produkowanych spoiw oraz ich właściwości użytkowe umożliwiają wykonanie zarówno typowych, jak i specjalistycznych konstrukcji i elementów. Wybrane przykłady zrealizowanych obiektów przedstawiono na rys. 3.59÷3.64.



Rys. 3.59. Dworzec PKP w Katowicach – zastosowano CEM II/B-S 32,5R-NA,
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA



Rys. 3.60. Budowa nowych bloków energetycznych w Elektrowni Opole – zastosowano CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA, CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA



Rys. 3.61. Obwodnica Malni i Choruli, woj. opolskie (DW 423) – zastosowano CEM I 42,5N-NA



Rys. 3.62. Marina III we Wrocławiu, beton architektoniczny barwiony – zastosowano CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA



Rys. 3.63. Most na rzece Odrze w Opole – zastosowano CEM I 42,5R



Rys. 3.64. Beton jamisty jako warstwa drenażowa pod boisko sportowe – zastosowano CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA

3.8. Właściwości i zastosowanie cementu wapieniowo siarczanoglinianowego (CSA)

Cement wapieniowo siarczanoglinianowy (CSA) – jest to mineralne spoiwo hydrauliczne wytwarzane w wyniku przemiatu klinkieru wapieniowo siarczanoglinianowego oraz siarczanu wapnia. Produkcja klinkieru CSA odbywa się w instalacji piecowej takiego samego rodzaju, jak produkcja klinkieru portlandzkiego. Surowcami do produkcji klinkieru siarczanoglinianowego są kamień wapienny, boksyt lub inne surowce glinonośne oraz gips. Temperatura syntezy klinkieru wynosi około 1250°C i jest niższa ok. 200°C w porównaniu do temperatury syntezy klinkieru portlandzkiego (1450°C). Grupa Góraźdze oferuje zmielony klinkier wapieniowo siarczanoglinianowy i.tech ALI PRE GREEN oraz cement wapieniowo siarczanoglinianowy i.tech ALI CEM GREEN.

3.8.1. Właściwości chemiczne

Klinkier wapniowo-siarczanoglinianowy (CSA) charakteryzuje się odmiennym składem chemicznym i mineralogicznym w porównaniu do klinkieru portlandzkiego (tabela 3.36 i 3.37). Głównym składnikiem fazowym klinkieru wapniowo-siarczanoglinianowego jest ye'elimit ($C_4A_3\$$). W konsekwencji inny jest przebieg hydratacji spoiw z jego udziałem, co w głównej mierze decyduje o właściwościach cementu wapniowo siarczanoglinianowego.

Tabela 3.36. Skład fazowy klinkieru siarczanoglinianowego w porównaniu do klinkieru portlandzkiego

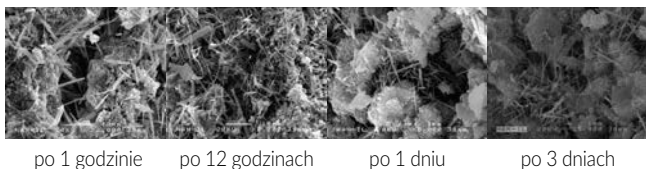
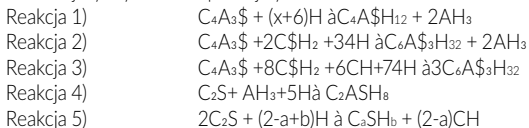
Rodzaj klinkieru	Zawartość składnika [%]								
	$C_4A_3\$$ (Ye'elimit)	C_3S (Alit)	C_2S (Belit)	$C\$$ (Anhydryt)	$3C_2S$ $3C\$$ CaF_2	C_3A	C_4AF	MgO (Peryklaz)	C_3MS_2 (Merwinitt)
CSA	64,9	-	10,4	2,6	9,4	-	1,2	4,9	0,8
portlandzki	-	69,0	9,6	-	-	9,4	9,0	-	-

Tabela 3.37. Skład chemiczny klinkieru wapniowo siarczanoglinianowego CSA i portlandzkiego

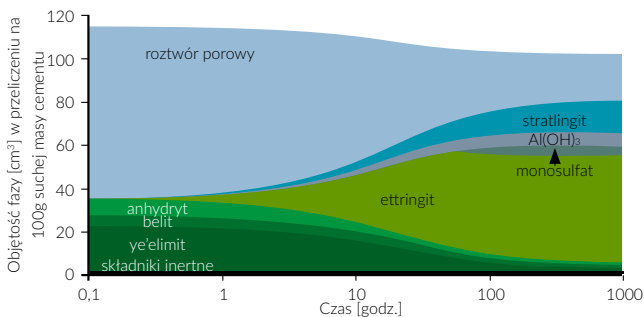
Rodzaj klinkieru	Zawartość składnika [%]								
	Strata prażenia	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_2	Na ₂ O	K ₂ O
CSA	0,46	9,2	28,1	1,52	39,20	3,50	11,4	0,08	0,35
portlandzki	1,01	21,24	5,51	3,01	66,85	1,51	0,50	0,15	0,64

Przebieg reakcji hydratacji cementu siarczanoglinianowego CSA przedstawiono na rys. 3.65 i 3.66. Ye'elimit w reakcji z wodą tworzy uwodniony monosiarczanoglinian wapnia $C_4A\$H_{12}$ i wodorotlenek glinu AH_3 (reakcja 1), a w obecności siarczanu wapnia powstaje ettringit $C_6A\$_3H_{32}$ i wodorotlenek glinu AH_3 (reakcja 2). W obecności większej ilości wodorotlenku wapnia tworzy się tylko ettringit, wg reakcji (reakcja 3). Powstawanie ettringitu odpowiada za szybki przyrost wytrzymałości wczesnej oraz ograniczenie skurczu, a przy

stosunkowo wysokim dodatku gipsu, również za ekspansję. Z powstawaniem dużych ilości ettringitu związane jest zjawisko „samoosuszania”, gdyż do wytworzenia ettringitu potrzebne są 32 cząsteczki wody. Klinkier siarczanogliniany, jako drugi pod względem ilościowym składnik fazowy, zawiera belit C_2S . W wyniku hydratacji belitu, w obecności AH_3 , powstaje głównie stratlingit C_2ASH_8 (reakcja 4), może również powstawać faza C-S-H oraz wodorotlenek wapnia $Ca(OH)_2$ (reakcja 5). Wytwarzany w procesie hydratacji belitu wodorotlenek wapnia $Ca(OH)_2$ (reakcja 5) przyspiesza proces reakcji ye'elimitu ($C_4A_3\$$) z wodą. W związku z wolniejszym przebiegiem reakcji hydratacji belitu, wpływa ona na rozwój wytrzymałości w późniejszych okresach twardnienia.



Rys. 3.65. Mikrostruktura zaczynu z cementu siarczanoglinianowego CSA



Rys. 3.66. Przebieg reakcji hydratacji cementu CSA

3.8.2. Właściwości fizyczne i mechaniczne

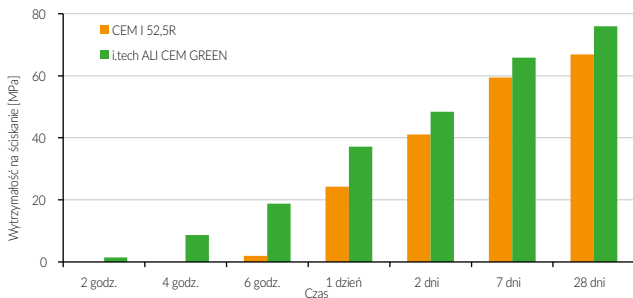
Właściwości cementu i.tech ALI CEM GREEN w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 52,5R przedstawiono w tabeli 3.38. Cement i.tech ALI CEM GREEN charakteryzuje się wysoką wytrzymałością wczesną (po 2 dniach), jak i normową¹ (po 28 dniach) oraz bardzo krótkim czasem początku (<15 min) i końca wiązania (< 30 min). Cechą wyróżniającą cement na bazie klinkieru CSA jest wysoka dynamika narastania bardzo wczesnych wytrzymałości (kilkugodzinnych) w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I 52,5R (rys. 3.67). Wytrzymałości wczesne w obniżonych temperaturach cementu i.tech ALI CEM GREEN są także relatywnie wysokie (rys. 3.68). Właściwości te predestynują tego rodzaju cement do produkcji spoiw lub zapraw naprawczych szybko wiążących i szybkotwardniejących oraz betonów natryskowych.

Tabela 3.38. Właściwości cementu siarczanoglinianowego i.tech ALI CEM GREEN

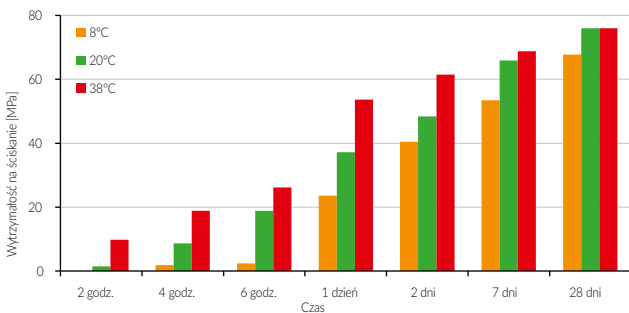
Właściwość	Jednostka	i.tech ALI CEM GREEN	CEM I 52,5R
Stażość objętości, Le Chatelier	[mm]	1	1
Początek czasu wiązania	[min]	13	150
Koniec czasu wiązania	[min]	21	190
Wytrzymałość na ściskanie: - po 2 dniach - po 28 dniach	[MPa]	48,4 76,0	41,1 66,9
Wodozadržność	[%]	31,0	32,8
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a	[cm ² /g]	5600	5050

Cement siarczanoglinianowy i.tech ALI CEM GREEN charakteryzuje się niższą sumaryczną ilością wydzielonego ciepła po 41 godz. niż cement portlandzki CEM I 52,5R. Wyróżnia się jednak znacznie szybszą dynamiką wydzielania ciepła w początkowym okresie hydratacji (rys. 3.69). W pierwszych 6 godzinach powstająca ilość ciepła jest ponad 2-krotnie wyższa niż w przypadku cementu portlandzkiego CEM I 52,5R.

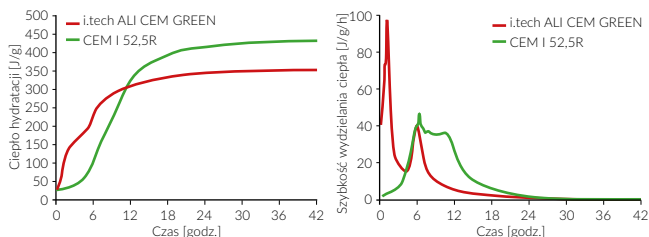
¹ cement i.tech ALI CEM GREEN nie jest objęty zakresem normy PN-EN 197-1, termin „normowa”/”normowy” odnosi się do właściwości opisanych w normie PN-EN 197-1



Rys. 3.67. Wytrzymałość na ściskanie cementu siarczanoglinianowego i.tech ALI CEM GREEN i cementu portlandzkiego CEM I 52,5R ($w/c = 0,5$)

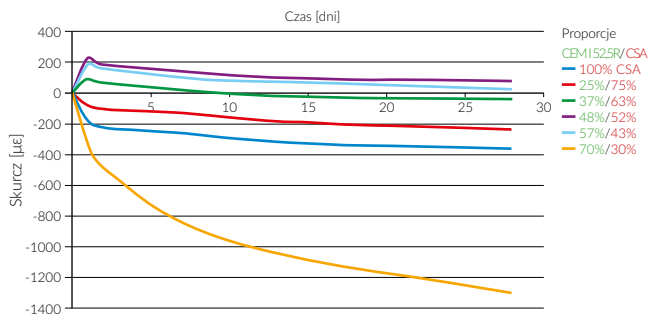


Rys. 3. 68. Wytrzymałość na ściskanie cementu wapieniowo siarczanoglinianowego i.tech ALI CEM GREEN w różnych temperaturach ($w/c = 0,5$)



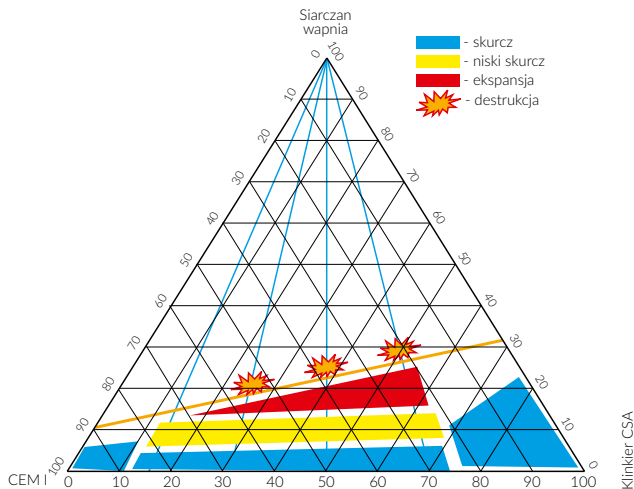
Rys. 3.69. Ciepło hydratacji i szybkość jego wydzielenia wg PN-EN 196-9

Cement i.tech ALI CEM GREEN charakteryzuje się znacznie niższym skurczem w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 52,5R (rys. 3.70). Spoiwa otrzymane poprzez zmieszanie cementu i.tech ALI CEM GREEN z cementem portlandzkim CEM I pozwalają uzyskać kompozyty (zaczyny, zaprawy i betony) bezskurczowe lub wykazujące niewielką ekspansję.



Rys. 3.70. Skurcz spoiw z cementu wapniowo siarczanoglinianowego i.tech ALI CEM GREEN i cementu portlandzkiego CEM I 52,5R

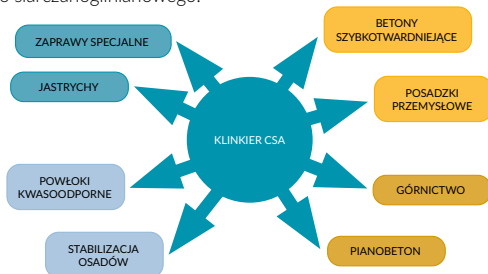
Na rys. 3.71 przedstawiono obszary zalecanych składów spoiw z klinkieru CSA, cementu portlandzkiego CEM I i siarczanu wapnia ze względu na zmiany objętościowe zaczynu (skurcz/ekspansja).



Rys. 3.71. Zalecane obszary składów ze względu na zmiany objętościowe spoiw w układzie klinkier CSA/cement portlandzki CEM I/ siarczan wapnia

3.8.3. Kierunki zastosowań cementu wapniowo siarczanoglinianowego

Na rys. 3.72 – 3.76 przedstawiono główne kierunki zastosowań cementu wapniowo siarczanoglinianowego.



Rys. 3.72. Główne kierunki zastosowań klinkieru i cementu wapniowo siarczanoglinianowego



Rys. 3.73. Beton naprawczy – płyta postojowa na lotnisku w Paryżu



Rys. 3.74. Jastrychy samopoziomujące



Rys. 3.75. Pianobeton z cementem CSA



Rys. 3.76. Zaprawy naprawcze

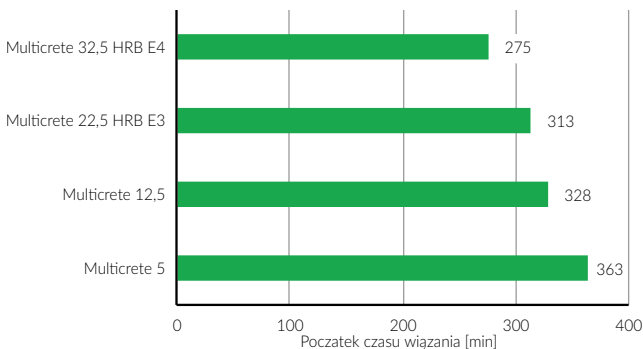
3.9. Właściwości hydraulicznych spoiw drogowych

Hydrauliczne spoiwa drogowe MULTICRETE® produkowane przez Góraźdże Cement S.A. spełniają wymagania normy PN-EN 13282-1 lub krajowej oceny technicznej nr IBDiM-KOT-2018/0130 wyd. 1.

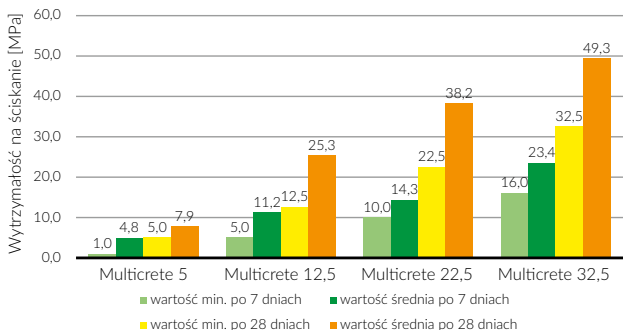
3.9.1. Właściwości fizyko-mechaniczne spoiw drogowych MULTICRETE

Składnikiem głównym spoiw MULTICRETE® jest granulowany żużel wielkopieczowy, co modyfikuje szereg cech użytkowych, w szczególności zwiększa odporność kompozytu spoiwowego na agresję chemiczną ze strony środowiska (chlorkową, siarczanową, alkaiczną), wydłuża czas wiązania (rys. 3.77), obniża ciepło hydratacji oraz zwiększa przyrost wytrzymałości na ściskanie w długich okresach twardnienia (rys. 3.78). Pozostałymi składnikami spoiwa drogowego MULTICRETE® są klinkier cementu portlandzkiego, popioły lotne (krzemionkowe i/lub wapienne), produkty uboczne z procesu produkcji klinkieru portlandzkiego oraz siarczan wapnia.

Wytrzymałość na ściskanie hydraulicznych spoiw drogowych MULTICRETE® po 7 i 28 dniach dojrzewania przedstawiona została na rys. 5.78.



Rys. 3.77. Początek czasu wiązania hydraulicznych spoiw drogowych MULTICRETE®



Rys. 3.78. Wytrzymałość na ściskanie hydraulicznych spoiw drogowych MULTICRETE®

3.9.2. Przykłady zastosowań hydraulicznych spoiw drogowych Multicrete

Hydrauliczne spoiwa drogowe MULTICRETE® łączą w sobie jednocześnie cechy charakterystyczne dla spoiw tradycyjnych, takich jak cement i wapno, z powodzeniem znajdują zastosowanie przy ulepszaniu słabych i przydatnych w budownictwie gruntów rodzimych i antropogenicznych. Spoiwa MULTICRETE® są w pełni przydatne do wykonania podbudowy pomocniczej i zasadniczej dla kategorii obciążenia ruchem KR1÷KR7 według Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych oraz wykonania podbudowy nawierzchni twardej nieulepszonej w technologii nawierzchni stabilizowanej mechanicznie. Mogą też być stosowane jako materiał ulepszający właściwości mieszanki gruntowo-spoiwowej z zabezpieczeniem górnej powierzchni natryskiem z emulsji asfaltowej. Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE® znajduje zastosowanie także w budownictwie komunikacyjnym w zakresie:

- dróg publicznych, bez ograniczeń, w rozumieniu i zgodnie z warunkami określonymi w rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 43, poz. 430 ze zm.) oraz w rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych (Dz. U. Nr 12, poz. 116 ze zm.).
- dróg wewnętrznych, bez ograniczeń, w rozumieniu przepisów ustawy z dnia

- 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Dz. U. Nr 14 poz. 60, tekst jednolity)
- kolejowych obiektów inżynieryjnych z ograniczeniem do podtorza, w rozumieniu i zgodnie z warunkami określonymi w rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 151, poz. 987).
 - lotnisk cywilnych z ograniczeniem do:
 - nawierzchni dróg startowych,
 - nawierzchni dróg kołowania,
 - nawierzchni płyt,nawierzchni wydzielonych miejsc postoju, w rozumieniu i zgodnie z warunkami określonymi w rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 31 sierpnia 1998 r. w sprawie warunków techniczno-budowlanych dla lotnisk cywilnych (Dz. U. Nr 130, poz. 859 ze zm.).

Hydrauliczne spoiwa drogowe MULTICRETE® produkowane na bazie granulowanego żużla wielkopiecowego znalazły zastosowanie w licznych realizacjach na terenie całego kraju, z których wybrane przedstawiono na rys. 3.79-3.81.



Rys. 3.79. Budowa drogi ekspresowej S7, miejscowość Brzegi, koło Kielc



Rys. 3.80. Budowa autostrady A1, odcinek F, okolice Częstochowy



Rys. 3.81. Realizacja obwodnicy miejscowości Skąta

4

Kruszywo

4.1. Wymagania podstawowe

Podstawowymi dokumentami odniesienia dla kruszywa stosowanego w obszarze budownictwa są normy:

- PN-EN 12620 „Kruszywa do betonu”
- PN-EN 13139 „Kruszywa do zaprawy”,
- PN-EN 13242 „Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym”,
- PN-EN 13055-1 „Kruszywa lekkie. Część 1: Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy”,
- PN-EN 13043 „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”.

Kruszywo ze względu na udział objętościowy w betonie, który wynosi ok. 70%, odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu właściwości zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Objętościowy udział składników w betonie

W wielu zastosowaniach podstawowe właściwości betonowych wyrobów budowlanych uzyskiwane są dzięki zastosowaniu odpowiedniego kruszywa.

Dobrym przykładem w tym względzie są, np. górne warstwy nawierzchni betonowych na drogach szybkiego ruchu i autostradach (rys. 4.2).

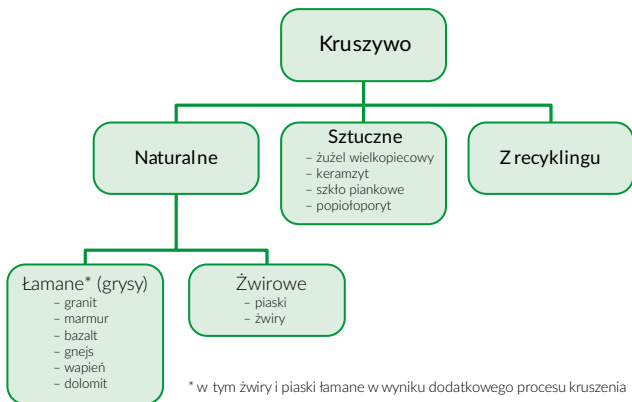


Rys. 4.2. Klasy ekspozycji dla górnej warstwy nawierzchni z betonu cementowego

4.1.1. PN-EN 12620 Kruszywa do betonu

Norma PN-EN 12620 wprowadza podział kruszywa do betonu (rys. 4.3) na:

- kruszywo naturalne - kruszywo pochodzenia mineralnego, które poza obróbką mechaniczną nie zostało poddane żadnemu innemu procesowi,
- kruszywo sztuczne - kruszywo pochodzenia mineralnego, uzyskane w wyniku procesu przemysłowego obejmującego obróbkę termiczną lub inną modyfikację,
- kruszywo z recyklingu - kruszywo powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie,
- kruszywo z odzysku - kruszywo uzyskane przez wyflukanie z mieszanki betonowej lub przez przekruszenie betonu, który nie był wcześniej zastosowany w budownictwie.



Rys. 4.3. Podział i przykłady kruszyw według PN-EN 12620

Najpowszechniej w betonie stosuje się kruszywa naturalne, przykłady przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Kruszywa budowlane: a) piasek, b) żwir, c) grysy granitowy

4.1.1.1. Wymagania geometryczne

WYMIAR KRUSZYWA

Wymiar kruszywa, wyrażony jako d/D , określony jest przez dolny (d) i górny wymiar (D) sita przez które przechodzi (D) i na którym pozostaje (d) określona ilość ziaren kruszywa (uwzględniająca obecność nadziarna oraz podziarna).

Wymiar kruszywa należy określać za pomocą dwóch wymiarów sit wybranych z zestawu podstawowego lub podstawowego plus zestaw 1 lub zestaw 2 (tabela 4.1). Łączenie wymiarów z zestawu 1 i 2 jest niedopuszczalne. Wymiary kruszywa powinny posiadać stosunek D/d nie mniejszy niż 1,4.

Tabela 4.1. Zestawy sit do określenia wymiarów ziaren kruszywa

Zestaw podstawowy [mm]	Zestaw podstawowy plus zestaw 1. [mm]	Zestaw podstawowy plus zestaw 2. [mm]
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63

Wymiarów w zaokrąglonych w nawiasach można używać przy uproszczonym opisie wymiarów kruszywa.

UZIARNIENIE KRUSZYWA

Uziarnienie kruszywa jest to rozkład wymiaru ziaren, wyrażony jako udział masy (%) przechodzącej przez określony zestaw sit. Uziarnienie określane jest jako kategoria (G), dla której obowiązują dane wartości graniczne masy przechodzącej przez sita kontrolne (2D, 1,4D, D, d, d/2). Podstawowe wymagania dotyczące uziarnienia kruszyw podano w tabeli 4.2. Ze względu na uziarnienie norma

PN-EN 12620 wprowadza podział kruszyw na: grube, drobne, naturalne 0/8, o ciągłym uziarnieniu i wypełniające (rys. 4.5). W tabeli 4.3 podano wybrane przykłady zastosowań kruszyw w zależności od uziarnienia.

Tabela 4.2. Podstawowe wymagania dotyczące uziarnienia kruszyw

Kruszywo	Wymiar [mm]	Masa przechodząca [%]					Kategoria G ^{d)}
		2 D	1,4D ^{a), b)}	D ^{c)}	d ^{b)}	d/2 ^{a), b)}	
Grube	D/d ≤ 2	100	98÷100	85÷99	0÷20	0÷5	G _c 85/20
	D ≤ 11,2	100	98÷100	80÷99	0÷20	0÷5	G _c 80/20
Drobne	D/d > 2	100	98÷100	90÷99	0÷15	0÷5	G _c 90/15
	D > 11,2	100	98÷100	90÷99	0÷15	0÷5	G _c 90/15
Drobne	D ≤ 4 d = 0	100	95÷100	85÷99	-	-	G _f 85
Naturalne 0/8	D = 8 d = 0	100	98÷100	90÷99	-	-	G _{nc} 90
O ciągłym uziarnieniu	D ≤ 45 d = 0	100	98÷100 98÷100	90÷99 85÷99	-	-	G _A 90 G _A 85

a) Tam gdzie określone sita nie są dokładnymi numerami z serii R20 wg ISO 565: 1990, należy przyjąć następny najbliższy wymiar sita
b) Dla betonu o nieciągłym uziarnieniu lub w specjalnych zastosowaniach mogą być określone wymagania dodatkowe
c) Zawartość ziaren przechodzących przez D może być większa niż 99% masy, ale w takim przypadku producent powinien udokumentować i zadeklarować typowe uziarnienie, łącznie z sitami D, d, d/2 oraz sitami zestawu podstawowego plus zestaw 1 lub zestawu podstawowego plus zestaw 2, dla wartości pośrednich pomiędzy d i D. W przypadku sit o stosunku mniejszym niż 1,4 następne niższe sito można wykluczyć
d) W normach dotyczących innych kruszyw podano inne wymagania odnoszące się do kategorii

Tabela 4.3. Obszary stosowania kruszyw ze względu na uziarnienie

Uziarnienie [mm]	Zastosowanie
Piaski 0/2; 0/2 ^{extra} , 0/4	produkcja betonów i prefabrykatów betonowych; tynki i zaprawy budowlane; dachówka cementowa; budownictwo ogólne, drogowe i hydrotechniczne
Żwiry 2/8; 8/16; 16/31,5; 2/16; 4/16; 16/31,5; 31,5/63; Mieszanki 0/8; 0/16; 0/31,5; 0/63	produkcja betonów i prefabrykatów; budownictwo ogólne, drogowe i hydrotechniczne
Grysy 2/8; 8/16; 16/22,5	produkcja betonów i prefabrykatów betonowych – szczególnie wyższych klas wytrzymałościowych; warstwy ścieralne
Piaski kwarcowe suszone 0/0,5; 0/1,0	suche mieszanki: tynki, kleje i zaprawy budowlane



Rys. 4.5. Nazewnictwo kruszyw ze względu na skład ziarnowy

Kruszywo grube

Kruszywo o wymiarach ziaren $D \geq 4\text{ mm}$ oraz $d \geq 2\text{ mm}$. Wszystkie kruszywa grube powinny spełniać podstawowe wymagania dotyczące uziarnienia podane w tabeli 4.2, odpowiednio do wybranych kategorii G.

Dla kruszyw grubych ($D > 11,2\text{ mm}$ i $D/d > 2$ lub $D \leq 11,2\text{ mm}$ i $D/d > 4$), należy stosować następujące dodatkowe wymagania, określające % masy przechodzącej przez sito pośrednie:

- uziarnienia powinny mieścić się w ogólnych granicach podanych w tabeli 4.4,
- producent powinien udokumentować, i na żądanie deklorować, typowy przesiew przez sito pośrednie oraz tolerancje kategorii zgodnie z tabelą 4.4.

Tabela 4.4. Ogólne granice i tolerancje uziarnienia kruszywa grubego na sitach pośrednich

D/d	Sito pośrednie [mm]	Ogólne granice i tolerancje na sitach pośrednich ([%] przechodzącej masy)		Kategoria GT
		Ogólne granice	Tolerancje dotyczące typowego uziarnienia deklarowanego przez producenta	
<4	D/1,4	25÷70	±15	GT15
≥4	D/2	25÷70	±17,5	GT17,5

Jeżeli sito pośrednie nie ma dokładnych wymiarów sita z serii R20 wg ISO 565, należy użyć najbliższego sita z serii.

Kruszywo drobne

Kruszywo o wymiarze ziaren $D \leq 4$ mm. Kruszywo drobne może powstać w wyniku naturalnego rozdrobnienia skały albo żwiru i/lub kruszenia skały/żwiru, lub przetworzenia kruszywa sztucznego. Kruszywa drobne powinny spełniać podstawowe wymagania dotyczące uziarnienia, podane w tabeli 4.2. odpowiednio dotyczących wymiarów górnego sita D.

Podczas kontroli zmienności kruszywa drobnego należy stosować wymagania dodatkowe podane tabeli 4.5. Producent powinien udokumentować i na żądanie, deklarować typowe uziarnienie do każdego wymiaru wytwarzanego kruszywa drobnego.

Tabela 4.5. Tolerancje typowego uziarnienia kruszywa drobnego ogólnego zastosowania deklarowanego przez producenta

Wymiar sita [mm]	Tolerancje [%] przechodzącej masy		
	0/4	0/2	0/1
4	± 5 ^{a)}	—	—
2	—	± 5 ^{a)}	—
1	± 20	± 20	± 5 ^{a)}
0,250	± 20	± 25	± 25
0,063 ^{b)}	± 3	± 5	± 5

a) Tolerancje ±5 są ograniczone również wymaganiami wg tabeli 4.2, dotyczącymi procentu masy przechodzącej przez D
b) Dodatkowo ustala się dla danej kategorii maksymalną zawartość pyłów, określoną % masy przechodzącej przez sito 0,063 mm

Kruszywo o ciągłym uziarnieniu

Kruszywo będące mieszanką kruszyw drobnych i grubych, może być wytwarzane bez rozdzielania na grube i drobne frakcje lub przez połączenie kruszywa grubego i drobnego. Kruszywo o ciągłym uziarnieniu powinno być dostarczane jako mieszanka kruszywa grubego i drobnego, o wymiarach $D \leq 45$ mm i $d=0$, uziarnienie powinno

spełniać ogólne wymagania określone w tabeli 4.2. Kruszywo o ciągłym uziarnieniu powinno dodatkowo spełniać wymagania względem przechodzącej masy przez dwa sita pośrednie, stosowne do określenia wymiaru kruszywa zgodnie z tabelą 4.6.

Tabela 4.6. Wymagania uziarnienia kruszyw o ciągłym uziarnieniu

Wymiar kruszywa [mm]		Ogólne granice dla sit (przechodząca masa [%])	
Zestaw podstawowy plus		40 ± 20	70 ± 20
zestaw 1.	zestaw 2.	Dla sita [mm]	
–	0/6,3	1	4
0/8	0/8	1	4
–	0/10	1	4
0/11,2 (11)	–	2	5,6 (5)
–	0/12,5 (12)	2	6,3 (6)
–	0/14	2	8
0/16	0/16	2	8
–	0/20	2	10
0/22,4 (22)	–	2	11,2 (11)
0,31,5 (32)	0/31,5 (32)	4	16
–	0/40	4	20
0/45	–	4	22,4 (22)

Wymiary w okrągłych nawiasach mogą być używane przy uproszczonym opisie wymiarów kruszywa

Kruszywo wypełniające

Kruszywo, którego większość masy przechodzi przez sito 0,063 mm. Może być dodawane do materiałów budowlanych w celu uzyskania pewnych właściwości. Uziarnienie kruszywa wypełniającego powinno odpowiadać wymaganiom zawartym w tabeli 4.7.

Tabela 4.7. Wymagania uziarnienia dla kruszywa wypełniającego

Wymiar sita [mm]	Przechodząca masa [%]	
	Ogólny zakres poszczególnych wyników	Maksymalny zakres deklarowany przez producenta ^{a)}
2	100	–
0,125	od 85 do 100	10
0,063	od 70 do 100	10

a) Zakres uziarnienia deklarowany na podstawie ostatnich 20 wartości. 90% wyników powinno znaleźć się w tym zakresie, ale wszystkie powinny mieścić się w ogólnym zakresie uziarnienia

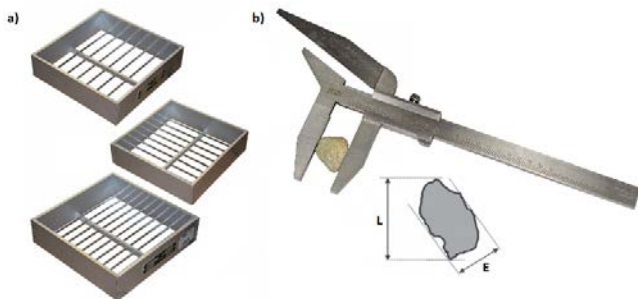
KSZTAŁT KRUSZYWA GRUBEGO

Kształt kruszywa grubego należy oznaczać za pomocą wskaźnika płaskości wg PN-EN 933-3 lub wskaźnika kształtu wg PN-EN 933-4. Badaniem wzorcowym oznaczania kształtu kruszyw grubych powinno być badanie wskaźnika płaskości. Kształt ziaren kruszywa grubego opisuje kategoria:

- FI – wskaźnik płaskości, który stanowi sumę masy ziaren przechodzących przez sита prętowe (rys. 4.6.), wyrażony w % w stosunku do całkowitej masy suchych ziaren. Kategorie maksymalnych wartości wskaźnika płaskości podano w tabeli 4.8,
- SI – wskaźnik kształtu określony przy pomocy suwmiarki Schultza (rys. 4.6), który określa zawartość ziaren o stosunku L/E (L – długość, E – grubość) większym niż 3, wyrażony w % całkowitej suchej masy badanych ziaren.

Kategorie maksymalnych wartości wskaźnika kształtu podano w tabeli 4.9.

Kształt ziaren wynika bezpośrednio z wytrzymałości i odporności na ścieranie skały macierzystej oraz ilości oddziaływań ścierających, którym poddawane były dane ziarna. W przypadku grysów jest to dodatkowo wpływ rodzaju kruszarki oraz stopnia rozdrobnienia ziaren (stopień rozdrobnienia – stosunek wymiaru ziaren materiału podawanego do kruszarki do wymiaru ziaren otrzymanego produktu).



Rys. 4.6. Przyrządy do badania kształtu ziaren a) sита prętowe, b) suwmiarka Schultza

Tabela 4.8. Kategorie wskaźnika płaskości

Wskaźnik płaskości	Kategoria FI
≤ 15	FI ₁₅
≤ 20	FI ₂₀
≤ 35	FI ₃₅
≤ 50	FI ₅₀
> 50	FI _{Deklarowana}
Brak wymagań	FI _{NR}

Tabela 4.9. Kategorie wskaźnika kształtu

Wskaźnik kształtu	Kategoria SI
≤ 15	SI ₁₅
≤ 20	SI ₂₀
≤ 40	SI ₄₀
≤ 55	SI ₅₅
>55	SI _{Deklarowana}
Brak wymagań	SI _{NR}

ZAWARTOŚĆ PYŁÓW

Pyły stanowią frakcje kruszywa o wymiarach ziaren < 0,063 mm. Zawartość pyłów oznaczoną wg PN-EN 933-1 należy deklarować zgodnie z odpowiednią kategorią (f) określoną w tabeli 4.10. Obecność pyłów może wpływać na przyczepność między ziarnami kruszywa a zaczynem cementowym oraz na wodozgodność kruszywa, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia wytrzymałości betonu – zwłaszcza wytrzymałości na zginanie. Uzyskanie dobrej przyczepności uwarunkowane jest stosowaniem kruszywa pozbawionego pyłów, części organicznych oraz szczególnie części minerałów ilastych (gliny).

JAKOŚĆ PYŁÓW

Nie tylko zawartość pyłów, ale również ich jakość przekłada się na właściwości kruszyw. Pyły uznawane są za nieszkodliwe, gdy:

- ogólna zawartość pyłów w kruszywie drobnym jest mniejsza niż 3% lub poniżej innej wartości, zgodnie z postanowieniami obowiązującymi w miejscu stosowania kruszywa,
- wartość wskaźnika piaskowego (SE) badanego wg PN-EN 933-8 przekracza określoną dolną granicę,
- badanie błękitem metylenowym (MB) wg PN-EN 933-9 daje wartość

mniejszą od określonej wartości granicznej,

- stwierdzono, że zachowanie kruszywa jest równoważne z kruszywem znanym z zadowalającego zachowania lub jest dowód na bezproblemowe zastosowanie kruszywa.

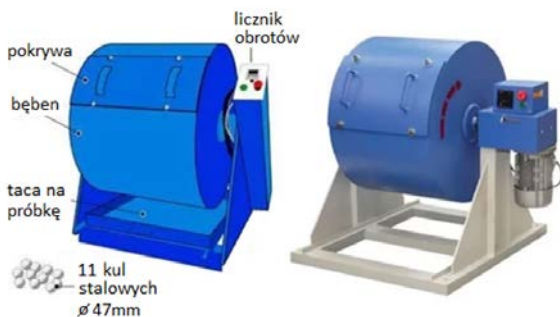
Tabela 4.10. Kategorie maksymalnych zawartości pyłów

Kruszywo	Sito 0,063 mm masa przechodząca [%]	Kategoria f
Kruszywo grube	≤ 1,5	f _{1,5}
	≤ 4	f ₄
	> 4	f _{Deklarowana}
	brak wymagania	f _{NR}
Kruszywo naturalne 0/8 mm	≤ 3	f ₃
	≤ 10	f ₁₀
	≤ 16	f ₁₆
	> 16	f _{Deklarowana}
Kruszywo drobne	≤ 3	f ₃
	≤ 10	f ₁₀
	≤ 16	f ₁₆
	≤ 22	f ₂₂
	> 22	f _{Deklarowana}
	brak wymagania	f _{NR}
Kruszywo o uziarnieniu ciągłym	≤ 3	f ₃
	≤ 11	f ₁₁
	> 11	f _{Deklarowana}
	brak wymagania	f _{NR}

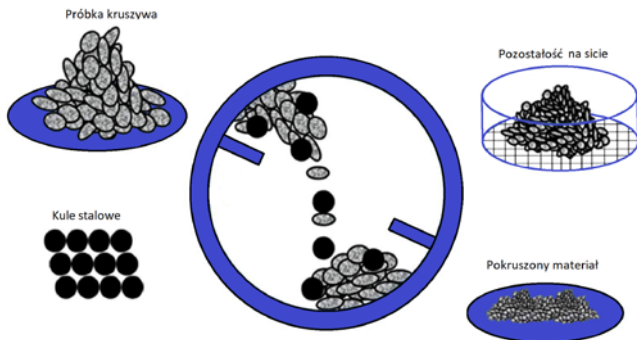
4.1.1.2. Wymagania fizyczne

ODPORNOŚĆ NA ROZDRABNIANIE KRUSZYWA GRUBEGO

Odporność na rozdrabnianie oznaczana jest na podstawie pomiaru rozdrobnienia kruszywa w wyniku obtaczania kruszywa wraz ze stalowymi kulami w obracającym się bębnie (rys. 4.7). Współczynnik Los Angeles (LA) odpowiada masie próbki analitycznej wyrażonej w %, która przeszła przez sito 1,6 mm, po pełnym cyklu obrotów bębna (rys. 4.8).



Rys. 4.7. Bęben Los Angeles



Rys. 4.8. Schemat oznaczenia odporności na rozdrabnianie kruszywa

Współczynnik LA pośrednio obrazuje wytrzymałość produktu finalnego – betonu. Im niższy współczynnik – tym wyższa wytrzymałość betonu. Kategorie maksymalnych wartości współczynnika Los Angeles (LA) podano w tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Kategorie współczynnika Los Angeles

Współczynnik Los Angeles	Kategoria LA
≤ 15	LA ₁₅
≤ 20	LA ₂₀
≤ 25	LA ₂₅
≤ 30	LA ₃₀
≤ 35	LA ₃₅
≤ 40	LA ₄₀
≤ 50	LA ₅₀
> 50	LA _{Deklarowana}
Brak wymagania	LA _{NR}

ODPORNOŚĆ NA ŚCIERANIE KRUSZYWA GRUBEGO

Odporność na ścieranie oznaczana jest przez pomiar zużycia kruszywa spowodowanego tarciem pomiędzy kruszywem a materiałem ściernym w obracającym się bębnie (rys. 4.9). Oznaczanie współczynnika mikro-Devala polega na określeniu ubytku początkowej masy próbki (wyrażonej w %) w czasie jej ścierania do wymiarów poniżej 1,6 mm (rys. 4.10). Jeśli jest to wymagane, odporność na ścieranie kruszywa grubego (współczynnik mikro-Devala M_{DE}), należy oznaczać wg PN-EN 1097-1 i deklarować zgodnie z odpowiednią kategorią, określoną w tabeli 4.12.



Rys. 4.9. Bęben Micro-Devala



Rys. 4.10. Schemat oznaczenia odporności na ścieranie

Tabela 4.12. Kategorie odporności na ścieranie

Współczynnik mikro-Devala	Kategoria M _{DE}
≤ 10	M _{DE} 10
≤ 15	M _{DE} 15
≤ 20	M _{DE} 20
≤ 25	M _{DE} 25
≤ 35	M _{DE} 35
> 35	M _{DE} Deklarowana
Brak wymagania	M _{DE} NR

ODPORNOŚĆ NA POLEROWANIE (POLEROWALNOŚĆ – PSV)

Polerowalność jest miarą odporności kruszywa na polerujące działanie opon pojazdów w warunkach zbliżonych do tych, jakie występują na powierzchni drogi (rys. 4.11). Istotą badania jest określenie tarcia zmierzonego dla wypolerowanej próbki, którego wartość wykorzystywana jest do obliczenia współczynnika PSV. Jeśli jest to wymagane, odporność na polerowanie kruszywa grubego, przewidzianego na warstwy nawierzchniowe, należy oznaczać wg PN-EN 1097-8 i deklarować zgodnie z odpowiednią kategorią określoną w tabeli 4.13.



Rys. 4.11. Próbka i urządzenie do badania odporności na polerowanie (PSV)

Tabela 4.13. Kategorie odporności na polerowanie

Polerowalność	Kategoria PSV
≥ 68	PSV ₆₈
≥ 62	PSV ₆₂
≥ 56	PSV ₅₆
≥ 50	PSV ₅₀
≥ 44	PSV ₄₄
Wartości pośrednie oraz < 44	PSV _{Deklarowana}
Brak wymagania	PSV _{NR}

ODPORNOŚĆ NA ŚCIERANIE POWIERZCHNIOWE (ŚCIERALNOŚĆ - AAV)

Ścieralność (AAV) jest miarą odporności kruszywa na ścieranie powierzchni w warunkach ruchu drogowego. Istotą badania jest określenie różnicy mas próbek przed i po ścieraniu na obracającej się poziomo tarczy, wraz z podawanym w sposób ciągły materiałem ściernym (piaskiem). Jeśli jest to wymagane, odporność na ścieranie powierzchniowe (ścieralność - AAV) należy oznaczać wg PN-EN 1097-8 i deklorować zgodnie z odpowiednią kategorią określoną w tabeli 4.14.

Tabela 4.14. Kategorie odporności na ścieranie powierzchniowe

Wartość ścierania kruszyw	Kategoria AAV
≤ 10	AAV ₁₀
≤ 15	AAV ₁₅
≤ 20	AAV ₂₀
Wartości pośrednie oraz > 20	AAV _{Deklarowana}
Brak wymagania	AAV _{NR}

GĘSTOŚĆ OBJĘTOŚCIOWA ZIAREN

Określa stosunek masy próbki kruszywa wysuszonej w suszarce, do objętości, jaką próbka zajmie w wodzie, wraz z wewnętrznymi zamkniętymi pustymi przestrzeniami, lecz bez pustych przestrzeni dostępnych dla wody. Gęstość objętościowa, wyrażona w g/cm³, zależy od gęstości minerałów wchodzących w skład kruszywa oraz od ilości i objętości porów.

GĘSTOŚĆ NASYPOWA

Gęstość nasypowa w stanie luźnym jest to iloraz niezagęszczonej masy suchego kruszywa wypełniającego określony pojemnik do objętości tego pojemnika, wyrażona w g/cm^3 . Gęstość nasypowa zależy od stopnia zagęszczenia (stopnia upakowania).

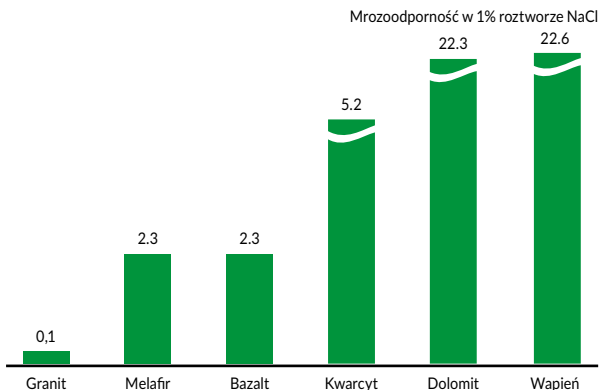
NASIĄKLIWOŚĆ

Nasiąkliwość określa zwiększenie masy próbki kruszywa wysuszonego w suszarce spowodowane penetracją wody do dostępnych dla niej pustych przestrzeni. Jest miarą zdolności kruszywa do wchłaniania i magazynowania wody w porach oraz drobnych spękaniach, co w konsekwencji ma istotny wpływ na mrozoodporność (szczególnie pory o wymiarach mniejszych od $4\ \mu\text{m}$). Kruszywo może być uznane za mrozoodporne jeżeli nasiąkliwość oznaczana wg PN-EN 1097-6 nie przekracza 1 %. Należy zwrócić uwagę, że szereg kruszyw o potwierdzonej mrozoodporności wykazuje większą nasiąkliwość. Przykładowo, niektóre jurajskie wapienie i piaskowce charakteryzują się nasiąkliwością powyżej 4 %, z kolei nasiąkliwość żużli wielopieczowych, permskich wapieni, dolomitów i karbońskich piaskowców często przekracza 2 %.

TRWAŁOŚĆ

Mrozoodporność kruszywa grubego

Mrozoodporność (F) wg PN EN 1367-1 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 1 : Oznaczanie mrozoodporności” określana jest na podstawie ubytku masy próbek po cyklicznym zamrażaniu i rozmrażaniu, wyrażonego w % (tabela 4.15). Istotą badania jest całkowite nasycenie badanego kruszywa wodą, a następnie jego zamrażanie w wodzie. Po 10 cyklach zamrażania i rozmrażania określa się rodzaj pęknięć, utratę masy, zmiany wytrzymałości. W warunkach niekorzystnego klimatu lub stosowania soli odładzających, bardziej odpowiednie mogą być badania z wykorzystaniem 1% roztworu chlorku sodu (NaCl) wg PN-EN 1367-6 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych - Część 6: Mrozoodporność w obecności soli”. Odporność kruszywa na wielokrotne cykle zamrażania i rozmrażania zależy najczęściej od jego nasiąkliwości, czyli ilości wody pozostającej wewnątrz ziaren podczas zamrażania. Mrozoodporność wybranych kruszyw przedstawia rys. 4.12.



Rys. 4.12. Mrozoodporność wybranych kruszyw

Tabela 4.15. Kategorie mrozoodporności kruszywa (F)

Zamrażanie-rozmrażanie ubytek masy [%] ^{a)}	Kategoria F
≤ 1	F ₁
≤ 2	F ₂
≤ 4	F ₄
> 4	F _{Deklarowana}
Brak wymagania	F _{NR}
a) W warunkach wyjątkowo zimnego klimatu i/lub środowiska zasolonego albo stosowania soli odładzających, bardziej odpowiednie mogą być badania z wykorzystaniem roztworu soli, jak opisano w EN 1367-6 wtedy nie stosuje się wymagań podanych w niniejszej tabeli	

Mrozoodporność (MS) wg PN EN 1367-2 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 2 : Badanie w siarczanie magnezu” określana jest na podstawie ubytku masy kruszywa poddanego 5 cyklom zanurzenia w nasyconym roztworze siarczanu magnezu (MgSO₄), a następnie suszeniu w temp. 110°C. Wywołuje to w kruszywie efekt rozsadzenia pod wpływem cyklicznej krystalizacji i uwodnienia siarczanu magnezu w porach. Niszczenie w wyniku rozsadzenia jest mierzone ilością powstałego materiału drobniejszego niż 10 mm (tabela 4.16).

Tabela 4.16. Kategorie mrozoodporności kruszywa (MS)

Badanie siarczanem magnezu, ubytek masy [%]	Kategoria MS
≤ 18	MS ₁₈
≤ 25	MS ₂₅
≤ 35	MS ₃₅
> 35	MS _{Deklarowana}
Brak wymagania	MS _{NR}

Wymagania dla kategorii mrozoodporności kruszywa w zależności od warunków środowiskowych zostały podane w tabeli 4.17.

Tabela 4.17. Warunki środowiskowe a wymagania względem mrozoodporności kruszywa

Warunki środowiskowe	Klimat		
	śródlądowy	atlantycki	kontynentalny ^a
Brak mrozu i sucho	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań
Częściowe nasycenie, brak soli	brak wymagań	F ₄ lub MS ₃₅	F ₂ lub MS ₂₅
Nasycenie, brak soli	brak wymagań	F ₂ lub MS ₂₅	F ₁ lub MS ₁₈
Sól (woda morska lub nawierzchnie drogi)	F ₄ lub MS ₃₅	F ₂ lub MS ₂₅	F ₁ lub MS ₁₈
Nawierzchnie lotnisk	F ₂ lub MS ₂₅	F ₁ lub MS ₁₈	F ₁ lub MS ₁₈
a) Kategoria kontynentalna może odnosić się również do Islandii, części Skandynawii i rejonów górskich, w których występują surowe warunki zimowe			

Stość objętości - skurcz przy wysychaniu

Metoda oznaczenia polega na badaniu wpływu kruszywa na skurcz betonu przy wysychaniu wg PN-EN 1367-4. Badanie przeprowadza się na próbkach betonu o ustalonym składzie, wykonanym z kruszywa o maksymalnym wymiarze ziaren 20 mm. Po całkowitym nasyceniu wodą, próbki poddaje się suszeniu w 110°C i oznacza zmianę długości po przejściu ze stanu pełnego nasycenia do stanu suchego. Nadmierny skurcz przy wysychaniu betonu przypisuje się kruszywom i wyraża jako przeciętną zmianę długości beleczek. Jeżeli możliwa jest destrukcja betonu w wyniku spękań skurczowych (wywołanych kruszywem) to skurcz przy wysychaniu powinien być ≤0,075 %.

Reaktywność alkalia - kruszywo

Niektóre rodzaje kruszyw są zdolne do reakcji z roztworami alkalicznymi znajdującymi się w cieczy porowej. W pewnych niesprzyjających warunkach w obecności wilgoci, reakcja alkalia-kruszywo może prowadzić do pęcznienia, a następnie do pęknięcia i destrukcji betonu. Wiele rodzajów kruszyw naturalnych jest zdolnych do reakcji z roztworami alkalicznymi, a ich reaktywność jest funkcją rodzaju składników tworzących kruszywo. Kruszywa charakteryzujące się porowatą, szklistą powierzchnią są bardziej podatne na wchodzenie w reakcje w ze związkami alkalicznymi.

Według normy PN-EN 12620 reaktywność alkalia - kruszywo należy oceniać zgodnie z postanowieniami (przepisami) ważnymi w miejscu zastosowania.

Problem reaktywności alkalicznej kruszywa jest szczególnie istotny dla obiektów o wysokim znaczeniu, takich jak np.: kluczowa infrastruktura drogowo – mostowa. Z tego powodu Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad określiła dodatkowe wymagania dla kruszywa w dokumencie pt. „Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich” oraz metody badań reaktywności (tabela 4.19).

Kategorię reaktywności kruszyw należy wyznaczać na podstawie wyników pomiarów wydłużenia próbek betonu lub zaprawy (metody bezpośrednie - rys. 4.13), wykonanych odpowiednio wg procedur badawczych GDDKiA PB/2/18 lub PB/1/18 (do czasu uzyskania wyników metody długoterminowej). Klasyfikacja reaktywności alkalicznej kruszywa po raz pierwszy wymaga przeprowadzenia również pełnej analizy petrograficznej wg procedury badawczej GDDKiA PB/3/18. Zastosowanie danego rodzaju kruszywa wymaga przeprowadzenia analizy zagrożeń związanych z reakcją alkalia – kruszywo oraz doboru środków zapobiegawczych zależnie od kategorii reaktywności kruszywa (R0, R1, R2, R3) – tabela 4.20, klasy konstrukcji (S1, S2, S3, S4) oraz kategorii środowiska (E1, E2, E3) – patrz rozdz. 5.2.5.13. Tok postępowania przy ocenie reaktywności kruszywa przedstawia rys. 4.13.

Tabela 4.18. Wykaz skał mogących zawierać składniki potencjalnie reaktywne

Skala	Składnik potencjalnie reaktywny	Uwagi
porfir kwarcowy (ryolit, ryodacyt, dacyt)	kwarc mikrokrystaliczny i/ lub krypto-krystaliczny (masa kwarcowo-skale-niowa), szkliwo wulkaniczne, trydymit, krystobalit	-
bazalt, melafir, diabaz	szkliwo wulkaniczne, trydymit, kristobalit, opal, chalcedon, wtórny kwarc (rekrytalizacja szkliwa wulkanicznego)	opal i chalcedon mogą stanowić wypełnienie pęcherzyków lub żyłki z mineralizacją
gnejs, tupek metamorficzny	kwarc w stanie naprężeń, kwarc rekrytaliczny (słaby stopień krystalizacji na granicy ziaren), kwarc mikrokrystaliczny i/ lub kryptokrystaliczny	-
kwarcyt		-
amfibolit	kwarc w stanie naprężeń, kwarc mikrokrystaliczny i/ lub kryptokrystaliczny	-
granit, granodioryt, dioryt		-
hornfleks	kwarc mikrokrystaliczny i/ lub kryptokrystaliczny	-
piaskowiec, szarogłaz, pyłowiec, mułowiec, tupek osadowy	kwarc w stanie naprężeń, kwarc mikrokrystaliczny i/lub kryptokrystaliczny, opal, chalcedon	chalcedon w postaci rozet (spoiwo w piaskowcu)
wapień, wapień dolomityczny, dolomit wapnisty, dolomit		-
opoka	kwarc mikrokrystaliczny i/ lub kryptokrystaliczny, opal rzadziej chalcedon	często zawierają szczątki organiczne (zwłaszcza igły gąbek)
geza wapienna	kwarc mikrokrystaliczny i/ lub kryptokrystaliczny, opal, krystobalit	zawierają zmienne ilości krzemionkowych elementów szkieletowych (spikule gąbek, szkieleciki radiolarii i/lub okrzemek)
ziemia okrzemkowa, diatomit, radiolaryt, spongiolit	chalcedon, opal, kwarc mikrokrystaliczny i/lub kryptokrystaliczny,	ziemia okrzemkowa - głównym składnikiem jest opal
krzemień, czert, rogowiec		krzemień i chalcedon - głównie chalcedon, rzadziej opal

Tabela 4.19. Metody badań reaktywności wg wytycznych GDDKiA

Metoda	Tytuł	Cel metody / zastosowania
PB/1/18	Instrukcja badania reaktywności kruszywa metodą przyspieszoną w 1M roztworze NaOH w temp. 80°C	Klasyfikacja kruszywa na podstawie kategorii reaktywności w zależności od podatności na reakcję alkalia- krzemionka
PB/2/18	Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C	
PB/3/18	Zalecenia dotyczące analizy petrograficznej kruszywa	Identyfikacja potencjalne reaktywnych składników kruszywa oraz rozpoznanie produktów reakcji alkalia-krzemionka
PB/4/18	Określenie potencjalnej reaktywności mieszaniny cementu, dodatków mineralnych i kruszyw	Weryfikacja środków zapobiegających wystąpieniu negatywnych skutków ASR w betonie oraz weryfikacja odporności betonu na ekspansję wskutek reakcji ASR w warunkach eksploatacji nawierzchni betonowych
PB/5/18	Określenie potencjalnej reaktywności mieszaniny kruszyw mineralnych w betonie w warunkach cyklicznego oddziaływania temp.60°C i zewn. dostępu alkaliów	



Rys. 4.13. Pomiar zmian liniowych próbki betonu

Tabela 4.20. Kategoryzacja kruszywa do betonu ze względu na reaktywność

Metoda badawcza	Kategoria reaktywności kruszywa					
	Niereaktywne R0		Umiarkowanie reaktywne R1		Silnie reaktywne R2	Bardzo silnie reaktywne R3
	kruszywo drobne	kruszywo grube	kruszywo drobne	kruszywo grube	kruszywo drobne; kruszywo grube	kruszywo drobne; kruszywo grube
GDDKiA PB/1/18	Wydłużenie próbek zaprawy po 14 dniach, %					
	≤ 0,15	≤ 0,10	> 0,15 ≤ 0,30	> 0,10 ≤ 0,30	> 0,30 ≤ 0,45	> 0,45
GDDKiA PB/2/18	Wydłużenie próbek betonu po 365 dniach, %					
	≤ 0,04		> 0,04 ≤ 0,12		> 0,12 ≤ 0,24	> 0,24
UWAGA: Jeżeli wyniki badań kruszywa metodą przyspieszoną (wg PB/1/18) wskazują na kategorię R1, a metodą długoterminową (wg PB/2/18) na kategorię R0, to kategorię reaktywności badanego kruszywa należy przyjąć według metody długoterminowej.						

Wskazane kategorie reaktywności kruszywa nie mają zastosowania w odniesieniu do jego podatności na reakcję alkalia-węglany.

W przypadku kruszyw węglanowych, zwłaszcza wapieni dolomitycznych, dolomitów i dolomitów wapnistych, należy przeprowadzić analizę petrograficzną zgodnie z zaleceniami podanymi w PB/3/18.

Jeżeli w kruszywach uzyskanych z przeróbki:

- wapienia o zawartości $\text{CaCO}_3 > 95\%$ (obliczonej na podstawie zawartości CaO) nie stwierdza się występowania składników potencjalnie reaktywnych, tj. reaktywnych form krzemionki i minerałów ilastych lub specyficznej tekstury, oraz jeżeli zawartości: $\text{SiO}_2 < 3,0\%$, $\text{MgO} < 1,0\%$ (<5% dolomitu) oraz $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,2\%$, to kruszywo nie jest podatne na reakcję ACR,
- dolomitu nie stwierdza się występowania składników potencjalnie reaktywnych, tj. reaktywnych form krzemionki i minerałów ilastych lub specyficznej tekstury, oraz jeżeli zawartości: $\text{SiO}_2 < 3,0\%$ i $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,2\%$, a zawartość dolomitu (obliczona na podstawie zawartości MgO) przekracza 95%, to kruszywo nie jest podatne na reakcję ACR.

W powyższych dwóch przypadkach przyjmuje się, iż kruszywo jest niereaktywne w kierunku ACR i nie wymaga się wykonywania badania wg PB/2/18 w wersji zmody-

fikowanej. W tych przypadkach przyjmuje się, iż kruszywo jest niereaktywne również w kierunku ASR i nie wykonuje się badań wg procedur PB/1/18 oraz PB/2/18. Przeprowadzenie analizy zagrożeń wystąpienia reakcji alkalia – krzemionka konieczne jest na etapie doboru odpowiednich środków zapobiegawczych dla danej kasy obiektu (S) uzależnionych od kategorii reaktywności alkalicznej kruszywa (R) i kategorii oddziaływania środowiska (E). Jako środki zapobiegawcze przyjmuje się następujące rozwiązania:

- ograniczenie zawartości alkaliów aktywnych ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) w betonie do poziomu 3,5; 3,0 lub 2,4 kg/m^3 ,
- stosowanie dodatków typu II do betonu: popiołu lotnego krzemionkowego spełniającego wymagania normy PN-EN 450-1 lub zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego zgodnego z wymaganiami PN-EN 15167-1, wg zasad normy PN-EN 206 wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265,
- stosowanie cementu powszechnego użytku niskoalkalicznego NA zgodnego z PN-B-19707 o odpowiedniej zawartości popiołu lotnego krzemionkowego i/lub zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego,
- jednoczesne ograniczenie zawartości alkaliów aktywnych w betonie i stosowanie dodatków typu II do betonu.



Rys. 4. 14. Schemat analizy zagrożeń i doboru środków zapobiegawczych

KLASYFIKACJA SKŁADNIKÓW KRUSZYW GRUBYCH Z RECYKLINGU

Kruszywa z recyklingu powstają w wyniku przeróbki materiałów wykorzystanych uprzednio w budownictwie. Wymagane jest oznaczanie proporcji materiałów składowych wg EN 933-11 oraz deklarowanie wyników zgodnie z odpowiednią kategorią określoną w tabeli 4.21.

Tabela 4.21. Kategorie zawartości składników grubych kruszyw z recyklingu

Składniki	Zawartość [%] masy	Kategorie
Rc (beton, wyroby betonowe, zaprawa, betonowe elementy murowe)	≥ 90	Rc 90
	≥ 80	Rc 80
	≥ 70	Rc 70
	≥ 50	Rc 50
	< 50	Rc Deklarowana
	Brak wymagania	Rc NR
Rc + Ru (j.w. +kruszywo niezwiązane, kamień naturalny, kruszywo związane hydraulicznie)	≥ 95	Rcu 95
	≥ 90	Rcu 90
	≥ 70	Rcu 70
	≥ 50	Rcu 50
	< 50	Rcu Deklarowana
	Brak wymagania	Rcu NR
Rb (ceramiczne elementy murowe, tj. cegły i dachówki, silikatowe elementy murowe, beton napowietrzony nie pływający w wodzie)	≤ 10	Rb 10
	≤ 30	Rb 30
	≤ 50	Rb 50
	> 50	Rb Deklarowana
	Brak wymagania	Rb NR
	Ra (materiały bitumiczne)	≤ 1
≤ 5		Ra 5-
≤ 10		Ra 10-
≤ 0,5		XRg 0,5-
X + Rg (szkło + inne spoiście, np. glina i grunt, metale żelazne i nieżelazne, nie pływające w wodzie drewno, plastik i guma, tynk gipsowy)	≤ 1	XRg 1-
	≤ 2	XRg 2-
	≤ 0,2 ^{a)}	FL 0,2-
FL (materiał pływający w wodzie, objętościowo ^{b)})	≤ 2	FL 2-
	≤ 5	FL 5-
	a) Kategoria ≤ 0,2 przeznaczona jest tylko do specjalnych zastosowań, wymagających wysokiej jakości wykończenia powierzchni.	
b) Zawartość cm ³ /kg		

4.1.1.3. Wymagania chemiczne dla kruszyw

Konieczność badania i deklarowania wszystkich właściwości określonych w niniejszym podpunkcie powinna być ograniczona do poszczególnych zastosowań lub pochodzenia kruszywa. Jeśli jest to wymagane, w celu oznaczenia odpowiednich właściwości chemicznych (szczególnie dla kruszyw z recyklingu), należy przeprowadzić poniższe badania.

ZAWARTOŚĆ CHLORKÓW W KRUSZYWACH NATURALNYCH

Chlorki w kruszywach naturalnych mogą występować w postaci soli sodu i potasu, w ilościach zależnych od pochodzenia kruszywa. Sole te znacznie wpływają na całkowitą zawartość chlorków i alkaliów w betonie. W celu zminimalizowania ryzyka korozji znajdujących się wewnątrz elementów metalowych, np. zbrojenia, zwykle ogranicza się całkowitą zawartość jonów chlorkowych we wszystkich składnikach betonu. Zawartość jonów chlorkowych rozpuszczalnych w wodzie, w kruszywach pochodzących z większości śródlądowych złóż jest bardzo mała. Tam, gdzie wiadomo, że zawartość chlorków nie jest większa niż 0,01 %, wartość ta może być użyta w metodzie obliczeniowej opartej na maksymalnej zawartości chlorków w składnikach betonu. Zawartość jonów chlorkowych rozpuszczalnych w wodzie, w kruszywach do betonu należy oznaczać wg PN-EN 1744-1.

ZAWARTOŚĆ CHLORKÓW W KRUSZYWACH Z RECYKLINGU

W kruszywach z recyklingu, a zwłaszcza w tych powstałych z przekruszenia betonu lub zaprawy, chlorki mogą być związane w glinianie wapnia lub w innych fazach stwardniałego zaczynu cementowego. Wyekstrahowanie związanych chlorków z użyciem wody, według procedur podanych w PN-EN 1744-1 jest mało prawdopodobne, nawet jeśli wcześniej próbka zostanie zmielona.

Zaleca się zatem, aby przeprowadzić badanie zawartości chlorków rozpuszczalnych w kwasie zgodnie z PN-EN 1744-5. Wynik badania prawdopodobnie będzie zawyżony, jednak wartość tą zaleca się stosować przy obliczaniu zawartości jonów chlorkowych w betonie. Pozwoli to zapewnić odpowiedni margines bezpieczeństwa.

ZAWARTOŚĆ SIARCZANÓW ROZPUSZCZALNYCH W KWASIE

W kruszywach i kruszywach wypełniających do betonu zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie należy oznaczać wg PN-EN 1744-1 i deklarować zgodnie z odpowiednią kategorią określoną w tabeli 4.22. Siarczany w kruszywach mogą zwiększać ryzyko pęknięcia betonu. W przypadku żużla wielkopieczowego

znaczna ilość siarczanów zamknięta jest w formach krystalicznych – nie ulega rozpuszczeniu i dlatego nie uczestniczy w procesie hydratacji cementu. Z tego względu dopuszczane są wyższe zawartości siarczanów w żużlu.

Tabela 4.22. Kategorie maksymalnych zawartości siarczanów rozpuszczalnych w kwasie

Kruszywa	Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie [%]	Kategoria AS
Kruszywa oprócz żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem	$\leq 0,2$ $\leq 0,8$ $> 0,8$	$AS_{0,2}$ $AS_{0,8}$ $AS_{Deklarowana}$
	Brak wymagania	AS_{NR}
Żużel wielkopieczowy chłodzony powietrzem	$\leq 1,0$ $> 1,0$	AS_{L0} $AS_{Deklarowana}$
	Brak wymagania	AS_{NR}

ZAWARTOŚĆ SIARKI CAŁKOWITEJ

Zawartość siarki całkowitej w kruszywach i kruszywach wypełniających, oznaczona wg PN-EN 1744-1, nie powinna przekraczać:

- 2,0% dla żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem,
- 1,0% dla kruszyw innych niż żużel wielkopieczowy chłodzony powietrzem.

Szczególne środki ostrożności są konieczne, jeżeli w kruszywie występuje pirotyn (niestabilna postać siarczku żelaza FeS). Jeśli wiadomo, że minerał ten występuje, wówczas zawartość siarki całkowitej $S \leq 0,1\%$.

ZAWARTOŚĆ SIARCZANÓW ROZPUSZCZALNYCH W WODZIE W KRUSZYWACH Z RECYKLINGU

W przypadku kruszyw z recyklingu dodatkowo oznacza się zawartość siarczanów rozpuszczalnych w wodzie wg PN-EN 1744-1, którą należy deklарować zgodnie z odpowiednią kategorią określoną w tabeli 4.23. Siarczany rozpuszczalne w wodzie w kruszywach z recyklingu, na ogół są siarczanami potencjalnie reaktywnymi, np. tynk gipsowy. Mogą więc zwiększać ryzyko pęknięcia (destrukcji) betonu i obniżenia jego trwałości.

Tabela 4.23. Kategorie maksymalnych zawartości siarczanów rozpuszczalnych w wodzie w kruszywach z recyklingu

Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w wodzie	Kategoria
<0,2	SS _{0,2}
Brak wymagania	SS _{NR}

INNE SKŁADNIKI

Składniki, które wpływają na szybkość wiązania i twardnienia betonu

Składniki kruszyw i kruszyw wypełniających mogą zawierać substancje organiczne lub inne substancje w ilościach, które wpływają na szybkość wiązania i twardnienia betonu. Składniki te powinny być ocenione pod względem ich wpływu na czas wiązania i wytrzymałość na ściskanie zapraw zgodnie z PN-EN 1744-1. Zawartość tych składników nie powinna powodować:

- wydłużenia czasu wiązania zaprawy powyżej 120 min w stosunku do zaprawy wzorcowej,
- spadku wytrzymałości na ściskanie zaprawy, nie więcej niż 20 % po 28 dniach dojrzewania, w stosunku do zaprawy wzorcowej.

W przypadku kruszyw z recyklingu wpływ zawartości materiałów rozpuszczalnych w wodzie na początek czasu wiązania zaczynu cementowego należy oceniać zgodnie z normą PN-EN 1744-6. Zmiana początku czasu wiązania te powinna odpowiadać wymaganiom podanym w tabela 4.24.

Tabela 4.24. Kategorie wpływu składników kruszyw z recyklingu na początek czasu wiązania zaczynu cementowego

Zmiana początku czasu wiązania t_e [min]	Kategoria A
≤ 10	A ₁₀
≤ 40	A ₄₀
> 40	A _{Deklarowana}
Brak wymagania	A _{NR}

Jeżeli jest to wymagane kontrolę zawartości węglanów w kruszywach drobnych, stosowanych do warstwy ścieralnej nawierzchni betonowej, należy oznaczać wg PN-EN 196-2, a wyniki deklorować.

Składniki wpływające na wykończenie powierzchni betonu

Tam gdzie istotny jest wygląd betonu, zaleca się aby kruszywa nie zawierały materiałów w ilościach niekorzystnie wpływających na jakość powierzchni lub trwałość. Nawet niewielkie zanieczyszczenie kruszyw, może mieć znaczący wpływ na wykończenie powierzchni betonu. Konieczna jest weryfikacja przydatności źródła kruszywa do danego zastosowania. Zaleca się, aby w typowych zastosowaniach, zawartość lekkich zanieczyszczeń organicznych oznaczana wg PN-EN 1744-1 nie przekraczała:

- 0,5 % masy kruszywa drobnego,
- 0,1 % masy kruszywa grubego.

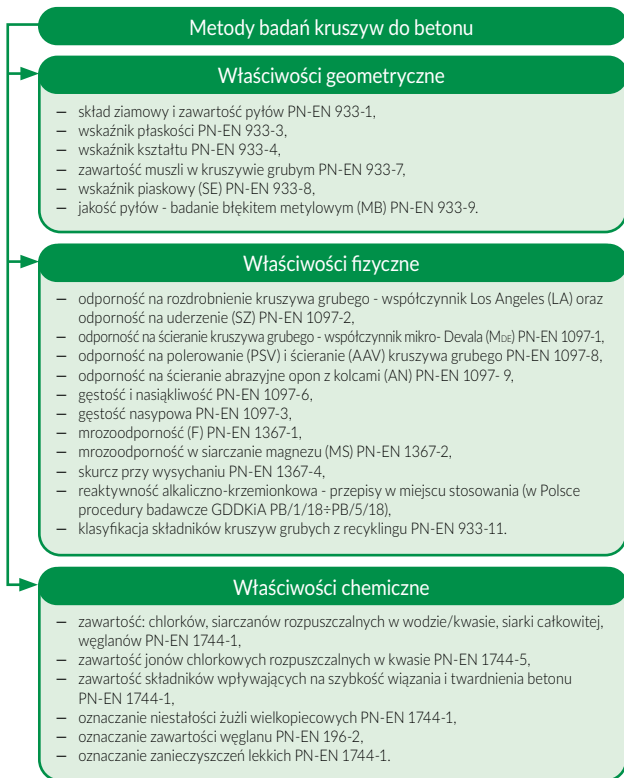
Jeżeli ważny jest wygląd powierzchni betonu, zaleca się aby zawartość lekkich zanieczyszczeń organicznych określona wg PN-EN 1744-1 nie przekraczała:

- 0,25 % masy kruszywa drobnego lub,
- 0,05 % masy kruszywa grubego.

W pewnych sytuacjach, na przykład dla uzyskania doskonałej powierzchni betonu, konieczne może być dodatkowe ograniczenie zawartości lekkich zanieczyszczeń organicznych.

4.2. Metody badań

Metodykę badań właściwości kruszyw do betonu zgodnie z PN-EN 12620 przedstawiono na rys. 4.15.



Rys. 4.15. Metody badań kruszyw do betonu wg wymagań normy PN-EN 12620

5 Beton

5.1. Podstawowe wymagania dla betonu

5.1.1. Klasy ekspozycji związane z oddziaływaniem środowiska

Klasa ekspozycji - opis oddziaływania środowiska na beton w konstrukcji (rys. 5.1). Oddziaływania mogą mieć charakter chemiczny lub fizyczny, mogą wpływać na beton lub na zbrojenie, a także inne znajdujące się w nim elementy metalowe, które w projekcie konstrukcyjnym nie zostały uwzględnione jako obciążenia. Zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 z uwzględnieniem jej krajowego uzupełnienia PN-B-06265 oddziaływania te sklasyfikowano za pomocą 21 klas ekspozycji (tabela 5.1).

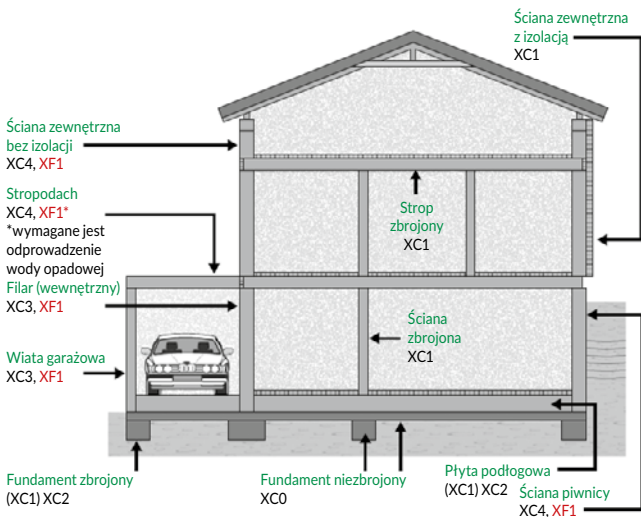


Rys. 5.1. Klasy ekspozycji według PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265

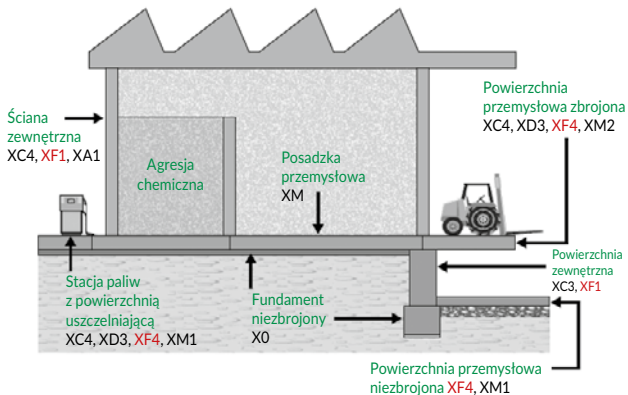
Poszczególnym klasom ekspozycji (rys. 5.1) przyporządkowane są wymagania dotyczące składu mieszanki betonowej obejmujące:

- maksymalny współczynnik wodno-cementowy,
- minimalną zawartość cementu,
- minimalną klasę wytrzymałości betonu na ściskanie,
- dopuszczalne rodzaje i klasy składników,
- dla niektórych klas środowiskowych – minimalne napowietrzenie betonu i wymagania dla materiałów (cementy SR lub HSR, kruszywo mrozo odporne).

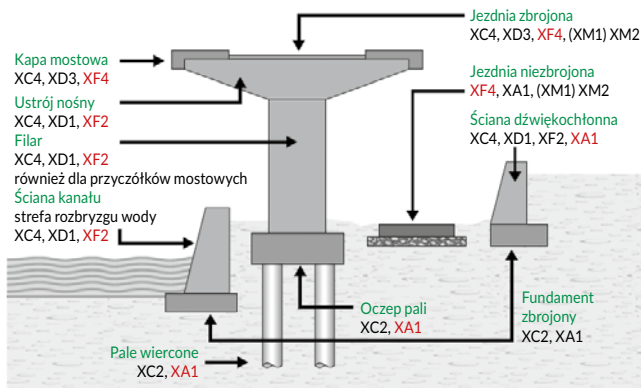
Beton może być poddany więcej niż jednemu oddziaływaniu opisanemu w tabeli 5.1, a zatem warunki środowiska, w których jest eksploatowany, mogą wymagać określenia za pomocą kombinacji kilku klas ekspozycji. Poszczególne elementy danej konstrukcji betonowej mogą być narażone na różne oddziaływania środowiska (rys. 5.2÷5.4).



Rys. 5.2. Przykłady klas ekspozycji w budownictwie mieszkaniowym



Rys. 5.3. Przykłady klas ekspozycji w budownictwie przemysłowym



Rys. 5.4. Przykłady klas ekspozycji w budownictwie komunikacyjnym

Tabela 5.1. Klasy ekspozycji oraz wymagania dla betonu wg PN-EN 206 z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265

Klasa ekspozycji	Środowisko	Maks. w/c ⁽¹⁾	Zawartość cementu [kg]		Min. klasa wytrzymałości betonu	Inne wymagania
			min.	min. przy stosowaniu dodatku typu II ⁽³⁾		
Brak ryzyka korozji lub brak oddziaływania	X0	–	–	–	C8/10	–
	XC1	0,70	260	250	C16/20	–
	XC2	0,65	280	260	C16/20	–
	XC3	0,60	280	260	C20/25	–
Karbonatyzacja	XC4	0,55	300	280	C25/30	–
	XD1	0,55	300	280	C30/37	–
	XD2	0,50	320	300	C30/37	–
Chlorki niepochozące z wody morskiej	XD3	0,45	320	300	C35/45	–
	XS1	0,50	300	280	C30/37	–
Chlorki pochodzące z wody morskiej	XS2	0,45	320	300	C35/45	–
	XS3	0,45	340	310	C35/45	–
	XA1	0,55	300	280	C30/37	–
Środowisko agresywne chemicznie ⁽²⁾	XA2	0,50	320	300	C30/37	Cementy odporne na siarczany ⁽³⁾
	XA3	0,45	360	330	C35/45	

Agresja mrozowa	XF1	umiarkowane nasycenie wodą	0,55	300	280	C30/37	Kruszywo kat. F ₂ ⁴⁾
	XF2	umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odładzającymi	0,55	300	5)	C25/30	Kruszywo kat. F ₄ ⁴⁾ Napowietrzenie ⁶⁾
	XF3	silne nasycenie wodą bez środków odładzających	0,50	320	5)	C30/37	
	XF4	silne nasycenie wodą ze środkami odładzającymi	0,45	340	5)	C30/37	Kruszywo kat. F _{NiCl6} ⁷⁾ Napowietrzenie ^{6,8)}
Agresja wywołana ścieraniem ⁹⁾	XM1	umiarkowane zagrożenie ścieraniem	0,55	300	280	C30/37	M _{DE} wart. deklarowana ^{9,10)}
	XM2	silne zagrożenie ścieraniem	0,50	300	280	C30/37	M _{DE2} /8mm ≤ 25 ^{9,10)} M _{DE6} /16mm ≤ 20 ^{9,10)}
	XM3	ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem	0,45	320	300	C35/45	

1) W przypadku koncepcji współczynnika k maksymalny współczynnik w/c oraz minimalna zawartość cementu modyfikuje się zgodnie z EN 206 p.5.2.5.2

2) Środowisko agresywne chemicznie należy kwalifikować do klasy ekspozycji od XA1 do XA3 na podstawie wartości granicznych podanych w tabeli 5.2.

3) W przypadku, gdy zawartość siarczków (SO₃²⁻) w środowisku pracy betonu wskazuje na klasy ekspozycji XA2 lub XA3 należy zastosować cement odporny na siarczany (SR) zgodny z EN 197-1 lub cement odporny na siarczany (HSR) zgodny z normą PN-B-19707.

4) Kruszywo o mrozoodporności odpowiadającej kategorii (F) wg EN 12620.

5) Dopuszcza się stosowanie dodatków typu II, lecz nie jako ekwiwalent dla minimalnej ilości cementu.

6) Zawartość objętościowa powietrza w mieszaninie betonowej przed jej wbudowaniem zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa i musi wynosić dla kruszywa:

do 8 mm ≥ 5,5%; do 16 mm ≥ 4,5%; do 32 mm ≥ 4,0%; do 64 mm ≥ 3,5%.

7) Kruszywo o mrozoodporności w rozwarze NaCl (F_{NiCl}) odpowiadającej wartości deklarowanej, na podstawie badania wg EN 1367-6.

8) Beton o konsystencji VO (≥ 31s) oznaczonej wg PN-EN 12350-3 i w/c ≤ 0,4 może być produkowany bez dodatkowego napowietrzenia.

9) Kruszywo o współczynniku ścieralności micro-Devala odpowiadającej kategorii (M_{DE}) wg EN 12620.

10) Wymagana właściwa pielęgnacja i obróbka powierzchni.

Zgodnie z założeniami normy PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 należy oczekiwać, że beton wykonany według wymagań podanych w tabeli 5.1 będzie trwały w środowisku, do jakiego został zaprojektowany, pod warunkiem:

- właściwego ułożenia, zagęszczenia i pielęgnacji,
- zapewnienia otulenia zbrojenia,
- zaprojektowania konstrukcji betonowej zgodnie z rzeczywistymi wymaganiami warunków środowiska,
- eksploatacji konstrukcji w warunkach dla jakich została zaprojektowana,
- przestrzegania właściwej konserwacji.

Szczególnym zagrożeniem dla betonu jest agresja chemiczna (klasy ekspozycji XA). Dotyczy gruntu naturalnego i wody gruntowej o temperaturze od 5°C do 25°C, przy nieznacznej prędkości jej przepływu, umożliwiającej uznanie warunków za statyczne. Klasę ekspozycji określa najbardziej niekorzystna wartość dla dowolnej pojedynczej charakterystyki chemicznej (tabela 5.2). W przypadku agresji chemicznej, potrzebne mogą być specjalne badania w celu ustalenia odpowiednich warunków ekspozycji, w których występują:

- inne ograniczenia niż wymienione w tabeli 5.2,
- inne agresywne substancje chemiczne,
- zanieczyszczony chemicznie grunt lub woda,
- woda o dużej prędkości w połączeniu z substancjami chemicznymi uwzględnionymi w tabeli 5.2.

W przypadku, gdy dwie lub więcej agresywnych charakterystyk wskazuje na tę samą klasę, środowisko należy zakwalifikować do następnej, wyższej klasy, chyba że specjalne badania dotyczące tego szczególnego przypadku wykażą, że nie jest to konieczne.

Tabela 5.2. Wartości graniczne dla klas ekspozycji XA

Właściwość chemiczna	Metoda badawcza	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	EN 196-2	≥200 i ≤600	>600 i ≤3000	>3000 i ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 i ≥5,5	<5,5 i ≥4,5	<4,5 i ≥4,0
CO ₂ agresywny [mg/l]	EN 13577	≥15 i ≤40	>40 i ≤100	>100 aż do nasycenia
NH ₄ ⁺ [mg/l]	ISO 7150-1	≥15 i ≤30	>30 i ≤60	>60 i ≤100
Mg ²⁺ [mg/l]	EN ISO 7980	≥300 i ≤1000	>1000 i ≤3000	>3000 aż do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ całkowite ^{a)} [mg/kg]	EN 196-2 ^{b)}	≥200 i ≤3000 ^{c)}	>3000 ^{d)} i ≤12000	>12000 i ≤24000
Kwasowość wg Baumanna Gully'ego [ml/kg]	prEN 16502	>200	nie spotykane w praktyce	
<p>a) Grunty gliniaste o przepuszczalności poniżej 10⁻⁵ m/s mogą być przesunięte do niższej klasy.</p> <p>b) Metoda badania przewiduje ekstrakcję SO₄²⁻ z użyciem kwasu chlorowodorowego; alternatywnie można zastosować ekstrakcję wodną, jeżeli takie badania były już wcześniej prowadzone w miejscu stosowania betonu.</p> <p>c) W przypadku, gdy istnieje ryzyko akumulacji jonów siarczanowych w betonie na skutek cyklicznego wysychania i nawilżania lub podciągania kapilarnego, wartość graniczną 3000 mg/kg należy zmniejszyć do 2000 mg/kg</p>				

5.1.2. Wymagania dotyczące składników betonu

Zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 do betonu należy stosować wyłącznie składniki o ustalonej przydatności. W przypadku, gdy nie ma normy europejskiej dotyczącej danego składnika, ustalenie jego przydatności można przeprowadzić na podstawie:

- europejskiej oceny technicznej, dotyczącej w szczególności zastosowania tego składnika do betonu,
- przepisów obowiązujących w miejscu stosowania betonu, dotyczących w szczególności tego składnika.

Należy jednak pamiętać, że ustalona ogólna przydatność danego składnika nie oznacza jego przydatności w przypadku dowolnego zastosowania.

5.1.2.1. Cement

Cement jest podstawowym składnikiem betonu, umożliwiającym jego wiązanie i twardnienie w wyniku postępującej reakcji i procesów hydratacji.

Ogólną przydatność cementu ustala się zgodnie z:

- PN-EN 197-1 – cementy powszechnego użytku, w tym właściwości specjalne LH i SR,
- PN-EN 197-5 - cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/C-M i wieloskładnikowe CEM VI,
- PN-B-19707 – cementy specjalne HSR i NA,
- PN-EN 14216 – cementy specjalne o bardzo niskim cieple hydratacji VLH (w przypadku konstrukcji masywnych),
- PN-EN 14647 – cement glinowo-wapniowy,
- PN-EN 15743 – cement supersiarczanowy.

W wielu przypadkach wybór cementu decyduje o trwałości betonu, tzn. o odporności betonu na działanie mrozu, mediów agresywnych chemicznie, itp. Dobór cementu, szczególnie pod względem rodzaju i klasy wytrzymałości, zależy od przeznaczenia betonu (zastosowania) oraz warunków jego użytkowania (klasy ekspozycji) i powinien być dokonany w oparciu o odpowiednie normy i przepisy dotyczące użytkowania obiektu budowlanego.

Należy mieć na uwadze, że żaden cement nie będzie uniwersalny w zastosowaniu, tzn. najlepszy w każdych warunkach stosowania. Dobierając cement do konkretnej realizacji, np. obiektu mostowego należy rozważyć zastosowanie kilku rodzajów cementów, w zależności od przeznaczenia i warunków pracy danego elementu (fundamenty – CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA, pylon – CEM III/A 42,5N-HSR/NA, zwieńczenie pylonu – strefa zakotwienia want – CEM I 42,5R).

Rodzaj i klasę cementu do betonu należy dobierać w zależności od:

- warunków realizacji (wykonania konstrukcji betonowej):
 - temperatury otoczenia,
 - warunków dojrzewania - dojrzewanie w warunkach naturalnych, obróbka cieplna - niskoprężne naparzenie,
 - sposobu pielęgnacji betonu,
 - szybkości rozformowania elementów,
 - długości transportu mieszanki betonowej,
 - objętości betonowanego elementu, wymiary konstrukcji - wydzielanie ciepła (element masywny - stosowanie cementów o niskim cieple hydratacji LH/VLH).

- wymaganych właściwości betonu:
 - klasy wytrzymałości,
 - szczelności betonu,
 - mrozoodporności,
 - potencjalnej reaktywności kruszywa z alkaliami (stosowanie cementów NA zgodnych z PN-B-19707),
 - przeznaczenia betonu i warunków środowiska, na którego działanie będzie narażona konstrukcja (klasy ekspozycji).

Cement portlandzki CEM I	<ul style="list-style-type: none"> • betony klasy wytrzymałości C40/50 i wyższych (cementy klas 42,5; 52,5) • betony konstrukcyjne i nawierzchniowe w budownictwie komunikacyjnym (drogi, mosty) • betony samozagęszczalne SCC • można stosować we wszystkich klasach ekspozycji z wyłączeniem klas XA2, XA3 w przypadku zagrożenia korozją siarczanową (tylko cementy SR, HSR) • produkcja elementów prefabrykowanych, kostki brukowej, galerii betonowej (krawężników, palisad, obrzeży chodnikowych, itp.), dachówek cementowych
Cement portlandzki żuźłowy CEM II/ A,B-S	<ul style="list-style-type: none"> • produkcja betonów zwykłych w klasach wytrzymałości do C30/37 • cementy szczególnie przydatne przy wykonywaniu obiektów narażonych na agresję siarczanową (oczyszczalnie ścieków, budownictwo morskie, roboty górnicze) • produkcja galerii betonowej i elementów prefabrykowanych (cementy klas 42,5; 52,5 R)
Cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V	<ul style="list-style-type: none"> • produkcja betonów zwykłych w klasach wytrzymałości do C35/45 • cementy z dodatkiem popiołu lotnego V i granulowanego żuźla wielkopiecowego S mają podobny zakres stosowania jak cementy CEM II/A,B-S i CEM II/A,B-V • cementy z dodatkiem kamienia wapiennego (V-LL, S-LL) są szczególnie przydatne do stosowania w betonie w przypadku zagrożenia karbonatyzacją (klasy ekspozycji XC1-XC3)
Cement pucolanowy CEM IV/A,B	<ul style="list-style-type: none"> • betony klasy wytrzymałości C35/45 i wyższych (cementy klas 42,5; 52,5) • do betonów wszystkich klasach ekspozycji, w klasach XA2, XA3 (korozja siarczanowa) CEM III SR, HSR, w klasie XF4 zaleca się stosowanie CEM III/A (zawartość żuźla < 50%) w klasie wytrzymałości 42,5 • szczególnie zalecane do betonu przy budowie konstrukcji masywnych fundamentów, zapór wodnych, oczyszczalni ścieków, obiektów morskich • CEM III/A,B 42,5 (N, R) może być stosowany w prefabrykacji i produkcji galerii betonowej
Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A,B-M (V, S, L, LL)	<ul style="list-style-type: none"> • produkcja betonów zwykłych w klasach wytrzymałości do C30/37 • CEM V/A można stosować w betonach zwykłych we wszystkich klasach ekspozycji • CEM V/B można stosować w betonie w przypadku zagrożenia karbonatyzacją (klasy ekspozycji XC1 - XC3) • CEM V/B z uwagi na wysoką zawartość dodatków mineralnych w składzie zalecany jest do wykonywania elementów narażonych na agresję chemiczną (klasy ekspozycji XA)
Cement hutniczy CEM III/A, B, C	<ul style="list-style-type: none"> • produkcja betonów zwykłych w klasach wytrzymałości do C30/37 • CEM V/A można stosować w betonach zwykłych we wszystkich klasach ekspozycji • CEM V/B można stosować w betonie w przypadku zagrożenia karbonatyzacją (klasy ekspozycji XC1 - XC3) • CEM V/B z uwagi na wysoką zawartość dodatków mineralnych w składzie zalecany jest do wykonywania elementów narażonych na agresję chemiczną (klasy ekspozycji XA)
Cement wieloskładnikowy CEM V/A,B	<ul style="list-style-type: none"> • produkcja betonów zwykłych w klasach wytrzymałości do C30/37 • CEM V/A można stosować w betonach zwykłych we wszystkich klasach ekspozycji • CEM V/B można stosować w betonie w przypadku zagrożenia karbonatyzacją (klasy ekspozycji XC1 - XC3) • CEM V/B z uwagi na wysoką zawartość dodatków mineralnych w składzie zalecany jest do wykonywania elementów narażonych na agresję chemiczną (klasy ekspozycji XA)

Rys. 5.5. Orientacyjne zakresy stosowania cementów powszechnego użytku w składzie betonu

Obszary zastosowań cementów do produkcji betonu w poszczególnych klasach ekspozycji przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Obszary zastosowań cementów zgodnych z PN-EN 197-1 lub PN-B-19707 do produkcji betonu w poszczególnych klasach ekspozycji

Rodzaj cementu		Klasy ekspozycji																Interakcja ze strony stali sprężającej			
		Korozyja zagrożenia				Korozyja zbrojenia				Agresja wobec betonu				Agresja wywołana ścieraniem							
		Korozyja wskutek karbonatyzacji		Korozyja chłorkowa		Korozyja zbrojenia		Korozyja zbrojenia		Zamrażanie / rozmrażanie		Środowisko chemiczne agresywne							Środowisko chemiczne agresywne		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3	
Cementy zgodne z EN 197-1 lub PN-B-19707																					
CEM I		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A/B S		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A V ⁽¹⁾		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A W ⁽²⁾		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A LL		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CEM II		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A L		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A D		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A T		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
A P,Q		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

CEM II																				
B										C										
M																				
S-V ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-LL	✓	✓	el	el	el	el	el	el	X	✓	✓	el	el	el	el	el	el	el	el	✓
V ⁰¹ -LL	✓	✓	el	el	el	el	el	el	el	el	✓	el	el	el	el	el	el	el	el	✓
S-W ⁰¹	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X
V ⁰¹ -W ⁰¹	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X
W ⁰¹ -LL	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X
V ⁰¹ -Q, V ⁰¹ -P, Q-LL, P-LL	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S-V ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V ⁰¹ -LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-W ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V ⁰¹ -W ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
W ⁰¹ -LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V ⁰¹ -Q, V ⁰¹ -P, Q-LL, P-LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-V ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V ⁰¹ -LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S-W ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V ⁰¹ -W ⁰¹	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
W ⁰¹ -LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
V ⁰¹ -Q, V ⁰¹ -P, Q-LL, P-LL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

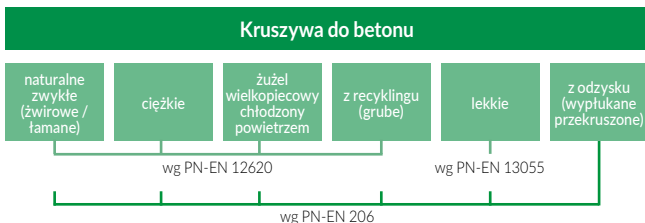
5.1.2.2. Kruszywo

Kruszywo stanowi około 70-80% całkowitej objętości betonu. Oczywiście jest zatem, że przy tak dużym udziale ma ono znaczący wpływ na kształtowanie się cech, zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu.

Ogólną przydatność kruszywa ustala się w odniesieniu do (rys. 5.6):

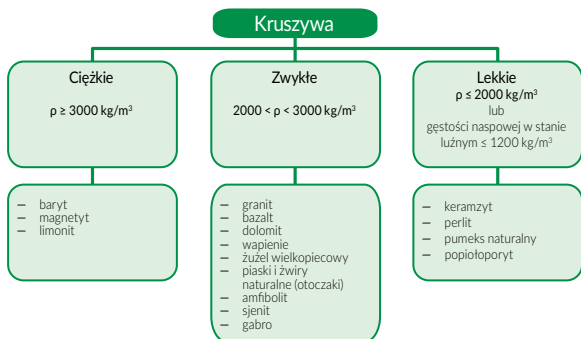
- naturalnych kruszyw zwykłych, kruszyw ciężkich oraz żużla wielkopieczowego chłodzonego powietrzem, zgodnie z PN-EN 12620,
- kruszyw lekkich zgodnie z PN-EN 13055-1,
- kruszyw z odzysku,
- kruszyw z recyklingu i kruszyw przetworzonych, innych niż żużel wielkopieczowy chłodzony powietrzem (dopuszcza się do stosowania jako kruszywa do betonu, jeżeli ich przydatność określona jest w przepisach obowiązujących w miejscu stosowania).

Najczęściej w produkcji betonu stosuje się kruszywa naturalne żwirowe i łamane.



Rys. 5.6. Podział kruszyw do betonu w ujęciu norm PN-EN 206, PN-EN 12620, PN-EN 13055

Podział kruszyw ze względu na gęstość objętościową w stanie suchym przedstawiono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Podział i przykłady kruszyw ze względu na gęstość objętościową w stanie suchym

Kruszywa żwirowe – rys. 5.8 - powstały w wyniku naturalnych procesów przyrodniczych, takich jak wietrzenie skał i erozyjne działanie wody. Okruchy skalne są przenoszone przez prąd rzeki, bądź falowanie wody. W efekcie tego działania uzyskały zaokrąglony kształt ziaren. Nazywane są potocznie kruszywem otoczkowym.



Rys. 5.8. Piasek i kruszywa naturalne żwirowe

Kruszywa naturalne łamane (grysy) – rys. 5.9 - powstały w wyniku mechanicznego rozdrobnienia skał litych. Najczęściej są to skały magmowe (granit, sjenit, bazalt) i skały węglanowe (wapień, dolomit). Kruszywa uzyskane ze skał magmowych charakteryzują się wysoką odpornością na ścieranie, niską porowatością, a co za tym idzie – niską nasiąkliwością, odpowiednią mrozoodpornością. Kruszywa łamane są zazwyczaj używane do produkcji betonów wysokich klas wytrzymałości (betony mostowe, nawierzchniowe).

Przy doborze kruszywa do betonu należy kierować się zapisami normy PN-EN 206+A2:2021, 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.



WAPIEŃ



DOLOMIT



GRANIT



BAZALT



SJENIT



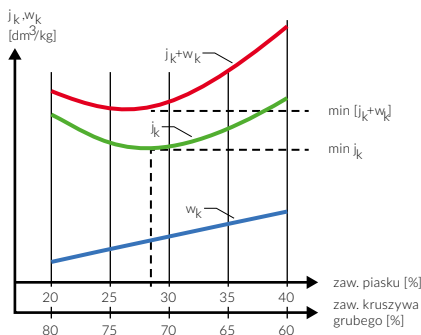
AMFIBOLIT

Rys. 5.9. Kruszywa naturalne łamane

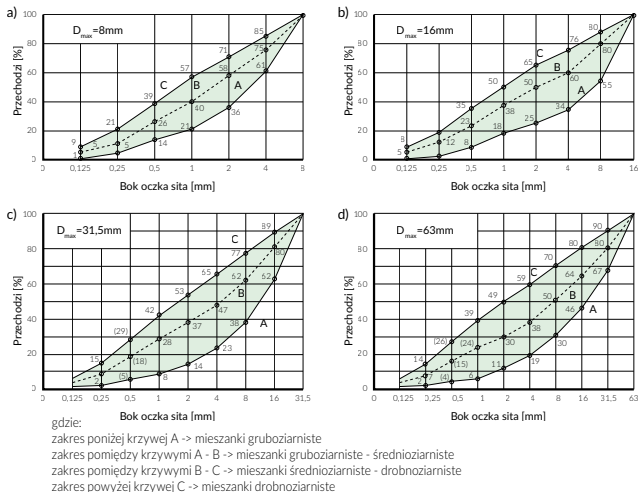
W celu prawidłowego zaprojektowania mieszanki betonowej należy dobrać odpowiednie proporcje kruszywa grubego i piasku, tak aby ukształtowały w betonie szczelny stos okruchowy. Uziarnienie kruszywa do betonu powinno zapewnić możliwie niskie zapotrzebowanie na zaczyn cementowy (cement i wodę). Zapotrzebowanie to wynika głównie z dwóch cech kruszywa:

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

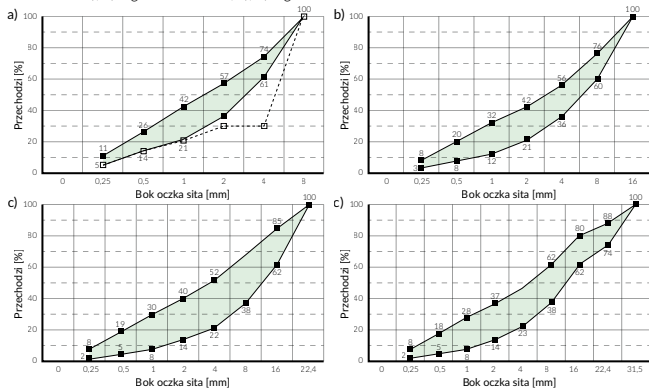
Zarówno jamistość, jak i powierzchnię zewnętrzną należy zatem minimalizować (rys. 5.10). Równoczesne uzyskanie minimum tych dwóch wielkości nie jest jednak możliwe. Optymalnym rozwiązaniem jest kompromis, którego efektem są tzw. obszary właściwego uziarnienia, zawarte w normach przedmiotowych (rys. 5.11) i specyfikacjach technicznych (rys. 5.12). Mieszanki kruszywowe z tego obszaru spełniają równocześnie wymaganie minimalnej jamistości przy minimalnej wodoządnności. Ponadto, uzupełnienie krajowe PN-B-06265 podaje wartości dla krzywych granicznych obszaru zalecanego uziarnienia stosów okruchowych $D_{\max}=8\text{mm}$ (rys. 5.11a) oraz $D_{\max}=16\text{mm}$ (rys. 5.11b) dla mieszanek betonowych o konsystencji w klasach S2÷S4. Skład poszczególnych frakcji kruszyw ustalić należy przez badanie składu ziarnowego wg normy PN-EN 933-1. W stosunku do D_{\max} dopuszczalne jest występowanie nadziarna zgodnie z kategorią uziarnienia stosowanego kruszywa według normy PN-EN 12620.



Rys. 5.10. Zmiany jamistości (j_k) i wodoządnności (w_k) kruszywa w zależności od zawartości piasku



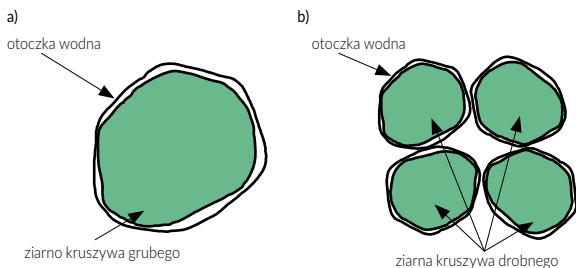
Rys. 5.11. Krzywe uziarnienia kruszywa w zależności od maksymalnego wymiaru ziaren D_{max} , a), b) wg PN-B-06265, c), d) wg DIN-1045-2



Rys. 5.12. Zalecane graniczne krzywe uziarnienia kruszywa do betonu nawierzchniowego wg WWIORB D-05.03.04 Nawierzchnie z betonu cementowego

Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej (kruszywowej) dla betonu nawierzchniowego powinna się mieścić w obszarze dobrego uziarnienia wyznaczonego przez krzywe graniczne dla mieszanek o ciągłym lub o nieciągłym uziarnieniu (rys. 5.12). Ponadto, maksymalny wymiar ziaren kruszywa D_{max} nie powinien przekraczać 1/4 grubości warstwy nawierzchni oraz 1/3 długości przestrzeni pomiędzy podłużnymi prętami zbrojeniowymi dla nawierzchni betonowych dylatowanych zbrojonych i dla nawierzchni o zbrojeniu ciągłym. WWiORB stawiają dodatkowe wymagania dla górnej warstwy nawierzchni betonowej o odkrytym kruszywie. Mają one na celu zapewnienie odpowiedniej makrotekstury nawierzchni oraz współczynnika tarcia. W celu spełnienia tych wymagań zaleca się stosowanie mieszanki kruszywowej 0/8 mm o nieciągłym uziarnieniu (rys. 5.12a). W przypadku nawierzchni dwuwarstwowych, do górnej warstwy zaleca się stosowanie mieszanki kruszywowej o uziarnieniu 0/16 lub 0/22 mm (rys. 5.12 b, c).

Dobór kruszywa powinien zatem gwarantować uzyskanie odpowiedniej krzywej uziarnienia mieszanki kruszywowej. Od rozwinięcia powierzchni ziaren kruszywa (rys. 5.13) zależy ilość zaczynu cementowego niezbędne dla uzyskania założonej konsystencji mieszanki betonowej. Najbardziej rozwiniętą powierzchnią ziaren charakteryzuje się piasek (frakcja < 2 mm) rys. 5.13b, z tego względu bardzo istotnym parametrem jest w technologii betonu tzw. „punkt piaskowy”, czyli zawartość piasku (% masy) w mieszance kruszywowej.



Rys. 5.13. Wpływ uziarnienia kruszywa na wodozgodność a) kruszywo grube, b) kruszywo drobne

W celu zapewnienia właściwego układania i zagęszczania mieszanki betonowej, z uwzględnieniem transportu, niezbędne jest dobranie odpowiedniej zawartości frakcji piaskowej (0-2mm) w stosie okruchowym kruszywa. Orientacyjnie, dla mieszanek betonowych, zależnie od sposobu zagęszczania i konsystencji mieszanki betonowej oraz od zagęszczenia wkładek zbrojeniowych w betonowanym elemencie, przyjmuje się punkt piaskowy w granicach:

- 27-30% - mieszanki betonowe układane ręcznie, zagęszczane mechanicznie (wibrowane); konsystencja plastyczna, półciekła; elementy zbrojone (stopień zbrojenia do 2,5% powierzchni przekroju elementu),
- 35-40% - mieszanki betonowe podawane pompą, wibrowane lub samozagęszczalne; konsystencja półciekła, ciekła; elementy gęsto zbrojone,
- 45-60% - mieszanki wibroprasowane; konsystencja wilgotna, gęstoplastyczna; elementy niezbrojone lub rzadko zbrojone, o prostych, nieskomplikowanym kształcie przekroju.

Brak lub niedobór pewnych frakcji ziarnowych w mieszance kruszywowej prowadzi do wyraźnego pogorszenia właściwości reologicznych mieszanki betonowej (urabialności, konsystencji) oraz obniża jakość stwardniałego betonu (wyższa nasiąkliwość, obniżona wytrzymałość i mrozoodporność). Zbyt duży udział frakcji drobnych (pylastych) w stosie okruchowym kruszywa prowadzi do wzrostu wodozadržności, efektem czego jest pogorszenie warunków ekonomicznych produkcji betonu – potrzeba więcej cementu w m³ betonu dla uzyskania wymaganej konsystencji mieszanki. Przy określaniu maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa należy uwzględnić pewne ograniczenia, związane z wymiarami przekroju elementu betonowego oraz stosowanego zbrojenia (rozstaw i średnica prętów zbrojeniowych).

Maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie może być większy niż:

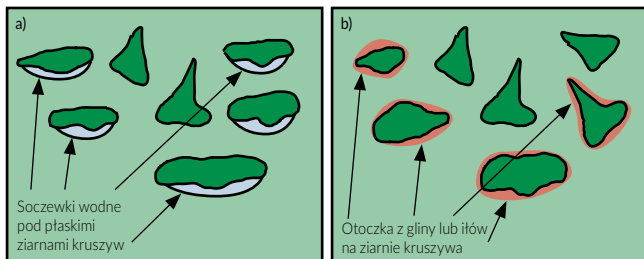
- 1/3 najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego elementu,
- 3/4 odległości między prętami zbrojenia.

Jakość stosowanych kruszyw jest bardzo istotna dla trwałości betonu. Zanieczyszczenia organiczne, głównie kwasy humusowe powstające z rozkładu roślin, kawałki węgla kamiennego, ziarna zbóż i kawałki drewna, pochodzące, np. z nieoczyszczonych naczep ciężarówek po poprzednim ładunku, wpływają niekorzystnie na przebieg hydratacji cementu. Pogarszają one estetykę i właściwości użytkowe betonu. Dotyczy to zwłaszcza betonów architektonicznych i wykonawstwa posadzek przemysłowych. Zanieczyszczenia organiczne, jeżeli dostaną się z kruszywem do betonu, mogą w niekontrolowany sposób zwiększać swoją objętość (pęcznić), a w efekcie powodować złuszczenie powierzchni,

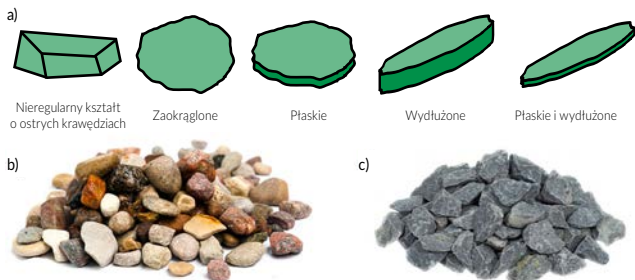
odpryski, a nawet spękania posadzek betonowych.

Czynnikiem wpływającym na właściwości betonu jest zawartość pyłów mineralnych (ziaren mniejszych od 0,063 mm), szczególnie minerałów ilastych i glin w kruszywie (rys. 5.14b). Jako ziarna posiadające największą powierzchnię właściwą, pyły zwiększają znacząco wodożądność stosu okruszowego, a co za tym idzie – współczynnik wodno-cementowy. Bardzo często ziarna pyłów tworzą powłokę na ziarnach kruszywa grubego, przez co znacząco pogarsza się przyczepność zaczynu do powierzchni ziaren, co może skutkować spadkiem lub w skrajnych przypadkach nawet brakiem mrozoodporności betonu.

Równie istotnym parametrem jest kształt ziaren kruszywa. Zazwyczaj kruszywa łamane mają kształt zbliżony do graniastostupów o wyraźnych, ostrych krawędziach, natomiast kruszywa naturalne są zaokrąglone, o kształcie zbliżonym do kuli (rys. 5.15). W obu przypadkach są to ziarna o najbardziej pożądanym kształcie ze względu na mały stosunek powierzchni do objętości, co minimalizuje zużycie cementu. W kruszywach mogą występować również ziarna wydłużone i płaskie, obecność których utrudnia pompowanie i szczelne ułożenie mieszanki betonowej (pogorszenie urabialności). W trakcie zagęszczania betonu pod ziarnami płaskimi może powstawać soczewka wodna (rys. 5.15a), co skutkuje brakiem przyczepności zaczynu do ziaren kruszywa, a w efekcie może pogorszyć trwałość stwardniałego betonu.



Rys. 5.14. Wpływ kruszywa na kształtowanie strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn
a) tworzenie się soczewek wodnych pod ziarnami płaskimi, b) otoczki z minerałów ilastych na ziarnach kruszywa



Rys. 5.15. Kształt ziaren kruszywa a) klasyfikacja, b) kruszywo otoczkowe o zaokrąglonych ziarnach, c) kruszywo łamane o nieregularnym kształcie

KRUSZYWO O UZAIARNIENIU CIĄGŁYM

Kruszywo o ciągłym uziarnieniu o zakresie wymiarów większym niż 0/8 zgodnie z PN-EN 12620 należy stosować wyłącznie do betonów klas wytrzymałości na ściskanie \leq C12/15.

KRUSZYWO Z ODZYSKU

Norma wyróżnia dwa rodzaje kruszyw „odzyskanych”:

- kruszywo uzyskane przez wyflukanie z mieszanki betonowej,
- kruszywo uzyskane przez rozkruszenie stwardniałego betonu, który nie był wcześniej zastosowany w konstrukcji.

Kruszywo z odzysku można stosować jako kruszywo do betonu pod warunkiem, że jest ono stosowane wyłącznie przez producenta lub grupę producentów betonu, od którego pochodzi to kruszywo. Podczas stosowania kruszyw z odzysku należy pamiętać, że:

- jeżeli kruszywo z odzysku nie jest rozdzielone na frakcje, nie należy dodawać go w ilościach większych niż 5 % całkowitej masy kruszywa,
- w przypadku, gdy ilość kruszywa odzyskanego przez wyflukanie jest większa niż 5 % całkowitej masy kruszywa, kruszywo to powinno być rozdzielone na kruszywo grube i drobne oraz powinno być zgodne z PN-EN 12620,
- w przypadku, gdy ilość kruszywa odzyskanego przez przekruszenie jest większa niż 5 % całkowitej masy kruszywa, kruszywo to powinno być traktowane jako kruszywo z recyklingu.

KRUSZYWO GRUBE Z RECYKLINGU

Kruszywem z recyklingu nazywamy kruszywo uzyskane w wyniku przetworzenia materiału nieorganicznego zastosowanego wcześniej w konstrukcji. W Tabeli 5.4. podano ograniczenia dotyczące zastępowania naturalnych kruszyw grubych kruszywami grubymi z recyklingu ($d \geq 4$ mm), w odniesieniu do klas ekspozycji.

Tabela 5.4. Udział kruszywa z recyklingu jako % kruszywa grubego wg PN-EN 206+A2:2021

Typ kruszywa z recyklingu	Klasa ekspozycji			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Inne klasy ekspozycji ^{a)}
Typ A : (RC ₉₀ , RC _{U95} , Rb ₁₀ , Ra ₁ , Fl ₂ , Rg ₁)	50%	30%	30%	0%
Typ B ^{b)} : (RC ₅₀ , RC _{U70} , Rb ₃₀ , Ra ₅ , Fl ₂ , XRg ₂)	50%	20%	0%	0%

a) Kruszywa z recyklingu typu A znanego pochodzenia można stosować przy klasach ekspozycji, na które zaprojektowano oryginalny beton, przy maksymalnym procencie zastąpienia 30 %
b) Nie zaleca się stosowania kruszyw z recyklingu typu B do betonu klas wytrzymałości >C30/37

ODPORNOŚĆ NA REAKCJĘ ALKALIA-KRZEMIONKA

W przypadku, gdy kruszywo zawiera odmiany krzemionki podatne na reakcję z alkali (Na₂O i K₂O, pochodzące ze składu cementu, środków odladzających lub innych źródeł), a beton narażony jest na działanie środowiska wilgotnego, należy podjąć działania w celu zapobiegania szkodliwej reakcji, uwzględniając przepisy obowiązujące w miejscu stosowania betonu. Więcej informacji na temat reakcji alkalia-krzemionka znajduje się w rozdziale 5.2.5.13.

5.1.2.3. Woda zarobowa

Woda zarobowa, czyli woda dodawana do mieszaniny cementu i kruszywa w celu umożliwienia hydratacji cementu oraz uzyskania mieszanki betonowej o żądanej konsystencji. Jakość stosowanej wody może w znaczący sposób wpływać na właściwości stwardniałego betonu. Wymagania dotyczące wody zarobowej do produkcji betonu zawarte są w normie PN-EN 1008 „Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu”. Oprócz wody pitnej, która nie wymaga badania, norma dopuszcza do stosowania, po uprzednim zbadaniu, inne rodzaje wód:

- odzyskaną z procesu produkcji betonu,
- ze źródeł podziemnych,
- naturalną wodę powierzchniową i wodę ze ścieków przemysłowych,
- morską lub zasoloną.

Wodę poddaje się wstępnej ocenie pod względem:

- zawartości olejów i tłuszczów,
- zawartości detergentów (piana powinna zanikać w ciągu 2 minut),
- barwy (bladożółta lub jaśniejsza – nie dotyczy wody z produkcji betonu),
- zawiesiny (nie więcej niż 4ml osadu – nie dotyczy wody z produkcji betonu),
- zapachu (zapach jak wody pitnej, bez zapachu H₂S po dodaniu HCl),
- kwasowości (pH ≥ 4),
- zawartości substancji humusowych (jakościowa ocena barwy po dodaniu NaOH jako żółtawobrzozowa lub jaśniejsza).

W zakresie właściwości chemicznych norma stawia następujące wymagania:

- zawartość chlorków:
 - dla betonu sprężonego i zaczynu iniekcyjnego do kanałów kablowych – do 500 mg/l wody,
 - dla betonów zbrojonych – do 1000 mg/l wody,
 - dla betonów niezbrojonych – do 4500 mg/l wody,
- zawartość siarczanów, jako SO₄²⁻ nie powinna przekraczać 2000mg/l wody,
- zawartość alkaliów nie powinna przekraczać (w przeliczeniu na NaOH 1500 mg/l) chyba, że wykaże się brak szkodliwej reakcji reaktywnej krzemionki z alkaliami,
- inne zanieczyszczenia szkodliwe (cukry, azotany, fosforany, ołów i cynk) sprawdza się, czy nie wpływają negatywnie na czas wiązania i wytrzymałość betonu.

W przypadku wody odzyskiwanej z produkcji betonu, dodatkowo spełnione muszą być następujące wymagania:

- jednorodność zawiesiny materiału stałego,
- dodatkowa masa materiału stałego w betonie wynikająca z użycia wody odzyskiwanej z produkcji betonu powinna być mniejsza niż 1% całkowitej masy kruszywa w betonie (obliczane na podstawie kontroli gęstości wody),

UWAGA!

Zgodnie z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265 do normy PN-EN 206 do produkcji betonów narażonych na oddziaływanie środowiska w klasie ekspozycji XF nie można stosować wody odzyskanej z procesów produkcji betonu. Nie zaleca się stosowania wody z recyklingu do produkcji betonów architektonicznych czy elementów fasadowych.

5.1.2.4. Domieszki chemiczne

Stosowanie domieszek chemicznych w technologii betonu jest rozwiązaniem powszechnie praktykowanym. Domieszki pozwalają na skuteczne modyfikowanie właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Ogólną przydatność domieszek do betonu ustala się zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 934-2 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”.

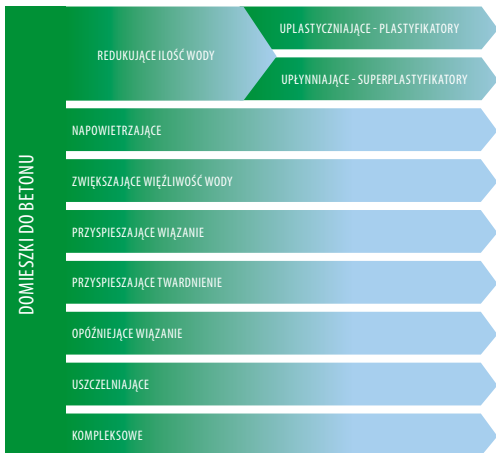
Domieszki chemiczne są definiowane w normie PN-EN 206+A2:2021 jako składniki dodawane w niewielkich ilościach (do 5%) w stosunku do masy cementu podczas procesu produkcji mieszanki betonowej.

Najpowszechniej w technologii betonu stosuje się domieszki redukujące ilość wody - plastyfikatory i superplastyfikatory. Domieszki klasyfikuje się ze względu na skutki modyfikacji właściwości betonu - decydujący jest główny kierunek działania (rys. 5.16). W przypadku, gdy domieszka modyfikuje więcej niż jedną właściwość, jest traktowana jako kompleksowa (wielofunkcyjna).

Podkreślić należy, że oczekiwane rezultaty stosowania domieszek chemicznych w składzie betonu, możliwe są do uzyskania tylko wtedy, gdy beton zostanie zaprojektowany w prawidłowy sposób pod względem jakościowym i ilościowym (odpowiedni dobór pozostałych składników mieszanki betonowej). Należy również zapewnić odpowiednie warunki produkcji i transportu mieszanki betonowej oraz jej ułożenia, zagęszczenia, a także pielęgnacji betonu.

UWAGA!

Domieszki chemiczne nie poprawiają właściwości nieodpowiednio zaprojektowanej mieszanki betonowej lub betonu niepoprawnie zabudowanego (nieterminowy transport, nieprawidłowe zagęszczenia, brak pielęgnacji, itp.).



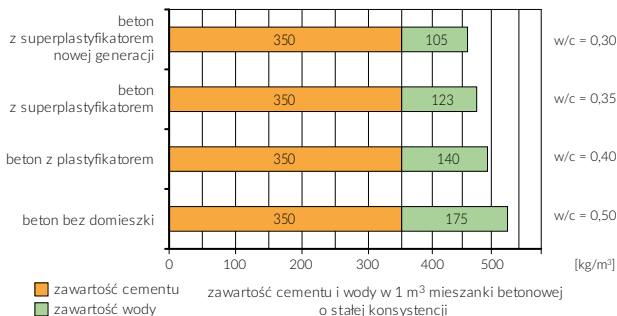
Rys. 5.16. Klasyfikacja domieszek wg PN-EN 934-2

DOMIESZKI UPLASTYCZNIAJĄCE I UPŁYNNIAJĄCE (PLASTYFIKATORY I SUPERPLASTYFIKATORY)

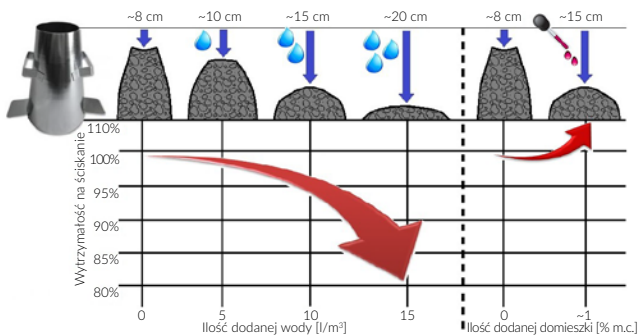
Najliczniejszą grupę rodzajową na rynku stanowią domieszki redukujące wodę (rys. 5.16) i jednocześnie poprawiające urabialność mieszanki betonowej, pomimo obniżenia współczynnika w/c (rys. 5.17). W tej grupie domieszek rozróżnia się:

- domieszki uplastyczniające (redukujące ilość wody), czyli plastyfikatory, pozwalające na zmniejszenie ilości wody zarobowej w granicach 5–12%,
- domieszki upłynniające (znacznie redukujące ilość wody), tzw. superplastyfikatory, pozwalające na zmniejszenie ilości wody o więcej niż 12% (domieszki nowej generacji nawet do 40%).

Głównym celem stosowania domieszek o działaniu redukującym ilość wody jest zapewnienie odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej bez konieczności zwiększania zawartości wody, co mogłoby skutkować obniżeniem wytrzymałości betonu (rys. 5.18).



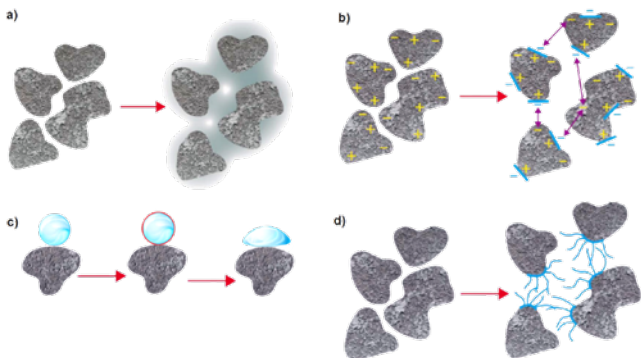
Rys. 5.17. Redukcja zawartości wody w mieszance betonowej przy zachowanej stałej konsystencji z zastosowaniem domieszki uplastyczniającej lub upłynniającej



Rys. 5.18. Zasada działania domieszek redukujących ilość wody w mieszance betonowej

Obniżenie ilości wody i utrzymanie konsystencji pozwala na zwiększenie wytrzymałości betonu, a także poprawę jego trwałości poprzez zwiększenie mrozoodporności, szczelności i obniżenie nasiąkliwości. Dozując plastyfikator należy stosować się do zaleceń producenta domieszki. Domieszki upłynniające (superplastyfikatory) umożliwiają znaczne obniżenie zawartości wody zarobowej.

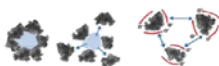
Efektywnie zwiększają konsystencję mieszanki betonowej (w znacznie większym stopniu niż domieszki uplastyczniające). Pozwala to na produkcję mieszanek betonowych przy bardzo niskim współczynniku w/c i odpowiedniej ciekłości. Mechanizm działania superplastyfikatorów jest zróżnicowany (rys. 5.19) i uzależniony od rodzaju substancji czynnej (bazy chemicznej) w domieszce (rys. 5.20).



Rys. 5.19. Mechanizm działania domieszek chemicznych a) mechanizm smarny, b) mechanizm elektrostatyczny, c) mechanizm hydrofilowy, d) mechanizm steryczny

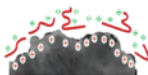
Plastyfikatory mogą działać w dwojaki sposób - powodując powstanie na ziarnach cementu i mikrowypełniaczy warstwy „smaru” (rys. 5.19a), o grubości mierzonej w wielkościach molekularnych, zmniejszającej tarcie wewnętrzne w mieszance betonowej lub otaczając ziarna cementu ładunkami ujemnymi (mechanizm elektrostatyczny), powodując ich wzajemne odpychanie się (rys. 5.19b), a tym samym „rozluźnienie” struktury mieszanki betonowej. Z kolei superplastyfikatory pierwszych generacji powodują zmniejszenie napięcia powierzchniowego wody (rys. 5.19c) w stosunku do cementu i mikrowypełniaczy. Najnowsza generacja upłynniaczy działa na zupełnie innej zasadzie. Ich długie łańcuchy polimerowe fizycznie uniemożliwiają ziarnom cementu zbliżanie się do siebie. Efekt ten nazywany jest efektem sterycznym (rys. 5.19d). Często domieszki te działają w jeszcze bardziej wyrafinowany sposób i łączą w sobie różne „techniki” oddziaływania na mieszankę betonową. Na przykład łącząc oddziaływanie steryczne i elektrostatyczne.

Lignosulfoniany



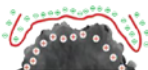
- elektrostatyczne odpychanie międzycząsteczkowe
- obniżone napięcie powierzchniowe
- działanie opóźniające
- redukcja wody do 10%

Naftaleny Melaminy



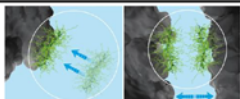
- elektrostatyczne odpychanie międzycząsteczkowe
- poprawa właściwości wiążących
- redukcja wody do 20%

Kopolimery winylu



- elektrostatyczne odpychanie międzycząsteczkowe
- redukcja wody do 25%

Poli- karboksyetry (PCE)



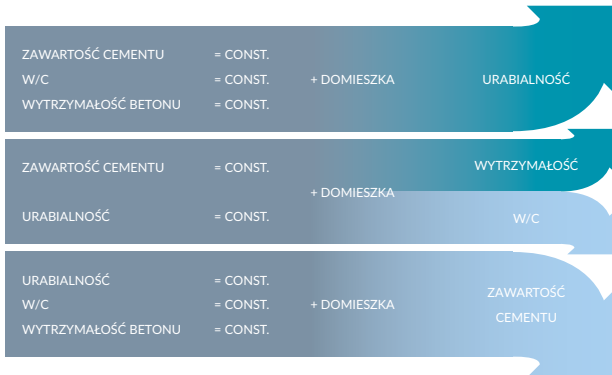
- elektrostatyczne odpychanie międzycząsteczkowe
- przestrzenne przeszkody
- redukcja wody do 40%

Rys. 5.20. Mechanizmy i efekty działania domieszek w zależności od bazy chemicznej

Wpływ domieszek upłynniających na właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego, może być trojakiemu rodzaju (rys. 5.21):

- poprawa urabialności poprzez zwiększenie ciekłości mieszanki betonowej,
- zwiększenie wytrzymałości betonu poprzez zmniejszenie ilości wody zarobowej przy niezmienionej zawartości cementu,
- zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła wskutek zmniejszenia zużycia cementu na projektowaną klasę wytrzymałości betonu.

Niektóre rodzaje superplastyfikatorów charakteryzują się krótkotrwałym efektem działania w czasie, np. 30÷60 min, po którym mieszanka betonowa wraca do pierwotnej konsystencji i urabialności. Rozwiązanie to sprawdza się w przypadku produkcji prefabrykatów betonowych, natomiast w betonach towarowych, przy stosowaniu tego typu domieszek, aby wydłużyć efekt upłynnienia, można stosować dwuetapowe dozowanie domieszki: pierwsze - podczas produkcji mieszanki betonowej na węźle, a drugie - bezpośrednio przed zabudową mieszanki w deskowaniu na placu budowy.



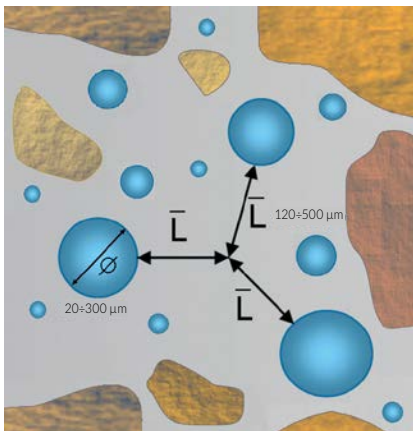
Rys. 5.21. Efekty stosowania domieszek redukujących ilość wody w mieszance betonowej

Wśród domieszek upłynniających na szczególną uwagę zasługuje grupa domieszek najnowszej generacji, produkowanych na bazie eterów polikarboksylowych. Upłynniacze te pozwalają na znaczną redukcję ilości wody zarobowej (nawet do 40%) oraz charakteryzują się silnym i długotrwałym efektem upłynniającym.

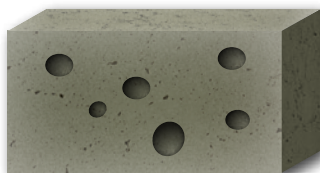
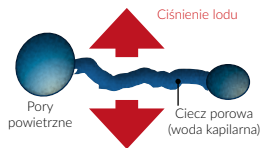
DOMIESZKI NAPOWIETRZAJĄCE

Domieszki napowietrzające tworzą i stabilizują w mieszance betonowej zamknięte pęcherzyki powietrza, które pozostają w stwardniałym betonie, jako równomiernie rozmieszczone mikropory. Pęcherzyki powstałe w wyniku wprowadzenia domieszki napowietrzającej charakteryzują się małą średnicą 20–300µm, są rozłożone w odległościach 120–250µm i otoczone cienką warstwą zączyu (rys. 5.22, rys. 5.23).

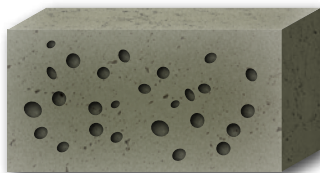
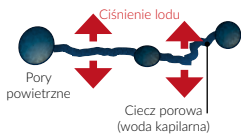
W betonie nienapowietrzonym pory powietrzne, utworzone podczas mieszania i nieusunięte w trakcie zagęszczania betonu oraz pory powstałe po odparowaniu wody, pogarszają cechy użytkowe betonu. Mikropory utworzone wskutek wprowadzenia domieszki napowietrzającej korzystnie zmieniają strukturę betonu, obniżając chłonność porów kapilarnych i zmniejszając przenikanie wody. W efekcie beton uzyskuje wyższą mrozoodporność i niższą nasiąkliwość.



Rys. 5.22. Schemat napowietrzenia betonu i rozmieszczenie porów



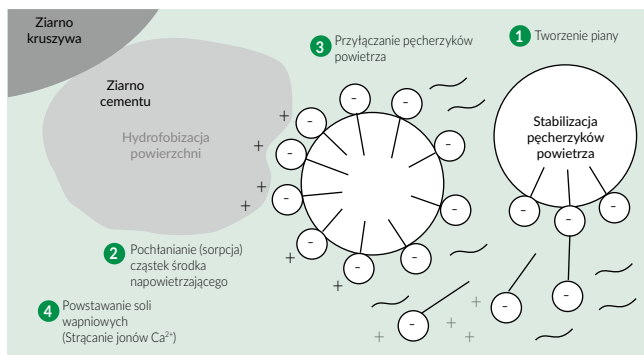
Beton bez domieszki napowietrzającej



Beton z domieszką napowietrzającą

Rys. 5.23. Ograniczenie ciśnienia lodu przez przerwanie systemu kapilar

Na rys. 5.23 przedstawiono mechanizm przerwania systemu kapilar w betonie, skutkujący ograniczeniem ciśnienia wody i lodu (poprawa odporności betonu na działanie mrozu). Mechanizm działania domieszek napowietrzających oparty jest na działaniu hydrofobizującym środków powierzchniowo czynnych na granicy faz powietrze-woda (rys. 5.24).

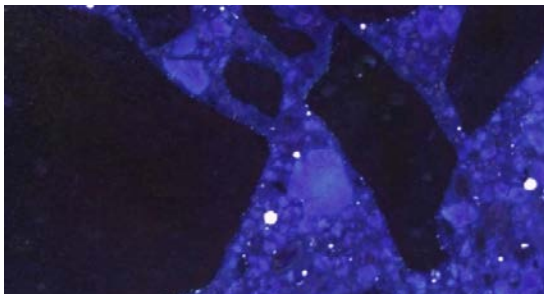


Rys. 5.24. Mechanizm działania domieszek napowietrzających (1 - tworzenie się piany, 2 - sorpcja domieszki i hydrofobizacja ziaren cementu 3 - przyłączanie pęcherzyków powietrza do cząstek stałych, 4 - strącanie w roztworze przez tworzenie nierozpuszczalnych soli wapnia)

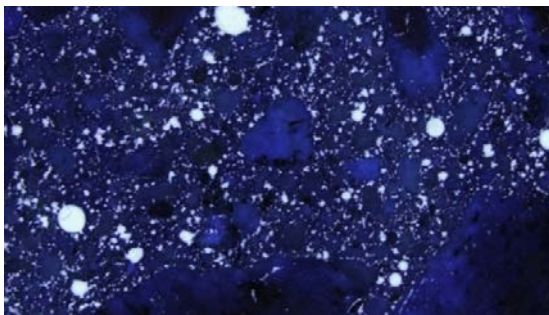
Zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021, betony eksploatowane w warunkach opisanych klasami ekspozycji XF2, XF3 i XF4, powinny być napowietrzane. Minimalna zawartość powietrza w betonie powinna wynosić 4%. Krajowe uzupełnienie PN-B-06265 do normy PN-EN 206 dodatkowo wprowadza wymaganie minimalnego poziomu napowietrzenia betonu w zależności od uziarnienia zastosowanego kruszywa. Zawartość powietrza w mieszance betonowej przed jej wbudowaniem powinna wynosić:

- $\geq 5,5\%$ dla kruszywa do 8 mm,
- $\geq 4,5\%$ dla kruszywa do 16 mm,
- $\geq 4,0\%$ dla kruszywa do 32 mm,
- $\geq 3,5\%$ dla kruszywa do 64 mm.

Aby spełnić wymagania norm przedmiotowych i zapewnić prawidłowe napowietrzenie betonu, należy zastosować domieszki napowietrzające. Ilość domieszki napowietrzającej, należy dobrać w taki sposób, aby uzyskać zakładany poziom napowietrzenia (zawartość porów) w betonie stwardniałym (rys. 5.25, rys. 5.26).



Rys. 5.25. Mikrostruktura porowatości w betonie nienapowietrzonym $w/c = 0,45$



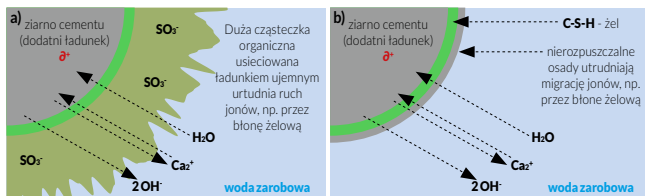
Rys. 5.26. Mikrostruktura porowatości w betonie napowietrzonym $w/c = 0,45$, zawartość powietrza 6%

UWAGA!

Dozowanie domieszki napowietrzającej w zbyt dużych ilościach prowadzi do niekontrolowanego napowietrzenia betonu, a w konsekwencji do znacznego spadku wytrzymałości.

DOMIESZKI OPÓŹNIAJĄCE

Domieszki opóźniające wydłużają przebieg hydratacji cementu w początkowym okresie i spowalniają proces wydzielania ciepła w czasie hydratacji - przedłużają czas przejścia mieszanki betonowej ze stanu plastycznego w stan sztywny. Najczęściej stosowaną bazę chemiczną domieszek o działaniu opóźniającym stanowią nasycone roztwory chlorku sodu, lignosulfoniainy, pochodne celulozy i cukrów. Działanie domieszek opóźniających oparte jest na ograniczeniu szybkości reakcji krzemianu trójwapiowego (C_3S) z wodą (rys. 5.27), w efekcie zmniejsza się tempo wzrostu kryształów wodorotlenku wapnia, a tym samym wydłuża czas wiązania i obniża wytrzymałość w pierwszych 24 godz. Przy stosowaniu domieszek opóźniających wiązanie, wytrzymałość początkowa betonu może być niższa niż betonu bez domieszki, natomiast końcowa wytrzymałość jest zazwyczaj wyższa.

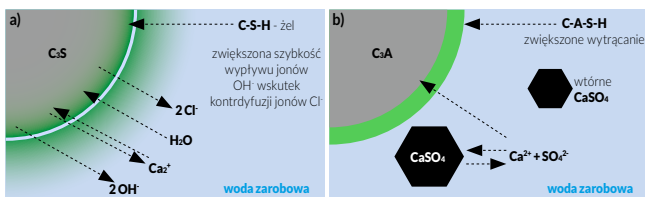


Rys. 5.27. Mechanizm działania domieszek opóźniających a) oparty na efekcie sterycznym, b) oparty na teorii wytrącania osadów

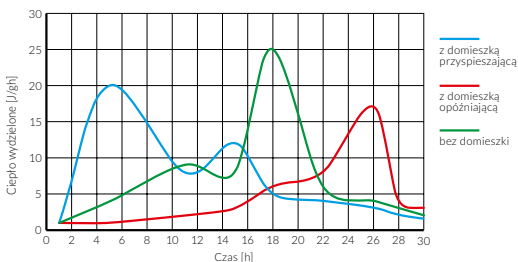
Domieszki opóźniające dodaje się w czasie wykonywania mieszanki betonowej, najczęściej z wodą zarobową. W niektórych przypadkach konieczne może być dodawanie opóźniacza do już wymieszanej mieszanki betonowej, na przykład przy wydłużonym transporcie spowodowanym przez awarię lub korek uliczny (po wprowadzeniu dodatkowej ilości domieszki mieszanka betonowa musi być ponownie wymieszana). Stosowanie domieszek opóźniających jest niezbędne, gdy zachodzi konieczność transportu betonu towarowego na większą odległość, w technologii betonów masywnych (betonowanie ciągłe warstwami) i w pracach prowadzonych w warunkach podwyższonych temperatur (>25 °C).

DOMIESZKI PRZYSPIESZAJĄCE WIĄZANIE

Domieszki przyspieszające zwiększają szybkość reakcji między cementem a wodą, skracając czas do przejścia mieszanki betonowej ze stanu plastycznego w sztywny. Działanie domieszek przyspieszających polega na zwiększeniu szybkości reakcji krzemianu trójwapieniowego (C_3S) z wodą - chemicznie interweniując w proces hydratacji lub na przyspieszeniu zarodkowania (rys. 5.28). W efekcie zwiększa się tempo wzrostu kryształów wodorotlenku wapnia, przez co skróceniu ulega czas wiązania i wzrasta wytrzymałość wczesna, szczególnie w ciągu pierwszych 24 godzin (rys. 5.29). Norma PN-EN 934-2 wymaga, aby przy stosowaniu domieszek przyspieszających wiązanie początek czasu wiązania w temp. 20°C nastąpił w czasie przynajmniej 30 minut krótszym niż dla betonu kontrolnego.



Rys. 5.28. Mechanizm działania domieszek przyspieszających a) oparty na przepływie jonów, b) oparty na przyspieszonym zarodkowaniu



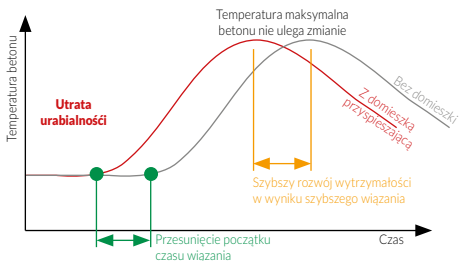
Rys. 5.29. Kinetyka wydzielania ciepła hydratacji (beton bez domieszki oraz z domieszką opóźniającej i przyspieszającą)

DOMIESZKI PRZYSPIESZAJĄCE TWARDNIENIE

Celem stosowania domieszek przyspieszających twardnienie jest zwiększenie dynamiki przyrostu wytrzymałości betonu w czasie – działanie tych domieszek, podobnie jak domieszek przyspieszających wiązanie, polega na zwiększeniu szybkości reakcji zachodzących w zaczynie cementowym (rys. 5.29, rys. 5.30).

Przyspieszony zostaje przyrost wytrzymałości początkowej betonu, zwykle przy braku negatywnego wpływu na wytrzymałość końcową. Norma PN-EN 934-2 wymaga, aby przy stosowaniu domieszek przyspieszających twardnienie wytrzymałość na ściskanie betonu po 24 godz. dojrzewania w temp. 20°C przekraczała 120% wytrzymałości betonu kontrolnego (bez domieszki), natomiast po 28 dniach dojrzewania w temp. 20°C przekraczała 90% wytrzymałości betonu kontrolnego.

Domieszki przyspieszające twardnienie znajdują zastosowanie głównie w produkcji prefabrykatów i galanterii betonowej (ich użycie pozwala ograniczyć lub wyeliminować obróbkę cieplną formowanych elementów).



Rys. 5.30. Efekty stosowania domieszek o działaniu przyspieszającym

DOMIESZKI STABILIZUJĄCE

Domieszki stabilizujące zwiększają wężliwość wody i spójność mieszanki betonowej (ograniczają sedymentację składników mieszanki betonowej). Staje się ona bardziej jednorodna i wykazuje mniejszą skłonność do segregacji i samoistnego wycieku wody (bleedingu). Stosowane są w betonach zwykłych, lekkich, zwłaszcza w mieszankach o większej płynności (SCC), w fasadowych betonach architektonicznych.

INNE RODZAJE DOMIESZEK

Wśród innych domieszek chemicznych do betonów można wymienić:

- zwiększające wodoodporność (uszczelniające),
- zwiększające objętość betonu - pęczniejące,
- zwiększające odporność na agresję chemiczną lub biologiczną,
- inhibitory korozji stali,
- zapobiegające wymywaniu zaczynu podczas betonowania pod wodą,
- usztywniające mieszanke betonową,
- zwiększające przyczepność betonu do stali, zaprawy, betonu i innych materiałów budowlanych.

Przy stosowaniu kilku rodzajów domieszek chemicznych należy zwrócić szczególną uwagę na ich kompatybilność (współpracę). Jeżeli stosowana jest więcej niż jedna domieszka, ich wzajemna zgodność musi być wcześniej sprawdzona i potwierdzona badaniami wstępnymi. Istotny jest także problem kompatybilności domieszek chemicznych z cementem i dodatkami typu II (rys. 5.31). Wymaga to również sprawdzenia w badaniach wstępnych betonu wg PN-EN 206+A2:2021, załącznik A (projektowanie betonu).



Rys. 5.31. Czynniki decydujące o kompatybilności domieszek chemicznych

Według normy PN-EN 206+A2:2021 dozowanie domieszek chemicznych dozwolone jest do 5% masy cementu (efekty i skutki większego dozowania muszą być sprawdzone z uwagi na zachowanie właściwości fizycznych i trwałość).

Domieszki chemiczne powinny być na ogół mieszane z wodą zarobową lub dodawane do mieszanki równoległe z wodą (nie należy wprowadzać domieszek wcześniej – nie stosować na suche składniki). Szczegółowe informacje w zakresie dozowania (zalecanych ilości i sposobu dozowania) są podane w kartach technicznych wyrobów.

UWAGA!

Ilość wody zawartej w domieszkach musi być uwzględniona przy obliczaniu współczynnika woda/cement (w/c), jeżeli całkowita ilość stosowanych domieszek przekracza 3 l/m³ betonu.

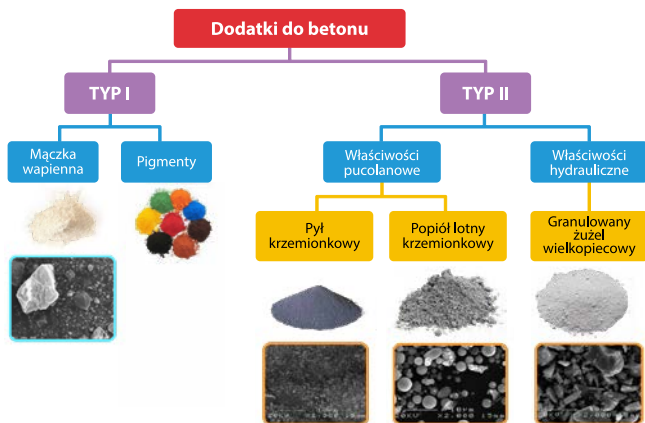
5.1.2.5. Dodatki do betonu

Dodatek, zgodnie z definicją zawartą w normie PN-EN 206+A2:2021, to drobnoziarnisty nieorganiczny składnik stosowany do betonu w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania właściwości specjalnych (dodawany zazwyczaj w ilości powyżej 5% masy cementu). Dodatek może w znaczący sposób modyfikować właściwości, zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu.

Wyróżnia się dwa rodzaje dodatków do betonu (rys. 5.32):

- typ I – dodatki prawie obojętne, których ogólną przydatność ustala się w odniesieniu do:
 - kruszywa wypełniającego zgodnie z PN-EN 12620 lub PN-EN 13055-1,
 - pigmentów zgodnie z PN-EN 12878, w przypadku betonu zbrojonego tylko pigmentów kategorii B
- typ II – dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych, których ogólną przydatność ustala się w odniesieniu do:
 - popiołu lotnego zgodnie z PN-EN 450-1
 - pyłu krzemionkowego zgodnie z PN-EN 13263-1
 - mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego zgodnie z PN-EN 15167-1.

Ilość dodatków do betonu, należy określić na podstawie badań wstępnych (załącznik A do normy PN-EN 206+A2:2021) z uwzględnieniem wpływu również na inne właściwości niż wytrzymałość. Dodatki typu II można uwzględnić w składzie betonu w ramach zawartości cementu (spoiwa = cement + k×dodatek) oraz wartości współczynnika woda/cement (woda/spoiwo). Dodatki typu I i II, inne niż wymienione na rys. 5.32, można stosować w składzie betonu, jeżeli ich przydatność została określona w przepisach obowiązujących w miejscu stosowania.



Rys. 5.32. Dodatki do betonu

KONCEPCJA WSPÓŁCZYNNIKA k

Koncepcja współczynnika k jest koncepcją zalecaną. Stosuje się w przypadku dodatków typu II. Opiera się ona na porównaniu trwałości (lub wytrzymałości) betonu referencyjnego z cementem „A” oraz betonu, w którym część cementu „A” zastąpiono dodatkiem, biorąc pod uwagę współczynnik woda/cement i zawartość dodatku. W przypadku dodatków typu II norma wprowadza pojęcie współczynnika k , co umożliwia uwzględnienie dodatków w składzie betonów przez zastąpienie terminu „współczynnik woda/cement” terminem „współczynnik woda/(cement + k x dodatek)”:

$$w/(c + k \times d)$$

gdzie:

w – zawartość wody [kg],

c – zawartość cementu [kg],

d – zawartość dodatku: p – popiół lotny [kg], pk – pył krzemionkowy [kg],

$mgżw$ – mielony granulowany żużel wielkopiecowy [kg].

UWAGA!

Obliczona zawartość spoiwa (cement + $k \times$ dodatek) nie powinna być mniejsza niż minimalna zawartość cementu wymagana ze względu na klasę ekspozycji.

Ogólne zasady stosowania dodatków typu II i ich uwzględniania w składzie betonu przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Zasady stosowania dodatków typu II zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021

Rodzaj dodatku		popiół lotny	mielony granulowany żużel wielkopieczowy	pył krzemionkowy klasy 1 ^d
		PN-EN 450-1	PN-EN 15167-1	PN-EN 13263-1
Maksymalna zawartość dodatku w betonie ^{a)}	CEM I	popiół lotny/ cement $\leq 0,33$	mgżw/ cement $\leq 1,0$	pył krzemionkowy /cement $\leq 0,11$
	CEM III/A	popiół lotny/ cement $\leq 0,25$		
Wartość k ^{b)} przy stosowaniu CEM I i CEM II/A		$k = 0,4$	$k = 0,6$	k ^{b)} = 2,0 w XC i XF, w/c > 0,45 $k = 1,0$
Minimalna zawartość cementu		ilość (cement + $k \times$ dodatek) nie powinna być mniejsza niż minimalna zawar- tość cementu wymagana ze względu na odpowiednią klasę ekspozycji		min. zawartość cementu nie powinna być zmniejszona o więcej niż 30 kg/m ³
a) W przypadku wyższej zawartości dodatku w betonie, nadmiaru tego nie należy uwzględniać przy obliczaniu współczynnika $w/(c + k \times d)$.				
b) Z wyjątkiem cementów z dodatkiem pyłu krzemionkowego.				
c) W przypadku pyłu krzemionkowego klasy 2 stosuje się przepisy obowiązujące w miejscu stosowania betonu.				

UWAGA!

Koncepcji współczynnika k nie stosuje się w odniesieniu do popiołu lotnego w celu obniżenia minimalnej zawartości cementu w klasach ekspozycji XF2, XF3 oraz XF4

Oprócz koncepcji współczynnika „ k ” dodatkowo norma wyróżnia koncepcje:

- równoważnych właściwości betonu (ECPC),
- kombinacji równoważnych właściwości użytkowych (EPCC).

Wykorzystuje się je w przypadku stosowania specjalnych dodatków lub cementów. Koncepcje te dopuszczają:

- zmiany wymagań dotyczących minimalnej zawartości cementu,
- zmiany maksymalnego współczynnika woda/cement,
- kombinacji cementu zgodnego z PN-EN 197-1 wraz z dodatkiem (dodatki).

Bardziej szczegółowe informacje na temat podanych koncepcji znajdują się w Raporcie Technicznym opracowanym przez Europejski Komitet Normalizacyjny CEN/TR 16639.

KONCEPCJA RÓWNOWAŻNYCH WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH BETONU

Zasady „koncepcji równoważnych właściwości betonu” dopuszczają zmiany wymagań dotyczących minimalnej zawartości cementu oraz maksymalnego współczynnika woda/cement, w przypadku zastosowania specjalnych dodatków i specjalnych cementów, których pochodzenie oraz charakterystyki są dokładnie określone i udokumentowane (rys. 5.33). Koncepcję tę należy stosować wyłącznie w przypadku użycia cementów, zgodnych z PN-EN 197-1, wraz z dodatkami. W zakresie wymagań według PN-EN 206+A2:2021 należy sprawdzić, czy właściwości betonu, w szczególności te związane z odpornością na oddziaływanie środowiska, są równoważne z właściwościami betonu referencyjnego, zgodnie z wymaganiami dotyczącymi danej klasy ekspozycji.



Rys. 5.33. Schemat działania w ramach koncepcji równoważnych właściwości użytkowych

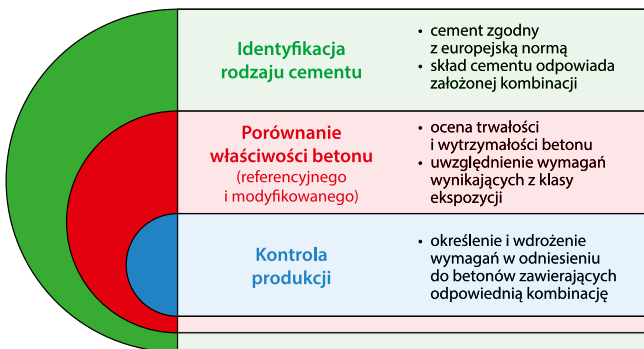
KONCEPCJA KOMBINACJI RÓWNOWAŻNYCH WŁAŚCIWOŚCI

Zasady „koncepcji kombinacji równoważnych właściwości” dopuszczają określony zestaw kombinacji cementu, zgodnego z PN-EN 197-1 i dodatku (dodatki), które w całości mogą być uwzględnione w wymaganiach dotyczących maksymalnego współczynnika woda/cement i minimalnej zawartości cementu, określonych w odniesieniu do betonu (rys. 5.34).

Metodyka postępowania obejmuje następujące elementy:

- identyfikację rodzaju cementu, który jest zgodny z normą europejską dotyczącą cementu i ma skład taki sam lub podobny jak założona kombinacja,
- ocenę czy betony zawierające taką kombinację mają podobną wytrzymałość i trwałość, z uwzględnieniem określonej klasy ekspozycji, jak betony zawierające zidentyfikowany rodzaj cementu,
- wprowadzenie kontroli produkcji, która zapewni określenie i wdrożenie tych wymagań w zakresie do betonów zawierających odpowiednią kombinację.

Koncepcja kombinacji równoważnych właściwości



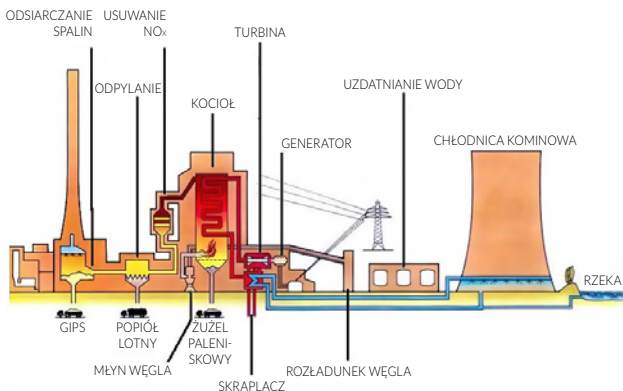
Rys. 5.34. Schemat działania w ramach koncepcji kombinacji równoważnych właściwości

POPIÓŁ LOTNY

Popiół lotny stosowany jako dodatek typu II do betonu powinien spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 450-1 „Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”. Norma ta definiuje popiół lotny jako drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych zeszkliwionych ziaren, otrzymywany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim SiO_2 i Al_2O_3 .

Popiół lotny jest otrzymywany przez elektrostatyczne lub mechaniczne wydzielenie pylastych cząstek z gazów odlotowych z elektrowni (rys. 5.35). Popiół otrzymywany innymi metodami nie może być użyty w betonie.

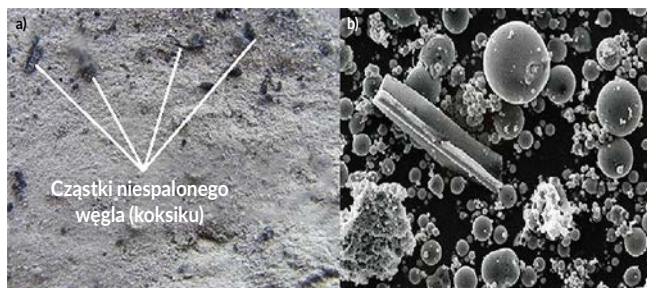
Popiół lotny może być poddany obróbce, na przykład przez separację, sortowanie, przesiewanie, suszenie, mieszanie, mielenie lub zmniejszanie zawartości węgla, lub przez kombinację tych procesów, w odpowiednich zakładach produkcyjnych. Poddany takiej obróbce popiół lotny może być mieszaniną popiołów lotnych pochodzących z różnych źródeł, przy czym każdy powinien być zgodny z definicją PN-EN 450-1. Definicja ta nie obejmuje popiołów pochodzących ze spoielania odpadów miejskich lub przemysłowych.



Rys. 5.35. Schemat technologiczny spalania węgla w elektrowni

Wymagania zawarte w normie PN-EN 450-1 szczególną uwagę zwracają na zawartość straty prażenia oraz miąższość popiołów (pozostałość na sicie 45 μ m) ponieważ właściwości te mają duże znaczenie dla jakości betonu zawierającego popiół lotny (rys. 5.36, rys. 5.37). Norma PN-EN 450-1 wprowadza pojęcie kategoryzacji popiołu lotnego w zależności od zawartości straty prażenia (niespalonego węgla) – tabela 5.6 (kategoria A, B lub C) oraz miąższości – tabela 5.7 (kategoria N i S).

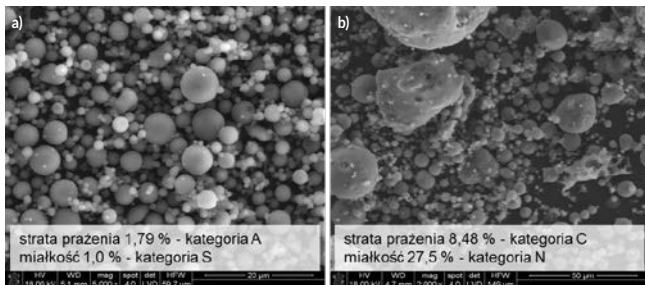
W popiołach o niskiej zawartości strat prażenia dominują ziarna sferyczne, z wysoką zawartością fazy szklistej, natomiast w popiołach o wysokiej zawartości strat prażenia widoczne są ziarna koksiku o rozwiniętej, porowatej powierzchni. Wysoka zawartość niespalonego węgla (straty prażenia) w popiele lotnym, zwiększa jego wodożądność, co może skutkować obniżeniem trwałości betonu z jego udziałem. Podwyższona wodożądność wynika również z różnego pokroju ziaren popiołu (rys. 5.37).



Rys. 5.36. Pozostałość niespalonego węgla (straty prażenia) w popiele lotnym a) w skali makro na powierzchni, b) pod mikroskopem elektronowym (cząsteczki o nieregularnym kształcie)

UWAGA!

W myśl uzupełnienie krajowego PN-B 06265 do produkcji betonu towarowego zgodnego z PN-EN 206 należy stosować popiół lotny krzemionkowy kategorii A wg PN-EN 450-1.



Rys. 5.37. Popiół lotny do betonu z różną zawartością straty prażenia (niespalonego węgla)
 a) miałkość 1%, b) miałkość 27,5%

Tabela 5.6. Wymagania względem składu chemicznego popiołu lotnego

Składnik	Zawartość składnika	
	Popiół otrzymywany wyłącznie przez spalanie węgla	Popiół otrzymywany wyłącznie przez współspalanie
Strata prażenia:		
– kategoria A	≤5,0%	
– kategoria B	≤7,0%	
– kategoria C	≤9,0%	
Chlorki	≤ 0,10%	
SO ₃	≤ 3,0%	
CaO wolny	≤ 1,5% ¹⁾	
CaO reaktywny	≤ 10,0%	
Sumaryczna zawartość tlenków:	Określenie zawartości nie jest konieczne Należy przyjąć, że wymaganie jest spełnione	≥ 25,0%
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃		≥ 70,0%
Zawartość MgO		≤ 4,0%
Całkowita zawartość alkaliów w przeliczeniu na Na ₂ O _{eq}		≤ 5,0%
Zawartość rozpuszczalnych związków fosforu w przeliczeniu na P ₂ O ₅		≤ 100 mg/kg
1) Popiół lotny, w którym zawartość wolnego CaO jest większa niż 1,5% masy może być akceptowany pod warunkiem zachowania stałości objętości – próba Le Chatelliera ≤10 mm wg metodyki podanej w normie PN-EN 450-1		

Tabela 5.7. Wymagania względem właściwości fizycznych popiołu lotnego

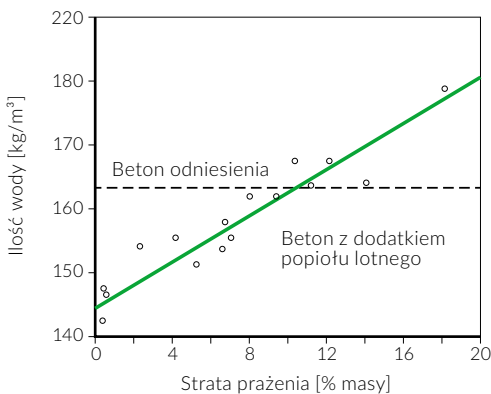
Właściwość		Wymagania
Miałość, pozostałość na sicie o oczkach 0,045 mm przy przesiewaniu na mokro wg EN 451-2 [%] – kategoria N – kategoria S		≤ 40 ≤ 12
Wskaźnik aktywności [%]:	po 28 dniach po 90 dniach	≥ 75 ≥ 85
Stołość objętości (badanie jest konieczne, gdy zawartość CaO _{wolne} zawiera się pomiędzy 1,0 a 2,5%)		max. 10 mm
Gęstość objętościowa		maks. różnica ± 200 kg/m ³ względem wartości zadeklarowanej przez producenta
Początek czasu wiązania zaczynu zawierającego 25% popiołu i 75% cementu portlandzkiego CEM I		nie powinien być dwukrotnie dłuższy niż początek wiązania zaczynu wykonanego w 100% z cementu porównawczego
Wodoządnosc (dotyczy popiołu o miałości w kategorii S)		≤ 95% wodoządnosci cementu porównawczego (CEM I)

Wpływ zawartości wybranych składników popiołu na właściwości betonu:

- niespalony węgiel (oznaczany w popiołach lotnych jako strata prażenia):
 - zwiększa wodoządnosc popiołu (rys. 5.38), a w efekcie może obniżyć mrozoodpornosc betonu z jego udziałem,
 - zmniejsza efektywnosc dzialania domieszek chemicznych, szczególnie srodkow napowietrzajacych, plastyfikatorow i superplastyfikatorow,
 - od zawartosci niespalonego węgla zalezy takze kolor popiołu lotnego: im jego zawartosc jest wyzsza, tym popiół ma ciemniejszy kolor,
 - mozna zaobserwować takze wyptywanie ziaren niespalonego węgla na powierzchnię betonu, co niekorzystnie wpływa to na estetykę powierzchni betonu, a przy tym może utrudniać proces powierzchniowego utwardzania betonu z wykorzystaniem odpowiednich posypek, np. przy wykonywaniu posadzek betonowych z utwardzaniem powierzchni,
- reaktywne SiO₂ (a także suma SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) decyduje o aktywności pucolanowej popiołu, która ma znaczący wpływ na wskaźnik aktywności,
- wolne (niezwiązane chemicznie) CaO i MgO mogą powodować pęcznienie i destrukcję stwardniałego betonu,
- jony chlorkowe (Cl⁻) należy ograniczać ze względu na ochronę przed korozją stali zbrojeniowej,

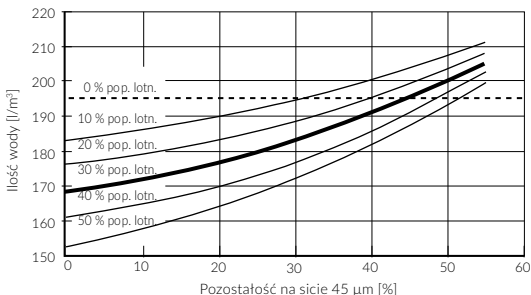
- tlenki alkaliczne (w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) w popiele związane są w fazie szklistej, w postaci nierozpuszczalnej, przez co nie wchodzi w reakcję z aktywnymi formami krzemionki
- rozpuszczalne związki fosforu (w przeliczeniu na P_2O_5) mogą wydłużyć czas wiązania kompozytów cementowo-popiołowych.

Popioły drobne kategorii S (o bardzo niskiej pozostałości na sicie $45\ \mu\text{m}$) charakteryzują się mniejszą zawartością faz krystalicznych i większą zawartością fazy szklistej. Dodatek takiej jakości popiołu może zmniejszać ilość wody zarobowej w mieszance betonowej (rys. 5.39), a co za tym idzie możliwe jest uzyskanie zakładanej konsystencji mieszanki betonowej przy niższym w/c (wyższa wytrzymałość na ściskanie).

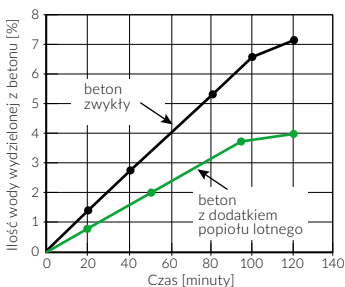


Rys. 5.38. Wpływ zawartości strat prażenia w popiele lotnym na wodożądność

Popioły lotne charakteryzują się kulistym kształtem ziaren, z tego powodu ich stosowanie wydatnie poprawia urabialność mieszanki betonowej, co jest bardzo istotne, zwłaszcza w przypadku betonów pompowalnych (łatwiejsze podawanie betonu, dłuższa żywotność pomp i innych urządzeń transportujących). Mieszanka betonowa zawierająca popioły lotne jest bardziej spoiста i wykazuje mniejszą tendencję do samoistnego wydzielania mlecza cementowego tj. bleedingu (rys. 5.40), w porównaniu do betonu o zbliżonym czasie wiązania.



Rys. 5.39. Wpływ miakkości popiołu lotnego na ilość wody zarobowej w betonie



Rys. 5.40. Wpływ stosowania popiołu lotnego na ilość wody samoistnie wydzielanej z betonu

Bleeding polega na wypływności wody na powierzchnię betonu przez system kanalików (porów) kapilarnych. Popioły lotne w mieszance betonowej stanowią nie tylko zamiennik części cementu (spoiwo), ale także pewnego rodzaju „mikrokruszywo”, które pozwala na uzyskanie szczelniejszego stosu kruszywowego, co dodatkowo zapobiega zjawisku odsączenia wody.

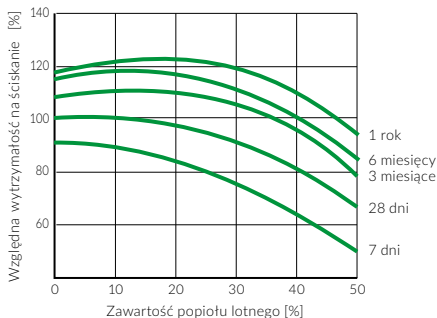
Popiół lotny jako dodatek do betonu może być stosowany zgodnie z zasadami normy PN-EN 206+A2:2021 jako zamiennik części cementu. Możliwe jest również wprowadzenie do składu betonu większych ilości popiołu lotnego, jednak nadmiaru nie należy uwzględniać przy obliczaniu współczynnika $w/(c+k \cdot d)$ oraz minimalnej zawartości cementu w betonie (wymaganej dla poszczególnych klas

ekspozycji). Popiół lotny można wówczas uwzględnić w obliczeniach receptury betonu jako zamiennik kruszywa lub tylko kruszywa drobnego (rys. 5.41).



Rys. 5.41. Skład betonu a) beton zwykły bez popiołu lotnego, b) beton z dodatkiem popiołu, korekta zawartości kruszywa drobnego, c) beton z dodatkiem popiołu, korekta zawartości kruszywa

Stosując popiół lotny w betonie, szczególnie w przypadku znacznych jego ilości, należy mieć na uwadze, że zastąpienie części cementu popiołem lotnym może powodować obniżenie wytrzymałości betonu na ściskanie, szczególnie w początkowym okresie twardnienia (rys. 5.42).



Rys. 5.42. Wpływ dodatku popiołu na wytrzymałość betonu

W późniejszych terminach dojrzewania (28 dni i dłużej) beton z dodatkiem popiołu lotnego osiąga wytrzymałości zbliżone lub nawet wyższe niż beton bez dodatku popiołu lotnego (rys. 5.42).

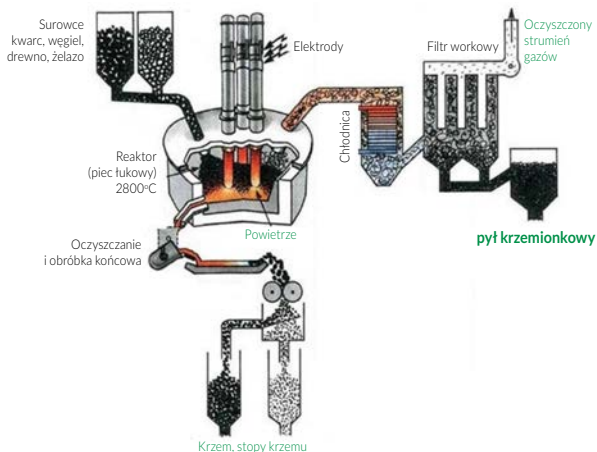
Wprowadzenie popiołu lotnego do składu betonu, przy równoczesnym zmniejszeniu zawartości cementu, skutkuje ograniczeniem skurczu betonu. Beton z dodatkiem popiołu lotnego charakteryzuje się także podwyższoną odpornością na korozyjne działanie środowisk agresywnych chemicznie.

Beton, w którym znaczną część cementu zastąpiono popiołem lotnym, może wykazywać mniejszą odporność na działanie mrozu. Podstawową przyczyną zmniejszenia mrozoodporności jest powolny przebieg reakcji pucolanowej i wolniejsze tempo narastania wytrzymałości betonu. Właściwa pielęgnacja betonów cementowo-popiołowych dojrzewających przez dłuższy okres może ograniczyć niekorzystny wpływ na mrozoodporność. Betony z dodatkiem popiołu lotnego po upływie 60-90 dni twardnienia wykazują dobrą mrozoodporność. Przeważa pogląd, że betony o podobnej wytrzymałości, niezależnie od tego, czy są wykonane z cementów portlandzkich lub cementów portlandzkich i popiołu lotnego, charakteryzują się zbliżoną odpornością na działanie mrozu. Najlepszą metodą poprawy odporności betonu na mróz, w przypadku dodatku popiołów lotnych, jest zmiana jego mikrostruktury przez wprowadzenie do składu betonu domieszek napowietrzających oraz dodatkowo domieszek uplastyczniających, które pozwalają na zmniejszenie zawartości wody w betonie i uzyskanie niższego współczynnika w/c.

PYŁ KRZEMIONKOWY

Pył krzemionkowy jest surowcem wtórnym powstającym w procesie wytwarzania krzemu metalicznego, żelazokrzemu i innych stopów krzemu w elektrycznych piecach łukowych (rys. 5.43). Ziarna pyłu krzemionkowego tworzą się w wyniku utleniania i kondensacji gazowego podtlenku krzemu SiO , którego część ulatnia się z pieca łukowego w postaci gazów odlotowych.

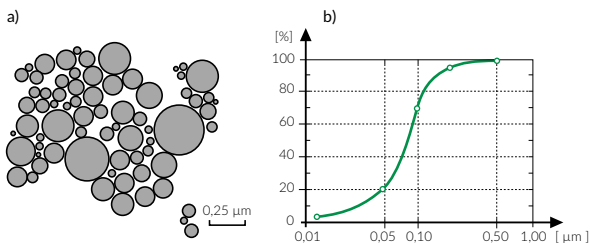
Pył krzemionkowy jest w większości materiałem amorficznym, charakteryzuje się wysoką zawartością krzemionki SiO_2 (>85%) i ma postać drobnych, sferycznych ziaren. Powierzchnia właściwa pyłu krzemionkowego jest znacznie większa od powierzchni właściwej cementu, oznaczona metodą adsorpcji azotu (BET), zawiera się w przedziale $13000 \div 20000 \text{ m}^2/\text{g}$, przy średniej gęstości na poziomie $2,20 \text{ kg}/\text{m}^3$.



Rys. 5.43. Schemat produkcji pyłu krzemionkowego

Typowy rozkład wielkości cząstek wskazuje na przewagę ziaren o średnicy mniejszej od $1\ \mu\text{m}$, przy czym przeciętna średnica wynosi $0,2\ \mu\text{m}$ (rys. 5.44).

Spośród dodatków do betonu o właściwościach pucolanowych, pył krzemionkowy odznacza się najwyższą aktywnością. Amorficzna krzemionka, o wysokiej miękkości, bardzo szybko reaguje z wodorotlenkiem wapnia tworząc fazę C-S-H.



Rys. 5.44. Pył krzemionkowy: a) kształt i wielkość ziaren, b) uziarnienie pyłu krzemionkowego

Wprowadzenie pyłu krzemionkowego do składu mieszanki betonowej zmienia jej właściwości reologiczne, decydujące o urabialności, a więc przekładające się na sposób podawania, np. pompowania, układania i zagęszczania mieszanki betonowej. Bardzo drobne ziarna tego dodatku wpływają na zwiększenie spoistości i zmniejszenie plastyczności mieszanki betonowej, co skutkuje podwyższeniem wodożądności. Z tego względu, do mieszanki betonowej zawierającej dodatek pyłu krzemionkowego, niezbędne jest stosowanie odpowiedniej jakości superplastyfikatorów. Efektem jest uzyskanie żądanej konsystencji w zakładanym okresie czasu (pompowany może być beton tylko o konsystencji płynnej). Mieszanka betonowa z dodatkiem pyłu krzemionkowego, zwłaszcza z jego większą zawartością, ma także dużą skłonność do przylegania (przyklejania się) do ścianek urządzeń transportowych (ścian betonomieszarek, rurociągów pomp, pojemników - koszy, deskowań). Trudniejsze jest także odpowietrzenie wbudowywanej mieszanki betonowej. W przypadku napowietrzania mieszanki betonowej z dodatkiem pyłu krzemionkowego należy liczyć się ze stosowaniem większej ilości domieszki napowietrzającej dla osiągnięcia zamierzonego poziomu napowietrzenia.

Dodatek pyłu krzemionkowego zapobiega segregacji składników mieszanki betonowej (bleeding praktycznie nie występuje) i możliwe jest podawanie mieszanki betonowej z większych wysokości. Beton napowietrzony z dodatkiem pyłu krzemionkowego jest bardziej stabilny, zachowuje właściwy rozkład wprowadzonych pęcherzyków powietrza.

Pył krzemionkowy bardzo korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne betonu. Jego stosowanie w składzie betonu przyczynia się do wzrostu wytrzymałości na ściskanie, któremu towarzyszy także wzrost modułu Younga (modułu sprężystości). Na szczególną uwagę zasługuje pozytywny wpływ dodatku pyłu krzemionkowego na trwałość betonu. Beton z dodatkiem pyłu krzemionkowego charakteryzuje się bardzo szczelną matrycą (niska porowatość), mniejszą nasiąkliwością i przepuszczalnością, a w efekcie wyższą odpornością na oddziaływanie czynników agresywnych chemicznie.

Pył krzemionkowy stosowany do betonu musi spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 13263-1 „Pył krzemionkowy do betonu. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności” (tabela 5.8).

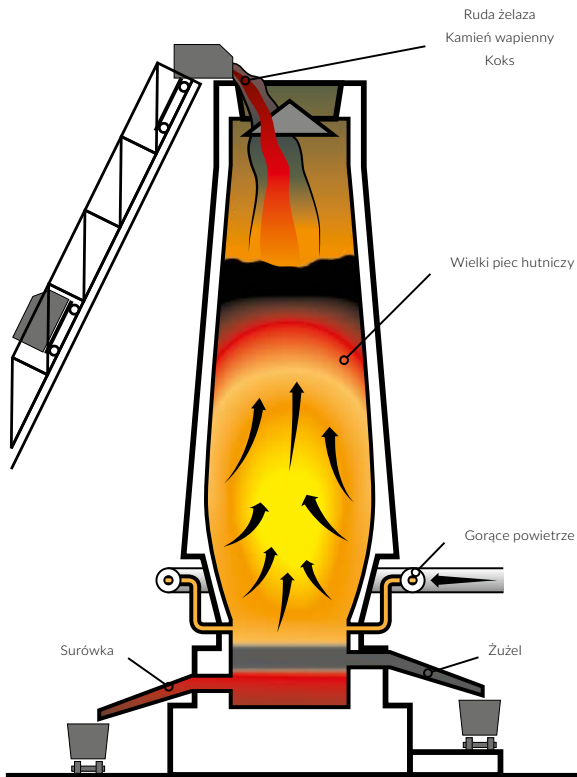
Tabela 5.8. Wymagania dla pyłu krzemionkowego wg PN-EN 13263-1

Właściwość	Wymagania	
Powierzchnia właściwa [m ² /g]	od 15 do 35	
Strata prażenia [%]	≤ 4,0	
SiO ₂ [%]	kat. 1 ≥ 85,0	kat. 2 ≥ 80,0
Cl ⁻ [%]	≤ 0,30	
SO ₃ [%]	≤ 2,0	
CaO pierwiastkowy [%]	≤ 1,0	
Si wolny [%]	≤ 0,4	
Wskaźnik aktywności po 28 dniach [%] (90% cementu CEM i 42,5 i 10% pyłu)	≥ 100	

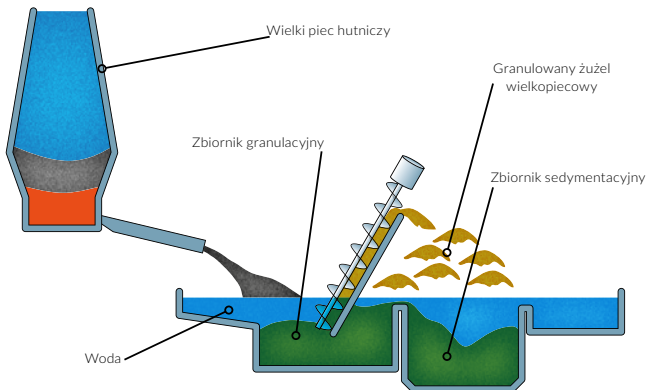
MIELONY GRANULOWANY ŻUŻEL WIELKOPIECOWY

Mielony granulowany żużel wielkopiecowy jest otrzymywany w wyniku zmiełenia granulowanego żużla wielkopiecowego, uzyskiwanego jako produkt uboczny przy wytapianiu surowki żelaza w wielkim piecu hutniczym (rys. 5.45). W skład surowców wsadowych wprowadzanych do pieca wchodzi ruda żelaza, koks i topniki (najczęściej boksyty i wapień), czyli substancje, które obniżają temperaturę topnienia rud oraz ułatwiają oddzielenie metalu od innych domieszek zawartych w rudzie. Piec jest ogrzewany poprzez spalanie koksu w gorącym powietrzu. Proces wytopu surowki żelaza jest prowadzony w temperaturze 1400÷1600°C. W wyniku wytopu wsadu uzyskuje się stopiony żużel wielkopiecowy na powierzchni surowki. Po oddzieleniu od surowki, stopiony żużel poddaje się procesowi granulacji poprzez gwałtowne chłodzenie wodą (rys. 5.46) lub powietrzem. Szybkie chłodzenie płynnego żużla ma na celu wykształcenie mikrostruktury zapewniającej odpowiedni poziom aktywności. Szczególnie istotna jest wysoka zawartość fazy szklistej w żużlu (>90%).

Granulowany żużel wielkopiecowy jest wysokiej jakości dodatkiem typu II o właściwościach pucolanowo – hydraulicznych. Odpowiednio aktywowany i rozdrobniony, wiąże i twardnieje w wodzie analogicznie jak cement portlandzki. W wyniku reakcji żużla z wodą powstają podobne fazy, jak w przypadku hydratacji cementu portlandzkiego, a największy udział ma faza C-S-H. Opisane analogie właściwości wiążących są związane ze zbliżonym chemicznym składem jakościowym (tabela 5.9) oraz podobnym procesem wytwarzania żużla i klinkieru portlandzkiego na drodze obróbki termicznej surowców (żużel uzyskiwany w wielkim piecu hutniczym, klinkier w piecu obrotowym).



Rys. 5.45. Schemat wytwarzania płynnego żużla wielkopieczowego podczas wytapiania surówki w wielkim piecu hutniczym



Rys. 5.46. Schemat procesu granulacji żużla wielkopiecowego

Szczegółowe wymagania dotyczące składu chemicznego (tabela 5.10) i właściwości fizycznych (tabela 5.11), dla zmielonego granulowanego żużla wielkopiecowego, zawarte są w normie PN-EN 15167-1 „Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”.

Tabela 5.9. Skład chemiczny klinkieru portlandzkiego i granulowanego żużla wielkopiecowego

Składnik	Zawartość składnika [% masy]	
	Klinkier	Żużel
SiO ₂	21,6	41,3
Fe ₂ O ₃	2,70	1,0
Al ₂ O ₃	5,70	8,20
CaO	66,9	42,5
MgO	1,30	5,70

Tabela 5.10. Wymagania odnośnie składu chemicznego dla żużla wielkopieczowego

Składnik	Wymagania [% masy]	Metoda badawcza
MgO	≤ 18,0	EN 196-2
Siarczany	≤ 2,5	
Siarczki	≤ 2,0	
Straty prażenia, z poprawką na utlenianie siarczków	≤ 3,0	
Chlorki ¹⁾	≤ 0,10	
Zawartość wilgoci	≤ 1,0	Wg załącznika B normy PN-EN15167-1
1) Mielony żużel wielkopieczowy może zawierać > 0,10% chlorków - w takim przypadku informację o faktycznej zawartości chlorków należy podać na opakowaniu lub dokumentach dostawy.		

Tabela 5.11. Wymagania odnośnie właściwości fizycznych dla żużla wielkopieczowego

Właściwość	Wymagania	Metoda badawcza
Powierzchnia właściwa	≥ 2750 cm ² /g	EN 196-6
Początek czasu wiązania ¹⁾	nie powinien być 2x dłuższy niż początek czasu wiązania zaczynu wykonanego w 100% z masy cementu porównawczego	EN 196-3
Wskaźnik aktywności - po 7 dniach ²⁾ - po 28 dniach ²⁾	≥ 45% ≥ 70%	EN 196-1
1) Początek wiązania należy określać dla kombinacji 50% (masowo) mielonego żużla wielkopieczowego i 50% (masowo) cementu 2) Wskaźnik aktywności należy określać jako stosunek wytrzymałości na ściskanie kombinacji 50% (masowo) mielonego żużla wielkopieczowego i 50% (masowo) cementu, do wytrzymałości na ściskanie cementu użytego do badań. Do oznaczenia początku czasu wiązania i wskaźnika aktywności należy stosować cement portlandzki CEM I klasy 42,5 lub wyższej spełniający następujące wymagania: powierzchnia właściwa ≥ 300 m ² /g, zawartość glinianu trójwapiennego C ₃ A od 6% do 12%, zawartość alkaliów Na ₂ O _{eq} od 5,0% do 1,2%.		

W produkcji mielonego żużla wielkopieczowego nie należy stosować żadnych dodatkowych materiałów, z wyjątkiem środków wspomagających mielenie. Całkowita zawartość tych środków nie powinna przekraczać 1,0% masy żużla, a zawartość środków organicznych w ich składzie nie powinna przekraczać 0,2% masy. Środki wspomagające mielenie nie powinny powodować korozji zbrojenia lub pogarszać właściwości mielonego żużla wielkopieczowego i betonu. Istotnym parametrem jakościowej oceny mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego jest wskaźnik aktywności, który określany jest jako stosunek

wytrzymałości na ściskanie zaprawy normowej wykonanej z użyciem mieszanki składającej się z 50% masy mielonego granulowanego żużla wielopieczowego i 50% masy cementu porównawczego, do wytrzymałości na ściskanie zaprawy normowej wykonanej z cementu porównawczego (cement portlandzki CEM I 42,5 lub CEM I 52,5). Wytrzymałość na ściskanie należy oznaczać przy współczynniku woda/spoiwo i woda/cement równym 0,50.

5.2.5.6. Włókna

Ogólną przydatność włókien ustala się w odniesieniu do:

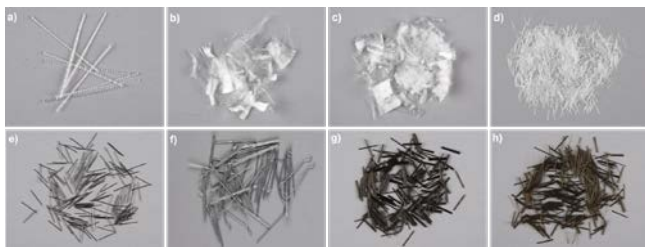
- włókien stalowych zgodnie z PN-EN 14889-1,
- włókien polimerowych zgodnie z PN-EN 14889-2.

Dodawanie do mieszanki betonowej wyspecyfikowanej ilości włókien danego rodzaju powinno odbywać się według procedury, która zapewni ich równomierne rozmieszczenie w całej mieszance.

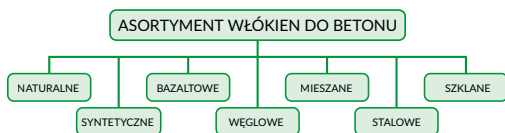
Zbrojenie rozproszone w postaci włókien stosowane jest w celu zapewnienia odporności na zarysowanie i pękanie. Zbrojenie rozporoszone może w pewnych przypadkach zastąpić także tradycyjne zbrojenie, eliminując uciążliwe ręczne układanie zbrojenia lub zmniejszając zagęszczenie wkładek zbrojeniowych. Modyfikacja właściwości betonu zbrojonego włóknami jest w głównej mierze uzależniona od materiału, z jakiego wykonane są włókna (rys. 5.47, rys. 5.48). Rozróżnia się dwa główne rodzaje włókien do betonu:

- włókna stalowe, wg normy PN-EN 14889-1 „Włókna do betonu Część 1: Włókna stalowe - Definicje, wymagania i zgodność” stanowią proste lub ukształtowane fragmenty drutu stalowego ciągniętego na zimno, proste lub ukształtowane włókna cięte z arkusza, włókna uzyskiwane ze stopu, włókna skrawane z drutu ciągniętego na zimno oraz włókna skrawane z bloków stalowych, odpowiednie do jednorodnego rozmieszczenia w mieszance betonowej lub zaprawie,
- włókna polimerowe, wg normy PN-EN 14889- 2 „Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność” włókna polipropylenowe, są to proste lub ukształtowane fragmenty wytłaczanego kierunkowo i ciętego materiału polimerowego (polipropylen lub polietylen, poliester, nylon, PVA, poliakryl, aramid i ich mieszaniny), odpowiednie do jednorodnego rozmieszczenia w mieszance betonowej lub zaprawie.

Do betonu, oprócz włókien znormalizowanych, coraz częściej zastosowanie znajdują także włókna z tworzyw sztucznych, węglowe, szklane, a nawet włókna pochodzenia organicznego (rys. 5.48).



Rys. 5.47. Włókna do betonu a)÷d) polimerowe, e), f) stalowe, g), h) bazaltowe



Rys. 5.48. Klasyfikacja włókien stosowanych do betonu

Stosując zbrojenie rozproszone, zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021, należy zapewnić równomierne rozprowadzenie włókien w całej objętości mieszanki betonowej (rys. 5.49a), a przy tym zachować jej jednorodność, tak by rozmieszczenie włókien zostało zachowane w betonie stwardniałym (rys. 5.49b). Należy mieć na uwadze, że dodatek włókien może niekorzystnie wpłynąć na konsystencję mieszanki betonowej. Największy wpływ na właściwości mieszanki betonowej, ale także stwardniałego betonu mają: rodzaj, długość, średnica, kształt, rozkład oraz zawartość włókien, która w klasycznych rozwiązaniach waha się w granicach od 0,5÷3% (objętościowo).



Rys. 5.49. Rozmieszczenie włókien a) w mieszance betonowej b) w betonie stwardniałym

UWAGA!

Zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 206+A2:2021 wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265, do betonu nie należy stosować włókien z powłoką cynkową (chyba, że wykazano, że wytwarzanie się wodoru w betonie jest niemożliwe).

5.1.3. Mieszanka betonowa

5.1.3.1. Urabialność mieszanki betonowej

Urabialność mieszanki betonowej określa ilość pracy potrzebnej do uzyskania pełnego zagęszczenia betonu, czyli łatwość z jaką mieszanka betonowa może być podawana, ułożona, zagęszczona i wykończona, przy jednoczesnym zachowaniu jednorodności. Urabialność decyduje więc o szczelnym, jednorodnym i możliwie łatwym wypełnieniu formy przez mieszankę betonową przy założonym sposobie zagęszczenia.

Na urabialność mieszanki betonowej ma wpływ:

- objętość zaprawy w mieszance betonowej, która zależy od kształtu i wymiarów elementu oraz intensywności rozmieszczenia zbrojenia a także sposobu efektywnego zgęszczania (im bardziej masywny i prosty w kształcie element i skuteczne zagęszczanie, tym mniej zaprawy należy wprowadzić do mieszanki),
- zawartość frakcji pyłowej (<0,125 mm), do której zalicza się również cement, ilość której wpływa na spoistość mieszanki po jej zagęszczeniu, wygląd betonu po rozformowaniu oraz utrzymanie wody przez mieszankę (bleeding).

Urabialność mieszanki betonowej powinna być zachowana w czasie, tj. od momentu wytworzenia mieszanki na węźle betoniariskim, aż do jej zabudowania w deskowaniu. Urabialność jest właściwością ściśle związaną z konsystencją mieszanki betonowej.

5.1.3.2. Klasy konsystencji mieszanki betonowej

Do oznaczenia konsystencji mieszanki betonowej według wymagań normy PN-EN 206+A2:2021 wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265 dopuszczalne jest stosowanie metod pomiarowych wg tabeli 5.12. W tabeli 5.13 przedstawiono klasy konsystencji mieszanki betonowej i dopuszczalne graniczne wartości dla każdej klasy. W przypadku betonu samozagęszczalnego (SCC) stosuje się wyłącznie klasy konsystencji określone według metody rozptywu stożka.

Tabela 5.12. Klasy konsystencji mieszanki betonowej i metody badań

Konsystencja	Metoda badania
klasa S1 - S5	PN-EN 12350-2 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
klasa C0 - C4	PN-EN 12350-4 Badania mieszanki betonowej - Część 4: Badanie konsystencji metodą oznaczania stopnia zagęszczalności
klasa F1 - F6	PN-EN 12350-5 Badania mieszanki betonowej - Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozptywowego
klasa SF1 - SF3	PN-EN 12350-8 Badania mieszanki betonowej - Część 8: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą rozptywu stożka
klasa V0 - V4	PN-EN 12350-3 Badania mieszanki betonowej - Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe

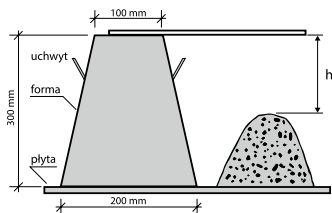
Tabela 5.13. Wartości graniczne klas konsystencji mieszanki betonowej

Metoda badania	Klasa	Wartości graniczne
Opad stożka [mm] zgodnie z PN-EN 12350-2	S1	10-40
	S2	50-90
	S3	100-150
	S4	160-210
	S5	≥220
Stopień zagęszczalności zgodnie z PN-EN 12350-4	C0	≥1,46
	C1	1,45-1,26
	C2	1,25-1,11
	C3	1,10-1,04
	C4 ^{a)}	<1,04
Średnica rozptywu [mm] zgodnie z PN-EN 12350-5	F1	≤340
	F2	350-410
	F3	420-480
	F4	490-550
	F5	560-620
	F6	≥630
Rozptyw stożka ^{b)} [mm] zgodnie z PN-EN 12350-8	SF1	550-650
	SF2	660-750
	SF3	760-850

Metoda Vebe [s] zgodnie z PN-EN 12350-3	V0 ^{d)}	≥ 31
	V1	30-21
	V2	20-11
	V3	10-6
	V4 ^{d)}	5-3
a) C4 stosuje się wyłącznie do betonu lekkiego b) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 40 mm. c) Brak danych dotyczących czułości metody poza wartościami, zaleca się jej stosowanie w zakresie czasu Vebe ≤ 30s i > 5s.		

Metoda opadu stożka - rys. 5.50

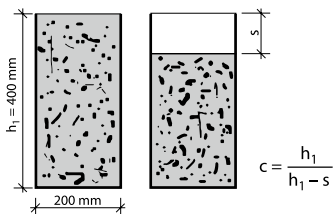
Badanie polega na pomiarze opadu stożka bezpośrednio po usunięciu formy (stożek Abramsa), czyli różnicy między wysokością formy, a wysokością najwyższego punktu rozformowanej próbki mieszanki betonowej. Mieszanekę umieszcza się w formie w 3 warstwach, zagęszczając ręcznie przez sztychowanie (25 razy).



Rys. 5.50. Badanie konsystencji metodą opadu stożka

Metoda stopnia zagęszczalności - rys. 5.51

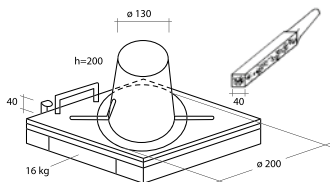
Badanie polega na pomiarze odległości od górnej krawędzi pojemnika do powierzchni zagęszczonej mieszanki betonowej. Pojemnik wypełnia się mieszanką betonową równomiernie, bez zagęszczania, do górnej krawędzi formy. Mieszanekę zagęszcza się przez wibrację.



Rys. 5.51. Badanie konsystencji metodą stopnia zagęszczalności

Metoda rozptywu - rys. 5.52

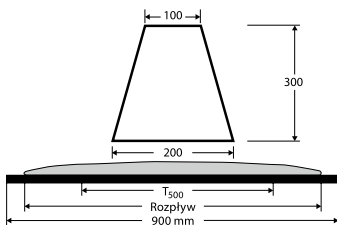
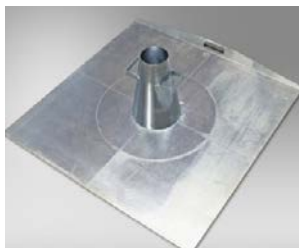
Badanie polega na pomiarze rozptywu mieszanki betonowej na płaskiej płycie poddanej wstrząsom. Formę stożkową wypełnia się mieszanką w dwóch warstwach zagęszczanych ręcznie przy użyciu drewnianego drążka. Po podniesieniu formy, wykonuje się 15 cykli podnoszenia i swobodnego opadania płyty górnej stolika.



Rys. 5.52. Badanie konsystencji metodą stolika rozptywowego

Metoda rozptyłu stożka - rys. 5.53

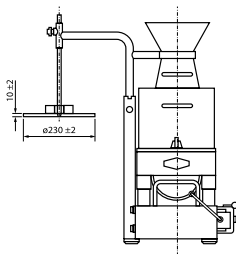
Badanie polega na pomiarze średnicy rozptyłu mieszanki betonowej pod własnym ciężarem, po usunięciu formy. Mieszkankę betonową umieszcza się w jednej warstwie, bez zagęszczania, w formie (stożek Abramsa), ustawionej na płycie. Po usunięciu formy mierzy się średnicę rozptywu w 2 kierunkach, jako wynik podaje się średnią.



Rys. 5.53. Badanie konsystencji metodą rozptywu stożka

Metoda Vebe - rys. 5.54

Badanie polega na pomiarze czasu do momentu całkowitego zetknięcia się dolnej powierzchni przezroczystego krążka aparatu Vebe z zaczynem. Mieszkankę betonową umieszcza się w 3 warstwach, zagęszczając każdą warstwę przez 25-krotne uderzenie prętem sztychującym, w stożku umieszczonym w cylindrze pomiarowym. Po zdjęciu formy stożkowej opuszcza się przezroczysty krążek na górną powierzchnię mieszanki betonowej i uruchamia się stół wibracyjny.



Rys. 5.54. Badanie konsystencji metodą Vebe

Ze względu na dokładność oznaczeń poszczególne metody zaleca się stosować w zakresach podanych w tabeli 5.14.

Tabela 5.14. Kryteria zgodności dla założonych wartości konsystencji

Opad stożka S			
Wartość założona [mm]	≤ 40	50 do 90	≥ 100
Tolerancja [mm]	± 10	± 20	± 30
Stopień zagęszczalności C			
Wartość założona	≥ 1,26	1,25 do 1,11	≤ 1,10
Tolerancja	± 0,13	± 0,11	± 0,08
Średnica rozptywu F			
Wartość założona [mm]	Wszystkie wartości		
Tolerancja [mm]	± 40		
Średnica rozptywu stożka SF			
Wartość założona [mm]	Wszystkie wartości		
Tolerancja [mm]	± 50		
Czas Vebe			
Wartość założona [s]	Wszystkie wartości		
Tolerancja [s]	Brak kryteriów		

Konsystencję mieszanki betonowej należy dobierać w zależności od sposobu i czasu transportu, metody zabudowy oraz kształtu elementu i rozmieszczenia zbrojenia (tabela 5.15). Norma PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 dopuszcza metody specjalne określania konsystencji, uzgodnione przez specyfikującego i producenta, w odniesieniu betonów do specjalnych zastosowań betonu, np. dla mieszanek wilgotnych.

UWAGA!

Niedopuszczalne jest upłynnianie mieszanki betonowej poprzez dodawanie wody – powoduje to niekontrolowane zwiększenie współczynnika w/c i skutkuje obniżeniem trwałości betonu. Konsystencję należy modyfikować zależnie od potrzeb stosując odpowiednie domieszki uplastyczniające i/lub upłynniające.

Tabela 5.15. Zalecane metody badania konsystencji mieszanki betonowej

Konsystencja	Sposób zagęszczania / formowania mieszanki	Zalecana metoda badawcza
Wilgotna	Mieszanki wibroprasowane, przekroje proste niezbrojone	nie klasyfikuje się ze względu na konsystencję
Gęstoplastyczna	Mieszanki wibrowane lub ubijane ręcznie, przekroje proste, rzadko zbrojone	stopień zagęszczalności
Plastyczna	Mieszanki wibrowane, przekroje proste normalnie zbrojone lub przekroje złożone rzadko zbrojone	stopień zagęszczalności, opad stożka
Półciekła	Mieszanki wibrowane, przekroje złożone gęsto zbrojone	stopień zagęszczalności, opad stożka
Ciekła	Mieszanki ręcznie sztychowane	rozptyw, rozptyw stożka, opad stożka
Bardzo ciekła	Mieszanki samozagęszczalne	rozptyw stożka

5.1.3.3. Klasy dodatkowych właściwości betonu samozagęszczalnego – SCC

Zgodnie z PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 beton samozagęszczalny (SCC) jest to beton, który pod własnym ciężarem rozptywa się i zagęszcza, wypełnia deskowanie ze zbrojeniem, kanały, ramy itp., zachowując jednorodność. Właściwości samozagęszczalnej mieszanki betonowej (SCC) opisuje się za pomocą:

- lepkości VF lub VS,
- przepływalności PL lub PJ,
- odporności na segregację SR.

Każda z wymienionych właściwości podlega ocenie wg odpowiedniej procedury badawczej (tabela 5.16) oraz klasyfikacji wg normy PN-EN 206+A2:2021. Nie wszystkie badania wymienione w tabeli 5.16 muszą zostać przeprowadzone. Każdorazowo wykonuje się rozptyw swobodny, pozostałe natomiast wykonywane są w zależności od potrzeb i aplikacji betonu SCC.

Zgodność wskazanych właściwości mieszanki betonowej (SCC) należy określić w czasie jej stosowania lub w przypadku betonu towarowego w czasie dostawy. W przypadku dostawy mieszanki betonowej w betoniarce samochodowej lub w urządzeniu mieszającym, jej właściwości należy badać stosując albo próbkę złożoną (uśrednioną z próbek punktowych) albo próbkę punktową zgodnie z PN-EN 12350-1.

Tabela 5.16. Właściwości reologiczne mieszanki SCC

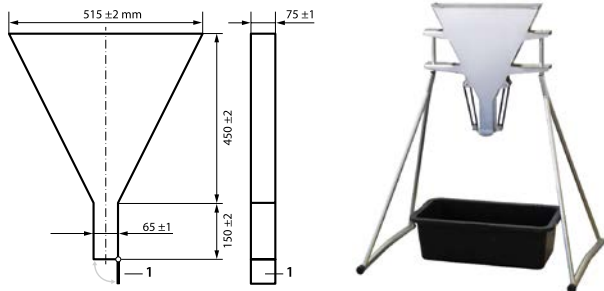
Właściwość mieszanki	Metoda badania
Zdolność do płynięcia	PN-EN 12350-8 Badania mieszanki betonowej - Część 8: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą rozptywu stożka
Lepkość	PN-EN 12350-9 Badania mieszanki betonowej - Część 9: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą V-lejka
Zdolność do przepływu	PN-EN 12350-10 Badania mieszanki betonowej - Część 10: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą L-pojemnika PN-EN 12350-12 Badania mieszanki betonowej - Część 12: Beton samozagęszczalny - Badanie metodą J-pierścienia
Odporność na segregację	PN-EN 12350-11 Badania mieszanki betonowej - Część 11: Beton samozagęszczalny - Badanie segregacji sitowej

Rozptyw swobodny - rys. 5.53

Rozptyw swobodny mierzony jest za pomocą stożka Abramsa (patrz metoda rozptywu stożka). Równoległe w tej metodzie oznacza się czas t_{500} , czyli czas mierzony od momentu podniesienia stożka, do momentu rozptywu mieszanki SCC do średnicy 500 mm.

Lepkość - rys. 5.55

Lepkość mieszanki betonowej jest to opór stawiany przez rozptywającą się mieszankę betonową. Pomiar lepkości może być oceniana na dwa sposoby - przez pomiar czasu wypływu mieszanki betonowej z V-lejka (tabela 5.17) oraz na podstawie oznaczenia czasu t_{500} (tabela 5.18) przy pomiarze rozptywu swobodnego stożka. Pomiar metodą V-lejka pozwala ocenić lepkość i zdolność mieszanki samozagęszczalnej do wypełniania formy. Badanie nie jest miarodajne, kiedy maksymalne uziarnienie kruszywa przekracza 22,4 mm.



Rys. 5.55. V-lejek (V-funnel), 1- zamknięcie (uchylne lub przesuwne)

Tabela 5.17. Klasy lepkości – t_v wg PN-EN 206+A2:2021

Klasa	t_v ^{a)} [s]
VF1	< 9,0
VF2	9,0 – 25,0

a) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 22,4 mm

Tabela 5.18. Klasy lepkości – t_{500} wg PN-EN 206+A2:2021

Klasa	t_{500} ^{a)} [s]
VS1	< 2,0
VS2	≥ 2,0

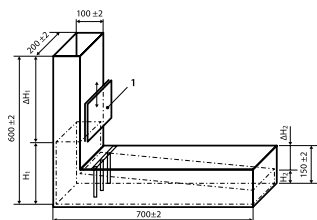
a) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 40 mm

Pomiar czasu t_{500} podczas wykonywania badania rozptyłu stożka, może posłużyć jako element oceny jednorodności betonu samozagęszczalnego w różnych zarobach.

Chwilowa zdolność płynięcia – przepływalność

Przepływalność jest to zdolność mieszanki betonowej SCC do przepływu przez ciasne otwory, pręty zbrojenia i inne przeszkody, bez blokowania się i segregacji. Przy określaniu przepływalności konieczne jest uwzględnienie geometrii zbrojenia oraz najmniejszego obszaru przepływu (obszaru, przez który mieszanka

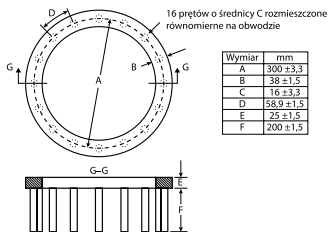
SCC powinna przepłynąć w sposób ciągły, aby szczelnie wypełnić deskowanie). W przypadku złożonych konstrukcji o wymiarze najmniejszego obszaru przepływu mniejszym niż 60 mm, konieczne mogą być specjalne badania próbne z zastosowaniem odpowiedniego modelu deskowania naturalnej wielkości. W celu oznaczenia tego parametru przeprowadza się badanie metodą L-pojemnika (rys. 5.56) i/lub metodą J-pierścienia (rys. 5.57). W metodzie L-pojemnika badanie można przeprowadzić na dwóch lub trzech prętach (tabela 5.19), zaś przy J-pierścieniu mamy do wyboru wariant z 12 lub 16 prętami (tabela 5.20).



Rys. 5.56. L-pojemnik (L-box), 1- zasuwka ślizgowa

Tabela 5.19. Klasy przepływalności wg metody L-box

Klasa	Wskaźnik przepływalności według metody pojemnika L [mm]
PL1	≥ 0,80 dla 2 prętów
PL2	≥ 0,80 dla 3 prętów



Rys. 5.57. J-pierścień (J-ring)

Tabela 5.20. Klasy przepływalności wg metody J-ring

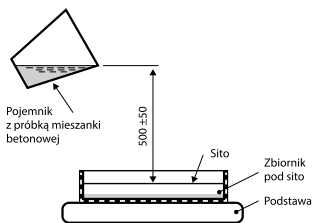
Klasa	Parametr przepływalności według metody pierścienia J ^{a)} [mm]
PJ1	≤ 10 z 12 prętami
PJ2	≤ 10 z 16 prętami

a) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 40 mm.

Odporność na segregację - rys. 5.58

Odporność na segregację jest to zdolność mieszanki betonowej do zachowania jednorodności. Mieszanka betonowa SCC może podlegać, zarówno dynamicznej segregacji podczas układania, jak i statycznej segregacji po ułożeniu, przed stwardnieniem. Statyczna segregacja jest najbardziej niebezpieczna w przypadku wysokich elementów, ale nawet w cienkich płytach może prowadzić do uszkodzeń powierzchni betonu. Badania odporności na segregację nie stosuje się w przypadku betonu zawierającego włókna lub kruszywo lekkie. W celu oznaczenia odporności na segregację samozagęszczalnej mieszanki betonowej, jej pomiar należy wykonać metodą sitową zgodnie z metodyką zawartą w normie PN-EN 12350-11, podając odpowiednie klasy (SR) wg tabeli 5.21.

Odporność mieszanki SCC na segregację bada się testem przesiewu. Badanie polega na wyznaczeniu (w %) ilości mieszanki betonowej przechodzącej przez sito 5 mm w stosunku do całkowitej ilości mieszanki umieszczonej na tym sicie po jej uprzednim przetrzymaniu przez okres 15 minut w przykrytym pojemniku. Jeśli ilość ta jest mniejsza niż 20%, to mieszankę klasyfikuje się jako odporną na segregację.



Rys. 5.58. Badanie odporności na segregację metodą sitową

Tabela 5.21. Klasy odporności na segregację wg metody sitowej

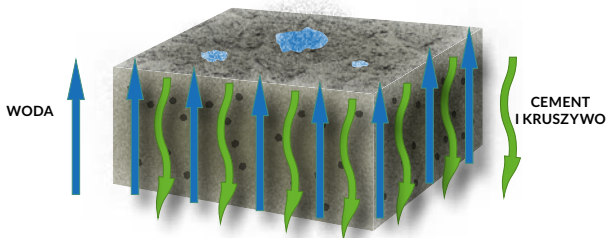
Klasa	Udział segregacji ^{a)} [%]
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

a) Klasyfikacji nie stosuje się do betonu z kruszywem o D_{max} większym niż 40 mm.

Odporność na segregację ma zasadnicze znaczenie, gdy mieszanka betonowa SCC wykazuje dużą zdolność rozplywu (klasa konsystencji SF3), a przy tym charakteryzuje się niską lepkością lub gdy przyjęta technologia podawania mieszanki, kształt i wymiary elementu mogą zwiększać ryzyko segregacji.

5.1.3.4. Odsączanie wody z mieszanki betonowej „bleeding”

Odsączanie wody z mieszanki betonowej, określane w technologii betonu z ang. jako „bleeding”, jest zjawiskiem naturalnym. Zaczyna się w momencie zabudowy mieszanki i trwa do momentu rozpoczęcia procesów wiązania spoiwa. Jest procesem samoistnym i wynika z różnicy gęstości pomiędzy stałymi składnikami mieszanki betonowej (kruszywo, cement), a wodą. Woda jako składnik mieszanki o najmniejszej gęstości jest wypierana w górę przez osiadające składniki o większym ciężarze właściwym (rys. 5.59).



Rys. 5.59. Zjawisko samoistnego wydzielania wody na powierzchnię betonu (bleeding)

Można wyróżnić dwa rodzaje „bleedingu”:

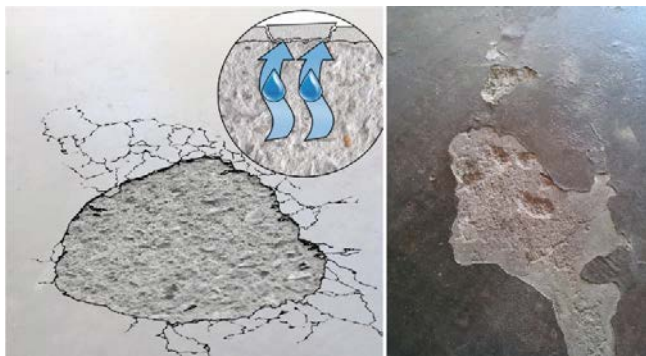
- wewnętrzny – występuje w przypadku elementów pionowych,
- powierzchniowy – jest obserwowany podczas wykonywania posadzek lub nawierzchni.

Niewielkie odsączanie wody z mieszanki betonowej jest w pewnym stopniu

korzystne, ponieważ zapobiega przesuszaniu powierzchni betonu. Natomiast zbyt duży „bleeding” prowadzi do niekontrolowanego zwiększenia współczynnika w/c w strefie przypowierzchniowej, co w konsekwencji powoduje obniżenie wytrzymałości i trwałości betonu. Obfity „bleeding” może także powodować wzrost ścieralności, a w przypadku posadzek, delaminację warstwy posypki utwardzającej (rys. 5.60).

Zjawisko odsączenia wody z mieszanki betonowej można kontrolować przez odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy składników betonu. Tendencja do samoistnego odsączenia wody zależy od rodzaju i właściwości zastosowanego cementu (rys. 5.61, tabela 5.23). Duże znaczenie mają szczególnie stopień rozdrobnienia, rodzaj cementu (zawartość klinkieru cementowego) oraz początek czasu wiązania cementu (tabela 5.23).

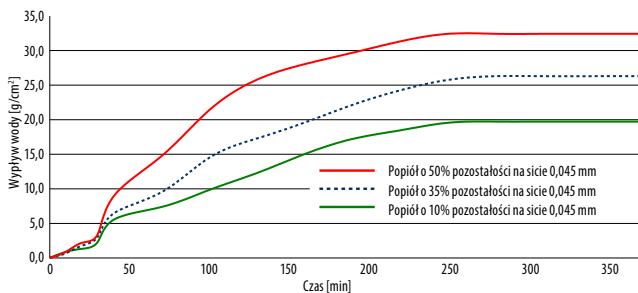
Wpływ na ilość odsączonej wody z mieszanki betonowej ma także jakość i ilość stosowanego popiołu lotnego. Miałkość popiołu lotnego, czyli pozostałość na sicie 0,045 mm (maksymalnie 40%), to jedna z podstawowych właściwości popiołów lotnych determinująca jakość. Niższa pozostałość wpływa korzystnie nie tylko na aktywność popiołu i urabialność mieszanki betonowej, ale także ogranicza zjawisko „bleedingu” (rys. 5.62).



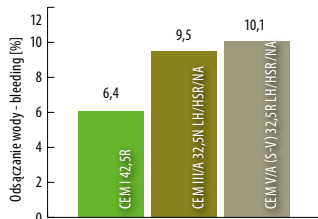
Rys. 5.60. Uszkodzenia warstwy wierzchniej betonu posadzkowego wskutek „bleedingu”

Tabela 5.22. Właściwości cementów istotne w kontekście bleedingu

Rodzaj cementu	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	Początek czasu wiązania [min]
CEM I 42,5R	3500	180
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	4220	220
CEM V/A (S-V) 42,5R LH/HSR/NA	4160	250



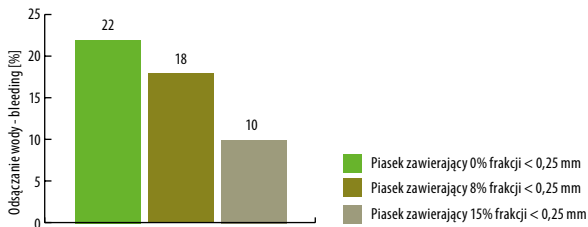
Rys. 5.61. Wpływ miakkości popiołu na „bleeding”



Rys. 5.62. Wpływ rodzaju cementu na bleeding

Szczególnie ważnym aspektem związanym z ograniczeniem wypływu wody z mieszanki betonowej jest odpowiedni dobór uziarnienia kruszywa drobnego. Zaleca się, aby zawartość frakcji $0 \div 0,25$ mm w mieszance kruszywowej wynosiła co najmniej 5%. Aby spełnić to wymaganie zawartość frakcji $0 \div 0,25$ mm w piasku powinna zawierać się w przedziale od 13% do 15%. Zastosowanie piasku o niewielkiej zawartości drobnej frakcji w wyraźny sposób zwiększa ilość

odsączonej wody (rys. 5.63). Przy stosowaniu piasków o niewielkiej zawartości ziaren $<0,25$ mm zalecane jest stosowanie dodatków w składzie betonu, np. popiołów lotnych lub mączek wapiennych. Alternatywnym rozwiązaniem może być także zastosowanie domieszki chemicznej zwiększającej więźliwość wody. Szczególną uwagę należy zwrócić podczas stosowania domieszek opóźniających wiązanie spoiwa w składzie betonu. Wydłużenie początku czasu wiązania cementu może doprowadzić do nasilenia zjawiska odsączenia wody.

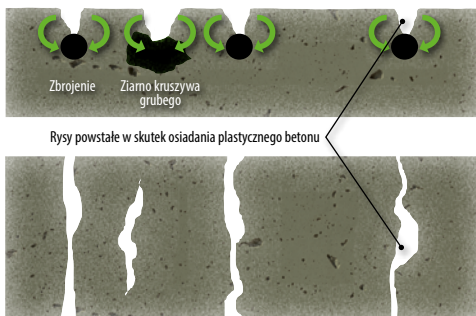


Rys. 5.63. Wpływ uziarnienia piasku na ilość odsączonej wody

5.1.3.5. Osiadanie i pękanie plastyczne betonu

Osiadanie i pękanie plastyczne betonu występują, gdy mieszanka betonowa jest jeszcze plastyczna, a proces wiązania nie został rozpoczęty. Przyczyną tworzących się pęknięć jest ograniczanie swobodnego osiadania zabudowanej mieszanki betonowej przez, znajdujące się w niewielkiej odległości od powierzchni, ziarna kruszywa grubego lub pręty zbrojeniowe (rys. 5.64). Obecność „przeszkód” dla osiadającej mieszanki sprawia, że w przypadku elementów zbrojonych, na powierzchni zabudowanego betonu, odzwierciedla się układ górnej, przypowierzchniowej siatki zbrojeniowej (rys. 5.65). Zazwyczaj pęknięcia wywołane osiadaniem plastycznym powstają w okresie od 2 do 4 godzin od zabudowy betonu, mogą jednak pozostawać niezauważone do momentu wystąpienia skurczu plastycznego (2 do 8 godzin), który powoduje wzrost rozwartości rys oraz propagację zarysowania.

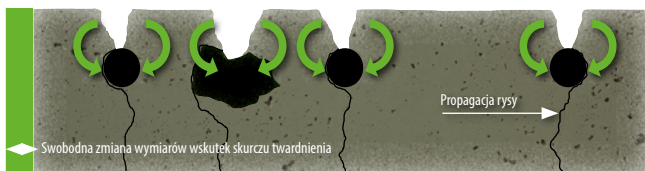
Zarysowania powstałe wskutek osiadania plastycznego w większości przypadków występują w strefie otuliny (pomiędzy powierzchnią betonu, a górną warstwą zbrojenia), przez co nie wpływają znacząco na właściwości mechaniczne konstrukcji, aczkolwiek w znacznym stopniu obniżają trwałość betonu. Wyjątek stanowią elementy utwardzone, w których rysy od osiadania mogą ulec propagacji wskutek wystąpienia skurczu twardnienia (rys. 5.66).



Rys. 5.64. Schemat zarysowania betonu wskutek osiadania plastycznego



Rys. 5.65. Rysy na powierzchni betonu wskutek osiadania plastycznego



Rys. 5.66. Propagacja zarysowań w elementach utwardzonych

Rysy powstałe w ten sposób przebiegają przez całą wysokość elementu niosąc ze sobą ryzyko obniżenia trwałości konstrukcji żelbetowej i pogorszenia właściwości mechanicznych betonu.

Zjawisko osiadania plastycznego wynika z wielu czynników, m.in.:

- gwałtownej utraty wody z warstw powierzchniowych betonu (niewłaściwa pielęgnacja),
- nieodpowiednio prowadzonego procesu zabudowy mieszanki betonowej (niewłaściwe, niedostateczne zagęszczenie),
- zbyt małej grubości otuliny zbrojenia,
- zbyt płynnej konsystencji mieszanki,
- znacznego bleedingu (wypływu wody z mieszanki betonowej),
- stosowania mieszanek betonowych o opóźnionym czasie wiązania.

Bardzo często przyczyną osiadania plastycznego jest przenoszenie drgań na zabudowaną w deskowaniu mieszankę betonową. Drgania, powstające w efekcie pracy urządzeń, sprzętu i maszyn budowlanych na terenie budowy, wywołują niekontrolowane przemieszczanie się świeżo ułożonej mieszanki betonowej, a przez to zmianę zabudowanej wysokości.

Ograniczenie zjawiska osiadania plastycznego można osiągnąć już na etapie projektowania receptury betonu, poprzez odpowiedni dobór składników betonu, ze szczególnym uwzględnieniem zakładanej klasy konsystencji. W praktyce, w celu zwiększenia klasy konsystencji powyżej projektowanej, na budowie często dodaje się wodę do mieszanki betonowej lub stosuje się domieszki chemiczne. W efekcie takich działań może wystąpić nadmierny bleeding (wydzielanie wody na powierzchnię), szczególnie gdy zawartość frakcji drobnych w mieszance betonowej jest ograniczona. Wskutek „bleedingu” dochodzi do zmian objętości zabudowanej mieszanki betonowej jeszcze przed jej stwardnieniem, co przekłada się na znaczny wzrost ryzyka zarysowania.

Podstawowymi sposobami przeciwdziałania osiadaniu plastycznemu są:

- stosowanie osłon zmniejszających odparowanie wody z zabudowanej mieszanki betonowej,
- prawidłowo przeprowadzony proces zabudowy,
- zacieranie lub powtórne zawibrowanie powierzchni betonu,
- zwiększenie grubości otuliny,
- produkcja mieszanek betonowych zgodnie z ich zakresem konsystencji,
- odpowiednia zawartość frakcji drobnych w mieszance betonowej.



Rys. 5.67. Zastosowanie przerwy roboczej, poniżej górnej warstwy zbrojenia, przed zabudową wierzchniej warstwy mieszanki betonowej

Należy zwrócić uwagę na jakość kruszywa drobnego stosowanego w betonie, w Polsce bardzo często stosowane są piaski o niewielkiej ilości frakcji drobnych $\leq 0,25\text{mm}$ (poniżej 7- 8%). Kruszywo takie wymaga zastosowania w mieszance betonowej dodatków lub specjalnych domieszek chemicznych zwiększających wiązność wody. Na etapie zabudowy mieszanki betonowej należy stosować następujące zabiegi:

- uwzględnienie przerwy roboczej (tam gdzie jest to możliwe, dla elementów o wymiarze przekroju ponad 30cm) przed zabudową wierzchniej warstwy mieszanki betonowej (rys. 5.67) – poniżej górnej siatki zbrojeniowej,
- rewibracja mieszanki betonowej po zabudowaniu całej objętości, zacieranie powierzchni ułożonej mieszanki betonowej (rys. 5.68) - najskuteczniejszy i najprostszy sposób eliminacji powstałych rys, ponieważ odpowiednio przeprowadzona całkowicie i trwale zamyka powstałe pęknięcia, zapobiegając tym samym ich propagacji oraz wnikanii czynników agresywnych w strukturę betonu.



Rys. 5.68. Zacieranie powierzchni betonu

5.1.3.6. Wymagania dotyczące zawartości składników w mieszance betonowej

ZAWARTOŚĆ CEMENTU

Zawartość cementu w mieszance betonowej uzależniona jest od warunków środowiska na jakie będzie narażony beton. Klasy ekspozycji podane w normie PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 określają minimalną zawartość cementu. W przypadku, gdy w składzie betonu uwzględnia się dodatki z uwagi na minimalną zawartość cementu i maksymalny współczynnik woda/cement, zawartość cementu zastępuje się, zależnie od stosowanej koncepcji:

- zawartością (cement + $k \times$ dodatek) lub
- zawartością (cement + dodatek),

Jeśli przewiduje się oznaczenie zawartości cementu, należy ją określić, wybierając jedną z poniższych możliwości:

- na podstawie wydruku z przyrządu rejestrującego skład betonu,
- na podstawie zapisu z produkcji w powiązaniu z instrukcją dozowania,
- analityczne, metoda badania oraz tolerancje powinny być uzgodnione między specyfikującym a producentem.

WSPÓŁCZYNNIK WODA/CEMENT (W/C)

Współczynnik woda/cement jest to stosunek masowy efektywnej zawartości wody (różnica między całkowitą ilością wody w mieszance betonowej a ilością wody zaabsorbowaną przez kruszywo) do zawartości cementu w mieszance betonowej.

Jeśli przewiduje się oznaczenie współczynnika woda/cement mieszanki betonowej, należy go obliczyć na podstawie oznaczonej zawartości cementu oraz efektywnej zawartości wody.

Ilość wody zaadsorbowanej przez kruszywo (nasiąkliwość kruszywa) należy określać zgodnie z PN-EN 1097-6 (wyjątek: nasiąkliwość grubego kruszywa lekkiego w mieszance betonowej należy określać po 1 godzinie, stosując kruszywo w stanie wilgotności naturalnej). Badania nasiąkliwości można modyfikować uwzględniając wszystkie pyty, pod warunkiem, że jest to zgodne z przepisami obowiązującymi w miejscu stosowania.

ZAWARTOŚĆ POWIETRZA

Wszystkie betony zawierają pustki, nawet te bardzo starannie zagęszczone i samozagęszczalne. Pozostała ilość powietrza, np. dla betonu z kruszywem do 32 mm wynosi 1 – 2 % objętościowo, a może wzrosnąć do 4 % dla betonu z drobnym kruszywem. Zawartość powietrza w betonie może być też modyfikowana w wyniku stosowania domieszek napowietrzających.

Rodzaje pustek w betonie:

- pustki zagęszczenia,
- otwarte i zamknięte kapilary,
- pustki żelowe,
- powietrze wprowadzone sztucznie w celu zwiększenia mrozoodporności.

Odpowiednia zawartość pęcherzyków powietrza w mieszance betonowej pochodzącego z napowietrzania ma szczególne znaczenie ze względu na trwałość (mrozoodporność) wykonanego elementu. Norma PN-EN 206+A2:2021 wymaga, aby napowietrzenie mieszanki betonowej wynosiło $\geq 4\%$ w przypadku betonu użytkowanego w klasach ekspozycji XF2÷XF4. Uzupełnienie krajowe do normy PN-EN 206, tj. PN-B-06265 precyzuje te wymagania, uzależniając zawartość powietrza w mieszance betonowej od maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa, tj.:

- dla kruszywa do 8mm – zawartość powietrza $\geq 5,5\%$,
- dla kruszywa do 16mm – zawartość powietrza $\geq 4,5\%$,
- dla kruszywa do 32mm – zawartość powietrza $\geq 4,0\%$,
- dla kruszywa do 64mm – zawartość powietrza $\geq 3,5\%$.

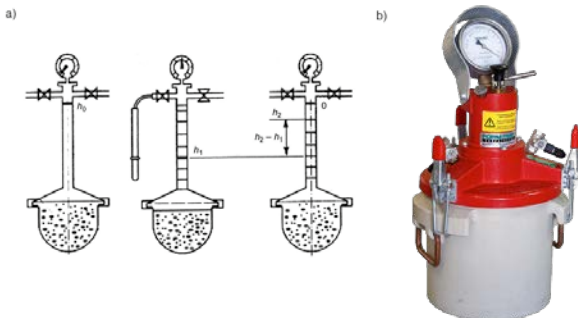
Oznaczenie zawartości powietrza w mieszance betonowej, należy wykonać zgodnie z metodyką podaną w normie PN-EN 12350-7 w przypadku betonu zwykłego i ciężkiego oraz zgodnie z normą ASTM C 173 w przypadku betonu lekkiego. Zaleca się, aby specyfikujący uwzględnił straty powietrza, które mogą wystąpić po dostarczeniu mieszanki na miejsce w wyniku pompowania, układania, zagęszczania, itp. Istotnym są też warunki środowiskowe (temperatura otoczenia).

Metoda słupa wody wg PN-EN 12350-7

Metoda polega na wprowadzeniu wody do ustalonego poziomu ponad próbkę zagęszczoną mieszanki betonowej o znanej objętości, znajdującą się w szczelnie zamkniętym pojemniku i oddziaływaniu na wodę ustalonym ciśnieniem powietrza. Redukcję objętości powietrza, w próbce mieszanki betonowej, mierzy się, obserwując obniżenie poziomu słupa wody. Rurka do odczytu wysokości słupa wody jest wyskalowana odpowiednio do zawartości powietrza [%], w próbce mieszanki betonowej (rys. 5.69a).

Metoda ciśnieniomierza wg PN-EN 12350-7

Metoda opiera się na założeniu, że znana objętość powietrza pod określonym ciśnieniem połączy się, w szczelnie zamkniętym pojemniku, z nieznaną objętością powietrza zawartą w próbce mieszanki betonowej. Zawartość powietrza w mieszance betonowej mierzy się zgodnie z metodą wyrównawczego ciśnienia. Aparat posiada komorę (rys. 5.69b), w której zdefiniowane ciśnienie buduje się za pomocą pompy. Otwarcie zaworu przelewowego wyrównuje ciśnienie w pojemniku testowym, który jest wypełniony mieszanką betonową. Spadek ciśnienia w naczyniu testowym, pokazuje ilość powietrza porowego. Skala na ciśnieniomierzu jest wykalibrowana odpowiednio do zawartości powietrza [%], względem wynikłego ciśnienia.



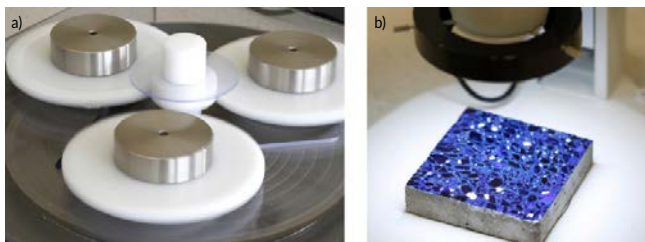
Rys. 5.69. Badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej a) schemat aparatu i badania metodą słupa wody, b) ciśnieniomierz

Metoda mikroskopowa z cyfrową analizą obrazu wg PN-EN 480-11

Metoda polega na analizie obrazu próbki betonu napowietrzonego i określeniu struktury porów, opisanej za pomocą:

- całkowitej zawartości powietrza,
- powierzchni właściwej systemu porów powietrznych,
- wskaźnika rozmieszczenia porów
- rozkładu wielkości porów powietrznych,
- zawartości mikroporów.

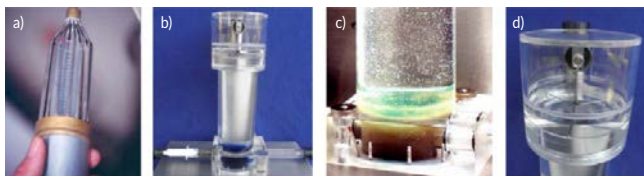
Metoda jest odpowiednia do stosowania wyłącznie na próbkach stwardniałego betonu, gdy znany jest dokładnie skład wyjściowy mieszanki betonowej, a próbki są reprezentatywne dla tego składu. Badaniu poddawane są próbki po okresie dojrzewania co najmniej 7 dni (z uwagi na możliwy efekt kolmatacji zaleca się, aby czas dojrzewania nie przekraczał 28 dni). Przygotowanie próbki polega na wycięciu i wyszlifowaniu (rys. 5.70a) oraz wykonania kontrastu powierzchniowego szlifów, dzięki czemu pęcherzyki stają się wyraźnie widoczne, a następnie na wykonaniu w określonych miejscach i wzdłuż określonych linii pomiarów mikroskopowych (rys. 5.70b).



Rys. 5.70. Określenie struktury porowatości a) szlifowanie próbek, b) pomiary mikroskopowe

Metoda analizy porów (AVA – air void analyzer)

Metoda polega ona na pobraniu specjalną sondą (rys. 5.71a) porcji mieszanki betonowej (z odrzuceniem kruszywa ≥ 6 mm) do naczynia cylindrycznego wypełnionego mieszanką glikolową o określonej lepkości (rys. 5.71b). W czasie magnetycznego mieszania (przez 30 sekund), z mieszanki uwalniane są powoli pęcherzyki powietrza (rys. 5.71c), od największych do najmniejszych (zgodnie z prawem Stokesa, większe pęcherzyki unoszą się szybciej niż mniejsze). Lepkość i charakter hydrofilowy cieczy, zapewnia, że uwolnione pęcherzyki zachowują swój pierwotny rozmiar, tzn. nie koalescują i nie rozpadają się na mniejsze pęcherzyki. Unoszą się one w naczyniu cylindrycznym najpierw przez warstwę tej mieszanki, a potem przez przykrywającą ją warstwę wody, a następnie gromadzą się pod zanurzoną w wodzie pokrywą połączoną z wagą hydrostatyczną (rys. 5.71d). Urządzenie rejestruje przyrost siły wyporu w czasie badania i przypisuje go wg specjalnego algorytmu malejącym średnicom pęcherzyków powietrza. Na podstawie zarejestrowanych wielkości algorytm oblicza rozkład wielkości zebranych pęcherzyków powietrza, współczynnik rozmieszczenia i powierzchnię właściwą.



Rys. 5. 71. Zestaw AVA a) sonda do poboru mieszanki, b) naczynie cylindryczne, c) uwalnianie pęcherzyków, d) waga hydrostatyczna

Pomiar zawartości powietrza w mieszance betonowej przeprowadzany jest, przede wszystkim, w przypadku betonów produkowanych z zastosowaniem domieszek napowietrzających. Utrzymanie zawartości powietrza w mieszance betonowej na odpowiednim poziomie jest konieczne, aby poprawić trwałość betonu (mrozoodporność). Napowietrzenie betonu jest szczególnie istotne w przypadku betonów narażonych na oddziaływanie mrozu i środków odladzających, np. elementy konstrukcji mostowych, nawierzchnie dróg, itp. Zgodnie z zapisami Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWIORB) dla betonu konstrukcyjnego (tabela 5.23) i nawierzchniowego (tabela 5.24) zawartość powietrza w mieszance betonowej w przypadku stosowania domieszki napowietrzającej powinna mieścić się w zalecanych przedziałach.

Tabela 5.23. Wymagana zawartość powietrza w mieszance betonowej betonu konstrukcyjnego przy stosowaniu domieszki napowietrzającej

Wymiar kruszywa D [mm]	Wartości graniczne dla zawartości powietrza [%] ¹⁾	Tolerancja pomiarowa [%]
16,0	4,5 ÷ 6,5	-0,5 +1,0
22,4	4,0 ÷ 6,0	
31,5	4,0 ÷ 6,0	
1) W przypadku betonów podawanych przy pomocy pompy, dolną wartość graniczną zawartości powietrza należy zwiększyć o 0,5%		

Tabela 5.24. Wymagana zawartość powietrza w mieszance betonowej betonu nawierzchniowego

Wymiar kruszywa D [mm]	Etap wykonywania badań	
	Projektowanie składu mieszanki betonowej [%]	Zatwierdzanie receptury, próba technologiczna, kontrola jakości robót [%]
8	4,5 ÷ 6,0	Wartości z projektowania składu mieszanki z uwzględnieniem tolerancji pomiarowej: -0,5; +1,0
16,0; 22,4	4,0 ÷ 5,5	
31,5	4,0 ÷ 5,5	

Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych GDDKiA dotyczące nawierzchni z betonu cementowego, stawiają także dodatkowe wymagania odnośnie napowietrzenia w zakresie charakterystyki porów powietrznych w betonie:

- zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A_{300}), powinna wynosić nie mniej niż 1,5 %
- wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie (L), powinien być niższy niż 0,200 mm.

Projektując beton należy wziąć pod uwagę fakt, że dodatkowe napowietrzenie betonu skutkuje spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Literatura podaje, że 1% dodatkowo wprowadzonego powietrza może spowodować spadek wytrzymałości nawet do 5,5%.

Czynniki wpływające na napowietrzenie:

- intensywność i czas mieszania,
- konsystencja mieszanki betonowej (współczynnik w/c),
- temperatura mieszanki betonowej,
- jakość i ilość domieszki napowietrzającej,
- kompatybilność z innymi rodzajami domieszek m.in. reduktorami wody,
- rodzaj i ilość cementu (cementy o wyższej zawartości $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ efektywniej się napowietrzają),
- rodzaj i ilość dodatku do betonu.

ZAWARTOŚĆ WŁÓKIEN

Jeśli przewiduje się oznaczenie zawartości włókien, należy ją określić, wybierając jedną z poniższych możliwości:

- na podstawie wydruku z przyrzędu rejestrującego skład betonu,
- na podstawie zapisu z produkcji w powiązaniu z instrukcją dozowania.

Dodawanie do mieszanki betonowej wyspecyfikowanej ilości włókien danego rodzaju, powinno odbywać się według procedury, która zapewni równomierne rozmieszczenie w całej objętości.

TEMPERATURA MIESZANKI BETONOWEJ

Temperatura mieszanki betonowej w czasie dostawy nie powinna być niższa niż 5°C. W przypadku gdy wymagana jest inna (minimalna lub maksymalna) temperatura mieszanki betonowej, wartość tą należy wyspecyfikować z podaniem dopuszczalnych tolerancji. Wszelkie wymagania dotyczące sztucznego chłodzenia lub podgrzewania mieszanki, przed jej dostarczeniem, powinny być uzgodnione między producentem a wykonawcą.

ZAWARTOŚĆ CHLORKÓW

Zawartość chlorków w betonie, oznacza zawartość jonów chlorkowych w odniesieniu do masy cementu (% masy), nie powinna przekraczać wartości dla wybranej klasy, wg tabeli 5.25. W celu oznaczenia zawartości chlorków w betonie należy określić sumę ich udziałów w składnikach, stosując jedną z poniższych metod lub ich kombinację:

- obliczanie na podstawie maksymalnej zawartości chlorków w składniku, dopuszczalnej w normie dotyczącej danego składnika, albo deklarowanej przez producenta każdego składnika,
- obliczanie na podstawie zawartości chlorków w składnikach, określanej co najmniej raz na miesiąc jako suma średnich z ostatnich 25 oznaczeń zawartości chlorków oraz iloczynu $1,64 \times \sigma$ (obliczone odchylenie standardowe dla każdego składnika).

Do betonu zawierającego zbrojenie stalowe, sprężające zbrojenie stalowe oraz inne elementy metalowe nie należy dodawać chlorku wapnia oraz domieszek zawierających chlorki.

Tabela 5.25. Maksymalna zawartość chlorków w betonie

Zastosowanie betonu	Klasa zawartości chlorków ^{a)}	Maksymalna zawartość Cl ⁻ odniesiona do masy cementu ^{b)} [%]
Bez zbrojenia stalowego lub innych elementów metalowych z wyjątkiem uchwytów odpornych na korozję	Cl 1,0	1,0
Ze zbrojeniem stalowym lub innymi elementami metalowymi	Cl 0,20	0,20
	Cl 0,40 ^{c)}	0,40
Ze stalowym zbrojeniem sprężającym, bezpośrednio stykającym się z betonem	Cl 0,10	0,10
	Cl 0,20	0,20
<p>a) Do specjalnego zastosowania betonu; zależy od przepisów w miejscu zastosowania betonu. b) W przypadku stosowania dodatków oraz ich uwzględniania w masie cementu, zawartość chlorków wyraża się jako zawartość jonów chlorkowych (% masy cementu) wraz z całkowitą masą uwzględnianych dodatków c) W przypadku betonów z cementem CEM III dopuszcza się różne klasy zawartości chlorków zgodnie z przepisami obowiązującymi w miejscu stosowania betonu.</p>		

5.1.4. Właściwości betonu stwardniałego

Norma PN-EN 206+A2:2021+ PN-B-06265 stawia wymagania w stosunku do następujących właściwości betonu stwardniałego:

- wytrzymałość na ściskanie,
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu,
- gęstość,
- odporność na penetrację wody pod ciśnieniem,
- ognioodporność.

5.1.4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie jest podstawowym wymaganiem dla stwardniałego betonu już na etapie projektowania konstrukcji betonowej.

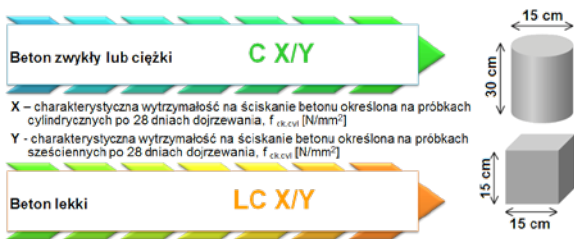
Na wytrzymałość betonu na ściskanie wpływ mają takie czynniki jak:

- rodzaj i klasa wytrzymałości cementu oraz jego zawartość w mieszance betonowej,
- zawartość wody w mieszance betonowej (współczynnik w/c),
- rodzaj i uziarnienie kruszywa,
- rodzaj i ilość dodatku do betonu,
- stosowane domieszki chemiczne,
- sposób zagęszczania mieszanki betonowej,
- warunki dojrzewania betonu, np. temperatura otoczenia, wilgotność, obróbka cieplna,
- metody i długość okresu pielęgnacji.

O ile nie określono inaczej, wytrzymałość na ściskanie oznacza się po 28 dniach dojrzewania. W szczególnych przypadkach może istnieć konieczność określenia wytrzymałości na ściskanie w wieku wcześniejszym lub późniejszym niż 28 dni, np. dla masywnych elementów konstrukcyjnych lub po przechowywaniu w warunkach specjalnych, np. obróbka cieplna.

Wytrzymałość betonu na ściskanie, zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021+ PN-B-06265, jest definiowana poprzez klasę. Klasa wytrzymałości na ściskanie jest określona symbolem literowo-liczbowym dla betonu zwykłego lub ciężkiego C X/Y, a dla betonu lekkiego LC X/Y (rys. 5.72).

Wytrzymałość charakterystyczna oznaczona jest na próbkach walcowych (o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm) lub na próbkach sześciennych (o boku 150 mm) zgodnie z normą PN-EN 12390-3.



Rys. 5.72. Schemat oznaczania klasy wytrzymałości betonu na ściskanie

Krajowe uzupełnienie PN-B-06265 do normy PN-EN 206+A2:2021 dopuszcza stosowanie próbek sześciennych o długości krawędzi 100 mm dla określenia wytrzymałości na ściskanie, jeżeli maksymalny wymiar ziarna kruszywa (D_{max}) w betonie nie przekracza 16 mm. Do przeliczenia wytrzymałości uzyskanej na podstawie badania próbek sześciennych o długości krawędzi 100 mm na normowy wymiar próbek należy zastosować następującą zależność:

$$f_{c, \text{cube}}(150 \text{ mm}) = 0,95 \times f_{c, \text{cube}}(100 \text{ mm})$$

Dopuszcza się także stosowanie próbek sześciennych o długości krawędzi 200 mm dla określenia wytrzymałości na ściskanie, jeżeli maksymalny wymiar ziarna kruszywa (D_{max}) w betonie nie przekracza 63 mm. Do przeliczenia wytrzymałości uzyskanej na podstawie badania próbek sześciennych o długości krawędzi 200 mm na normowy wymiar próbek należy zastosować następującą zależność:

$$f_{c, \text{cube}}(150 \text{ mm}) = 1,05 \times f_{c, \text{cube}}(200 \text{ mm})$$

Producent mieszanki betonowej przed dostawą powinien określić, na jakich próbkach, walcowych czy sześciennych, będzie oznaczana wytrzymałość na ściskanie. Przyjęcie innych zasad musi być uzgodnione między specyfikującym a producentem. Jeżeli istnieje przypuszczenie, że wyniki badania wytrzymałości na ściskanie będą niereprezentatywne, np. w przypadku mieszanek betonowych o konsystencji C0 lub o konsystencji gęstszej niż S1, należy zmodyfikować metodę badania albo ocenić wytrzymałość na ściskanie w istniejącej konstrukcji lub elemencie konstrukcyjnym.

W celu klasyfikacji wytrzymałości na ściskanie, norma PN-EN 206+A2:2021 wprowadza pojęcie wytrzymałości charakterystycznej - wartość wytrzymałości, poniżej której może znaleźć się 5% populacji wszystkich możliwych oznaczeń wytrzymałości dla danej objętości betonu.

Z uwagi na poziom wytrzymałości charakterystycznej norma PN-EN 206+A2:2021 wyróżnia klasy wytrzymałości na ściskanie betonu – dla betonu zwykłego i ciężkiego wg tabeli 5.26 oraz dla betonu lekkiego wg tabeli 5.27.

Tabela 5.26. Klasy wytrzymałości na ściskanie betonu zwykłego i ciężkiego

Klasa wytrzymałości na ściskanie	Minimalna wytrzymałość charakterystyczna oznaczona na próbkach walcowych $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]	Minimalna wytrzymałość charakterystyczna oznaczona na próbkach sześciennych $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tabela 5.27. Klasy wytrzymałości na ściskanie betonu lekkiego

Klasa wytrzymałości na ściskanie	Minimalna wytrzymałość charakterystyczna oznaczona na próbkach walcowych $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]	Minimalna wytrzymałość charakterystyczna oznaczona na próbkach sześciennych $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Wytrzymałości na ściskanie określa się na próbkach sześciennych lub walcowych (rys. 5.73) pobieranych, przygotowywanych i pielęgnowanych według procedur zawartych w normach:

- PN-EN 12350-1 „Badania mieszanki betonowej. Część 1: Pobieranie próbek”,
- PN-EN 12390-2 „Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”.



Rys. 5.73. Formy do przygotowania próbek betonu do badania wytrzymałości na ściskanie
a) forma sześcienna 15cm, b) forma sześcienna podwójna 10cm, c) forma walcowa \varnothing 15cm

W tabeli 5.28 przedstawiono podstawowe czynności związane z pobieraniem i przygotowaniem próbek betonu do badań wytrzymałościowych.

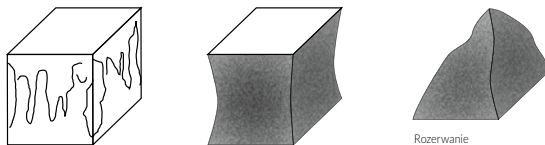
Tabela 5.28. Pobieranie i przygotowanie próbek do badań wytrzymałości

Czynność	Postępowanie
Pobieranie mieszanki betonowej	Należy pobrać co najmniej 1,5 razy większą ilość mieszanki betonowej niż ilość wymagana do badań. Podczas pobierania próbek z betonowozu nigdy nie należy pobierać próbki przy początku ani końcu rozładunku
Napełnianie form	Przed napełnieniem form (rys. 5.73) mieszanka betonowa powinna być wymieszana w mieszalniku za pomocą szufelki. Próbki powinny być napełniane w co najmniej dwóch warstwach, nie grubszych niż 100 mm
Zagęszczanie próbek	Mieszanka powinna być zagęszczona bezpośrednio po ułożeniu za pomocą jednej z metod: – zagęszczanie mechaniczne – wibratorem wglębnym lub na stole wibracyjnym, – zagęszczanie ręczne – za pomocą pręta. Zagęszczanie należy prowadzić bez nadmiernej segregacji składników oraz bez pojawienia się warstwy mleczka cementowego
Znakowanie próbek	Oznakowanie powinno być wyraźne i trwałe, bez uszkodzeń próbki
Pielęgnacja próbek	Próbki należy pozostawić w formach przez min. 16 godzin, lecz nie dłużej niż 3 dni, chroniąc przed wstrząsami i utratą wody. Temperatura przechowywania próbek +20°C ±5°C, po wyjęciu z form pielęgnować próbki aż do badania w wodzie o temperaturze +20°C ±2°C, lub w komorze klimatycznej w temperaturze +20°C ±2°C i wilgotności względnej ≥95%.
Transport próbek	Nie wolno dopuścić do ubytku wilgotności i odstępstw od wymaganej temperatury

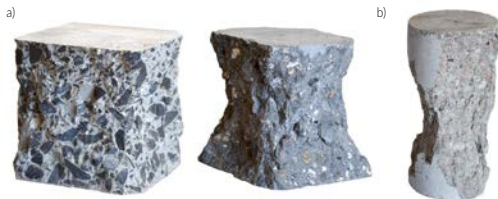
Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonuje się w prasie wytrzymałościowej, zgodnie z normą PN-EN 12390-3 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania” – rys. 5.74. Prawidłowość wykonanego badania należy określać za pomocą zdefiniowanych schematów prawidłowego (rys. 5.75, rys. 5.76) i nieprawidłowego zniszczenia próbek (rys. 5.77).



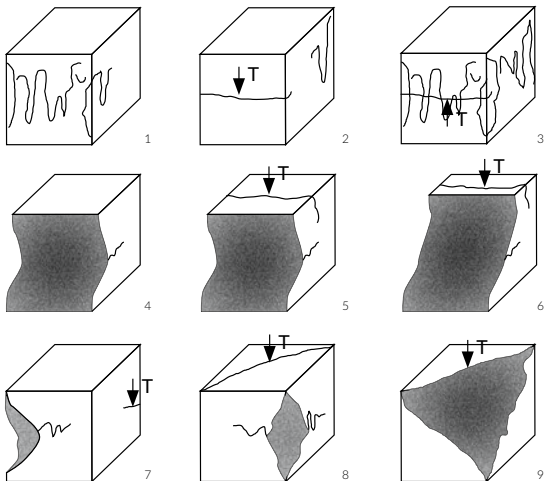
Rys. 5.74. Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu



Rys. 5.75. Schemat prawidłowego zniszczenia próbek w badaniu wytrzymałości na ściskanie



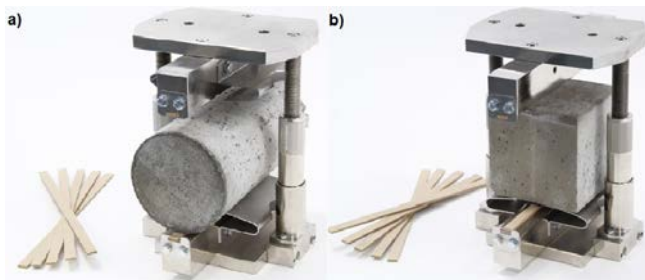
Rys. 5.76. Przykład prawidłowego zniszczenia próbek w badaniu wytrzymałości na ściskanie
a) próbek sześciennych, b) próbek walcowych



Rys. 5.77. Schemat nieprawidłowego zniszczenia próbek w badaniu wytrzymałości na ściskanie

5.1.4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wytrzymałość na rozciąganie jest właściwością decydującą o trwałości betonu w konstrukcji nawierzchni drogowej lub lotniskowej. Wytrzymałość charakterystyczna betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu powinna być równa lub większa od wyspecyfikowanej wartości. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonuje się według normy PN-EN 12390-6 „Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań” w sposób pośredni, przeprowadzając próbę rozłupywania na próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm - rys.5. 78a, ewentualnie na próbkach sześciennych o boku 150 mm - rys. 5.78b, przykładając obciążenie przez odpowiednie podkładki.



Rys. 5. 78. Próbkę do badań wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu: a) cylindryczna, b) sześcienna (www.controls-group.com)

Wymagania w zakresie wytrzymałości na rozciąganie podają Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych GDDKiA D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego. Według WWIORB wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu badania po 28 dniach twardnienia lub czasie równoważnym, wynikającym z charakterystyki użytego cementu (liczona jako średnia z trzech próbek sześciennych o boku 150mm), powinna być nie niższa niż:

- 3,0 MPa - dla kategorii ruchu KR1÷KR4,
- 3,5 MPa - dla kategorii ruchu KR5÷KR7.

Wytrzymałość na zginanie betonu, jeżeli jest wyspecyfikowana, należy oznaczyć zgodnie z normą PN-EN 12390-5 "Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań".

Wyniki badania próbek prostopadłościennych mogą być większe o ok. 10% niż uzyskane dla próbek walcowych z tego samego betonu.

Wytrzymałość betonu na rozciąganie zależy przede wszystkim od wytrzymałości zaczynu cementowego i strefy kontaktowej zaczynu - kruszywo (od przyczepności zaczynu do ziaren) oraz wytrzymałości na rozciąganie ziaren kruszywa (beton na kruszywie łamanym ma większą wytrzymałość niż beton z kruszywem otoczkowym). Znaczącym czynnikiem jest także mikrostruktura matrycy cementowej (porów i rys).

5.1.4.3. Gęstość

Gęstość betonu należy określać w stanie suchym zgodnie z PN-EN 12390-7. Gęstość betonu zwykłego w stanie suchym powinna być większa niż 2000 kg/m³ i nie powinna przekraczać 2600 kg/m³. Gęstość betonu lekkiego w stanie suchym powinna zawierać się między wartościami granicznymi określonej klasy gęstości - tabela 5.29. Gęstość betonu ciężkiego w stanie suchym powinna być większa niż 2600 kg/m³. W przypadku, gdy gęstość betonu jest wyspecyfikowana jako wartość założona, tolerancja wynosi ± 100 kg/m³, o ile nie ustalono inaczej.

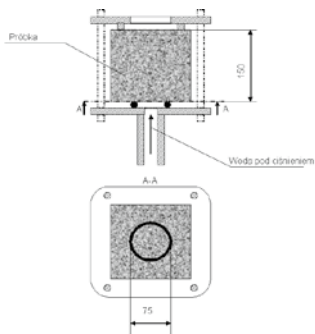
Tabela 5.29. Klasy gęstości betonu lekkiego wg PN-EN 206+A2:2021

Klasa gęstości	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Zakres badanej gęstości [kg/m ³]	≥ 800 i ≤ 1000	> 1000 i ≤ 1200	> 1200 i ≤ 1400	> 1400 i ≤ 1600	> 1600 i ≤ 1800	> 1800 i ≤ 2000

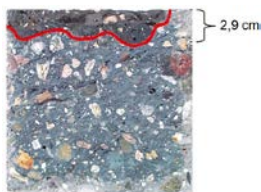
5.1.4.4. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

W przypadku oznaczania odporności na penetrację wody pod ciśnieniem, metoda badania oraz kryteria zgodności powinny być uzgodnione między specyfikującym a producentem. Jeżeli do wykonania elementu, wyrobu lub konstrukcji istotna jest jego wodoszczelność, to maksymalną głębokość penetracji wody pod ciśnieniem należy określić w specyfikacji technicznej a badanie przeprowadzić zgodnie z PN-EN 12390-8. Badaniu należy poddać trzy próbki, chyba że w specyfikacji technicznej podano inaczej. Badanie należy rozpocząć w czasie równoważnym dojrzewania betonu w zależności od rodzaju zastosowanego cementu.

Nie należy przekazywać ciśnienia wody na zagładzoną powierzchnię próbki. Badanie betonu przebiega pod stałym ciśnieniem wody 500 ± 50 kPa działającym na powierzchnię próbki o średnicy 75 mm przez 72 ± 2 godz. Na rys. 5.79 przedstawiono schemat badania głębokości penetracji wody w próbce betonu. Po zakończeniu wtłaczania wody pod ciśnieniem próbkę rozłupuje się i mierzy głębokość penetracji wody określoną na powierzchni przekroju próbki (rys. 5. 80). Wynik pomiaru określa wodoprzepuszczalność betonu.



Rys. 5.79. Schemat badania głębokości penetracji wody oraz widok aparatury badawczej



Rys. 5.80. Pomiar głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, beton z cementu CEM III/A 32,5N, $w/c=0,46$

Norma PN-EN 13877-2 „Nawierzchnie betonowe. Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych” zaleca badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem w celu określenia odporności betonu na wnikanie benzyny, oleju i innych substancji chemicznych, przy czym dopuszczalna głębokość wnikania wody nie powinna przekroczyć 30 mm.

Według Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych GDDKiA dotyczących betonu konstrukcyjnego w budownictwie komunikacyjnym, beton w elementach konstrukcji narażonych na oddziaływanie środowiska chemicznie agresywnego (klasa ekspozycji XA) i korozji wywołanej chlorkami (XC3, XD3) powinien wykazywać odporność na penetrację wody pod ciśnieniem (badanie wg PN-EN 12390-8). Według WWIORB maksymalna głębokość penetracji nie

powinna przekraczać:

- 60 mm w klasie ekspozycji XA1,
- 50 mm w klasie ekspozycji XA2,
- 40 mm w klasie ekspozycji XA3, XS3, XD3.

5.1.4.5. Odporność na działanie mrozu

Zamarzająca woda w porach betonu zwiększa objętość o 9%. Powoduje to naprężenia wewnątrz betonu, które mogą być przyczyną jego spękań. Ilość uszkodzeń zwiększa się w przypadku cyklicznego zamrażania i rozmrażania betonu, co w konsekwencji może prowadzić do całkowitego zniszczenia kompozytu. Odporność betonu na działanie mrozu, jeżeli jest wyspecyfikowana, oznacza się zgodnie z metodyką zawartą w załączniku N krajowego uzupełnienia PN-B-06265 do normy PN-EN 206+A2:2021. Mrozoodporność zwykła betonu charakteryzowana jest poprzez stopień mrozoodporności który zaleca się przyjmować wg tabeli 5.30 w zależności od wskaźnika N, odpowiadającemu liczbie przewidywanych lat użytkowania konstrukcji. W przypadku gdy beton narażony jest na kapilarne podciąganie wody, wskaźnik należy zwiększyć o 50, natomiast jeżeli znajduje się w strefie wahań poziomu wody lub środków rozmrażających – zwiększyć o 100. Badanie należy rozpocząć w czasie równoważnym dojrzewania betonu w zależności od rodzaju zastosowanego cementu.

Tabela 5.30. Stopnie mrozoodporności betonu

Wskaźnik N	Stopień mrozoodporności
do 25	F25
26 do 50	F50
51 do 75	F75
76 do 100	F100
101 do 150	F150
151 do 200	F200
ponad 200	F300

Stopień mrozoodporności betonu jest osiągnięty, jeżeli po wymaganej w jego symbolu liczbie cykli zamrażania – odmrażania próbek betonowych spełnione są następujące warunki:

- próbki nie wykazują pęknięć,
- łączna masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków kruszywa itp. nie przekracza 5 % masy próbek przed rozpoczęciem cykli zamrażania-odmrażania,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek nie zamrażanych nie jest większe niż 20 %.

Przez cykl w metodzie zwykłej należy rozumieć zamrażanie próbki w powietrzu o temp. $-18^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ przez co najmniej 4 godz. a następnie jej odmrażanie w wodzie o temperaturze $18^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ przez okres nie krótszy niż 2 godz. i nie dłuższy niż 4 godz.

O wysokiej mrozoodporności betonu decyduje skład mieszanki betonowej i jakość zastosowanych składników. Norma PN-EN 206+A2:2021 podaje wymagania dla klas ekspozycji XF (agresja mrozowa) dotyczące:

- maksymalnego współczynnika w/c,
- minimalnej zawartości cementu,
- mrozoodporności kruszywa (oznaczenie wg normy PN-EN 1367 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych”),
- minimalnej zawartości powietrza (min.4% dla klas XF2÷XF4).

W praktyce odporność betonu na działanie mrozu uzyskuje się poprzez zastosowanie kruszywa mrozoodpornego oraz właściwe napowietrzenie mieszanki betonowej za pomocą domieszek chemicznych. Wprowadzenie domieszek napowietrzających pozwala uzyskać zamknięte mikropory, równomiernie rozłożone w stwardniałym zaczynie, które pozostają niewypełnione wodą. Podczas zamrażania wody w betonie mikropory pełnią rolę buforów, które kompensują powstające ciśnienie w wyniku zamrażania wody. Przyjmuje się, że właściwa zawartość powietrza w betonie mrozoodpornym powinna wynosić 4–6%. Większa zawartość powietrza powoduje znaczne obniżenie wytrzymałości betonu.

5.1.4.6. Odporność na cykliczne zamrażanie-odmrażanie w obecności soli odladzających

Odporność betonu na cykliczne zamrażanie-odmrażanie w obecności soli odladzających, jeżeli jest wyspecyfikowana, oznacza się zgodnie z metodyką zawartą w załączniku O krajowego uzupełnienia PN-B-06265 do normy PN-EN 206+A2:2021.

Odporność na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających jest

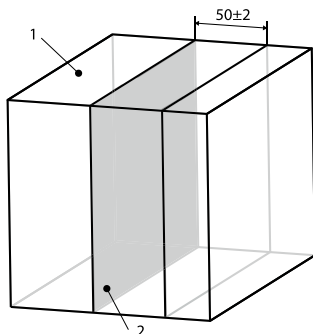
oceniana na podstawie masy materiału złuszczonego z badanej powierzchni po 56 cyklach zamrażania-rozmrażania. Na podstawie uzyskanych wyników beton klasyfikowany jest do kategorii zgodnie z tabelą 5.31. Badaną powierzchnię uzyskuje się z przecięcia sześciennego próbki betonowej o boku 150 mm, a następnie pokrywa 3 mm warstwą dejonizowanej wody lub 3 % roztworu chlorku sodu (NaCl). Badanie należy rozpocząć w czasie równoważnym dojrzewania betonu w zależności od rodzaju zastosowanego cementu.

Do badania należy użyć czterech próbek wyciętych z czterech różnych sześciątów o boku 150 mm. W pierwszym dniu próbki są przechowywane w formach ostnionych folią polietylenową w temperaturze $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Po 24 ± 2 godz. powinno nastąpić rozformowanie próbek i umieszczenie ich w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Po siedmiu dniach próbki należy umieścić w komorze klimatycznej zgodnej z normą załącznikiem O do normy PN-B 06265, w której przechowuje się je do momentu badania mrozoodporności. Po 21 ± 1 dniach należy wyciąć próbki z każdej kostki prostopadle do górnej powierzchni w taki sposób aby przecięcie znajdowało się w środku sześciątu. Grubość próbki powinna wynosić 50 ± 2 mm, przy czym badana powierzchnia musi znajdować się w połowie sześciątu zgodnie z rys. 5.81.

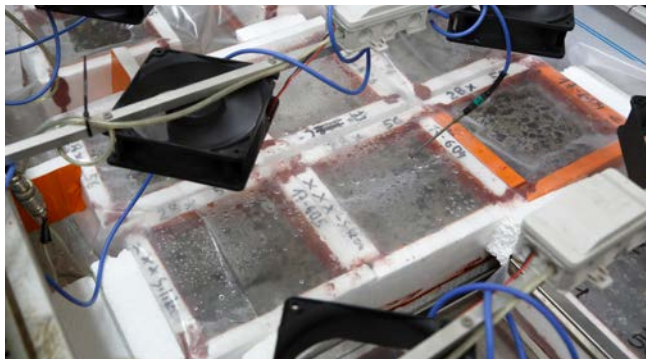
Tabela 5.31. Kryteria odporności próbek betonu na cykle zamrażania - odmrażania w obecności soli odładzających

Kategoria	Ubytek masy po 28 cyklach (m_{28})	Ubytek masy po 56 cyklach (m_{56})	Stopień ubytku m_{56}/m_{28}
FT0	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań
FT1	wartość średnia $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$, przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,5 \text{ kg/m}^2$	brak wymagań	brak wymagań
FT2	średnio $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	wartość średnia $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$, przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,5 \text{ kg/m}^2$	≤ 2

W 28 dniu lub w czasie równoważnym należy wlać wodę dejonizowaną o temperaturze $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ na górną powierzchnię do grubości warstwy 3 mm. Aby rozpocząć badanie, należy umieścić próbki w komorze (rys. 5.82) w czasie fazy cyklu 0 ± 30 min, zgodnie z rys. 5.83.



Rys. 5.81. Położenie i powierzchnia próbki do badań. 1) powierzchnia odcinana, 2) powierzchnia badana



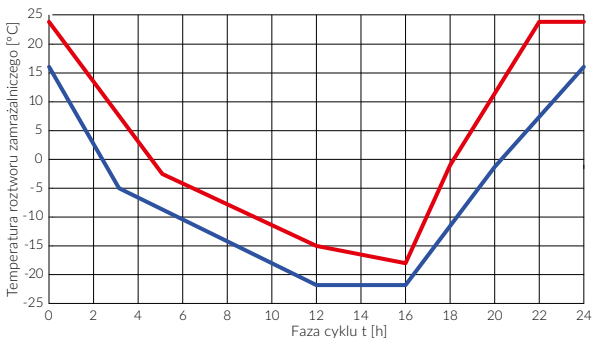
Rys. 5.82. Badanie mrozoodporności w obecności soli odładzających

Roztwór zamrażalniczy zabezpiecza się przed odparowaniem, przykrywając go arkuszem polietylenu, przez cały czas badania arkusz znajduje się w takiej pozycji, aby odległość między nim a powierzchnią roztworu zamrażalniczego wynosiła co najmniej 15mm.

W czasie cykli zamrażania-rozmrażania, wszystkie powierzchnie próbek z wyjąt-

kiem powierzchni badanej należy zaizolować termicznie styropianem o grubości 20 ± 1 mm. Alternatywnie można wykorzystać inny materiał o innej grubości zapewniając równoważną izolację termiczną.

Zamrażanie i rozmrażanie próbek odbywa się ściśle według określonych krzywych wychładzania i ogrzewania komory zamrażarki (rys. 5.83). Temperatura powinna zawierać się w polu ograniczonym górną i dolną krzywą przebiegu temperatury w czasie. Ocenie podlega ilość materiału, który zostanie złączony z badanej powierzchni. Jako wyniki badania podaje się ilość samego złączonego materiału dla każdej próbki, a także średnią wartość w kilogramach na metr kwadratowy zaokrągloną do $0,2 \text{ kg/m}^2$, po: 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 i 56 cyklach zamrażania i rozmrażania. Dodatkowo podaje się skład środka zamrażania oraz ocenę wizualną (pęknięcia, wyciek wody lub roztworu soli) przed rozpoczęciem i po kolejnych cyklach (jak wyżej).



Rys. 5.83. Zakres temperatury w czasie badania mrozoodporności – w obecności soli odladzających

5.1.4.7. Ognioodporność

Beton wykonany ze składników odpowiadających wymaganiom PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265, zgodnie z decyzją Komisji Europejskiej 94/611/EC, jest zakwalifikowany do klasy ognioodporności Euro A1 i nie wymaga badania.

5.1.4.8. Czas równoważny

Badania właściwości stwardniałego betonu, inne niż wytrzymałość, rozpoczyna się w czasie równoważnym dojrzewania betonu zależnym od rodzaju użytego cementu (tabela 5.32).

Tabela 5.32. Czas wykonywania badań w zależności od rodzaju zastosowanego cementu

Czas równoważny [dni]	Rodzaj cementu		
	wg krajowego uzupełnienia PN-B-06265	wg WWIORB	
		Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich ¹⁾	Nawierzchnia z betonu cementowego ¹⁾
28 dni	CEM I (R), CEM II/A (R)		CEM I (R), CEM II/A-S (R)
56 dni	CEM I (N), CEM II/A (N), CEM II/B (N,R), CEM IV/A	CEM I (N), CEM II/A (N), CEM II/B (N,R)	CEM I (N), CEM II/A-S (N), CEM II/B-S (N,R), CEM II/A-LL, CEM II/A-V, CEM II/A-M (S-V), CEM II/A-M (S-LL)
90 dni	CEM III CEM IV/B CEM V	CEM III/A	CEM III/A

¹⁾ WWIORB dopuszczają dostosowania ograniczonej ilości rodzajów cementu w stosunku do krajowego uzupełnienia PN-B-06265

5.1.4.9. Pozostałe właściwości stwardniałego betonu

Wiele właściwości betonu, mimo iż bezpośrednio nie są przywołane w normie betonowej PN-EN 206+A2:2021, są specyfikowane i stosowane w praktyce do oceny trwałości kompozytów cementowych. Wśród tych właściwości wymieć należy:

- skurcz,
- odporność na agresję chemiczną.

SKURCZ

Spękania betonu wskutek skurczu skutkują obniżeniem trwałości, tj. znacznie pogarszają jego szczelność matrycy, co ułatwia dostęp mediów agresywnych (gazów, cieczy) do wnętrza betonu. Skurcz jest zjawiskiem samoistnym spowodowanym odkształceniami niewynikającymi z obciążeń mechanicznych (rys. 5.84). Zachodzi w materiałach o strukturze porowatej, w wyniku utarty wody na skutek osuszania lub zachodzących reakcji fizyko-chemicznych, stąd nazywany jest kontrakcją (zmianą objętości).

SKURCZ CHEMICZNY

- wynikający ze zmniejszenia objętości produktów reakcji hydratacji cementu w porównaniu do objętości substratów
- skala zależy od składu mineralnego cementu
- odkształcenia znacznie mniejsze niż odkształcenia od skurczu plastycznego
- właściwa pielęgnacja umożliwia ograniczenie

SKURCZ PLASTYCZNY

- zachodzi, gdy beton jest w stanie plastycznym
- następuje wskutek odparowania wody z powierzchni lub zasysania wody przez chłonne podłoże
- gdy ilość wody odparowującej jest większa niż ilość wody doprowadzonej na powierzchnię betonu następuje pęknięcie
- rysy od skurczu plastycznego są równoległe, mogą mieć znaczną głębokość i nie rozciągają się do wolnych krawędzi betonu, szczególnie wrażliwe są powierzchnie płaskie

SKURCZ AUTOGENICZNY

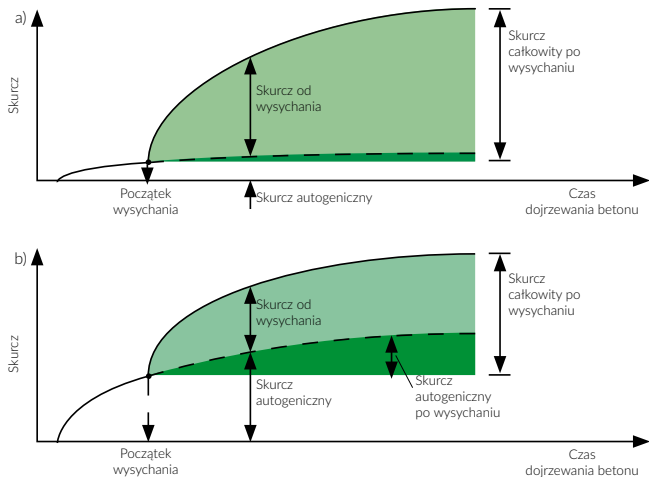
- zachodzi wskutek odciągania wody z porów kapilarnych przez niezhydratyzowane jeszcze ziarna cementu, tzw. samoosuszenie betonu
- odkształcenia znacznie mniejsze niż odkształcenia od skurczu od wysychania
- ma znaczenie w betonach o bardzo niskim współczynniku w/c
- często zachodzi we wnętrzu dużych masywów z betonu
- niższy gdy stosowane są cementy zawierające granulowany żużel wielkopiecowy lub popiół lotny

SKURCZ PRZY WYSYCHANIU

- spowodowany uchodzeniem wody z betonu do otoczenia nienasyconego parą wodną
- ma największe znaczenie, ponieważ nie można go całkowicie wyeliminować, a jedynie ograniczać negatywne skutki
- skutkuje największymi odkształceniami w stosunku do pozostałych rodzajów skurczu
- związany z charakterystyką porowatości betonu

Rys. 5.84. Rodzaje skurczu betonu

Na całkowity skurcz betonu składają się zmiany objętości wynikające z procesów wiązania i twardnienia zaczynu cementowego (skurcz chemiczny i autogeniczny) oraz odkształcenia wywołane utratą wody z powierzchni betonu (początkowo skurcz plastyczny, a po stwardnieniu skurcz od wysychania), co obrazuje rys. 5.84, rys. 5.85.

















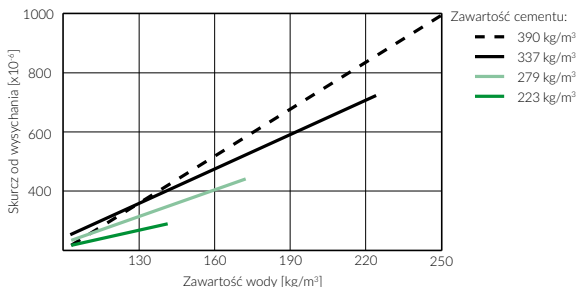
Rys. 5.85. Odształcenia skurczowe a) w betonie zwykłym b) w betonie wysokiej wytrzymałości

Wielkość odształceń skurczowych, a w efekcie prawdopodobieństwo zarysowania betonu, zależy w dużym stopniu także od czynników materiałowych (skład betonu) oraz technologicznych (tabela 5.33), tj.:

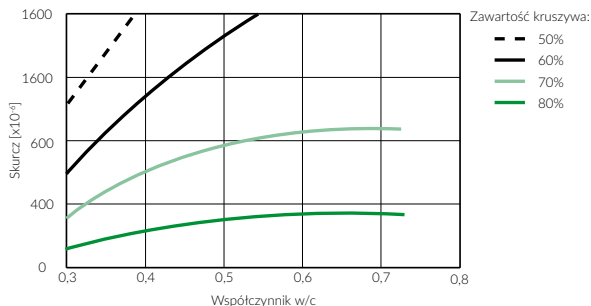
- wielkości współczynnika w/c (rys. 5.86, rys. 5.87),
- ilości i uziarnienia kruszywa (im więcej kruszywa drobnego, tym większy skurcz - rys. 5.87),
- ilości i rodzaju cementu w składzie betonu (rys. 5.86),
- rodzaju i ilości dodatków do betonu,
- rodzaju zastosowanych domieszek chemicznych,
- warunków pielęgnacji (metoda i długość).

Tabela 5.33. Czynniki wpływające na skurcz betonu

Czynnik	Wpływ na zmiany skurczowe
Skurcz chemiczny	
Skład mineralny cementu, wysoka zawartość C_3A	
Wysoka powierzchnia właściwa cementu	
Duża wilgotność powierzchni betonu	
Skurcz plastyczny	
Odparowanie wody z powierzchni betonu	
Duża zawartość cementu	
Wyższy współczynnik wodno-cementowy (w/c)	
Skurcz autogeniczny	
Wzrost temperatury twardniejącego betonu	
Wysoka zawartość cementu	
Wysoka zawartość składników nieklinkierowych (żużel, popiół lotny) w cemencie	
Niższy współczynnik wodno-cementowy (w/c)	
Skurcz przy wysychaniu	
Duża zawartość cementu	
Wyższy współczynnik wodno-cementowy (w/c)	
Duży udział zaczynu cementowego w objętości betonu	
Wysoki moduł sprężystości betonu	



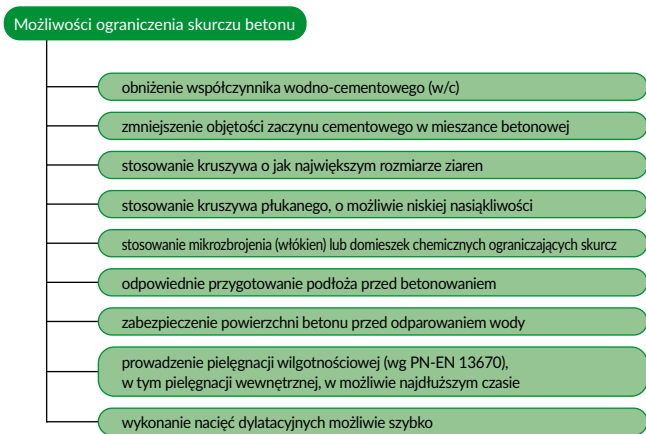
Rys. 5.86. Wpływ zawartości wody i cementu na skurcz betonu



Rys. 5.87. Wpływ współczynnika w/c i zawartości kruszywa na skurcz betonu

Beton jako kompozyt o porowatej strukturze jest w praktyce narażony na zjawisko skurczu niezależnie od stosowanych zabiegów technologicznych. Ze względu na mnogość zjawisk skurczowych, całkowite wyeliminowanie skurczu betonu nie jest możliwe, a jedynie ograniczenie jego skali (rys. 5.88). Do zestawu norm PN-EN 12390 dotyczących metod badań stwardniałego betonu wprowadzono w 2020r. normę PN-EN 12390-16 „Badania betonu - Część 16: Oznaczanie skurczu betonu”. W przywołanym dokumencie opisano procedurę oznaczania skurczu całkowitego betonowych próbek w warunkach wysychania.

Skurcz może prowadzić do powstania mikrospeków w strukturze stwardniałego betonu, a w skrajnych przypadkach do zarysowań/makrospeków, a nawet niechcianych szczelin dylatacyjnych. Największy wpływ na zmiany skurczowe betonu mają zmiany objętości twardniejącego zaczynu cementowego. W betonie skurcz zaczynu cementowego jest w dużym stopniu ograniczony zawartością kruszywa.

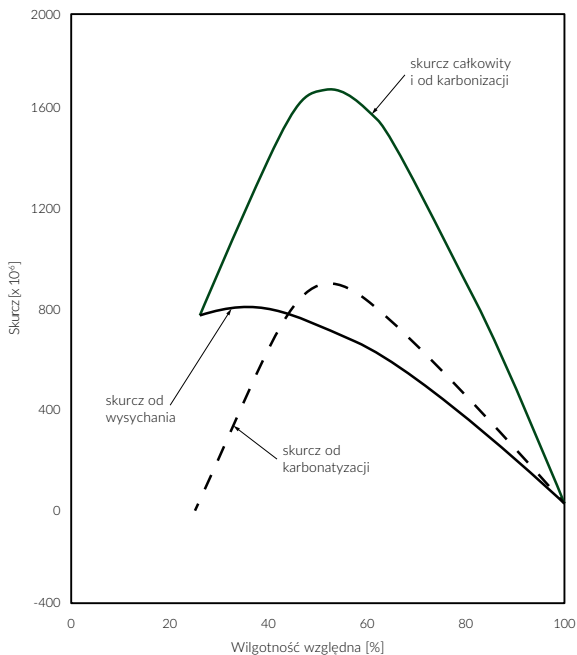


Rys. 5.88. Możliwości ograniczania skurczu betonu

Zmiany skurczowe w betonie zachodzą od momentu połączenia cementu z wodą przez cały okres eksploatacji betonu, szczególnie jeżeli beton jest narażony na zmienne warunki wilgotnościowe. Ze względu na środowisko pracy i cykl życia betonu największe znaczenie ma skurcz związany z osuszaniem, ponieważ ma wpływ na beton przez cały okres jego eksploatacji. Pozostałe zmiany skurczowe (skurcz chemiczny, plastyczny, autogeniczny) można znacząco ograniczyć poprzez właściwą pielęgnację wilgotnościową wg PN-EN 13670.

W literaturze można również znaleźć informacje o skurczu od karbonatyzacji, który ma miejsce, gdy beton wystawiony jest na działanie dwutlenku węgla. Skurcz od karbonatyzacji może być tak duży, jak skurcz spowodowany wysychaniem w temperaturze $20 \pm 1^\circ\text{C}$, przy 50% wilgotności względnej (rys. 5.89).

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o wielkości zmian skurczowych są warunki dojrzewania betonu, innymi słowy wilgotność względna otoczenia. W betonie dojrzewającym w wilgotności względnej wynoszącej 100 %, zjawisko skurczu nie występuje, natomiast można zaobserwować niewielkie pęcznienie. Zależność między skurczem betonu a wilgotnością otoczenia przedstawia rys. 5.89. Równie istotnym kryterium oceny zmian skurczowych jest czas, ponieważ szybkość skurczu znacząco maleje wraz z upływem czasu. W okresie początkowym, do 14 dni dojrzewania betonu, zachodzi 14÷34% skurczu całkowitego ocenionego po 20 latach, w ciągu 3 miesięcy 40÷80%, a w ciągu jednego roku 66÷85%.



Rys. 5.89. Zależność między wilgotnością względną otoczenia a skurczem betonu

ODPORNOŚĆ BETONU NA AGRESJĘ CHEMICZNĄ

W cyklu życia konstrukcje betonowe podlegają zużyciu nie tylko w efekcie użytkowania, ale także z tytułu korozyjnego oddziaływania otaczającego środowiska. Trwałość betonu należy definiować jako zdolność do spełnienia przez beton, z odpowiednimi współczynnikami bezpieczeństwa i przez odpowiedni okres, funkcji wyznaczanych projektem budowlanym. Norma PN-EN 206+A2:2021 zaleca, aby przewidywany czas użytkowania uwzględniający warunki eksploatacji wynosił co najmniej 50 lat.

Zrozumienie mechanizmów niszczenia betonu pozwala na odpowiedni dobór jego składników celem zapewnienia trwałości w danym środowisku (klasy ekspozycji wg normy PN-EN 206+A2:2021). Należy jednak zaznaczyć, że nie zawsze wysoka wytrzymałość daje gwarancję dużej trwałości. Najistotniejszym czynnikiem decydującym o trwałości jest struktura i mikrostruktura stwardniałego zaczynu oraz rodzaj (jakość) zastosowanego kruszywa.

Na korozję chemiczną betonu będzie miała wpływ struktura porów, która bezpośrednio wpływa na głębokość penetracji mediów agresywnych i wielkość podciągania kapilarnego. Beton jest kompozytem, który „broni się” przed działaniem środowiska poprzez niską przepuszczalność, a w sytuacji wniknięcia mediów agresywnych w strukturę charakteryzuje się buforującym działaniem składników stwardniałego zaczynu cementowego. Zasadowe środowisko betonu zapewnia stan pasywny stali zbrojeniowej. Decydujący wpływ na odporność betonu na agresję chemiczną mają wodorotlenek wapnia, uwodnione gliniany wapnia oraz uwodnione krzemiany wapnia (faza C-S-H).

Wyróżnia się dwa rodzaje korozji betonu, tj. wewnętrzną i zewnętrzną.

Przyczynę korozji wewnętrznej stanowią składniki betonu, głównie alkalia występujące w cemencie i innych składnikach betonu oraz zbyt duża zawartość siarczanu wapnia w spoiwie. Natomiast powodem występowania korozji zewnętrznej jest ekspozycja na działanie niekorzystnych czynników zewnętrznych, do których należy zaliczyć przede wszystkim roztwory siarczanów i chlorków, jak również CO_2 z powietrza oraz kwaśne deszcze.

Do najczęściej występujących zjawisk korozyjnych w betonie można zaliczyć:

- karbonatyzację,
- korozję chlorkową,
- korozję siarczanową,
- reakcję alkalia-kruszywa,
- korozję węglanową,
- korozję biologiczną.

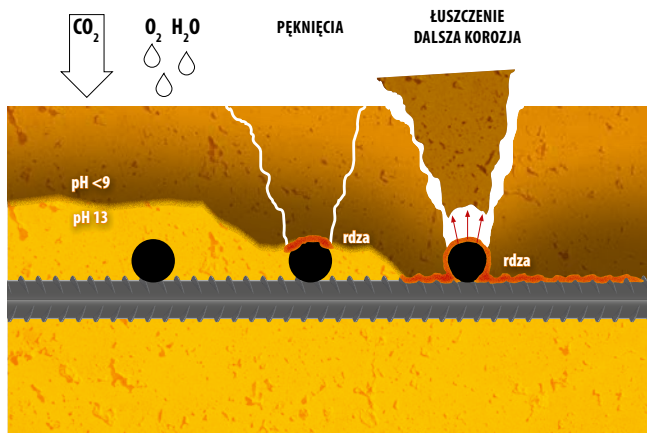
W pakiecie norm PN-EN 12390 opisującym metody badań stwardniałego betonu, stopniowo wprowadzane są również dokumenty podające metodykę oznaczania odporności betonu na różne czynniki korozyjne, tj.:

- PN-EN 12390-12 „Badania betonu - Część 12: Oznaczenie odporności betonu na karbonatyzację Przyspieszona metoda karbonatyzacji”,
- PN-EN 12390-11 „Badania betonu - Część 11: Oznaczenie odporności betonu na wnikanie chlorków w warunkach jednokierunkowej dyfuzji”,
- PN-EN 12390-18 „Badania betonu - Część 18: Oznaczenie współczynnika migracji chlorków”.

W celu ograniczenia oddziaływań substancji agresywnych należy stosować ochronę powierzchniową polegającą na izolacji konstrukcji od środowiska zewnętrznego lub/i ochronę materiałowo-strukturalną polegającą na właściwym doborze składników betonu oraz ukształtowaniu odpowiedniej mikrostruktury betonu (niskie w/c, stosowanie dodatków typu II).

KARBONATYZACJA

Karbonatyzacja jest procesem zachodzącym stopniowo od zewnętrznej strony konstrukcji betonowej, wystawionej na działanie dwutlenku węgla, który w wyniku reakcji z wodorotlenkiem wapnia tworzy CaCO_3 . Karbonatyzacja jest jedną z głównych przyczyn niszczenia betonu. Dwutlenek węgla reaguje z rozpuszczonymi w cieczy porowej betonu produktami hydratacji cementu, szczególnie z portlandytem Ca(OH)_2 . W wyniku tego tworzy się kalcyt CaCO_3 i woda (rys. 5.90). Reakcjom z CO_2 ulegają też inne hydraty, zwłaszcza gdy zabraknie portlandytu. Wpływ karbonatyzacji na trwałość betonu jest bardzo złożony. Sama reakcja powstawania CaCO_3 nie powoduje zniszczenia betonu. Mechanizm niszczenia konstrukcji betonowych w wyniku karbonatyzacji związany jest z obniżeniem pH cieczy porowej betonu z poziomu $12,6 \div 13,5$ do ok. 9 przez przereagowanie wodorotlenku wapnia i powstanie obojętnego węglanu wapnia (kalcytu). Po wyczerpaniu portlandytu Ca(OH)_2 pH cieczy porowej betonu spada do wartości 8,3. Negatywnym skutkiem karbonatyzacji jest depastywacja stali zbrojeniowej. Zachodzi ona, gdy głębokość karbonatyzacji osiągnie poziom prętów zbrojeniowych, a poziom wilgotności jest na tyle wysoki, że następuje szybka korozja stali zbrojeniowej (rys. 5.88). Rdza jako produkt korozji, charakteryzuje się większą objętością niż substraty reakcji, co skutkuje powstaniem pęknięć i rys w betonie. W wyniku dalszego postępu korozji może dojść do złuszczenia otuliny zbrojenia i całkowitego odstonięcia prętów zbrojeniowych.



Rys. 5.90. Mechanizm niszczenia betonu w wyniku karbonatyzacji

Przyjmuje się, że zarówno w warunkach całkowicie suchych, jak i przy pełnym nasyceniu wodą, karbonatyzacja jest bardzo ograniczona. W całkowicie suchym betonie przebieg procesu karbonatyzacji jest znacznie utrudniony, ponieważ pewna minimalna wilgotność jest konieczna do wstępnego rozpuszczenia wodorotlenku. W betonie nasyconym wodą, utrudniona jest z kolei dyfuzja dwutlenku węgla, co hamuje postęp karbonatyzacji. Karbonatyzacja przebiega najszybciej w warunkach przemienne wilgotno - suchych. Karbonatyzacja jest zjawiskiem bardzo groźnym dla trwałości betonu, zwłaszcza w połączeniu z innymi czynnikami korozyjnymi (innym rodzajem korozji, temperaturą i wilgotnością).

Mechanizm niszczenia konstrukcji żelbetowych spowodowany karbonatyzacją można podzielić na trzy etapy:

- I - zubożenie otuliny,
- II - uszkodzenie warstw ochronnych na powierzchni stali,
- III - pękanie otuliny i zmniejszenie przekroju stali zbrojeniowej.

Czynniki ograniczające karbonatyzację:

- stosowanie odpowiedniej ilości cementu w składzie betonu,
- zapewnienie możliwie niskiego współczynnika w/c (celem obniżenia poro-

watości), a tym samym ograniczenia możliwości wnikania CO₂ w strukturę stwardniałego zaczynu cementowego,

- właściwy dobór grubości otuliny zbrojenia (tabela 5.34),
- odpowiednia pielęgnacja betonowanego elementu (wydłużenie okresu pielęgnacji powierzchniowej betonu na mokro pozwala ograniczyć zasięg karbonatyzacji – głębokość wnikania CO₂),
- spełnienie wymagań normy PN-EN 206+A2:2021 dla klas ekspozycji dotyczących korozji spowodowanej karbonatyzacją (XC1, XC2, XC3, XC4) w zależności od warunków eksploatacji betonu.

Tabela 5.34. Minimalna grubość otuliny ze względu na trwałość stali zbrojeniowej

Klasa konstrukcji*	Klasa ekspozycji						
	X0	XC1	XC2/ XC3	XC4	XD1/ XS1	XD2/ XS2	XD3/ XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

*Zalecaną klasą konstrukcji (projektowy okres użytkowania 50 lat) jest S4, jeżeli klasa wytrzymałości betonu \geq C30/37 klasę należy podnieść o 1 (S5), w przypadku okresu użytkowania wydłużonego do 100lat klasę należy ponieść o 2 (S6)

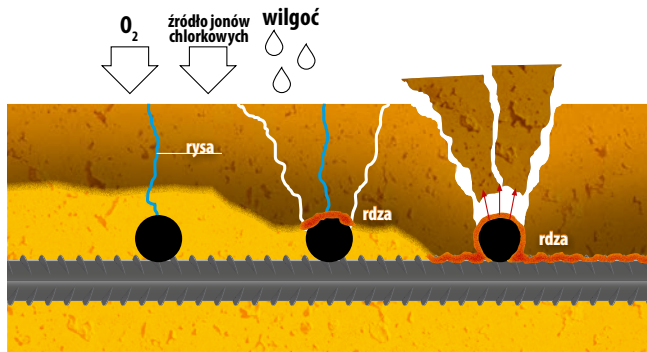
KOROZJA CHLORKOWA

Chlorki występują w betonie głównie w wyniku wprowadzenia do jego składu zanieczyszczonego kruszywa pochodzenia nadmorskiego lub stosowania wody morskiej, lub lekko zasolonej, np. z ujścia rzeki. Źródłem chlorków w mieszance może być również cement, jednak zawartość ta nie przekracza 0,1% masy (wymaganie normowe). Problem korozji spowodowany zawartością chlorków w betonie pojawia się wówczas, gdy jony chlorkowe wnikają w beton z zewnątrz. Może to być spowodowane działaniem m.in. wód kopalnianych, wody morskiej w konstrukcjach nabrzeżnych czy też stosowaniem środków odładowczych (rys. 5.91). Jedną z przyczyn, dla których jony chlorkowe są tak groźne dla zaczynu jest fakt, że matryca cementowa ma charakter silnie zasadowy, natomiast roztwory chlorkowe zazwyczaj wykazują odczyn kwasowy. Decydujące znaczenie dla agresji chlor-

kowej ma przepuszczalność betonu, gdyż proces korozyjny polega na migracji jonów Cl^- w głąb betonu i transporcie jonów OH^- z wnętrza do powierzchni betonu (szkodliwe działanie chlorków polega przede wszystkim na reakcji chemicznej jonów Cl^- z $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dyfuzji jonów OH^-). Jony chlorkowe, spośród wszystkich jonów, dyfundują najszybciej przez matrycę cementową, dlatego korozja betonu poddanego działaniu roztworu chlorków następuje stosunkowo szybko. W konsekwencji agresja chlorkowa prowadzi do obniżenia pH oraz ługowania wapnia z faz zaczynu cementowego. Głównym skutkiem agresji jonów chlorkowych jest korozja stali zbrojeniowej. Objętość produktów korozji stali jest do 10 razy większa niż objętość stali. Prowadzi to do powstawania naprężeń w betonie, w efekcie dochodzi do zarysowania, spękania i postępującego złuszczenia betonu (rys. 5.91). Wszystko to sprawia, że beton zwiększa swoją przepuszczalność. Minimalna korozja stali zachodzi w betonie suchym lub całkowicie zanurzonym w wodzie.

Czynniki ograniczające korozję chlorkową:

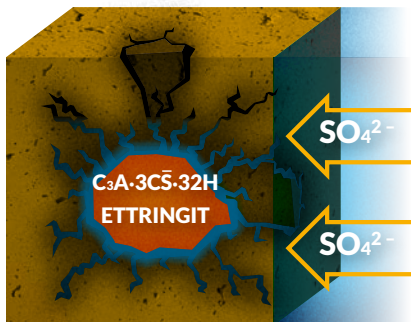
- projektowanie betonu o możliwie niskim współczynniku w/c w celu zwiększenia szczelności matrycy cementowej, a tym samym ograniczenia możliwości wnikania wody zawierającej chlorki,
- zastosowanie cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi (cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II, cement hutniczy CEM III, cement wieloskładnikowy CEM V), skutkujące znacznym ograniczeniem przepuszczalności betonu i zwiększeniem oporu właściwego, zmniejszając w ten sposób szybkość korozji,
- odpowiedni dobór grubości otuliny zbrojenia – im grubsza warstwa otuliny, tym dłuższy okres czasu musi upłynąć zanim proces korozyjny zostanie zainicjowany (koncentracja jonów chlorkowych przy powierzchni stali osiągnie wartość graniczną) – tabela 5.34,
- stosowanie mieszanek betonowych spełniających wymagania normy PN-EN 206+A2:2021 dla klas zawartości chloru w zależności od zastosowania betonu (beton niezbrojony, żelbet),
- stosowanie mieszanek betonowych spełniających wymagania normy PN-EN 206+A2:2021 dla klas ekspozycji dotyczących agresji spowodowanej chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej (XD1, XD2, XD3) lub/i agresji spowodowanych chlorkami z wody morskiej (XS1, XS2, XS3) w zależności od warunków wilgotnościowych.



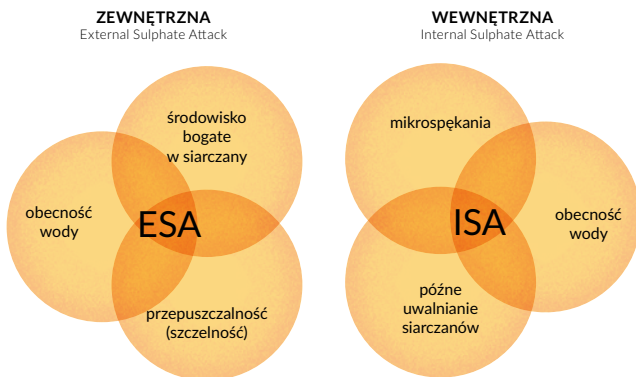
Rys. 5.91. Schematy powstawania zniszczeń spowodowanych przez korozję chlorkową

KOROZJA SIARCZANOWA

Korozja siarczanowa występuje najczęściej w konstrukcjach narażonych na działanie wód gruntowych, ścieków lub wody morskiej. Siarczany w wodzie gruntowej zazwyczaj są pochodzenia naturalnego, ale ich źródłem mogą być również nawozy sztuczne i ścieki przemysłowe. Natomiast w wodzie morskiej jonom siarczanowym towarzyszą duże ilości jonów chlorkowych, sodowych i magnezowych, co potęguje jej niszczące oddziaływanie na beton. Sole siarki w stanie stałym nie są zagrożeniem dla betonu, jednak w sytuacji, gdy pojawiają się w roztworze, mogą reagować ze składnikami zhydratyzowanego zaczynu cementowego. Czynnikiem niszczącym jest anion siarczanowy SO_4^{2-} , natomiast składnikami atakowanymi w zaczynie cementowym są wodorotlenek wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ przechodzący podczas krystalizacji w gips oraz glinian trójwapniowy C_3A przechodzący w ettringit (rys. 5.92). Początkowo powstające kryształy gipsu i ettringitu uszczelniają beton i podnoszą jego wytrzymałość na ściskanie. Po przekroczeniu granicy uszczelniania struktury prowadzą do rozsądzenia i zniszczenia stwardniałego betonu. Ten typ korozji mogą powodować w zasadzie wszystkie sole mineralne, jeżeli warunki eksploatacji sprzyjają krystalizacji soli w porach betonu (np. podsiąkanie kapilarne wody zawierającej rozpuszczone siarczany, połączone z obsychaniem). Warto zwrócić uwagę, że krystalizacji ettringitu towarzyszy zwiększenie objętości fazy stałej o około 168%, podczas gdy, dla porównania, krystalizacja wody w postaci lodu powoduje zwiększenie objętości zaledwie o 10%.



Rys. 5.92. Niszczenie betonu spowodowane powstaniem ekspansywnego ettringitu



Rys. 5.93. Rodzaje i przyczyny korozji siarczanowej

Wyróżnia się dwa rodzaje ataku siarczanowego na beton: wewnętrzny i zewnętrzny (rys. 5.93). Pierwszy przypadek zachodzi w betonach, do których wraz z cementem wprowadzono nadmierną ilość siarczanów (głównie w wyniku zbyt dużej, nienormowej zawartości gipsu w cemencie) i/lub poddawanych obróbce termicznej w temperaturze wyższej niż 60°C. Drugi przypadek odpowiada sytuacji, w której beton poddawany jest działaniu roztworów soli

siarczanowych. W tym przypadku jony siarczanowe reagują z matrycą cementową, a zwłaszcza z portlandytem $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Agresja siarczanowa jest jedną z najgroźniejszych korozji występujących w trakcie cyklu życia konstrukcji betonowej. Do skutków fizycznych agresji siarczanowej należy zaliczyć ekspansję, spękania, łuszczenie czy spadek wytrzymałości, a w przypadku silnej korozji może dojść nawet do całkowitej destrukcji betonu (elementu konstrukcji). Szybkość zniszczenia matrycy cementowej zależy w pierwszej kolejności od przepuszczalności betonu i szybkości dyfuzji jonów w betonie.

Czynniki ograniczające agresję siarczanową:

- wysoka szczelność betonu (niskie w/c, stosowanie dodatków typu II),
- stosowanie cementu odpornego na siarczany (SR wg normy PN-EN 197-1 lub HSR wg normy PN-B-19707),
- stosowanie mieszanek betonowych spełniających wymagania normy PN-EN 206+A2:2021 dla klas ekspozycji dotyczących agresji chemicznej XA w zależności od stopnia agresywności środowiska.

KOROZJA ALKALICZNA

Reakcja zachodząca pomiędzy jonami Na^+ , K^+ i OH^- obecnymi w cieczy porowej betonu z niektórymi składnikami kruszywa nazywana reakcją alkalia-kruszywo AAR (z ang. Alkali-Aggregate Reaction), może być przyczyną korozji betonu. Zewnętrzными objawami szkodliwej reakcji zwykle jest nadmierna ekspansja elementów konstrukcji, pojawienie się odspojień warstwy wierzchniej, odprysków ziaren kruszywa podatnego na reakcję, przebarwień, wykwitów, wysięki żelu oraz powstanie rys o dużej rozwarłości. Może objawiać się także w postaci sieci spękań lub spękań przebiegających promieniowo. Widoczne symptomy korozji alkalicznej w konstrukcji betonowej mogą pojawić się po kilku lub po wielu latach eksploatacji. Powstałe uszkodzenia zwykle powiększają się z czasem często prowadząc do utraty parametrów technicznych konstrukcji, zwłaszcza kiedy wystąpią jednocześnie z innymi mechanizmami korozyjnymi. Sprzężenia istniejące pomiędzy oddziaływaniami mechanicznymi, fizycznymi i chemicznymi, na jakie narażony jest betonu w konstrukcji, mogą doprowadzić do wzmagania postępu reakcji AAR.

Przebieg reakcji korozyjnej i jej skutki zależne są od szeregu parametrów, m.in. rodzaju i zawartości kruszywa podatnego na reakcję alkaliczną, zawartości jonów sodu, potasu i wapnia w cieczy porowej oraz warunków wilgotności i temperatury. Innymi czynnikami są zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w betonie, uziarnienie kruszywa, porowatość betonu, zawartość cementu i współczynnik w/c. Głównym źródłem jonów

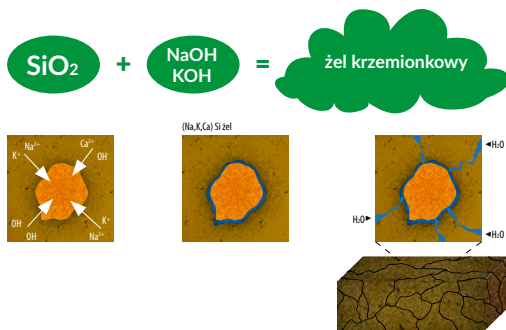
sodu i potasu w betonie jest cement, ponadto alkalia mogą pochodzić również z domieszek chemicznych, dodatków, kruszywa, wody zarobowej oraz być wprowadzane z zewnątrz wraz ze środkami odladzającymi.

Spośród znanych przyczyn destrukcji betonu, wynikających z oddziaływań między reaktywnymi składnikami kruszyw i alkaliów w praktyce najczęściej spotyka się:

- reakcję alkalia-krzemionka, ASR (z ang. Alkali-Silica Reaction) jest to reakcja alkaliów z kruszywami bogatymi w reaktywną krzemionkę (opal, chalcedon, trydymit, kwarc w stanie naprężeń, szkło wulkaniczne itd.),
- reakcję alkalia-węglany, ACR (z ang. Alkali-Carbonate Reaction) przebiega pomiędzy alkaliami oraz niektórymi kruszywami węglanowymi, w szczególności wapniem dolomitycznym i dolomitem wapnistym.

KOROZJA ALKALIA-KRZEMIONKA, ASR

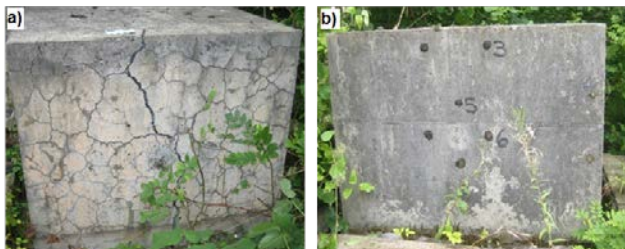
Mechanizm korozji alkalia-krzemionka wywołuje reakcja pomiędzy jonami Na^+ , K^+ i OH^- obecnymi w cieczy porowej a reaktywnymi formami krzemionki o zwiększonej rozpuszczalności tj. amorficznymi, nieuporządkowanymi lub słabo wykryształizowanymi postaciami SiO_2 . W wyniku tej reakcji w betonie powstaje żel krzemianu sodowo-potasowo-wapniowego o zmiennym składzie. Powstały produkt reakcji wykazuje tendencję do absorpcji wody w wyniku czego zwiększa się jego objętość, co wywołuje powstanie naprężeń wewnętrznych w betonie, pękanie ziaren kruszywa i otaczającej matrycy cementowej (rys. 5.94).



Rys. 5.94. Mechanizm reakcji alkalia – reaktywna krzemionka ze składu kruszywa

Wyeliminowanie lub ograniczenie skutków szkodliwej reakcji ASR, wymaga podjęcia określonych środków zapobiegawczych:

- dobór kruszywa niereaktywnego lub ograniczenie stosowania kruszyw reaktywnych,
- wykluczenie kruszyw silnie i bardzo silnie reaktywnych z zastosowań w betonie o dużej odpowiedzialności,
- ograniczenie alkaliów w składnikach betonu: stosowanie cementów o niskiej zawartości alkaliów i/lub stosowanie dodatków mineralnych, m.in. popiołu lotnego krzemionkowego (rys. 5.95) lub granulowanego żużla wielkopiecowego wprowadzanych z cementem lub jako dodatek typu II (zmniejszają przepuszczalność stwardniałego betonu oraz wiążą pewną ilość alkaliów w reakcji pucolanowej).



Rys. 5.95. Reakcja ASR, a) przykład destrukcji betonu zwykłego, b) beton z dodatkiem popiołu lotnego

KOROZJA ALKALIA-WĘGLANY, ACR

Reakcja alkalia-węglany występuje znacznie rzadziej niż reakcja alkalia-krzemionka. Mechanizm reakcji odpowiedzialnej za ekspansję w przypadku kruszyw węglanowych nie został jednoznacznie ustalony. Doniesienia o wystąpieniu ekspansji betonu wskutek tej reakcji pochodzą głównie z Ameryki Północnej i Chin, ale zaleca się tego powodu ostrożność przy stosowaniu krajowych kruszyw węglanowych i żwirowych zawierających węglany. Korozję ACR tłumaczy się następującymi hipotezami:

- reakcja reaktywnej (trudno wykrywalnej) formy krzemionki,
- reakcja dedolomityzacji kruszywa, z wytrąceniem brucytu i kalcytu,
- adsorpcja wody przez minerały ilaste odsłaniane w wyniku dedolomityzacji i rozluźniania tekstury kruszywa, powodująca pęcznienie i generowanie naprężenia w kruszywie i betonie,

- reakcja, w której jony Na^+ , K^+ i OH^- dyfundują do wnętrza kruszywa i powodują wzrost ciśnienia w ograniczonej przestrzeni ziarna kruszywa, a w konsekwencji jego pękanie i ekspansję betonu.

Reakcję alkalia-węglany od reakcji alkalia-krzemionka odróżnia krótszy czas występowania negatywnych efektów reakcji, wymagana jest bardzo niska całkowita zawartość alkaliów w składnikach ($1,8 \text{ kg/m}^3$). W przypadku tego typu reakcji również nieskuteczne są typowe dodatki mineralne: popiół lotny krzemionkowy lub granulowany żużel wielkopiecowy. Z uwagi na to, wyklucza się stosowanie kruszyw podatnych na ten rodzaj reakcji z alkaliami do wykonawstwa nawierzchni betonowych i drogowych obiektów inżynierskich z powodu nieefektywności środków zapobiegawczych oraz postępu reakcji pomimo radykalnego ograniczenia alkaliów w betonie.

5.1.5. Specyfikacja betonu

Specyfikacja przekazywana producentowi betonu, zgodnie z założeniami normy PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265, powinna zawierać wszystkie istotne wymagania dotyczące właściwości betonu oraz warunków jego transportu, zabudowy, pielęgnacji oraz dalszych zabiegów. W tym ujęciu specyfikujący jest zobowiązany uwzględnić:

- przeznaczenie mieszanki betonowej i betonu stwardniałego,
- warunki pielęgnacji,
- wymiary konstrukcji (wydzielanie ciepła),
- oddziaływanie środowiska, w którym konstrukcja będzie eksploatowana,
- projektowy okres użytkowania,
- wymagania dotyczące wykończenia powierzchni betonu,
- wszelkie wymagania, które mają wpływ na wyspecyfikowane wartości uziarnienia kruszywa,
- wszelkie ograniczenia dotyczące stosowania składników o ustalonej przydatności, np. wynikające z klas ekspozycji.

W oparciu o wymienione założenia ogólne zamawiany beton powinien być wyspecyfikowany jako beton projektowany (o określonych właściwościach – rys. 5.96) lub beton recepturowy (o określonym składzie – rys. 5.96).

Beton

projektowany	recepturowy
<p>Wymagane właściwości i dodatkowe cechy są podawane producentowi odpowiedzialnemu za dostarczenie betonu</p>	<p>Skład i materiały składowe, jakie mają być użyte są podane producentowi odpowiedzialnemu za dostarczenie betonu</p>
<ul style="list-style-type: none">■ właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego■ sposobu zabudowy mieszanki■ wielkości elementu■ częstotliwości dostaw■ sposobów pielęgnacji betonu	<ul style="list-style-type: none">■ skład jakościowy mieszanki betonowej■ skład ilościowy mieszanki betonowej
<ul style="list-style-type: none">■ wymaganie zgodności z PN-EN 206■ klasę wytrzymałości na ściskanie (klasę betonu) np. C 25/30■ klasy ekspozycji betonu (środowisko eksploatacji) np. XA1■ maksymalny, nominalny górny wymiar kruszywa np. D_{max}=16 mm■ klasę konsystencji np. S3 lub jej założoną wartość wg zdefiniowanej metody np. opad stożka 120 mm■ klasę zawartości chlorków, np. Cl 0,40■ ewentualnie klasę gęstości lub jej założoną wartość dla betonu lekkiego lub ciężkiego■ specjalny rodzaj lub klasa cementu (np. cement o niskim ciepłe hydratacji LH)	<ul style="list-style-type: none">■ wymaganie zgodności z PN-EN 206■ rodzaj i klasa cementu np. CEM II/B-S 32,5 R■ zawartość cementu, np. 330 kg■ współczynnik w/c lub klasa konsystencji, np. w/c= 0,45 lub S3■ wymagania jakościowe dotyczące kruszywa■ zawartość poszczególnych frakcji kruszywa w mieszance betonowej■ typ, ilość i pochodzenie domieszek chemicznych■ rodzaj i ilość dodatku mineralnego
<ul style="list-style-type: none">■ specjalny rodzaj lub klasa kruszywa■ zawartość powietrza■ temperatura mieszanki betonowej■ rozwój wytrzymałości betonu■ wydzielanie ciepła hydratacji■ opóźnienie wiązania■ wodoszczelność■ wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu■ inne wymagania techniczne (dotyczące osiągnięcia wymaganego wykończenia) np. architektoniczny	<ul style="list-style-type: none">■ pochodzenie niektórych lub wszystkich składników betonu■ dodatkowe wymagania dla kruszywa■ wytyczne dotyczące kolejności dozowania składników, sposobu i czasu mieszania■ wymaganej temperatury mieszanki betonowej, gdy jest ona różna od ogólnie zalecanej■ inne wymagania techniczne
	<p>Producent betonu nie jest odpowiedzialny za uzyskane właściwości betonu recepturowego.</p>

Rys. 5.96. Specyfikacja betonu projektowanego i recepturowego

5.1.6. Dostawa mieszanki betonowej

Wykonawca powinien uzgodnić z producentem:

- datę, godzinę i wielkość dostawy, oraz jeżeli to właściwe, poinformować producenta o:
 - specjalnym transporcie na budowie,
 - specjalnych metodach układania,
 - ograniczeniach dotyczących pojazdu dostawczego, np. o jego rodzaju (urządzenie mieszające, niemieszające), wielkości, wysokości lub masie brutto.

UWAGA!

Jeżeli dostawca z odbiorcą nie uzgodnią inaczej, to betoniarki samochodowe należy całkowicie rozładować w czasie nie dłuższym niż 90 min, licząc od chwili pierwszego kontaktu wody z cementem w ramach produkcji danego zarobu/ładunku.

Na życzenie wykonawcy producent powinien przekazać następujące informacje dotyczące betonu projektowanego:

- rodzaj i klasę wytrzymałości cementu oraz rodzaj kruszywa,
- rodzaj domieszek, rodzaj dodatków, jeśli są stosowane,
- opis włókien zgodnie z PN-EN 14889-1 lub PN-EN 14889-2 oraz ich zawartość, jeśli jest wyspecyfikowana, za pomocą klasy właściwości użytkowych betonu zbrojonego włóknami,
- założony współczynnik woda/cement,
- wyniki istotnych wcześniejszych badań betonu, np. z kontroli produkcji lub kontroli zgodności lub z badań wstępnych,
- rozwój wytrzymałości,
- pochodzenie składników,
- wartość deklarowana najgrubszej frakcji kruszywa.

Pielęgnacja młodego betonu ma na celu osiągnięcie projektowanych właściwości stwardniałego betonu. Odpowiedni dobór metod i czasu pielęgnacji zależy od warunków klimatycznych i rozwoju wytrzymałości betonu. Przy określaniu czasu pielęgnacji, informacje o rozwoju wytrzymałości betonu mogą być podane według tabeli 5.35, lub w postaci krzywej rozwoju wytrzymałości betonu w temperaturze 20°C między 2 a 28 dniem dojrzewania. Współczynnik wytrzymałości, charakteryzujący rozwój wytrzymałości, jest stosunkiem średniej wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania ($f_{cm,2}$) do średniej wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania ($f_{cm,28}$), określonym

na podstawie badań wstępnych lub znanych właściwości użytkowych betonu o porównywalnym składzie.

Tabela 5.35. Rozwój wytrzymałości betonu w 20°C

Rozwój wytrzymałości	Współczynnik wytrzymałości $r = f_{cm,2}/f_{cm,28}$
Szybki	$\geq 0,5$
Umiarkowany	$\geq 0,3$ do $< 0,5$
Wolny	$\geq 0,15$ do $< 0,3$
Bardzo wolny	$< 0,15$

DOWÓD DOSTAWY BETONU TOWAROWEGO

Norma PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 określa szczegółowe wymagania w zakresie dokumentacji dostawy mieszanki betonowej. Do obowiązku producenta należy dostarczenie odbiorcy dowodu dostawy, dołączonego do każdego ładunku mieszanki betonowej. Dokument ten powinien zawierać następujące pozycje:

- nazwa wytwórni betonu towarowego,
- numer dowodu dostawy,
- datę i godzinę załadunku,
- numer ciężarówki lub oznaczenie pojazdu,
- dane nabywcy,
- nazwę i lokalizację miejsca dostawy,
- szczegóły specyfikacji, np. numer przepisu, numer zamówienia,
- ilość mieszanki betonowej [m³],
- deklarację zgodności z powołaniem na specyfikację oraz normę PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265,
- nazwę lub oznaczenie jednostki certyfikującej (jeśli dotyczy),
- godzinę dostawy betonu na miejsce, rozpoczęcia rozładunku i zakończenia rozładunku.

Dowód dostawy powinien dodatkowo zawierać:

- dla betonu projektowanego:
 - klasę wytrzymałości na ściskanie wraz z podaniem terminu badania,
 - klasę ekspozycji,
 - maksymalny górny wymiar ziaren kruszywa,

- klasę zawartości chlorków,
- klasę konsystencji lub jej wartość założoną,
- wartości graniczne składu betonu, jeśli są wyspecyfikowane,
- rodzaj i klasę wytrzymałości cementu, jeśli są wyspecyfikowane,
- rodzaj domieszki i rodzaj dodatku, jeśli są wyspecyfikowane,
- rodzaj i zawartość włókien lub klasę właściwości użytkowych betonu zbrojonego włóknami, jeśli są wyspecyfikowane,
- właściwości specjalne, jeśli są wymagane,
- maksymalny wymiar ziaren kruszywa D_{max} ,

w przypadku betonu lekkiego lub ciężkiego: klasę gęstości lub założoną gęstość:

- dla betonu recepturowego:
 - szczegóły dotyczące składu, np. zawartość cementu, rodzaj domieszki,
 - założony współczynnik w/c lub konsystencja wyrażona jako klasa lub wartość założona, jeżeli są wyspecyfikowane,
 - maksymalny wymiar ziaren kruszywa D_{max} ,
 - rodzaj i zawartość włókien, jeśli są wyspecyfikowane.

ZMIANY SKŁADU MIESZANKI BETONOWEJ PO ZASADNICZYM PROCESIE MIESZANIA, A PRZED ROZŁADUNKIEM

W ogólnym przypadku nie dopuszcza się zmian proporcji mieszanki po zasadniczym procesie mieszania. Jednak w szczególnych przypadkach domieszki, pigmenty, włókna lub wodę można dodać:

- na odpowiedzialność producenta,
- jeśli konsystencja i wartości graniczne będą odpowiadały wyspecyfikowanym wartościom,
- jeśli w ramach zakładowej kontroli produkcji istnieje udokumentowana procedura gwarantująca bezpieczną realizację takiego procesu.

Ponadto, w przypadku dodawania wody, kontrolę zgodności należy przeprowadzić na próbkach pobranych z mieszanki betonowej po tej modyfikacji. W każdym przypadku na dowodzie dostawy należy zapisać dodaną do betoniarki samochodowej ilość wody, domieszek, pigmentów lub włókien (jeśli wyspecyfikowano zawartość włókien).

5.1.7. Kontrola i kryteria zgodności betonu zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265

PLAN POBIERANIA I BADANIA PRÓBEK

Próbki mieszanki betonowej należy pobierać zgodnie z EN 12350-1, w sposób losowy, z betonów o ustalonych składach (recepturach) lub z każdej rodziny betonów produkowanych w warunkach uznanych za jednorodne. Minimalną częstotliwość pobierania i badania próbek betonu należy przyjąć zgodnie z tabelą 5.37, przyjmując tę wartość, która daje największą liczbę próbek w odniesieniu do rozważanej produkcji, początkowej lub ciągłej.

Niezależnie od wymagań dotyczących pobierania próbek, próbki należy pobierać po każdym dodaniu, na odpowiedzialność producenta, wody lub domieszek do betonu. Natomiast dopuszcza się pobieranie próbek przed dodaniem domieszki uplastyczniającej lub upłynniającej w celu modyfikacji konsystencji, w przypadku potwierdzenia w badaniach wstępnych, że domieszka w stosowanych ilościach nie wywiera negatywnego wpływu na wytrzymałość betonu.

Wynikiem badania powinien być wynik uzyskany z pojedynczej próbki do badania lub stanowiącej średnią z wyników co najmniej dwóch próbek do badania wykonanych z tej samej próbki mieszanki i badanych w tym samym wieku. Jeżeli co najmniej dwie próbki do badania są wykonane z jednej próbki, a zbadane wartości różnią się więcej niż o 15 % od średniej, wówczas wyniki te należy pominąć, chyba że analiza danego przypadku wykaże racjonalny powód, uzasadniający odrzucenie pojedynczego wyniku badania.

KONTROLA I KRYTERIA ZGODNOŚCI BETONU PROJEKTOWANEGO

Pobieranie i badanie próbek w ramach kontroli zgodności betonu (producent betonu)

Kontrola zgodności obejmuje ogół działań i decyzji podejmowanych według zasad przyjętych przed sprawdzeniem zgodności betonu z jego specyfikacją. Jednym z etapów kontroli zgodności betonu towarowego jest kontrola i ocena wyspecyfikowanych właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu. W celu usystematyzowania częstotliwości oraz ilości pobieranych prób do badań w normie PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 zdefiniowano minimalną częstotliwość poboru prób do badań w ramach oceny zgodności. Należy podkreślić, że wytyczne te dotyczą wyłącznie producenta betonu, a częstotliwość kontroli prowadzonej przez odbiorcę podlega innym zasadom i powinna być zgodna z wytycznymi dotyczącymi badań identyczności.

Przy poborze prób rozróżniamy dwa rodzaje produkcji:

- **początkową** – obejmuje produkcję do momentu otrzymania co najmniej 35 wyników badań,
- **ciągłą** – osiąga się, gdy uzyska się co najmniej 35 wyników badań w okresie nie przekraczającym 12 miesięcy.

W przypadku, gdy produkcja betonu o odrębnym składzie lub rodziny betonów, została wstrzymana na dłużej niż 12 miesięcy, producent powinien przyjąć kryteria, plan pobierania i badania próbek przewidziane dla produkcji początkowej. Próbki mieszanki betonowej należy wybierać losowo i pobierać zgodnie z PN-EN 12350-1. Minimalna częstotliwość pobierania i badania próbek betonu powinna być zgodna z tabelą 5.36. Należy przyjmować wartość, zapewniającą największą liczbę próbek w odniesieniu do rozważanej produkcji, początkowej lub ciągłej.

Niezależnie od wymagań dotyczących pobierania próbek, próbki należy pobierać po każdym dodaniu, na odpowiedzialność producenta, wody lub domieszek do mieszanki betonowej. Natomiast dopuszcza się pobieranie próbek przed dodaniem domieszki uplastyczniającej lub upłynniającej w celu modyfikacji konsystencji, w przypadku potwierdzenia w badaniach wstępnych, że domieszka w stosowanych ilościach nie wywiera negatywnego wpływu na wytrzymałość betonu.

Tabela 5. 36. Minimalna częstotliwość pobierania próbek do oceny zgodności

Produkcja	Minimalna częstotliwość pobierania próbek		
	Pierwsze 50 m ³ produkcji	Po pierwszych 50 m ³ produkcji ^{a)} , największa częstotliwość z podanych:	
		Beton z certyfikatem kontroli produkcji	Beton bez certyfikatu kontroli produkcji
Początkowa (do momentu uzyskania co najmniej 35 wyników badań)	3 próbki	1 na 200 m ³ lub 1 na 3 dni produkcji ^{d)}	1 na 150 m ³ lub 1 na dzień produkcji ^{d)}
Ciągła ^{b)} (po uzyskaniu co najmniej 35 wyników badań)	---	1 na 400 m ³ lub 1 na 5 dni produkcji ^{c), d)} lub 1 na miesiąc kalendarzowy	

a) Pobieranie próbek powinno być rozłożone w czasie produkcji i nie zaleca się pobierania więcej niż 1 próbki z każdego 25 m³ mieszanki.
b) W przypadku gdy odchylenie standardowe ostatnich 15 lub więcej wyników badania przekracza górne granice s_w wg tabeli. 5.38, częstotliwość pobierania próbek należy zwiększyć do częstotliwości wymaganej w przypadku produkcji początkowej, do uzyskania następujących 35 wyników badań.
c) Lub raz na tydzień kalendarzowy, gdy na 7 kolejnych dni kalendarzowych przypada więcej niż 5 dni produkcji.
d) Dzień kalendarzowy, w którym wyprodukowano co najmniej 25 m³ betonu przynależnego do rodziny betonu i/lub betonu projektowanego spoza rodziny. W przypadku, gdy produkcja w ciągu pojedynczego dnia kalendarzowego jest mniejsza niż 25 m³ – dniem produkcji jest:
– okres, w którym wyprodukowano łączną ilość 25 m³ betonu przynależnego do rodziny betonu i/lub betonu projektowanego spoza niej, licząc od ostatniego „dnia produkcji” lub od rozpoczęcia produkcji,
– w przypadku, gdy całkowita produkcja w okresie 30 dni wyniosła mniej niż 25 m³ – dzień kalendarzowy, w którym ta rodzina betonu lub beton projektowany będzie ponownie produkowany

Kryteria zgodności dotyczące wytrzymałości na ściskanie

Zgodność wytrzymałości na ściskanie ocenia się na próbkach badanych po 28 dniach dojrzewania. Jeśli wytrzymałość jest wyspecyfikowana w odniesieniu do innego wieku, zgodność ocenia się na próbkach badanych w wieku określonym w specyfikacji. Każdy pojedynczy wynik badania f_{ci} , powinien spełniać warunek: $f_{ci} \geq (f_{ck} - 4) \text{ N/mm}^2$.

Uzyskanie wyspecyfikowanej wytrzymałości charakterystycznej, dotyczącej wyników średnich, należy ocenić jedną z poniższych metod:

- **metoda A – produkcja początkowa:** w przypadku produkcji początkowej, średnia wytrzymałość nienakładających się lub nakładających się zbiorów trzech kolejnych wyników badań f_{cm} ,
- **metoda B – produkcja ciągła:** może być stosowana, gdy warunki produkcji ciągłej są ustalone. W przypadku produkcji ciągłej, średnia wytrzymałość nienakładających się lub nakładających się zbiorów kolejnych wyników uzyskanych na pojedynczym betonie lub rodzinie betonów w okresie oceny badania,
- **metoda C – stosowanie kart kontrolnych:** polegająca na stosowaniu kart kontrolnych, może być alternatywnie stosowana do oceny zgodności, jeśli warunki produkcji ciągłej są ustalone, a produkcja betonu objęta jest certyfikacją strony trzeciej.

Zgodność jest potwierdzona, jeśli kryteria podane w tabeli 5.37 dla produkcji początkowej lub ciągłej (metoda A lub B) są spełnione.

Tabela 5.37. Kryteria zgodności dotyczące wytrzymałości na ściskanie

Produkcja	Liczba „n” wyników badań wytrzymałości na ściskanie w zbiorze	Średnia z „n” wyników (f_{cm}) [N/mm ²]	Dowolny pojedynczy wynik badania (f_{ci}) [N/mm ²]
Początkowa	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Ciągła	≥ 15	$\geq f_{ck} + 1,48\sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie
 f_{cm} – średnia z „n” wyników badania wytrzymałości
 f_{ci} – pojedynczy wynik badania wytrzymałości w danej serii
 σ – odchylenie standardowe

Pod koniec produkcji początkowej należy oszacować odchylenie standardowe (σ) populacji na podstawie co najmniej 35 kolejnych wyników badań uzyskanych w okresie nieprzekraczającym trzech miesięcy. Gdy rozpoczyna się produkcję

ciągłą, wartość odchylenia standardowego należy stosować do sprawdzenia zgodności w okresie pierwszej oceny. Pod koniec pierwszego i następnych okresów oceny sprawdza się, stosując ograniczenia podane w tabeli 5.38 czy odchylenie standardowe znacząco się zmieniło. W przypadku znaczącej zmiany odchylenia standardowego, na podstawie ostatnich 35 kolejnych wyników oblicza się nową wartość odchylenia standardowego i stosuje się ją w następnym okresie oceny.

Tabela 5.38. Wartości do weryfikacji odchylenia standardowego

Liczba wyników badań	Granice s_n
15 do 19	$0,63 \sigma \leq s_n \leq 1,37 \sigma$
20 do 24	$0,68 \sigma \leq s_n \leq 1,31 \sigma$
25 do 29	$0,72 \sigma \leq s_n \leq 1,28 \sigma$
30 do 34	$0,74 \sigma \leq s_n \leq 1,26 \sigma$
35 ^{a)}	$0,76 \sigma \leq s_n \leq 1,24 \sigma$

a) W przypadku liczby wyników badań większej niż 35, stosuje się wzór: $\sqrt{\frac{\chi^2_{0,025;n-1}}{(n-1)}} \sigma \leq s_n \leq \sqrt{\frac{\chi^2_{0,975;n-1}}{(n-1)}} \sigma$.

Stosowanie kart kontrolnych – metoda C

Metoda C może być alternatywnie stosowana do oceny zgodności, jeśli warunki produkcji ciągłej są ustalone, a produkcja objęta jest certyfikacją strony trzeciej (rys. 5.97). Metoda kontroli powinna obejmować stosowanie rozpoznanego modelu kart kontrolnych i posiadać następujące cechy:

- osiągać maksymalną średnią jakość po kontroli (AOQ) $\leq 5,0 \%$;
- dążyć do zapewnienia zgodności danej produkcji z wymaganą wytrzymałością charakterystyczną;
- obejmować systematyczną kontrolą wytrzymałość i odchylenie standardowe lub odchyłki od wartości założonych;
- w stosownych przypadkach, uwzględniać jedną lub więcej procedur przyspieszenia reakcji systemu, np. stosowanie danych o wczesnej wytrzymałości, stosowanie rodzin betonów;
- określać i stosować jednoznaczne zasady podejmowania decyzji dotyczących zgodności i granicznych wartości ostrzegawczych;
- jeżeli karta kontroli wskaże, że odchylenie standardowe $s_n \geq 0,5N/mm^2$ od aktualnie stosowanej wartości, zmienić stosowaną wartość.

Metoda C

Metoda sum skumulowanych (CUSUM)

- szacowanie wytrzymałości 28-dniowej na podstawie badania wcześniejszej wytrzymałości
- założona wytrzymałość średnia ustalona jest na poziomie
$$f_c \geq f_{ck} + 1,96 \sigma$$
- minimalne odchylenie standardowe
$$\sigma \geq 3,0 \text{ N/mm}^2$$
- zgodność ocenia się na podstawie co najmniej 35 wyników badań
$$n \geq 35$$

Karty Shewharta (zmodyfikowane granice)

- stosowana w celu oceny, czy wytrzymałość charakterystyczna betonu jest niższa niż wartość wymagana
- minimalne odchylenie standardowe
$$\sigma \geq 3,0 \text{ N/mm}^2$$
- niezgodność orzeka się, gdy średnia z wyników wytrzymałości jest niższa niż linia dolna L1
$$L1 \geq f_{ck} + q_n \sigma$$
- liczba próbek $15 \leq n \leq 35$
- q_n współczynnik zależny od ilości próbek n oraz wybranej wartości granicy średniej jakości po kontroli ($\leq 5,0\%$)

Rys. 5.97. Metoda C modele kart kontrolnych

Kryteria zgodności dotyczące wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Gdy wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu jest wyspecyfikowana, ocenę zgodności należy przeprowadzić na podstawie wyników badań uzyskanych w okresie oceny zgodności, który nie powinien przekraczać okresu określonego przez jeden z poniższych przypadków, w zależności od częstotliwości badania:

- w przypadku zakładów stosujących mniejszą częstotliwość badań (liczba wyników badań betonu projektowanego mniejsza niż 35 na trzy miesiące), okres oceny powinien obejmować co najmniej 15 wyników i nie więcej niż 35 kolejnych wyników uzyskanych w okresie nie przekraczającym 6 miesięcy,
- w przypadku zakładów stosujących większą częstotliwość badań (liczba wyników badań betonu projektowanego co najmniej 35 na trzy miesiące), okres oceny powinien obejmować co najmniej 15 kolejnych wyników i nie powinien przekraczać trzech miesięcy.

Zgodność wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu ocenia się na próbkach badanych po 28 dniach dojrzewania (chyba, że wyspecyfikowano inny termin badania) w odniesieniu do:

- zbiorów n nienakładających się lub nakładających się kolejnych wyników badań $f_{ctm,sp}$ (kryterium 1),
- każdego pojedynczego wyniku badania $f_{cti,sp}$ (kryterium 2).

Zgodność z charakterystyczną wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu ($f_{ctk,sp}$) jest potwierdzona, jeśli wyniki badań spełniają oba kryteria podane w odpowiednio dla produkcji początkowej albo ciągłej - tabela 5.39.

Tabela 5.39. Kryteria zgodności dotyczące wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Produkcja	Liczba n wyników w zbiorze	Kryterium 1	Kryterium 2
		Średnia z n wyników ($f_{ctm,sp}$) [N/mm ²]	Dowolny pojedynczy wynik ($f_{cti,sp}$) [N/mm ²]
Początkowa	3	$\geq f_{ctk,sp} + 0,5$	$\geq f_{ctk,sp} - 0,5$
Ciągła	≥ 15	$\geq f_{ctk,sp} + 1,48 \sigma$	$\geq f_{ctk,sp} - 0,5$

Pobieranie i badanie próbek w ramach oceny identyczności (odbiorca betonu)

Ocenę identyczności przeprowadza się w celu wskazania czy określona objętość betonu należy do tej samej populacji, która w ramach oceny zgodności została zweryfikowana przez producenta jako spełniająca wymagania. Wykonuje się ją wtedy, gdy istnieją wątpliwości co do zarobu, ładunku lub jeżeli jest wymagana w specyfikacji projektu. Przy wykonywaniu badań identyczności należy określić partię betonu, która będzie poddawana ocenie, np. jako:

- pojedynczy zarób lub ładunek, w przypadku wątpliwości związanych z jakością,
- beton dostarczony na każdą kondygnację budynku lub grupę, np.: belek, płyt, słupów, ścian lub innych porównywanych elementów konstrukcyjnych,
- beton dostarczony na miejsce w ciągu jednego tygodnia, nie więcej niż 400 m³.

Z każdej partii należy określić ilość pobieranych próbek przy uwzględnieniu wytycznych z tabelą 5.40.

Tabela 5.40. Minimalna częstotliwość pobierania próbek do oceny identyczności

Warunki kontroli produkcji	Minimalna częstotliwość pobierania próbek z partii
Beton bez certyfikatu kontroli produkcji	3 próbki
Beton z certyfikatem kontroli produkcji	1 próba

Kryteria identyczności dotyczące wytrzymałości na ściskanie

Identyczność betonu ocenia się dla każdego pojedynczego wyniku badania wytrzymałość na ściskanie oraz dla średniej z „n” niepokrywających się pojedynczych wyników zgodnie z tabelą 5.41.

Tabela 5.41. Kryteria identyczności dotyczące wytrzymałości na ściskanie

Warunki kontroli produkcji (producent)	Liczba „n” wyników badań wytrzymałości na ściskanie w próbach z określonej objętości betonu	Średnia z „n” wyników (f_{cm}) [N/mm ²]	Dowolny pojedynczy wynik badania (f_{ci}) [N/mm ²]
Beton z certyfikatem kontroli produkcji	1	nie stosuje się	$\geq f_{ck} - 4$
	2-4	$\geq f_{ck} + 1$	$\geq f_{ck} - 4$
	5-6	$\geq f_{ck} + 2$	$\geq f_{ck} - 4$
Beton bez certyfikatu kontroli produkcji	≥ 3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$

Kryteria identyczności dotyczące zawartości włókien i jednorodności mieszanki betonowej

W przypadku kryteriów identyczności zawartości włókien i jednorodności mieszanki betonowej należy pobrać trzy próbki z ładunku podczas jego rozładowywania, po jednej z każdej trzeciej części jego objętości: początkowej, środkowej i końcowej. Uznaje się, że beton pochodzi z populacji o potwierdzonej zgodności, jeżeli spełnione są oba kryteria podane w tabeli 5.42.

Procedura badania zawartości włókien polimerowych klasy II i jednorodności mieszanki betonowej (z wyjątkiem pobierania próbek) powinna być zgodna z PN-EN 14488-7. W przypadku włókien polimerowych klasy 1a i 1b należy stosować metody badań obowiązujące w miejscu stosowania betonu.

Tabela 5.42. Wspólne kryteria identyczności dotyczące zawartości włókien i jednorodności mieszanki betonowej

Stosuje się do	Kryterium
Każdej próbki	$\geq 0,80$ wyspecyfikowanej wartości minimalnej
Średniej z 3 próbek pobranych z ładunku	$\geq 0,85$ wyspecyfikowanej wartości minimalnej

KONTROLA ZGODNOŚCI BETONU RECEPTUROWEGO, W TYM NORMOWEGO BETONU RECEPTUROWEGO

Zgodność każdego zarobu lub ładunku betonu recepturowego należy ocenić pod względem:

- zawartości cementu,
- maksymalnego wymiaru i proporcji kruszyw (jeśli są wyspecyfikowane),

w odpowiednich przypadkach:

- współczynnika woda/cement,
- ilości domieszki lub dodatku.

Zgodność składników betonu należy oceniać przez porównanie zapisu z produkcji oraz dokumentów dostawy składników z wyspecyfikowanymi wymaganiami. Ilości cementu, kruszywa, domieszki i dodatku (każdego wyspecyfikowanego wymiaru), jakie zarejestrowano w zapisie produkcji lub na wydruku z przyrządu rejestrującego zarób, powinny zawierać się w granicach tolerancji dotyczących wyspecyfikowanych wartości. Współczynnik woda/cement powinien zawierać się w granicach $\pm 0,04$ wartości wyspecyfikowanej.

Przy ocenie zgodności składu betonu za pomocą analizy mieszanki betonowej, wykonawca i producent powinni wcześniej uzgodnić metody badania oraz granice zgodności, uwzględniając granice tolerancji ilości składników oraz dokładność metod badań.

DZIAŁANIA PODEJMOWANE W PRZYPADKU NIEZGODNOŚCI WYROBU

W przypadku niezgodności producent powinien podjąć następujące działania:

- sprawdzić wyniki badań i, jeśli są nieprawidłowe, podjąć działania mające na celu wyeliminowanie błędów,
- jeśli niezgodność została potwierdzona, podjąć działania korygujące, łącznie z przeglądem odpowiednich procedur kontroli produkcji, wykonywanym przez kierownictwo,
- jeśli niezgodność ze specyfikacją betonu została potwierdzona, co nie było wiadome przy dostawie, powiadomić o tym specyfikującego (specyfikujących) oraz wykonawcę (wykonawców), aby uniknąć negatywnych skutków niezgodności.

Jeśli niezgodność betonu spowodowana jest dodaniem wody lub domieszek na miejscu, producent powinien podjąć działania jedynie wówczas, gdy sam podjął decyzję o takim dodaniu.

Jeśli producent powiadomił o niezgodności betonu lub jeśli wyniki badań zgodności nie spełniają wymagań, mogą być wymagane badania uzupełniające, zgodnie z PN-EN 12504-1, przeprowadzone na rdzeniach pobranych z konstrukcji lub elementów, albo kombinacja badań przeprowadzonych na rdzeniach z badaniami nieniszczącymi. Wytyczne dotyczące oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji lub w elementach konstrukcyjnych znajdują się w PN-EN 13791.

DODATKOWE WYMAGANIA PRZY SPECYFIKACJI BETONÓW DO SPECJALNYCH ROBÓT GEOTECHNICZNYCH

Norma PN-EN 206+A2:2021 + PN-B-06265 podaje wymagania dotyczące specyfikacji i zgodności betonów do specjalnych robót geotechnicznych, stosowanych przy wykonywaniu:

- pali wierconych wykonywanych zgodnie z PN-EN 1536 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale wiercone”,
- ścianach szczelinowych wykonywanych zgodnie z PN-EN 1538 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Ściany szczelinowe”,
- pali przemieszczeniowych wykonywanych zgodnie z PN-EN 12699 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe”,
- mikropali wykonywanych zgodnie z PN-EN 14199 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Mikropale”.

W odniesieniu do betonów do specjalnych robót geotechnicznych norma podaje wymagania w zakresie:

- stosowanych surowców,
- kompozycji składu mieszanki betonowej z uwzględnieniem minimalnych zawartości cementu oraz jego rodzaju,
- wymagania w zakresie współczynnika wodno-cementowego,
- wymagania dla stosowanych kruszyw,
- właściwości reologicznych mieszanki betonowej.

Wymagania dotyczące składników betonu

Cement

Norma dopuszcza wykonanie betonu do specjalnych robót geotechnicznych z wykorzystaniem cementów zgodnych z PN-EN 197-1 oraz PN-EN 197-5:

- cement portlandzki CEM I,
- cement portlandzki żuźłowy CEM II/A-S i II/B-S,
- cement portlandzki krzemionkowy CEM II/A-D,
- cement portlandzki pucolanowy CEM II/A-P i II/B-P,
- cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V i II/B-V,
- cement portlandzki łupkowy CEM II/A-T i II/B-T,
- cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL,
- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-V) i CEM II/B-M (S-V),
- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL, V-LL) i CEM II/B-M (S-LL, V-LL),
- cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M
- cement hutniczy CEM III/A, III/B i III/C
- cement pucolanowy CEM IV/A, CEM IV/B,
- cement wieloskładnikowy CEM V.
- cement wieloskładnikowy CEM VI

Pozostałe, niewymienione rodzaje cementów, mogą być stosowane na podstawie przepisów krajowych potwierdzających ich przydatność do zastosowań geotechnicznych.

Minimalna zawartość frakcji drobnych i minimalna zawartość cementu

Norma PN-EN 206+A2:2021+PN-B-06265 dla betonów do specjalnych robót geotechnicznych podaje wymagania dotyczące minimalnej zawartości cementu i drobnych frakcji ziaren poniżej 0,125 mm (tabela 5.43) w zależności od:

- elementu,
- technologii wykonania,
- użytego kruszywa.

Tabela 5.43. Zawartość składników w betonach do specjalnych robót geotechnicznych

Pale wiercone i przemieszczeniowe			
Zawartość cementu	Beton układany na sucho		$\geq 325 \text{ kg/m}^3$
	Beton wykonywany pod wodą lub w cieczy stabilizującej		$\geq 375 \text{ kg/m}^3$
Zawartość ziaren poniżej 0,125 mm łącznie z cementem i dodatkami	Kruszywo grube	$D_{\text{lower}} > 8$	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$
		$D_{\text{upper}} > 8$	
		$D_{\text{lower}} \geq 4$	$\geq 450 \text{ kg/m}^3$
		$D_{\text{upper}} \geq 8$	
Pale przemieszczeniowe wykonywane z półsuchych mieszanek betonowych ¹⁾			
Zawartość cementu			$\geq 350 \text{ kg/m}^3$
Mikropale			
Zawartość ziaren poniżej 0,125 mm łącznie z cementem i dodatkami ²⁾			$\geq 375 \text{ kg/m}^3$
Ściany szczelinowe			
Zawartość cementu	Kruszywo grube	$D_{\text{max}} = 32 \text{ mm}^{3)}$	$\geq 350 \text{ kg/m}^3$
		$D_{\text{max}} = 22,4 \text{ mm}$	$\geq 380 \text{ kg/m}^3$
		$D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$
Zawartość ziaren poniżej 0,125 mm łącznie z cementem i dodatkami		$D_{\text{max}} = 32 \text{ mm}^{3)}$	450 ÷ 550 kg/m^3
D_{lower} - najmniejszy wymiar kruszywa w odniesieniu do najgrubszej frakcji kruszywa w betonie D_{upper} - największy wymiar kruszywa w odniesieniu do najgrubszej frakcji kruszywa w betonie D_{max} wartość deklarowana najgrubszej frakcji kruszywa			
1) Minimalna klasa wytrzymałości betonu C25/30 2) Górny wymiar ziaren nie powinien przekraczać 16 mm 3) Zawartość kruszywa drobnego ($D \leq 4\text{mm}$) w stosie okruszowym powyżej 40% masy			

Kruszywo

W celu zminimalizowania segregacji mieszanki betonowej zgodnie z normą zaleca się stosowanie kruszyw otoczkowych o ciągłym uziarnieniu i o maksymalnym wymiarze ziaren nieprzekraczającym w przypadku:

- pali wierconych i ścian szczelinowych: 32 mm i 1/4 odległości między prętami zbrojenia podłużnego,
- pali przemieszczeniowych: 32 mm i 1/3 odległości między prętami zbrojenia podłużnego,
- mikropali: 16 mm i 1/4 odległości między prętami zbrojenia podłużnego,
- betonowania podwodnego: 1/6 wewnętrznej średnicy rury wlewowej lub pompy, przyjmując najmniejszą z wartości.

Wymagania dotyczące betonu

Współczynnik woda/cement

Maksymalny współczynnik w/c nie powinien być większy niż podany w przepisach w miejscu stosowania betonu w odniesieniu do określonych klas ekspozycji (tabela 5.1) lub 0,60, przyjmując mniejszą z tych wartości.

Mieszanka betonowa

Projekt mieszanki powinien spełniać wymagania specyfikacji uwzględniającej konieczność uzyskania odpowiedniej:

- wysokiej odporności na segregację,
- plastyczności i dobrej spoistości,
- zdolności do rozptywu,
- zdolności do zagęszczenia pod wpływem własnego ciężaru,
- urabialności podczas układania oraz usuwania wszelkich tymczasowych elementów ostonowych.

Projekt mieszanki powinien być zaakceptowany przed rozpoczęciem produkcji. Konsystencja mieszanki betonowej, z wyjątkiem mieszanki półsuchej, powinna być specyfikowana jako założony rozptyw i/lub opad stożka w zależności od technologii wbudowywania betonu wg wartości podanych w tabeli 5.44. Beton układany za pomocą pompy lub w warunkach zanurzenia może być produkowany bez stosowania domieszek znacznie redukujących ilość wody (upłynniających).

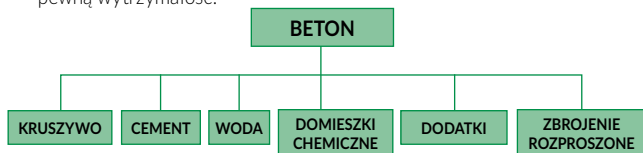
Tabela 5.44. Konsystencja mieszanki betonowej do specjalnych robót geotechnicznych

Średnica rozptywu zgodnie z PN-EN 12350-5 [mm]	Opad stożka zgodnie z PN-EN 12350-2 [mm]	Typowe warunki zastosowania (przykłady)
500	150	beton układany w warunkach suchych
560	180	beton układany pod wodą za pomocą pompy lub rury wlewowej
600	200	beton układany w cieczy stabilizującej za pomocą rury wlewowej.

5.2. Beton i jego rodzaje

Aktualna norma PN-EN 206 „Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” dotycząca betonu używanego do konstrukcji wykonywanych na miejscu, konstrukcji prefabrykowanych oraz konstrukcyjnych wyrobów prefabrykowanych stosowanych w budynkach i budowlach, podaje szereg terminów ogólnych i definicji w zakresie betonu, w tym:

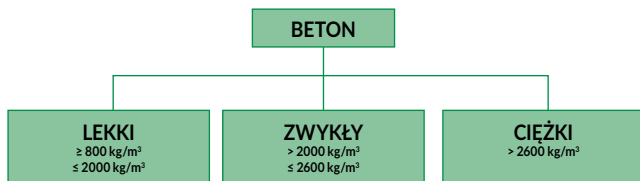
- **beton** - materiał powstały ze zmieszania cementu, kruszywa grubego i drobnego, wody oraz ewentualnych domieszek, dodatków lub włókien (zbrojenia rozproszonego), który uzyskuje swoje właściwości w wyniku hydratacji cementu,
- **mieszanka betonowa** – w pełni wymieszany beton, który jest jeszcze w stanie umożliwiającym jego zagęszczenie wybraną metodą,
- **beton stwardniały** – beton, który jest w stanie stałym i który osiągnął pewną wytrzymałość.



Beton wg normy PN-EN 206 można podzielić ze względu na:

a) gęstość

- beton zwykły - beton o gęstości w stanie suchym większej niż 2000 kg/m^3 i nieprzekraczającej 2600 kg/m^3 , najczęściej wykonywany na kruszywie żwirowym, a w przypadku betonów wyższych klas na grysach uzyskiwanych w wyniku kruszenia skał o wysokich wytrzymałościach,
- beton lekki - beton gęstości w stanie suchym nie mniejszej niż 800 kg/m^3 i nie większej niż 2000 kg/m^3 , wykonywany z kruszyw lekkich (keramzyt, perlit, glinoporyt, itp.) lub przez nadanie betonowi porowatej struktury, np. napowietrzenie lub spienienie,
- beton ciężki - beton o gęstości w stanie suchym większej niż 2600 kg/m^3 , wykonywany z kruszyw pochodzących z ciężkich minerałów lub rud żelaza (magnetyt, limonit, baryt, hematyt, itp.), stosowany do budowy osłon przed promieniowaniem w komorach rentgenowskich lub reaktorach atomowych,



b) sposób produkcji:

- towarowy, beton dostarczony, jako mieszanka betonowa, przez podmiot nie będący wykonawcą, jak również beton wyprodukowany przez wykonawcę poza placem budowy lub beton wyprodukowany na placu budowy, ale nie przez wykonawcę,
- wykonywany na miejsc budowy - beton wykonany na placu budowy przez wykonawcę na jego własny użytek,
- produkowany w zakładzie prefabrykacji - beton wytwarzany przez producenta betonowych elementów prefabrykowanych w zakładzie produkcyjnym,

c) sposób zagęszczenia

- zagęszczany - beton, który po ułożeniu w deskowaniu lub formie, poddany jest procesowi zagęszczania ręcznego lub mechanicznego,
- samozagęszczalny - beton, który pod własnym ciężarem rozpyływa się i zagęszcza, wypełnia deskowanie ze zbrojeniem, kanały, ramy, itp., zachowując jednorodność.

5.2.1. Podstawowe wytyczne projektowania składu betonu

Zasady postępowania przy projektowaniu betonu zawarte są w załączniku A (normatywny) do normy PN-EN 206.

WSTĘPNE ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

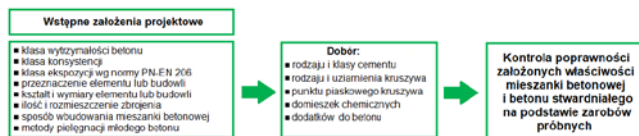
Produkcja betonu jest nierozzerwalnie związana z jego projektowaniem, czyli ustaleniem ilości poszczególnych składników w jednostce objętości (najczęściej w przeliczeniu na 1m³ lub jeden zarób). Procedura projektowania (rys. 5.98) musi uwzględniać także warunki i czas transportu, metody zabudowy, warunki dojrzewania i pielęgnacji, a przede wszystkim warunki środowiskowe pracy betonu (klasy ekspozycji wg PN-EN 206). Wstępne założenia do projektowania składu betonu obejmują zatem dobór składników mieszanki betonowej pod względem ilościowym, ale też jakościowym (zapewnienie osiągnięcia żądanych właści-

wości i odpowiedniej trwałości). Beton projektowany należy poddać weryfikacji doświadczalnej (załącznik A do normy PN-EN 206).

a)



b)



c)



Rys. 5.98. Algorytm postępowania przy projektowaniu betonu

a) podstawowe czynniki, b) założenia projektowe, c) wybór metody projektowania

5.2.2. Metody projektowania betonów zwykłych

Metod projektowania składu betonu jest wiele, jednak założenia i podstawy tych metod są zbliżone:

- klasyczna metoda 3 równań (stanowiąca podstawę pozostałych metod),
- metoda otulania ziaren kruszywa grubego zaprawą (metoda Paszkowskiego),
- metoda zaczynożadności (metoda Kopycińskiego),
- metoda kolejnych przybliżeń (metoda Kuczyńskiego),
- metoda równań,
- metoda znanego zaczynu (uproszczona postać metody Kuczyńskiego),
- metoda przepętniania jam kruszywa (metoda Eymana).

W praktyce wśród rozlicznych metod projektowania składu betonu umownie rozróżnia się następujące grupy:

- metody doświadczalne,
- metody obliczeniowe,
- metody obliczeniowo-doświadczalne.

We wszystkich wspomnianych metodach, opierając się na podstawowych równaniach: wytrzymałości, szczelności i wodożadności, dąży się do uzyskania pożądanych właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu przy optymalnym zużyciu cementu i kruszywa. Zapisy normy PN-EN 206 w sposób bardzo wyraźny wskazują, iż w procesie projektowania składu mieszanki betonowej wyróżnić należy 4 podstawowe etapy:

- etap I – zdefiniowanie przeznaczenia projektowanego betonu (rodzaj konstrukcji, klasa ekspozycji, itp.),
- etap II – jakościowe projektowanie składu – dobór składników,
- etap III – projektowanie ilościowe – zawartość składników,
- etap IV – doświadczalne (laboratoryjne) sprawdzenie (badania wstępne) poprawności doboru składu betonu oraz ewentualna korekta receptury.

METODA TRZECH RÓWNAŃ

Zazwyczaj ustalenie składu betonu polega na wyznaczeniu zawartości jego składników w 1 m^3 mieszanki betonowej, tj.:

- c – cementu [kg],
- w – wody [kg],
- k – kruszywa [kg],

których użycie powinno spełniać trzy warunki:

1. warunek wytrzymałości (zależność Bolomey'a):

$$R = A_1 (c/w - 0,5), \quad \text{w przypadku } c/w < 2,5,$$

$$R = A_2 (c/w + 0,5), \quad \text{w przypadku } c/w \geq 2,5,$$

gdzie:

R – średnia wytrzymałość na ściskanie betonu [MPa],

A – współczynnik zależny od rodzaju kruszywa i klasy wytrzymałości cementu (tabela 5. 45),

c – ilość cementu [kg],

w – ilość wody [kg],

c/w – współczynnik cementowo-wodny – stosunek ilości cementu do ilości wody w mieszance, powszechniej stosowana jest jego odwrotność w/c – współczynnik wodno-cementowy, który w ujęciu normy PN-EN 206 zastąpiony zostaje współczynnikiem wodno-spoiwowym zdefiniowanym jako $w/(c + k \times \text{dodatek})$, z zachowaniem zasad podanych w tabeli 5.5.

Tabela 5.45. Wartości współczynników A1, A2

Kruszywo grube	Współczynnik A	Klasa cementu		
		32,5	42,5	52,5
Naturalne (otoczkowe)	A1	18	21	23
	A2	12	14,5	15
Łamane (grysy)	A1	20	24	26
	A2	13,5	15,5	17,5

Przy obecnym stanie wiedzy oraz zastosowaniu nowoczesnych cementów o wysokim stopniu zmielenia, zawierających nieklinkierowe składniki główne warunek wytrzymałości nie znajduje swojego odzwierciedlenia w praktyce.

2. warunek konsystencji:

$$w = c \times w_c + d \times w_d + k \times w_k$$

gdzie:

c – ilość cementu [kg],

d – ilość dodatku [kg],

w – ilość wody [kg],

k – ilość kruszywa [kg],

w_c – wodożądność cementu [dm^3/kg],

w_d – wodożądność dodatku [dm^3/kg],

w_k – wodożądność kruszywa [dm^3/kg], ustalona metodami np.:

- punktu piaskowego,
- kolejnych przybliżeń, wskaźników
- wodożądności poszczególnych frakcji.

Przy obecnym stanie wiedzy w zakresie technologii betonu warunek konsystencji obliczony z wodożądności poszczególnych składników może zostać pominięty. Zakładaną klasę konsystencji mieszanki betonowej uzyskuje się poprzez stosowanie domieszek chemicznych modyfikujących właściwości reologiczne (ilość wody w mieszance betonowej), czyli plastyfikatorów i superplastyfikatorów.

3. warunek szczelności:

$$c/\rho_c + d/\rho_d + k/\rho_k + w = 1000$$

gdzie:

c – ilość cementu [kg],

d – ilość dodatku [kg],

w – ilość wody [kg],

k – ilość kruszywa [kg],

ρ_c – gęstość cementu [kg/dm^3],

ρ_d – gęstość dodatku [kg/dm^3],

ρ_k – gęstość kruszywa [kg/dm^3] (tabela 5.46)

Tabela 5.46. Gęstość wybranych kruszyw do betonów

Rodzaj kruszywa		Średnia gęstość [kg/dm^3]
Kruszywo naturalne	Piaski	2,65
	Żwiry	
Kruszywo łamane	Granity	2,69
	Sjenity	2,83
	Bazalty	3,00
	Melafiry	2,72
	Wapienie zbite	2,70
	Dolomity	2,84

METODA OTULANIA ZIAREN KRUSZYWA GRUBEGO ZAPRAWĄ - METODA PASZKOWSKIEGO

Metoda oparta jest na założeniu, że wykonanie betonu uwarunkowane jest zapewnieniem otulenia ziaren kruszywa grubego warstwą zaprawy. Grubość otulenia uzależniona od założonej klasy konsystencji mieszanki betonowej – im bardziej ciekła konsystencja mieszanki tym grubsza warstwa otulająca. Charakterystycznym równaniem metody jest wzór na określenie zawartości kruszywa grubego w 1m³ mieszanki betonowej:

$$K_g = \frac{(1-j_g) \rho_g}{1 + F_g \frac{r_g}{2}} 1000$$

gdzie:

K_g - ilość kruszywa grubego [kg/m³],

j_g - jamistość kruszywa grubego,

ρ_g - gęstość kruszywa grubego [kg/m³],

F_g - powierzchnia zewnętrzna kruszywa grubego [cm²/g],

$r_g/2$ - promień otulenia ziaren kruszywa grubego zaprawą [dm].

METODA ZACZYNOŻADNOŚCI - METODA KOPYCIŃSKIEGO

Metoda zwana również metodą jednostopniowego przepętnienia jam kruszywa grubego zaprawą. Metoda zbliżona do metody Eyemana. Metoda zakłada, że objętość zaprawy powinna być większa niż objętość jam między ziarnami kruszywa grubego:

$$\mu_g = \frac{\text{objętość zaprawy}}{\text{objętość jam}} > 1,0$$

gdzie:

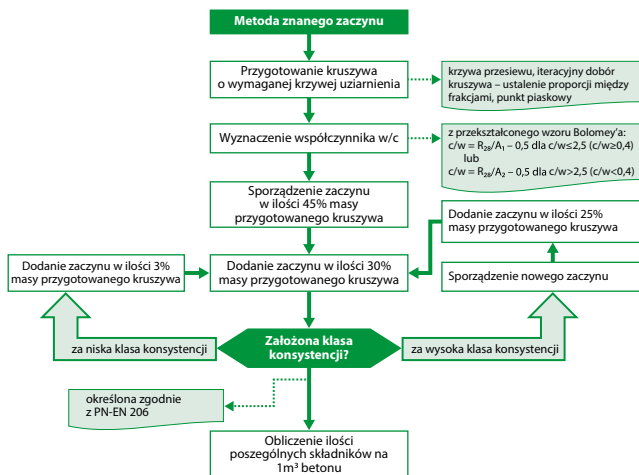
μ_g - stopień przepętnienia jam kruszywa grubego zaprawą.

METODA KOLEJNYCH PRZYBLIŻEŃ - METODA KUCZYŃSKIEGO

Metoda polega na doborze kruszywa o odpowiednim uziarnieniu poprzez mieszanie poszczególnych frakcji i ustalenie proporcji między nimi. W dalszym etapie należy dobierać odpowiednie ilości wody i cementu. Ilość tych składników dobierane są w drodze kolejnych przybliżeń, tak aby zapewnić zakładaną konsystencję mieszanki betonowej.

METODA ZNANEGO ZACZYNU (UPROSZCZONA METODA KUCZYŃSKIEGO)

Jest to najpowszechniej stosowana w praktyce metoda projektowania składu mieszanki betonowej. Polega na oddzielnym, iteracyjnym określeniu optymalnego składu kruszywa komponowanego z poszczególnych frakcji lub ich grup oraz, także iteracyjnym, określeniu niezbędnej zawartości zaczynu cementowego o znanym współczynniku w/c. W pierwszej kolejności ustala się zawartość poszczególnych frakcji w stosie okruszowym kruszywa (obszary dobrego uziarnienia – rys. 5.11). W drugim etapie projektuje się zaczyn o znanym współczynniku w/c (maksymalna wartość współczynnika w/c dla poszczególnych klas ekspozycji zawarta jest w załączniku F do normy PN-EN 206). Algorytm postępowania przy projektowaniu betonu metodą znanego zaczynu przedstawia rys. 5.99.



Rys. 5.99. Algorytm projektowania betonu metoda znanego zaczynu

METODA PRZEPEŁNIANIA JAM KRUSZYWA - METODA EYMANA

Metoda zbliżona do metody otulenia (Paszowskiego). Opiera się na założeniu, że do wykonania mieszanki betonowej konieczne jest przepiętnienie jam między ziarnami kruszywa grubego zaprawą. Stopień przepiętnienia jam (μ_g), zależy od założonej klasy konsystencji mieszanki betonowej (im bardziej ciekła mieszanka, tym większy stopień przepiętnienia). Charakterystycznym równaniem metody przepiętnienia jest wzór, pozwalający na określenie zawartości kruszywa grubego w 1m^3 mieszanki betonowej:

$$K_g = \frac{1000 \rho_g}{1 + \mu_g \frac{j_g}{1 - j_g}}$$

gdzie:

K_g - ilość kruszywa grubego [kg/m^3],

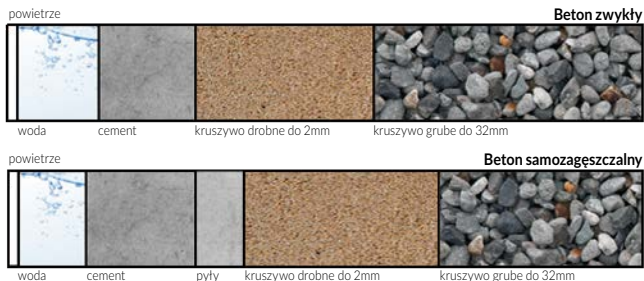
ρ_g - gęstość kruszywa grubego [kg/m^3],

j_g - jamistość kruszywa grubego,

μ_g - stopień przepiętnienia jam kruszywa grubego zaprawą.

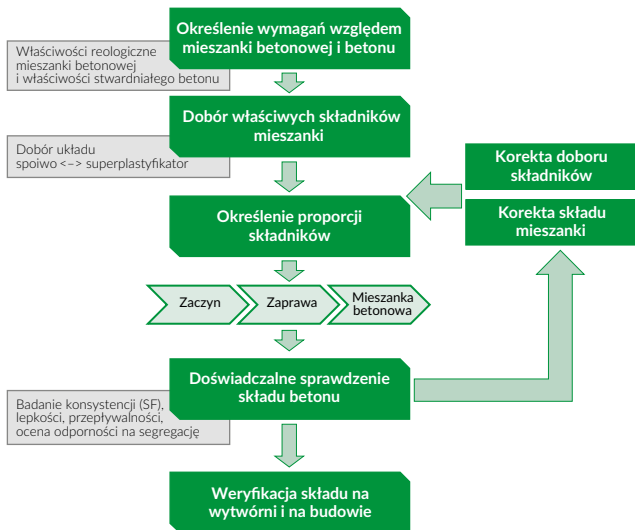
5.2.3. Projektowanie betonów samozagęszczalnych SCC

Nie ma standardowej metody projektowania betonów samozagęszczalnych. Głównym celem każdego projektanta jest osiągnięcie założonych właściwości reologicznych. W każdym przypadku projektowanie należy rozpocząć od prób laboratoryjnych, które zweryfikują początkowy skład mieszanki (różniący się od składu betonu zwykłego, zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym – rys. 5.100), z uwzględnieniem właściwości i klasy wytrzymałości projektowanego betonu.



Rys. 5.100. Proporcje składników (objętościowo) w betonie zwykłym i samozagęszczalnym

Algorytm postępowania przy projektowaniu betonów SCC przedstawiono na rys. 5.101. Mieszanka betonowa powinna być wykonana i sprawdzona w warunkach wytwarzania (na wytwórni).



Rys. 5. 101. Postępowanie przy projektowaniu mieszanki betonowej SCC

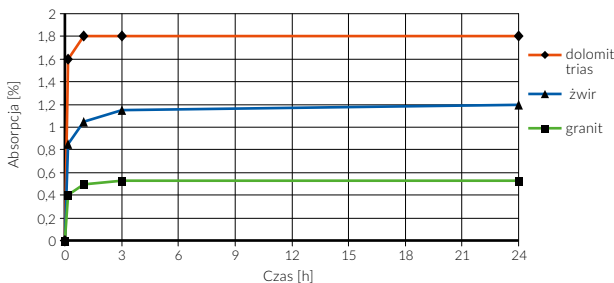
Mieszanka betonowa może być projektowana w oparciu o ogólne zasady:

- dobór odpowiedniego składu spoiwa (cement + dodatki zwiększające zawartość frakcji pylistych),
- wyznaczenie ilości potrzebnej wody oraz optymalizacja płynności i stabilności mieszanki,
- określenie proporcji pomiędzy piaskiem a ilością dozowanej domieszki, zapewniającej wymaganą trwałość,
- określenie wrażliwości mieszanki na wahania ilości składników,
- wyznaczenie ilości dodawanego kruszywa grubego,
- wykonanie mieszanki SCC w laboratorium i sprawdzenie podstawowych

- właściwości mieszanki,
- zbadanie właściwości stwardniałego betonu,
- wykonanie prób na wytwórni betonu.

5.2.4. Współczynnik w/c a właściwości betonu

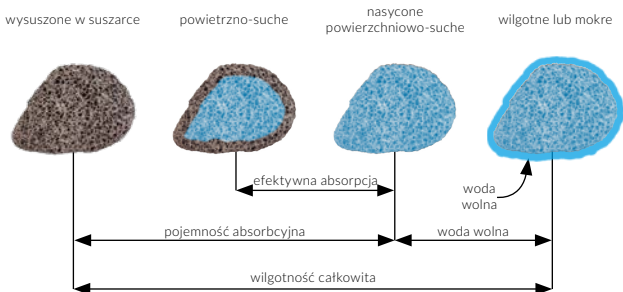
Zawartość wody w stosunku do zawartości cementu w składzie betonu jest określana współczynnikiem wodno-cementowym w/c. Według normy PN-EN 206 współczynnik w/c jest to stosunek efektywnej zawartości wody do zawartości cementu w mieszance betonowej. Efektywna zawartość wody jest różnicą między całkowitą ilością wody w mieszance betonowej, a ilością wody zaabsorbowanej przez kruszywo (rys. 5.102).



Rys. 5.102. Przykładowe krzywe absorpcji kruszywa

Należy przez to rozumieć, że do obliczenia współczynnika w/c należy uwzględnić tę wodę, która jest na ziarnach kruszywa (woda efektywna). Ponieważ wchłanianie wody przez suche kruszywo maleje lub ulega zahamowaniu wskutek pokrywania ziaren kruszywa zaczynem cementowym, często wskazane jest określenie ilości wody wchłoniętej przez kruszywo w ciągu 10–30 min zamiast całkowitej nasiąkliwości. W praktyce ilość wody na ziarnach kruszywa jest różnicą ilości wody wynikającej z wilgotności kruszywa i jego nasiąkliwości (rys. 5.103). Ustalenie właściwej proporcji i zawartości wody i cementu jest istotne ze względu na zapewnienie odpowiednich właściwości mieszanki betonowej (konsystencja i urabialność) oraz stwardniałego betonu. Istnieje ścisły związek między wytrzymałością betonu a współczynnikiem w/c, co pokazano na rys. 5.104. Zmniejszenie

współczynnika w/c skutkuje powstaniem bardziej zwartej i trwałej matrycy cementowej. Ograniczona jest szybkość dyfuzji mediów agresywnych - rys. 5.105, np. soli mineralnych, tlenu, wilgoci, i dwutlenku węgla. Efektem jest znaczne wydłużenie okresu użytkowania (cyklu życia) konstrukcji betonowej.



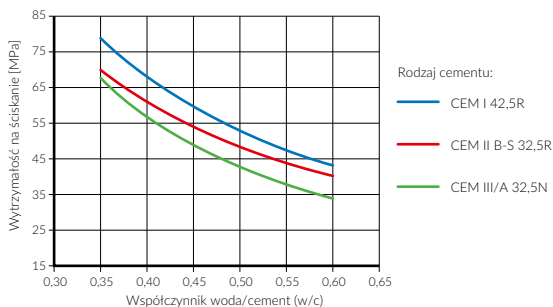
Rys. 5.103. Zawartość wody w kruszywie (stany wilgotnościowe kruszywa)

UWAGA!

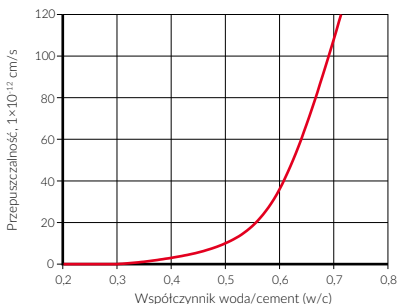
Niższy współczynnik w/c pozwala uzyskać wyższą wytrzymałość i trwałość betonu przy tej samej ilości cementu.

Zwiększenie ilości wody w betonie, przy niezmienionej ilości cementu, skutkuje znacznym obniżeniem wytrzymałości betonu i obniżeniem jego trwałości - wysoka nasiąkliwość, niska mrozoodporność, niska szczelność i szybsza korozja stali zbrojeniowej.

Współczynnik w/c jest najważniejszym czynnikiem determinującym wytrzymałość i trwałość betonu. Jego stabilność podczas produkcji i utrzymanie zgodnie z ustaloną recepturą jest podstawą do uzyskania właściwej jakości.



Rys. 5.104. Wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach wpływ rodzaju cementu i w/c



Rys. 5.105 Wpływ współczynnika w/c na przepuszczalność betonu

5.2.5. Betony specjalne

W ostatnich latach, w dziedzinie technologii betonu nastąpił bardzo intensywny rozwój. W konsekwencji, obok betonu zwykłego, pojawiły się betony nowej generacji - betony o właściwościach specjalnych, kompozyty wieloskładnikowe, wyższej jakości, nie tylko w aspekcie wytrzymałości, ale i trwałości. Specjalne właściwości betonu można osiągnąć poprzez optymalny ilościowo-jakościowy dobór składników - cementu, wody, kruszywa, domieszek, dodatków (w niektórych przypadkach istnieje konieczność zastosowania nietypowych składników

- włókien, proszków reaktywnych, specjalnych kruszyw, kombinacji domieszek chemicznych) oraz poprzez dokonywanie na najwyższym poziomie czynności technologicznych. Do betonów specjalnych zaliczyć można:

- betony samozagęszczalne (SCC),
- betony wysokowartościowe (BWW, UWBB),
- betony architektoniczne,
- betony ciężkie, lekkie, komórkowe,
- betony masywne,
- fibrobetony,
- betony o właściwościach fotokatalitycznych,
- betony z kruszyw z recyklingu,
- betony barwione.

5.2.5.1. Beton samozagęszczalny (SCC)

Beton samozagęszczalny (skrót SCC z ang. self-compacting concrete) to beton charakteryzujący się specjalnymi właściwościami mieszanki betonowej. Jak sama nazwa wskazuje, beton SSC posiada zdolność do samozagęszczenia, co pozwala na szczelne wypełnienie szalunków w przypadku elementów o gęstym zbrojeniu czy skomplikowanym kształcie, z równoczesnym zachowaniem jednorodności składu. Beton samozagęszczalny SCC charakteryzuje się:

- zagęszczeniem i odpowietrzeniem mieszanki betonowej pod własnym ciężarem (bez użycia urządzeń wibrujących),
- bardzo płynną konsystencją i wysoką urabialnością mieszanki betonowej,
- brakiem segregacji, odpornością na „bleeding” (samoistny wyciek wody z mieszanki),
- szczelnym wypełnieniem form i deskowań, nawet w elementach gęsto zbrojonych.

Beton samozagęszczalny stosowany jest jako beton towarowy, w prefabrykacji (do wypełnienia matryc, form poziomych i pionowych) oraz tam, gdzie nie ma możliwości zabudowania mieszanki z betonu zwykłego. Można go stosować również jako:

- beton wysokowytrzymałościowy w produkcji sprężonych zbiorników na ciecze i gazy,
- beton mostowy – fundamenty i filary mostów,
- beton układany bez wibrowania przy wykonywaniu betonowych konstrukcji masywnych,
- przy betonowaniu zbiorników oczyszczalni ścieków,

- w budownictwie tunelowym – monolityczne ściany tuneli kolejowych,
- beton hydrotechniczny - fundamenty betonowane pod wodą,
- beton architektoniczny.

Głównymi zaletami betonów samozagęszczalnych jest możliwość dokładnego odwzorowania powierzchni form, bez raków i pęcherzy, betonowania bardzo skomplikowanych kształtów, czy pompowania mieszanki betonowej od dołu. SCC zapewnia lepszą przyczepność do zbrojenia niż większość betonów tradycyjnych. Przy projektowaniu betonów samozagęszczalnych podstawowym warunkiem jest uzyskanie odpowiednich właściwości reologicznych mieszanki betonowej. Do najważniejszych cech mieszanki samozagęszczalnej należą

- konsystencja (SV),
- lepkość (VS lub VF),
- przepływalność (PL lub PJ),
- odporność na segregację (SR).

W zależności od rodzaju i kształtu wykonywanych elementów zaleca się ustalenie właściwości mieszanki samozagęszczalnej zgodnie z tabelą 5.47.

Korzyści wynikające ze stosowania betonu SCC:

- eliminacja wibrowania – redukcja hałasu, redukcja drgań (możliwość betonowania nocą w pobliżu budynków mieszkalnych), co jest niezwykle praktycznym rozwiązaniem w czasie upałów,
- większa szybkość wykonywania konstrukcji – krótszy czas formowania elementów, a także szybsze wbudowywanie mieszanki betonowej,
- brak konieczności wibrowania betonu samozagęszczającego, przede wszystkim zmniejsza koszty realizacji danego projektu, ponieważ do przygotowania i ułożenia mieszanki SCC nie potrzeba dodatkowych pracowników i maszyn (redukcja kosztów robocizny i zużycia energii),
- wykonywanie konstrukcji o bardzo skomplikowanych kształtach,
- wysoka jakość wykonania - dokładne odwzorowanie powierzchni form, bez raków i pęcherzy (prefabrykacja, beton licowy).

Tabela 5.47. Właściwości betonu SCC dla różnych typów zastosowań

Lepkość	Rozptyw			Odporność na segregację/zdolność przepływu
	SF1	SF2	SF3	
VS2 VF2	pochylnie			Określa zdolność przepływu dla klas SF1 i SF2
VS1 lub VS2 VF1 lub VF2 lub określona wartość	ściany i podpory		wysokie i smukłe	Określa SR dla klasy SF3
VS1 VF1	stropy i płyty			Ustalone SR dla klasy SF2 i SF3



Rys. 5.106. Most zamkowy w Rzeszowie wykonany z betonu samozagęszczalnego



Rys. 5.107. Przykłady zastosowania mieszanki betonowej SCC w prefabrykacji

Przykładem zastosowania betonów SCC w Polsce jest, np. Most Zamkowy w Rzeszowie (rys. 5.106), podpory obiektów mostowych na Węzle Sośnica (skrzyżowanie autostrad A1 i A4), prefabrykowane elementy fasadowe budynku Roma Center w Warszawie (rys. 5.107).

UWAGA!

Zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 zaleca się, aby beton samozagęszczalny był układany w sposób ciągły, a częstotliwość dostaw była dostosowana do tempa betonowania i zaakceptowana przez producenta w celu uniknięcia przerw w betonowaniu, spowodowanych opóźnieniem w dostawie lub układaniu betonu po jego dostarczeniu na miejsce.

Na etapie zabudowy mieszanki betonu samozagęszczalnego należy pamiętać, żeby nie zrzucić mieszanki swobodnie z dużej wysokości, ponieważ może to doprowadzić do jej segregacji.

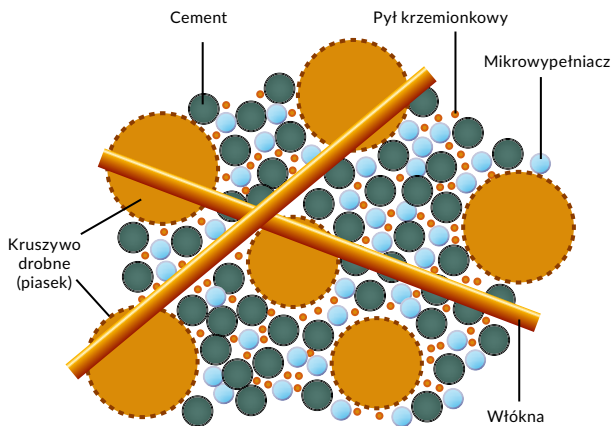
W trakcie prowadzenia prac wykonawczych, należy pamiętać, że w przypadku betonu samozagęszczalnego płynna mieszanka betonowa wywiera większe ciśnienie na szalunek niż w przypadku zwykłego betonu. Ciśnienie to zależne jest od lepkości mieszanki betonowej, tempa betonowania oraz wysokości warstwy mieszanki betonowej. Przy projektowaniu szalunku należy przyjmować pełne parcie hydrostatyczne z uwzględnieniem gęstości betonu. Konieczne jest więc wzmocnienie szkieletu szalunku o poprzeczne deski rozporowe, przeciwdziałające rozpieraniu szalunku. Boczne podpory i poprzeczne wzmocnienia muszą być gęsto rozmieszczone. Cały szalunek musi być solidnie zamocowany do podłoża (zakotwiony) – inaczej istnieje ryzyko że wpływający beton uniesie szalunek i wypłynie dołem. Należy zwrócić uwagę czy w bocznych ścianach szalunku nie ma dziur lub szpar. Jeśli są jakiegokolwiek nieszczelności, należy zabezpieczyć je, tak aby szalunek był szczelny i uniemożliwiał wypływanie mieszanki. Ponadto deskowanie dla betonu samozagęszczalnego musi być czyste i pozbawione nadmiaru środka antyadhezyjnego, w przeciwnym wypadku nie ma możliwości uzyskania ładnej i gładkiej powierzchni.

5.2.5.2. Beton wysokowartościowy (BWW)

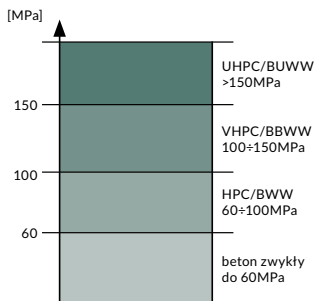
Beton wysokowartościowy BWW, jest kompozytem, w którym jedna lub kilka cech charakterystycznych, w porównaniu do betonu zwykłego, uległa udoskonaleniu wskutek odpowiedniego doboru rodzaju oraz proporcji składników, tak by dostosować wymagane właściwości (trwałość) do potrzeb i warunków

eksploatacji konstrukcji. W betonie wysokowartościowym kluczowe jest zapewnienie niskiego współczynnika wodno-cementowego (wodno-spoiwowego) oraz zastosowanie wysoce efektywnych domieszek chemicznych, głównie kształtujących właściwości reologiczne (plastyfikatorów i superplastyfikatorów), dodatków, szczególnie pyłu krzemionkowego, jak również mikrowypełniaczy i włókien - rys. 5.108.

Beton wysokowartościowy najczęściej definiuje się jako beton o charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa oznaczonej po 28 dniach dojrzewania, jest to granica umowna (rys. 5.109), w aktualnej normie PN-EN 206+A2:2021 nie ma takiego podziału.



Rys. 5.108. Schematyczne przedstawienie składu betonu wysokowartościowego



Rys. 5.109. Podział betonu ze względu na wytrzymałość na ściskanie

Określenie betonu wysokowartościowego (BWW) nie jest tożsamy z betonem wysokowytrzymałościowym, gdyż w betonie wysokowartościowym dodatkowym wymaganiem, oprócz wysokiej wytrzymałości, jest wysoka trwałość wynikająca głównie ze szczelności. 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.

W projektowaniu betonu wysokowartościowego brak jest norm i jednolitych procedur, należy korzystać z ogólnych wytycznych oraz metod doświadczalnych. Podstawą projektowania i wykonania BWW jest odpowiedni dobór tradycyjnych składników (cementu, kruszywa, wody i dodatków) podporządkowany głównie wymaganiom dobrej urabialności mieszanki betonowej, a później osiągnięciu odpowiedniej szczelnej struktury betonu zapewniającej zachowanie wszystkich wyróżniających właściwości BWW.

Przy projektowaniu składu betonu BWW należy stosować następujące zało-

żenia technologiczne (tabela 5.48):

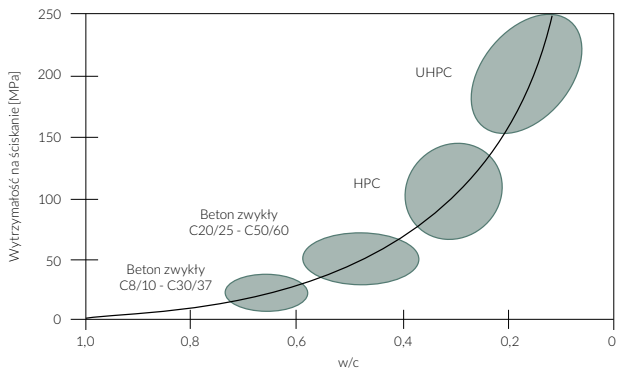
- przyjąć możliwie najniższy współczynnik w/c (w/s), dla BWW 0,35÷0,45; dla BBWW 0,25÷0,35 (rys. 5.110),
- stosować cementy wysokiej jakości o stabilnych, powtarzalnych właściwościach,
- zawartość cementu powinna wynosić 450÷550 kg/m³, dla betonu BUWW nawet powyżej 700 kg/m³,
- stosować kruszywa o bardzo dużej wytrzymałości mechanicznej (wytrzymałość ≥ 150 MPa), oraz wysokiej jakości (brak zanieczyszczeń w postaci pyłów),
- stosować dodatki mające na celu uszczelnienie mikroporów poprzez wypełnienie stosu okruszowego fazą mikroziarnistą, zwiększenie szczelności oraz wypełnienie strefy na granicy zaczyn-kruszywo, np. pył krzemionkowy, nanokrzemionka, popiół lotny kategorii S i A wg PN-EN 450-1,
- stosować domieszki silnie redukujące ilość wody (stężone polikarboksylany, PCE).

Porównanie składu jakościowego i ilościowego betonów zwykłych i wysokowartościowych przedstawiono na rys. 5.111.

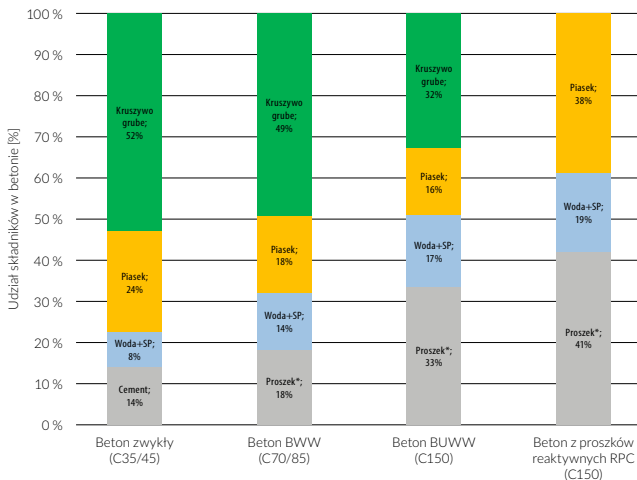
Tabela 5.48. Wymagania dotyczące składu betonu wysokowartościowych

Właściwość	Beton zwykły	Beton wysoko-wartościowy (HPC/BBWW)	Beton bardzo wysoko-wartościowy (VHPC/BBWW)	Beton ultra wysoko-wartościowy (UHPC/BUWW)
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	< 60	60÷100	60÷150	>150
Moduł sprężystości [GPa]	25–30	40–50		50–80
Współczynnik w/c	> 0,45	0,45÷0,35	0,35÷0,25	< 0,25
Domieszka chemiczna	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*
Włókna zbrojenia	Korzystne	Korzystne	Korzystne	Istotnie potrzebne
Pielęgnacja	Tradycyjna	Tradycyjna	Pielęgnacja wewnętrzna	Pielęgnacja wewnętrzna. Obróbka cieplna i ewentualnie ciśnieniowa

* - można stosować również metakaolin/zmielony granulowany żużel wielkopiecowy



Rys. 5.110. Wpływ współczynnika w/c na wytrzymałość betonu

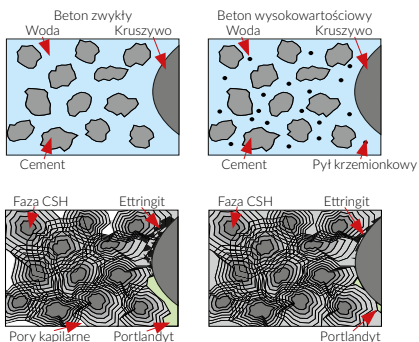


Rys. 5.111. Przykładowy skład betonów wysokowartościowych
 (* - suma ilości cementu i dodatków, SP-superplastyfikator)

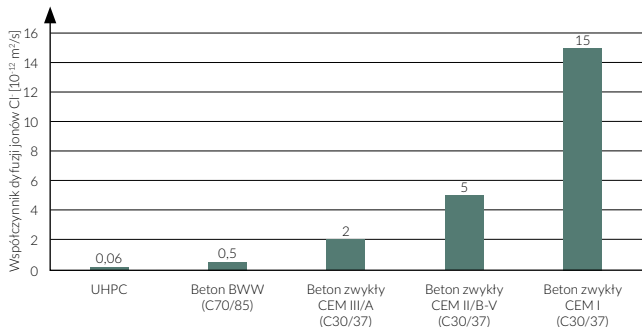
Podstawowym kierunkiem w osiągnięciu betonu wysokiej wytrzymałości i trwałości jest zapewnienie możliwie niskiego współczynnika w/c $< 0,45$. Dolna granica wielkości współczynnika w/c dla betonów ultra wysokowartościowych wynosi ok. 0,2, pod warunkiem osiągnięcia odpowiedniej urabialności mieszanki betonowej pozwalającej na prawidłowe zagęszczenie i zabudowę oraz warunków pielęgnacji zapewniających dostęp wody dla prawidłowego przebiegu procesu hydratacji cementu, np. poprzez pielęgnację wewnętrzną. W celu uzyskania odpowiednich właściwości reologicznych przy niskim współczynniku w/c konieczne jest stosowanie domieszek uplastyczniających i upłynniających. Redukując ilość wody należy zwiększyć ilość domieszki, czego skutkiem jest wzrost lepkości mieszanki betonowej. 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 betonu w konstrukcji. W betonie zwykłym strefa kontaktowa zaczyn – kruszywo jest najszabsza. W betonie wysokowartościowym strefa kontaktowa jest mniej porowata, co pozwala lepiej przenosić obciążenia (poprawa wytrzymałości). W betonie wysokowartościowym ziarna kruszywa są najszabszym ogniwem. Na rys. 5.112 porównano mikrostrukturę betonów zwykłego i wysokowartościowego. Wysoka szczelność betonu BWW wynika z gęstej i praktycznie nieporowatej mikrostruktury, w tym także małej ilości porów kapilarnych. A to z kolei przekłada się korzystnie na kształtowanie odporności betonów BWW na wnikanie mediów ciekłych i gazowych, np. chlorków (rys. 5.113), CO_2 , itp. Ograniczenie transportu mediów ciekłych przez beton korzystnie wpływa również na ograniczenie ryzyka wystąpienia reakcji alkalia-reaktywne kruszywo, gdyż obecność wody (wilgoci) jest niezbędne dla przebiegu reakcji ASR.

Ze względu na znaczący udział kruszywa i wpływ na jakość 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,
- brak zanieczyszczeń w kruszywie (szczególnie pyłów),
- zdefiniowana reaktywność alkaliczna (ryzyko reakcji ASR).



Rys. 5.112. Porównanie mikrostruktury betonu zwykłego i betonu wysokowartościowego



Rys. 5.113. Współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych w betonie wysokowartościowym i zwykłym

Im wyższa jest projektowana 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 okruszowym powinien wynosić od 27 do 32%. Zaleca się stosowanie piasków o tym samym pochodzeniu geologicznym, co kruszywo grube.

Najczęściej stosowanym dodatkiem do betonu wysokowartościowego jest pył krzemionkowy. Zalecane jest stosowanie pyłu krzemionkowego w składzie betonu w ilości do 10%, w przeliczeniu na masę cementu, szczególnie dla betonów o projektowanej klasie wytrzymałości $\geq C60/75$. Przy stosowaniu pyłu krzemionkowego należy pamiętać o wzroście wodożądności mieszanki betonowej wynikającej z wysokiego stopnia rozdrobnienia mikrokrzemionki (zawartość bardzo drobnych ziaren o rozwiniętej powierzchni właściwej, tj. $14 \div 20 \text{ m}^2/\text{g}$).

Stosowane popioły lotne w składzie betonów BWW muszą spełniać wymagania względem miakkości ($\leq 12\%$, kategoria S wg PN-EN 450-1) zawierać bardzo drobne, sferyczne ziarna, ze znaczną zawartością fazy szklistej oraz zawartości strat prażenia ($< 5\%$, kategoria A wg PN-EN 450-1).

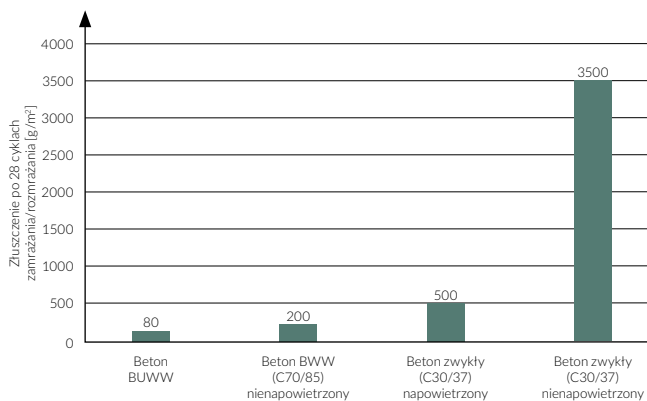
Dodatkowo, w celu poprawy właściwości mechanicznych betonów wysokowartościowych w ich składzie stosuje się różne rodzaje włókien, np. metalowe, polipropylenowe, szklane lub włókna węglowe w przypadku betonów ultra wysokowartościowych. W tabeli 5.49 został przedstawiony wpływ poszczególnych rodzajów włókien na właściwości tego typu betonów.

Tabela 5.49. Wpływ włókien na właściwości betonu wysokowartościowego

Rodzaj włókien		
Stalowe	Polipropylenowe	Szklane
<ul style="list-style-type: none"> – wzrost energii pękania, 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 – poleszenie odporności ogniowej – zmniejszenie wczesnego skurczu 	<ul style="list-style-type: none"> – redukcja naprężeń własnych wewnątrz młodego betonu
<p><i>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).</i></p>		

Betony wysokowartościowe 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 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 na 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 przez zastosowanie włókien polipropylenowych, które w wyniku pożaru ulegają spaleniu, pozostawiając pustki w strukturze betonu umożliwiające odparowanie wody.

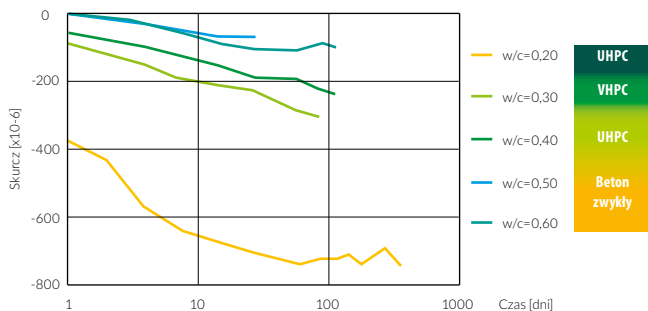
Beton BWW charakteryzuje się również wysoką mrozoodpornością, a betony BBWW i BUWW cechują się bardzo dobrą mrozoodpornością bez konieczności ich napowietrzenia (rys. 5.114), co wynika z bardzo niskiej porowatości całkowitej, małej ilości porów kapilarnych oraz wody wolnej, która mogłaby zamarznąć.



Rys. 5.114. Mrozoodporność betonów (metoda CDF wg CEN/TS 12390-9)

W betonach BWW szczególnego znaczenia nabiera skurcz autogeniczny. Jest on konsekwencją „wyciągania” wody z porów kapilarnych podczas hydratacji cementu dotychczas niehydratyzowanego. Może stanowić to poważny problem, jeżeli betony 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 $0,25 \div 0,3$. Poza tym zawierają stosunkowo dużo cementu oraz dodatki i relatywnie małą ilość wody zarobowej. Po rozpoczęciu procesu hydratacji, przy niewielkiej wilgotności wewnętrznej, wysuszenie kapilar może doprowadzić do wysokich naprężeń rozciągających, które kurczą stwardniały zaczyn cementowy (rys. 5.115). Wysoki skurcz autogeniczny i jego szybki rozwój zwiększa znacząco ryzyko powstania mikrospękań w betonie, zwłaszcza we wczesnym okresie, jeżeli element z niego wykowany jest pozbawiony swobodnych odkształceń.

Stosowanie betonu wysokich wytrzymałości w konstrukcjach niesie ze sobą szereg korzyści (tabela 5.50), w tym ograniczenie ciężaru własnego konstrukcji przy zapewnieniu zachowania nośności elementów konstrukcyjnych (rys. 5.116). Stosowanie BWW umożliwiło budowę wielu budynków wysokościowych (rys. 5.117).

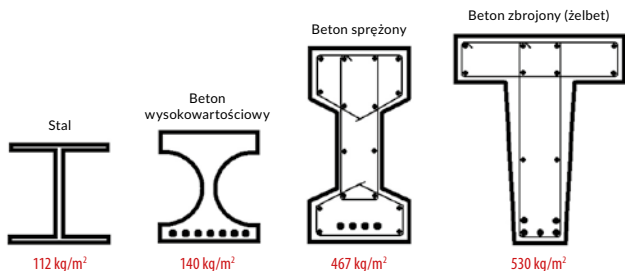


Rys. 5.115. Wpływ współczynnika w/c na skurcz autogeniczny betonu

Do głównych obszarów zastosowań betonu wysokowartościowego należą:

- budownictwo wysokie (przemysłowe, wielorodzinne, biurowe, szczególnie słupy nośne),
- budownictwo komunikacyjne - budowa mostów, nawierzchni drogowych i obudowa tuneli,

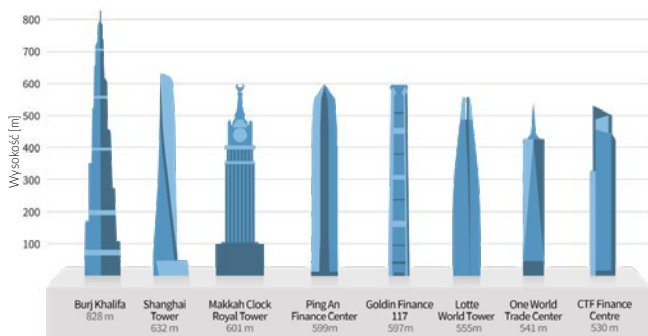
- budowa platform wiertniczych,
- budownictwo energetyczne (obudowa reaktorów jądrowych i chłodzi powłokowych),
- produkcja prefabrykatów wielkowymiarowych.



Rys. 5.116. Ciężar właściwy i proporcje przekrojów belek o tej samej nośności wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych

Tabela 5.50. Właściwości betonu wysokowartościowego w konstrukcjach

Rodzaj konstrukcji	Poprawa właściwości materiałów 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
Prefabrykowane elementy konstrukcyjne	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



Rys. 5.117. Najwyższe budynki świata

Korzyści wynikające ze stosowania betonów wysokowartościowych:

- dla projektantów:
 - wyższa wytrzymałość, smuklejsze i lżejsze konstrukcje,
 - szybsza stabilizacja strat sprężenia i tolerancji montażowych,
 - większe możliwości konstrukcyjne, np. ustroje zespolone,
- dla wykonawców:
 - wysoka wytrzymałość betonu umożliwiająca wczesne obciążanie konstrukcji a zarazem przyspieszenie realizacji obiektu,
 - możliwość dobierania urabialności i czasu przerobu mieszanki stosownie do wymagań transportu i układania betonu,
- dla inwestorów:
 - uzyskiwanie korzystniejszych funkcjonalnych cech obiektów, np. mniejszych przekrojów słupów, większych rozpiętości,
 - wyższa jakość konstrukcji, w tym uzyskiwanie powierzchni niewymagających wykończenia,
 - zdecydowanie większa trwałość, w różnych aspektach fizycznych i chemicznych,
 - ograniczenie zabiegów konserwacyjnych w toku eksploatacji,
- dla środowiska:
 - zmniejszenie zużycia materiałów i wysoka estetyka obiektów,
 - wysoka trwałość wznoszonych obiektów w całym cyklu życia (oszczędność naturalnych kopalin).

5.2.5.3. Beton architektoniczny

Beton architektoniczny stanowi szczególny rodzaj betonu umożliwiającego wykonanie elementów spełniających, zarówno wymogi konstrukcyjne, jak również estetyczne, bez konieczności stosowania dodatkowych zabiegów technologicznych, jak tynkowanie (rys. 5.118, rys. 5.119). W celu zagwarantowania tych właściwości wymagana jest szczególna dokładność i staranność na etapie przygotowania oraz zabudowy mieszanki betonowej.

Beton architektoniczny podlega specjalnej procedurze projektowania z uwagi na wymagania odnośnie jakości powierzchni. Powierzchnia betonu architektonicznego wpływa na wizualny charakter obiektu.

Za beton architektoniczny uważa się nie tylko beton uzyskiwany przez pozostawienie go w jego naturalnej formie po rozdeskowaniu, ale także beton, którego powierzchnia została poddana barwieniu przy zachowaniu faktury i/lub obróbce, np. przez szlifowanie, groszkowanie, spiekanie itd. Warunkiem koniecznym jest wykonanie takiego betonu z zachowaniem odpowiedniego „reżimu” technologicznego, który ma zapewnić uzyskanie wymaganej jakości i struktury powierzchni.



Rys. 5.118. Włoski pawilon wystawienniczy na targach EXPO 2015

Ze względu na brak norm dotyczących betonu architektonicznego ocena jakości wykonania tego rodzaju betonu jest subiektywna, co pociąga za sobą liczne problemy związane z odbiorem prac budowlanych oraz doбором receptur mieszanek betonowych.



Rys. 5.119. a) Teatr Nowy w Pilźnie, b) Betonowe kielichy na dworcu w Katowicach

Na etapie specyfikowania wymagań związanych z estetyką powierzchni elementu architektonicznego pomocne stają się wytyczne zawarte w literaturze specjalistycznej. Wytyczne polskie wprowadzają podział betonu architektonicznego na trzy kategorie (tabela 5.51, tabela 5.52) zawierające szereg wymagań dotyczących m.in: porowatości (tabela 5.53), faktury (tabela 5.54), równomierności zabarwienia (tabela 5.55), kategorii deskowania (tabela 5.56).

Tabela 5.51. Kategorie betonu architektonicznego kształtowanego przed zabudowaniem

Kategoria	Koszty	Opis
BA1 Małe wymagania	niskie	Powierzchnie betonowe o małych wymaganiach dotyczących wyglądu, np.: ściany piwnic, ściany parkingów podziemnych itp.
BA2 Średnie wymagania	średnie	Powierzchnie betonowe o typowych wymaganiach dotyczących wyglądu, np.: ściany klatek schodowych.
BA3 Wysokie wymagania	wysokie/ bardzo wysokie	Powierzchnie betonowe z wysokimi wymaganiami dotyczącym wyglądu, np.: elewacje, reprezentacyjne elementy budowli.

Tabela 5.52. Kategorie betonu architektonicznego kształtowanego przed zabudowaniem

Kategoria	Faktura	Porowatość	Równo- mierność zabarwienia	Element referencyjny	Kategorie deskowania
BA1	F1	P1	RZ1	dowolny wybór	KD1
BA2	F2	P2	RZ2	zalecany	KD2
BA3	F3	P3	RZ3	wymagany	KD3

Tabela 5.53. Wymagania dotyczące porowatości powierzchni betonowych architektonicznych uzyskiwanych w wyniku odwzorowania deskowania

Porowatość*	Wymagania
P1	– maksymalna liczba porów – ok. 3000 mm ² **, ***
P2	– maksymalna liczba porów – ok. 2350 mm ² **, *** – dodatkowe wymagania: + sprawdzenie interakcji między mieszanką betonową, środkiem antyadhezyjnym i deskowaniem, + stosowanie tego samego rodzaju deskowania i sposobu jego przygotowania, + zapewnienie czystości deskowania, równomiernego nałożenia środka antyadhezyjnego, + przygotowanie powierzchni próbnej
P3	– maksymalna liczba porów ok. 1600 mm ² **, *** – dodatkowe wymagania: + wszystkie dodatkowe dla kategorii P2, + wykluczenie zmian w składzie betonu, + wykluczenie stosowania składników (wody i kruszywa) z recyklingu, + przygotowanie co najmniej 2 powierzchni próbnych.

* powierzchnia porów o średnicy ϕ w granicach 2 mm $\leq \phi < 15$ mm.
 ** powierzchnia porów na standardowej powierzchni kontrolnej o wymiarach 500 mm \times 500 mm.
 *** w przypadku stosowania deskowania chłonnego należy przyjąć maksymalną powierzchnię porów odpowiednio na poziomie P1 – do 3000 mm², P2 – do 2000 mm², P3 – do 1000 mm².

Tabela 5.54. Wymagania dotyczące powierzchni betonowych architektonicznych uzyskiwanych w wyniku odwzorowania deskowania

Faktura	Wymagania (faktura, styk elementów deskowania, przerwy konstrukcyjne i technologiczne)
F1	<ul style="list-style-type: none"> – przeważająca jednorodna powierzchnia betonu, – warstwa zaczynu zaprawy w złączach elementów deskowania o szerokości $\leq 20\text{mm}$, grubości $\leq 10\text{mm}$ – dozwolony odcisk ramy elementu deskowania, – dopuszczalne przesunięcia płaszczyzn $\leq 10\text{ mm}$
F2	<ul style="list-style-type: none"> – przeważająca jednorodna i zamknięta powierzchnia betonu, – warstwa zaczynu /zaprawy w złączach elementów deskowania o szerokości $\leq 10\text{mm}$, grubości $\leq 5\text{mm}$, – dozwolony odcisk ramy elementu deskowania. – dodatkowe wymagania: <ul style="list-style-type: none"> + stosowanie tego samego rodzaju deskowania i sposobu jego przygotowania, + zapewnienie czystości deskowania, równomiernego nałożenia środka antyadhezyjnego, + ustalony sposób uszczelnienia styków deskowania, + ustalony rodzaj wkładek dystansowych, + stosowanie deskowania tej samej jakości powierzchni, + przygotowanie powierzchni próbnej. + przesunięcia płaszczyzn w miejscu przerwy – maksymalnie do 10 mm
F3	<ul style="list-style-type: none"> – przeważająco gładka, zamknięta, jednorodna powierzchnia betonu, – warstwa zaczynu/zaprawy w złączach elementów deskowania o szerokości $\leq 3\text{mm}$, – dalsze wymogi odnośnie np. złącz deskowania, odcisku ramy, należy szczegółowo ustalić, – dodatkowe wymagania: <ul style="list-style-type: none"> + wszystkie dodatkowe dla kategorii F2, + szczegółowe zaprojektowanie deskowania (styki, uszczelnienia, rozmieszczenie blatów, itd.), + ochrona deskowania przed warunkami atmosferycznymi, + ustalenie krótkiego odstępu od montażu deskowania do przeprowadzenia betonowania, + określenie wytycznych do wykonania szczelin roboczych (listwa trapezowa, szczelina łącząca, itd.), + opracowanie instrukcji wykonania, + zapewnienie ochrony wykonanym elementom (zabezpieczenie naroży, ochrona przed zabrudzeniem), + dopuszczalne przesunięcia płaszczyzn w miejscu przerwy roboczej $\leq 5\text{ mm}$

Tabela 5.55. Wymagania dotyczące powierzchni betonowych architektonicznych uzyskiwanych w wyniku odwzorowania deskowania

Równo- mierność zabarwienia	Wymagania
RZ1	<ul style="list-style-type: none"> – dopuszczalna zmiana zabarwienia i uzyskanie jasnej/ciemnej barwy, – niedopuszczalne są rdza i brudne zacieki
RZ2	<ul style="list-style-type: none"> – dopuszczalne równomierne, wielkopowierzchniowe zmiany odcienia na jasny/ciemny, – niedopuszczalne są rdza i brudne zacieki, – niedopuszczalne jest stosowanie różnych rodzajów poszycia deskowania (sklejki), materiałów wykończeniowych. – dodatkowe wymagania: <ul style="list-style-type: none"> + wszystkie dodatkowe jak dla P3, + czas mieszania betonu ≥ 60 sekund, + wykonanie większej ilości powierzchni próbnych.
RZ3	<ul style="list-style-type: none"> – niedopuszczalne są wielkopowierzchniowe zmiany zabarwienia, spowodowane różnego rodzaju materiałami wykończeniowymi, różnorodnie rodzaje powierzchni deskowania oraz różna końcowa obróbka betonu, – dopuszczalne są niewielkie zmiany zabarwienia, – niedopuszczalne są rdza, brudne zacieki, wyraźnie widoczne poszczególne warstwy wbudowanej mieszanki, jak również zmiany w zabarwieniu, – wybór specjalnego i właściwego środka adhezyjnego, – dodatkowe wymagania: <ul style="list-style-type: none"> + wszystkie dodatkowe jak dla kategorii RZ2, + uwzględnienie zmiany czasu rozdeskowania ze względu na zmianę warunków atmosferycznych, + ustalenie rozmieszczenia zbrojenia, aby uniemożliwić zetknięcie się buławy wibracyjnej z deskowaniem i zbrojeniem, + ustalenie miejsca rzutu mieszanki do deskowania w równych odstępach, + geometria elementów konstrukcji i układ zbrojenia musi pozwalać na szybki proces betonowania, + należy zachować w/c na poziomie $+ 0,02$ lub zachować konsystencję z dokładnością do $+ 20$ mm.
<p><i>Całkowite wyeliminowanie zmian odcienia betonu nie jest możliwe (nawet przy najwyższej dbałości i zachowaniu wszystkich zasad)</i></p>	

Tabela 5.56. Kategorie deskowania

Deskowanie	KD1	KD2	KD3*
Otwory wiercone	dozwolone	dozwolone (do naprawy)	niedozwolone
Otwory po gwoździach i śrubach	dozwolone	dozwolone bez odprysków	dozwolone jako miejsca napraw po akceptacji zleceniodawcy
Uszkodzenie deskowania w wyniku działania wibratora pograżanego	dozwolone	niedozwolone/ dozwolone po akceptacji zleceniodawcy	niedopuszczalne
Zadrapania	dozwolone	dozwolone jako miejsca napraw**	dozwolone jako miejsca napraw po akceptacji zleceniodawcy
Resztki betonu	dopuszczalne tylko w zagłębieniach, np. otwory po gwoździach	niedozwolone	niedozwolone
Zabrudzenia zaczynem cementowym	dozwolone	niedozwolone	niedozwolone
Małe fałdki, zmarszczenia sklejki, w obszarze wiercenia, gwoździowania („ripplings”)	dozwolone	niedozwolone/ dozwolone po akceptacji zleceniodawcy	niedozwolone
Miejscowe naprawy	dozwolone	dozwolone	niedozwolone/ dozwolone po akceptacji zleceniodawcy
Element referencyjny	dowolne	zalecane	wymagane
* prawdopodobieństwo jednorazowego użycia deskowania			
** wszelkie naprawy deskowania muszą być przeprowadzone przez wykwalifikowany i kompetentny personel, deskowanie musi być przed zastosowaniem sprawdzone			

Wytyczne niemieckie wprowadzają klasyfikację betonu architektonicznego (tabela 5.57) ze względu na teksturę (tabela 5.58), porowatość (tabela 5.59), jednorodność koloru (tabela 5.60), a także równość powierzchni, przerw roboczych.

Tabela 5.57. Wytyczne niemieckie dla betonów architektonicznych

Klasa betonu architektonicznego	Przykład	Wymogi stawiane powierzchni licowej elementu						Wymagania dodatkowe		Koszty		
		tekstura	porowatość		jednorodność koloru		równość powierzchni	przerwy robocze i fugi deskowania	obszar referencyjny		klasa deskowania	
			s ¹⁾	ns ²⁾	s ¹⁾	ns ²⁾						s ¹⁾
Niewielkie	Powierzchnie betonu z niskimi wymaganiami estetycznymi. Ściany piwnic lub obszary o przeznaczeniu głównie handlowym	SB 1	T1	P1	FT1	FT1	E1	AF1	zwolniony	SHK1	Niskie	
	Normalne	Powierzchnie betonu z normalnymi wymaganiami estetycznymi. Klatki schodowe, ściany pomocnicze	SB 2	T2	P2	FT2	FT2	E1	AF2	zalecany	SHK2	Średnie
Wysokie	Powierzchnie betonu z wysokimi wymaganiami estetycznymi. Fasady budynku	SB 3	T2	P3	FT2	FT2	E2	AF3	szczególnie zalecany	SHK2	Wysokie	
	Powierzchnie betonu o szczególnie wysokim znaczeniu estetycznym. Reprezentatywne elementy budynku	SB 4	T3	P4	FT2	FT3	E3	AF4	wymagany	SHK3	Bardzo wysokie	
Podział ze względu na wymagania powierzchni												

1) Deskowania chłonne, 2) Deskowania niechłonne

Tabela 5.58. Klasy tekstury

Klasa	Wymagania
T1	Powierzchnia zamknięta, dopuszczalny wypływ zaczynu w obszarze styku deskowań do 20mm szerokości i 10mm głębokości oraz odbicie ram konstrukcyjnych
T2	Powierzchnie zamknięte o dużym stopniu jednolitości, dopuszczalny wypływ zaczynu w obszarze styku deskowań do 10mm szerokości i 5mm głębokości oraz odbicie ram konstrukcyjnych i klawiszowanie płyt szalunkowych do ok. 5mm
T3	Gładkie, zamknięte powierzchnie o wysokim stopniu jednorodności. Dozwolony wypływ zaczynu i spoiny technologiczne szerokości 3mm

Tabela 5.59. Klasy porowatości

Klasa	Suma powierzchni porów o średnicy $2 \pm 15 \mu\text{m}^*$	
P1	do 3000 mm ²	zliczona na powierzchni badanej 500x500 [mm ²]
P2	do 2250 mm ²	
P3	do 1500 mm ²	
P4	do 750 mm ²	
* pory o wielkości powyżej 15mm uznawane są za defekt		

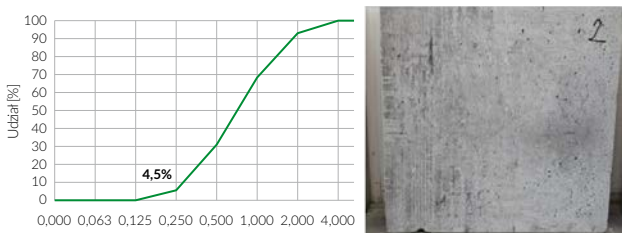
Tabela 5.60. Klasy równomierności odcienia koloru

Klasy	Wymagania
FT1	Dozwolone są ciemne i jasne plamy lub powierzchnie. Zanieczyszczenia powierzchniowe oraz ślady rdzy są niedozwolone
FT2	Dozwolone są powierzchnie o umiarkowanej różnicy w odcieniach. Zanieczyszczenia powierzchniowe oraz ślady rdzy są niedozwolone, niedopuszczalne jest stosowanie różnych technik obróbki powierzchni oraz zmian w surowcach do produkcji mieszanki betonowej
FT3	Dozwolone są powierzchnie o znikomej różnicy w odcieniach. Zanieczyszczenia i ślady rdzy są niedozwolone, niedopuszczalne jest stosowanie różnych technik obróbki powierzchni oraz zmian w surowcach do produkcji betonu, niedopuszczalne są naprawy powierzchni. Konieczne jest określenie wpływu środka antyadhezyjnego.

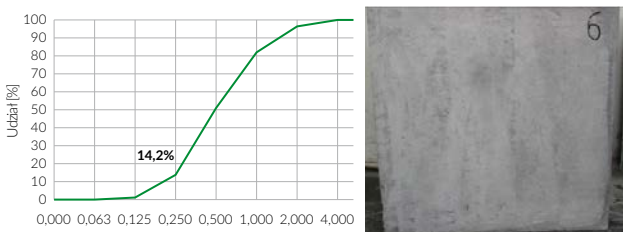
Uzyskanie odpowiedniego efektu architektonicznego wymaga:

- zdefiniowania wymagań dotyczących betonu,
- odpowiedniego doboru proporcji i składników mieszanki betonowej,
- wprowadzenie dodatkowych procedur kontroli składników, wytwarzania oraz transportu mieszanki betonowej,
- odpowiedniego przygotowania form, środków antyadhezyjnych oraz prawidłowego procesu zabudowy i pielęgnacji betonu,
- pełnej współpracy wytwórcy i odbiorcy mieszanki betonowej.

Dobór składników betonu powinien uwzględniać konieczność stosowania w składzie odpowiednio wysokiej zawartości frakcji drobnych ($< 0,125$ mm), wliczając zarówno frakcje pochodzące z kruszywa, jak i cement oraz dodatki. Niezwykle istotną rolę odgrywa odpowiedni dobór kruszywa drobnego (piasku), szczególnie zawartość frakcji poniżej 0,25 mm. Zastosowanie zbyt „grubego” piasku skutkować może wzmożonym wydzieleniem wody (bleedingiem), zarówno powierzchniowym, jak i wewnętrznym oraz zwiększeniem udziału porów na powierzchni elementu betonowego (rys. 5.120, rys. 5.121). Należy także zgromadzić odpowiednią ilość składników do wykonania określonej partii elementów w technologii betonu architektonicznego (podobny kolor i odcień).



Rys. 5.120. Wpływ zastosowania piasku o niskiej zawartości frakcji poniżej 0,25 mm (4,5 %) na jakości powierzchni elementu referencyjnego



Rys. 5.121. Wpływ zastosowania piasku o zawartości frakcji poniżej 0,25 mm (14,2%) na jakości powierzchni elementu referencyjnego

Proces doboru ilościowego i jakościowego poszczególnych składników mieszanki betonowej wymusza na technologu uwzględnienie dodatkowych wymagań,

takich jak: zapewnienie odpowiedniej urabialności i odporności na segregację mieszanki betonowej oraz ocenę wpływu poszczególnych składników na estetykę powierzchni wykonywanego elementu (równomierny odcień barwy, brak raków), szczególnie w przypadku stosowania popiołu lotnego. Stosując popiół lotny należy zwrócić uwagę na zawartość strat prażenia, która świadczy o obecności cząsteczek niespalonego węgla w postaci koksiku o dużym rozwinięciu powierzchni. Popiół lotny krzemionkowy posiadający wysoką zawartość strat prażenia absorbuje składniki ciekłe mieszanki betonowej, w tym domieszki chemiczne, powodując szybką utratę właściwości reologicznych oraz obniżenie trwałości betonu. Zawarty w popiele lotnym niespalony węgiel, zmienia barwę powierzchni betonu prowadząc do zmiany odcienia fragmentów powierzchni (rys. 5.122). Z tego względu, w betonach architektonicznych klas BA2 i BA3 (niemieckie klasy SB3 oraz SB4), należy zapewnić powtarzalność właściwości popiołu lotnego stosowanego na poszczególne elementy, a jego ilość w składzie betonu należy ograniczyć do minimum wynikającego z potrzeby uzyskania odpowiedniego efektu powierzchni i właściwości reologicznych mieszanki betonowej.



Rys. 5.122. Zmiany zabarwienia powierzchni betonu spowodowane różną zawartością strat prażenia w popiele lotnym

Dobór konsystencji mieszanki betonowej zależy od rodzaju oraz wymiarów wykonywanego elementu oraz od geometrii zastosowanego zbrojenia. Zazwyczaj dla mieszanek betonowych zagęszczanych mechanicznie konsystencja zawiera się w klasach S3 do S4, natomiast dla betonów samozagęszczalnych SF2 do SF3. Współczynnik w/c nie powinien być większy niż 0,55. Szczególnie ważne jest, aby zachować powtarzalność konsystencji i współczynnika w/c w czasie realizacji danej konstrukcji (elementów betonowych). Różnice konsystencji i współczynnika w/c mogą prowadzić do wyraźnych różnic w odcieniach poszczególnych obszarów elementu architektonicznego (rys. 5.123).



Rys. 5.123. Powierzchnia betonu z widoczną różnicą w odcieniach spowodowaną brakiem stałości konsystencji

Na etapie wykonywania elementów z betonu architektonicznego, należy zwrócić uwagę na:

- sprawdzenie deskowania przed zastosowaniem (jakość powierzchni sklejk deskowaniowej, równomierność naprężenia kotw deskowaniowych, odpowiednie pokrycie lakierem ciętych krawędzi płyt deskowania),
- stan czystości deskowania, zwłaszcza pod kątem zanieczyszczeń organicznych oraz resztek pochodzących z prac zbrojarskich,
- konieczność stosowania dodatkowych uszczelnień (zwłaszcza przy stosowaniu mieszanek betonów samozagęszczalnych),
- stosowanie, na tej samej powierzchni, płyt szalunkowych pochodzących od jednego producenta,
- właściwy dobór środka antyadhezyjnego,
- odpowiednie rozprowadzenie środka antyadhezyjnego.

W kategorii BA2 i BA3 (odpowiednio niemieckie klasy betonu architektonicznego: SB2, SB3, SB4) zaleca się przygotowanie powierzchni próbnej, należy ocenić wzajemne oddziaływanie rodzaju betonu, środka antyadhezyjnego oraz deskowania. Wykonanie elementu referencyjnego powinno odbyć się dla zakładanej receptury mieszanki betonowej oraz techniki zagęszczenia i pielęgnacji, które mają być zastosowane na późniejszych etapach prac. Niezwykle istotne jest ocenianie betonu architektonicznego z przyjętego odstępów obserwacyjnego, co powinien ustalić Wykonawca w Planie Zapewnienia Jakości (PZJ). Bardzo częstym błędem przy odbiorze powierzchni jest ustawianie się obserwatora w niewielkiej odległości od ocenianej konstrukcji. Każdy element konstrukcji powinien być poddawany ocenie z odległości przewidzianej jako standardowa dla późniejszego użytkownika. W pierwszej kolejności należy oceniać ogólne wrażenie z odstępów obserwacyjnego, odnosząc uzyskane efekty do wyglądu elementu referencyjnego. Dopiero, gdy ogólny wizerunek nie odpowiada wyma-

ganiom należy oceniać poszczególne wyspecyfikowane parametry. Uzyskanie zakładanego efektu architektonicznego zależy od wszystkich etapów realizacji konstrukcji, wliczając dobór składników betonu, odpowiednie przygotowanie szalunków (dobór środków antyadhezyjnych), zabudowę mieszanki betonowej oraz proces pielęgnacji betonu. Należy zapewnić również stałość składu betonu pod kątem ilościowym, jak i jakościowym. w czasie realizacji obiektu. Nawet przy największej dbałości i zachowaniu zasad nie da się całkowicie uniknąć zmian odcienia betonu. Od jakości powierzchni betonu architektonicznego można oczekiwać wiele. Jednak jego wykonanie uzależnione jest od szeregu czynników po stronie wykonania, a nie tylko od dostarczanej mieszanki betonowej. Niezwykle istotne jest również zdanie sobie sprawy, że na betonie mogą powstać pewne niedociągnięcia. Jest to nieodłączna cecha tego materiału.

5.2.5.4. Beton ciężki

Norma PN-EN 206+A2:2021 definiuje beton ciężki, jako beton o gęstości w stanie suchym większej niż 2600 kg/m^3 . Ze względu na wytrzymałość na ściskanie jest klasyfikowany tak jak beton zwykły. Beton ciężki klasyfikuje się jest jako beton specjalny ze względu na stosowanie kruszyw ciężkich, których ciężar właściwy przekracza 4000 kg/m^3 (baryt, magnetyt) i specjalne przeznaczenie. W tabeli 5.61 zestawiono kruszywa ciężkie o najwyższej gęstości, na rys. 5.124 przykłady najczęściej stosowanych kruszyw ciężkich.

Tabela 5.61. Gęstość i skład chemiczny kruszyw ciężkich

Rodzaj kruszywa	Gęstość nasypowa (kg/m^3)	Ciężar właściwy (kg/m^3)	Skład chemiczny głównego minerału występującego w kruszywie
Limonit	2100 ÷ 2400	3400÷3800	$(\text{HFeO}_2)_x(\text{H}_2\text{O})_y$
Goethyt	2100 ÷ 2250	3500÷4500	HFeO_2
Baryt	2300 ÷ 2250	4000÷4400	BaSO_4
Ilmenit	2250 ÷ 2700	4200÷4800	FeTiO_3
Hematyt	2900 ÷ 3200	4600÷5200	Fe_2O_3
Magnetyt	2400 ÷ 3050	4600÷5200	FeFe_2O_4



Rys. 5.124. Kruszywa ciężkie: a) baryt, b) magnetyt, c) hematyt

Beton ciężki stosowany jest jako zabezpieczenie (osłona) przed szkodliwym promieniowaniem jonizującym. Wykonuje się z niego elementy konstrukcji (ściany, stropy) w pomieszczeniach osłonowych (bunkrach) w:

- szpitalach onkologicznych,
- jednostkach naukowo-badawczych,
- elektrowniach atomowych.

Z uwagi na duży ciężar objętościowy stosowany może być także w konstrukcjach przeciwwag, np. do żurawi wieżowych.

5.2.5.5. Beton lekki

Beton lekki wg normy PN-EN 206+A2:2021 to beton o gęstości w stanie suchym nie mniejszej niż 800 kg/m³ i nie większej niż 2000 kg/m³. Norma wprowadza klasyfikację betonu lekkiego ze względu na gęstość (tabela 5.62) oraz wytrzymałość na ściskanie (tabela 5.27).

Tabela 5.62. Klasy gęstości betonu lekkiego wg PN-EN 206+A2:2021

Klasa gęstości betonu lekkiego	Gęstość [kg/m ³]	
D 1,0	≥ 800	≤ 1000
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

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.

Beton lekki uzyskuje się poprzez wprowadzenie do mieszanki betonowej porów powietrza, w jeden z trzech możliwych sposobów:

- w ziarnach kruszywa lekkiego (beton lekki kruszywowy),
- w zaczynie cementowym (beton komórkowy),
- pomiędzy ziarna kruszywa grubego w betonach wytwarzanych bez kruszywa drobnego (beton jamisty).

W tabeli 5.63 przedstawiono systematykę betonów lekkich z uwagi na technologię produkcji oraz strukturę materiału.

Tabela 5.63. Podział 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			nie auto- klawizowany	auto- klawizowany
z kruszywem mineralnym				

Beton lekki o strukturze zwartej znajduje zastosowanie głównie w prefabrykacji. Beton lekki jest produkowany z zastosowaniem, wyłącznie lub częściowo, kruszywa lekkiego (rys. 5.125). Norma PN-EN 1992 „Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu” dodatkowo precyzuje, że lekki beton kruszywowy do celów konstrukcyjnych musi mieć strukturę zwartą. Zgodnie z definicją podaną w normie PN-EN 1520 „Prefabrykowane elementy z betonu lekkiego kruszywowego o otwartej strukturze” beton lekki kruszywowy to beton o gęstości nie większej niż 2000 kg/m^3 , dodatkowo charakteryzujący się zawartością objętościową pustek międzyziarnowych powyżej 3%. Beton lekki o strukturze otwartej wykonywany jest z kruszyw lekkich, w którym zredukowana została zawartość kruszywa drobnego i/lub materiałów wiążących.

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.



Rys. 5.125. Beton lekki o strukturze zwartej

Do betonów lekkich konstrukcyjnych stosowane są głównie kruszywa pochodzenia mineralnego, o gęstości ziaren w stanie suchym nie większej niż 2000 kg/m^3 lub gęstości nasypowej w stanie luźnym nie większej niż 1200 kg/m^3 . Z reguły stosuje się kruszywa o gęstości przekraczającej 900 kg/m^3 . Klasyfikację kruszyw lekkich, odpowiadającą podziałowi na cztery grupy według PN-EN 13055-1, przedstawiono na rys. 5.126, a przykłady kruszyw lekkich na rys. 5.127.



Rys. 5.126. Klasyfikacja kruszyw lekkich do betonu



Rys. 5.127. Kruszywo lekkie a) naturalne - ziarno pumeksu, b) sztuczne z surowców mineralnych - spiekane z glin pęczniejących, c) odpadowe - szkło ekspandowane

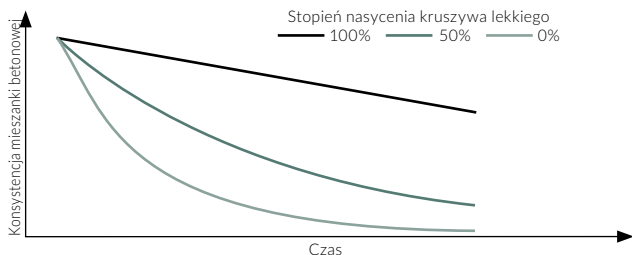
W wielu przypadkach równie istotną cechą, jak gęstość jest porowatość kruszyw lekkich, a szczególnie struktura tej porowatości. Kruszywa o podobnej gęstości ziaren mogą charakteryzować się znacząco różnymi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi.

Z reguły proces spiekania kruszyw sztucznych gwarantuje ograniczenie porowatości otwartej, w szczególności w zewnętrznej powłoce ziaren, sprzyjając wzrostowi wytrzymałości oraz ograniczeniu nasiąkliwości. 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 wnętrzach 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 absorpcji 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. 5.103 schematycznie przedstawiono stany w jakich może znajdować się kruszywo: wysuszone w suszarce, powietrzno-suche, nasycone powierzchniowo suche oraz wilgotne lub mokre.

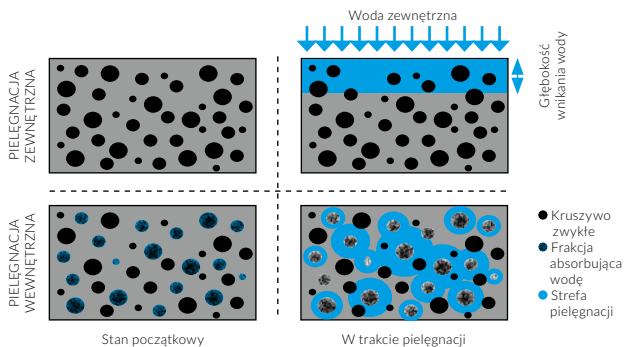
Stan wilgotnościowy kruszyw stosowanych do produkcji betonu lekkiego ma wpływ, zarówno na cechy mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Kruszywa lekkie o wysokiej nasiąkliwości nie w pełni nasycone, absorbują wodę z mieszanki betonowej powodując duży spadek konsystencji mieszanki w trakcie transportu (rys. 5.128). 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 hydratacji cementu podczas twardnienia mieszanki betonowej, zapewniając wewnętrzną pielęgnację betonu lekkiego. W efekcie betony lekkie kruszywowe nasycone wcześniej wodą są mniej wrażliwe na niewłaściwą pielęgnację zewnętrzną. Natomiast proces wysychania betonów lekkich jest zdecydowanie dłuższy w porównaniu do betonów zwykłych i może mieć niekorzystny wpływ na właściwości użytkowe betonu.



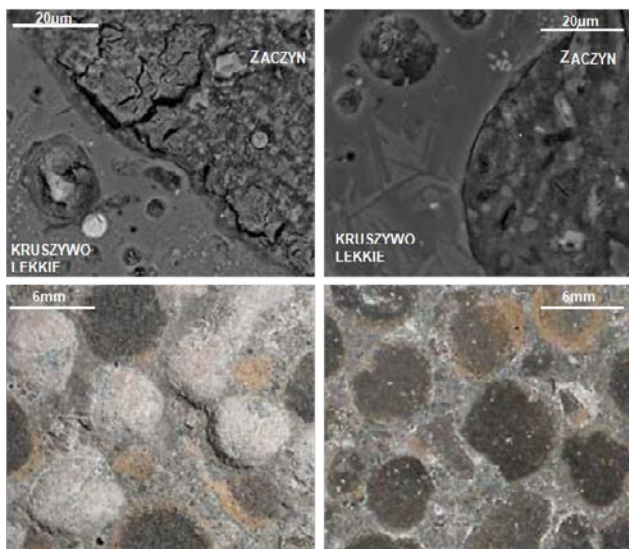
Rys. 5.128. Konsystencja mieszanki betonowej w zależności od stopnia nasycenia kruszywa lekkiego

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 za 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. 5.130).



Rys. 5.129. Mechanizm pielęgnacji zewnętrznej i wewnętrznej betonu



Rys. 5.130. Uszczelnienie matrycy cementowej w strefie przejściowej zaczyn-ziarno kruszywa

Odpowiedni proces wstępnego nawilżenia kruszywa lekkiego, 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 utraty 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), z tego względu przy podawaniu betonów lekkich pompą, należy zachować szczególną ostrożność. Zapewnienie pompowalności betonów lekkich wymaga ich odpowiedniej modyfikacji poprzez stosowanie dodatków, 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 pompowalność przy konsystencji mierzonej opadem stożka ok. 200 mm lub metodą rozpląwu powyżej 650 mm. Warunkiem koniecznym uzyskania pompowalnego 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 nasycenia 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. Pompowalność 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/m³. Dodatkowo, w celu zapewnienia dobrej pompowalności, zaleca się ciągłą krzywą uziarnienia. W przypadku betonów konstrukcyjnych lekkich warunki te najczęściej spełnione są samoistnie.

Uzyskanie betonów lekkich samozagęszczalnych 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/m³, 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 pęźaniem. 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÷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. Ponadto zastosowanie kruszywa lekkiego (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).

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 zarobów próbnych i sprawdzeniu rzeczywistych proporcji składników, poddaje się ewentualnej korekcie. Możliwości kształtowania składu betonu lekkiego przedstawiono na rys. 5.131.



Rys. 5.131. Kształtowanie składu betonu lekkiego w zależności od założonych właściwości

Przy projektowaniu betonów lekkich kryterium doboru największej zawartości kruszywa w jednostce objętości betonu niekoniecznie jest właściwe. Porowate kruszywa sztuczne nie są bowiem ani najtańszym, ani najmocniejszym składnikiem betonu. Dlatego też ich zawartość w betonach stosowanych w praktyce waha w tak znacznym zakresie jak od 30 do 75% objętościowo. Ponadto, ze względu na lepszą przyczepność zaczynu cementowego do kruszyw lekkich, wpływ proporcji objętościowych obu tych składników na wytrzymałość betonu ma większe znaczenie niż w przypadku betonów zwykłych. Niestety wpływ ten jest nie tak oczywisty jak mogłoby się wydawać. Nie zawsze bowiem wzrostowi zawartości słabszego kruszywa towarzyszy spadek wytrzymałości betonu. W przypadku, gdy dochodzi do redukcji współczynnika w/c w mieszance betonowej w wyniku absorpcji wody przez porowate kruszywo, efekt wzmocnienia matrycy cementowej może zrekompensować zwiększony udział słabszego składnika, wpływając korzystnie na wytrzymałość całego kompozytu.

Zastosowanie betonu lekkiego:

- budownictwo mostowe (możliwość uzyskania większej rozpiętości),
- ściany o podwyższonej izolacyjności cieplnej,
- wylewki do podłóg i stropów (podbudowa dla systemów podłóg pływających, warstwa wyrównawcza w systemach ogrzewania podłogowego),
- wypełnienia przestrzeni (np. wokół przewodów, wypełnienie nisz w gruntach i elementach budowlanych),
- nawierzchnie i podbudowy wodoprzepuszczalne,
- prefabrykacja drobno- i wielowymiarowa,
- konstrukcyjne betony lekkie do renowacji obiektów zabytkowych w których zastępują pierwotnie zastosowany materiał (korzystna relacja niskiej gęstości i odpowiednio wysokiej wytrzymałości).

Korzyści wynikające ze stosowania betonu lekkiego:

- obniżenie masy konstrukcji (konstrukcyjny beton lekki):
 - zmniejszenie przekroju elementów nośnych,
 - zmniejszenie wymiarów fundamentów,
 - wykonywanie budowli na gruncie o niskiej nośności,
- lepsza izolacja cieplna (beton izolacyjny) pozwalająca na oszczędność energii,
- możliwość wykonania nowoczesnych wodoprzepuszczalnych nawierzchni i podbudów (beton jamisty - rys. 5.132),
- izolacyjność akustyczna pozwalająca na tłumienie dźwięków.

Pomimo szerokich możliwości zastosowań konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych betonów lekkich, liczba wykonanych realizacji jest wciąż 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 znacznie bardziej skomplikowany,
- dostępność kruszyw lekkich jest ograniczona,
- produkcja betonu lekkiego wymaga dodatkowych zabiegów technologicznych, przez co obciążona jest większym ryzykiem błędów.



Rys. 5.132. Beton jamisty

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 różnią się w bardzo znacznym zakresie, nieporównywalnie szerszym niż w przypadku kruszyw zwykłych.

Kolejność dozowania składników betonów lekkich również ma wpływ na projektowane właściwości. Poprawie szczelności strefy stykowej sprzyja mieszanie w pierwszej kolejności nawilżonego kruszywa lekkiego wraz z cementem, a dopiero później dozowanie pozostałych składników: dodatków, piasku naturalnego i reszty wody zarobowej. Domieszki upłynniające powinny być dozowane z ostatnią partią wody zarobowej, w przeciwnym wypadku mogą być absorbowane przez kruszywo. Mieszanki wykonywane z kruszywami nie w pełni nasyconymi wymagają również dłuższego czasu mieszania i zagęszczania. W przypadku mieszanek z kruszywami wykazującymi dużą dynamikę rozwoju nasiąkliwości w czasie po zmieszaniu składników konieczne może być wtórne mieszanie.

Uzyskanie właściwości betonów lekkich jest uzależnione od odpowiedniego doboru rodzaju betonu lekkiego i prawidłowego podejścia do procesu produkcji. Sukces uzyskania betonu lekkiego spełniającego wyspecyfikowane parametry można osiągnąć poprzez popularyzację odpowiednich wytycznych do projektowania i wykonania betonów lekkich.

5.2.5.6. Beton komórkowy

Norma betonowa PN-EN 206 nie obejmuje zakresem betonu komórkowego. Normami wiodącymi dla elementów prefabrykowanych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) są normy z serii PN-EN 771 oraz PN-EN 772. W tabeli 5.64 przedstawiono klasyfikację ABK ze względu na średnią wytrzymałość na ściskanie w stanie wilgotności $6\pm 2\%$ masy (wg PN-EN 771-4).

Tabela 5.64. Klasyfikacja elementów murowych ABK

Klasa wytrzymałości na ściskanie	Średnia wytrzymałość na ściskanie, [N/mm ²]
1,5	1,5
2,0	2,0
2,5	2,5
3,0	3,0
3,5	3,5
4,0	4,0
4,5	4,5
5,0	5,0
6,0	6,0
7,0	$\geq 7,0$

Autoklawizowany beton komórkowy (gazobeton) jest produkowany w procesie obróbki hydrotermalnej w wysokociśnieniowych autoklawach (rys. 5.133). Jest to lekki, porowaty materiał budowlany, o niskiej gęstości objętościowej (w praktyce dla betonu produkowanego w Polsce zakres gęstości objętościowej wynosi od 300 do 700 kg/m³), zawierający znaczne ilości zamkniętych porów sferycznych wypełnionych w 90% powietrzem (rys. 5.134). ABK charakteryzuje się również jednorodną strukturą, wytrzymałością na ściskanie, wysoką izolacyjnością cieplną i dużą ognioodpornością.



Rys. 5.133. Autoklaw wysokociśnieniowy do produkcji wyrobów z ABK



Rys. 5.134. Struktura betonu komórkowego

Beton komórkowy produkowany jest z następujących składników:

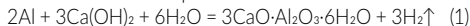
- spoiwa – cement, wapno, gips,
- kruszywa - piasek, popiół lotny, żużel wielkopieczowy, inne surowce krzemionkowe,
- środka porotwórczego – proszek aluminowy, pasta aluminowa,
- wody,
- składników dodatkowych – poprawiających właściwości reologiczne masy zarobowej, wpływających na proces twardnienia masy, itp.

Do produkcji 1 m³ masy (czyli nawet do 5 m³ betonu komórkowego) zużywa się 135 kg spoiwa, (cementu i wapna) oraz 16 kg gipsu, 235 kg piasku, 225 kg wody i zaledwie 0,50 kg proszku aluminowego – rys. 5.135.

Wyróżnia się 5 podstawowych etapów produkcji ABK (rys. 5.135):

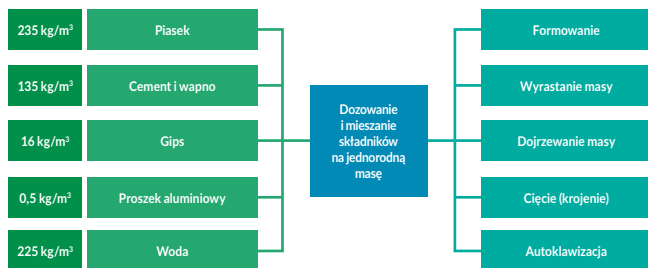
- 1) przygotowanie i mieszanie składników,
- 2) wyrastanie masy - w procesie tym istotną rolę odgrywa proszek aluminowy (pasta), który powinien charakteryzować się odpowiednią reaktywnością w czasie; istotnym jest, żeby nie wykazywał reaktywności przez okres przebywania w mieszarce, a dopiero w po ułożeniu masy w formie, w wyniku

działania środka powierzchniowo czynnego następuje usunięcie parafiny z proszku aluminiowego, a następnie jego aktywacja w zasadowym środowisku wytworzonym przez wodorotlenek wapnia, zachodzi reakcji glinu z wodorotlenkiem wapnia:



w efekcie w wylanej masie zarobowej wydzielają się pęcherzyki wodoru, powodujące wzrost ciśnienia w miarę postępu reakcji (1), gdy ciśnienie przekroczy granicę plastyczności masy, następuje proces wyrastania masy, w końcowym etapie procesu następuje przejście masy z fazy ciekłej do fazy stałej o minimalnej wytrzymałości,

- 3) dojrzewanie masy - długość tego okresu powinna umożliwić uzyskanie takiej wytrzymałości, aby można było stwardniałą masę pokroić na elementy o żądanych wymiarach,
- 4) krojenie masy,
- 5) autoklawizacja - kluczowy proces w produkcji ABK, prowadzony w wysokociśnieniowych autoklawach (rys. 5.133) w temperaturze $180 \div 200^\circ\text{C}$ i ciśnieniu pary wodnej $1,1 \div 1,3 \text{ MPa}$, czas autoklawizacji jest zmienny i wynosi średnio $10 \div 14$ godzin, w zależności od założonej gęstości produkowanego betonu komórkowego i objętości danego wyrobu; proces autoklawizacji zapewnia odpowiednie właściwości, tj.: wytrzymałość, mrozoodporność, trwałość oraz pozwala na eliminację skurczu chemicznego.



Rys. 5.135. Surowce i schemat procesu w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego

Podstawowymi właściwościami wyrobów z ABK decydującymi o ich szerokim zastosowaniu są:

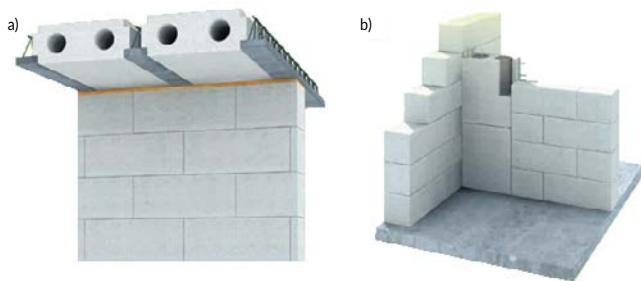
- niska gęstość objętościowa ($300 \div 1000 \text{ kg/m}^3$), beton komórkowy posiada porowatą strukturę, dzięki czemu jest lekki i ma właściwości termoizolacyjne, jest dostępny w odmianach: 400, 500, 600 i 700 (rzadko 300 i 350); im wyższa liczba, tym większa gęstość betonu i wytrzymałość mechaniczna, ale obniżona ochrona cieplna,
- wytrzymałość na ściskanie do 7MPa; wytrzymałość betonu komórkowego zależy od jego gęstości; jednak nawet beton o niskiej gęstości ma wytrzymałość na ściskanie wystarczającą do budowy budynku kilkukondygnacyjnego,
- izolacyjność cieplna (współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0,08 \div 0,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), przez co ściana budynku może mieć mniejszą grubość,
- łatwość w obróbce (podczas przycinania powstaje niewiele odpadów),
- odporność na bakterie, pleśnie, grzyby,
- możliwość murowania wszystkich rodzajów ścian, tj. zewnętrznych jednowarstwowych (bez ocieplenia), zewnętrznych warstwowych, wewnętrznych konstrukcyjnych i działowych,
- szybkość wykonywania prac, duże elementy pozwalają na szybką budowę obiektów budowlanych,
- odporność na ogień, ABK jest materiałem niepalnym,
- wysoka efektywność wykorzystania surowców (z 1 m^3 surowców produkuje się $3,3 \div 5 \text{ m}^3$ betonu komórkowego, niski ciężar bloczków z betonu komórkowego umożliwia efektywny i ograniczający emisję CO_2 transport),
- ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko, możliwość ponownego wykorzystania w procesie produkcji i całkowity recyding; współczesne technologie wytwarzania betonu komórkowego (ABK) nie powodują także uwalniania substancji szkodliwych dla organizmów żywych i środowiska, są procesami bezodpadowymi i charakteryzują się małym zużyciem surowców i nośników energii.

Wyroby z autoklawizowanego betonu komórkowego znajdują zastosowanie głównie w budownictwie mieszkaniowym, szczególnie jednorodzinnym. Do głównych kierunków zastosowań betonów komórkowych należą:

- wykonywanie stropów – zbrojone elementy stropowe (rys. 5.136a),
- wykonanie ścian nośnych (3 kondygnacje) i działowych (rys. 5.136b),
- wykonywanie zbrojonych elementów nadproży i wieńców,
- wypełnienie konstrukcji szkieletowych,
- wykonywanie przegród ogniowych oraz elementów osłonowych.

Pomimo wielu zalet jakie niesie stosowanie wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego, należy zaznaczyć, że:

- ściana z ABK jest lekka i słabo izoluje akustycznie (cięższe elementy lepiej izolują akustycznie),
- beton komórkowy jest nasiąkliwy, dlatego bloczki oraz ściany należy chronić przed długotrwałym kontaktem z wodą, z tego też powodu nie nadaje się do budowy ścian fundamentowych (można z niego budować ściany piwniczne, jednak pod warunkiem, że zostaną prawidłowo zaizolowane),
- zaleca się, aby ściany z betonu komórkowego zaczynały się nie niżej niż 20 cm nad ziemią – uchroni to ścianę przed zawilgoceniem, a tym samym przed przemarzaniem zimą,
- szczególnie istotne jest staranne ułożenie zaprawy, tak aby grubość i układ spoin odpowiadały rodzajowi bloczków (murowanie na cienkie spoiny wymaga dużej dokładności, ma to bowiem wpływ na izolacyjność cieplną ściany).



Rys. 5.136. Przykładowe elementy wykonane z betonu komórkowego

5.2.5.7. Betony masywne

Betonem masywnym określa się beton przeznaczony do zabudowy w konstrukcji (elementie) o rozmiarach na tyle dużych, że w zagadnieniach technologii betonu należy uwzględnić wpływ ciepła hydratacji cementu. Konstrukcję uznaje się za masywną, jeżeli jej moduł powierzchniowy, czyli stosunek powierzchni do objętości (S/V), wynosi poniżej 2 oraz samoistny wzrost jego temperatury przekracza 20°C , np. elementy zbiorników w oczyszczalniach ścieków, fundamenty,

podpory mostów, itp. Klasyfikacja konstrukcji betonowych (tabela 5.65) z uwagi na wpływ termiczno-skurczowe oparta jest na module powierzchniowym (mp):

$$m_p = \frac{S}{V}$$

gdzie:

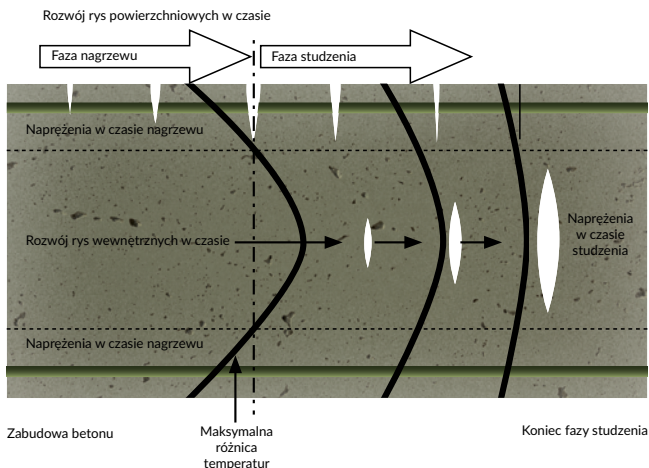
S – pole powierzchni elementu [m²],

V - objętość elementu [m³].

Tabela 5.65. Klasyfikacja budowli betonowych

Konstrukcja	Moduł powierzchniowy (m = S/V):	Samooceplenie betonu
Niemasywna	> 15	1 ÷ 3 °C
Średniomasywna	2 ÷ 15	3 ÷ 20 °C
Masywna	< 2	> 20 °C

Proces realizacji betonowego obiektu masywnego przebiega wieloetapowo. Szczególnie istotnymi etapami są: odpowiedni dobór składu jakościowego i ilościowego mieszanki betonowej, dostawa mieszanki betonowej, zabudowa w konstrukcji oraz proces pielęgnacji termiczno-wilgotnościowej. Efekty termiczne związane z hydratacją cementu nabierają szczególnego znaczenia w betonowych konstrukcjach masywnych. Powstająca w wyniku wydzielanego ciepła w procesie hydratacji cementu, różnica temperatur pomiędzy wnętrzem, a stosunkowo szybko chłodzoną powierzchnią zewnętrzną elementu betonowego, prowadzi do powstania naprężeń termicznych. Występujące w betonowych konstrukcjach masywnych więzy wewnętrzne wynikające z faktu ograniczenia swobodnego rozszerzania termicznego warstw wewnętrznych elementu przez chłodniejsze warstwy zewnętrzne mogą spowodować wystąpienie naprężeń rozciągających przekraczających wytrzymałość młodego betonu, co w ekstremalnych warunkach skutkować może powstawaniem rys w całej objętości elementu betonowego (rys. 5.137), prowadząc do obniżenia jego trwałości i skrócenia okresu użytkowania.

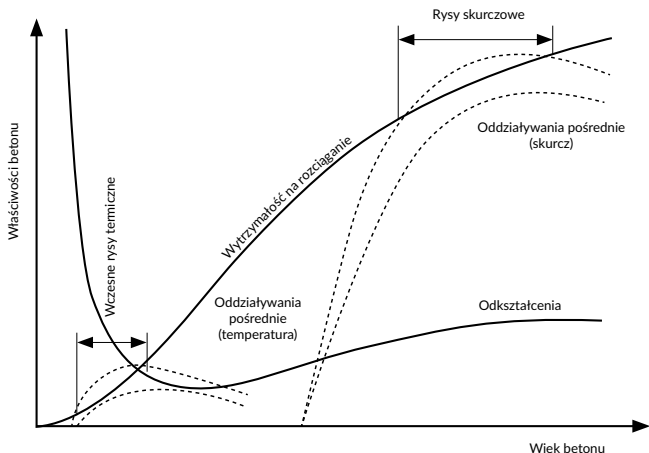


Rys. 5.137. Mechanizm powstawania rys w elemencie masywnym bez więzów zewnętrznych

Ryzyko tworzenia się rys termicznych jest najwyższe w początkowym okresie hydratacji cementu, w którym „młody beton” na etapie rozwoju właściwości, charakteryzuje się jeszcze niską wytrzymałością oraz minimalnym poziomem odkształceń granicznych (rys. 5.138, rys. 5.139). Szczególnie, gdy różnica temperatury pomiędzy wnętrzem elementu a warstwami powierzchniowymi, przekroczy 20°C . Następuje wówczas zjawisko określane jako pękanie termiczne.



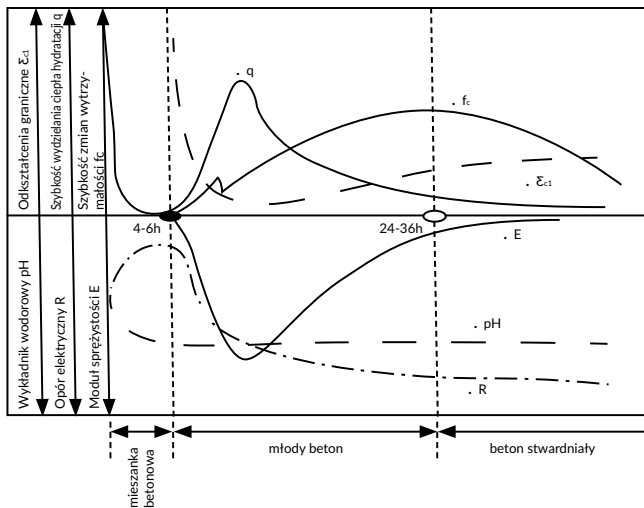
Rys. 5.138. Etapy rozwoju właściwości betonu



Rys. 5.139. Właściwości mechaniczne i zagrożenie tworzenia się rys w twardniejącym betonie

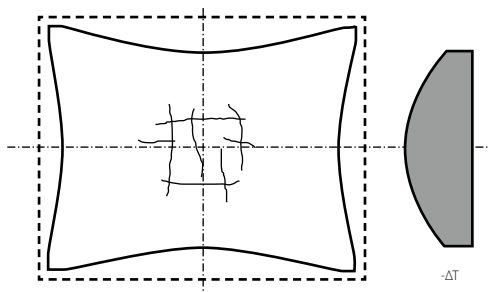
Beton w okresie przejściowym (młody beton) traci właściwości reologiczne, dzięki którym możliwe było jego ułożenie i zagęszczenie w konstrukcji bardzo łatwo jednak ulega odkształceniom sprężystym, plastycznym i lepkim. W tym okresie beton charakteryzuje się jednocześnie najmniejszymi odkształczeniami granicznymi, niewielką wytrzymałością mechaniczną oraz maksymalną szybkością wydzielania ciepła hydratacji (rys. 5.139, rys. 5.140).

W elementach betonowych niezależnie od ich grubości może wystąpić również dodatkowy mechanizm pęknięcia w okresie studzenia konstrukcji, polegający na powstrzymywaniu zmian objętości stygnącego wnętrza przez warstwy powierzchniowe. Mechanizm ten nazywany jest klinowaniem struktury betonu, a naprężenia w ten sposób powstałe nazywamy naprężeniami klinowania lub naprężeniami powstrzymywania. Klinowanie odpowiada za propagację rys przez całą grubość betonu, a w konsekwencji utratę monolityczności konstrukcji (rys. 5.141).



Rys. 5.140. Etapy rozwoju właściwości twardniejącego betonu

Obecnie najczęściej spotykanym sposobem redukcji naprężeń termicznych jest ograniczenie ciepła hydratacji zastosowanego spoiwa oraz stosowanie izolacji termicznej redukującej oddawanie ciepła do otoczenia z warstw powierzchniowych. Dobór składników mieszanki betonowej w tym rodzaju i ilości stosowanego cementu oraz dodatku typu II ma podstawowy wpływ na ilość i szybkość wydzielenia ciepła hydratacji, determinując jednocześnie proces pielęgnacji termicznej dojrzewającego betonu. Zastosowanie cementów hutniczych CEM III lub cementów wieloskładnikowych CEM V spełniających kryteria normy PN-EN 197-1 dla cementów o niskim ciepłe hydratacji wraz z popiołem lotnym krzemionkowym, spełniającym wymogi normy PN-EN 450-1 umożliwia uzyskanie betonów charakteryzujących się wysokimi wytrzymałościami mechanicznymi jak i niskim przyrostem temperatur wnętrza masywu.



Rys. 5.141. Zniszczenie wnętrza elementu wskutek powstrzymywania odkształceń wnętrza przez warstwy powierzchniowe

Odpowiedni dobór składników mieszanki betonowej ma kluczowe znaczenie dla poprawności wykonania konstrukcji masywnej. Na etapie projektowania składu należy uwzględnić nie tylko właściwości normowe betonu takie jak wytrzymałość na ściskanie czy konsystencja. Kompleksowe podejście do tego etapu musi uwzględniać również pozostałe czynniki kształtujące obciążenia pośrednie betonu takie jak: wymiary elementu, obecność przerw dylatacyjnych, prognozowane temperatury otoczenia przy których prowadzona będzie zabudowa, sposób zabudowy i możliwości prowadzenia pielęgnacji wczesnej.

Podstawowym etapem projektowania betonu jest ustalenie składu zaczynu. Etap ten polega na doborze jakościowym i ilościowym cementu, dodatku, domieszek chemicznych oraz ustaleniu współczynnika w/c.

Cement jakościowo należy dobierać kierując się poniższymi aspektami:

- możliwością uzyskania odpowiednio niskiego ciepła hydratacji cementu oraz dodatku typu II, przy zakładanej klasie wytrzymałości na ściskanie betonu,
- odpowiednio długim czasem początku wiązania,
- możliwością kształtowania odporności betonu na oddziaływania środowiska.

Hydratacja cementu to proces egzotermiczny, w trakcie którego wydzielane jest ciepło. Ilość wydzielonego ciepła, jest zależna od składu mineralnego klinkieru portlandzkiego zastosowanego do produkcji, rodzaju i ilości pozostałych składników cementu oraz powierzchni właściwej.

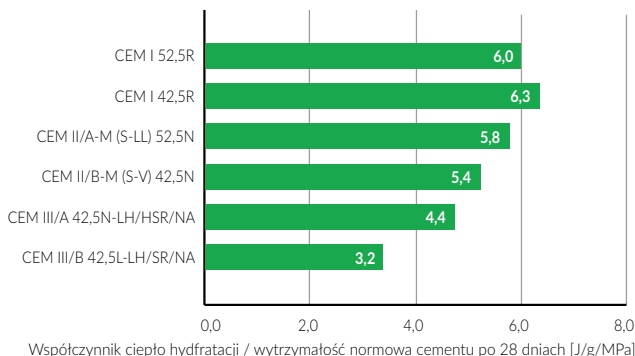
Przy doborze cementu przydatny okazuje się współczynnik ciepła hydratacji cementu do jego wytrzymałości na ściskanie (rys. 5.142):

$$W_H/R_{28} = Q/R_{28}$$

gdzie:

Q - ciepło hydratacji oznaczone metodą semiadiabatyyczną wg PN-EN 196-9,

R₂₈ - normowa wytrzymałość cementu oznaczona wg PN-EN 196-1.



Rys. 5. 142. Współczynnik W_H/R_{28} cementów Górażdże Cement S.A.

Niska wartość współczynnika wskazuje na potencjalnie dużą możliwość redukcji ciepła hydratacji spoiwa przy zachowaniu zakładanej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu. Ze względu na konieczność dodatkowego ograniczenia ciepła hydratacji oraz uzyskania odpowiedniej urabialności i pompowalności mieszanki betonowej, stosowane są dodatki typu II. Najbardziej praktycznym a zarazem powszechnym w stosowaniu jest popiół lotny krzemionkowy, który pozytywnie wpływa, zarówno na właściwości mieszanki betonowej, jak i na obniżenie ciepła hydratacji spoiwa oraz poprawę wytrzymałości mechanicznej stwardniałego betonu w dłuższym okresie czasu.

Wśród czynników materiałowych (tabela 5.66) mających wpływ na ciepło twardnienia i wysokość temperatur w betonie masywnym, wyróżnia się:

- ilość i rodzaj stosowanego cementu, stosowanego dodatku typu II, domieszek chemicznych,
- właściwości termofizyczne kruszywa.

Czynnikami wpływającymi na wielkość naprężeń (σ) powstających w dojrzewającym betonie masywnym są, obok uwarunkowań materiałowych, również uwarunkowania technologiczne związane z produkcją, zabudową mieszanki betonowej i pielęgnacją. Proces produkcji betonu, temperatura początkowa mieszanki betonowej, sposób zabudowy oraz odpowiednia pielęgnacja termiczno – wilgotnościowa mają zasadniczy wpływ na maksymalną temperaturę wewnątrz (T_{max}) wznoszonej konstrukcji, jak również na gradient (ΔT) i rozkład temperatury w całej konstrukcji (tabela 5.66).

W celu zmniejszenia ilości wydzielanego ciepła w elemencie masywnym należy w składzie betonu:

- zastosować cement charakteryzujący się:
 - niskim ciepłem hydratacji (LH) lub bardzo niskim ciepłem hydratacji (VLH),
 - podwyższoną odpornością na agresję chemiczną,
 - wydłużonym początkiem czasu wiązania,
- ograniczyć ilość cementu, każde 100 kg cementu zastosowanego w 1m^3 betonu powoduje wzrost jego temperatury o $10\div 12^\circ\text{C}$ i to niezależnie od rodzaju użytego cementu, przy założeniu że zawartość cementu mieści się w przedziale $300\div 600\text{ kg/m}^3$,
- stosować dodatki typu II jako częściowy substytut cementu, np. popiół lotny, mielony granulowany żużel wielkopiecowy,
- stosować jak najgrubsze kruszywo (uziarnienie do 63 mm), co zmniejsza ilość zaczynu potrzebną do otoczenia ziaren kruszywa.

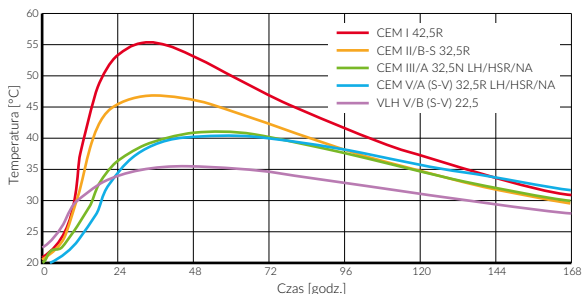
Do wykonywania betonów masywnych zaleca się stosowanie cementów z dużą ilością nieklinkierowych składników głównych np. cementów hutniczych CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA, CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA cementów wieloskładnikowych CEM V/A (S-V) 42,5N-LH/HSR/NA oraz cementów specjalnych o bardzo niskim ciepłe hydratacji, np. VLH V/B (S-V) 22,5. Na rys. 5.143 przedstawiono wpływ rodzaju cementu na temperaturę twardnienia betonu (zawartość cementu 300 kg/m^3 , $w/c=0,50$; kruszywo żwirowe 0-31,5 mm).

Tabela 5.66. Czynniki wpływające na temperaturę i naprężenia w betonie masywnym

Właściwość		Zmiana	Wpływa na		
			temp. maks.	gradient temp.	naprężenia
Rodzaj cementu	CEM I	-	↑↑	↑↑	↑↑
	CEM II÷CEM VI	-	↓↓	↓	↓↓
Ilość cementu w betonie		↑	↑↑	↑↑	↑↑
Współczynnik w/c w betonie		↑	↑	↑	↑
Wilgotność betonu		↑	↓	↓	↑ ¹⁾
Rozmiar ziaren kruszywa		↑	↓	↓	↓
Właściwości kruszywa	Współczynnik rozszerzalności termicznej	↑	↔	↔	↑↑
	Pojemność cieplna	↑	↓	↔ ²⁾	↓
	Współczynnik przewodnictwa ciepła	↑	↑	↓ ²⁾	↓
Dodatki do betonu	Popiół lotny	↑	↓↓	↓↓	↓↓
	Mielony granulowany żużel wielkopiecowy	↑	↓	↓	↓
	Mączka wapienna ³⁾	↑	↓	↓	↓
Domieszki chemiczne ⁴⁾ :	opóźniające	-	↓	↓	↓
	reologiczne	-	↓	↓	↓
Wilgotność betonu		↑	↑	↑	↑
Temperatura początkowa		↑	↑↑	↑↑	↑↑
Betonowanie etapami		-	↓	↓	↓
Betonowanie ciągłe ⁵⁾		-	↑	↑	↑
Chłodzenie mieszanki betonowej		-	↓↓	↓↓	↓↓
Grubość izolacji (pielęgnacja termiczna)		↑	↑	↓	↓
Wewnętrzne chłodzenie konstrukcji		-	↓	↓	↓
Geometria i wymiary konstrukcji		↑	↑↑	↑↑	↑↑

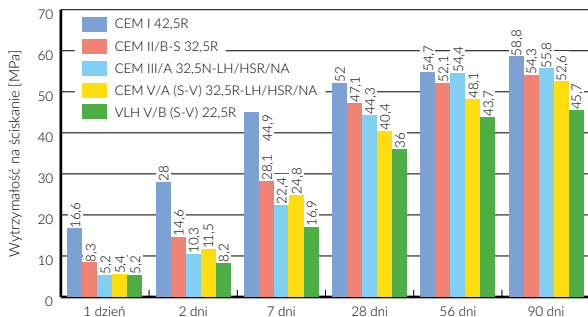
↑↑- bardzo wysoki wzrost; ↑- wzrost; ↔- brak wpływu; ↓- spadek; ↓↓- bardzo duży spadek

1) zwiększa współczynnik rozszerzalności termicznej
2) istotna w elementach o większej grubości
3) pogarsza właściwości mechaniczne i trwałościowe wraz ze wzrostem zawartości w składzie betonu
4) zależy od rodzaju domieszki
5) w stosunku do betonowania etapowego



Rys. 5.143. Temperatura wewnątrz elementów betonowych wykonanych z różnych cementów

Stosowanie zmniejszonej ilości cementu i dużej ilości dodatków w składzie betonu masywnego wiąże się z niższą dynamiką narastania wytrzymałości takiego betonu w czasie, co należy uwzględnić już na etapie projektowania (specyfikowania) jego składu. W takim przypadku klasę wytrzymałości na ściskanie należy określać po dłuższych, niż 28 dni, okresach dojrzewania betonu, np. po 56, 90 czy nawet 360 dniach (rys. 5.144).



Rys. 5.144. Przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu masywnego (cement 300 kg/m³, w/c=0,5; kruszywo żwirowe 0÷31,5 mm)

Dodatki typu II stosowane są w betonie masywnym z kilku powodów:

- umożliwiają dodatkową redukcję ciepła hydratacji,
- zapewniają odpowiednią urabialność mieszanki betonowej,
- poprawiają pompowalność,
- wydłużają czas zabudowy mieszanki betonowej,
- poprawiają właściwości stwardniałego betonu (szczególnie w dłuższym okresie dojrzewania).

Najczęściej w warunkach krajowych w betonie masywnym stosowany jest popiół lotny krzemionkowy, który ze względu na swoje właściwości może być stosowany nawet przy niskiej zawartości cementu w składzie betonu, bez znaczącego pogorszenia właściwości reologicznych mieszanki betonowej.

Domieszki chemiczne stanowią jeden z podstawowych składników betonów masywnych. Odpowiedni dobór domieszek do betonu ma zapewnić przede wszystkim:

- możliwość redukcji współczynnika w/c do założonego poziomu,
- uzyskanie właściwej konsystencji i urabialności mieszanki betonowej, przy bardzo niskiej zawartości cementu,
- wydłużenie okresu zabudowy, potrzebnego na bezpieczne połączenie poszczególnych warstw zabudowywanej mieszanki betonowej ze sobą,
- opóźnienie procesu wiązania.

Podstawowymi domieszkami stosowanymi obecnie w technologii betonów masywnych są domieszki silnie redukujące ilość wody, tj. superplastyfikatorzy typu PCE (polimery karboksylowe) oraz domieszki regulujące szybkość wiązania i/lub twardnienia spoiwa w betonie.

Kruszywo stosowane w betonie masywnym powinno charakteryzować się możliwie niską wodozadržnością oraz jamistością. Umożliwia to ograniczenie ilości zaczynu cementowego niezbędnego dla uzyskania żądanej konsystencji mieszanki betonowej przy zachowaniu założonego współczynnika wodno-cementowego (w/c). Maksymalny wymiar ziarna kruszywa powinien być dobrany z uwzględnieniem grubości otuliny zbrojenia oraz odległości pomiędzy prętami zbrojeniowymi, leżącymi prostopadle do kierunku betonowania. Zazwyczaj w betonie z przeznaczaniem do konstrukcji masywnych stosowane jest kruszywo o maksymalnym wymiarze ziarna $D_{\max}=31,5\text{mm}$. Przy doborze kruszywa należy kierować się również jego nasiąkliwością, która to w przypadku podwyższonego poziomu, może znacznie wpłynąć na zachowanie cech reologicznych mieszanki betonowej w czasie transportu oraz tuż po zabudowie. Zjawisko to wywołane jest wysoką absorpcją wody oraz rozpuszczonych w niej składników,

w tym także domieszek chemicznych. Kruszywo także kształtuje właściwości termiczne betonu (przewodność i pojemność cieplną). Tabela 5.67 przedstawia wartości współczynników termicznych betonu wykonanego na różnych kruszywach (cement 300kg/m³, współczynnik w/c=0,5; kruszywo 0÷31,5 mm). Najkorzystniejsze w konstrukcji masywnej jest stosowanie kruszywa o możliwie wysokim współczynniku przewodnictwa ciepła i dużej pojemności cieplnej. W tym kontekście najlepsze właściwości ma kruszywo żwirowe (głównym składnikiem jest kwarc, który jest minerałem o najkorzystniejszych właściwościach termicznych).

Tabela 5.67. Przewodność i pojemność cieplna betonu w zależności od zastosowanego kruszywa (cement CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA)

Rodzaj kruszywa			
Żwir	Bazalt	Granit	Wapień
Współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)]			
2,35	1,70	1,95	1,99
Pojemność cieplna [10⁶·J/(m³·K)]			
1,68	1,77	1,74	1,76

Nadrzędną, nad klasą wytrzymałości na ściskanie, właściwością betonu masywnego jest jego trwałość. Z tego względu należy beton odpowiednio zabudować oraz pielęgnować. Pielęgnacja betonu masywnego ma na celu zmniejszenie gradientu temperatur i powinna, oprócz pielęgnacji wilgotnościowej (polewanie wodą, przykrywanie wilgotnymi matami, folią, itp.), obejmować ochronę cieplną betonu, tj. izolację cieplną i/lub chłodzenie elementu masywnego, np. poprzez system wbudowanych rurociągów. Okres ochrony cieplno-wilgotnościowej, ze względu wolny przyrost wytrzymałości betonu masywnego, powinien być wydłużony w stosunku do betonu zwykłego w przypadku masywnych płyt fundamentowych może przekraczać nawet 21 dni. Metodę i czas pielęgnacji najlepiej dobrać kierując się zapisami normy PN-EN 13670 „Wykonywanie konstrukcji z betonu” oraz rodzajem i wymiarami konstrukcji masywnej.

Obszary stosowania betonu masywnego:

- budownictwo hydrotechniczne (tamy, zapory),
- budownictwo energetyczne (fundamenty pod bloki energetyczne),
- budownictwo komunikacyjne (fundamenty, przyczółki i pylony mostów).

5.2.5.8. Fibrobetony (betony ze zbrojeniem rozproszonym)

Istnieje kilka nazw opisujących beton z dodatkiem włókien. Najczęstszym określeniem spotykanym w literaturze jest fibrobeton. Jest to rodzaj kompozytu betonowego, wyróżniający się spośród innych zawartością rozproszonego mikrozbrojenia w postaci włókien (rys. 5.145).



Rys. 5.145. Przełam próbki fibrobetonu

Najczęściej stosowane są fibrobetony wzmacniane włóknami stalowymi i polipropylenowymi (włókna znormalizowane wg PN-EN 14889, patrz pkt. 5.2.5.6.). W tabeli 5.68 przedstawiono wpływ rodzaju włókien na właściwości betonu.

Fibrobetony charakteryzują się podwyższoną odpornością na powstawanie rys i pęknięcie, podwyższoną odpornością zmęczeniową i udarnośćią, a często także podwyższoną wytrzymałością na rozciąganie i ścinanie.

Fibrobeton charakteryzuje się przede wszystkim:

- niekruchym, pseudoplastycznym procesem zniszczenia, w wyniku czego możliwa jest kontrola propagacji rys oraz praca elementu zarysowanego jako integralnej całości mimo występowania mikrorys,

- zdolnością do pochłaniania znacznych ilości energii przy wszystkich obciążeniach dynamicznych, np. na skutek uderzenia (posadzki, fundamenty pod maszyny, elementy konstrukcji drogowych i mostowych),
- poprawą dystrybucji naprężeń przed zarysowaniem matrycy betonowej,
- przenoszeniem obciążenia poprzez włókna po zarysowaniu,
- ograniczeniem zarysowań – propagujące rysy napotykać na włókna, które zatrzymują dalsze powiększanie i rozwieranie się,
- redukcją skurczu betonu – poprzez wysoką przyczepność zaczynu do włókna ograniczony zostaje skurcz zaczynu w bezpośrednim sąsiedztwie włókna, w efekcie, przy dużej ilości włókien rozmieszczonych blisko siebie, zredukowany zostaje skurcz w całej objętości betonu.

Tabela 5.68. Właściwości fibrobetonu

Właściwość	Rodzaj włókien	
	Stalowe	Polipropylenowe
Udział objętościowy	0,25 - 2,0 %	0,1 - 0,5 %
Skurcz	redukcja ok. 30 - 50 %	
Wytrzymałość na ściskanie	wzrost 10 - 30%	niewielki wzrost
Wytrzymałość na rozciąganie	wzrost 20 - 40%	niewielki wzrost
Wytrzymałość na zginanie	wzrost 30 - 70%	niewielki wzrost
Wytrzymałość na miejscowy docisk	wzrost 15 - 30%	niewielki wzrost
Udarność	wzrost do 6 razy	wzrost do 3 razy
Moduł sprężystości	praktycznie bez zmian	
Nasiąkliwość	bez zmian lub niewielki wzrost	bez zmian lub niewielkie obniżenie
Mrozoodporność	wzrost 30 - 60%	wzrost ok. 30%
Ścieralność	redukcja do 50%	praktycznie bez zmian
Wodoszczelność	praktycznie bez zmian	polepszenie ok. 20%
Urabialność	pogorszenie 30 - 40%	pogorszenie

Stosowanie fibrobetonu nabiera szczególnego znaczenia, gdy konstrukcja może być narażona na wszelkiego rodzaju obciążenia dynamiczne, zarówno mechaniczne, jak i termiczne. Występujące dynamiczne przeciążenie powoduje zarysowanie betonu, który, jeśli jest niezbrojony, ulega zniszczeniu. W przypadku konstrukcji żelbetowej zniszczeniu może ulec beton pomiędzy prętami zbrojeniowymi, natomiast fibrobeton

będzie w dalszym ciągu przejmował obciążenia (pracował w konstrukcji), dzięki zdolności do pochłaniania dostarczonej energii. Po przejściu fali uderzeniowej, powstałej w wyniku dynamicznego obciążenia, sprężystość włókien powoduje domknięcie rys powstałych w betonie, dzięki czemu element nie traci swoich cech użytkowych.

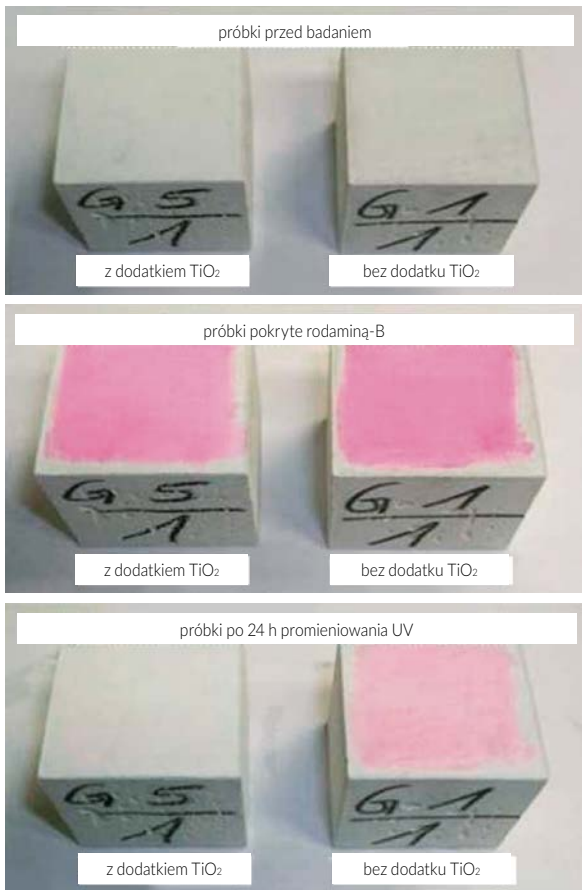
Z uwagi na swoje właściwości fibrobetony znajdują zastosowanie w:

- betonie natryskowym (obudowy tuneli, szybów górniczych, wzmocnienia ścian i skarp),
- betonie posadzkowym (posadzki przemysłowe, nawierzchnie lotnisk i dróg),
- betonie architektonicznym (elementy małej architektury, elementy konstrukcyjne o skomplikowanym kształcie, elementy dekoracyjne),
- prefabrykacji (elementy cienkościenne, płyty elewacyjne),
- budownictwie hydrotechnicznym (zapory),
- budowie zbiorników na ciecze,
- konstrukcjach barier ochronnych (od uderzeń dynamicznych),
- pracach naprawczych konstrukcji żelbetowych.

5.2.5.9. Betony o właściwościach fotokatalitycznych – z cementem TioCem® i technologią TX Active®

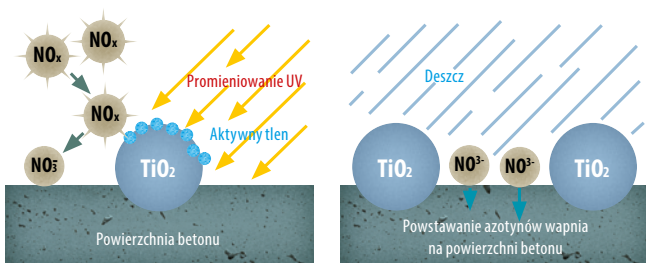
Betony o właściwościach fotokatalitycznych są wykonywane z cementu zawierającego w składzie nanometryczny dwutlenek tytanu TiO_2 . Znajdują zastosowanie w wykonywaniu konstrukcji i elementów o wysokich walorach estetycznych, aktywnie wspomagających ochronę środowiska naturalnego. Zastosowanie cementu TioCem® umożliwia redukcję szkodliwych związków obecnych w powietrzu, a także usuwanie zanieczyszczeń organicznych z powierzchni budynków i konstrukcji inżynierskich. Nanokrystaliczny dwutlenek tytanu jako fotokatalizator ulega aktywacji pod wpływem oddziaływania promieniowania słonecznego UV. Na powierzchni betonu zawierającego TiO_2 tworzą się rodniki wodorotlenowe $OH\cdot$ o silnych właściwościach utleniających. W efekcie zostaje przyspieszony naturalny proces utleniania, wzmagając w ten sposób szybki rozpad szkodliwych związków, które znajdują się w powietrzu w otoczeniu obiektu budowlanego oraz zanieczyszczających powierzchnię betonu. Istotny jest również fakt, że dwutlenek tytanu jako fotokatalizator nie ulega zużyciu podczas zachodzących reakcji. Proces oczyszczania powietrza jest długotrwały i stale odnawialny.

Właściwości fotokatalityczne cementu TioCem® zostały potwierdzone testem z użyciem organicznej substancji, rodaminy-B, którą pokryto powierzchnię próbek betonowych poddanych następnie naświetlaniu promieniowaniem UV. Po upływie 24 godz. naświetlania, w przypadku betonu wykonanego z cementu TioCem® odnotowano całkowite utlenienie rodaminy i w efekcie oczyszczoną powierzchnię próbki (rys. 5.146).



Rys. 5.146. Właściwości fotokatalityczne cementu TioCem®

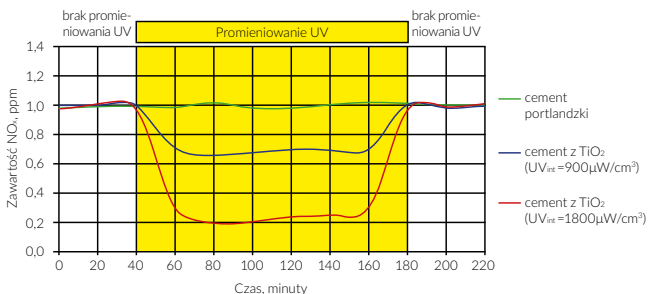
Fotokatalitycznie aktywna powierzchnia betonu wykazuje działanie redukujące w przypadku szkodliwych tlenków azotu NO_x , pochodzących ze spalin samochodowych. Zwiększająca się koncentracja tlenków azotu wzmacnia powstawanie ozonu, który jako główny składnik miejskiego smogu negatywnie wpływa na zdrowie człowieka. Zastosowanie betonu z cementu $\text{TioCem}^{\text{®}}$ pozwala zredukować szkodliwe tlenki azotu NO_x , na drodze reakcji fotochemicznych, do nieszkodliwych jonów azotanowych NO_3^- , które na powierzchni betonu tworzą azotany wapnia spłukiwane przez opady atmosferyczne (rys. 5.147).



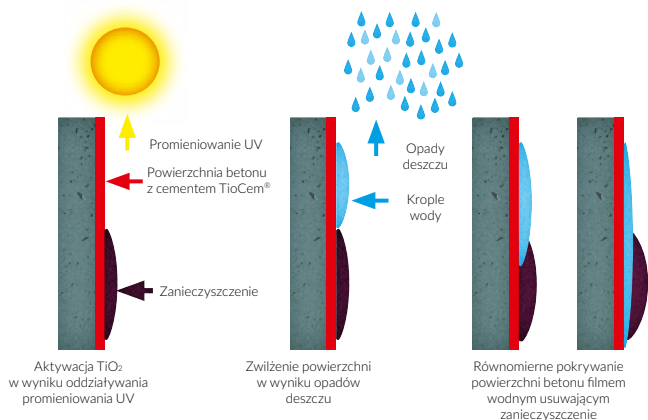
Rys. 5.147. Schemat redukcji tlenków azotu NO_x przez aktywne fotokatalitycznie powierzchnie betonu zawierające cement $\text{TioCem}^{\text{®}}$

Potwierdzeniem zdolności redukcji tlenków azotu NO_x zawartych w powietrzu są wyniki badań laboratoryjnych przedstawione na rys. 5.148. Badaniom poddano beton wykonany z użyciem cementu $\text{TioCem}^{\text{®}}$ i cementu portlandzkiego. Pomiary wykazały spadek zawartości tlenków NO_x w przypadku betonu z cementu $\text{TioCem}^{\text{®}}$.

Zastosowanie cementu $\text{TioCem}^{\text{®}}$ nadaje powierzchniom betonowym również właściwości samoczyszczące. Samooczyszczenie powierzchni wynika z właściwości utleniających i superhydrofilowych betonu zawierającego cement $\text{TioCem}^{\text{®}}$. Pod wpływem promieniowania UV kąt zwilżania powierzchni betonu z nanometrycznym TiO_2 maleje niemal do zera. W efekcie powierzchnia betonu zostaje równomiernie pokryta cienkim filmem wodnym tworzącym płaszczyznę poślizgu dla usuwania zanieczyszczeń (rys. 5.149). Właściwości te są szczególnie istotne w konstrukcjach o wysokich walorach estetycznych.



Rys. 5.148. Redukcja tlenków azotu NO_x w powietrzu w obecności cementu TioCem®



Rys. 5. 149. Superhydrofilowe właściwości nanokrystalicznego dwutlenku tytanu TiO_2 – proces samoczyszczenia powierzchni betonu zawierającej cement TioCem®

Właściwości fizyczne i mechaniczne cementu TioCem® spełniają wymagania normy PN-EN 197-1 „Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”, stąd zasady jego stosowania do

produkcji betonu i elementów prefabrykowanych są identyczne jak w przypadku cementów powszechnego użytku – podstawowe właściwości cementu TioCem® przedstawiono w tabeli 5.69.

Tabela 5.69. Podstawowe właściwości cementu TioCem®

Właściwość	Wyniki badań cementu TioCem®	Wymagania wg PN-EN 197-1 dla cementu klasy 42,5R
Początek czasu wiązania [min]	140	≥ 60
Koniec czasu wiązania [min]	190	brak wymagania
Wytrzymałość po 2 dniach [MPa]	29,0	≥ 20,0
Wytrzymałość po 28 dniach [MPa]	60,0	≥ 42,5 ≤ 62,5

Cement TioCem® jest produkowany zgodnie z technologią TX Active® (rys. 5.150), definiującą wymagania, jakie muszą spełniać materiały budowlane posiadające właściwości fotokatalityczne.



Rys. 5.150. Oznakowanie wyrobu TX Active®

Fotokatalityczne działanie cementu TioCem® wymaga światła słonecznego, stąd spoiwo to wystarczy stosować w powierzchniowych warstwach betonu. Beton zawierający cement TioCem® można efektywnie wykorzystać do:

- wykonywania nawierzchni drogowych,
- napraw nawierzchni drogowych (technologia Whitetopping),
- produkcji kostki brukowej (do wykonania warstwy fakturowej),
- produkcji ekranów akustycznych i ochronnych w budownictwie drogowym,
- produkcji drogowych barier bezpieczeństwa,
- wykonywania okładzin ścian tuneli,
- produkcji elementów fasadowych,
- produkcji dachówki cementowej.

Na rys. 5.151 i 5.152 przedstawiano realizacje z zastosowaniem cementu TioCem®.



Rys. 5.151. Fasada budynku mieszkalnego w Krakowie



Rys. 5.152. Teren pod linią pieca nr 2 Cementowni Górażdże wykonany z fotokatalitycznej kostki zawierającej TioCem®

5.2.5.10. Betony barwione

Kształtowanie estetyki betonu poprzez barwienie jest najpowszechniej stosowanym zabiegiem. Beton barwiony pełni dodatkową funkcję dekoracyjną, jest rodzajem betonu architektonicznego. Beton barwiony na skutek zastosowanych zabiegów technologicznych charakteryzuje się odpowiednim wybarwieniem. Takimi zabiegami mogą być:

- dobór rodzaju cementu, dodatków i kruszywa,
- barwienie mieszanki betonowej przez zastosowanie barwników (pigmentów),
- barwienie powierzchni betonu stwardniałego.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na kolor betonu i trwałość wybarwienia jest jakość użytych pigmentów spełniających wymagania normy PN-EN 12878 „Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie – Wymagania i metody badań”. Zgodnie z tą normą, pigment to substancja w postaci drobnych ziaren, praktycznie nierozpuszczalnych w stosowanym środowisku, która służy wyłącznie do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie. Pigmenty do barwienia betonu to zazwyczaj tlenki żelaza

występujące w różnych odmianach (tabela 5.70) Norma PN-EN 12878 wyróżnia dwie kategorie pigmentów: A i B. W kategorii B zostały sklasyfikowane pigmenty stosowane do betonu zbrojonego, które muszą spełniać poniższe wymagania:

- spadek wytrzymałości na ściskanie zaprawy z pigmentem po 28 dniach względem zaprawy wzorcowej $\leq 8\%$,
- zawartość substancji rozpuszczalnych w wodzie $\leq 0,5\%$,
- zawartość chlorków rozpuszczanych w wodzie $\leq 0,1\%$,
- zawartość całkowitego chloru $\leq 0,1\%$.

Dodatkowe wymagania dla pigmentów:

- kompatybilność z cementem i betonem (odporność alkaliczna),
- odporność na działanie światła UV,
- odporność na działanie warunków atmosferycznych,
- intensywność barwy w zależności od dozowania,
- powtarzalność wybarwienia wyrobów gotowych,
- nietoksyczność i nieszkodliwość dla środowiska.

Tabela 5.70. Skład chemiczny pigmentów do betonu

Kolor	Związek chemiczny
Czerwony	Tlenek żelaza - Fe_2O_3
Żółty	Hydroksytlenek żelaza - $FeOOH$
Antracytowy	Tlenek żelaza i/iub modyfikowana sadza techniczna
Brązowy	Mieszanina tlenków żelaza i hydroksytlenków żelaza
Pomarańczowy	Mieszanina tlenków żelaza i hydroksytlenków żelaza
Biały	Tlenek tytanu - TiO_2
Zielony	Tlenek chromu
Niebieski	Tlenek kobaltu, pigmenty ultramarynowe

Projektując beton, należy uwzględnić wpływ barwnika na właściwości betonu, w tym m. in. na wytrzymałość na ściskanie.

Produkcja pigmentów budowlanych objęta jest system zgodności 2+. Na rynku pigmenty dostępne są w postaci:

- pigmentu proszkowego,
- pigmentu granulowanego,
- kompaktu,
- pigmentu upłynnionego/ preparatu/wodnej dyspersji.

Każda z form pigmentu posiada zalety oraz wady (tabela 5.71).

Tabela 5.71. Pigmenty do barwienia betonu betonu

Pigment	Wady	Zalety
Proszek	<ul style="list-style-type: none"> – silne pylenie, – ryzyko zbrylania, wymagają przechowywania w warunkach suchych, – problemy z automatycznym dozowaniem (dozowanie ręczne na kruszywo), – gorsza homogenizacja w mieszance betonowej (wydłużone mieszanie) 	<ul style="list-style-type: none"> – korzystna cena, – brak wrażliwości na mróz, – wysoka moc barwiąca,
Granulat	<ul style="list-style-type: none"> – droższy od pigmentów proszkowych, – wymaga przechowywania w warunkach suchych (względem pigmentów proszkowych), – dozowanie metodą wdmuchiwania przez specjalne systemy dozujące, – konieczność dokładnego i intensywnego procesu mieszania (właściwe roztrarcie pigmentu) 	<ul style="list-style-type: none"> – wysoka moc barwiąca, – lepsza homogenizacja, – lepsza higiena aplikacji, – łatwość i komfort przechowywania
Kompakt	<ul style="list-style-type: none"> – droższy od pigmentów proszkowych, – wymaga przechowywania w warunkach suchych, – konieczność dokładnego i intensywnego procesu mieszania (właściwe roztrarcie pigmentu) 	<ul style="list-style-type: none"> – ograniczenie pylenia (powstaje przez prasowanie pigmentu proszkowego) – zawiera dodatek środków wiążących, – proste i precyzyjne dozowanie, – łatwość i komfort przechowywania
Płyn	<ul style="list-style-type: none"> – ryzyko sedymentacji po długim okresie, – wrażliwość na przemrożenie, – konieczność uwzględniania współczynnika w/c w recepturze, – mniejsza odporność na skażenia biologiczne, – wyższe dozowanie w porównaniu z pigmentami proszkowymi 	<ul style="list-style-type: none"> – eliminacja pylenia, – szybka homogenizacja, – dokładne zdyspergowanie i zwilżenie ziaren pigmentu, – wysoka zdolność barwienia, – precyzyjne dozowanie poprzez zastosowanie systemów dozujących, – czystość aplikacji

Najefektywniejszy proces barwienia polega na wstępnym wymieszaniu pigmentu z samym kruszywem, a następnie dodawaniu cementu. Zaleca się następujące procedury mieszania:

- 1) kruszywa + pigment → wstępne mieszanie przez 15÷30 sekund
- 2) kruszywa + pigment + cement → wstępne mieszanie przez 15÷30 sekund
- 3) kruszywa + pigment + cement + woda + domieszki chemiczne → mieszanie przez 45 ÷ 90 sekund.

Czas mieszania powinien zostać dobrany z uwagi na efektywność pracy

mieszarki, której cechą charakterystyczną jest tzw. minimalny czas mieszania, dopiero jego przekroczenie jest gwarantem pełnego, jednorodnego wybarwienia mieszanki betonowej. Wraz ze wzrostem ilości dozowanego pigmentu liniowo wzrasta nasycenie barwy betonu. Zalecane dozowanie pigmentów podawane jest przez producenta pigmentu w przeliczeniu na masę cementu (spoiwa). Typowe dozowanie w zależności od rodzaju barwnika mieści się w przedziale między 1÷10 % masy cementu (spoiwa). Należy pamiętać o tym, że większe dozowanie pigmentu niekoniecznie będzie pogłębiać kolor a może pogorszyć jakość betonu. Kolor barwionego betonu może być prawidłowo określony tylko na w pełni wyschniętym betonie i zależy od następujących czynników:

- rodzaj, ilość i rozdrobnienie pigmentu,
- rodzaj cementu (stopień białości cementu), rodzaj dodatków mineralnych,
- kruszywo (uziarnienie i barwa kruszywa),
- skład betonu, współczynnik w/c,
- wilgotność kruszywa,
- warunki dojrzewania betonu,
- warunki użytkowania.

Odpowiedni dobór jakościowy i ilościowy składników mieszanki betonowej pozwala na uzyskanie różnych odcieni szarości bez stosowania pigmentów. Powtarzalna produkcja barwionego w masie betonu jest ogromnym wyzwaniem z uwagi na stosowanie surowców o zmiennej charakterystyce. Kluczowy wpływ na barwę betonu ma rodzaj zastosowanego cementu, różne odcienie cementu wpływają decydująco na końcowy kolor betonu (rys. 5.153). Cement biały umożliwia uzyskanie najjaśniejszej barwy. Cementy zawierające w składzie mielony granulowany żużel wielkopiecowy charakteryzują się jasnym wybarwieniem (rys. 5.154). Cementy z dodatkiem popiołu lotnego charakteryzują się ciemniejszym wybarwieniem. Dlatego też należy zdecydowanie rozważyć stosowanie w przypadku kolorów jaśniejszych w całości lub części cementu białego lub jaśniejszych dodatków mączki wapiennej. W przeciwnym wypadku nawet wyższe dozowanie barwnika nie umożliwi uzyskania pożądanego koloru. Nie bez znaczenia jest zawartość cementu w mieszance betonowej (rys. 5.155). Również dodatki stosowane do produkcji betonu w zależności od zawartości wpływają na kolorystykę betonu. Mikrokrzemionka pogarsza wybarwienie ze względu na wielkość cząsteczek, zazwyczaj przyciemnia barwę. Mączka wapienna stosowana jest do rozjaśniania elementów betonowych. Popiół lotny krzemionkowy, ze względu na zawartość niespalonego węgla, przyciemnia kolor betonu.

Współczynnik wodno-cementowy w zależności od wartości wpływa na kolor

betonu szarego, jak i kolorowego. Im wyższe w/c, tym stwardniały beton jaśniejszy (rys. 5.156). Spowodowane jest to odparowaniem większej ilości wody z betonu trakcie dojrzewania, czego konsekwencją jest powstanie porów kapilarnych, które silniej rozpraszają światło niż otaczający je beton. W efekcie beton wydaje się jaśniejszy. Dla uzyskanego efektu wybarwienia betonu istotny jest także rodzaj i pochodzenie zastosowanego kruszywa, głównie frakcji pisakowej 0/2 mm (rys. 5.157). Odcień kruszywa ma nieco mniejszy wpływ na ostateczny kolor betonu. Należy jednak unikać stosowania ciemnych kruszyw do jasnych betonów. Pigment otacza ziarna kruszywa, jednak na skutek eksploatacji poprzez ścieranie czy wymywanie kruszywo stopniowo odsłania się, odbierany kolor będzie wypadkową zabarwionej zaprawy oraz odsłoniętego kruszywa. Naturalny odcień użytego piasku ma większy wpływ na jasne pigmenty. W przypadku kolorów brązowych i czarnych różnice są niezauważalne. Dlatego też zaleca się stosowanie jasnych kruszyw do jasnych kolorów betonów. Przy doborze piasku należy zwracać szczególną uwagę na ilość frakcji pylastej (wysoka powierzchnia właściwa wymaga większego dozowania pigmentu) oraz eliminowanie iłów i gliny.



Rys. 5.153. Wpływ rodzaju cementu na wybarwienie betonu/zaprawy

CEM I 52,5R BIAŁY

CEM III/A42,5N
LH/HSR/NA

CEM I 42,5R

CEM II A-V 42,5R



Rys. 5.154. Wpływ rodzaju cementu na wybarwienie betonu/zaprawy

300 kg/m³

420 kg/m³

300 kg/m³

420 kg/m³

COLOR SY-020

COLOR SR-010



Rys. 5.155. Wpływ ilości cementu na wybarwienie betonu/zaprawy



Rys. 5.156. Wpływ współczynnika wodno-cementowego na wybarwienie betonu/zaprawy



Rys. 5.157. Wpływ koloru kruszywa na wybarwienie betonu/zaprawy

Uzyskanie końcowego efektu odpowiadającego wymaganiom, ponadto jednolitego dla całej betonowanej konstrukcji lub wszystkich betonowanych elementów, wymaga od producenta betonu przestrzegania bardzo rygorystycznej kontroli dozowania surowców, korygowania wilgotności kruszyw oraz prawidłowego wykonania mieszanki betonowej. Często konieczne jest wyko-

nanie w warunkach laboratoryjnych kilku lub kilkunastu prób. Każda zmiana rodzaju i proporcji surowców będzie skutkowałą zmianą odcienia i koloru betonu. Dlatego też, chcąc uzyskać jednakowe wybarwienie betonu danej partii mieszanki betonowej należy zapewnić stałość surowców do produkcji, jednako-
kowe warunki wykonania oraz dojrzewania betonu.

Zastosowanie środków barwiących na bazie kwasów pozwala barwić powierzchnię betonu stwardniałego (rys. 5.158). Środki te wnikają na głębokość kilku, kilkunastu milimetrów i reagują z produktami hydratacji cementu powodując zmianę kolorystyki betonu. Metoda ta pozwala uzyskać skomplikowane rysunki na powierzchni betonu.



Rys. 5.158. Przykłady reaktywnego barwienia betonu

Projektant projektując beton architektoniczny powinien mieć na uwadze warunki eksploatacji betonu. Intensywnie eksploatowane powierzchnie betonowe ulegają zanieczyszczeniom. Wraz z upływem czasu odcień barwionego wyrobu ulega zmianom (powstawanie wykwitów węglanowych, ciągły proces hydratacji, ścieranie warstwy fakturowej, wnikanie zanieczyszczeń i pyłów w pory betonu). Jest to problem zarówno dla właściciela, jak i dla architekta będącego autorem projektu. Dlatego też zabezpieczenie betonu powinno być uwzględnione na początkowym etapie realizacji. Jednym ze sposobów zabezpieczenia przed zewnętrznymi czynnikami jest zastosowanie środków hydrofobizujących (zastosowanie do mieszanki betonowej na etapie projektowania). Domieszki uszczelniające – hydrofobizujące spowodowały zmianę w podejściu do barwienia betonu. Głównym powodem ich zastosowania jest redukcja wykwitów węglanowych decydujących o odbiorze kolorystyki oraz podniesienie trwałości konstrukcji betonowej.

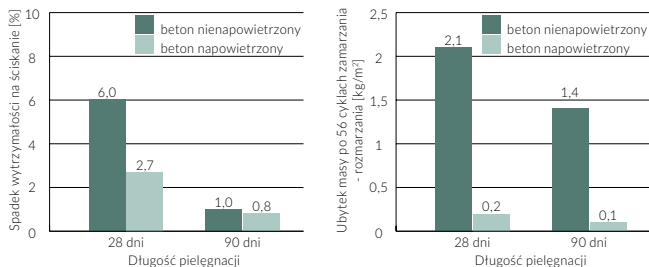
Wymienione czynniki pokazują, jak wiele jest złożonych składowych, zaczynając od doboru surowców na etapie projektowania, poprzez produkcję mieszanki betonowej, proces zabudowy, dojrzewania (pielęgnacji), a na warunkach eksploatacji kończąc, należy brać pod uwagę, aby proces wybarwienia betonu był zgodny z oczekiwaniami projektanta, inwestora i wykonawcy.

5.2.5.11. Betony mrozoodporne

Betonem mrozoodpornym nazywamy beton odporny na agresywne oddziaływanie środowiska wywołane cyklicznym zamrażaniem/rozmarzaniem przy udziale środków odladzających bądź też bez ich udziału. Zamarzająca woda zmienia stan skupienia, przemianie fazowej woda-lód towarzyszy wzrost objętości ok. 9%, co może prowadzić do powstania spękań oraz uszkodzeń elementu betonowego. Nie należy mylić betonu mrozoodpornego z betonem wykonywanym podczas obniżonych temperatur. Zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 wyróżnia się cztery klasy ekspozycji XF1÷XF4 wywołane agresją mrozową. W celu wykonania betonu o wymaganym stopniu mrozoodporności, należy prawidłowo dobrać składniki mieszanki betonowej pod względem jakościowym oraz ilościowym, szczególnie istotne jest stosowanie kruszywa mrozoodpornego. Najskuteczniejszymi metodami zwiększającymi odporność betonu na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie są:

- prawidłowe napowietrzenie (ilość, wielkość i rozkład porów powietrznych),
- obniżenie współczynnika w/c (im niższy, tym bardziej mrozoodporny beton),
- prawidłowa pielęgnacja (im dłużej, tym lepiej).

Kluczowym, wymaganym przez normę PN-EN 206+A2:2021 zabiegiem technologicznym, jest napowietrzenie betonu w klasach ekspozycji XF2÷XF4. Napowietrzenie ma na celu poprawę odporności betonu na działanie mrozu, co obrazują wyniki badań zamieszczone na rys. 5.159.



Rys. 5.159. Wpływ napowietrzenia betonu na mrozoodporność a) zwyżką po 150 cyklach zamarzania-rozmrażania, b) w obecności soli odladzających po 56 cyklach zamarzania-rozmrażania

Napowietrzenie, wprowadzone poprzez domieszkę do mieszanki betonowej, musi utrzymać się w czasie transportu, rozładunku (pompowania) i zagęszczania mieszanki betonowej w formie/szalunku, tak aby pozostać na założonym poziomie w postaci porów powietrznych w betonie stwardniałym. Zapewnienie (i utrzymanie) napowietrzenia mieszanki betonowej i betonu na za założonym poziomie jest zależne od wielu czynników, głównie materiałowych (skład jakościowy i ilościowy betonu) oraz technologicznych (czas i sposób transportu, rozładunku, zagęszczania). Napowietrzenie mieszanki betonowej ma na celu wprowadzenie do struktury betonu dodatkowych porów powietrznych o odpowiednim kształcie, rozmiarze i rozmieszczeniu. Poprawne napowietrzenie betonu polega na wprowadzeniu drobnych, regularnie rozmieszczonych sferycznych pęcherzyków powietrznych, niepołączonych ze sobą i przerywających system porów kapilarnych w betonie. Odpowiednie napowietrzenie mieszanki betonowej uzależnione jest od ilości zaprawy w mieszance betonowej, której ilość wynika z maksymalnego wymiaru kruszywa. Im maksymalny wymiar kruszywa jest mniejszy (im drobniejsze ziarna), tym większe jest zapotrzebowanie na zaprawę. Większa ilość zaprawy w mieszance betonowej wymaga

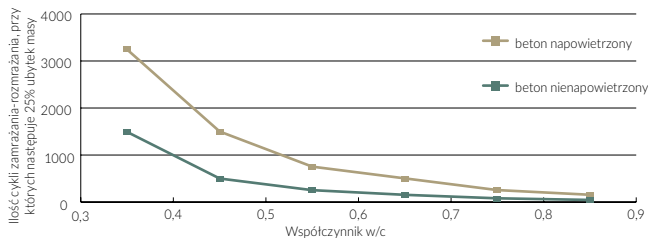
większej ilości pęcherzyków powietrza do zachowania odpowiedniego stopnia mrozoodporności. Kolejnym ważnym czynnikiem w zapewnieniu mrozoodporności jest kruszywo, które stanowi ok. 70% objętości betonu, dlatego jego właściwości w sposób istotny przekładają się na właściwości napowietrzonych kompozytów betonowych. Właściwości kruszyw wynikają z cech skały macierzystej oraz zastosowanej obróbki w procesie produkcji. Do kruszyw wrażliwych na działanie mrozu zalicza się: tutek, tutek mikowy, tutek ilasto-mikowy, kredę, margiel, łożek, porowaty krzemień, zmieniony porowaty bazalt oraz kruszywa luźno scementowane minerałami ilastymi. Zgodnie z zapisami normy PN-EN 206+A2:2021 kruszywo do betonu w klasach ekspozycji XF powinno wykazywać odpowiedni stopień mrozoodporności w zależności od warunków środowiskowych. Ponadto dla klasy ekspozycji XF4 wymagane jest stosowanie kruszywa mrozoodpornego w obecności soli. Ze względu na znaczący udział kruszywa w objętości betonu znaczącą cechą wpływającą na mrozoodporność jest maksymalny wymiar ziarna, wymagana ilość powietrza w mieszance spada wraz ze wzrostem maksymalnego uziarnienia. Istotnym jest również stosowanie piasków o odpowiednim uziarnieniu, zawartość frakcji 0,25- 1,00 mm ułatwia napowietrzenie mieszanki betonowej.

Rodzaj i ilość cementu również ma znaczący wpływ na przebieg procesu hydratacji oraz właściwości betonu stwardniałego, w tym także na napowietrzenie betonu. Cementy niskoalkaliczne wymagają większego dozowania domieszki napowietrzającej, podobnie jak cementy o dużym stopniu rozwinięcia powierzchni właściwej. Zwiększenie ilości cementu w mieszance betonowej również wiąże się z koniecznością zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej. Podobnie jest z dodatkiem granulowanego żużla wielkopiecowego, który przy dużym stopniu rozdrobnienia wymaga zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej. W przypadku popiołu lotnego kluczowy wpływ na napowietrzenie mieszanki betonowej ma zawartość niespalonego węgla. Z tego względu mieszanki betonowe z dodatkiem popiołu lotnego trudniej napowietrzyć. Dozowanie domieszki napowietrzającej musi być dostosowane do wysokości strat prażenia popiołu lotnego.

Kształtowanie współczynnika w/c na odpowiednio niskim poziomie, zapewnia korzystny wpływ na mrozoodporność betonu (rys. 5.160). Obniżenie w/c w mieszance betonowej skutkuje mniejszą ilością porów kapilarnych w betonie, a więc podwyższeniem trwałości betonu.

Produkcja betonów napowietrzonych oprócz doboru receptury na etapie projektowania stawia bardzo wysokie wymagania co do jakości i powtarzalności

składników, wchodzących w skład betonu oraz optymalnych operacji jednostkowych składających się na proces technologiczny produkcji mieszanki betonowej. Istotną jest kolejność dozowania surowców, moment dozowania domieszki napowietrzającej oraz czas mieszania. Wymienione czynniki mają kluczowy wpływ zarówno na jakość napowietrzenia, jak i na stabilność struktury porów. Zalecane jest dozowanie napowietrzacza wraz z wodą zarobową, a następnie pozostałych domieszek. Optymalny czas mieszania po dodaniu domieszki napowietrzającej, a przed wprowadzeniem pozostałych domieszek wynosi od 15 do 30 sekund.



Rys. 5.160. Wpływ współczynnika w/c na mrozoodporność betonu

Mieszankę betonową należy odpowiednio długo mieszać, tak aby cała domieszka uległa aktywacji. Po dodaniu wszystkich składników czas mieszania nie powinien być zbyt krótki i może wynosić nawet 90 sekund. Zbyt krótkie mieszanie prowadzi do niekompletnej aktywacji domieszki napowietrzającej.

Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na napowietrzenie mieszanki betonowej jest transport na budowę, gdyż na efektywność napowietrzenia wpływa energia mieszania. Im jest ona większa, tym efektywność napowietrzenia większa. Wynikiem tego może być wzrost napowietrzenia podczas transportu mieszanki betonowej (tzw. aktywacja wtórna). Dlatego bardzo ważne jest, aby transport odbywał się w wolno obracającym się bębnie betonowozu. Należy również pamiętać o tym, że jeśli transport mieszanki betonowej odbywa się bez dodatkowego wzruszania mieszanki betonowej, przyczynia się to znacznej utracie napowietrzenia. Podsumowując istotnymi czynnikami wpływającymi na ukształtowanie struktury napowietrzenia są:

- czas i intensywność mieszania (prędkość obrotowa, stopień napełnienia mieszalnika)
- rodzaj mieszarki (planetarna, dwuwąłowa),

- system dozowania domieszki (dokładność dozowania),
- konsystencja (początkowa, końcowa),
- domieszki (zawartość środków przeciwiopieniujących),
- domieszki napowietrzające (surowiec, stężenie domieszki),
- rodzaj cementu, dodatków (ilość, stopień rozdrobnienia)
- woda (współczynnik w/c),
- piasek (uziarnienie, wilgotność)
- środki antyadhezyjne (środki do konserwacji mieszalnika),
- transport mieszanki betonowej (stan techniczny betonomieszarki, prędkość obrotowa bębna, czas jazdy),
- wbudowywanie mieszanki betonowej (pompa, szybkość pompowania, wysokość spadania mieszanki),
- zagęszczanie mieszanki betonowej (rodzaj wibratora/wibroprasy, czas trwania zagęszczania).
- temperatura (im wyższa, tym mniejsza zawartość powietrza).

Należy również pamiętać o prawidłowej pielęgnacji betonu napowietrzonego. Szczególne znaczenie przy produkcji betonów napowietrzonych ma ścisła współpraca wszystkich zaangażowanych stron.

5.2.5.12. Betony z użyciem kruszyw z recyklingu

Produkcja betonu nie jest procesem obojętnym dla środowiska, wydobycie oraz obróbka surowców (kruszywa, cement, itd.) wiąże się z emisją CO₂ do atmosfery oraz zużyciem surowców naturalnych. Ponadto każda nowopowstała konstrukcja z betonu potencjalnie przyczynia się do powstawania odpadów z gruzu betonowego, które w przyszłości trzeba będzie zagospodarować. Gruz betonowy odzyskany z konstrukcji, po przekruszenie może być zastosowany w betonie jako kruszywo z recyklingu. Według normy PN-EN 206+A2:2021 kruszywa z recyklingu to kruszywa, które powstały w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego wcześniej na budowie. Kruszywo z przeróbki gruzu budowlanego jako substytut kruszywa naturalnego, w mieszankach betonowych znajduje coraz szersze zastosowanie. Spowodowane jest to głównie względami ekonomicznymi i ekologicznymi. Wykorzystując do betonu kruszywo z recyklingu, możliwe jest ograniczenie zużycia kruszyw naturalnych, co jest równoznaczne z ograniczeniem negatywnego wpływu wywieranego przez eksploatację złóż naturalnych na środowisko. W Belgii, będącej europejskim liderem w tym obszarze, przetwarzane jest około 90% gruzu budowlanego, z czego 75% wykorzystywane jest na niwelację terenu, podbudowy oraz stabilizacje, natomiast 25% jako kruszywo do betonu.

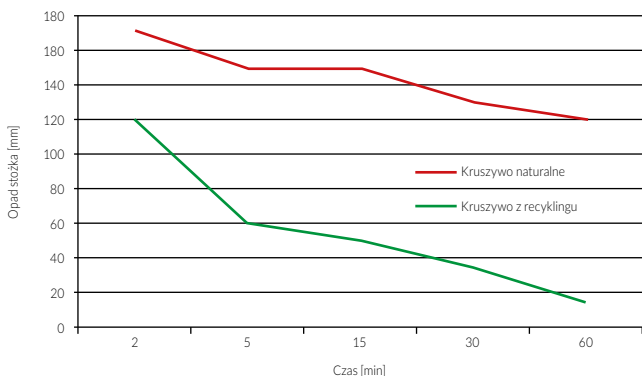
Norma PN-EN 206+A2:2021 nie określa zaleceń dotyczących kruszywa drobnego z recyklingu, podobnie wytyczne niemieckie, jak również RILEM, ograniczają ich zastosowanie. Główną przyczyną tych ograniczeń jest wysoka wodożądność i nasiąkliwość drobnych frakcji, niska gęstość oraz znaczna ilość wprowadzanego wraz z nimi starego, stwardniałego zaczynu cementowego.

Grube kruszywo z recyklingu ($d \geq 4\text{mm}$) można stosować do betonu, zastępując grube kruszywo naturalne. Ustalenie składu betonu z wykorzystaniem kruszywa z recyklingu betonu wymaga uwzględnienia ich odmiennych, w porównaniu z kruszywami naturalnymi, właściwości fizycznych, mechanicznych oraz chemicznych związanych głównie z występowaniem zanieczyszczeń.

Procedura projektowania betonu towarowego z kruszywem z recyklingu powinna uwzględniać jego podwyższoną nasiąkliwość. Ilość wody wynikająca ze współczynnika w/c należy powiększyć o wodę, która zostanie zaabsorbowana w porach kruszywa i nie będzie brała udziału w reakcji hydratacji cementu, lub stosować kruszywa nasycone wodą. Stosując kruszywa z recyklingu należy liczyć się z dużą utratą konsystencji mieszanki betonowej (rys. 5.161). Dlatego też, wykonując beton z tego rodzaju kruszywa, należy:

- wydłużyć czas mieszania składników betonu,
- uwzględnić dodatkową ilość wody zarobowej,
- maksymalnie wydłużyć czas między zadozowaniem wody zarobowej a dodaniem domieszki chemicznej, co pozwoli na ograniczenie absorpcji domieszki chemicznej na powierzchni kruszywa,
- stosować kruszywo z recyklingu w stanie nasyconym wodą.

Kruszywo z recyklingu można stosować w wielu rodzajach betonu, jednak wymagania dotyczące odpowiedniej czystości kruszyw mogą dyskwalifikować je z niektórych obszarów zastosowań. Norma PN-EN 206+A2:2021 dopuszcza stosowanie kruszywa z recyklingu we wszystkich klasach ekspozycji związanych z karbonatyzacją, natomiast w przypadku konstrukcji narażonych na agresję chemiczną, chlorkową, czy zamrażanie i rozmrażanie możliwe jest stosowanie kruszywa typu A tylko w najniższych klasach ekspozycji (XA1, XD1, XF1). Stosowanie kruszywa w pozostałych klasach ekspozycji jest możliwe jedynie pod warunkiem, że znane są klasy ekspozycji, na które był projektowany beton pierwotny, natomiast udział kruszywa z recyklingu w tym przypadku ograniczony jest do 30% całkowitej masy kruszywa naturalnego. Maksymalny udział kruszywa z recyklingu w betonie w poszczególnych klasach ekspozycji przedstawia tabela 5.72.



Rys. 5.161. Konsystencja mieszanki betonowej z kruszywem z recyklingu

Tabela 5.72. Dopuszczalny poziom zastąpienia kruszywa grubego kruszywem z recyklingu

Typ kruszywa z recyklingu	Klasy ekspozycji			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Pozostałe klasy ekspozycji ^{a)}
Typ A (R _{C90} , R _{Cu95} , R _{b10-} , R _{a1-} , FL ₂₋ , XR _{g1-})	50%	30%	30%	0%
Typ B ^{b)} (R _{C50} , R _{Cu70} , R _{b30-} , R _{a5-} , FL ₂₋ , XR _{g2-})	50%	20%	0%	0%

a) *Kruszywa z recyklingu typu A znanego pochodzenia można stosować w klasach ekspozycji, na które zaprojektowano beton pierwotny, przy maksymalnym poziomie zastąpienia 30%*
b) *Nie zaleca się stosowania kruszyw z recyklingu typu B do betonu klas wytrzymałości > C30/37*

Norma PN-EN 206+A2:2021 pozwala na użycie kruszywa z recyklingu w betonie towarowym, pod warunkiem spełniania przez nie szczegółowych wymagań dotyczących proporcji materiałów. Ze względu na skład można wyróżnić dwa typy kruszywa grubego z recyklingu typ A oraz typ B. Na rys. 5.162 przedstawiono dopuszczalne udziały poszczególnych składników kruszywa z recyklingu typu A oraz typu B. Kruszywo z recyklingu typu A jest to kruszywo, któremu stawia się wyższe wymagania. W tabeli 5.73 zestawiono definicje ozna-

czeń poszczególnych typów - składników kruszywa grubego z recyklingu. W rodz. 4 (tabela 4.21) zestawiono kategorie zawartości składników grubych kruszyw z recyklingu. Dodatkowo w tabeli 5.74 przedstawiono zalecenia (wymagania) dla kruszyw grubych z recyklingu stosowanych w betonie.

Tabela 5.73. Kategorie składników grubych kruszyw z recyklingu

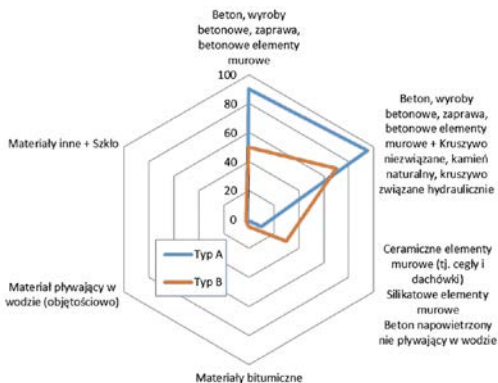
Składnik	Opis
R _c	beton, wyroby betonowe, zaprawa, betonowe elementy murowe
R _u	kruszywo niezwiązane, kamień naturalny, kruszywo związane hydraulicznie
R _b	ceramiczne elementy murowe (cegły i dachówki), silikatowe elementy murowe, beton napowietrzony niepyłujący w wodzie
R _a	materiały bitumiczne
FL	materiał pływający w wodzie (objętościowo)
X	inne: spoiste (głina i grunt), metale różne (żelazne i nieżelazne), niepyłujące w wodzie drewno, plastik i guma, tynk gipsowy
R _g	szkło

Tabela 5.74. Zalecenia dotyczące grubych kruszyw z recyklingu

Właściwość ^{a)}	Typ	Kategoria wg PN-EN 12620
Zawartość pyłów	A+B	Wartość deklarowana
Wskaźnik płaskości	A+B	≤ F _{l50} lub ≤ S _{l55}
Odporność na rozdrabnianie	A+B	≤ LA ₅₀ lub ≤ SZ ₃₂
Gęstość ziaren w stanie suchym ρ _{sd}	A	≥ 2100 kg/m ³
	B	≥ 1700 kg/m ³
Nasiąkliwość	A+B	Wartość deklarowana
Składniki ^{b)}	A	R _{c90} , R _{c95} , R _{b30-} , R _{a1-} , FL ₂₋ , XR _{g1-}
	B	R _{c50} , R _{c70} , R _{b30-} , R _{a5-} , FL ₂₋ , XR _{g2-}
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w wodzie	A+B	SS _{0.2}
Zawartość jonów chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie	A+B	Wartość deklarowana
Wpływ na początek czasu wiązania	A+B	≤ A ₄₀

a) Kategorię NR (brak wymagań) można stosować w odniesieniu do innych właściwości, niewymienionych w niniejszej tablicy, zgodnie z PN-EN 12620

b) W przypadku specjalnych zastosowań, przy których wymagana wysoka jakość wykończenia powierzchni, zaleca się ograniczenie wskaźnika FL składnika do kategorii FL_{0.2}



Rys. 5.162. Udział materiałów składowych w grubych kruszywach z recyklingu Typ A oraz Typ B

Składnikami kruszywa z recyklingu betonowego są oprócz kruszywa naturalnego również zaprawa cementowa oraz zanieczyszczenia. Kruszywo naturalne jako składnik betonu źródłowego ma znaczący wpływ na właściwości fizyczno-chemiczne recyklingowego kruszywa betonowego, podobnie jak ilość pozostałej zaprawy, szczególnie strefa kontaktowa kruszywo-zaczyn (rys. 5.163), która ma decydujące znaczenie dla wytrzymałości. Strefa przejściowa, międzyfazowa to obszar przylegającego do ziarna kruszywa zaczynu cementowego, ma niższą wytrzymałość i sztywność w porównaniu z zaczynem ze względu na stosunkowo większą porowatość i większą objętość fazy wodorotlenku wapnia. Właściwości strefy przejściowej zależą od wielu czynników, takich jak: wielkość ziarna spoiwa, współczynnik w/c, przebieg hydratacji, rodzaj i wielkość kruszywa. Kruszywa z recyklingu mogą zawierać ziarna zaprawy lub ziarna kruszywa z otoczką starej zaprawy. Udział tych faz w kruszywie z recyklingu może dodatkowo obniżać ich cechy wytrzymałościowe oraz zwiększać nasiąkliwość. Podobnie wytrzymałość na rozdrabnianie czy odporność na uderzenia mogą być obniżone poprzez obecność w kruszywie z recyklingu rys powstałych podczas kruszenia konstrukcji betonowych (tabela 5.74).



Rys. 5.163. Schemat ziarna kruszywa z recyklingu

Wymagania zebrane w tabeli 5.74 są bardzo niskie, w większości stanowią bowiem najniższe z kategorii jakie dopuszcza norma PN-EN 12620. Należy zaznaczyć, że dla kruszyw z recyklingu nie stawia się wymagań w obszarze reaktywności alkalicznej (konieczne jest upewnienie się, że beton pierwotny nie zawierał kruszywa reaktywnego). W przypadku kruszyw z surowców wtórnych stosowanych ogółem należy traktować ten materiał jako kruszywo potencjalnie reaktywne, chyba że zostanie ono wyraźnie określone jako niereaktywne. W obu przypadkach zaleca się uwzględnienie nieprzewidzianej zmienności składu.

Szczególnie niebezpiecznym zanieczyszczeniem kruszywa z recyklingu może być wapno niegaszone, którego hydratacja przebiega bardzo powoli wraz ze zwiększeniem objętości produktów. Brak dostępnych metod badań powoduje, że w żadnej z norm nie sprecyzowano wymagań dotyczących dopuszczalnej zawartości, ani kontroli produkcji.

Chlorki w kruszywach zwykłych występują zwykle w postaci soli sodu i potasu, które są łatwo rozpuszczalne w wodzie. Sole takie wpływają na całkowitą zawartość chlorków i alkaliów w betonie. W celu zminimalizowania ryzyka korozji znajdujących się wewnątrz elementów metalowych, zwykle ogranicza się całkowitą zawartość jonów chlorkowych ze wszystkich składników betonu. W kruszywach z recyklingu, a zwłaszcza tych zawierających stwardniały beton lub zaprawę, chlorki mogą być związane w glinianie wapniowym lub innych

fazach, dlatego metoda badania zawartości chlorków poprzez rozpuszczanie w wodzie jest w tym przypadku mało efektywna. W większości kruszyw z recyklingu zawartość jonów chlorkowych może być niska. Zawartość chlorków rozpuszczalnych w kwasie, może zawyżać ich dostępność, natomiast tą wartość zaleca się stosować przy obliczaniu zawartości jonów chlorkowych w betonie w celu zapewnienia dodatkowego marginesu bezpieczeństwa.

Siarczany rozpuszczalne w wodzie, w kruszywach z recyklingu zwykle pochodzą z zapraw i tynków gipsowych, są to potencjalnie reaktywne związki i mogą zwiększać ryzyko spękania betonu.

Kruszywa z recyklingu powodują zmiany właściwości stwardniałego betonu, które należy uwzględnić na etapie projektowania mieszanki betonowej. Ogólne trendy zmian właściwości betonu spowodowanych wprowadzeniem kruszyw z recyklingu przedstawiono w tabeli 5.75.

Tabela 5.75. Zmiany właściwości betonu z kruszywem z recyklingu¹⁾

Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł Young'a	Skurcz betonu	Penetracja wody pod ciśnieniem	Mrozoodporność ²⁾
↓	↓	↓	↑	↑	↔
↑ - zmiana o 10 - 20% ↓ - zmiana o 20 - 50% ↔ - bez zmian					
1) W porównaniu do mieszanek betonowych opartych na kruszywie naturalnym 2) Beton napowietrzony					

Zuwagi na dużą różnorodność i zmienność kruszywa z recyklingu niezwykle ważną jest świadomość pochodzenia surowca wyjściowego. Duża zmienność kruszywa z recyklingu znalazła również swoje odzwierciedlenie w rekomendacjach RILEM TC 121-DRG RF1, które stawiają również szczegółowe wymagania dotyczące zawartości poszczególnych materiałów składowych (tabela 5.76). Według wytycznych RILEM kruszywa z recyklingu można podzielić na 3 kategorie:

- RCAC I materiał pochodzący z elementów murowych,
- RCAC II materiał pochodzący z elementów betonowych,
- RCAC III materiał stanowiący mieszaninę (min. 80% kruszywa naturalnego oraz maks. 20% kruszywa z recyklingu).

Wytyczne niemieckie, jak również RILEM, ograniczają zastosowanie frakcji

drobnych kruszyw pochodzących z recyklingu. Niektóre kraje Unii Europejskiej posługują się własnymi wytycznymi wykorzystania kruszyw z recyklingu. Dla przykładu, wytyczne niemieckie przedstawiono w tabeli 5.77, gdzie oprócz właściwości kruszyw z recyklingu podane są także obszary zastosowania ich w budownictwie.

Prowadzone badania dowodzą, że kruszywa z odzysku można stosować we wszystkich rodzajach betonu. Zasady stosowania zawarte są w załączniku E (informacyjnym) do normy PN-EN 206.

Tabela 5.76. Wymagania RILEM dla kruszyw z recyklingu

Cecha kruszywa	RCAC I	RCAC II	RCAC III
Gęstość ρ w stanie suchym [kg/dm ³]	≥1,500	≥2,000	≥2,400
Nasiąkliwość wagowa [%]	≤20	≤10	≤3
Zawartość materiału $\rho < 2,200$ kg/dm ³ [%]	-	≤10	≤10
Zawartość materiału $\rho < 1,800$ kg/dm ³ [%]	≤10	≤1	≤1
Zawartość materiału $\rho < 1,000$ kg/dm ³ [%]	≤1	≤0,5	≤0,5
Zawartość materiałów obcych [%]	≤5	≤1	≤1
Zawartość metali [%]	≤1	≤1	≤1
Zawartości zanieczyszczeń organicznych [%]	≤1	≤0,5	≤0,5
Zawartość ziaren < 0,063mm [%]	≤3	≤2	≤2
Zawartość ziaren < 4mm [%]	≤5	≤5	≤5
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych (SO ₃) [%]	≤1	≤1	≤1

Gruz betonowy, ze względu na powszechne stosowanie chlorku wapnia jako domieszki przyspieszającej wiązanie i twardnienie betonu, może stanowić źródło chlorków będących zagrożeniem dla stwardniałego zaczynu cementowego, jak również dla stali znajdującej się w żelbecie. Zanieczyszczenie kruszywa z recyklingu gipsem może doprowadzić do wywołania reakcji składników betonu z jonami SO₄²⁻ co może powodować powstawanie ekspansywnych produktów, np. wtórnego ettingitu.

Surowiec (materiał) wtórny, z którego wyprodukowano kruszywo zgodnie z normami dotyczącymi kruszyw (patrz zał. ZA do norm), powinien być na etapie badań wstępnych typu szczegółowo rozpoznany i przebadany, z uwzględnieniem występowania uwalnianych substancji niebezpiecznych, np. metali ciężkich. Jest

to warunek konieczny do oznaczenia kruszywa znakiem CE, dopuszczającym wyrób do obrotu i stosowania.

Normy nie określają zakresu tych badań, tzn. nie podają, jakie rodzaje metali ciężkich należy oznaczać dla kruszywa. Wyjaśnienia należy szukać w treści załącznika ZA norm PN-EN dotyczących kruszyw. Obowiązek badania zawartości uwalnianych metali ciężkich wynika bezpośrednio z ustaleń podanych w Dyrektywie 89/106 EEC oraz z Mandatu M125 Kruszywa, udzielonego CEN przez Komisję Europejską i Europejskie Stowarzyszenie Wolnego Handlu, nawiązujących do tzw. wymagań podstawowych w zakresie bezpieczeństwa wyrobu budowlanego.

Wyroby wprowadzane na rynek muszą być bezpieczne i tylko takie mogą być oznaczone znakiem CE. Stąd badania te powinny być wykonywane w ramach systemu Zakładowej Kontroli Produkcji jako element koniecznej wiedzy o surowcu do produkcji kruszyw, w ramach badań wstępnych typu. Zakres i częstotliwość badań powinna być ustalona przez producenta i zapisana w dokumentach systemu ZKP. Podstawową trudnością w realizacji badań jest brak normowych europejskich uregulowań w zakresie metod badań i kryteriów oceny substancji niebezpiecznych. W takiej sytuacji w badaniach należy stosować metody i kryteria oceny funkcjonujące w poszczególnych krajach członkowskich. W Polsce w zakresie badania substancji niebezpiecznych wykonuje się oznaczenie pierwiastków promieniotwórczych oraz substancji szkodliwych wprowadzanych do wód lub ziemi. Badanie substancji niebezpiecznych przeprowadza się dla wyciągu wodnego uzyskanego wg PN-EN 1744-3:2004. Badanie zawartości poszczególnych substancji szkodliwych w kruszywie oznacza się według norm:

- PN-EN 1233 „Jakość wody. Oznaczanie chromu. Metody absorpcyjnej spektrometrii atomowej”;
- PN-ISO 8288 „Jakość wody. Badania chemicznych właściwości. Oznaczanie kobaltu, niklu, miedzi, cynku, kadmu i ołowiu. Metody atomowej spektrometrii absorpcyjnej z atomizacją w płomieniu”;
- PN-C-04570-05 „Woda i ścieki. Badania zawartości metali metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej. Oznaczania baru w wodzie”.

Tabela 5.77. Kruszywa z recyklingu wg wytycznych niemieckich

Typ kruszywa	Zawartość składnika [%]						Zawartość rozpuszczalnych chlorów [% masy]	Gęstość w stanie suchym [kg/dm ³]	Nasąkliwość masowa [%]	Zawartość frakcji grubych kruszyw z recyklingu [%] w stosie okruszowym				
	Beton, naturalne kruszywo	Cegła	Tynk	Inne mineralne składniki 1)	Asfalt	Zanieczyszczenia 2)				Elementy wewnętrzne	Elementy zewnętrzne	Beton zbrojony	Podbudowy 3)	
													stabilizacje	
TYP I Kruszywo z betonu	≥90	≤10	≤10	≤2	≤1	≤0,2		≥2,000	≤10	≤50	≤40	≤100		
TYP II Kruszywo z elementów budowlanych	≥70	≤30	≤30	≤3	≤1	≤0,5	≤0,4	≥2,000	≤15	≤40	–	≤100		
TYP III Kruszywo z elementów murowych	≥20	≤80	≤5	≤5	≤1	≤0,5		≥1,800	≤20	≤40	–	≤100		
TYP IV Kruszywo mieszane		≥80		≤20		≤1	≤0,15	≥1,500	–	–	–	≤100		

1) np. beton lekki, zaprawa budowlana, pumeks, beton komórkowy

2) np. szkło, ceramika, papier, gips, plastik, metal, drewno

3) obejmuje również frakcje drobne

Ocenę uzyskanych wyników przeprowadza się wg kryteriów zawartych w Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych. W celu uregulowania sytuacji w zakresie substancji niebezpiecznych w CEN podjęto działania dotyczące: klasyfikacji kruszyw sztucznych i z recyklingu w zależności od rodzaju surowca stosowanego do ich produkcji (prace w ramach CEN/TC 154 Kruszywa); opracowania metod badań zanieczyszczeń i kryteriów ich oceny (CEN/TC 351).

Dodatkowe obowiązki dla producenta wynikające ze stosowania surowców wtórnych reguluje REACH, czyli Rozporządzenie (WE) 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 roku dotyczące rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów oraz utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów. Podstawowym celem rozporządzenia REACH jest zapewnienie wysokiego poziomu ochrony zdrowia ludzkiego i środowiska przed zagrożeniami stwarzanymi przez chemikalia wytwarzane, importowane i stosowane lub wprowadzane do obrotu na terenie Unii Europejskiej. Rejestracja w ramach systemu REACH dotyczy wyłącznie substancji chemicznych, które generalnie mogą być szkodliwe dla zdrowia ludzi oraz wpływać, przez ich uwalnianie, na stan środowiska naturalnego.

Zakres rozporządzenia REACH jest bardzo szeroki i obejmuje wszystkie substancje produkowane, wykorzystywane jako półprodukty lub wprowadzane na rynek, w ich postaci własnej, w preparatach lub wyrobach. Rejestracja substancji niebezpiecznych zawartych w wyrobach jest obowiązkowa dla wytwórcy lub importera wyrobów, gdy spełnione są następujące warunki:

- substancje mogą być uwolnione z wyrobów w normalnych i racjonalnie przewidywalnych warunkach użytkowania;
- łączna ilość substancji obecna w wyrobach, z których ma być uwolniona, przekracza 1 tonę rocznie na producenta lub importera.

Uwzględnić trzeba zarówno ilości, które przeznaczone są do uwolnienia, jak i ilości, które nie będą uwolnione. Ponadto, jeśli wytwarzany/importowany jest więcej niż jeden rodzaj wyrobu, z którego ma być uwalniana substancja, to trzeba sumować ilości tej substancji we wszystkich wyrobach, z których ma być ona uwalniana.

Z warunków zgłaszania substancji wynika, że:

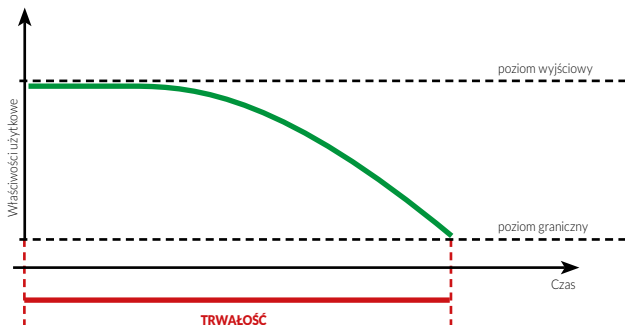
- kruszywa produkowane z surowców naturalnych (mineralnych), tzn. kruszywa naturalne, spełniają podane kryteria i nie wymagają rejestracji, chyba że występują w nich substancje niebezpieczne uwalniane w ilości pow. 0,1%, a ich łączna ilość w wyprodukowanych wyrobach przekracza 1 t;
- kruszywa z recyklingu i sztuczne podlegają obecnie rozporządzeniu REACH i muszą być rejestrowane.

W przypadku kruszyw sztucznych rejestracja powinna być dokonana po etapie wytworzenia odpadu w procesach przemysłowych jako substancji wtórnej. Jeżeli nie zostało to dokonane, rejestracją objęte jest kruszywo otrzymane w wyniku przeróbki odpadu (surowca) w procesie technologicznym produkcji kruszywa. Rejestracja powinna być dokonana zgodnie z rozdz. II rozporządzenia REACH. Informacje o substancji wtórnej powinny być opracowane zgodnie z art. 31 i 32 wymienionego rozporządzenia. Zgodnie z obecnym podejściem producent kruszyw sztucznych powinien wykazać, że jego kruszywo jest wyrobem i spełnia jeden z wymienionych powyżej warunków. Konieczne jest wykonanie badań składu chemicznego kruszywa i na tej podstawie:

- ocenienie zawartości uwalnianych substancji niebezpiecznych oraz określenie ich rodzaju,
- ocenienie ich jakości i stopnia szkodliwości lub wykluczenie ich szkodliwego oddziaływania,
- sprawdzenie na listach substancji zwolnionych z rejestracji i liście substancji już zarejestrowanych.

5.2.5.13. Beton w inżynierii komunikacyjnej

Beton stosowany w budowie obiektów inżynierii komunikacyjnej (drogi, mosty, wiadukty) musi charakteryzować się wysoką wytrzymałością, odpornością na korozyjne oddziaływanie środowiska, wysoką jakością ze względu na to, iż poddawany jest dużym obciążeniom mechanicznym oraz działaniu zmiennych temperatur, a także działaniu środków odladzających. Istnieje konieczność zapewnienia trwałości konstrukcji, co wymaga odpowiedniej staranności przy projektowaniu, wykonywaniu, transporcie i zabudowie oraz prowadzeniu odpowiedniej, starannej pielęgnacji. Trwałość definiowana jest jako zdolność konstrukcji/ elementu do spełnienia wyznaczonej przez projekt funkcji, w określonym czasie i warunkach środowiska (rys. 5.164).



Rys. 5.164. Trwałość konstrukcji

Wymagania w zakresie trwałości konstrukcji/obiektów inżynierii komunikacyjnej zawarte są w obowiązującym Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 roku. (Dz.U. z 2019r. poz. 1642)

Według Rozporządzenia zapewnienie ochrony materiałowo-strukturalnej realizowane jest poprzez:

- stosowanie odpowiednich: klas betonu, rodzaju cementu, rodzaju i uziarnieniu kruszywa oraz dodatków i domieszek,
- uwzględnienie oddziaływania środowiska, stosowanie odpowiednich klas ekspozycji,
- wymagania dodatkowe,
- stosowanie odpowiednich składników betonu.

Zgodnie z zapisami Rozporządzenia, w obiektach inżynierii komunikacyjnej można zastosować cement spełniający wymagania Polskich Norm. Przy doborze cementu uwzględnia się rodzaj, wymiary i technologię wykonania konstrukcji oraz warunki wykonania i pielęgnacji i dojrzewania betonu. Ponadto należy uwzględnić agresywność środowiska, na które będzie narażona konstrukcja, w tym klasyfikację środowiska w odniesieniu do możliwości wystąpienia w betonie konstrukcyjnym zagrożenia destrukcyjną reakcją minerałów z wodorotlenkami sodu i potasu w cieczy porowej betonu. W przypadku wykonania betonu sprężonego w elementach obiektu inżynierskiego stosuje się cement CEM I. Z kolei w przypadku wykonania betonu konstrukcyjnego w elementach masywnych obiektu drogowego dopuszcza się stosowanie cementów o niskim cieple hydratacji LH.

Zgodnie z zapisami Rozporządzenia, w obiektach inżynierii komunikacyjnej można stosować kruszywo spełniające wymagania Polskiej Normy dla kruszyw mineralnych. Dobór kruszywa do betonu ma uwzględniać rodzaj, wymiary, technologii wykonania, warunki wykonania i pielęgnacji betonu, agresywności środowiska, projektowaną trwałość konstrukcji. Uziarnienie kruszywa ustala się doświadczalnie w czasie projektowania mieszanki betonowej. W drogowych obiektach inżynierskich należy stosować kruszywa mineralne niewykazujące szkodliwej reakcji z wodorotlenkami sodu i potasu w betonie.

Dopuszcza się zastosowanie domieszek i dodatków do betonu, zgodnych z Polskimi Normami. Przy doborze dodatku i domieszki bierze się pod uwagę kompatybilność domieszki z cementem, rodzaj, wymiary i technologię wykonania konstrukcji oraz warunki wykonania i pielęgnacji betonu. Należy również uwzględnić agresywność środowiska, na które narażona będzie konstrukcja.

W przypadku zastosowania domieszki napowietrzającej wraz z inną domieszką lub z cementem zawierającym nieklinkierowe składniki główne należy potwierdzić ich kompatybilność w betonie napowietrzonym na podstawie charakterystyki porów powietrznych, zgodnie z Polskimi Normami.

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, celem wsparcia projektantów i technologów (specyfikujących) w procesie projektowania i wykonawstwa trwałych konstrukcji inżynierskich, opracowała Wzorcowe Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB). Wytyczne te w połączeniu z zapisami normy PN-EN 206+A2:2021 wprowadzają zupełnie nową jakość w dotychczasowym podejściu. Przedmiotem WWiORB są wymagania w zakresie wykonania i odbioru robót budowlanych związanych z realizacją obiektów z betonu konstrukcyjnego w monolitycznych drogowych obiektach inżynierskich z zastosowaniem mieszanek betonowych wibrowanych, jak i samozagęszczalnych SCC.

WWiORB są stosowane jako dokument przetargowy i kontraktowy przy zleceniu i realizacji robót na drogach krajowych, stanowią podstawę opracowania Specyfikacji Technicznych Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (STWiORB). Zgodnie z zapisami w dokumentacji przetargowej do betonu należy stosować materiały dopuszczone do obrotu i stosowania, oznakowane znakiem CE lub B dla których producent opracował Deklarację Właściwości Użytkowych lub Krajową Deklarację Właściwości Użytkowych odniesione do Europejskiej Normy zharmonizowanej, Polskiej Normy wyrobu, Europejskiej Oceny Technicznej lub Krajowej Oceny Technicznej.

Obowiązujące Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 roku

nałożyło obowiązek badania reaktywności alkalicznej kruszyw, co zostało określone w zapisach WWiORB M-13.01.00 „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich” precyzujące tematykę badań reaktywności alkalicznej kruszyw, wprowadzając nowe wymagania. Zapisy dotyczące reaktywności alkalicznej zostały wprowadzone również do WWiORB D-05.03.04 „Nawierzchnia z betonu cementowego”.

Problematykę reaktywności kruszyw kompleksowo opisuje dokument opracowany w ramach projektu RID (Rozwój Innowacji Drogowych) „Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich” wraz z zestawem załączników opisujących m.in. metody badania kruszyw. Zgodnie z założeniami ww. wytycznych kruszywo kategoryzuje się z uwagi na reaktywność alkaliczno-krzemionkową (ASR). Wytyczne określają kategorie oddziaływań środowiskowych (tabela 5.78) oraz wprowadzają klasyfikację obiektów budowlanych i inżynierskich w zależności od konsekwencji wystąpienia szkodliwych efektów reakcji alkalia kruszywo (tabela 5.79).

Oznaczenie kategorii reaktywności alkalicznej kruszywa R0 - R3, (patrz tabela 4.20) jest warunkiem koniecznym zastosowania kruszywa w betonie konstrukcyjnym drogowych obiektów inżynierskich oraz w betonie nawierzchniowym. Stosowanie kruszywa o nieznannej kategorii reaktywności alkalicznej jest wykluczone. Kryteria oceny reaktywności kruszywa zależne są od zastosowanej metody badawczej (patrz tabela 4.19). Metoda krótkoterminowa PB/1/18 i metoda długoterminowa PB/2/18 opisane zostały odpowiednio w zał. 1 i zał. 2 do Wytycznych technicznych klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich.

Pełna ocena reaktywności kruszyw wymaga dodatkowo przeprowadzenia analizy petrograficznej wg PB/3/18 (zał. 3 do Wytycznych), której przedmiotem jest identyfikacja skał oraz składników potencjalnie reaktywnych oraz rozpoznanie produktów reakcji alkalia-krzemionka w próbkach zaprawy lub próbkach betonu.

Tabela 5.78. Kategorie oddziaływań środowiskowych, związane z zagrożeniem wystąpienia szkodliwej reakcji alkalia kruszywo

Kategoria środowiska	Opis środowiska	Ekspozycja elementów obiektu z betonu – przykłady obiektów drogowych
E1*	Środowisko suche, chronione przed wilgocią zewnętrzną ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> – elementy wewnętrzne w budynkach w środowisku suchym
E2	Środowisko wilgotne bez oddziaływania agresywnego czynników zewnętrznych ²⁾	<ul style="list-style-type: none"> – elementy wewnętrzne w budynkach o wysokiej wilgotności; – elementy wystawione na działanie wilgoci z powietrza, nieagresywnych wód podziemnych, zanurzone w wodzie słodkiej lub stale zanurzone w wodzie morskiej; – wewnętrzne elementy masywne ³⁾
E3	Środowisko wilgotne z agresywnym oddziaływaniem czynników zewnętrznych ⁴⁾	<ul style="list-style-type: none"> – elementy drogowych obiektów inżynierskich⁵⁾ narażone bezpośrednio na odladzanie solami; – elementy wystawione na cykliczne działanie wody morskiej (zanurzenie i suszenie) lub słony oprysk (strefy rozbryzgu); – wilgotne elementy wystawione na naprzemienne działanie zamarzania i rozmarzania; – wilgotne elementy wystawione na długotrwałe działanie wysokiej temperatury; – jezdnie dróg i parkingi narażone na oddziaływanie soli odladzających; – jezdnie drogowe poddane obciążeniom zmęczeniowym.

* Kategorie środowiska E1 nie ma zastosowania do betonowych nawierzchni drogowych i drogowych obiektów inżynierskich

1) Suche środowisko odpowiada otoczeniu o średniej wilgotności względnej, niższej niż 75% (warunki panujące zazwyczaj wewnątrz budynków), gdzie nie dochodzi do ekspozycji na wilgoć z zewnątrz

2) Powiązane klasy ekspozycji wg PN-EN 206 odpowiadają warunkom w elementach wilgotnych z wyłączeniem ekspozycji na czynniki środowiskowe wymienione w objaśnieniu 4)

3) We wnętrzu betonowych elementów masywnych utrzymuje się wysoka wilgotność, nawet gdy znajdują się w środowisku suchym.

4) Powiązane grupy klas ekspozycji wg PN-EN 206 odpowiadają warunkom w elementach wilgotnych, wystawionych na oddziaływanie środków odladzających zawierających alkalia (poprzez kontakt rozтворów lub mgły solnej), na cykliczne ochładzanie wodą morską, na cykliczne oddziaływanie mrozu

5) Zasięg strefy oddziaływania środków odladzających zgodnie z PN-EN 1992-2:2010 pkt. 4.2 i PN-EN 1992-2:2010/NA:2016-11

Tabela 5.79. Klasy obiektów w zależności od konsekwencji wystąpienia szkodliwych efektów reakcji alkalia-kruszywo

Klasa obiektu	Konsekwencje wystąpienia reakcji AAR	Akceptowalność szkodliwych efektów AAR	Przykłady
S1	Pomijalne	Wobec krótkiego czasu użytkowania pewne ryzyko uszkodzenia wskutek AAR można tolerować.	<ul style="list-style-type: none"> Elementy konstrukcji tymczasowych lub krótko-życiowych (projektowany okres użytkowania do 5 lat)
S2	Nieznaczne konsekwencje ekonomiczne, w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska	Niewielkie ryzyko uszkodzenia wskutek AAR w okresie użytkowania można tolerować z uwagi na łatwość wymiany i mniejsze znaczenie obiektu. Ryzyko obniżone przez warunki otoczenia-dotyczy technologii głębokiego fundamentowania.	<ul style="list-style-type: none"> Prefabrykowane elementy nawierzchni dróg, które łatwo wymienić, np. chodniki, krawężniki oraz betonowe elementy odwodnieniowe Nawierzchnie placów postojowych Nawierzchnie dróg kat. ruchu KRO* Beton w technologii głębokiego fundamentowania
S3	Znaczące konsekwencje ekonomiczne, w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska	Ryzyko uszkodzeń wskutek AAR jest pod kontrolą poprzez selekcję kruszywa, składu cementu. Akceptowalne minimalne uszkodzenia bez wpływu na trwałość eksploatacyjną.	<ul style="list-style-type: none"> Elementy drogowych obiektów inżynierskich o projektowanym okresie użytkowania do 50 lat ; Nawierzchnie dróg kat. ruchu KR1 – KR4; Bariery autostradowe; Elementy drogowych ekranów akustycznych
S4	Bardzo poważne konsekwencje ekonomiczne, w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska	Nietolerowane żadne ryzyko uszkodzenia wskutek AAR i najwyższy stopień zapobiegania takim uszkodzeniom.	<ul style="list-style-type: none"> Elementy drogowych obiektów inżynierskich o projektowanym okresie użytkowania powyżej 50 lat Elementy konstrukcji bardzo trudne do wymiany lub naprawy Nawierzchnie dróg kat. ruchu KR5 - KR7
* dotyczy nawierzchni dróg według rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych			

W szczególnych przypadkach wymaga się rozszerzenia badań reaktywności alkalicznej kruszywa. Po ustaleniu kategorii reaktywności kruszywa (R0-R3), kategorii środowiska (E1-E3) oraz klasy obiektu (S1-S4) dobiera się odpowiednie środki zapobiegające wystąpienia reakcji ASR. W przypadku nawierzchni betonowych i drogowych obiektów inżynierskich kategoria oddziaływań środowiska E1 nie ma zastosowania. Dla pozostałych kategorii warunki stosowania kruszywa naturalnego przedstawiono w tabeli 5.80.

Środkami zapobiegającymi przed negatywnym skutkiem ASR są:

- stosowanie kruszyw niereaktywnych (R0) lub umiarkowanie reaktywnych (R1),
- ograniczenie zawartości alkaliów, np. stosowanie cementów specjalnych niskoalkalicznych (NA),
- stosowanie dodatków do betonu lub składników nieklinkierowych w cementach,
- kombinacja powyższych metod.

Zawartość alkaliów aktywnych w betonie jako Na_2O_{eq} określa się jako sumę zawartości alkaliów z poszczególnych składników mieszanki betonowej.

$$Na_2O_{eq} = \sum_i \frac{w_i}{100\%} x_i z_i \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

gdzie:

w_i – współczynnik uwzględniający udział alkaliów wymywanych dla składnika [%],

x_i – zawartość Na_2O_{eq} dla składnika [%],

z_i – zawartość składnika w betonie [kg/m^3].

Do obliczeń należy przyjąć następujące wielkości współczynników w_i :

- 85% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na Na_2O_{eq} w cemencie portlandzkim CEM I lub cemencie portlandzkim wapiennym CEM II/A-LL-NA;
- 80 % całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na Na_2O_{eq} w cemencie portlandzkim żuźlowym CEM II/A-S-NA;
- 70% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na Na_2O_{eq} w cemencie portlandzkim popiołowym CEM II/A-V-NA, cemencie portlandzkim żuźlowym CEM II/B-S-NA, cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/A-M (S-V)-NA,
- 60% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na Na_2O_{eq} w cemencie portlandzkim popiołowym CEM II/B-V-NA, cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (S-V)-NA, cemencie hutniczym CEM III/A-NA,
- 50% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na Na_2O_{eq} w cemencie wieloskładnikowym CEM V/A (S-V)-NA,

- 30% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w zmielonym granulowanym żużlu wielkopiecowym, jako dodatku typu II do betonu;
- 10% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w popiele lotnym krzemionkowym, jako dodatku typu II do betonu;
- 100% zawartość alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w domieszkach do betonu;
- 100% zawartość alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w wodzie zarobowej (nie dotyczy wody wodociągowej);
- w przypadku kruszyw naturalnych ze złóż krajowych ze skał litych i okrucowych nie stwierdza się znaczącego wymywania alkaliów, a co za tym idzie, alkalia wymywalne z kruszywa pomija się w bilansie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie.

Tabela 5.80. Wymagania dla betonu konstrukcyjnego w inżynierii komunikacyjnej ze względu na reaktywność kruszywa, klasę obiektu i kategorię oddziaływania środowiska

Klasa obiektu	Kategoria oddziaływań środowiska	Kategoria reaktywności kruszywa	
		Niereaktywne R0	Umiarkowanie reaktywne R1
		Zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ na 1 m ³ betonu	
S4	E2	– maks. 3,0 kg/m ³	
	E3	– maks. 3,0 kg/m ³ - dla elementów drogowych obiektów inżynierskich oraz elementów konstrukcji bardzo trudnych do wymiany lub naprawy	
S3	E2	– bez ograniczeń	– maks. 2,4 kg/m ³ cement CEM I – min. 20% V albo 35% S jako dodatek typu II * – maks. 2,4 kg/m ³ i cement NA**: – CEM II/B-V-NA – CEM II/B-M (S-V)-NA – CEM III/A-NA – CEM V/A (S-V)-NA
	E3	– maks. 3,0 kg/m ³	– maks. 2,4 kg/m ³ cement CEM I i min. 25% V albo 50% S jako dodatek typu II* – maks. 2,4 kg/m ³ i cement NA** – CEM II/B-V-NA – CEM II/B-M (S-V)-NA – CEM III/A-NA – CEM V/A (S-V)-NA

V – popiół lotny krzemionkowy wg PN-EN 450-1
S – granulowany żużel wielkopiecowy wg PN-EN 15167-1
* zgodnie z PN-EN 206 i krajowym uzupełnieniem PN-B-06265
** cement NA wg PN-B-19707

UWAGA:

Kruszywa w kategorii reaktywności R2 i R3 nie dopuszcza się do stosowania w betonie konstrukcyjnym w drogowych obiektach inżynierskich i betonowych nawierzchniach dróg.

BETON KONSTRUKCYJNY W DROGOWYCH OBIEKTACH INŻYNIERSKICH

Beton konstrukcyjny powinien spełniać wymagania Wytycznych Wykonania i Odbioru Robót WWIORB M-13.01.00 „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich” i być zgodny z normą PN-EN 206 oraz krajowym uzupełnieniem PN-B-06265. Ocenę i weryfikację stałości właściwości użytkowych należy prowadzić wg krajowego systemu 2+.

Beton w elementach konstrukcyjnych powinien spełniać wymagania w zakresie:

- minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu: C20/25 (beton zwykły) lub LC25/28 (beton lekki),
- odporności na działanie mrozu, nie mniejsza niż:
 - a) F100 w klasie ekspozycji XF1,
 - b) F150 w klasie ekspozycji XF2 lub XF3
 - c) F200 w klasie ekspozycji XF4;
- głębokość penetrację wody pod ciśnieniem, nie więcej niż:
 - a) 60 mm w klasie ekspozycji XA1
 - b) 50 mm w klasie ekspozycji XA2
 - c) 40 mm w klasie ekspozycji XA3, XD3 lub XS3.

Skład mieszanki betonowej powinien być dobrany w taki sposób, aby przy możliwie najmniejszej ilości wody, zapewnić szczelne ułożenie mieszanki w deskowaniu przy zagęszczaniu przez wibrowanie. Współczynnik w/c nie powinien być większy niż 0,45 dla klas betonu C30/37 i wyższej oraz nie większy niż 0,50 w przypadku betonu klasy C25/30. Maksymalna zawartość cementu w mieszance betonowej nie powinna być większa niż:

- 400 kg/m³ dla betonu klasy C25/30,
- 450 kg/m³ dla betonów klasy C30/37 i wyższych,
- dla betonu samozagęszczalnego (SCC) oraz w uzasadnionych przypadkach (za zgodą Inżyniera/Inspektora Nadzoru) dopuszcza się zmianę podanych zawartości cementu do 10%.

Przy doborze cementu uwzględnia się:

- rodzaj, wymiary i technologię wykonania konstrukcji,
- warunki wykonania, pielęgnacji i dojrzewania betonu,
- agresywność środowiska, na które będzie narażona konstrukcja, w tym

klasyfikację środowiska w odniesieniu do możliwości wystąpienia w betonie konstrukcyjnym zagrożenia destrukcyjną reakcją kruszywa z jonami jonu i potasu.

Dopuszcza się do stosowania cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II oraz cement hutniczy CEM III/A-NA i CEM V/A (S-V)-LH w fundamentach masowych. (tabela 5.81), jak również możliwe jest stosowanie dodatków typu II.

Do betonu konstrukcyjnego dopuszcza się stosowanie dodatków typu II według zasad określonych w normach PN-EN 206 i PN-BO6265.

W betonach konstrukcyjnych należy stosować kruszywa naturalne pochodzenia mineralnego, które poza obróbką mechaniczną nie zostały poddane żadnej innej obróbce, zgodnych z PN-EN 12620, PN-EN 13043 oraz Wytycznych GDDKiA dot. klasyfikacji i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie.

Do wykonania betonów konstrukcyjnych nie dopuszcza się stosowania kruszyw:

- z recyklingu i z odzysku,
- węglanowych (nie dotyczy ww. kruszyw węglanowych pochodzenia dewońskiego i starszych, głębokomorskich) - do obiektów klasy S4,
- kategorii reaktywności R2, R3.

W drogowych obiektach inżynierskich należy stosować kruszywa mineralne niewykazujące szkodliwej reakcji z wodorotlenkami sodu i potasu w betonie.

Ponadto ocena kruszyw do betonu konstrukcyjnego w drogowych obiektach inżynierskich wymagana jest według Systemu Oceny i Weryfikacji Stałości Właściwości Użytkowych 2+. Dopuszcza się do stosowania kruszywo grube o maksymalnym wymiarze ziarna $D \leq 31,5$ mm (tabela 5.82), kruszywo drobne o uziarnieniu $d \leq 4$ mm (tabela 5.83).

Tabela 5. 81. Wymagania WWiORB M-13.01.00 względem cementu

Rodzaj betonu	Rodzaj cementu dopuszczonego do stosowania
Beton konstrukcyjny	<ul style="list-style-type: none"> – cement portlandzki CEM I, spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki niskoalkaliczny CEM I – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707 – cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S, spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki żuźlowy niskoalkaliczny CEM II/A-S – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707 – cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL), spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki wieloskładnikowy niskoalkaliczny CEM II/A-M (S-LL) – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707 – cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-V), spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki wieloskładnikowy niskoalkaliczny CEM II/A-M (S-V) – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707 – cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S, spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki żuźlowy niskoalkaliczny CEM II/B-S – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707 – cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V, spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki popiołowy niskoalkaliczny CEM II/A-V – NA, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707 – cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL klasy wytrzymałości 42,5 i wyższej, spełniający wymagania PN-EN 197-1 – cement portlandzki wapienny niskoalkaliczny CEM II/A-LL- NA klasy wytrzymałości 42,5 i wyższej, spełniający wymagania PN-EN 197-1 i PN-B – 19707
Beton konstrukcyjny sprężony	CEM I
Beton konstrukcyjny masowy	zaleca się stosowanie cementu o niskim cieple hydratacji (LH), zgodnym z PN-EN 197-1. w fundamentach masowych dopuszcza się stosowanie cementu CEM V/A (S-V) LH
Beton konstrukcyjny klas ekspozycji XA2 i XA3	należy stosować cementy odporne na siarczany SR wg PN-EN 197-1 lub HSR spełniające wymagania normy PN-B 19707, zalecane do stosowania w klasie ekspozycji XA2 i XA3 w warunkach agresji siarczanowej wg PN-B 06265
<p>Dopuszcza się również zastosowanie cementu CEM III/A-NA, z zastrzeżeniem, że dla elementów narażonych na oddziaływanie środowiska w klasie ekspozycji XF4 należy spełnić dodatkowe wymagania: klasa wytrzymałości cementu $\geq 42,5$ lub klasa wytrzymałości cementu $\geq 32,5$ R z zawartością granulowanego żuźla wielkopiecowego ≤ 50 % (masowo).</p> <p>Do betonu klasy wytrzymałości na ściskanie wyższej niż C30/37 powinien być stosowany cement klasy nie niższej niż 42,5.</p> <p>W przypadkach niejednoznacznych wyników badań reaktywności kruszywa (wartości wyników w górnej granicy kategorii R0 lub w kategorii R1) należy stosować cementy specjalne niskoalkaliczne NA spełniające wymagania normy PN-B 19707.</p>	

Tabela 5. 82. Wymagania WWiORB M-13.01.00 dla kruszywa grubego

Właściwość	Metoda badania	Wymagania
Uziarnienie w zależności od wymiaru kruszywa, kategoria nie niższa niż	PN-EN 933-1	G _c 90/15, gdy wymiar D/d > 2 i D > 11,2 mm
		G _c 85/20, gdy wymiar D/d ≤ 2 lub D ≤ 11,2 mm
Tolerancja uziarnienia na sitach pośrednich w zależności od wymiaru kruszywa, wymagana kategoria	PN-EN 933-1	G _T 15, gdy D/d < 4 i sito pośrednie D/1,4
		G _T 17,5 w przypadku, gdy D/d ≥ 4 i sito pośrednie D/2
Zawartość pyłów; kategoria nie wyższa niż	PN-EN 933-1	f _{1,5}
Kształt kruszywa; kategoria nie wyższa niż	PN-EN 933-3 lub PN-EN 933-4	F ₁₂₀ lub S ₁₂₀
Mrozoodporność w 1 % NaCl; kategoria nie wyższa niż	PN-EN 1367-6	F _{NaCl6}
Odporność kruszywa na rozdrabnianie; kategoria nie wyższa niż	PN-EN 1097-2	LA ₂₅ ²⁾
Gęstość ziaren w stanie suchym	PN-EN 1097-6	deklarowana przez producenta
Gęstość nasypowa	PN-EN 1097-3	deklarowana przez producenta
Skład chemiczny - uproszczony opis petrograficzny (ASR, ACR)	PN-EN 932-3 + PB/3/18	deklarowana przez producenta
Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa ASR	PB/2/18 lub PB/1/18	R0 lub R1, patrz tabela 5.80
Reaktywność alkaliczno-węglanowa ACR	PB/2/18 (wersja zmodyfikowana)	
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie, nie wyższa niż kategoria	PN-EN 1744-1	AS _{0,2}
Zawartość siarki całkowitej	PN-EN 1744-1	≤ 1,0 %
Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie;	PN-EN 1744-1	≤ 0,02 %
Lekkie zanieczyszczenia	PN-EN 1744-1	≤ 0,1 %
Zawartość [%] ziaren o powierzchni przekruszonej i łamanej oraz ziaren całkowicie zaokrąglonych; kategoria nie niższa niż	PN-EN 933-5	C _{100,0}
„Zgorzel słoneczna” bazaltu; kategoria	PN-EN 1367-3 PN-EN 1097-2	SB _{LA} (po gotowaniu: ubytek masy ≤ 1 %, wzrost LA ≤ 8 %)
Zawartość substancji organicznych	PN-EN 1744-1	barwa nie ciemniejsza niż wzorcowa

1) dopuszcza się stosowanie grubego kruszywa o kategorii LA₃₅ pod warunkiem, że jego mrozoodporność, badana w 1% NaCl jest nie większa niż 2%

Tabela 5.83. Wymagania WWiORB M-13.01.00 dla kruszywa drobnego

Właściwość	Metoda badania	Wymagania
Uziarnienie kruszywa, kategoria	PN-EN 933-1	G _r 85
Tolerancje typowego uziarnienia kruszywa deklarowanego przez producenta	PN-EN 933-1	zgodne z załącznikiem C PN-EN 12620+A1:2010
Zawartość pyłów; kategoria nie wyższa niż	PN-EN 933-1	f _s ¹⁾
Gęstość ziaren w stanie suchym	PN-EN 1097-6	deklarowana przez producenta
Gęstość nasypowa	PN-EN 1097-3	deklarowana przez producenta
Skład chemiczny - uproszczony opis petrograficzny (ASR, ACR)	PN-EN 932-3 + PB/3/18	deklarowana przez producenta
Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa ASR	PB/2/18 lub PB/1/18	R0 lub R1, patrz tabela 5.80
Reaktywność alkaliczno-węglanowa ACR	PB/2/18 (wersja zmodyfikowana)	
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie, nie wyższa niż kategoria	PN-EN 1744-1	AS _{0,2}
Zawartość siarki całkowitej	PN-EN 1744-1	≤ 1,0 %
Lekkie zanieczyszczenia	PN-EN 1744-1	≤ 0,1 %
Zawartość substancji organicznych	PN-EN 1744-1	barwa nie ciemniejsza niż wzorcowa

1) dopuszcza się stosowanie grubego kruszywa o kategorii LA₃₅ pod warunkiem, że jego mrozoodporność, badana w 1% NaCl jest nie większa niż 2%

Ze względu na geometryczne właściwości kruszywa należy podczas jego doboru uwzględnić geometrię i kubaturę konstrukcji oraz układ zbrojenia w elemencie konstrukcji. Wytyczne wskazują, iż jako maksymalny nominalny wymiar ziaren kruszywa należy dobierać uwzględniając otulinę zbrojenia oraz minimalną szerokość przekroju elementu. Ziarna kruszywa nie powinny być większe niż:

- 1/3 najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego elementu,
- 3/4 odległości w świetle między prętami zbrojenia leżącymi w jednej płaszczyźnie prostopadłej do kierunku betonowania.

Zawartość frakcji do 2 mm w mieszance kruszyw powinna być jak najmniejsza i jednocześnie zapewnić niezbędną urabialność mieszanki betonowej oraz nie powinna przekraczać:

- a) przy zagęszczeniu mechanicznym przez wibrowanie:
- 42 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 16,0 mm,
 - 38 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 22,4 mm,
 - 37 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 31,5 mm.
- b) w przypadku betonu samozagęszczalnego:
- 50 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 16,0 mm,
 - 47 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 22,4 mm.

Zalecane graniczne krzywe uziarnienie kruszywa do betonu konstrukcyjnego podano w Załączniku P do normy PN-B-06265.

Stosowanie domieszek chemicznych, w betonie konstrukcyjnym odnosi się bezpośrednio do wymagań i zaleceń normy PN-EN 206+A2:2021 i krajowego uzupełnienia PN-B-06265. Do betonu przeznaczonego do wykonania elementów narażonych na oddziaływanie środowiska w klasach ekspozycji: XF2, XF3, XF4 (cykliczne zamrażanie/rozmarzanie) stosuje się domieszkę napowietrzającą. Zawartość powietrza w mieszance betonowej badana zgodnie z PN-EN 12350-7 nie powinna przekraczać wartości granicznych podanych w PN-B-06265 (tabela 5.84).

Podczas próby technologicznej i kontroli jakości robót, zawartość powietrza w mieszance betonowej sprawdza się w miejscu rozładunku mieszanki betonowej z betonowozu.

Tabela 5.84. Wartości graniczne zawartości powietrza w mieszance betonowej w przypadku stosowania domieszki napowietrzającej

Wymiar kruszywa D [mm]	Wartości graniczne zawartości powietrza [%] ¹⁾	Tolerancja pomiarowa [%]
16,0	4,5 ÷ 6,5	-0,5 +1,0
22,4	4,0 ÷ 6,0	
31,5	4,0 ÷ 6,0	

1) W przypadku betonów podawanych przy pomocy pompy, dolną wartość graniczną zawartości powietrza należy zwiększyć o 0,5%

Przy doborze domieszki napowietrzającej wraz z inną domieszką lub z cementem zawierającym nieklinkierowe składniki główne, należy potwierdzić ich kompatybilność w betonie napowietrzonym na podstawie charakterystyki porów powietrznych wg PN-EN 480-11 w odniesieniu do kryteriów zawartych w PN-EN 934-2.

Zalecane jest również stosowanie domieszek modyfikujących właściwości

mieszanki betonowej lub stwardniełego betonu, poprawiających właściwości betonu lub zapewniających właściwości specjalne. Konsystencja mieszanki betonowej powinna być dostosowana do warunków zagęszczenia i zabudowy, tzn. wymiarów przekroju elementu, objętości elementu, zagęszczenia i układu prętów zbrojeniowych. Dobierając konsystencję uwzględnić należy również warunki i możliwości technologiczne Wykonawcy, w tym przede wszystkim rodzaj zastosowanego deskowania (lub form), rodzaj, wydajność i liczbę urządzeń zagęszczających (wibratory wgłębne, wibratory przyczepne, wibratory powierzchniowe, itp.), a także urządzeń do powierzchniowego wykańczania betonu (rodzaj i wydajność zacieraczek mechanicznych).

Konsystencja mieszanki betonowej powinna być określana przez klasę metody opadu stożka zgodnie z PN-EN 12350-2 lub metody rozptyłu stożka zgodnie z PN-EN 12350-8. Dopuszcza się także określenie konsystencji mieszanki betonowej poprzez zdefiniowanie założonej wartości opadu stożka.

Ocenę i weryfikację stałości właściwości użytkowych wytwarzanego betonu należy prowadzić według krajowego systemu 2+. Czas transportu mieszanki betonowej (od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wyładunku mieszanki) nie powinien być nie dłuższy niż 90 min (zgodnie z PN-B 06265).

NAWIERZCHNIA Z BETONU CEMENTOWEGO

Beton nawierzchniowy, wg definicji Wytycznych Wykonania i Odbioru Robót WWIORB D-05.03.04 „Nawierzchnia z betonu cementowego”, to beton napowietrzony o określonej wytrzymałości na ściskanie, rozciąganiu przy zginaniu oraz mrozoodporności, wbudowany w nawierzchnię. Ponadto wymagana jest zgodność z PN-EN 206+A2:2021 oraz PN-B-06265. Ocenę i weryfikację stałości właściwości użytkowych należy prowadzić wg krajowego systemu 2+. Do betonu nawierzchniowego należy stosować materiały dopuszczone do obrotu i stosowania które są oznakowane znakiem CE lub znakiem B i dla których Wykonawca (Producent) przedstawi Deklarację Właściwości Użytkowych (DWU) lub Krajową Deklarację Właściwości Użytkowych (KDWU). Przy wyborze materiałów do wbudowania, należy uwzględnić klasę obiektu S1-S4 oraz kategorię środowiska E1-E3, a także rodzaj (konstrukcję) nawierzchni i kategorię ruchu (tabela 5.85). Według wytycznych WWIORB nawierzchnie z betonu cementowego powinny odpowiadać wymaganiom kategorii środowiskowej E3 (tabela 5.86).

Tabela 5.85. Rodzaje nawierzchni z betonu cementowego w zależności od kategorii ruchu

Rodzaj nawierzchni	Kategoria ruchu
Nawierzchnia dwuwarstwowa, gdy górna i dolna warstwa są z różnych mieszanek, a górna warstwa jest z kruszywem odkrytym.	KR5 – KR7
Nawierzchnia dwuwarstwowa, gdy górna i dolna warstwa są z tej samej mieszanki. Nawierzchnia jednowarstwowa	KR1 – KR7

Tabela 5.86. Beton nawierzchniowy a warunki środowiska

Warstwa betonu nawierzchniowego	Klasa ekspozycji wg: PN-EN 206	Kategoria środowiskowa wg CEN/TR 16349
Dolna	XF4, XM2	E3
Górna	XF4	E3

Do wykonania nawierzchni z betonu cementowego powinny być stosowane cementy w klasie wytrzymałości 32,5 lub 42,5 o wytrzymałości wczesnej normalnej (N) lub wysokiej (R), z tym że w przypadku nawierzchni dwuwarstwowej, w obu warstwach powinien być wykorzystany ten sam cement. W przypadku możliwości wystąpienia agresji siarczanowej (wyspecyfikowane klasy ekspozycji XA2, XA3 z uwagi na poziom siarczanów w gruncie lub wodzie gruntowej) należy stosować cementy odporne na siarczany SR wg PN-EN 197-1 lub HSR wg PN-B-19707. Cementy niskoalkaliczne NA zgodne z PN-B 19707 stosować należy zgodnie z wytycznymi (tabela 5.80). Wymagania WWIORB D-05.03.04 względem cementu zestawiono w tabeli 5.87.

Do betonu nawierzchni drogowych należy stosować kruszywo dla którego prowadzi się ocenę zgodności wg systemu 2+. Wymagania dla kruszywa stosowanego do betonu nawierzchniowego podano w tabeli 5.88 dla kruszywa grubego i tabeli 5.89 dla kruszywa drobnego.

Ponadto powinny być zastosowane kruszywa o wymiarach jak niżej, gdzie D/d jest nie mniejsze niż 1,4, o uziarnieniu:

- dla nawierzchni dla KR1÷KR4 (jednowarstwowych oraz dwuwarstwowych z tej samej mieszanki betonowej) uziarnienie mieszanki mineralnej (stosu okruszowego) 0/22 lub 0/31,5 mm,
- dla nawierzchni dla KR5÷KR7 (nawierzchnia dyblowana i kotwiona, w przypadku KR7 również ze zbrojeniem ciągłym):
 - dla górnej warstwy nawierzchni z odkrytym kruszywem frakcje kruszyw o uziarnieniu: 0/2, 4/8 lub 0/2, 5/8 mm,

- dla dolnej warstwy nawierzchni uziarnienie mieszanki mineralnej (stosu okruszowego) w mieszance betonowej 0/16, 0/22 lub 0/31,5 mm,
- dla górnej warstwy nawierzchni dwuwarstwowej NGCS uziarnienie mieszanki mineralnej (stosu okruszowego) w mieszance betonowej 0/8 mm, 0/16 mm lub 0/22 mm,
- dla nawierzchni jednowarstwowej NGCS uziarnienie mieszanki mineralnej (stosu okruszowego) w mieszance betonowej 0/16 mm, 0/22 mm lub 0/31,5 mm,

W przypadku mieszanki z odkrytym kruszywem wymagane jest, aby w stosie okruszowym udział frakcji kruszywa większego od 4 mm stanowił minimum 68% mieszanki mineralnej.

Tabela 5.87. Wymagania względem cementu do stosowania w nawierzchniach betonowych

Rodzaj cementu	KR1-KR3	KR4	KR5-KR7
CEM I 32,5 R CEM I 32,5 N	początek czasu wiązania wg PN-EN 196-3 ≥ 120 minut stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 $\leq 3500\text{cm}^2/\text{g}$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$		
CEM I 42,5 R CEM I 42,5 N	początek czasu wiązania wg PN-EN 196-3 ≥ 90 minut stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 $\leq 3800\text{cm}^2/\text{g}$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$		
CEM II/A-S	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$		początek czasu wiązania wg PN-EN 196-3 ≥ 120 minut $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$
CEM II/B-S	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$		
CEM II/A-M (S-LL)	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$		Brak możliwości stosowania
CEM III/A ²⁾	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 1,05\%$		
CEM II/A-LL	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 0,80\%$	Brak możliwości stosowania	
CEM II/A-V ¹⁾	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^{3)} \leq 1,20\%$		
CEM II/A-M (S-V) ¹⁾			
1) jeśli nawierzchnia nie będzie poddawana działaniu środków odladzających; strata prażenia popiołu lotnego użytego do produkcji cementu nie więcej niż 5% (kategoria A wg PN-EN 450-1), 2) klasa wytrzymałości cementu 42,5, 3) zawartość alkaliów oznaczona wg PN-EN 196-2 jako $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$			

Tabela 5.88. Właściwości i kategorie kruszywa grubego do betonowych nawierzchni drogowych

Właściwości kruszywa	Przeznaczenie betonu do nawierzchni			
	Niedyblowana i niekotwiona	Dyblowana i kotwiona, nawierzchnie zbrojone ze szczelinami podłużnymi, nawierzchnie ze zbrojeniem ciągłym, nawierzchnie złożone (mieszane)		
	Nawierzchnia jednowarstwowa (JWN) KR1-KR2	Górna i dolna warstwa nawierzchni (GWN i DWN), nawierzchnia jednowarstwowa (JWN) KR3+KR4	Dolna warstwa nawierzchni (DWN) KR5+KR7	Górna warstwa nawierzchni (GWN) z odkrytym kruszywem lub NGCS KR5+KR7
Uproszczony opis petrograficzny wg PN-EN 932-3	Deklarowany przez producenta			
Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6, rozdz. 7, 8 lub 9	Deklarowany przez producenta			
Gęstość nasypowa wg PN-EN 1097-3	Deklarowany przez producenta			
Uziarnienie wg PN-EN 933-1, kat. nie niższa niż: gdzie: $D/d > 2$, $D > 11,2$	G _c 90/15			
jw. gdzie: $D/d \leq 2$ lub $D \leq 11,2$	G _c 85/20			
Tolerancje uziarnienia na sitach pośrednich, nie większe niż: gdzie: $D/d < 4$; $D/1,4$	G _T 15			
jw. lecz: $D/d \geq 4$; $D/2$	G _T 17,5			
Zawartość pyłu wg PN-EN 933-1; kat. nie wyższa niż:	f _{1,5}		f _{1,5} ¹⁾	
Kształt kruszywa grubego wg PN-EN 933-3 lub wg PN-EN 933-4; kat. nie wyższa niż:	Sl ₄₀ lub Fl ₃₅		Sl ₂₀ lub Fl ₂₀	Sl ₁₅ lub Fl ₁₅ dla odkrytego kruszywa; Sl ₂₀ lub Fl ₂₀ dla NGCS
Zawartość ziaren o powierzchni przekruszonej i łamanej [%] wg PN-EN 933-5, kat. nie niższa niż:	Brak wymagań	C _{90/1}	C _{100/0} ²⁾	C _{100/0}

Odporność kruszywa na rozdrabnianie wg PN-EN 1097-2, roz. 5, kat. nie wyższa niż:	LA ₄₀	LA ₃₅	LA ₃₅	LA ₂₅
Odporność na polerowanie wg PN-EN 1097-8	PSV deklarowana (nie mniej niż 48)	PSV deklarowana (nie mniej niż 48 dla GWN i JWN)	-	PSV ₅₀ (nie mniej niż 48 dla NGCS)
Mrozoodporność wg PN-EN 1367-1; kat. nie wyższa niż:	F ₂	F ₁	-	-
Mrozoodporność wg PN-EN 1367-6 badana w 1 % NaCl, kat. nie wyższa niż:	-	F _{NaCl6} (dla GWN i JWN)	F _{NaCl6}	F _{NaCl6}
„Zgorzel słoneczna” bazaltu wg PN-EN 1367-3; badanie na kruszywie 10/14; kat.:	SB _{LA}			
Reaktywność kruszywa - metoda przyspieszona w 1 N roztworze NaOH w temperaturze 80°C (wg. PB/1/18)	Dla dróg o wysokiej jakości (klasa obiektu S4) wymaga się stosowania kruszyw niereaktywnych RO			
Reaktywność alkaliczna - metoda długoterminowa (wg. PB/2/18)	Dla dróg o wysokiej jakości (klasa obiektu S4) wymaga się stosowania kruszyw niereaktywnych RO			
Zanieczyszczenia lekkie wg PN-EN 1744-1 p.14.2:	≤ 0,1 %			
Zawartość substancji organicznych wg PN-EN 1744-1 p.15.1	Barwa nie ciemniejsza od wzorcowej			
Zawartość siarki całkowitej wg PN-EN 1744-1, rozdz. 11	≤ 1%			
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie, kat. nie wyższa niż:	AS _{0,8}			
Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie wg PN-EN 1744-1,	≤ 0,02%			
1) zawartość pyłów należy ograniczyć do max. 1%, np. przez płukanie kruszywa przed sporządzeniem z niego mieszanki, 2) w przypadku kruszywa z przekruszenia surowca skalnego ze złoża polodowcowego, dopuszcza się kategorię nie niższą niż C _{95/1} , w przypadku klasy obiektu S4 nie dopuszcza się stosowania kruszywa takiego pochodzenia				

Tabela 5.89. Właściwości i kategorie kruszywa drobnego do betonowych nawierzchni drogowych

Właściwości kruszywa	Przeznaczenie betonu do nawierzchni			
	Niedyblowana i niekotwiona	Dyblowana i kotwiona, nawierzchnie zbrojone ze szczelinami podłużnymi, nawierzchnie ze zbrojeniem ciągłym, nawierzchnie złożone (mieszane)		
	Nawierzchnia jednowarstwowa (JWN) KR1-KR2	Górna i dolna warstwa nawierzchni (GWN i DWN), nawierzchnia jednowarstwowa (JWN) KR3÷KR4	Dolna warstwa nawierzchni (DWN) KR5÷KR7	Górna warstwa nawierzchni (GWN) z odkrytym kruszywem lub NGCS KR5÷KR7
Uproszczony opis petrograficzny wg PN-EN 932-3	Deklarowany przez producenta			
Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6, rozdz. 7,8 lub 9	Deklarowana przez producenta			
Gęstość nasypowa wg PN-EN 1097-3	Deklarowana przez producenta			
Uziarnienie wg PN-EN 933-1, kat. nie niższa niż: gdzie: $D/d > 2$, $D > 11,2$	G _F 85			
Zawartość pyłu wg PN-EN 933-1; kat. nie wyższa niż:	f ₃			
Reaktywność kruszywa - metoda przyspieszona w 1 N roztworze NaOH w temperaturze 80°C (wg. PB/1/18)	Dla dróg o wysokiej jakości (klasa obiektu S4) wymaga się stosowania kruszyw niereaktywnych RO			

Reaktywność alkaliczna - metoda długoterminowa (wg. PB/2/18)	Dla dróg o wysokiej jakości (klasa obiektu S4) wymaga się stosowania kruszyw niereaktywnych R0
Zanieczyszczenia lekkie wg PN-EN 1744-1 p.14.2.	$\leq 0,5\%$
Zawartość substancji organicznych wg PN-EN 1744-1 p.15.1	Barwa nie ciemniejsza od wzorcowej
Zawartość siarki całkowitej wg PN-EN 1744-1, rozdz. 11;	$\leq 1\%$
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie, kat. nie wyższa niż:	AS _{0,8}
Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie wg PN-EN 1744-1,	$\leq 0,02\%$

Oznaczenie kategorii reaktywności alkalicznej kruszywa jest warunkiem koniecznym jego zastosowania w betonie nawierzchniowym. Stosowanie do betonu kruszywa o nieznannej kategorii reaktywności alkalicznej jest wykluczone. Beton nawierzchniowy, z definicji powinien być napowietrzony, tj. zawierać domieszkę napowietrzającą. Przy wyborze domieszki należy uwzględnić jej kompatybilność z cementem. W przypadku zastosowania więcej niż jednej domieszki należy sprawdzić ich wzajemną kompatybilność, na etapie wykonywania zarobów próbnych i podczas sprawdzania receptury. Nie należy stosować równocześnie więcej niż trzech rodzajów domieszek. Wszystkie domieszki muszą pochodzić od jednego producenta. Beton nawierzchniowy powinien spełniać wymagania zawarte w tabeli 5.90.

Tabela 5.90. Wymagania dla betonu nawierzchniowego

Właściwości betonu nawierzchniowego	Wymagania	Metoda badania
Gęstość, tolerancja w stosunku do betonu wg zatwierdzonej receptury	$\pm 3,0 \%$	PN-EN 12390-7
Klasa wytrzymałości na ściskanie w 28 dniu ¹⁾ – dla kategorii ruchu KR1÷KR4 – dla kategorii ruchu KR5÷KR7	$\geq C30/37$ $\geq C35/45$	PN-EN 12390-3
Wytrzymałość betonu na zginanie w 28 dniu ¹⁾ twardnienia – dla kategorii ruchu KR1÷KR4 – dla kategorii ruchu KR5÷KR7	$\geq 4,5 \text{ MPa}$ $\geq 5,5 \text{ MPa}$	PN-EN 12390-5
Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu w 28 dniu ¹⁾ twardnienia – dla kategorii ruchu KR1÷KR4 – dla kategorii ruchu KR5÷KR7	$\geq 3,0 \text{ MPa}$ $\geq 3,5 \text{ MPa}$	PN-EN 12390-6
Kategoria mrozoodporności w 28 dniu ¹⁾ wg PN-EN 13877-2 (dla GWN oraz JWN) – dla betonów w klasie ekspozycji XF4 dla nawierzchni z innym rodzajem uszorstnienia niż kruszywo odkryte – dla betonów w klasie ekspozycji XF4 dla nawierzchni z kruszywem odkrytym (w poszczególne strefach)	FT2	PKN-CEN/TS EN 12390-9
Charakterystyka porów powietrznych – zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3mm (A_{300}) – wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie, L	$\geq 1,5 \%$ $\leq 0,200 \text{ mm}$	PN-EN 480-11 lub PB/O/18 dla odwiertów
Mrozoodporność F150, przy badaniu odporności betonu na działanie mrozu w 28 dniu (dla DWN i JWN) – ubytek masy próbki, – spadek wytrzymałości na ściskanie,	$\leq 5 \%$ $\leq 20 \%$	PN-B-06265
Dot. Dolnej warstwy nawierzchni (DWN) KR5÷KR7: Klasa wytrzymałości na ściskanie betonu wg PN-EN 13877-2 pkt 4.2.2	$\geq CC 40$	PN-EN 12390-3
1) lub w czasie równowaznym w stosunku do 28 dni twardnienia, wynikającym z charakterystyki użytego cementu. 2) Wymaganie odnosi się tylko do nawierzchni betonowych o wysokim ryzyku pojawiania się na nich paliwa lub oleju np. punkty poboru opłat, stacje benzynowe, parkingi, miejsca obsługi podrózników.		

Maksymalny wymiar kruszywa nie powinien przekraczać 1/4 grubości warstwy, w przypadku nawierzchni zbrojonych dylatowanych oraz nawierzchni o zbrojeniu ciągłym maksymalny wymiar kruszywa nie powinien przekraczać 1/3 długości przestrzeni pomiędzy podłużnymi prętami zbrojeniowymi.

Do górnej warstwy nawierzchni betonowej (GWN) o odkrytym kruszywie wymaga się stosowania mieszanki kruszyw 0/8 mm o nieciąglYM uziarnieniu. Do dwuwarstwowych nawierzchni NGCS, do górnej warstwy zaleca się stosowanie mieszanki kruszyw o uziarnieniu 0/8, 0/16 lub 0/22 mm. Krzywe granulometryczne, które mogą być wykorzystane do projektowania betonu nawierzchniowego określa tabela 5.91.

Tabela 5.91. Zalecane (informacyjne) graniczne uziarnienie kruszywa

Sito	Mieszanka 0/8 mm (uziarnienie nieciągle)		Mieszanka 0/16 mm		Mieszanka 0/22,4 mm		Mieszanka 0/31,5 mm	
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100
22,4	100	100	100	100	100	100	74	88
16	100	100	100	100	62	85	62	80
8	100	100	60	76	38	68	38	62
4	30	74	36	56	32	52	23	47
2	30	57	21	42	14	40	14	37
1	21	42	12	32	8	30	8	28
0,5	14	26	8	20	5	19	5	18
0,25	5	11	3	8	2	8	2	8

Zaleca się, aby zawartość cementu oraz ziaren do 0,25 mm, mieściła się w przedziale 450-520 kg/m³. W przypadku betonu dla dróg kategorii ruchu KR5-KR7 zawartość cementu nie może być mniejsza niż 360 kg/m³, natomiast dla nawierzchni z odkrytym kruszywem zawartość cementu w górnej warstwie betonu nie może być mniejsza niż 420 kg/m³. WWIORB D-05.03.04 dla nawierzchni z betonu cementowego określa również minimalny współczynnik w/c na poziomie 0,45. Do betonu dla dróg kategorii ruchu KR1+KR4 mogą być stosowane dodatki typu II według zasad określonych w normie PN-EN 206 natomiast w żadnym wypadku niedopuszczalne jest uwzględnienie ich w obliczeniach zawartości cementu i współczynnika w/c. Konsystencja mieszanki betonowej powinna być opisana klasą (wg tabeli 5.92) dostosowana do warunków transportu, układania oraz zagęszczania, tak aby nie dochodziło do segregacji, a podczas zagęszczania powstawała jednorodna, szczelna struktura oraz została osunięta wymagana forma nawierzchni. Zawartość powietrza w mieszance betonowej powinna być badana zgodnie z PN-EN 12350-7 i spełniać wymagania przedstawione w tabeli 5.93.

Tabela 5.92. Klasy konsystencji mieszanki betonowej dla nawierzchni z betonu cementowego

Klasa konsystencji	Metoda badawcza
S1 – S2	PN-EN 12350-2 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
V2 – V4	PN-EN 12350-3 Badania mieszanki betonowej - Część 3: Badania konsystencji metodą Vebe
C1 – C2	PN-EN 12350-4 Badania mieszanki betonowej - Część 4: Badanie konsystencji metodą oz stopnia zagęszczalności

Tabela 5.93. Wymagana zawartość powietrza w mieszance betonowej betonu nawierzchniowego

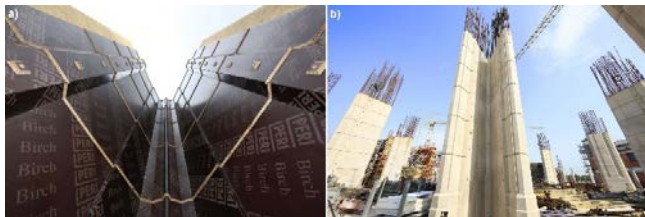
Wymiar kruszywa D [mm]	Etap wykonywania badań	
	Projektowanie składu [%]	Zatwierdzanie receptury, próba technologiczna, kontrola jakości [%]
8,0	5,0 - 6,5	Wartości z projektowania składu mieszanki z uwzględnieniem tolerancji pomiarowej: -0,5; +1,0
16,0; 22,4	4,5 - 6,0	
31,5	4,0 ÷ 5,5	

5.3. Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego

5.3.1. Deskowania i środki antyadhezyjne

Ważnym aspektem w planowaniu robót monolitycznych jest odpowiedni dobór deskowania. Podstawową rolą deskowania jest nadanie kształtu elementom konstrukcji w taki sposób, aby uzyskać oczekiwany efekt (rys. 5.165). Kształt elementów wynika nie tylko z funkcji konstrukcyjnych, lecz także, coraz częściej, z oryginalnych pomysłów architektów (beton architektoniczny). Dobór deskowania zależy w głównej mierze od:

- technologii i organizacji robót (metoda wykonania obiektu),
- parcia mieszanki betonowej (częściowo zależne od właściwości reologicznych mieszanki betonowej),
- jakości powierzchni betonu (beton samozagęszczalny, architektoniczny).



Rys. 5.165. Budowa Centrum Jana Pawła II w Krakowie a) deskowanie słupów, b) gotowy element po rozdeskowaniu (www.peri.com.pl)

Wysoką jakość powierzchni betonu można uzyskać stosując mieszankę betonową o odpowiednich właściwościach reologicznych (urabialność, konsystencja, zdolność do szczelnego wypełnienia formy, samoodpowietrzanie), wykonaną i zabudowaną zgodnie ze sztuką budowlaną oraz poddanej pielęgnacji odpowiednią metodą i w określonym czasie. Należy mieć na uwadze, że kluczowe znaczenie dla jakości uzyskanej powierzchni betonu (pod względem technicznym i estetycznym) ma stan poszycia deskowania oraz rodzaj i ilość zastosowanego środka antyadhezyjnego. Dobór powinien uwzględniać:

- rodzaj posiadanego deskowania lub formy (metalowe, drewniane, sklejka wodoodporna, tworzywo sztuczne),
- wymagania stawiane betonowi po rozdeskowaniu, np. betony architektoniczne, wodoszczelne, gładkie i inne,
- przeznaczenie elementów betonowych, np. kontakt z wodą pitną,
- warunki dojrzewania betonu, np. podgrzewane deskowanie, betonowanie w warunkach obniżonych temperatur.

Preparat antyadhezyjny nie może pozostawać na powierzchni betonu ani wpływać na barwę i jakość powierzchni. Ponadto środki antyadhezyjne należy dobrać tak, aby nie miały negatywnego wpływu na beton, a także wkładki zbrojeniowe, stal sprężającą, deskowanie, itp. Muszą także spełniać wymagania w zakresie ochrony środowiska i nie mogą być szkodliwe dla zdrowia ludzi i zwierząt. Preparaty antyadhezyjne muszą być nakładane w odpowiedniej ilości za pomocą urządzeń do tego przystosowanych – mechanicznie lub ręcznie – w taki sposób, aby nie dopuścić do spływania (tworzenia zacieków) po powierzchni deskowania, a w efekcie, na powierzchni elementu (rys. 5.166, tabela 5.94).



Rys. 5.166. Przebarwienia betonu spowodowane nierównomiernym nałożeniem środka antyadhezyjnego

Tabela 5.94. Wpływ wykonawstwa na wygląd powierzchni betonu

Estetyka powierzchni	Wykonawstwo jako przyczyna
Powierzchnia betonu gładka, brak porów	Zastosowano środek antyadhezyjny z lotnym rozpuszczalnikiem organicznym grupy AIII, zachowano niezbędny czas odparowania, formę wypełniono mieszanką po ok. 45 minutach
Liczne pory, równomiernie rozmieszczone na powierzchni betonu	Zastosowano środek antyadhezyjny z lotnym rozpuszczalnikiem organicznym grupy AIII, nie zachowano niezbędnego czasu na odparowanie, formę wypełniono betonem po ok. 10 minutach
Brak raków na powierzchni betonu	Właściwy czas zagęszczania (ok. 20 sekund)
Raki i pory na powierzchni betonu	Zbyt krótkie zagęszczanie (ok. 5 sekund)
Intensywne tworzenie się porów na powierzchni betonu	Zastosowano jako środek antyadhezyjny, olej mineralny nie zawierający domieszek typu TR
Przebarwienia i pylenie na powierzchni betonu	Zastosowano emulsję na bazie oleju roślinnego. Temperatura wiązania betonu ok. 60°C
Liczne plamy na powierzchni betonu	Przed betonowaniem nie wyczyszczono właściwie formy lub szalunku
Miejscami mleczko cementowe zerwane z powierzchni betonu	Nie zastosowano środków antyadhezyjnych
Pory na powierzchni betonu, przebarwienia na krawędziach	Za grubo nałożony środek antyadhezyjny. Przy wypełnianiu form betonem środek antyadhezyjny został przesunięty na obrzeża

Należy ściśle przestrzegać podanych przez producenta czasów odparowania rozpuszczalników, aby mieć gwarancję właściwego ich działania. Niewłaściwe stosowanie środków antyadhezyjnych jest powodem wielu wad betonu oraz skrócenia okresu żywotności deskowań (tabela 5.93).

5.3.2. Transport i układanie mieszanki betonowej

Wykonywanie robót i operacji związanych z transportem i układaniem mieszanki betonowej można realizować jedynie w okresie nieprzekraczającym początku czasu wiązania betonu. Z tego względu należy szczególną uwagę zwrócić na czas transportu mieszanki betonowej z wytwórni do miejsca wbudowania. Uzupelnienie krajowe PN-B-06265 do normy PN-EN 206 podaje, że jeżeli dostawca z odbiorcą nie uzgodnią inaczej, to betoniarki samochodowe należy całkowicie rozładować w czasie nie dłuższym niż 90 minut, licząc od chwili pierwszego kontaktu wody z cementem w ramach produkcji danego załadunku/ładunku. Zgodnie z ww. normą wszystkie stosowane do produkcji betonu mieszalniki (zarówno stacjonarne, jak i samochodowe) powinny zapewnić równomierne rozprowadzenie składników oraz uzyskanie jednorodnej konsystencji mieszanki betonowej, zarówno w czasie mieszania, jak i transportu.

Transport mieszanki betonowej może być bliski (w obrębie placu budowy) lub daleki (z wytwórni betonu). Do transportu dalekiego zasadniczo wykorzystywane są mieszalniki samochodowe lub betonomieszarki samojezdne (rys. 5.167), z kolei w transporcie bliskim stosowane są:

- rynny i rury spustowe,
- kosze przemieszczane za pomocą suwnic lub żurawi,
- pompy (rys. 5.168) i przenośniki pneumatyczne z rurociągami i osprzętem.

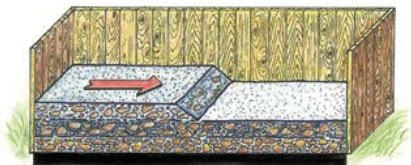
Wybór środków i sposobu transportu musi być dokonany, na etapie projektowania mieszanki betonowej, z uwzględnieniem czasu trwania transportu oraz właściwości mieszanki betonowej (konsystencja i utrzymanie jej w czasie). Również sposób układania mieszanki betonowej w deskowaniu (formie) zależy od właściwości reologicznych (głównie konsystencji). Na wybór technologii układania ma także wpływ wielkość betonowanego elementu, jego kształt, rozmieszczenie i zagęszczenie zbrojenia, zakres robót i przyjęta technologia wykonania konstrukcji.



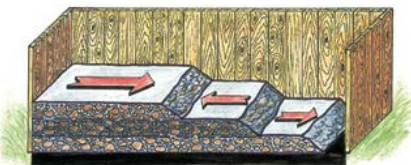
Rys. 5.167. Betonmieszarka samochodowa



Rys. 5.168. Pompa do betonu



poziome warstwy ciągłe – mieszankę układa się na całej powierzchni elementu betonowego; sposób ten jest korzystny w przypadku niezbyt dużych powierzchni



poziome warstwy ze stopniowaniem – sposób ten jest stosowany przy dużych powierzchniach i niewielkiej grubości



warstwy pochyle – mieszanka układana jest na całą wysokość elementu betonowego; sposób ten stosuje się w przypadku wysokich elementów

Rys. 5.169. Sposoby układania mieszanki betonowej („ABC betonu” - wyd. Polski Cement)

Kolejność układania mieszanki betonowej jest technologicznie dowolna, powinna jednak zapewnić ciągłość betonowania. Przykłady prawidłowego układania mieszanki betonowej pokazano na rys. 5.169. Podstawowym warunkiem właściwej zabudowy jest zachowanie jednorodności mieszanki betonowej w trakcie jej układania w deskowaniu, czyli niedopuszczenie do rozsegregowania składników.

Układanie mieszanki betonowej powinno odbywać się przy zachowaniu następujących wymagań:

- maksymalna wysokość swobodnego zrzucania mieszanki powinna się zmniejszać wraz ze wzrostem jej ciekłości w granicach:
 - 1 m – mieszanki o konsystencji gęstoplastycznej,
 - 50 cm – mieszanki o konsystencji ciekłej,
 - przy większych wysokościach należy stosować rury, rynny spustowe, rękawy elastyczne,
- wyloty urządzeń pochyłych muszą być wyposażone w klapy pozwalające na pionowe opadanie mieszanki w miejscu zabudowy.

Podczas betonowania należy chronić beton przed działaniem czynników atmosferycznych tj. intensywnym nasłonecznieniem, silnym wiatrem, opadami deszczu lub śniegu i ujemnymi temperaturami.

5.3.3. Zagęszczanie mieszanki betonowej

Zagęszczanie mieszanki betonowej ma na celu szczelne wypełnienie formy oraz wyeliminowanie pustek (powietrza wprowadzonego w trakcie mieszania i transportu) w układanym betonie. Ponadto zgodnie z normą PN-EN 13670 „Wykonywanie konstrukcji z betonu” mieszanka betonowa powinna być układana i zagęszczana w taki sposób, aby zapewnić otulenie wszystkich wkładek (prętów) zbrojeniowych oraz założoną wytrzymałość i trwałość betonu w projektowanym cyklu życia.

Zagęszczanie mieszanki betonowej może być prowadzone:

- ręcznie – rzadko stosowane, możliwe przy mieszance o konsystencji ciekłej (ew. półciekłej) lub w przypadku betonowania elementów gęstozbrojonych, co uniemożliwia wprowadzenie wibratorów wgłębnych – zasadniczo zagęszczanie polega na sztychowaniu każdej ułożonej warstwy prętami stalowymi,
- mechanicznie – polega najczęściej na wibrowaniu ułożonej mieszanki (lub wibroprasowaniu zależnie od technologii).

Najpowszechniej stosowanym sposobem zagęszczania mechanicznego jest wibrowanie mieszanki betonowej prowadzone różnymi rodzajami wibratorów

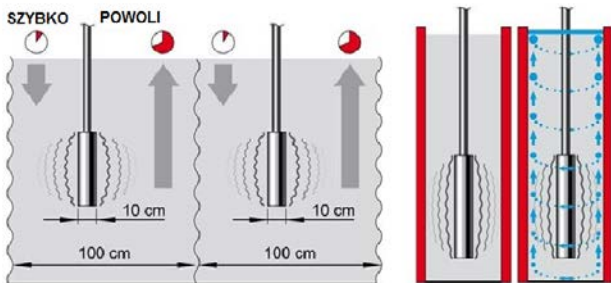
(wglębnymi – buławowymi, powierzchniowymi, przyczepnymi – rys. 5.170). Rodzaj wibratora i sposób wibrowania mieszanki betonowej dobiera się z uwagi na konstrukcję i rodzaj deskowania elementu. Jest to najczęściej stosowana metoda, polegająca na zanurzeniu buławy o kształcie wydłużonej butelki w masę mieszanki betonowej, przekazując drgania wysokiej częstotliwości wytworzone przez silnik na składniki mieszanki.



Rys. 5.170. Wibrowanie mieszanki betonowej a) wibratorem buławowym, b) wibratorem przyczepnym, c) wibratorem powierzchniowym

Wskazówki praktyczne zagęszczania mieszanki betonowej wibratorami buławowymi (rys. 5.171):

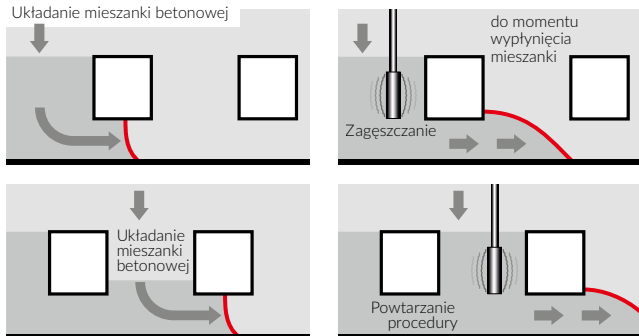
- używać należy jednego typu wibratora,
- buławę należy zanurzać szybko, przytrzymać, wyciągać powoli; w takim przypadku beton zagęszczany jest od dołu ku górze; jeżeli wibrator zanurzany jest zbyt wolno, następuje w pierwszej kolejności zagęszczenie mieszanki u góry, co powoduje, w momencie zanurzenia wibratora na planowaną głębokość, uniemożliwienie wydostania się powietrza z warstw zagęszczanych, przez warstwę wierzchnia już zagęszczoną, na zewnątrz,
- buławę wprowadzać w stałych odstępach; wibratory pograżalne obejmują swym zasięgiem obszar o średnicy max. do 10 razy jego własnej średnicy, np. wibrator o średnicy 5cm zagęszcza mieszankę w promieniu 25cm od miejsca zanurzenia; zagęszczanie jest silniejsze w pobliżu buławy i słabsze wraz ze wzrostem odległości od niego, odstęp zanurzenia wibratora zależy od konsystencji betonu i jego receptury; średnio przyjmuje się $10 \times d$, gdzie d – średnica buławy wibratora, jednak lżejsze lub cięższe betony mogą wymagać zmniejszenia odstępów nawet do 50% odstępów przy wibrowaniu betonów zwykłych.



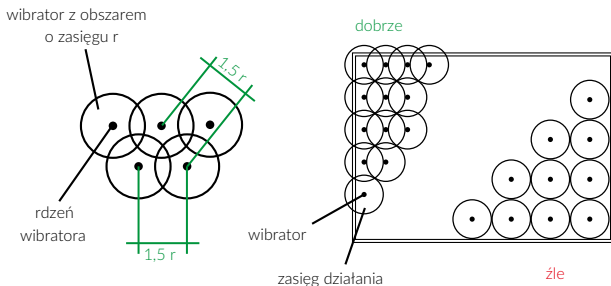
Rys. 5.171. Zasady zagęszczania mieszanki wibratorem węgłowym

Efektywność wibrowania jest uzależniona od składu mieszanki betonowej, częstotliwości i amplitudy drgań oraz czasu wibrowania. Ustalone dla konkretnych warunków parametry wibrowania powinny być tak dobrane, aby zachowana została jednorodność mieszanki betonowej. Nieodpowiednio dobrana częstotliwość drgań i czas wibrowania mogą być powodem segregacji składników mieszanki (grube frakcje kruszywa opadają na dno formy, a zaprawa gromadzi się w górnej warstwie) oraz wprowadzenia zbyt dużej ilości powietrza do mieszanki. Należy przy tym unikać zetknięcia się końcówki roboczej wibratora z prętami zbrojeniowymi. Przy betonowaniu warstwami, w celu zapewnienia jednorodności betonu w całej objętości, należy wprowadzić wibrator do poprzednio ułożonej i zawibrowanej warstwy. Wibrowanie mieszanki betonowej należy prowadzić do momentu zakończenia osiadania mieszanki. Wystąpienie na powierzchni betonu mleczka cementowego oraz niewielka ilość wydostających się na powierzchnię baniek powietrza są oznakami właściwego zagęszczenia mieszanki betonowej. Prawidłowy sposób zagęszczenia mieszanki betonowej wibratorem buławowym przedstawiono na rys. 5.172.

Schemat postępowania przy zagęszczaniu mieszanki betonowej w konstrukcji



Schemat zagęszczania mieszanki betonowej wibratorem butawym



Rys. 5.172. Prawidłowy sposób zagęszczania mieszanki betonowej

Zagęszczanie mieszanki betonowej z zachowaniem podanych zasad zapewnia:

- dokładne wypełnienie deskowania mieszanką,
- mniejsze zużycie cementu przy zachowaniu projektowanej wytrzymałości (zmniejszenie zawartości wody i kruszywa drobnego w mieszance betonowej w porównaniu z zagęszczaniem ręcznym),
- jednorodną i szczelną strukturę betonu,
- prawidłowe otulenie prętów zbrojenia mieszanką.

5.3.4. Betonowanie w warunkach obniżonych temperatur

Produkcja mieszanki betonowej oraz prace budowlane prowadzone w warunkach obniżonych temperatur wymagają szczególnej uwagi oraz dysponowania odpowiednimi środkami zapewniającymi właściwą temperaturę dostarczonej na plac budowy mieszanki betonowej. Za okres obniżonych temperatur, zgodnie z wytycznymi zawartymi w instrukcji ITB 282/2011, należy uznać czas, gdy średnia dobowa temperatura (T_{sr}) jest niższa niż 10°C.

$$T_{sr} = \frac{T_7 + T_{13} + 2 \cdot T_{21}}{4}$$

gdzie:

T_7, T_{13}, T_{21} – temperatury otoczenia w godzinach 7:00, 13:00, 21:00.

Okres obniżonych temperatur można podzielić na trzy grupy:

- 10°C do 1°C – procesy hydratacji spoiwa w betonie zachodzą wolniej, lecz nie ma zagrożenia uszkodzenia betonu w konstrukcji,
- 5°C do -1°C – okres niewliczony do czasu pielęgnacji niezabezpieczonego termicznie młodego betonu,
- poniżej -1°C – istnieje zagrożenie uszkodzenia młodego betonu.

Najwięcej problemów przysparza jednak okres ujemnych temperatur. Betonowania nie powinno się prowadzić, gdy temperatura otoczenia spadnie poniżej -15°C. Głównymi zagrożeniami w okresie obniżonych temperatur są:

- spowolnienie procesów wiązania i twardnienia betonu – niska temperatura spowalnia przebieg procesu hydratacji cementu, wydłużeniu ulega czas wiązania cementu, przez co opóźnia się proces narastania wytrzymałości betonu w konstrukcji; w bardzo niskich temperaturach może nastąpić całkowite zatrzymanie procesu hydratacji,
- uszkodzenie powstałej mikrostruktury betonu przez zamarzającą wodę – zwiększająca swoją objętość zamarzająca woda rozrywa słabe wiązania powstające w początkowym okresie procesu hydratacji, powodując zniszczenie struktury młodego betonu, przez co stwardniały beton charakteryzuje się obniżoną wytrzymałością i trwałością.

Zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021 temperatura mieszanki betonowej w momencie jej dostarczenia na plac budowy nie powinna być niższa niż 5°C. W przypadku gdy wymagana jest inna temperatura mieszanki betonowej, wartość tą należy wyspecyfikować z podaniem dopuszczalnych tolerancji.

Wszelkie wymagania dotyczące sztucznego chłodzenia lub podgrzewania muszą być uzgodnione pomiędzy producentem i wykonawcą przed dostawą mieszanki. Zachowanie temperatury mieszanki na poziomie powyżej 5°C pozwala uniknąć ryzyka zamarznięcia wody w mieszance. Niemniej ważne jest uzyskanie przez młody beton minimalnej wytrzymałości na ściskanie, zanim ulegnie on pierwszemu zamarznięciu. Naprężenia powstające wskutek zwiększania objętości przez zamarzającą wodę mają charakter naprężeń rozciągających. Gdy ich wartość przekroczy granicę wytrzymałości matrycy cementowej, dochodzi do rozerwania powstałych wiązań. Przyjmuje się, że warunkową odporność na jednokrotne działanie mrozu młody beton uzyskuje wtedy, gdy jego wytrzymałość na ściskanie wynosi, nie mniej niż:

- 5 MPa – przy stosowaniu cementów portlandzkich CEM I,
- 8 MPa – przy stosowaniu cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II,
- 10 MPa – przy stosowaniu cementów hutniczych CEM III.

W tabeli 5.95 podano orientacyjny czas osiągnięcia przez beton o różnym składzie wytrzymałości na ściskanie 5 MPa w zmiennych temperaturach otoczenia.

Tabela 5.95. Orientacyjne czasy twardnienia betonu do osiągnięcia wytrzymałości 5 MPa

Klasa cementu	Współczynnik w/c	Czas twardnienia betonu [dni] w zależności od temperatury	
		5°C	20°C
42,5R, 52,5N, 52,5R	0,4	1/2	1/4
	0,6	3/4	1/2
32,5R, 42,5N	0,4	1	1/2
	0,6	2	1
32,5N	0,4	2	1
	0,6	5	2

Osiągnięcie minimalnej temperatury mieszanki betonowej i założonego przyrostu wytrzymałości wymaga odpowiedniego przygotowania mieszanki betonowej, producenci betonu dążą do tego, aby węzły betoniarskie wyposażone były w instalacje do podgrzewania kruszywa i/lub wody. Podgrzewanie wody zarobowej jest łatwiejsze i trwa krócej, a często może być zabiegiem wystarczającym dla uzyskania odpowiedniej temperatury mieszanki betonowej. Kruszywo w betonie zajmuje ok. 70 – 80% objętości, więc jego temperatura w największym stopniu przekłada się na temperaturę mieszanki betonowej.

Najprostszym sposobem zwiększenia temperatury kruszywa jest podgrzewanie go ciepłym powietrzem, które wprowadza się poprzez system rur ułożonych pod pryzmą kruszywa. Innym sposobem jest stosowanie nadmuchu pary wodnej. W okresie zimowym należy ponadto unikać zawilgocenia i przemarzania kruszywa. Proces podgrzewania musi przebiegać z uwzględnieniem wytycznych dotyczących maksymalnych temperatur poszczególnych składników:

- maksymalna temperatura podgrzewanej wody 60°C lub dozowanej bezpośrednio na kruszywo 80°C,
- maksymalna temperatura podgrzewania kruszywa 50°C.

Temperaturę mieszanki betonowej można orientacyjnie wyznaczyć temperaturę na podstawie tabeli 5.96 lub obliczyć wg wzoru:

$$t_b = \frac{c \cdot (z \cdot t_z + f \cdot t_f + g \cdot t_g) + c_w \cdot w \cdot t_w}{c \cdot (z + f + g) + c_w \cdot w}$$

gdzie:

t_b – temperatura betonu

t_z – temperatura cementu

t_f – temperatura popiołu

t_g – temperatura kruszywa

t_w – temperatura wody

z – ilość cementu [kg/m³]

f – ilość popiołu [kg/m³]

g – ilość kruszywa [kg/m³]

w – ilość wody [kg/m³]

c_w – ciepło właściwe wody: 4,19 kJ/kg × K

c – ciepło właściwe cementu, popiołu i kruszywa: 0,84 kJ/kg × K

Tabela 5.96. Temperatura mieszanki betonowej w zależności od temperatury wody i kruszywa

Temperatura kruszywa [°C]	Temperatura wody [°C]								
	5	10	20	30	40	50	60	70	80
	Temperatura mieszanki betonowej [°C]								
5	5	6	9	11	14	16	19	22	24
10	8	9	12	15	17	20	22	25	27
15	11	13	15	18	21	23	26	28	31
20	15	16	19	21	24	26	29	31	34
30	21	23	25	28	30	33	35	38	40



Rys. 5.173. Błędy zabudowy mieszanki betonowej – oblodzone zbrojenie

Aby zapewnić skuteczną ochronę betonu przed niską temperaturą konieczne jest wcześniejsze przygotowanie odpowiedniej receptury mieszanki betonowej (rodzaj i ilość cementu, odpowiedni dobór domieszek chemicznych oraz dodatków, wielkość współczynnika w/c). Należy ponadto odpowiednio zaplanować harmonogram realizacji, z uwzględnieniem wytycznych dla sposobu układania mieszanki betonowej oraz pielęgnacji betonu po wbudowaniu.

5.3.5. Pielęgnacja betonu

Pod pojęciem pielęgnacji betonu, należy rozumieć ogół zabiegów podejmowanych od chwili ułożenia i zagęszczenia mieszanki betonowej, mających na celu zapewnienie prawidłowego przebiegu procesu hydratacji cementu, a w efekcie, otrzymanie w określonym czasie, betonu o projektowanych właściwościach (wytrzymałość i trwałość). Zabiegi te obejmują utrzymanie odpowiedniej temperatury i wilgotności betonu oraz jego ochronę przed szkodliwym oddziaływaniem czynników atmosferycznych. Norma PN-EN 13670 „Wykonywanie konstrukcji z betonu” w wytycznych odnośnie pielęgnacji i ochrony betonu zaleca, aby po zagęszczeniu i wykończeniu powierzchni betonu, bezzwłocznie podać ją pielęgnacji. Pielęgnację młodego betonu (w warunkach zimowych i letnich) przeprowadza się w celu:

- minimalizacji skurczu plastycznego,
- zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości powierzchniowej,
- zapewnienia odpowiedniej trwałości strefy powierzchniowej,
- zabezpieczenia przed szkodliwym działaniem czynników atmosferycznych i zamarzaniem,
- zabezpieczenia przed drganiami, uderzeniami lub uszkodzeniami.

Zapewnienie trwałości elementów betonowych konstrukcji uwarunkowane jest odpowiednim przeprowadzeniem każdego etapu robót monolitycznych, począwszy od etapu doboru technologii wykonania konstrukcji i projektowania składu mieszanki betonowej (rys. 5.174).

Jeżeli którykolwiek z przedstawionych etapów nie zostanie prawidłowo wykonany, istnieje zagrożenie, że wykonana konstrukcja nie będzie spełniać postawionych jej wcześniej wymagań, np. nośności, trwałości. Pielęgnacja betonu jest operacją często pomijaną w praktyce budowlanej. Jednakże nie należy zapominać, że ma ona znaczący wpływ na jakość wykonywanych konstrukcji żelbetonowych oraz betonowych.



Rys. 5.174. Etapy robót monolitycznych z uwzględnieniem pielęgnacji

Pielęgnacja betonu ma na celu:

- zapewnienie optymalnych warunków termiczno-wilgotnościowych w dojrzewającym betonie (dostarczenie odpowiedniej ilości wody do przebiegu procesów hydratacji oraz zachowanie odpowiedniego zakresu temperatur dojrzewania),
- ochronę wykonanego elementu betonowego przed szkodliwym wpływem promieniowania słonecznego, wiatru oraz opadów atmosferycznych,
- przeciwdziałanie skurczowi spowodowanemu utratą wilgoci z betonu,
- ograniczenie naprężeń termicznych wywołanych gradientem temperatur pomiędzy powierzchnią a wnętrzem dojrzewającego elementu betonowego (naprężenia mogą skutkować zarysowaniem i spękaniem konstrukcji – obniżeniem trwałości).

Ponadto, norma PN-EN 13670 podaje wytyczne dotyczące pielęgnacji elementów betonowych, tj.:

- metody pielęgnacji powinny zapewnić niski stopień odparowania wody z powierzchni betonu lub utrzymywać powierzchnie w stanie całkowicie nasyconym,
- w przypadku niebezpieczeństwa wystąpienia skurczu plastycznego, pielęgnację należy rozpocząć przed ukończeniem procesu zagęszczania mieszanki betonowej oraz wykańczania powierzchni elementu,
- jeżeli istnieje niebezpieczeństwo, że beton we wczesnym stadium dojrzewania będzie narażony na agresywne oddziaływanie środowiska, sposoby pielęgnacji muszą być opisane w specyfikacji wykonawczej,
- w przypadku betonów wysokich wytrzymałości oraz betonów samozagęszczalnych należy przedsięwziąć specjalne środki w celu zapobieżenia spękaniom w wyniku skurczu plastycznego,
- czas trwania pielęgnacji jest powiązany z rozwojem wytrzymałości w strefie powierzchniowej betonu; określony został poprzez klasy pielęgnacji zdefiniowane jako czas bądź procent wytrzymałości charakterystycznej 28 dniowej, przy którym możliwe jest zakończenie procesu pielęgnacji (tabela 5.97),
- klasy pielęgnacji powinny być określone w specyfikacji wykonawczej,
- specjalne wymagania dotyczące pielęgnacji mogą być podane w specyfikacji wykonawczej,
- środki chemiczne do pielęgnacji nie powinny być stosowane na powierzchniach betonowych o specjalnych wymaganiach – chyba że zostanie udowodnione, iż nie mają negatywnego wpływu na proces wykończenia powierzchni,
- temperatura powierzchni betonu nie może być niższa niż 0°C, do momentu,

- gdy beton w strefie powierzchniowej osiągnie wytrzymałość min. 5 MPa,
- temperatura wnętrza elementu betonowego nie może przekroczyć 70°C, chyba że zostanie udowodnione, iż dobór składników zabezpiecza przed wpływem wysokiej temperatury,
 - specyfikacja wykonawcza powinna zawierać zasady dotyczące redukcji niebezpieczeństwa wystąpienia naprężeń termicznych w młodym betonie np. stosowanie mieszanek o niskim cieple hydratacji, stosowanie instalacji chłodzących, itp.

Tabela 5.97. Klasy pielęgnacji

	Klasa 1.	Klasa 2.	Klasa 3.	Klasa 4.
Czas [h]	12 ^{a)}	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy
Specyfikowana charakterystyczna wytrzymałość 28-dniowa [%]	nie dotyczy	35	50	70
^{a)} Jeżeli czas początku wiązania nie przekracza 5 godzin oraz temperatura powierzchni betonu jest równa bądź wyższa niż 5°C				

Stosowane metody pielęgnacji powinny przede wszystkim ograniczyć odparowanie wody z powierzchni betonu. Wyróżnia się następujące metody pielęgnacji:

- pielęgnacja na mokro,
- stosowanie osłon,
- stosowanie preparatów do pielęgnacji betonu,
- pielęgnacja wewnętrzna.

PIELĘGNACJA MOKRA

Założeniem tej metody jest zapewnienie kontaktu powierzchni betonu z wodą (od momentu uzyskania wystarczającej twardości powierzchni) oraz przeciwdziałanie skurczowi wysychania.

Wyróżnia się dwa rodzaje skurczu przy wysychaniu betonu:

- skurcz plastyczny – występujący w betonie w stanie plastycznym; przyczyną jest parowanie wody z powierzchni betonu lub jej zasysanie przez głębiej położony suchy beton lub grunt (rys. 5.175),
- skurcz twardnienia – występujący w twardniejącym betonie na skutek szybkiego wysychania powierzchni betonu przy niskiej wilgotności względnej powietrza, wysokiej temperaturze otoczenia, nasłonecznieniu lub silnym wietrze (rys. 5.176),



Rys. 5.175. Zarysowanie powierzchni w efekcie skurczu plastycznego



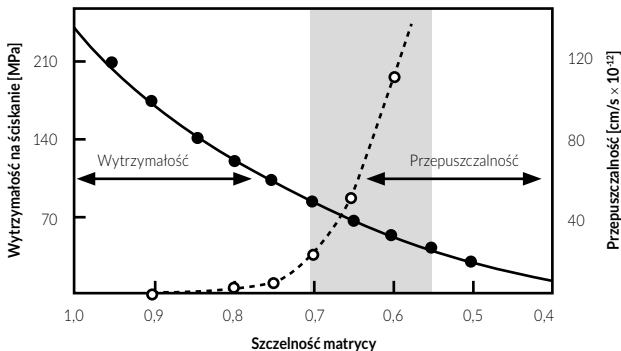
Rys. 5.176. Zarysowanie powierzchni w efekcie skurczu twardnienia

Szybkość osuszania rośnie ze wzrostem prędkości wiatru i spadkiem wilgotności względnej powietrza. Może prowadzić to do niepełnej hydratacji cementu, zwiększenia skurczu na powierzchni betonu, czego bezpośrednim wynikiem jest powstawanie rys i mikrorys. Szczególnej pielęgnacji należy poddawać betony, których współczynnik $w/c \leq 0,50$ (w próbce izolowanej prawidłowa hydratacja cementu może przebiegać tylko wtedy, gdy ilość wody w zaczynie jest większa od ilości wody już związanej). Analizując ten stan z praktycznego punktu widzenia, betony o $w/c \geq 0,50$ powinny być chronione przed odparowaniem wody. Natomiast betony o $w/c < 0,50$ należy, nie tylko chronić przed odparowaniem wody, lecz należy jej jeszcze dostarczyć. Zabiegi pielęgnacyjne w betonach o niskim w/c wpływają jedynie na zewnętrzną warstwę. Wraz z obniżaniem w/c wzrasta szczelność tej warstwy, a wraz z nią opór dyfuzyjny, w związku z czym transport wody do wnętrza betonu jest coraz trudniejszy (rys. 5.177). Szczególnie ważna w tym przypadku jest odpowiednia i jak najwcześniej rozpoczęta pielęgnacja, najlepiej, gdy pory kapilarne są jeszcze otwarte. Brak właściwej pielęgnacji wilgotnościowej w tym okresie powoduje osuszenie wnętrza betonu w sposób nieodwracalny. Pielęgnacja wodą w późniejszym czasie jest nieefektywna. Prowadząc pielęgnację moką, nie należy dopuszczać do „szoku” termicznego, tj. polewania nagrzanego betonu zbyt zimną wodą (rys. 5.178).

Do najczęściej stosowanych metod pielęgnacji mokrej należą:

- zraszanie betonu wodą,
- przykrywanie betonu wilgotnymi matami (rys. 5.179),
- polewanie wodą betonowych konstrukcji (rys. 5.180)

Pielęgnację moką powszechnie stosuje się w okresie wysokich temperatur powietrza, silnego nasłonecznienia oraz silnych, ciepłych wiatrów w krótkim czasie wysuszających powierzchnię betonu.



Rys. 5.177. Wpływ szczelności matrycy na wytrzymałość i przepuszczalność betonu



Rys. 5.178. Uszkodzenie powierzchni betonu na skutek „szoku” termicznego

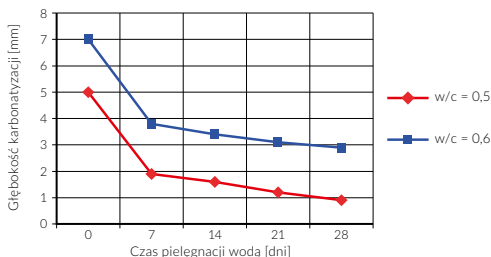


Rys. 5.179. Pielęgnacja świeżo ułożonego betonu (przykrywanie matami nasączonymi wodą)

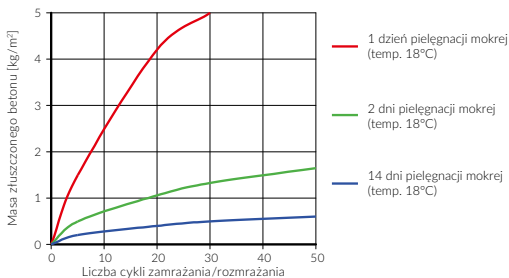


Rys. 5.180. Polewanie powierzchni betonu wodą o odpowiedniej temperaturze

Przykładem korzystnego wpływu pielęgnacji na trwałość betonu, jest zależność pomiędzy długością pielęgnacji a głębokością karbonatyzacji zaprawy, przedstawiona na rys. 5.181. Wraz z wydłużeniem czasu pielęgnacji zmniejsza się grubość warstwy skarbonatyzowanej. Problem ten dotyczy szczególnie betonu zbrojonego, ponieważ w efekcie karbonatyzacji obniża się pH w porach betonu, co może doprowadzić do korozji stali zbrojeniowej. Podobne zależności można również zaobserwować w przypadku mrozoodporności betonu. Wydłużenie okresu pielęgnacji mokrej umożliwia wykonanie betonu o większej odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, uzyskanie trwałej, zwartej warstwy wierzchniej betonu, która ma bezpośredni kontakt z otaczającym środowiskiem. Zależność tę pokazano na rys. 5.182.



Rys. 5.181. Zależność pomiędzy czasem pielęgnacji a głębokością karbonatyzacji zaprawy



Rys. 5.182. Wpływ długości pielęgnacji mokrej na mrozoodporność betonu

STOSOWANIE OSŁON ZEWNĘTRZNYCH

Pielęgnacja tym sposobem polega na zastosowaniu osłon pełniących rolę bariery zapewniającej utrzymanie ciepła wydzielanego przez twardniejący beton i zapobiegającej ubytkowi wody z betonu.

Do powszechnych sposobów pielęgnacji za pomocą osłon zewnętrznych należą:

- okrywanie betonu folią (rys. 5.183), prowadząc prace betonowe jesienią i zimą zalecane jest stosowanie folii czarnej, natomiast folię białą, odbijającą promieniowanie, stosuje się przy słonecznej pogodzie; stosowanie osłon foliowych może powodować wystąpienie miejscowych przebarwień powierzchni betonu (wykwitów) na skutek nierównomiernej kondensacji pary wodnej na powierzchni folii przylegającej do betonu,
- ochrona miejsca wbudowania betonu specjalnym namiotem przed opadami atmosferycznymi, szczególnie przed intensywnym deszczem, ale także przed silnym nasłonecznieniem i wiatrem. Zapobiega to przedwczesnemu przesychnaniu, nadmiernemu rozgrzaniu powierzchni zabudowanego betonu lub niszczeniu powierzchni betonu przez deszcz (często stosowana metoda pielęgnacji przy budowie mostów).



Rys. 5.183. Stosowanie osłon a) przykrywanie powierzchni betonu folią, b) owijanie słupa folią.

STOSOWANIE PREPARATÓW DO PIELĘGNACJI BETONU

Metoda ta polega na naniesieniu filmu ochronnego na powierzchnię świeżo ułożonego betonu (rys. 5.184). Gdy temperatura otoczenia przekracza $+30^{\circ}\text{C}$ (występuje silne nasłonecznienie), jest wietrznie (silny wiatr) lub względna wilgotność powietrza jest poniżej 50%, dodatkowo powierzchnię betonu należy zraszać

wodą. Główną zaletą preparatów do pielęgnacji jest możliwość stosowania ich na dużych powierzchniach, praktycznie zaraz po ułożeniu i zagęszczeniu mieszanki betonowej, np. przy budowie dróg i placów parkingowych.



Rys. 5.184. Pielęgnacja betonu poprzez nanoszenie powłoki ochronnej

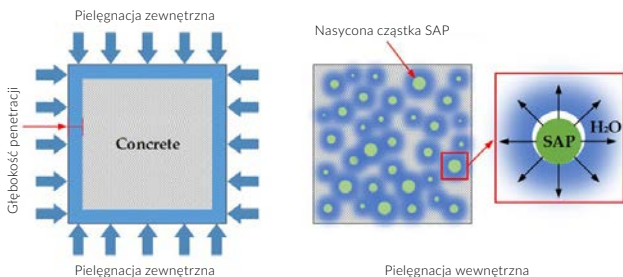
Preparaty do pielęgnacji można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa to środki stosowane głównie w budownictwie komunikacyjnym i na powierzchniach nieprzeznaczonych do malowania, ewentualnie dalszego wykańczania. Środki te oparte są na żywicach stearynowych i pozostawiają na powierzchni betonu trwałą powłokę, którą można usunąć tylko mechanicznie. O ile w przypadku dróg nie ma to większego znaczenia, to w przypadku np. betonów architektonicznych lub przeznaczonych do malowania, ze względów ekonomicznych (mechaniczne usuwanie), nie są one przydatne. Do tych zastosowań stworzono produkty z drugiej grupy – wolno odparowujące. Wytworzona powłoka znika zupełnie, najczęściej po około czterech tygodniach. Po tym czasie, powierzchnia betonu może być poddana dalszej obróbce.

Preparaty ochronne nanoszone są zwykle poprzez natrysk. Bardzo ważne jest staranne wykonanie powłoki, aby dokładnie „zamknąć” powierzchnię betonu.

Przed zastosowaniem określonego preparatu należy wykonać próbę poprzez spryskanie powierzchni betonu określoną ilością (producenci zwykle podają zużycie preparatu w g/m^2). W przypadku nanoszenia na powierzchnie pionowe, natrysk należy prowadzić tak, aby nie doprowadzić do spływania preparatu z powierzchni betonu. Jeśli jest to konieczne, nanoszenie powłoki ochronnej wykonuje się wieloetapowo.

PIELĘGNACJA WEWNĘTRZNA

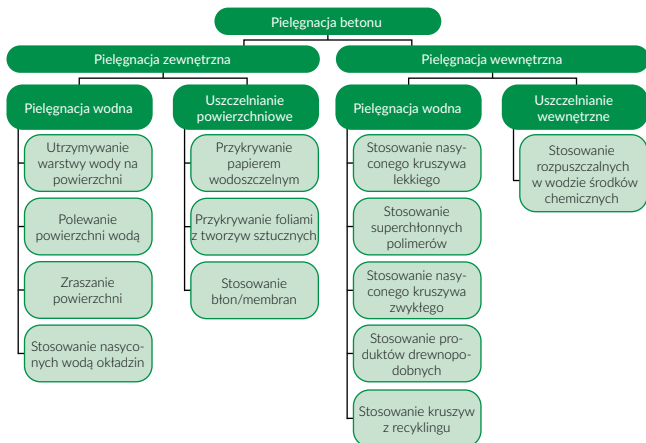
Odpowiedni dobór metody i czasu pielęgnacji zależy głównie od wymaganych właściwości betonu, założonej trwałości i wytrzymałości. Większość tradycyjnych metod pielęgnacji opiera się na oddziaływaniu na powierzchnię betonu z zewnątrz (rys. 5.185). Pielęgnacja wewnętrzna polega na wprowadzeniu do składu mieszanki betonowej komponentu, który ma stanowić „rezerywy” wody dla zapewniania warunków do postępu hydratacji (SAP – superabsorbujący polimer).



Rys. 5.185. Mechanizm pielęgnacji zewnętrznej i wewnętrznej betonu

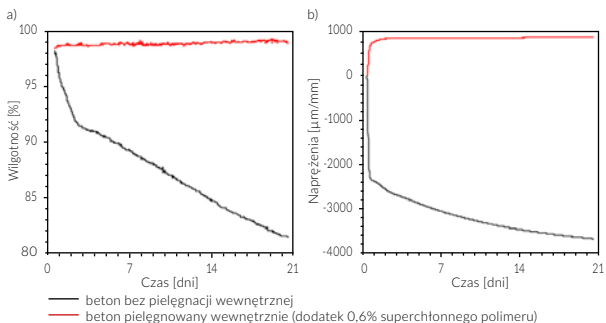
Pielęgnacja wewnętrzna została zdefiniowana przez Amerykański Instytut Betonu (ACI) jako „proces, dzięki któremu hydratacja cementu jest kontynuowana z uwagi na dostępność wewnętrznej wody, której źródłem nie jest woda zarobowa”. Idea pielęgnacji wewnętrznej zyskała na znaczeniu w ostatnich latach, ponieważ okazała się przydatnym narzędziem do poprawy właściwości betonu. Klasyfikację metod pielęgnacji betonu przedstawiono na rys. 5.186. Beton może utracić kapilarną wodę w wyniku zewnętrznych oddziaływań, jak np. suszenie, parowanie z powierzchni wystawionej na działanie powietrza lub

odsysanie z powierzchni wystawionej na działanie materiału chłonnego, np. posypanie deskowania. Ponadto, w mieszankach betonowych o niskim współczynniku w/c $\leq 0,42$, w procesie hydratacji cementu może zostać zużyta taka ilość wody kapilarnej, że wystąpi zjawisko wewnętrznego suszenia lub samoosuszenia (szczególnie przy bardzo niskim współczynniku w/c).



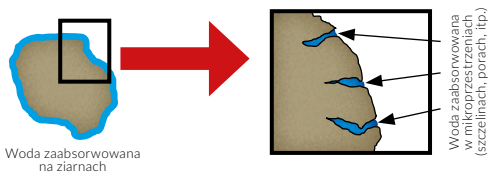
Rys. 5.186. Klasyfikacja metod pielęgnacji

Zjawiska te mogą powodować znaczny skurcz, zwłaszcza gdy pielęgnacja zewnętrzna jest prowadzona w ograniczonym zakresie lub całkowicie zaniechana. Skurcz spowodowany utratą wody przez beton można podzielić na dwie kategorie: skurcz autogeniczny i skurcz od wysychania. Skurcz autogeniczny odnosi się do zmniejszenia objętości produktów reakcji hydratacji cementu w stosunku do substratów, tj. cementu i wody, a także zmian objętości spowodowanych samoosuszaniem przy niskim współczynniku w/c. Skurcz od wysychania zwykle odnosi się do odkształceń betonu spowodowanych utratą wody kapilarnej, np. wskutek odparowania z powierzchni. W takich okolicznościach pielęgnacja wewnętrzna może stanowić uzupełnienie ubytku wody kapilarnej, co umożliwi dalszy postęp hydratacji, zapewni przyrost wytrzymałości, wpłynie na ograniczenie i/lub opóźnienie skurczu oraz poprawę trwałości - rys. 5.187.

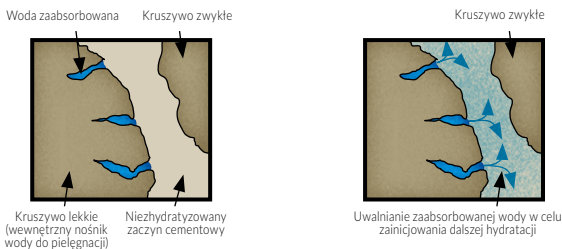


Rys. 5.187. Wpływ pielęgnacji wewnętrznej na wilgotność względną (a) i naprężenia autogeniczne (b) zaczynów cementowych w temp. 20°C.

Z zasady pielęgnacja wewnętrzna polega na stosowaniu materiałów zdolnych do pochłaniania wody, np. siłami kapilarnymi, tworząc w ten sposób „rezerwy” w betonie. Woda jest absorbowana (wchłaniana) przez materiał w mikropory, szczeliny porowatej cząstki, np. ziarna kruszywa - rys. 5.188. Celem jest uwolnienie wody wewnętrznej po wymieszeniu i zabudowaniu betonu, gdy beton zaczyna twardnieć. W okresie dojrzewania betonu, zaabsorbowana woda powinna być stopniowo oddawana (uwalniania), aby zapewnić dalszą hydratację cementu - rys. 5.189.



Rys. 5.188. Sposób absorbowania wody na ziarnach kruszywa



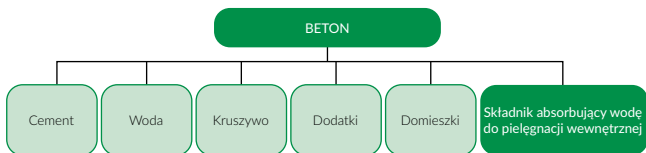
Rys. 5.189. Postęp hydratacji w wyniku uwolnienia zaabsorbowanej wody

Zabsorbowana (wewnętrzna) woda jest to dodatkowa ilość wody wprowadzonej do mieszanki, która nie zostanie odliczona od ilości założonej w recepturze betonu (potrzebnej dla zapewniania urabialności i przebiegu hydratacji). Ustalenie ilości wody potrzebnej dla zapewnienia warunków pielęgnacji wewnętrznej uzależnione jest od składu mieszanki betonowej (receptury), przyjętej metody pielęgnacji zewnętrznej i założonego celu. Ponieważ pielęgnacja wewnętrzna może potencjalnie służyć kompensacji strat wody z betonu do otoczenia, ilość zaabsorbowanej wody potrzebnej do pielęgnacji wewnętrznej zależy od zawartości cementu, a w uogólnieniu od współczynnika w/c. Dostępność zaabsorbowanej wody jest kluczowa dla zapewnienia właściwej pielęgnacji wewnętrznej. Teoretyczna ilość wody koniecznej dla zapewnienia warunków pielęgnacji wewnętrznej, w przypadku betonu z wysoką zawartością cementu (betonu wysokowartościowego), obliczona na podstawie modelu Powers'a, zakładającego zrównoważenie samoistnego osuszania wynosi ok. 40 kg/m³. Najszersze zastosowanie metoda pielęgnacji wewnętrznej znajduje właśnie w produkcji betonów wysokowartościowych i betonów wysokich wytrzymałości. Wynika to głównie z ukształtowania struktury betonu (betony wysokowartościowe charakteryzują się zwarta i szczelną strukturą), a tym samym ograniczonej możliwości migracji wody z powierzchni.

W betonie „rezerwy wody” mogą być formowane przed lub po rozpoczęciu mieszania. Tworzenie bufora wodnego opiera się na zasadach fizycznych:

- fizycznie zaabsorbowana woda, np. woda w superabsorbujących polimerach,
- woda fizycznie utrzymywana, np. woda kapilarna w drobnych porach kruszywa,
- woda niezwiązana, np. kapsułkowana woda w cząstkach polimeru / parafiny.

Środki do pielęgnacji wewnętrznej można dodawać do zwykłej mieszanki betonowej (rys. 5.190) w stanie suchym lub nasyconym (zależnie od rodzaju materiału i szybkości pochłaniania wody). Wprowadzenie tych środków do składu betonu w procesie produkcji (mieszania) zapewnia ich równomierne rozmieszczenie w pobliżu hydratyzujących ziaren cementu. Jest to szczególnie istotne ze względu na to, że kształtująca się w procesie hydratacji struktura matrycy cementowej, ulega zagęszczeniu, przez co zdolność do migracji wody jest ograniczona w czasie. W początkowym okresie hydratacji szacowany zasięg migracji wody wynosi 20 mm, w okresie końcowym zaledwie 1 mm.

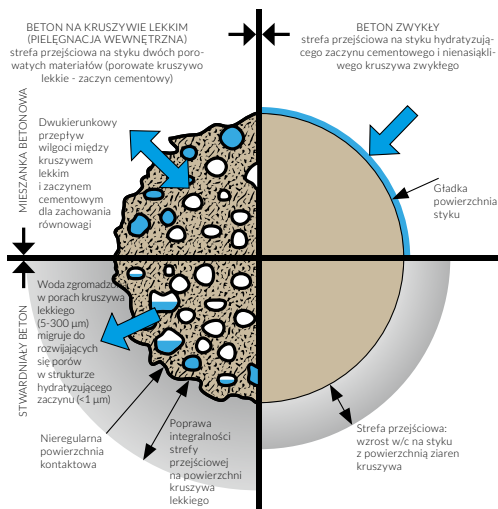


Rys. 5.190. Skład betonu poddanego pielęgnacji wewnętrznej

Możliwe są dwa główne sposoby wprowadzenia do betonu „dodatkowej” wody. Pierwszy, stosowany od lat, to wprowadzenie do składu mieszanki betonowej w pełni nasyconego wodą, mocno porowatego kruszywa lekkiego. Drugi, bardziej zaawansowany technologicznie, polega na zastosowaniu superabsorbentów polimerowych (SAP) jako domieszki do betonu.

Kruszywo lekkie stosowane jako nośnik wody dla zapewnienia warunków pielęgnacji wewnętrznej, musi być odpowiednio dobrane pod względem jakościowym, tak aby nie pogarszać specyfikowanych właściwości betonu. Kruszywa lekkie są bardzo porowate i mogą absorbować znaczne ilości wody. Zanim kruszywo lekkie zostanie wprowadzone do mieszanki betonowej, musi być zanurzone w wodzie. Całkowite nasycenie może potrwać wiele godzin lub dni, ponieważ powietrze obecne w cząsteczkach opóźnia wnikanie wody. Jeśli natomiast kruszywo lekkie w stanie suchym zostanie dodane do mieszalnika, osiągnięte zostanie tylko częściowe nasycenie. Ponadto ziarna cementu mogą częściowo wnikać w strukturę porów kruszywa razem z wodą, co poprawi właściwości strefy kontaktowej, ale w pewnym stopniu organiczny efekt pielęgnacji wewnętrznej. Wstępnie nasączone kruszywo lekkie w twardniejącym betonie uwalnia wodę z drobnych porów do otaczającego zaczynu cementowego (rys. 5.191). Z uwagi na zwiększoną dostępność wody dla przebiegu

hydratacji i aktywność pucolanową na powierzchni ziaren kruszywa lekkiego strefa przejściowa między ziarnami kruszywa a zaczynem cementowym ma lepszą przyczepność niż w przypadku betonu zwykłego.



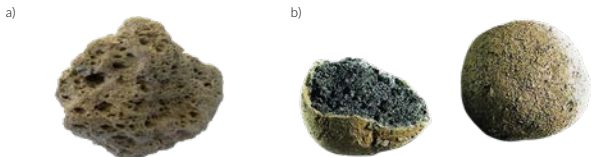
Rys. 5.191. Kształtowanie strefy przejściowej na styku kruszywo - zaczyn cementowy w warunkach pielęgnacji wewnętrznej

Podstawowym mechanizmem odpowiedzialnymi za utrzymywanie wody w porach ziaren kruszywa lekkiego są siły kapilarne. Tylko pory o rozmiarze powyżej 100 nm są przydatne do przechowywania wewnętrznej wody. W mniejszych porach woda jest trzymana tak mocno, że nie jest dostępna dla reakcji hydratacji.

Celem zapewnienia dużego rozproszenia, ale jednocześnie równomiernego rozmieszczenia ziaren kruszywa pielęgnującego w strukturze betonu, należy odpowiednio dobrać uziarnienie kruszywa – powinny to być frakcje drobne (maksymalna wielkość ziaren 10 mm), najlepiej piaskowe, stosowane jako częściowy zamiennik zasadniczego kruszywa (piasku) w ilości 10÷25%.

Wprowadzenie grubszych frakcji kruszywa lekkiego, jako źródła wody do pielęgnacji wewnętrznej, prowadzi raczej do znacznego zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie betonu.

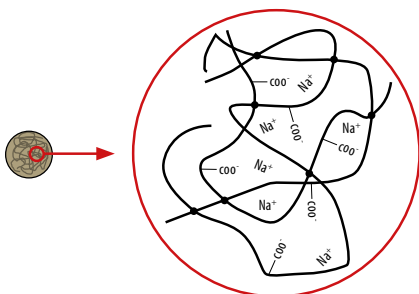
Jako kruszywa lekkie, zapewniające bufor wodny do pielęgnacji wewnętrznej, mogą być stosowane, zarówno naturalne kruszywa lekkie (pumeks, perlit, ziemia krzemkowa), jak i lekkie kruszywa sztuczne, np. ziarna spiekane z popiołów lotnych, czy glin pęczniących (rys. 5.192). Warunkiem koniecznym jest, aby wykazywały duże możliwości absorpcji (magazynowania) wody.



Rys. 5.192. Przykłady kruszyw lekkich stosowanych w celu zapewnienia warunków pielęgnacji wewnętrznej a) pumeks naturalny, b) kruszywo z glin spiekanych Leca®

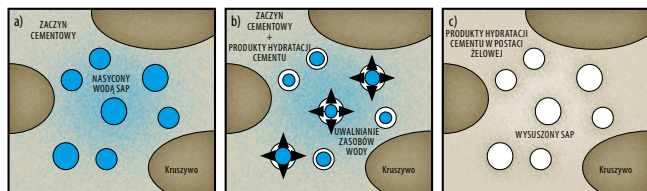
Domieszki stosowane do pielęgnacji wewnętrznej nazywane są ogólnie superabsorbentami polimerowymi. Superchłonny polimer (SAP) jest materiałem polimerowym, który jest zdolny do pochłaniania znacznej ilości cieczy z otoczenia i zatrzymywania jej w strukturze, bez rozpuszczania. Teoretycznie SAP mogą przyjąć maksymalną ilość wody, która jest ok. 5000 razy większa niż masa własna. Superabsorbenty polimerowe są kowalencyjnie usieciowanymi kopolimerami akryloamid/kwas akrylowy, które występują w dwóch różnych stanach: napęczniałe i zwinięte (rys. 5.193). Najczęściej są to kopolimery akryloamidowe, etylenowe kopolimery kwasu meleinowego, kopolimery alkoholu winylowego, sole sodowe kwasu poliakrylowego, karboksymetyloceluloza, itd. SAP znalazły szerokie zastosowanie jako materiał high-tech, np. do soczewek kontaktowych, pieluszek dla niemowląt, gaszenia pożarów i pielęgnacji gleby.

Szybkość absorpcji produkowanych komercyjnie SAP wynosi około 50g/g w rozcieńczonych roztworach soli. W roztworach o wysokiej zawartości jonów, takich jak porowaty roztwór porowy zaczynu cementowego, chłonność może wynosić poniżej 20g/g. W zależności od rodzaju polimeru i oczekiwanego efektu w celu zapewnienia warunków pielęgnacji wewnętrznej SAP stosowane są na poziomie dozowania w ilości $0,3 \div 0,6\%$ masy cementu.



Rys. 5.193. Schematycznie przedstawiona cząstka SAP

Zasadę działania superchłonnych polimerów w betonie przedstawiono na rys. 5.194. Wprowadzone do mieszanki betonowej SAP są nasycone wodą (rys. 5.194a), w trakcie hydratacji cementu, w fazie, w której względna wilgotność w układzie porów maleje, SAP uwalnia wodę do zaczynu, aby przedłużyć hydratację (rys. 5.194b). W trakcie dalszej hydratacji SAP wysycha i pozostawia pory w stwardniałym betonie (rys. 5.194c).



Rys. 5.194. Schemat działania SAP w trakcie wiązania i twardnienia betonu

Ze względu na zasadę działania w betonie, stosowanie superchłonnych polimerów może przejawiać wielorakie efekty:

- umożliwienie wewnętrznej pielęgnacji poprzez wspomaganie i przedłużanie procesu hydratacji cementu,
- opóźnienie i ograniczenie autogenicznego skurczu,
- wprowadzenie porów w strukturę stwardniałego betonu (efekt analogiczny

jak przy stosowaniu domieszki napowietrzającej) – zapewnienie poprawy mrozoodporności,

- obniżenie wytrzymałości na ściskanie w wyniku zwiększonej porowatości matrycy cementowej.

Pielęgnacja wewnętrzna jest doskonałym uzupełnieniem pielęgnacji zewnętrznej, jednak nie stanowi ona jej substytutu. Stosując pielęgnację wewnętrzną zapewnia się:

- redukcję skurczu autogenicznego,
- pełniejszą hydratację cementu,
- redukcję zarysowań,
- zwiększoną wytrzymałość wczesną i końcową,
- zwiększoną trwałość,
- utrzymywanie wysokiej wilgotności wewnątrz elementu.

Jednak, pomimo wielu zalet, pielęgnacja wewnętrzna nie zapewni należytych warunków dojrzewania, np. na powierzchniach silnie narażonych na oddziaływanie czynników zewnętrznych.

PIELĘGNACJA BETONU ZE WZGLĘDU NA WARUNKI ATMOSFERYCZNE

Zgodnie z polskim uzupełnieniem do normy PN-EN 206, PN-B-06265 rozróżnia się następujące warunki:

- prowadzenia prac monolitycznych
- obniżonej temperatury – temperatura średnia dobowa od 5 do 10°C,
- zimowe – temperatura średnia dobowa poniżej 5°C,
- podwyższonej temperatury – temperatura średnia dobowa powyżej 25°C.

Temperatura średnia dobowa – temperatura obliczona wg wzoru:

$$T_{sr} = \frac{T_7 + T_{13} + 2 \cdot T_{21}}{4}$$

Gdzie:

T_7 , T_{13} , T_{21} – temperatury powietrza zmierzone o godzinach 7, 13 i 21.

PIELĘGNACJA BETONU W WARUNKACH PODWYŻSZONYCH TEMPERATUR

Najbardziej efektywną pielęgnacją w okresie podwyższonych temperatur jest pielęgnacja wilgotnościowa, która ma na celu zapobiegnięciu utraty wody z betonu na skutek parowania z jego powierzchni, a także dostarczenie wody do

betonu niezbędnej do hydratacji cementu. Ubytek wody spowodowany brakiem pielęgnacji wywołuje następujące negatywne skutki dla betonu:

- większy skurcz plastyczny i powstawanie rys,
- mniejszy przyrost wytrzymałości,
- większą przepuszczalność i nasiąkliwość,
- obniżoną odporność na ścieranie.

Pielęgnację powierzchni betonu należy rozpocząć bezzwłocznie po zakończeniu operacji zagęszczania i wykańczania betonu tam, gdzie jest to konieczne. W razie konieczności ochrony powierzchni betonu przed jej ostatecznym wykończeniem, należy stosować pielęgnację tymczasową. Do zabezpieczenia wykończonej powierzchni betonu można zastosować żywiczne preparaty ochronne, ale oprócz tego należy powierzchnię ostonić przed nagrzewaniem folią i włókniną w jasnym kolorze. Po ułożeniu mieszanki betonowej, a przed rozpoczęciem zacierania może być konieczne także chwilowe ostonięcie powierzchni betonu folią (zwłaszcza przy dużym nasłonecznieniu i silnym wietrze).

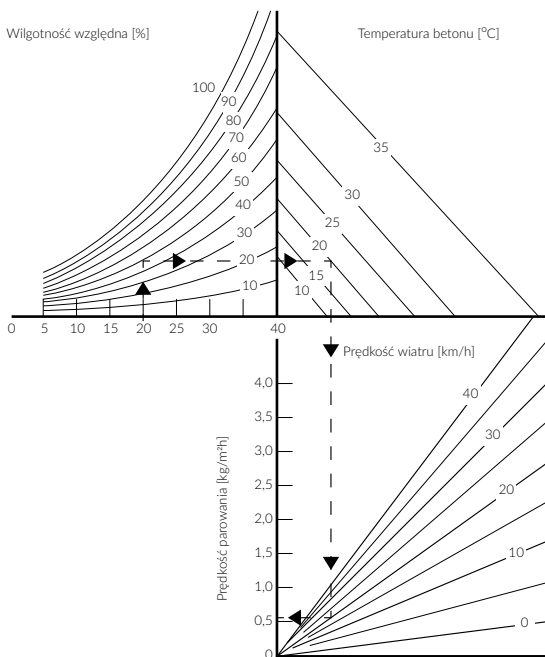
Przyrost lub spadek temperatury w świeżym betonie, wielkość zmian skurczowych oraz powstawanie ewentualnych rys wywołanych skurczem, uzależnione są w znacznym stopniu od szybkości odparowywania wody z tego tworzywa. Utrzymanie wymaganej ilości wody zarobowej oddziałuje na ilość i mikrostrukturę produktów hydratacji, a tym samym na wytrzymałość i w konsekwencji na trwałość betonu w różnych warunkach jego eksploatacji. Brak pielęgnacji wilgotnościowej betonu w ciągu pierwszych dni dojrzewania lub jej niewłaściwy przebieg w warunkach podwyższonej temperatury otoczenia i betonu, jak również niskiej wilgotności względnej powietrza powoduje utratę nawet 50 - 70 % wody zarobowej. Większość wody odparowuje ze świeżego betonu w ciągu pierwszych 6 -7 godzin jego twardnienia. Wynika stąd, że zarówno do prawidłowego rozwoju hydratacji cementu jak i właściwego ukształtowania struktury betonu, pozwalającej zminimalizować skutki skurczu, konieczna jest pielęgnacja wilgotnościowa, zwłaszcza w pierwszych dniach twardnienia betonu. Decydujący wpływ na dojrzewanie betonu ma przede wszystkim ilość wody będąca do dyspozycji uwadnianego cementu oraz temperatura dojrzewania. Stąd wynika konieczność zabezpieczenia świeżego betonu przed utratą wilgoci i ciepła, jak również przed przegrzaniem. Ponadto świeży beton należy chronić przed tak szkodliwie działającymi czynnikami jak: wstrząsy, ruchy form, nadmierne obciążenie, a także strugi wody czy deszcz, które wyflukują cement ze świeżo zagęszczonej mieszanki oraz młodego betonu.

Przydatnym przy podejmowaniu decyzji o pielęgnacji może być nomogram

(rys. 5.195) do wyznaczania ilości wody odparowanej z betonu w zależności od warunków środowiska. Nomogram ten pozwala ocenić intensywność odwodnienia betonu w zależności od wilgotności i temperatury powietrza, temperatury betonu oraz prędkości wiatru. Wg zaleceń amerykańskich instytutów naukowych wielkość odparowania wody większa od:

- 1,0 kg/m² /h (wg American Concrete Institute)
- 0,5 kg/m² /h (wg Cement and Concrete Association)

powinna zmuszać wykonawcę robót do natychmiastowego podjęcia pielęgnacji betonu.



Rys. 5.195. Nomogram do wyznaczania ilości odparowanej wody zarobowej z betonu w zależności od temperatury, wilgotności względnej i prędkości wiatru

Różnica temperatur pomiędzy wodą do pielęgnacji a powierzchnią betonu nie powinna być wyższa niż 5 °C do 8 °C. Częstotliwość z jaką należy polewać beton reguluje raport ACI 308-98. Według tego dokumentu częstotliwość polewań w ciągu doby jest ściśle uzależniona od temperatury powietrza i długości okresu pielęgnacji. Zalecenia odnośnie częstotliwości polewania betonu podaje tabela 5.98.

Tabela 5.98. Zalecana częstotliwość polewań w zależności od temperatury powietrza

Temperatura powietrza	25°C	30°C	35°C	40°C
Czas pielęgnacji, dni	20	17	14	11
Liczba polewań w ciągu doby	3	4	5	6

W warunkach podwyższonych temperatur, ostrego słońca i/lub mocnego wiatru należy rozpocząć pielęgnację tak szybko jak to jest możliwe, jednak do czasu związania powierzchni betonu nie wolno polewać go wodą pod dużym ciśnieniem. Dopuszcza się stosowanie mgiełki wodnej i natychmiastowe przykrywanie powierzchni betonu.

Dopuszcza się również pielęgnację przez zastosowanie powłoki. Zapobiega się w ten sposób ubytkowi wody z powierzchni bez doprowadzenia wody z zewnątrz. Do tego celu służą folie PE i PCV lub preparaty błonkotwórcze. Według raportów ACI 308-98 i ACI 305-99 stosowane folie polietylenowe powinny mieć grubość co najmniej 0,10 mm. Dla zróżnicowanych potrzeb pielęgnacji folie te występują w kolorach czarnym i białym. Folia czarna, jak zaleca ACI 308-98, powinna być stosowana podczas chłodnych dni, czarny kolor absorbuje promieniowanie słoneczne, natomiast folia biała doskonale nadaje się podczas dni słonecznych i upalnych – odbija promieniowanie. Folię układa się na tzw. zakładkę i delikatnie przysypuje piaskiem. Jednocześnie normy zalecają uprzednie spryskanie wodą pielęgnowanej powierzchni betonu, a następnie przykrycie jej folią polietylenową lub wzmocnionym papierem - kombinacja ta pozwoli uzyskać doskonałe efekty pielęgnacyjne.

ACI 308-98 zaleca nanoszenie powłoki błonkotwórczej natychmiast po zakończeniu wydzielania się wody na powierzchni betonu, ale zanim powierzchnia wyschnie. Dozowanie preparatu powinno się odbywać wg wskazań producenta. Na wypadek braku takich danych, raport zaleca stosowanie preparatu w ilości od 0,20 l/m² do 0,25 l/m². Przy stosowania powłok należy zwrócić szczególną uwagę na efektywną ilość środka nałożonego na powierzchnię betonu, dokładne jego nanoszenie może być utrudnione zwłaszcza przy silnym wietrze.

PIELĘGNACJA BETONU W WARUNKACH OBNIŻONYCH TEMPERATUR

Pielęgnacja betonu w warunkach obniżonych temperatur polega na zabezpieczeniu młodego betonu przed utratą ciepła i zamarznięciem wody zarobowej. Zalecane jest stosowanie osłon zewnętrznych poprzez okrycie betonu płachtami brezentowymi, matami słomianymi, płytami styropianu lub matami z wełny mineralnej i szczelnymi powłokami, np. folią, papą lub blachą. Inną metodą pielęgnacji jest nagrzewanie betonu za pomocą nadmuchu gorącego powietrza (rys. 5.196) lub przewodów oporowych wplatanych w zbrojenie (elektronagrzew). Ogólne wytyczne dotyczące pielęgnacji młodego betonu w warunkach obniżonych temperatur:

- w pierwszym okresie pielęgnacji młodego betonu należy chronić beton przed utratą ciepła,
- w przypadku stosowania zewnętrznego źródła ciepła nie należy dopuścić do wysuszenia betonu,
- strumień ciepłego powietrza pochodzący z nagrzewnic powinien być jak najbardziej rozproszony,
- nie dopuścić do przemrożenia powierzchni młodego betonu (rys. 5.197),
- nie należy zmieniać współczynnika w/c dostarczonej mieszanki betonowej oraz nie należy dodawać jakichkolwiek własnych środków chemicznych do dostarczonej mieszanki betonowej,
- dodanie domieszki chemicznej, popularnie zwanej „przeciw mrozową”, nie zastąpi właściwej pielęgnacji betonu.



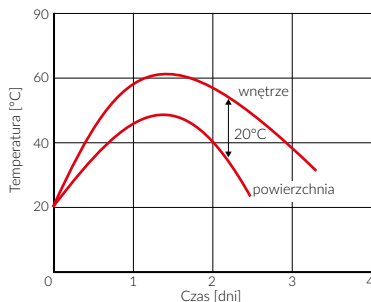
Rys. 5.196. Pielęgnacja betonu za pomocą nadmuchu ciepłego powietrza



Rys. 5.197. Uszkodzenie powierzchni betonu wskutek przemrożenia

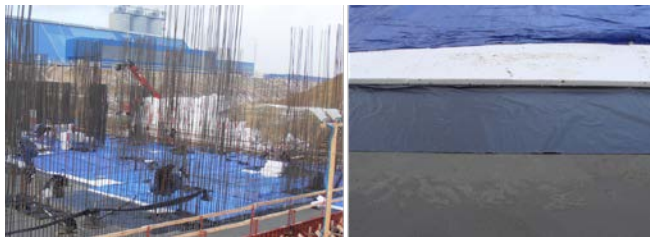
PIELĘGNACJA BETONÓW MASYWNYCH

W przypadku betonów masywnych (patrz rozdz. 5.2.5.7), gdzie wpływ ciepła hydratacji cementu jest znaczący istnieje ryzyko spękań termicznych. Proces ten jest wynikiem różnicy temperatur pomiędzy chłodzoną powierzchnią betonu a jego rdzeniem, w którym mogą wystąpić duże przyrosty temperatury. W efekcie beton w rdzeniu ulega rozszerzeniu, co powoduje powstanie naprężeń i spękań zewnętrznej chłodzonej warstwy betonu. Przyjmuje się, że dla różnicy temperatur ok. $20^{\circ}\text{C}/\text{m}$ w betonie nie wystąpią naprężenia krytyczne i spękania (rys. 5.198).

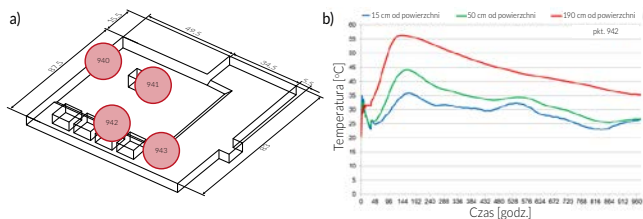


Rys. 5.198. Graniczna różnica temperatur (gradient) pomiędzy wnętrzem a powierzchnią zewnętrzną betonu

Z tego względu konieczne jest zabezpieczenie powierzchni betonu przed samoczynną utratą ciepła (parowanie, transport ciepła na styku powierzchnia betonu – otoczenie). W przypadku pielęgnacji betonów masywnych zalecane jest izolacja cieplna betonu za pomocą folii lub płyt styropianowych (rys. 5.199). W praktyce stosowane są różne metody obniżenia gradientu temperatury w twardniejącym betonie. Należą do nich: wykonywanie instalacji chłodzącej wewnątrz betonu, stosowanie cementów o niskim ciepłe hydratacji (LH), np. cementu hutniczego CEM III i wieloskładnikowego CEM V, czy też stosowanie dodatku popiołu lotnego jako częściowego substytutu cementu. Zalecany jest także monitoring zmian temperatury w betonowanym elemencie i określenie długości koniecznego okresu pielęgnacji (rys. 5.200).



Rys. 5.199. Stosowania osłon zewnętrznych (folia + styropian) na przykładzie fundamentu pod blok kotłowni w El. Opole



Rys. 5.200. Pomiar temperatury w płycie betonowej a) rozmieszczenie punktów pomiarowych, b) przebieg temperatury w czasie

DŁUGOŚĆ OKRESU PIELĘGNACJI

Długość okresu pielęgnacji należy dobrać w zależności temperatury, warunków atmosferycznych oraz rodzaju i właściwości zastosowanego cementu. Czas pielęgnacji można określić dokonując pomiaru temperatury powierzchni betonu i odnosząc się do wytycznych zawartych w normie PN-EN 13670 „Wykonywanie konstrukcji z betonu” (tabela 5. 99, tabela 5. 100, tabela 5. 101).

UWAGA!

Pielęgnację powierzchni betonu należy rozpocząć bezzwłocznie po zakończeniu operacji zagęszczania i wykańczania betonu tam, gdzie jest to konieczne. W razie konieczności ochrony powierzchni betonu przed jej ostatecznym wykończeniem, należy stosować pielęgnację tymczasową.

Długość okresu pielęgnacji świeżo ułożonego betonu może być określana za pomocą następujących metod:

- pomiaru temperatury z sondy umieszczonej maksymalnie 10 mm pod powierzchnią betonu,
- pomiaru temperatury na podstawie średniej dziennej temperatury,
- pomiaru za pomocą sklerometru Schmidta (po kalibracji na reprezentatywnych próbkach betonu),
- innych metod, których przydatność została udowodniona.

Tabela 5. 99. Minimalny okres pielęgnacji dla 2. klasy pielęgnacji (odpowiada wytrzymałości powierzchni wynoszącej 35% wytrzymałości charakterystycznej)

Temperatura (t) powierzchni betonu [°C]	Minimalny okres pielęgnacji [dni] ^{a)}		
	Rozwój wytrzymałości betonu ^{c),d)} (f_{cm2} / f_{cm28}) = r		
	szybki $r \geq 0,50$	średni $0,50 > r \geq 0,30$	wolny $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	1,0	1,5	2,5
$25 > t \geq 15$	1,0	2,5	5
$15 > t \geq 10$	1,5	4	8
$10 > t \geq 5$ ^{b)}	2,0	5	11

a) Gdy czasu początku wiązania ≥ 5 godz. różnice należy doliczyć do czasu pielęgnacji.
b) Gdy temperatura spadnie poniżej 5°C, okres ten należy doliczyć do czasu pielęgnacji.
c) Rozwój wytrzymałości betonu rozumiany jest jako stosunek wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania do wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.
d) Dla betonów o bardzo wolnym rozwoju wytrzymałości specyfikacje wykonawcze powinny zawierać specjalne wymagania.

Tabela 5. 100. Minimalny okres pielęgnacji dla 3. klasy pielęgnacji (odpowiada wytrzymałości powierzchni wynoszącej 50% wytrzymałości charakterystycznej)

Temperatura (t) powierzchni betonu [°C]	Minimalny okres pielęgnacji [dni] ^{a)}		
	Rozwój wytrzymałości betonu ^{c),d)} (f_{cm2} / f_{cm28}) = r		
	szybki $r \geq 0,50$	średni $0,50 > r \geq 0,30$	wolny $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	1,5	2,5	3,5
$25 > t \geq 15$	2,0	4	7
$15 > t \geq 10$	2,5	7	12
$10 > t \geq 5$ ^{b)}	3,5	9	18

a) Gdy czasu początku wiązania ≥ 5 godz. różnice należy doliczyć do czasu pielęgnacji.
b) Gdy temperatura spadnie poniżej 5°C, okres ten należy doliczyć do czasu pielęgnacji.
c) Rozwój wytrzymałości betonu rozumiany jest jako stosunek wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania do wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.
d) Dla betonów o bardzo wolnym rozwoju wytrzymałości specyfikacje wykonawcze powinny zawierać specjalne wymagania.

Tabela 5.101. Minimalny okres pielęgnacji dla 4. klasy pielęgnacji (odpowiada wytrzymałości powierzchni wynoszącej 70% wytrzymałości charakterystycznej)

Temperatura (t) powierzchni betonu [°C]	Minimalny okres pielęgnacji [dni] ^{a)}		
	Rozwój wytrzymałości betonu ^{c),d)} (f_{cm2}/f_{cm28}) = r		
	szybki $r \geq 0,50$	średni $0,50 > r \geq 0,30$	wolny $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	3	5	6
$25 > t \geq 15$	5	9	12
$15 > t \geq 10$	7	13	21
$10 > t \geq 5$ ^{b)}	9	18	30

a) Gdy czasu początku wiązania ≥ 5 godz. różnice należy doliczyć do czasu pielęgnacji.
 b) Gdy temperatura spadnie poniżej 5°C, okres ten należy doliczyć do czasu pielęgnacji.
 c) Rozwój wytrzymałości betonu rozumiany jest jako stosunek wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania do wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.
 d) Dla betonów o bardzo wolnym rozwoju wytrzymałości specyfikacje wykonawcze powinny zawierać specjalne wymagania.

5.3.6. Wykwyty węglanowe

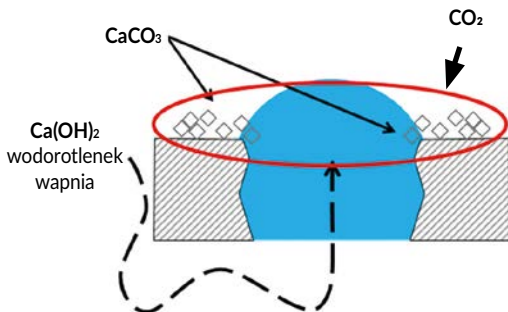
Wykwyty na elementach betonowych w znaczącej większości mają charakter węglanowy, a podstawowym ich składnikiem jest węglan wapnia CaCO_3 . Wykwyty są zjawiskiem naturalnym, związanym obecnością związków wapnia we wszystkich kompozytach cementowych. Wykwyty na powierzchni elementów betonowych powstają w wyniku szeregu skomplikowanych procesów fizyko-chemicznych zachodzących w dojrzewającym betonie (zachodzi proces odkładania się rozpuszczonego w wodzie wodorotlenku wapnia, który po parowaniu dyfuzyjnym wody i reakcji z dwutlenkiem węgla z powietrza, wytrąca się na powierzchni betonu jako trudno rozpuszczalny węglan wapnia). Wykwyty węglanowe obserwowane na powierzchni zapraw lub betonów występują w postaci plam, które zmieniają swój wygląd od mglistych, białych nalotów wapiennych do grubych wykryształizowanych warstw CaCO_3 (rys. 5.201).



Rys. 5.201. Wykwyty węglanowe a) plamy, b) naloty, c) wykryształizowane warstwy CaCO_3

Wyróżnia się dwa rodzaje wykwitów:

- pierwotne – powstający w procesie wiązania i twardnienia Ca(OH)_2 , reaguje z CO_2 z powietrza tworząc węgiel wapnia CaCO_3 – związek trudnorozpuszczalny w wodzie krystalizujący w postaci białego nalotu (rys. 5.202),
- wtórne – jako wynik penetracji wody do wnętrza struktury betonu i rozpuszczania związków wapnia; wtórne wykwitki powstają lokalnie i bardzo często są powodowane przez zmienne warunki atmosferyczne lub nierównomierną kondensację pary wodnej, np. paletyzowana kostka brukowa (rys. 5.203).



Rys. 5.202. Schemat powstawania wykwitów węglanowych



Rys. 5.203. Wykwitki węglanowe na powierzchni kostki brukowej

Powstanie wykwitów na elementach betonowych, a zwłaszcza galerii betonowej (szczególnie betonowa kostka brukowa), nie jest efektem złej jakości cementu czy błędów w technologii produkcji, a przede wszystkim nie dyskwalifikuje wyrobów z punktu widzenia wymagań jakościowych określonych w normach i aprobatkach technicznych. Obecność wykwitów negatywnie wpływa na odczucia estetyczne, a co za tym idzie, także na upodobania klienta. Powstawaniu wykwitów węglanowych sprzyjają:

- wysoki współczynnik w/c w betonie,
- stosowanie niepiłukanego kruszywa,
- źle zaprojektowany beton (nieszczelny),
- nieprawidłowo zagęszczony beton,
- warunki atmosferyczne powodujące szybkie wysychanie powierzchni betonu,
- niewłaściwe warunki dojrzewania (brak pielęgnacji),
- występowanie dużej ilości porów na powierzchni betonu – nierówna powierzchnia deskowania, nieefektywny środek antyadhezyjny.

Powstawanie wykwitów można ograniczyć poprzez (rys. 5.204):

- projektowanie betonu o możliwie niskim współczynniku wodno-cementowym,
- dobór kruszywa o uziarnieniu zapewniającym minimalną jamistość,
- odpowiedni dobór rodzaju i ilości cementu,
- właściwe ułożenie, zagęszczenie i pielęgnacja betonu.



Rys. 5.204. Sposoby ograniczania wykwitów węglanowych

Wykwity można usuwać poprzez:

- piaskowanie lub szlifowanie powierzchni (dodatkowo impregnacja powierzchni),
- mycie powierzchni – ługowanie betonu rozcieńczonym kwasem, np. fosforowym (zarówno przed, jak i po zabiegu należy zmyć powierzchnię betonu detergentami, a następnie obficie spłukać wodą).

Wykwity są zjawiskiem przejściowym i w zależności od rodzaju i miejsca zanikają w okresie maksymalnie do 3 lat. Związane to jest z reakcją powolnego przechodzenia CaCO_3 w łatwo rozpuszczalny kwaśny węglan wapnia $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Wykwity zanikają również w wyniku ścierania się z użytkowanej powierzchni.

6

Literatura

- 1) J. Piasta, W.G. Piasta, „Beton zwykły”, Arkady, Warszawa 1988
- 2) J. Deja, J. Małolepszy, E. Skrzyczewski, „Właściwości cementu CP 55S wytwarzanego w Cementowni Góraźdże S.A.”, Cement Wapno Beton 1/96
- 3) J. Małolepszy, R. Korczyński, „Zastosowanie cementu szybkotwardniejącego 55S do produkcji dźwigarów strunobetonowych”, XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Jadwisin'98
- 4) J. Deja, B. Kopia, „Właściwości betonu z cementem hutniczym”, Polski Cement, Kraków 1998
- 5) P. Kijowski, B. Kopia, W. Pichór, „Beton w budowie oczyszczalni ścieków”, Polski Cement, Kraków 1998
- 6) J. Deja, P. Kijowski, „ABC betonu”, Polski Cement, Kraków 1997.
- 7) M. Abramowicz, „Roboty betonowe – poradnik”, Arkady, Warszawa 1992
- 8) P. Łukowski, „Domieszki i dodatki do zapraw i betonów”, Polski Cement, Kraków 1998
- 9) Z. Giergiczny, „Odporność na agresję chemiczną cementów zawierających aktywne dodatki mineralne”, Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”, MATBUD'96, Kraków 1996
- 10) S. Bastian, „Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym”, Arkady, Warszawa 1988
- 11) W. Kurdowski, J. Małolepszy, „Zawartość glinianu trójwapniowego w cemencie a odporność zaprawy na działanie chlorków”, XLII konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1966
- 12) J. Małolepszy, J. Deja, W. Brylicki, M. Gawlicki, „Technologia Betonu”, Skrypt AGH nr 1447, Kraków 1995
- 13) W. Brylicki, „Kostka brukowa z betonu wibroprasowanego”, Polski Cement, Kraków 1998
- 14) „Betontechnische Daten. Beton nach EN 206-1 und DIN 1045”, Heidelberg Cement Group, 2014
- 15) J. Jasiczak, P. Mikołajczyk, „Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych”, Poznań 1997
- 16) E. Kon, „Trwałość betonu w ujęciu europejskiej normy betonowej”, Cement. Wapno. Beton. nr 6/98
- 17) W. Żenczykowski, „Budownictwo ogólne”, Arkady, Warszawa 1983
- 18) „Memento: Ciments, Betons”, FEBELCEM, Bruksela 1997.
- 19) A. M. Neville, „Właściwości betonu”, Polski Cement, Kraków 2012
- 20) Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński, „Cementy z dodat-

kami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji”, Instytut Śląski, Opole, 2002

- 21) Opole 2002. 23. Instrukcja ITB 362/99 „Stosowanie płyt krzemionkowych do wykonywania betonów narażonych na działanie wybranych warunków środowiskowych”, ITB, Warszawa 1999
- 22) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement hutniczy CEM III/A właściwości i perspektywy zastosowań w budownictwie”, Poznań, 1997
- 23) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Efektywne wykorzystanie cementów – wybrane zastosowania w budownictwie”, Wrocław, 1998
- 24) W. Kurdowski, „Chemia cementu i betonu”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010
- 25) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Nowoczesny beton, cementy, dodatki i domieszki chemiczne”, Szczecin, 1998
- 26) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton w budowie obiektów hydrotechnicznych i oczyszczalni ścieków”, Chorula, 1998
- 27) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Technologia produkcji i badania własności betonowej kostki brukowej”, Kraków, 1999
- 28) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 1999
- 29) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement z dodatkami mineralnymi. Rodzaje, właściwości i możliwości zastosowania w budownictwie”, Poznań, Chorula 1999
- 30) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Nowoczesne lokalne drogi betonowe”, Góraźdże, 2000
- 31) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Tendencje rozwojowe prefabrykacji betonowej”, Poznań, 2000
- 32) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton w budownictwie wodnym”, Szczecin, 2000
- 33) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2000
- 34) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton w inżynierii komunikacyjnej”, Poznań, 2001
- 35) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczo-inżynierskich oraz hydrotechnicznych”, Piła, 2001
- 36) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2001
- 37) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2002

- 38) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton i jego składniki”, Poznań, 2003
- 39) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Poznań, 2003
- 40) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Trwałość betonu”, Kraków, 2004
- 41) Konferencja „Dni Betonu. Szczyrk, październik 2002”, Polski Cement, 2002
- 42) Materiały promocyjne firmy SIKA Poland Sp. z o.o.
- 43) Materiały promocyjne firmy Góraźdze BETON Polska Sp. z o.o.
- 44) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton i jego składniki”, Poznań, 2005
- 45) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2005
- 46) Praca zbiorowa „Beton według normy PN-EN 206-1. Komentarz” Polski Cement, Kraków 2005
- 47) Konferencja „Dni betonu, Wisła, 9-11 października 2006”, Materiały Konferencyjne, Polski Cement, Kraków 2006
- 48) Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton cementowy w obiektach hydrotechnicznych”, Góraźdze, 2006
- 49) Z. Giergiczny, „Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych”, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2006
- 50) Materiały z konferencji „Dni Betonu”, Wisła 2008
- 51) Praca zbiorowa „Beton przyjazny środowisku”, SPBT, Kraków 2008
- 52) Z. Giergiczny, „Dodatki mineralne – niezastąpione składniki współczesnego cementu i betonu. Materiały Budowlane”, nr 3, 2009, s. 46÷50
- 53) J. Janiczak, A. Wdowska, T. Rudnicki, „Betony ultrawysokowartościowe. Właściwości, Technologia, Zastosowania”, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008
- 54) Z. Giergiczny, „Popiół lotny do betonu – proponowane zmiany w nowelizowanej normie EN 450-1”, Budownictwo-Technologie-Architektura, 2010, nr 2
- 55) Z. Giergiczny, „Cementy z dodatkami mineralnymi składnikami trwałego betonu”, Inżynieria i Budownictwo, nr 5-6, 2010.
- 56) XII Sympozjum Naukowo Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2010
- 57) Materiały z Konferencji „Dni Betonu”, Wisła 2010.
- 58) Z. Giergiczny, „Beton według normy EN 206-1 na przykładzie wybranych krajów europejskich”, Budownictwo-Technologie-Architektura, 2010, nr 4
- 59) T. Pużak, „Nanotechnologia – przyszłość prefabrykacji betonowej”, Materiały Budowlane nr 11/2010

- 60) Z. Giergiczny, A. Garbacik, D. Dziuk, „Aktywność popiołu lotnego wapiennego w porównaniu z innymi dodatkami mineralnymi stosowanymi w produkcji cementu”, XVII Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”, Warszawa, 24–26.10.2010
- 61) T. Pużak, M. Sokołowski, „Cementy w prefabrykacji betonowej”, Konferencja „Prefabrykacja XXI wieku”, Myślenice, 5-7.05.2010
- 62) G. Zapotoczna-Sytek, S. Balkovic, „Autoklawizowany beton komórkowy”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013
- 63) Materiały z Konferencji „Dni Betonu”, Wiśła 2012
- 64) Z. Giergiczny „Popiół lotny w składzie cementu i betonu”, Gliwice 2013
- 65) A. Garbacik, Z. Giergiczny „Cementy specjalne – nowe kryteria klasyfikacji, wymagań i oceny zgodności”, Budownictwo-Technologie-Architektura, 2014, nr 2
- 66) XIII Sympozjum Naukowo Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice 2011
- 67) XIV Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w Technologii Betonu, Gliwice 2012
- 68) J. Bobrowicz, P. Szaj, „Nowelizacja normy 206-1”, Materiały budowane 11/2013, Warszawa 2013
- 69) Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 63/2000, poz. 735)
- 70) A. Bobrowski, M. Gawlicki, A. Łagosz, W. Nocuń-Wczelik, „Cement: metody badań, wybrane kierunki stosowania”, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
- 71) Z. Giergiczny, M. Batog, M. Wąsik „Cement jako składnik betonu w inżynierii komunikacyjnej”, Autostrady 8,9/2014
- 72) R. Rozborski, „Układanie i zagęszczanie mieszanki betonowej, pielęgnacja świeżego betonu”, Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy; Radom 2006
- 73) A. Garbacik, Z. Giergiczny, „Cementy specjalne – nowe kryteria klasyfikacji, wymagań i oceny zgodności” Przegląd Budowlany 5/2014
- 74) Warunki Wykonywania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v04 Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich Sierpień 2022
- 75) Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-05.03.04 v02 Nawierzchnia z betonu cementowego 30 września 2019
- 76) M. Konopska-Piechurska, W. Jackiewicz-Rek, „Reaktywność alkaliczna kruszyw jako czynnik zagrażający trwałości konstrukcji betonowych

- w Polsce”, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane 2013
- 77) J. Śliwiński; „Beton zwykły projektowanie i podstawowe właściwości”, Polski Cement, Kraków 1999
 - 78) Sika – Beton praktyczny poradnik
 - 79) Z. Giergiczny, „Dobór cementów do klas ekspozycji wg PN-EN 206-1”, Materiały budowlane 11/2013 (nr 495)
 - 80) Z. Orłowski, „Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010
 - 81) M. Dąbrowska, Praca doktorska: „Wpływ popiołu lotnego wapiennego na odporność korozyjną kompozytów wykonanych z cementu portlandzkiego wieloskładnikowego”, Gliwice 2014
 - 82) W. Drożdż, Praca doktorska: „Wpływ popiołu lotnego wapiennego na przebieg korozji alkalicznej w betonie”, Gliwice 2014
 - 83) M.C.G. Juenger, F. Winnefeld, J.L. Provis, J.H. Ideker, Advances in alternative cementitious binders, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 1232–1243. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.012
 - 84) G.C. Bye, Portland Cement: Composition, Production and Properties, 2nd edition, Thomas Telford Ltd, 1999
 - 85) I. Odler, Special Inorganic Cements, (2014), <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482271942>
 - 86) J.M. W. Nocuń-Wczelik, Z. Konik, A. Stok, Spoiwa o kontrolowanych zmianach objętości do prac naprawczych i uszczelniających, Przegląd Bud. 12 (2003) 32–36
 - 87) M. Batog, Praca doktorska: „Kształtowanie składu mieszanki betonowej z uwagi na wczesne wpływy termiczno-skurczowe w betonowych konstrukcjach masywnych”
 - 88) K. Synowiec, Praca doktorska: „Kształtowanie właściwości cementów popiołowo – żużlowych zawierających popiół lotny wapienny”
 - 89) D. Dziuk, Praca doktorska: „Wpływ popiołu lotnego wapiennego na kształtowanie się właściwości cementu portlandzkiego wieloskładnikowego”
 - 90) A. Golda, Praca doktorska: „Odporność betonu na oddziaływanie środowiska w konstrukcjach masywnych, na przykładzie budowy bloków nr 5 i 6 Elektrowni Opole”
 - 91) XV Sympozjum Naukowo Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Bronisławów, 2013
 - 92) XVI Sympozjum Naukowo Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Bełchatów, 2015
 - 93) XVII Sympozjum Naukowo Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Bełchatów, 2017

- 94) Z. Giergiczny, K. Synowiec, M. Batog, Properties of fly ash-slag cements containing different types of fly ash, in: The 14th International Congress on the Chemistry of Cement. ICCS 2015 Beijing, Beijing, China, 13-16 October 2015
- 95) Praca zbiorowa pod redakcją Z. Giergicznego „Vademecum technologia Betonu”, Górażdże Cement S.A., Chorula, 2019
- 96) Praca zbiorowa pod redakcją T. Rybarczyka, „Prawie wszystko o betonie komórkowym. Zeszyt 1”, Stowarzyszenie Producentów Betonów,
- 97) G. Zapotoczna-Sytek, S. Balkovic, „Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia. Właściwości. Zastosowanie”, Wydawnictwo PWN, 2013
- 98) G. Bajorek, Pielęgnacja betonu w okresie dojrzewania, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2017
- 99) Z. Giergiczny, Pielęgnacja betonu - niedoceniany problem, Inżynier Budownictwa. 10 (2016)
- 100) W.C.P. Steven, H. Kosmatka, B. Kerkhoff, “Design and Control of Concrete Mixtures”, Portland Cement Association, 2002
- 101) Z. Giergiczny, M. Batog, K. Synowiec, M. Ostrowski, “Slag cement CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA as a component of durable concrete”, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018
- 102) P. Łukowski, „Modyfikacja materiałowa betonu”, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016
- 103) Z. Giergiczny, „Kiedy stosujemy cementy odporne na siarczany (SR, HSR) oraz niskoalkaliczne (NA) w składzie betonu”, Budownictwo Technologicznej Architektury 2017 nr 4
- 104) M. Batog, Z. Giergiczny, „Influence of mass concrete constituents on its properties”, Construction and Buildings. Materials, 2017, vol. 146, s. 221-230

Normy i oceny techniczne:

- N1. PN-EN 197-1:2012 „Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności cementów powszechnego użytku”
- N2. PN-EN 197-2:2014-05 „Cement. Część 2. Ocena zgodności”
- N3. PN-EN 197-5:2021-07 „Cement - Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI”
- N4. PN-B-19707:2013-10 „Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności”

- N5. PN-EN 14216:2015-09 „Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim ciepłe hydratacji”
- N6. PN-EN 206+A2:2021-08 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
- N7. PN-B-06265:2022-08 „Krajowe uzupełnienie PN-EN 206 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
- N8. PN-EN 450-1:2012 „Popiół lotny do betonu. Definicje, wymagania i kontrola jakości”
- N9. PN-EN 13263-1+A1:2010 „Pył krzemionkowy do betonu – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności”
- N10. PN-EN 15167-1:2011 „Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”
- N11. PN-EN 1008:2004 „Woda zarobowa do betonu – Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu”
- N12. PN-EN 934-1:2009 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 1: Wymagania podstawowe”
- N13. PN-EN 934-2+A1:2012 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”
- N14. PN-EN 14889-1:2007 „Włókna do betonu – Część 1: Włókna stalowe – Definicje, wymagania i zgodność”
- N15. PN-EN 14889-2:2007 „Włókna do betonu „Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność”
- N16. PN-EN 12620+A1:2010 „Kruszywa do betonu”
- N17. PN-EN 15743+A1:2015-06 „Cement supersiarczanowy – Skład, wymagania i kryteria zgodności”
- N18. PN-EN 14647:2007 „Cement glinowo-wapniowy – Skład, wymagania i kryteria zgodności”
- N19. PN-EN 13139:2003/AC:2004 „Kruszywa do zaprawy”
- N20. PN-EN 13055:2016-07 „Kruszywa lekkie. Część 1: Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy”
- N21. PN-EN 13242+A1:2010 „Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym”
- N22. PN-EN 13043:2004 „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”

- N23. PN-EN 12350-1:2019-07 „Badania mieszanki betonowej – Część 1: Pobieranie próbek”
- N24. PN-EN 12350-2:2019-07 „Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka”
- N25. PN-EN 12350-3:2019-07 „Badania mieszanki betonowej – Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe
- N26. PN-EN 12350-4:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 4: Badanie konsystencji metodą oznaczania stopnia zagęszczalności”
- N27. PN-EN 12350-5:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozpluwowego”
- N28. PN-EN 12350-6:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość”
- N29. PN-EN 12350-7:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe”
- N30. PN-EN 12350-8:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 8: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą rozpluwu stożka”
- N31. PN-EN 12350-9:2012 „Badania mieszanki betonowej – Część 9: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą V-lejka”
- N32. PN-EN 12350-10:2012 „Badania mieszanki betonowej – Część 10: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą L-pojemnika”
- N33. PN-EN 12350-11:2012 „Badania mieszanki betonowej – Część 11: Beton samozagęszczalny – Badanie segregacji sitowej”
- N34. PN-EN 12350-12:2012 „Badania mieszanki betonowej – Część 12: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą J-pierścienia”
- N35. PN-EN 12390-1:2021-12 „Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form”
- N36. PN-EN 12390-2:2019-07 „Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”
- N37. PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”
- N38. PN-EN 12390-4:2020-03 „Badania betonu – Część 4: Wytrzymałość na ściskanie – Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych”
- N39. PN-EN 12390-5:2019-08 „Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań”
- N40. PN-EN 12390-6:2011 „Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozpluwaniu próbek do badań”
- N41. PN-EN 12390-7:2019-08 „Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu”
- N42. PN-EN 12390-8:2019-08 „Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem”

- N43. CEN/TS 12390-9:2016 "Testing hardened concrete – Part 9: Freezethaw resistance – Scaling"
- N44. PN-EN 12390-10:2019-02 „Badania betonu - Część 10: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację w warunkach stężeń dwutlenku węgla na poziomie atmosferycznym”
- N45. PN-EN 12390-11:2015-09 „Badania betonu - Część 11: Oznaczanie odporności betonu na wnikanie chlorków w warunkach jednokierunkowej dyfuzji”
- N46. PN-EN 12390-12:2020-06 “Badania betonu - Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację - Przyspieszona metoda karbonatyzacji”
- N47. PN-EN 12390-13:2021-12 „Badania betonu – Część 13: Wyznaczenie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu”
- N48. PN-EN 12390-14:2018-10 „Badania betonu - Część 14: Semi-adiabatyiczna metoda oznaczania ciepła wydzielanego podczas procesu twardnienia betonu”
- N49. PN-EN 12390-15:2019-11 „Badania betonu - Część 15: Adiabatyiczna metoda oznaczania ciepła wydzielanego podczas procesu twardnienia betonu”
- N50. PN-EN 12390-16:2020-03 „Badania betonu - Część 16: Oznaczanie skurczu betonu”
- N51. PN-EN 12390-17:2020-03 „Badania betonu - Część 17: Oznaczanie pęcznienia betonu przy ściskaniu”
- N52. PN-EN 771-4+A1:2015-10 „Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego”
- N53. PN-EN 13877-2:2013-08 „Nawierzchnie betonowe – Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych”
- N54. PN-EN 13282-1:2013-07 „Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 1: Hydrauliczne spoiwa drogowe szybkowiążące – Skład, wymagania i kryteria zgodności”
- N55. PN-EN 13282-2:2015-06 „Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 2: Hydrauliczne spoiwa drogowe normalnie wiążące – Skład, wymagania i kryteria zgodności
- N56. PN-EN 13282-3:2015-06 „Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 3: Ocena zgodności”
- N57. EAD 150001-00-0301 „Calcium sulphoaluminate based cement”
- N58. EAD 150009-00-0301 „Blast Furnace Cement CEM III/A with assessment of sulfate resistance (SR) and optional with low effective alkali content (LA) and/or low heat of hydration (LH)”
- N59. Krajowa Ocena Techniczna nr IBDiM-KOT-2018/0130 wyd. 1 „Spoiwa hydrauliczne do mieszanek stosowanych na podbudowy dróg oraz do stabilizacji podłoża. Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE”

- N60. PN-EN 1536+A1:2015-08 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Pale wiercone”
- N61. PN-EN 1538+A1:2015-08 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Ściany szczelinowe”
- N62. PN-EN 12699:2015-06 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Pale przemieszczeniowe”
- N63. PN-EN 14199:2015-07 „Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Mikropale”
- N64. PN-EN 933-1:2012 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania”
- N65. PN-EN 933-3:2012 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości”
- N66. PN-EN 933-3:2012 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn – Wskaźnik kształtu”
- N67. PN-EN 933-7:2000 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie zawartości muszli – Zawartość procentowa muszli w kruszywach grubych”
- N68. PN-EN 933-8+A1:2015-07 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 8: Ocena zawartości drobnych cząstek – Badanie wskaźnika piaskowego”
- N69. PN-EN 933-9+A1:2013-07 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 9: Ocena zawartości drobnych cząstek – Badanie błękitem metylenowym”
- N70. PN-EN 933-11:2009 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 11: Klasyfikacja składników kruszywa grubego z recyklingu”
- N71. PN-EN 1097-1:2011 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw „Część 1: Oznaczanie odporności na ścieranie (mikro-Deval)”
- N72. PN-EN 1097-2:2010 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie”
- N73. PN-EN 1097-6:2013-11 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości”
- N74. PN-EN 1097-9:2014-02 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 9: Oznaczanie odporności na ścieranie abrazyjne przez opony z kolcami – Badanie skandynawskie”
- N75. PN-EN 1367-1:2007 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 1: Oznaczanie mrozoodporności”

- N76. PN-EN 1367-2:2010 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 2: Badanie w siarczenie magnezu”
- N77. PN-EN 1367-3:2002 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 3: Badanie bazaltowej zgorzeli słonecznej metodą gotowania”
- N78. PN-EN 1367-4:2010 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 4: Oznaczanie skurczu przy wysychaniu
- N79. PN-EN 1367-6:2008 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 6: Mrozoodporność w obecności soli”
- N80. PN-EN 13670:2011 „Wykonywanie konstrukcji z betonu”
- N81. PN-EN 1744-1+A1:2013-05 „Badania chemicznych właściwości kruszyw – Część 1: Analiza chemiczna”
- N82. PN-EN 1744-5:2008 „Badania chemicznych właściwości kruszyw „Część 5: Oznaczanie soli chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie”
- N83. PN-EN 1744-6:2008 „Badania chemicznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie wpływu wyciągu z kruszyw z recyklingu na początek czasu wiązania cementu”
- N84. PN-EN 12878:2014-05 „Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie – Wymagania i metody badań”
- N85. PN-EN 14488-7:2007 „Badanie betonu natryskowego – Część 7: Zawartość włókien w betonie zbrojonym włóknami”
- N86. PN-EN 12504-1:2011 „Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Próbk rdzeniowe – Pobieranie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie”
- N87. PN-EN 13791:2008 „Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych”
- N88. PN-EN 196-1:2016-07 „Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości”
- N89. PN-EN 196-2:2013-11 „Metody badania cementu – Część 2: Analiza chemiczna cementu”
- N90. PN-EN 196-3:2016-12 „Metody badania cementu – Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości”
- N91. PN-EN 196-5:2011 „Metody badania cementu – Część 5: Badanie pucolaności cementów pucolanowych”
- N92. PN-EN 196-6:2011 „Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia”

- N93. PN-EN 196-7:2009 „Metody badania cementu – Część 7: Metody pobierania i przygotowania”
- N94. PN-EN 196-8:2010 „Metody badania cementu – Część 8: Ciepło hydratacji – Metoda rozpuszczania”
- N95. PN-EN 196-9:2010 „Metody badania cementu – Część 9: Ciepło hydratacji – Metoda semiadiabatyczna”
- N96. PN-EN 196-10:2016-07 „Metody badania cementu – Część 10: Oznaczenie w cemencie zawartości chromu (VI) rozpuszczalnego w wodzie”

Materiały z następujących stron internetowych:

<http://www.wmb-giewartow.com/pliki/image/img/keramzyt.jpg>

<http://murator-dom.pl/>

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Styropian.jpg>

<http://pl.wikipedia.org/wiki/Keramzyt#mediaviewer/Plik:Hydroton.jpg>

http://pl.wikipedia.org/wiki/Pumeks#mediaviewer/Plik:Pumice_on_20_dollars.jpg

<http://www.kenalsilicafume.com>

<http://multiserw-morek.pl>

<http://warunkibudowlane.pl>

<http://www.basf-admixtures.com>

<http://knm.prz.edu.pl/ciekawe/zamkowy/index.htm>

<http://www.prefbet.pl/>

<http://www.pca.gov.pl>

<http://www.gddkia.gov.pl>

<http://www.controls-group.com>

<http://www.peri.com.pl>

