

Aantasting door sulfaten

Een typische vorm van chemische aantasting van beton is de inwerking van sulfaten. De aantasting wordt in de meeste gevallen veroorzaakt door de vorming van expansief ettringiet, uit een reactie van sulfaat met het cementhydratatieproduct C3A-hydraat. Sulfaten komen voor in zeewater, rioleringen, mestkelders en de bodem. Welke cementen hebben een hoge bestandheid tegen sulfaten? Hoe wordt beton beschermd tegen sulfaataantasting?

Vorming van ettringiet

Het hoofdbestanddeel van cement is portlandcementklinker, die verschillende chemische verbindingen bevat, waaronder verschillende klinkermineralen. Een specifiek klinkermineraal is de verbinding tussen kalk en aluminium. Dit klinkermineraal heet tricalciumaluminaat, kortweg C3A. Het C3A reageert onstuimig met water. Als dit zou worden toegelaten, is de betonspecie niet verwerkbaar. Daarom worden tijdens het malen van cement enkele procenten sulfaat in de vorm van natuurlijk gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) of anhydriet (CaSO_4) toegevoegd. Dit wordt een 'de bindtijd regelende toeslag' genoemd.

Het C3A reageert in contact met water en het gips of anhydriet tot ettringiet, die zich als een coating op het oppervlak van de cementkorrels vormt. Deze reactie heeft expansie of volumevergroting tot gevolg. Dit is geen probleem, omdat in deze fase van de verharding (de dormante periode) volumeverandering nog onbelemmerd kan optreden. Deze vroege vorming van ettringiet noemt men ook wel primaire ettringietvorming.

De aantasting van beton door sulfaten wordt in de meeste gevallen veroorzaakt door de vorming van ettringiet in het verharde beton, die al maanden of zelfs jaren oud is. Deze ettringietvorming noemt men wel secundaire ettringietvorming (SEV). Bij de sulfaataantasting van beton door SEV moet onderscheid worden gemaakt tussen externe sulfaataantasting (ESA) en interne sulfaataantasting (ISA).



Gebouw Cementrum
Sint Teunislaan 1
5231 BS 's-Hertogenbosch
Postbus 3532
5203 DM 's-Hertogenbosch

t. 073 640 12 31

f. 073 640 12 84

info@cementenbeton.nl

www.cementenbeton.nl

Externe sulfaataantasting (ESA)

Deze vorm van aantasting van beton wordt veroorzaakt door de chemische reactie tussen de met sulfaten verzadigde grond of het (grond)water en de cementsteen. Afhankelijk van de chemische reactie wordt de schade bij ESA gekenmerkt door:

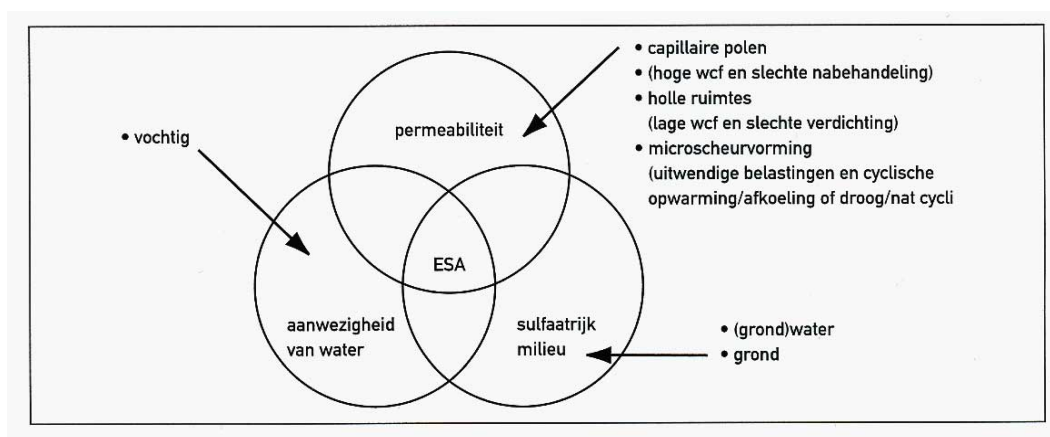
- scheurvorming veroorzaakt door secundaire ettringietvorming;
- sterkteverlies veroorzaakt door de vorming van:
 - gips;
 - thaumasiet bij lage temperaturen (< 5 °C), dit noemt men 'thaumasiet sulfaataantasting (TSA)';
 - silicahydraten door de sulfaten uit zeewater, dit noemt men 'aantasting door zeewater'.

Externe sulfaataantasting kan alleen optreden als aan de volgende randvoorwaarden wordt voldaan (figuur 1):

- hoge permeabiliteit van het beton;
- milieu met veel sulfaten;
- aanwezigheid van water.

Waar sulfaten in het milieu in contact komen met beton, alsmede de invloed van de samenstelling van het cement op ESA en de permeabiliteit van het beton in relatie tot het type cement, wordt hieronder nader toegelicht.

Figuur 1 Condities waaronder externe sulfaataantasting (ESA) kan optreden



Sulfaten in het milieu

In Nederland kunnen betonconstructies zich in milieus bevinden waar de mogelijkheid van sulfaataantasting aanwezig is. Sulfaten komen voor in de volgende milieus:

- zeewater, vooral zeewater bevat een aanzienlijke concentratie sulfaten;
- rioolsystemen, bij aanwezigheid van zwavelhoudende verbindingen (onder meer zwavelwaterstof uit het rottingsproces van organische stoffen) kunnen sulfaten worden gevormd;
- mestkelders, in de mest van runderen en pluimvee kunnen grote hoeveelheden sulfaten aanwezig zijn;
- specifieke situaties waarbij met de aanwezigheid van sulfaten moet worden gerekend, dit zijn bijvoorbeeld plaatsen waar veel met kunstmest wordt gewerkt zoals de glastuinbouw of sulfaten uit bouw- en sloopafval (gipsafval);
- bodem, in de bodem kunnen verhoogde concentraties sulfaten voorkomen.

Niet alleen de aanwezigheid van sulfaten is belangrijk, maar vooral ook de concentratie waarin de sulfaten in het milieu voorkomen is bepalend of er gevaar voor sulfaataantasting is.

Voor de sulfaatconcentraties in grondwater en (luchtdroge) grond is in NEN-EN 206-1 een indeling naar de mate van agressiviteit vastgelegd (tabel 1).

Tabel 1 Agressiviteit van sulfaatconcentraties volgens NEN-EN-206¹

Agressiviteit	Milieuklasse volgens NEN-EN 206-1	Sulfaatconcentratie grondwater SO ₄ ²⁻ mg/l	Sulfaatconcentratie grond SO ₄ ²⁻ mg/kg
licht	XA1	200 - 600	2000 - 3000 ²
matig	XA 2	600 - 3000	3000 ² - 12000
sterk	XA 3	3000 - 6000 ³	12000 - 24000 ³

¹⁾ Bepaling van de sulfaatconcentraties van grondwater en grond conform EN 196-2.

²⁾ De 3000 mg/kg limiet moet worden verlaagd tot 2000 mg/kg in geval van het risico van accumulatie van sulfaat-ionen als gevolg van droog/nat cycli of capillaire opzuiging.

³⁾ Voor nadere informatie, in geval de maximale sulfaatconcentraties worden overschreden, wordt verwezen naar het informatieblad 'Bestandheid van beton tegen chemische aantasting'

C3A-gehalte en sulfaatbestandheid van cement

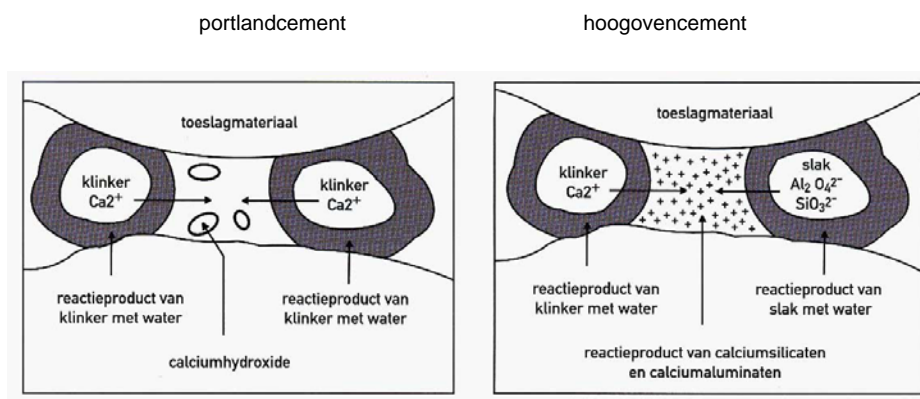
De tweede voorwaarde waaraan moet worden voldaan wil schadelijke ettringietvorming kunnen optreden, is de aanwezigheid van C3A-hydraat in verharde cementsteen. Hierbij speelt de cementsoort een belangrijke rol. Beton met portlandcement (CEM I) is over het algemeen gevoelig voor sulfaataantasting. De gevoeligheid vermindert naarmate het C3A-gehalte afneemt. Portlandcementen met een C3A-gehalte van 3% of minder gelden als sulfaatbestand. Deze cementen worden als C3A-arme of C3A-vrije portlandcementen op de markt gebracht. Een nadeel is echter dat beton gemaakt met een C3A-arm cement een betrekkelijk lage weerstand heeft tegen indringing van chloriden. Indien een dergelijk beton wordt toegepast in situaties waarbij ook de chlorideconcentratie aanzienlijk is, zoals in zeewater, is dit gevoelig voor corrosie van de wapening. Een zeer goed alternatief is het toepassen van hoogovencement (CEM III). Naast portlandcementklinker bevat hoogovencement, zoals de naam al aangeeft, het hoofdbestanddeel hoogovenslak. De sulfaatbestandheid van cementen op basis van portlandcementklinker en hoogovenslak hangt af van de mengverhouding en van de afzonderlijke eigenschappen van beide bestanddelen. Diverse onderzoeken en vele praktijktoepassingen hebben aangetoond dat hoogovencement met een voldoende hoog gehalte aan hoogovenslak ongevoelig is voor sulfaataantasting. De reden hiervoor is tweeledig:

- enerzijds wordt door vermindering van de portlandcementklinker simpelweg het gehalte aan C3A verlaagd;
- anderzijds - en dat is in feite de belangrijkste reden - neemt door de reactieproducten van hoogovenslak de dichtheid van het beton enorm toe.

Binnendringen van sulfaten in beton

Sulfaten kunnen pas reageren met C3A wanneer zij het beton zijn binnengedrongen. Toepassing van hoogovencement verhoogt de dichtheid van de poriënstructuur van de cementsteen in belangrijke mate. De hogere dichtheid van de cementsteen van hoogovencement wordt toegeschreven aan het feit dat in het poriewater tussen een portlandklinkerdeeltje en een hoogovenslakdeeltje een extra reactieproduct wordt gevormd. Dit wordt veroorzaakt doordat een surplus aan kalk (vanuit de portlandcementklinker) in het poriewater reageert met aluminaat- en silicaatverbindingen vanuit de hoogovenslakdeeltjes. Door deze reactie raken de poriën in de cementsteen beter verstopt dan in de cementsteen met uitsluitend portlandcement (figuur 2). Een dichte cementsteenstructuur vormt een grote barrière voor het binnendringen van sulfaten en water, zodat er geen gevaar bestaat voor het ontstaan van de expansieve reactie.

Figuur 2 Verskil in dichtheid van de cementsteen van portlandcement en hoogovencement



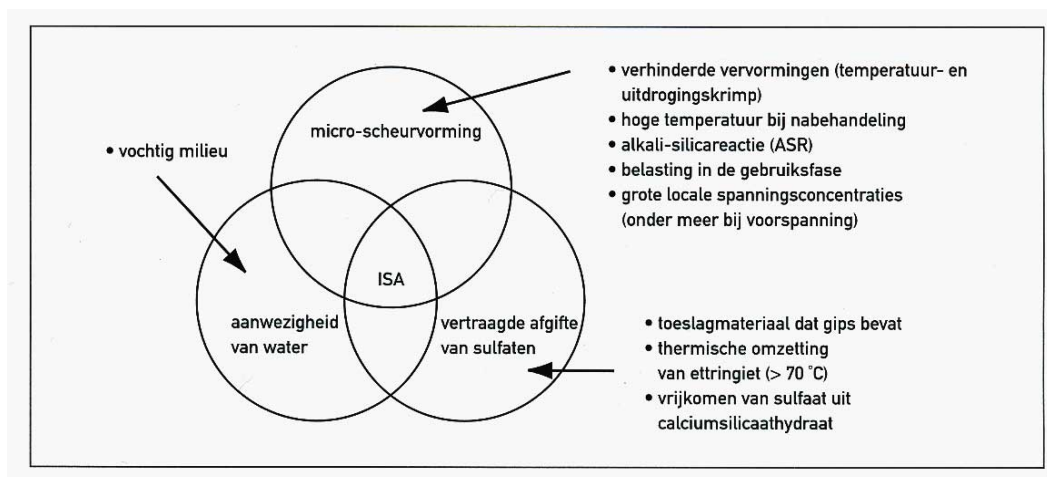
Interne sulfaataantasting (ISA)

Deze vorm van sulfaataantasting kwam voor het eerst midden jaren tachtig van de vorige eeuw voor bij de productie van prefab betonnen dwarsliggers, waar portlandcementbeton door middel van een warmtebehandeling met stoom snel op sterkte werd gebracht.

Uit nader onderzoek is gebleken dat ISA ook kan optreden bij massabeton waarin de inwendige temperatuur als gevolg van de hydratatie warmte hoog kan oplopen. Al deze gevallen hebben gemeen dat in het nog jonge beton temperaturen boven 70 °C optreden.

De schade door ISA wordt veroorzaakt doordat, als gevolg van de hoge temperaturen, de in de cementsteen aanwezige sulfaten vrijkomen voor secundaire ettringietvorming (SEV). Zoals uit de hiervoor beschreven schade bij ESA bekend is, heeft de vorming van SEV zwelling tot gevolg, wat leidt tot scheurvorming. Interne sulfaataantasting kan alleen optreden als aan de volgende randvoorwaarden wordt voldaan (figuur 3): microscheurvorming van het beton; vertraagde vrijgave van sulfaten; aanwezigheid van water.

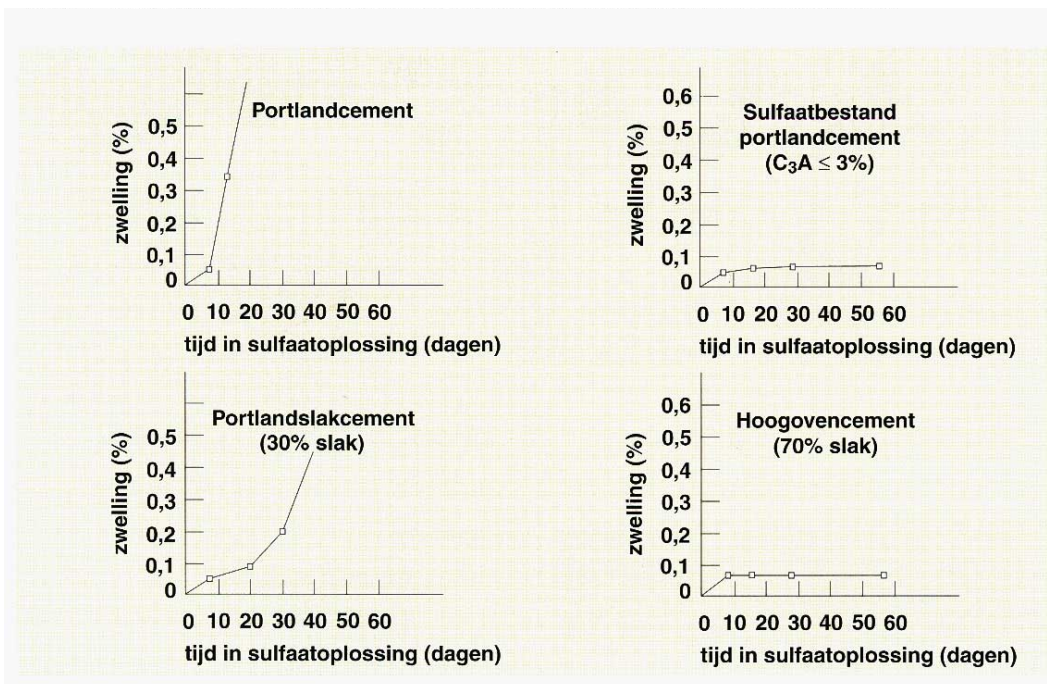
Figuur 3 Conditie waaronder interne sulfaataantasting (ISA) kan optreden



Beproevingsmethode voor externe sulfaataantasting (ESA)

De sulfaatgevoeligheid van een cement of de sulfaatbestandheid van beton kan worden aangetoond door middel van laboratoriumonderzoek. De (externe) sulfaatbestandheid wordt beoordeeld op basis van lengteveranderingen (zwelling) van prismavormige proefstukken, geplaatst in een standaard-sulfaatoplossing, in vergelijking met controleproefstukken, geplaatst in gedemineraliseerd water. De lengte van de proefstukken wordt na een vastgestelde periode gemeten, waarbij de laatste meting na 52 weken plaatsheeft. Een dergelijke beproevingsmethode neemt nogal wat tijd in beslag. Niettemin is het meten van de zwelling aan proefstukken een uitstekende methode om de sulfaatgevoeligheid van de verschillende cementen aan te tonen (figuur 4). Op verzoek van de Europese Commissie zal in 2004 worden begonnen met het opstellen van een CEN Technical Report voor de bestandheid van beton tegen alle bovengenoemde vormen van externe sulfaataantasting.

Figuur 4 Effect van gehalte aan hoogovenslak op de gevoeligheid van een cement voor sulfaataantasting



Cement met een hoge bestandheid tegen sulfaten

Volgens de Nederlandse norm NEN 3550 hebben cementen die voldoen aan NEN-EN 197-1 een hoge bestandheid tegen sulfaten, indien:

- in CEM I (portlandcement) het C₃A-gehalte ten hoogste 3% (m/m) en het Al₂O₃-gehalte ten hoogste 5% (m/m) bedraagt;
- het gehalte aan hoogovenslak in CEM III (hoogovencement) meer dan 65% (m/m) bedraagt.

Aan een dergelijk cement wordt als aanduiding van deze speciale eigenschap de lettercombinatie HS toegevoegd.

Uit figuur 4 blijkt nog eens duidelijk dat een hoogovencement met een hoog slakgehalte (in dit geval 70%) beton oplevert met een uitstekende bestandheid tegen sulfaten. In de dagelijkse praktijk wordt regelmatig hoogovencement gemengd met portlandcement.

Op zich is hier niets op tegen, behalve wanneer de projectspecificatie een HS-cement voorschrijft. In dat geval zal de betonproducent het mengsel van de twee cementen zodanig moeten samenstellen, dat het slakgehalte van dit mengsel minimaal 65% (m/m) bedraagt.

Wanneer men een dergelijk mengsel wil vervaardigen, is het verstandig contact op te nemen met de cementleverancier.

Betonvoorschriften en sulfaatbestandheid

Voor de toepassing van NEN-EN 206-1 in Nederland gelden ook de aanvullingen op deze norm zoals omschreven in NEN 8005. Voor beton dat wordt blootgesteld aan een agressief milieu, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van sulfaten, gelden de milieuklassen XA1, XA2 en XA3 (zie tabel 1). In NEN 8005 is voorgeschreven dat voor beton dat wordt blootgesteld aan oplossingen (grondwater) met meer dan 600 mg SO₄²⁻ ionen/liter of aan grond met een gehalte aan sulfaten van meer dan 3000 SO₄²⁻ mg/kg, een cement met een hoge bestandheid tegen sulfaten (HS) moet worden toegepast. Dit is beton in milieuklassen XA2 en XA3.

Literatuur

1. Betoniek 3/9, Sulfaataantasting, oktober 1974.
2. Betoniek 4/28, Afvalwater, september 1979.
3. NEN-EN 206-1, Beton - Deel 1: Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. NEN, Delft, 2001.
4. NEN 8005, Nederlandse aanvulling op NEN-EN 206-1 Beton - Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. NEN, Delft, 2004.
5. NEN-EN 197-1, Cement - Deel 1: Samenstelling, specificatie en conformiteitscriteria voor gewone cementsoorten. NEN, Delft, 2000.
6. NEN 3550, - Gewone cementsoorten volgens NEN-EN 206-1, met aanvullende speciale eigenschappen - Definities en eisen. NEN, Delft, 2002.
7. EN 196-2, Methods of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement. CEN, Brussels, 1994.