

Voorzet voor de classificatie van alkali geactiveerde bind- middelen voor beton

TNO 2023 R10958 – 23 mei 2023

Voorzet voor de classificatie van alkali geactiveerde bind-middelen voor beton

Auteurs	Dr. T.G. Nijland
Rubricering rapport	TNO Intern
Titel	TNO Intern
Rapporttekst	TNO Intern
Aantal pagina's	16 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnaam	Proeftuin geopolymere constructief
Projectnummer	060.50750

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

› CONCEPT ‹

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
1 Inleiding	4
2 Begrippenlijst.....	6
3 Achtergrondinformatie.....	7
4 Voorstel tot classificatie	11
5 Referenties	14
5.1 Normen	14
5.2 Overige literatuur	14

CONCEPT

1 Inleiding

In het streven naar verduurzaming van de bouwsector met onder meer een lagere CO₂ voetafdruk, wordt door producenten en aannemers geïnnoveerd met (aard)alkali geactiveerde bindmiddelen voor beton als alternatief voor traditionele cementen conform NEN-EN 197-1:2011. Deze nieuwe bindmiddelen zijn dan ook niet gedefinieerd in deze of een andere Europese norm. In Nederland bestaat wel een nationale beoordelingsrichtlijn voor geopolymeerbeton (BRL 5077:2017), maar dit richt zich op het Besluit Bodemkwaliteit (BSB) en bevat geen classificatie van de samenstelling waarvoor deze richtlijn geldt.

Voor toepassing van deze alternatieve bindmiddelen in gewapend beton kunnen de vereiste prestaties vanuit het Bouwbesluit niet vanzelfsprekend worden onderbouwd middels de huidige normen voor beton: NEN-EN 206 + NEN 8005:2017. Dit geldt overigens ook voor verschillende cementen die *wel* opgenomen zijn in NEN-EN 197-1:2011 of NEN-EN 197-1:2018 Ontw. en enkele traditionele cementen die afgedekt zijn door een eigen norm zoals supergesulfateerd cement (NEN-EN 15745-A1:2015) en calciumalumaat cement (NEN-EN 14647:2005); dit ondanks dat beiden in het verleden voor gewapend beton gebruikt zijn.

Voor de alternatieve bindmiddelsamenstellingen zijn de huidige normen niet gevalideerd. Met de nieuwe bindmiddelen bestaat geen lange termijn ervaring, zoals bij conventionele betonmengsels. Daardoor is niet (op voorhand) zeker of de standaardrelaties tussen (mechanische) eigenschappen die de basis zijn voor de constructieve beoordeling van betonconstructies opgaan en evenmin of de wijze van beoordelen van de duurzaamheid (Eng.: 'durability') van alternatieve betonmengsels conform CROW-CUR-Aanbeveling 48:2022 voor deze mengsels alle relevante aspecten afdekt. Het evalueren van de bestaande ervaringen wordt ook nog eens gehinderd door het feit dat vaak onduidelijk is wat in specifieke gevallen onder alkalisch geactiveerde bindmiddelen wordt verstaan.

Om die redenen heeft Rijkswaterstaat TNO gevraagd een proeftuin met constructieve toepassingen van beton op basis van (aard)alkalisch geactiveerde bindmiddelen zonder Portland klinker te monitoren gedurende vijf jaar; hierbij gaat het zowel om mechanische als duurzaamheidsaspecten. Deze proeftuin is een vervolg op een eerdere proeftuin waarin ongewapende toepassingen van dergelijke betonsoorten gedurende een jaar gemonitord zijn (Nijland & Dijkmans 2021).

Bij constructieve betontoepassingen worden de constructieve veiligheid en duurzaamheid normaal getoetst aan de hand van rekenregels en beproevingen op kleinere schaal. Beiden gaan uit van het voorspellend vermogen voor wat betreft de prestaties van beton op korte en lange termijn onderhavig aan de belastingen in een specifieke toepassing. Er is consensus over de validatie (o.a. door lange termijn ervaring) en het gebruik van deze rekenregels en (kleinschalige) beproevingen voor specifieke betonsoorten op basis van traditionele cementen. Vandaar dat bandbreedtes van (standaard) betonsamenstellingen worden gespecificeerd voor de toepasbaarheid van de relevante normen. Het Bouwbesluit staat daarnaast toe om de gelijkwaardigheid van prestaties aan te tonen wanneer handvatten zoals voorspellende rekenregels en beproevingen (nog) niet gevalideerd zijn. Dit is ook het geval in de huidige proeftuin.

De consequentie hiervan is echter, dat bij elke kleine verandering in (mengsel)samenstelling, -zowel op bindmiddel- als betonnivo-, en elke verandering in productiewijze en/of toepassing het mengsel opnieuw beproefd dient te worden op relevante schaal (validatie schaaufactoren), voor een relevante spreiding (validatie onzekerheidsfactoren) en voor een relevante tijdsduur (validatie voorspellend vermogen (levensduur) beproevingen en modellen). Dit heeft evidente nadelen qua doorlooptijd etc.

Opdat de ervaringen die in de proeftuin opgedaan zullen worden, gebruikt kunnen worden voor het beoordelen van nieuwe betonsoorten in andere projecten, is het dus noodzakelijk dat het mogelijk is eenduidig te kunnen vast stellen dat de dergelijke betonmengsels vergelijkbaar zijn. Dit binnen een redelijke bandbreedte. Een omschrijving vergelijkbaar met die van traditionele betonmengsels is daarvoor essentieel.

Voor een belangrijk deel kan dit op dezelfde wijze gebeuren als bij traditionele betonmengsels. Dit geldt voor type en gehalten aan fijne en grove toeslag, vulstoffen, water/bindmiddelfactor en bindmiddelgehalte. Het geldt echter niet voor de gebruikte bindmiddelen. Een classificatie zoals in NEN-EN 197-1:2011 c.q. NEN-EN 197-1:2018 Ontw. is daarom wenselijk. In dit rapport wordt een eerste voorzet gedaan om tot een dergelijke classificatie te komen. **Deze classificatie is nadrukkelijk alleen bedoeld om voor de proeftuin tot een bruikbare indeling te komen en niet als voorzet voor een richtlijn, aanbeveling of norm.**

Het bevat eerst een begrippenlijst (hoofdstuk 2), dan beknopt relevante achtergrond-informatie (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 wordt vervolgens een voorstel voor classificatie gedaan. Dit is bedoeld als voorzet voor discussie. Er volgt daarom geen conclusie.

) CONCEPT \

2 Begrippenlijst

Activator – Component van het bindmiddelmengsel bedoeld om de overige grondstoffen in oplossing te brengen.

Alkali activatie – Mechanisme waarbij een hoofdzakelijk uit reactief Al-Si bestaand (mengsel van) precursors door een alkalische stof in oplossing wordt gebracht waarna het verhardt. Alkalische activatoren zijn onder andere NaOH, natriumwaterglas, KOH, kaliumwaterglas, Na_2CO_3 en Na_2SO_4 .

Bindmiddel – Elk bindmiddel dat de rol van cement in beton vervult, zoals hydraulische kalk, tras-kalk, alkali en/of sulfaat geactiveerde bindmiddelen ('geopolymere'), etc.

Cement – Cement conform NEN-EN 197-1:2011, NEN-EN 197-1:2018 Ontw., NEN-EN 14647:2005 of NEN-EN 15745-A1:2015.

Fijne fractie gerecycleerd beton – Gerecycleerde fijne fractie uit schoon betonpuin (Eng.: 'recycled concrete fines') conform NEN-EN 197-6:2022 Ontw. Aanduiding in NEN-EN 197: **F**. De reactiviteit van deze fijne fractie is niet verhoogd door thermische en/of chemische behandeling.

Gecalcineerde natuurlijke puzzolanen - Gecalcineerde natuurlijke puzzolanen conform NEN-EN 197-1:2011, i.e. verkregen door calcinatie van natuurlijke grondstoffen zoals klei. Aanduiding in NEN-EN 197: **Q**.

Hoogovenslak – Hoogovenslak conform NEN-EN 197-1:2011 alsmede kunstmatige hoogovenslak verkregen door het opsmelten van geschikte grondstoffen, mits vergelijkbaar in chemische samenstelling en gehalte aan amorf met traditionele hoogovenslak afkomstig van de ijzerproductie in hoogovens. Aanduiding in NEN-EN 197: **S**.

Hulpstoffen – Hulpstoffen conform NEN-EN 197-1:2011, exclusief activatoren.

Kalksteenmeel – Kalksteenmeel conform NEN-EN 197-1:2011. Aanduiding in NEN-EN 197: **L**.

Natuurlijk puzzolaan – Natuurlijke puzzolanen conform NEN-EN 197-1:2011, zoals tras, andere vulkanische glassoorten, diatomeeënaarde, etc. Ontw. Aanduiding in NEN-EN 197: **P**.

Silica fume – Silica fume conform NEN-EN 197-1:2011. Ontw. Aanduiding in NEN-EN 197: **D**.

Vliegas – Vliegas conform NEN-EN 197-1:2011, afkomstig van de verbranding van steenkool. Ontw. Aanduiding in NEN-EN 197: **V** voor silicarijke vliegas, **W** voor calciumrijke vliegas. In Nederland is silicarijke vliegas gangbaar.

3 Achtergrondinformatie

Figuur 3.1 toont de classificatie van traditionele cementen zoals voorgesteld in NEN-EN 197-1:2018 Ontw. De afgelopen jaren zijn in de literatuur verschillende voorstellen gedaan voor classificatie van alkali geactiveerde bindmiddelen. Het moge duidelijk zijn dat de classificaties van alkali geactiveerde bindmiddelen die tot nu toe zijn voorgesteld daarmee niet te vergelijken zijn (m.u.v. de Oekraïense norm; zie hieronder). Zij zijn meestal gebaseerd op (veronderstelde) reactiemechanismen en gevormde reactieproducten. Voorbeelden worden gegeven in figuur 3.2 en 3.3. Hoe waardevol ook om inzicht te verkrijgen in de relatie tussen grondstoffen en verhardingsmechanisme, zijn ze niet geschikt voor het definiëren van betonmengsels. Ze laten daarvoor nog te veel bandbreedte toe, zijn niet eenduidig en laten activatortype buiten beschouwing.

In de voormalige Sovjet-Unie, met name Oekraïne, gaat onderzoek naar en toepassing van alkali geactiveerde bindmiddelen terug tot de jaren vijftig van de vorige eeuw. Een indeling die op basis van die ervaring een relatie legt met grondstoffen, wordt gegeven in figuur 3.4. De Oekraïense norm DSTU B V.2.7-181:2009 geeft een indeling die qua opzet vergelijkbaar is met NEN-EN 197-1:2011 voor traditionele cementen (Fig. 3.5). Merk overigens op dat deze alkalische cementen in bijna alle gevallen nog Portland klinker bevatten en de activator beperkt is tot niet-sulfaten. In andere landen waar op enig significante schaal beton op basis van alkali geactiveerde bindmiddelen wordt toegepast, zoals Australië, is men nog niet gekomen tot een dergelijke indeling en wordt een op prestatie gebaseerde richtlijn gehanteerd (Shayan 2016). Deze bevat geen classificatie van mengsels en stuit daarom op dezelfde bezwaren die al in de inleiding (hoofdstuk 1) genoemd zijn.

Table 1 — The 39 products in the family of common cements

Main types	Notation of the 39 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass ^{a)})											Minor additional constituents
			Main constituents											
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone			
	natural	natural calcined				siliceous	calca-reous							
	Type name	Type notation	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Portland-limestone cement	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

Main types	Notation of the 39 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass ^{a)})											Minor additional constituents
			Main constituents											
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone			
	natural	natural calcined				siliceous	calca-reous							
	Type name	Type notation	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL		
	Portland-composite cement ^c	CEM II/A-M	80-88	<----- 12-20 ----->									0-5	
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->									0-5	
		CEM II/C-M (S-P)	50-64	16-44	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/C-M (S-V)	50-64	16-44	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/C-M (S-L)	50-64	16-44	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/C-M (S-LL)	50-64	16-44	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/C-M (P-L)	50-64	-	-	16-44	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/C-M (P-LL)	50-64	-	-	16-44	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/C-M (V-L)	50-64	-	-	-	-	16-44	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/C-M (V-LL)	50-64	-	-	-	-	16-44	-	-	-	6-20	0-5	
CEM III	Blast furnace cement	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	Pozzolanic Cement ^c	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->						-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->						-	-	-	0-5
CEM V	Slag-pozzolanic cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5	
CEM VI	Composite cement ^c	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	

Fig. 3.1. Nieuwe indeling van traditionele cementen in NEN-EN 197-1:2018 Ontw.

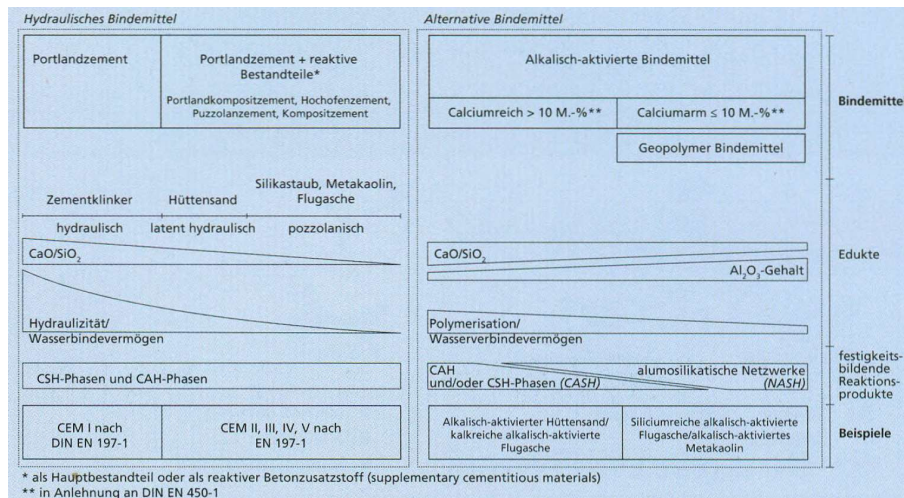


Fig. 3.2. Voorstel tot classificatie van alkali geactiveerde bindmiddelen van Hermann et al. (2015).

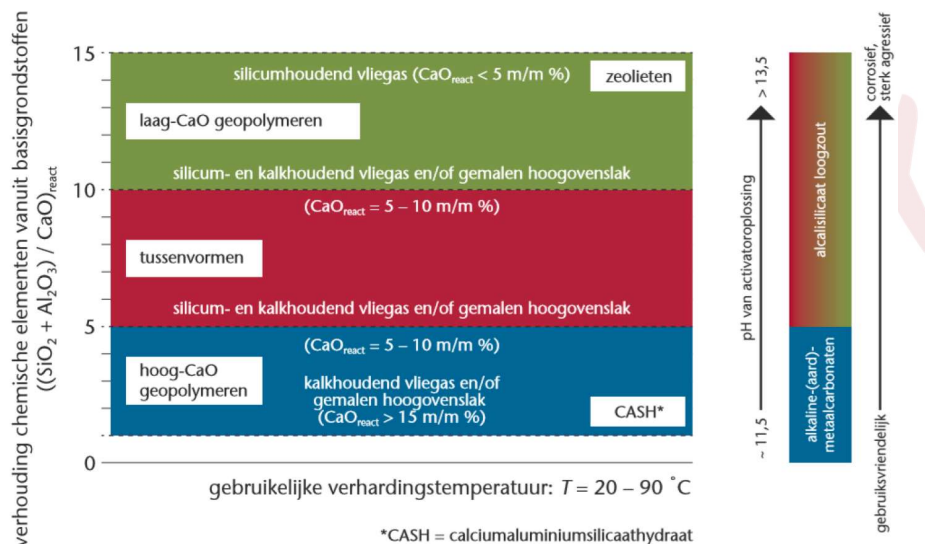


Fig. 3.3. Voorstel tot classificatie van alkali geactiveerde bindmiddelen van Vermeulen & De Vries (2015).

Cement type	Initial solid phase	Alkali content (calculated as R_2O), %	Hydration product
OPC	OPC clinker	< 0.6	0% 100%
Alkaline OPC	OPC clinker+ R_2O	1-5	
Blended alkaline OPC	OPC clinker+ additive (slag, ash, basalt, red mud) + Me_2O	2-5	
Alkali-activated slag cement	Metallurgical slag+ R_2O	4-8	
Alkali-activated ash cement	Ash - product of coal combustion	5-10	
Geocement	Clay+ R_2O	10-20	

Fig. 3.4. Classificatie van traditioneel Portland cement tot alkali geactiveerde bindmiddelen volgens Krivenko (2017).

Alkaline cement type			Content, % by mass				Alkali metal compounds (sodium or potassium)
			Aluminosilicate component				
			Granulated blast-furnace slag	OPC clinker	Fly ash	Basalt	
ACEM I	Slag alkaline cement	ACEM I	90–100	0–10	—	—	1.5–12
	Slag alkaline cement with additive of fly ash	ACEM I–3	55–90	0–10	10–35	—	1.5–12
ACEM II	Alkaline portland cement	ACEM II	—	100	—	—	1.5–12
ACEM III	Alkaline pozzolan cement	ACEM III–3	20–64		36–80	—	1.5–12
		ACEM III-B	↔		—	36–80	1.5–12
ACEM IV	Alkaline slag portland cement	ACEM IV	36–89	11–64	—	—	1.5–12
ACEM V	Alkaline composite cement	ACEM V	30–50	5–10	40–65	—	1.5–12

Fig. 3.5. Classificatie van alkalische cementen volgens de Oekraïense standaard DSTU B V.2.7-181:2009.

4 Voorstel tot classificatie

De voorgestelde classificatie is vooralsnog uitsluitend gebaseerd op te verwachten variaties in samenstellingen op dit moment in de markt en niet bij voorbaat op te verwachten vergelijkbare of afwijkende prestaties. De classificatie volgt zoveel mogelijk de systematiek van NEN-EN 197-1:2018 Ontw. Uitgangspunten voor een mogelijke classificatie zijn:

- De gebruikte Al-Si grondstoffen – In potentie zijn hier veel kandidaten voor (b.v. Petropavlovsky 1994). Hier wordt uitgegaan van de thans meest gangbare: hoogovenslak (S), vliegas (V voor silicarijke vliegas, W voor calciumrijke vliegas) en gecalcineerde klei (Q, vooralsnog metakaolien).
 - Los van de hoofdcomponenten is 0-5 m/m% bijmenging mogelijk, net als bij traditionele cementen.
 - Kalksteenmeel wordt beschouwd als niet reactieve vulstof en dient als zodanig opgevoerd te worden in het betonmengsel.
- Type activatie: loog of waterglas (Na, K), sulfaat (Na, Ca), carbonaat (Na) of gemengd.
- De doseringen van de componenten, met uitzondering van de activatoren.

Dit principe wordt hieronder uitgewerkt voor de verwachte samenstellingen. Indien in de proeftuin andere combinaties toegepast zullen worden, zal de classificatie worden uitgebreid.

Naamgeving:

- In plaats van CEM voor cement wordt hier AB ('activated binder') gehanteerd. Daarna volgt een aanduiding voor de grondstoffen (Tabel 1).
 - AB-SV – mengsel van hoogovenslak en (siliciumrijk) vliegas
 - AB-SV/A 0-35 m/m% hoogovenslak, 65-100 m/m% vliegas
 - AB-SV/B 35-64 m/m% hoogovenslak, 36-65 m/m% vliegas
 - AB-SV/C 64-80 m/m% hoogovenslak, 20-36 m/m% vliegas
 - AB-SV/D 81-100 m/m% hoogovenslak, 0-19 m/m% vliegas
 - AB-SF – mengsel van hoogovenslak met fijne fractie uit gerecycleerd beton. NEN-EN 197-6:2022 Ontw. gaat uit van max. 20 m/m% vervanging in traditionele cementen. Het lijkt vooralsnog niet waarschijnlijk dat het in -geactiveerde bindmiddelen hoger zal zijn, derhalve:
 - AB-SF/D 81-100 m/m% hoogovenslak, 0-19% fijne fractie betonpuin.
 - AB-Q – mengsel met gecalcineerde natuurlijke puzzolaan
 - AB-Q/D 100 m/m% metakaolien.
- Vervolgens wordt een letter voor het type activatie toegevoegd: AB-SF/A-X, waarin X vervangen wordt door (Tabel 2):
 - Na_L – activatie met natronloog.
 - Na_W – activatie met natriumwaterglas.
 - Na_C – activatie met natriumcarbonaat.
 - Na_S – activatie met natriumsulfaat.
 - K_L – activatie met kaliloog.
 - K_W – activatie met kaliumwaterglas.
 - C_S – activatie met calciumsulfaat.
 - M – gemengde activatie, aan te geven door combinatie van de relevante aanduidingen.

Tabel 1. Voorgestelde classificatie (in %) van geactiveerde bindmiddelen in het kader van de proeftuin op basis van componenten, zonder de activator aanduiding. Zie hiervoor tabel 2.

	Type		Hoogoven- slak	Natuurlijk puzzolaan		Vliegas		Gerecycleerde fijne fractie	Kalksteen	Ondergeschikte Aanvullende bestanddelen
				Natuurlijk	Gecalcineerd	Si-rijk	Ca-rijk			
			S	P	Q	V	W	F	L	
AB	Slak-vliegas	AB-SV/A	0-35			65-100				0-5
		AB-SV/B	35-64			36-65				0-5
		AB-SV/C	64-80			20-36				0-5
		AB-SV/D	81-100			0-19				0-5
	Slak-gerecycleerde fijne fractie	AB-SF/D	81-100					0-19		0-5
	Gecalcineerde klei	AB-Q/D			95-100					0-5
	Eventueel toe te voegen klassen (zie tekst)									

Tabel 2. Voorgestelde classificatie van activatoren in het kader van de proeftuin, toe te voegen aan de aanduiding op basis van componenten.

Activator	Type			
Basis	Loog	Waterglas	Carbonaat	Sulfaat
Na	Na _L	Na _W	Na _C	Na _S
K	K _L	K _W		
Ca				Ca _S
M (gemengd)	Combinatie van relevante aanduidingen			

Kanttekeningen:

- Zoals reeds opgemerkt is de classificatie beperkt tot de verwachte samenstellingen. Bij samenstelling op basis van andere componenten meer dan 5 % dient de pilot eigenaar deze op te geven opdat de classificatie kan worden uitgebreid.
- De grenzen aan de grondstoffen zijn noch door ervaring noch door onderzoek onderbouwd. Ze zijn pragmatisch gekozen op basis van de NEN-EN 197 serie.
- Er is geen goed beeld welke doseringen van activatoren marktpartijen hanteren, noch wat op grond van prestatie relevante grenswaarden voor klassen zouden kunnen zijn. Daarom is er geen aanvullende indeling op basis daarvan gemaakt. Een analyse van literatuurgegevens (zoals b.v. appendix 1 in Rossi et al. 2022) is wellicht zinnig. Overwogen kan worden de silica modulus van de activator te laten specificeren.
- Activatie met alleen Ca(OH)_2 zoals in het verleden in supergesulfateerde cementen gebeurde, wordt buiten beschouwing gelaten. Mocht dit in de praktijk wel gebeuren, dan kan overwogen worden deze toe te voegen.
- Er zijn geen aparte klassen geïntroduceerd voor hybride bindmiddelen. Dit zijn de factomengsels van meerdere bindmiddelen net zoals bij traditioneel beton bijvoorbeeld een mengsel van CEM I + CEM III/B. Zij kunnen op dezelfde wijze aangeduid worden, bijvoorbeeld CEM I + AB-SV/B-Na.

CONCEPT

5 Referenties

5.1 Normen

BRL 5077:2017. Nationale Beoordelingsrichtlijn Voor het NL-BSB® productcertificaat voor - vooraf vervaardigde geopolymeerbeton producten - geopolymeerbeton voor ter plaatse gestorte producten.

CROW-CUR Aanbeveling 48:2022. Procedures, criteria en beproevingsmethoden voor de toetsing van de geschiktheid van nieuwe cementen voor toepassing in beton en voor de gelijkwaardige prestatie van beton met vulstoffen. 3^e herziene druk.

DSTU B V.2.7-181:2009. Alkaline cements. Technical conditions.

NEN-EN 197-1:2011. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.

NEN-EN 197-1:2018. Ontw. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.

NEN-EN 197-6:2022. Ontw. Cement - Part 6: Cement with recycled building materials.

NEN-EN 206 + NEN 8005:2017. Concrete - Specification, performance, production and conformity + Dutch supplement to NEN-EN 206+A1.

NEN-EN 14647:2005. Calcium aluminate cement - Composition, specifications and conformity criteria.

NEN-EN 15743:2010+A1:2015. Supersulfated cement - Composition, specifications and conformity criteria

5.2 Overige literatuur

Herrmann, A., König, A. & Dehn, F., 2015. Vorschlag zur Klassifizierung von alkalisch-aktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln. Beton (7/8):390-394.

Krivenko, P., 2017. Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. Journal of Ceramic Science and Technology 8:323-334.

Nijland, T.G. & Dijkmans, T.J.A., 2021. Proeftuin Geopolymeren: Monitoring van tien pilots met geopolymeer beton gedurende het eerste gebruiksjaar en duurzaamheidskenmerken. TNO rapport 2021-R-12402.

Petropavlovsky, O.N., 1994. Slag alkaline binding systems: Basic materials, properties, technology and preparation. In: Krivenko, P.V., ed., Proceedings of the 1st International Conference Alkaline Cements and Concretes. VIPOL, Kiev, 2:761-788.

Rossi, L., Miranda de Lima, L., Sun, Y., Dehn, F., Provis, J.L., Ye, G. & Schutter, G. de, 2022. Future perspectives for alkali-activated materials: From existing standards to structural applications. RILEM Technical Letters 7:159-177

Shayan, A., 2016. Specification of geopolymer concrete: General guide. Austroroads Research Report AP-R531-16, 18 pp.

Vermeulen, E. & Vries, P. de, 2015., De uitdagingen van geopolymeerbeton. Betoniek 12:20-27.

› CONCEPT ‹

CONCEPT

Mobility & Built Environment

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
www.tno.nl