

## Załącznik 6

### Obliczenie zawartości alkaliów w betonie

#### 1. Uwagi ogólne

Recepturowe rozwiązania dotyczące doboru składników mieszanki betonowej z uwagi na zapobieganie reakcji ASR w betonie polegają na odpowiednim doborze rodzaju cementu oraz rodzaju i zawartości dodatków, dostosowanych do klasy obiektu, kategorii reaktywności kruszywa oraz kategorii środowiska. Rodzaje cementów, spełniające wymagania norm PN-EN 197-1 oraz PN-B 19707, dopuszczonych do stosowania betonie przeznaczonym na nawierzchnie drogowe lub drogowe obiekty inżynierskie, są wskazane w odpowiednich dokumentach GDDKiA: Ogólnych Specyfikacjach Technicznych lub Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB). Ograniczenia stosowania dodatków mineralnych jako dodatków typu II do mieszanki betonowej wynikają również z odpowiednich OST i WWiORB.

W celu właściwego doboru rodzaju cementu oraz rodzaju i zawartości dodatków mineralnych, zapobiegających wystąpieniu szkodliwych skutków reakcji alkalia-krzemionka (zgodnie z p.3 w zasadniczej części Wytycznych), niezbędne jest wyznaczenie całkowitej zawartości alkaliów czynnych w mieszance betonowej.

#### 2. Metoda obliczenia zawartości alkaliów w betonie

Obliczenie zawartości alkaliów w betonie odnosi się do maksymalnej zawartości alkaliów jako  $Na_2O_{eq \max}$ , dopuszczonej w określonej kategorii środowiska E, klasie obiektu S i kategorii reaktywność kruszywa R. Obliczenia powinny uwzględniać maksymalną zawartość  $Na_2O_{eq \max}$  we wszystkich składnikach mieszanki betonowej - zawartość  $Na_2O_{eq \max}$  określa maksymalną zawartość alkaliów wprowadzonych do betonu w postaci jego składników. Wartość graniczna zawartości  $Na_2O_{eq \max}$  na 1 m<sup>3</sup> betonu wg tablic nr 4-7 Wytycznych Technicznych jest zróżnicowana – wynosi 3,0; 2,4 lub 1,8 kg/m<sup>3</sup>.

Maksymalną wartość  $Na_2O_{eq \max}$  dla zawartości alkaliów w cemencie wyznacza się uwzględniając wyniki analizy statystycznej zawartości alkaliów w cementach stosowanych do produkcji mieszanki betonowej.

Dla zawartości średniej deklarowanej przez producenta dla produktu rynkowego maksymalną zawartość  $Na_2O_{eq \max}$  w cemencie oblicza się:

$$Na_2O_{eq \max} = Na_2O_{eq \text{ średnie}} \times (1+2V_c) \quad [kg/m^3],$$

gdzie:

$Na_2O_{eq \text{ średnie}}$  – średnia zawartość wszystkich alkaliów wprowadzonych do betonu w postaci jego składników,

- $Na_2O_{eq\ max}$  – maksymalna zawartość alkaliów wprowadzonych do betonu w postaci jego składników - dla zawartości alkaliów w cemencie stosuje się maksymalną wartość z analizy statycznej,
- $V_c$  – współczynnik zmienności dla zbioru zawartości alkaliów w stosowanym i proponowanym do wykorzystania w cemencie, gdzie zawartość reprezentuje produkcję za okres 3 tygodni lub dłuższy. Wykorzystuje się zbiór na podstawie analizy statystycznej próbek cementu przeprowadzonej przez producenta cementu. Jeżeli w okresie 3 lub więcej tygodni przeprowadzono więcej analiz oznaczenia zawartości alkaliów należy wybrać wartość najwyższą.

Analogiczny sposób obliczania  $Na_2O_{eq\ max}$  przyjmuje się dla wszystkich składników mieszanki betonowej. Do obliczeń przyjmuje się wartość  $Na_2O_{eq\ max}$  wyliczoną dla wartości  $Na_2O_{eq\ \text{średnie}}$  skorygowaną współczynnikiem zmienności  $V_c$  składnika.

### **3. Przykłady obliczania zawartości alkaliów w mieszankach według różnych receptur**

Przykłady obliczania zawartości alkaliów w betonie przedstawiają warianty receptur opracowane dla przypadków kategorii środowiska E2-E3 i kategorii reaktywności kruszywa R0-R1. Obliczenia uwzględniają zapisy Wytycznych Technicznych tj. dostępność alkaliów z poszczególnych składników betonu oraz metodykę obliczeń wg. p. 2 powyżej. Do przykładowych obliczeń przyjęto zawartość cementu 400 lub 420 kg/m<sup>3</sup> w mieszance betonowej, mieszczących się w przedziale najczęściej stosowanych zawartości 370-430 kg/m<sup>3</sup>. Przykładowe receptury opracowano przy jednakowym współczynniku  $w/c=0,45$ ; w przypadku stosowania dodatku typu II do betonu przy określeniu współczynnika  $w/c$  uwzględnia się współczynnik efektywności  $k$  wg PN-EN 206. Receptury uwzględniają zróżnicowane udziały składników mineralnych SCM w cemencie oraz stosowanie dodatku popiołu lotnego krzemionkowego do mieszanki jako aktywnego dodatku typu II.

#### **3.1. Receptury w przypadku kategorii środowiska E3 i reaktywności kruszywa R0 i R1**

##### **Przykład nr 1; Skład mieszanki betonowej w przypadku klasy obiektu S4 i kategorii środowiska E3 dla kruszywa niereaktywnego R0 i cementu portlandzkiego CEM I NA**

W poniższych tabelach podano przyjęty skład betonu i zawartość alkaliów w składnikach. W kolejnej tabeli podano wyniki obliczenia zawartości alkaliów w składnikach i maksymalnej zawartości alkaliów  $Na_2O_{eq\ max}$  w betonie.

### Składniki betonu

Składniki	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I NA	400
Domieszka upłynniająca	2,0
Domieszka napowietrzająca	1,6
Kruszywo	1 800
Woda	180

### Zawartość alkaliów w składnikach betonu

Składniki betonu	Średnia zawartość alkaliów [%]	Maksymalna zawartość alkaliów [%]	Współczynnik zmienności
CEM I NA	0,5	0,56	0,06*
Domieszka upłynniająca	niedostępny	0,4	niedostępny
Domieszka napowietrzająca	niedostępny	0,4	niedostępny
Kruszywo	0,0	0,0	niedostępny
Woda	niedostępny	0,00005	niedostępny
* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesiące			

### Obliczanie Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub>

Składniki betonu	Obliczenia	Zawartość alkaliów [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I	400 × 0,56 %	2,24
Domieszka upłynniająca	2,0 × 0,4 %	0,008
Domieszka napowietrzająca	1,6 × 0,4 %	0,006
Woda	180 × 0,00005 %	0,009
<b>Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> ogółem</b>		<b>2,26</b>

Maksymalna zawartość alkaliów Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> w betonie z zastosowaniem cementu CEM I NA wynosi 2,26 kg/m<sup>3</sup>.

Zawartość Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> jest niższa niż wartość maksymalna 2,4 kg/m<sup>3</sup>, dopuszczalna w kategorii środowiska E3, klasie obiektu S4 i kategorii reaktywności kruszywa R0 wg Tablicy 4 Wytycznych Technicznych.

**Przykład nr 2 Skład mieszanki betonowej w przypadku kategorii środowiska E3 i klasy obiektu S3 dla kruszywa umiarkowanie reaktywnego R1 przy zastosowaniu cementu specjalnego portlandzkiego popiołowego niskoalkalicznego CEM II/B-V NA z deklarowaną zawartością popiołu lotnego krzemionkowego 28% masy cementu**

W poniższych tabelach podano przyjęty skład betonu i zawartość alkaliów w składnikach. W kolejnej tabeli podano wyniki obliczenia zawartości alkaliów w składnikach i maksymalnej zawartości alkaliów Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> w betonie.

### Skład betonu:

Składniki betonu	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement CEM II/A-V NA	400
Domieszka upłynniająca	2,0
Domieszka napowietrzająca	1,6
Woda	180
Kruszywo	1 800

### Zawartość alkaliów w składnikach betonu

Składniki betonu		Ilość składników cementu %	Średnia zawartość alkaliów [%]	Maksymalna zawartość alkaliów [%]	Współczynnik zmienności
Cement CEM II/A-V NA	Klinkier portlandzki	67,0	0,40	0,45	0,06***
	Popiół lotny krzemionkowy	28,0	2,8*	3,14*	
	Gips	5,0	0,0	0,0	
Domieszka upłynniająca		0,5	niedostępny	0,4	niedostępny
Domieszka napowietrzająca		0,4	niedostępny	0,4	niedostępny
Woda		-	niedostępny	0,00005	niedostępny
Kruszywo		-	niedostępny	niedostępny	niedostępny

\* całkowita zawartość alkaliów w popiele  
 \*\* zawartość alkaliów stanowiąca 10% całkowitej zawartości alkaliów w popiele - alkalia wymywalne  
 \*\*\* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesięcy

### Obliczanie Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub>

Składniki betonu		Ilość składników [kg/m <sup>3</sup> ]	Obliczenia	Zawartość alkaliów [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement CEM II/A-V NA	Klinkier portlandzki	268	268 x 0,45%	1,206
	Popiół lotny krzemionkowy	112	112 x 0,314%	0,351
	Gips	20	20 x 0,0%	0,000
Domieszka upłynniająca		2,0	2,0 x 0,4%	0,008
Domieszka napowietrzająca		1,6	1,6 x 0,4%	0,006
Woda		180	180 x 0,00005%	0,000
<b>Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> ogółem</b>				<b>1,581</b>

Maksymalna zawartość alkaliów Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> w betonie z zastosowaniem cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V NA z deklarowaną zawartością popiołu lotnego krzemionkowego 28% wynosi 1,581 kg/m<sup>3</sup>. Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego jest większa niż 20% masy cementu, a zawartość Na<sub>2</sub>O<sub>eq max</sub> jest niższa niż wartość maksymalna 1,8 kg/m<sup>3</sup>, dopuszczalna w kategorii środowiska E3, klasie obiektu S3 i kategorii reaktywności kruszywa R1 wg Tablicy 5 Wytycznych Technicznych. Składniki i receptura betonu z kruszywem o kategorii reaktywności R1 spełniają wymagania Wytycznych Technicznych dla zastosowania w obiekcie klasy S3 w środowisku E3.

**Przykład nr 3 Skład mieszanki betonowej w przypadku kategorii środowiska E3 i klasy obiektu S3 dla kruszywa umiarkowanie reaktywnego R1 przy zastosowaniu cementu specjalnego portlandzkiego żużlowego niskoalkalicznego CEM II/B-S NA z deklarowaną zawartością żużla 30% masy cementu**

W poniższych tabelach podano przyjęty skład betonu i zawartość alkaliów w składnikach. W kolejnej tabeli podano wyniki obliczenia zawartości alkaliów w składnikach i maksymalnej zawartości alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie.

**Skład betonu:**

Składniki betonu	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement CEM II/B-S NA	400
Domieszka upłynniająca	2,0
Domieszka napowietrzająca	1,6
Kruszywo	1800
Woda	180

**Zawartość alkaliów w składnikach betonu**

Składniki betonu		Ilość składników [%]	Średnia zawartość alkaliów [%]	Maksymalna zawartość alkaliów [%]	Współczynnik zmienności
Cement CEM II/B-S NA	Klinkier portlandzki	66,0	0,45	0,50	0,06**
	Granulowany żużel wielkopiecowy	30,0	0,9* 0,09**	1,0 * 0,10**	
	Gips	4,0	0,0	0,0	
Domieszka upłynniająca		0,5	niedostępny	0,4	niedostępny
Domieszka napowietrzająca		0,4	niedostępny	0,4	niedostępny
Woda		0,45	niedostępny	0,00005	niedostępny

\* zawartość alkaliów stanowiąca 10% całkowitej zawartości alkaliów w żużlu  
 \*\* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesięcy

### Obliczanie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$

Składniki betonu		Ilość składnika [kg/m <sup>3</sup> ]	Obliczenia	Zawartość alkaliów [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement CEM II/B -S NA	Klinkier portlandzki	264	264 x 0,50%	1,320
	Granulowany żużel wielkopiecowy	120	120 x 0,10%	0,120
	Gips	16	18 x 0,0%	0,000
Domieszka upłynniająca		2,0	2,0 x 0,4 %	0,008
Domieszka napowietrzająca		1,6	1,6 x 0,4 %	0,006
Woda		180	180x 0,00005%	0,000
<b><math>\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}</math> ogółem</b>				1,454

Maksymalna zawartość alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie z zastosowaniem cementu portlandzkiego żużlowego specjalnego niskoalkalicznego CEM II/B-S NA wynosi 1,454 kg/m<sup>3</sup>. Zawartość granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie spełnia wymaganie zawartości minimum 30%. Jednocześnie zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  jest niższa niż wartość maksymalna 1,8 kg/m<sup>3</sup>, dopuszczalna w kategorii środowiska E3, klasie obiektu S3 i kategorii reaktywności kruszywa R1 wg Tablicy 5 Wytycznych Technicznych. Składniki i receptura betonu z kruszywem o kategorii reaktywności R1 spełniają wymagania Wytycznych Technicznych dla zastosowania w obiekcie klasy S3 w środowisku E3.

### 3.2. Receptury w przypadku kategorii środowiska E2 i reaktywności kruszywa R0 i R1

#### Przykład nr 4; Skład mieszanki betonowej w przypadku kategorii środowiska E2 i klasy obiektu S3 dla kruszywa niereaktywnego R0 z zastosowaniem cementu portlandzkiego CEM I

W poniższych tabelach podano przyjęty skład betonu i zawartość alkaliów w składnikach. W kolejnej tabeli podano wyniki obliczenia zawartości alkaliów w składnikach i maksymalnej zawartości alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie.

#### Składniki betonu

Składniki	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I	400
Domieszka upłynniająca	2,0
Domieszka napowietrzająca	1,6
Kruszywo	1 800
Woda	180

### Zawartość alkaliów w składnikach betonu

Składniki betonu	Średnia zawartość alkaliów [%]	Maksymalna zawartość alkaliów [%]	Współczynnik zmienności
CEM I	0,50	0,8	0,06*
Domieszka upłynniająca	niedostępny	0,4	niedostępny
Domieszka napowietrzająca	niedostępny	0,4	niedostępny
Kruszywo	0,0	0,0	niedostępny
Woda	niedostępny	0,00005	niedostępny
* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesiące			

### Obliczanie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$

Składniki betonu	Obliczenia	Zawartość alkaliów [ $\text{kg/m}^3$ ]
CEM I	$400 \times 0,80 \%$	3,200
Domieszka upłynniająca	$2,0 \times 0,4 \%$	0,008
Domieszka napowietrzająca	$1,6 \times 0,4 \%$	0,006
Woda	$202,5 \times 0,00005 \%$	0,000
<b><math>T_{\text{max}}</math> ogółem</b>		<b>3,214</b>

Maksymalna zawartość alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie z zastosowaniem cementu portlandzkiego CEM I wynosi  $3,214 \text{ kg/m}^3$ . Zgodnie z Tablicą 5 Wytycznych Technicznych nie ma ograniczenia zawartości alkaliów w betonie w kategorii środowiska E2, klasie obiektu S3 i kategorii reaktywności kruszywa R0. Receptura betonu z kruszywem o kategorii reaktywności R0 spełnia wymagania Wytycznych Technicznych dla zastosowania w środowisku E2 w obiekcie klasy S3, jak również w obiekcie klasy S2.

**Przykład nr 5 Skład mieszanki betonowej w przypadku kategorii środowiska E2 i klasy obiektu S3 dla kruszywa umiarkowanie reaktywnego R1 przy zastosowaniu cementu specjalnego portlandzkiego popiołowego niskoalkalicznego CEM II/B-V NA z deklarowaną zawartością popiołu lotnego krzemionkowego 25% masy cementu**

W poniższych tabelach podano przyjęty skład betonu i zawartość alkaliów w składnikach. W kolejnej tabeli podano wyniki obliczenia zawartości alkaliów w składnikach i maksymalnej zawartości alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie.

### Skład betonu:

Składniki betonu	Zawartość [ $\text{kg/m}^3$ ]
Cement CEM II/B-V NA	420
Domieszka upłynniająca	2,0
Domieszka napowietrzająca	1,6
Woda	189
Kruszywo	1 800

### Zawartość alkaliów w składnikach betonu

Składniki betonu		Ilość składników cementu %	Średnia zawartość alkaliów [%]	Maksymalna zawartość alkaliów [%]	Współczynnik zmienności
Cement CEM II/B-V NA	Klinkier portlandzki	70,0	0,50	0,56	0,06***
	Popiół lotny krzemionkowy	25,0	2,8* 0,28**	3,14* 0,314**	
	Gips	5,0	0,0	0,0	
Domieszka upłynniająca		0,5	niedostępny	0,4	niedostępny
Domieszka napowietrzająca		0,4	niedostępny	0,4	niedostępny
Woda		-	niedostępny	0,00005	niedostępny
Kruszywo		-	niedostępny	niedostępny	niedostępny

\* całkowita zawartość alkaliów w popiele  
\*\* zawartość alkaliów stanowiąca 10% całkowitej zawartości alkaliów w popiele  
\*\*\* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesięcy

### Obliczanie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$

Składniki betonu		Ilość składników [kg/m <sup>3</sup> ]	Obliczenia	Zawartość alkaliów [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement CEM II/B-V NA	Klinkier portlandzki	294	294 x 0,56	1,646
	Popiół lotny krzemionkowy	105	105 x 0,314	0,330
	Gips	21	21 x 0,0%	0,000
Domieszka upłynniająca		2,0	2,0 x 0,4 %	0,008
Domieszka napowietrzająca		1,6	1,6 x 0,4 %	0,006
Woda		189	189 x 0,00005%	0,000
<b><math>\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}</math> ogółem</b>				<b>1,99</b>

Maksymalna zawartość alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie z zastosowaniem cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V NA z deklarowaną zawartością popiołu lotnego krzemionkowego 25% wynosi 1,99 kg/m<sup>3</sup>. Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego jest większa niż 20% masy cementu. Jednocześnie zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  jest niższa niż wartość maksymalna 2,4 kg/m<sup>3</sup>, dopuszczalna w kategorii środowiska E2, klasie obiektu S3 i kategorii reaktywności kruszywa R1 wg Tablicy 5 Wytycznych Technicznych. Składniki i receptura betonu z kruszywem o kategorii reaktywności R1 spełniają wymagania Wytycznych Technicznych dla zastosowania w obiekcie klasy S3 w środowisku E2.



**Przykład nr 6; Skład mieszanki betonowej w przypadku kategorii środowiska E2 i klasy obiektu S2 dla kruszywa reaktywnego R1 przy zastosowaniu cementu portlandzkiego CEM I oraz aktywnego dodatku mineralnego typu II - popiołu lotnego krzemionkowego**

W poniższych tabelach podano przyjęty skład betonu i zawartość alkaliów w składnikach. W kolejnej tabeli podano wyniki obliczenia zawartości alkaliów w składnikach i maksymalnej zawartości alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie.

**Składniki betonu**

Składniki	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I	336
Popiół lotny krzemionkowy	84
Domieszka upłynniająca	3,0
Domieszka napowietrzająca	1,6
Kruszywo	1 800
Woda	166

**Zawartość alkaliów w składnikach betonu**

Składniki betonu	Średnia zawartość alkaliów [%]	Maksymalna zawartość alkaliów [%]	Współczynnik zmienności
CEM I	0,80	0,896	0,06*
Popiół lotny krzemionkowy	2,8* 0,28**	3,14* 0,314**	0,06*
Domieszka upłynniająca	niedostępny	0,4	niedostępny
Domieszka napowietrzająca	niedostępny	0,4	niedostępny
Kruszywo	0,0	0,0	niedostępny
Woda	niedostępny	0,00005	niedostępny

\* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesięcy  
 \*\* zawartość alkaliów stanowiąca 10% całkowitej zawartości alkaliów w popiele  
 \*\*\* wartości z analizy statystycznej producenta cementu za okres 3 miesięcy

**Obliczanie  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$**

Składniki betonu	Obliczenia	Zawartość alkaliów [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I	$336 \times 0,896 \%$	3,011
Popiół lotny krzemionkowy	$84 \times 0,314$	0,264
Domieszka upłynniająca	$3,0 \times 0,4 \%$	0,012
Domieszka napowietrzająca	$1,6 \times 0,4 \%$	0,006
woda	$166 \times 0,00005 \%$	0,000
<b><math>\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}</math> ogółem</b>		<b>3,293</b>

Maksymalna zawartość alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  w betonie z zastosowaniem cementu CEM I i dodatkiem typu II w postaci popiołu lotnego krzemionkowego wynosi 3,293 kg/m<sup>3</sup>. Zawartość  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq max}}$  jest większa niż wartość maksymalna 3,0 kg/m<sup>3</sup>, dopuszczalna w kategorii środowiska E2, klasie obiektu S2 i kategorii reaktywności kruszywa R1 wg

Tablicy 6 Wytycznych Technicznych. Mieszanka nie spełnia wymagania odnośnie maksymalnej zawartości  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  w  $1 \text{ m}^3$  betonu.

Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego wynosi 20% w łącznej masie cementu i popiołu i spełnia warunek graniczny zawartości minimalnej w kategorii środowiska E2, klasie obiektu S2 i kategorii reaktywności kruszywa R1.