

Aantasting van beton door sulfaten

Een van de vormen van chemische aantasting van beton is de inwerking van sulfaten. Sulfaten zijn terug te vinden in zeewater, rioleringen, mestkelders en de bodem. Welke soorten cement zijn het beste bestand tegen sulfaten? En op welke manier kan beton beschermd worden tegen aantasting door sulfaten? In dit artikel wordt dieper ingegaan op de oorzaak van de aantasting door sulfaten en hoe sulfaat aantasting te voorkomen is

Ettringiet

Het basisbestanddeel van alle reguliere cementsoorten is portlandcementklinker, dat verschillende chemische verbindingen bevat, waaronder diverse klinkermineralen. Een specifiek klinkermineraal is de verbinding tussen kalk en aluminium, genaamd tricalciumaluminaat of kortweg C_3A . Dit mineraal reageert heftig met water en kan ervoor zorgen dat de betonspecie niet goed te verwerken is als dit niet wordt voorkomen. Ter voorkoming wordt tijdens het malen van cement worden enkele procenten sulfaat in de vorm van natuurlijk gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) of anhydriet ($CaSO_4$) toegevoegd om de bindtijd te reguleren. Dit wordt een 'bindtijdregulerend additief' genoemd of eenvoudigweg bindtijdregelaar.



Het C_3A reageert met water en het gips of anhydriet tot het mineraal ettringiet, dat als een coating op het oppervlak van de cementkorrels wordt gevormd. Deze reactie veroorzaakt in verhard beton expansie van het beton, doordat het reactieproduct meer volume inneemt dan het volume van het gips en C_3A samen. Bij betonspecie is het echter geen probleem, omdat tijdens deze fase (de dormante periode) volumeverandering nog vrij kan plaatsvinden. Deze vroege vorming van ettringiet staat ook bekend als primaire ettringietvorming.

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

Externe sulfaataantasting (ESA)

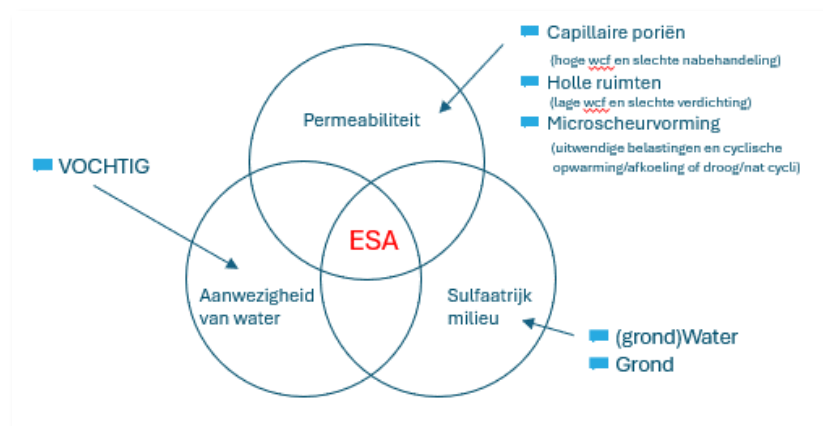
Externe sulfaataantasting (ESA)wordt veroorzaakt door de chemische reactie tussen de met met sulfaten verzadigde grond of (grond)water en de cementsteen. De schade bij ESA kan worden gekenmerkt door:

- Scheurvorming door secundaire ettringietvorming
- Sterkteverlies veroorzaakt door de vorming van:
 - gips;
 - thaumasiet bij temperaturen < 5 °C, ook wel: 'thaumasiet sulfaataantasting (TSA)'
 - silicaathydraten door de sulfaten uit zeewater, ook wel: 'aantasting door zeewater'.

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

- Hoge permeabiliteit van het beton
- Milieu met veel sulfaten
- Aanwezigheid van water.

Waar sulfaten in het milieu in contact komen met beton en 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 bevinden in milieus waar sulfaataantasting mogelijk is. Deze sulfaten komen voor in de volgende milieus:

- Zeewater; *zeewater bevat een aanzienlijke concentratie sulfaten.*
- Riolsystemen; *in rioleringsystemen kunnen sulfaten worden gevormd door zwavelhoudende verbindingen, zoals zwavelwaterstof uit het rottingsproces van organische stoffen.*
- Mestkelders; *in de mest van runderen en pluimvee kunnen aanzienlijke hoeveelheden sulfaten aanwezig zijn.*
- Bodem; *in de bodem kunnen (lokaal) verhoogde concentraties sulfaten voorkomen.*
- Specifieke situaties waarbij rekening moet worden gehouden met de aanwezigheid van sulfaten zijn onder andere locaties waar veel kunstmest wordt gebruikt, zoals in de glastuinbouw, en bij bouw- en sloopafval (zoals gipsafval).

Niet alleen de aanwezigheid van sulfaten is belangrijk, maar met name ook de concentratie waarin ze voorkomen in het milieu. Deze concentratie is bepalend voor het risico op sulfaataantasting.

Niet alleen de aanwezigheid van sulfaten is belangrijk, maar ook de concentratie waarin ze voorkomen in het milieu. Deze concentratie is bepalend voor het risico op sulfaataantasting.

In NEN-EN 206 is een classificatie naar de mate van agressiviteit voor sulfaatconcentraties in grondwater en droge grond (luchtdroog) vastgelegd (zie tabel 1).

Tabel 1 Agressiviteit van sulfaatconcentraties volgens NEN-EN-206 ¹⁾

Agressiviteit	Milieuklasse volgens NEN-EN 206	Sulfaatconcentratie grondwater SO ₄ ²⁻ mg/l	Sulfaatconcentratie grond SO ₄ ²⁻ mg/kg
licht	XA1	200 – 600	2.000 – 3.000 ²⁾
matig	XA2	600 – 3.000	3.000 – 12.000
sterk	XA3	3.000 – 6.000 ³⁾	12.000 – 24.000 ³⁾

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

²⁾ De 3.000 mg/kg limiet moet worden verlaagd tot 2.000 mg/kg in geval van het risico van accumulatie van sulfaationen als gevolg van droog/nat cycli of capillaire opzuiging.

³⁾ Voor nadere informatie, in geval de maximale sulfaatconcentraties worden overschreden, wordt verwezen naar 'Chemische aantasting van beton'

Relatie tussen C_3A - gehalte en sulfaatbestandheid van cement

De tweede voorwaarde voor schadelijke ettringietvorming is de aanwezigheid van C_3A -mineralen in verharde cementsteen. De keuze van cementsoort speelt hierbij een belangrijke rol.

Beton met portlandcement (CEM I) is over het algemeen gevoelig voor sulfaataantasting. De mate van gevoeligheid neemt af naarmate het C_3A -gehalte daalt. Portlandcementen met een C_3A -gehalte van 5% of minder worden beschouwd als bestand tegen sulfaat. Deze cementen worden op de markt gebracht als C_3A -arme of C_3A -vrije portlandcementen. Een nadeel is echter dat beton gemaakt met een C_3A -arm cement relatief lage weerstand heeft tegen het binnendringen van chloriden. Als dit beton wordt gebruikt in situaties waarbij de chlorideconcentratie hoog is, zoals in zeewater, kan dit leiden tot corrosie van de wapening.

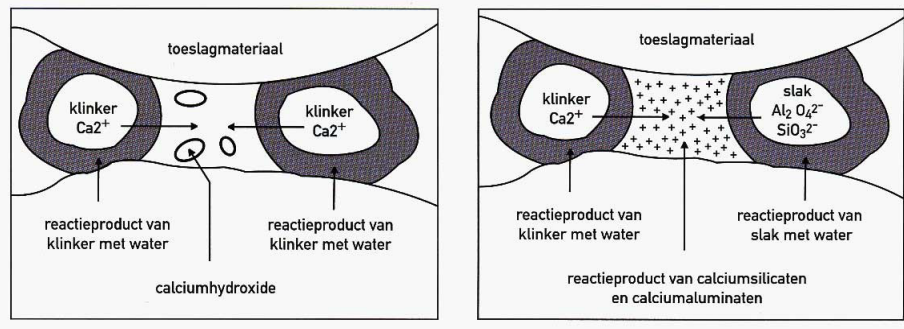
Een zeer goed alternatief is het gebruik van hoogovencement (CEM III). Naast portlandcementklinker bevat hoogovencement, zoals de naam al aangeeft, voornamelijk hoogovenslak. De sulfaatbestendigheid van cementen op basis van portlandcementklinker en hoogovenslak hangt af van de mengverhouding en de individuele eigenschappen van beide bestanddelen. Diverse onderzoeken en praktijktoepassingen hebben aangetoond dat hoogovencement met een (voldoende) hoog gehalte aan hoogovenslak niet gevoelig is voor sulfaataantasting. Hier zijn twee redenen aan te wijzen:

- Aan de ene kant wordt door het verminderen van de hoeveelheid portlandcementklinker eenvoudigweg het gehalte aan C_3A verlaagd.
- Aan de andere kant, en dat is eigenlijk de belangrijkste reden, neemt de dichtheid van het beton enorm toe door reactieproducten van hoogovenslak.

Indringing van sulfaten in beton

Sulfaten kunnen pas reageren met C_3A wanneer ze het beton zijn binnengedrongen. Het gebruik van hoogovencement verhoogt significant de dichtheid van de poriënstructuur van de cementsteen. Deze hogere dichtheid wordt toegeschreven aan het feit dat er een extra reactieproduct wordt gevormd in het poriewater tussen een portlandklinkerdeeltje en een hoogovenslakdeeltje. Dit wordt veroorzaakt doordat er een overschot aan kalk (afkomstig van de portlandcementklinker) in het poriewater reageert met aluminaat- en silicaatverbindingen afkomstig van de hoogovenslakdeeltjes.

De poriën in de cementsteen worden beter afgesloten door deze reactie dan bij cementsteen die alleen portlandcement bevat (zie figuur 2). Hierdoor ontstaat een dichtere cementstructuur die een effectieve barrière vormt tegen het binnendringen van sulfaten en water, waardoor het risico op expansieve reacties wordt geminimaliseerd.



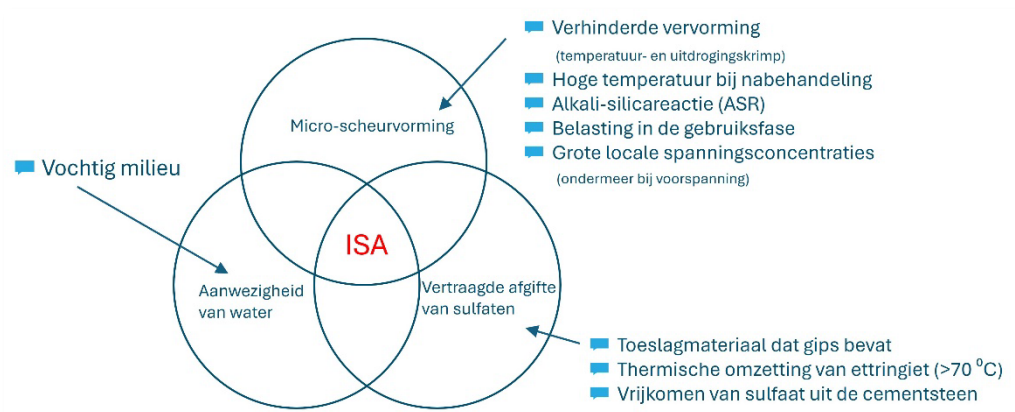
Figuur 2 Verskil in dichtheid van de cementsteen van portlandcement en hoogovencement

Interne sulfaataantasting (ISA)

Deze vorm van sulfaataantasting deed zich voor het eerst voor in de jaren tachtig van de vorige eeuw bij de productie van prefab betonnen dwarsliggers. Hierbij werd portlandcementbeton door middel van een warmtebehandeling met stoom snel op sterkte gebracht.

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

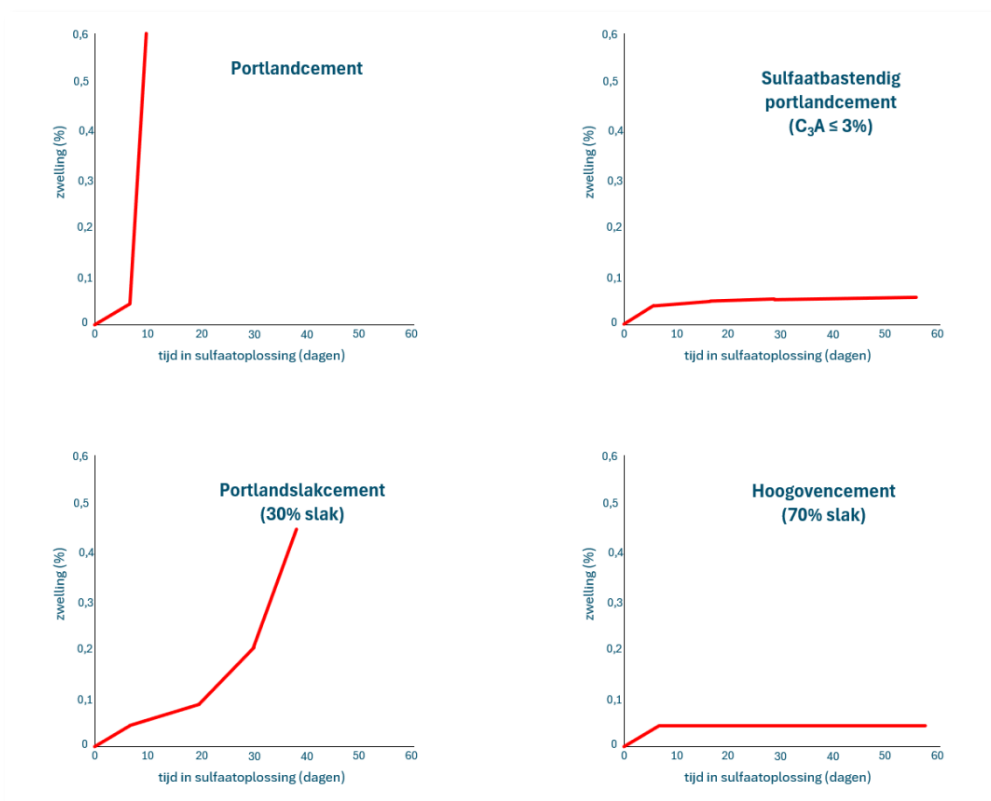
De schade door ISA wordt veroorzaakt doordat, als gevolg van hoge temperaturen, sulfaten vrijkomen uit de cementsteen voor secundaire ettringietvorming (SEV). Zoals bekend is bij ESA, leidt de vorming van SEV tot zwelling en daarmee scheurvorming. Interne sulfaataantasting kan alleen optreden onder de volgende randvoorwaarden (zie figuur 3): microscheurvorming in het beton, vertraagde afgifte van sulfaten en aanwezigheid van water.



Figuur 2 Condities waaronder interne sulfaataantasting (ISA) kan optreden

Beproevingsmethode voor externe sulfaataantasting (ESA)

De sulfaatgevoeligheid van een cement of de sulfaatbestendigheid van beton kan worden aangetoond door middel van laboratoriumonderzoek. De (externe) sulfaatbestendigheid wordt beoordeeld op basis van lengteveranderingen (zwellings) van prismavormige proefstukken, geplaatst in een standaard-sulfaatoplossing, in vergelijking met controleproefstukken die zijn geplaatst in gedemineraliseerd water. Na een vastgestelde periode van 52 weken worden de lengten van de proefstukken gemeten om de zwelling te bepalen. Ondanks dat deze beproevingsmethode tijdrovend is, is het een effectieve manier om de sulfaatgevoeligheid van verschillende cementen aan te tonen (zie figuur 4).



Figuur 3 Effect van gehalte aan hoogovenslak op de gevoeligheid van een cement voor sulfaataantasting

Cementen met een hoge bestandheid tegen sulfaten.

Volgens de Europese cementnorm NEN-EN 197-1 hebben de volgende zeven cementsoorten een hoge mate van bestandheid tegen sulfaten:

CEM I-SR 0	Sulfaatbestand Portlandcement (het C_3A -gehalte van de klinker = 0%)
CEM I-SR 3	Sulfaatbestand Portlandcement (het C_3A -gehalte van de klinker $\leq 3\%$)
CEM I-SR 5	Sulfaatbestand Portlandcement (het C_3A -gehalte van de klinker $\leq 5\%$)
CEM III/B-SR	Sulfaatbestand hoogovencement (geen eis aan het gehalte C_3A in de klinker)
CEM III/C-SR	Sulfaatbestand hoogovencement (geen eis aan het gehalte C_3A in de klinker)
CEM IV/A-SR	Sulfaatbestand puzzolaancement (het C_3A -gehalte van de klinker $\leq 9\%$)
CEM IV/B-SR	Sulfaatbestand puzzolaancement (het C_3A -gehalte van de klinker $\leq 9\%$)

Uit figuur 4 blijkt nog eens duidelijk dat een hoogovencement met een hoog slakgehalte (in dit geval 70%) zorgt voor beton met uitstekende bestandheid tegen sulfaten.

In de dagelijkse praktijk wordt regelmatig hoogovencement gemengd met portlandcement. Op zich is hier niets mis mee, tenzij de projectspecificatie een SR-cement voorschrijft. In dat geval moet de betonproducent het mengsel van de twee cementen zodanig samenstellen dat het slakgehalte van dit mengsel minimaal 65% (m/m) bedraagt. Als men zo'n mengsel wil maken, is het verstandig om contact op te nemen met de leverancier van het cement.

Sulfaatbestandheid en de betonvoorschriften

Voor de toepassing van NEN-EN 206 in Nederland dienen ook de aanvullingen op deze norm zoals beschreven in NEN 8005 te worden gevolgd. Beton dat wordt blootgesteld aan een agressief milieu, bijvoorbeeld door sulfaten, valt onder milieuklassen XA1, XA2 en XA3 (zie tabel 1). Volgens NEN 8005 staat voorgeschreven voor beton dat wordt blootgesteld aan oplossingen (grondwater) met meer dan 600 mg SO_4^{2-} -ionen per liter of aan grond met een gehalte aan sulfaten van meer dan 3000 mg SO_4^{2-} per kilogram, een cement met een hoge bestandheid tegen sulfaten (SR) moet worden toegepast. Deze richtlijn geldt voor beton in milieuklassen XA2 en XA3.

Literatuur

[BetonLexicon, Sulfaataantasting](#)

[Betonië 15/23, SR en VLH, nieuwe aanduidingen in de cementbenaming](#)

[Betonië 15/13, DEF? Sulfaataantasting, Delayed Ettringite Formation \(DEF\) & Thaumasië](#)

[Betonië 3/9, Sulfaataantasting](#)

NEN-EN 206, Beton + NEN 8005, Nederlandse invulling van NEN-EN 206

NEN-EN 197, Cement: Samenstelling, specificatie en conformiteitscriteria voor gewone cementsoorten.