

VERSNELLING HYDRATATIE DOOR ALKALISCHE ACTIVATIE HOOGOVENSLAK IN HYBRIDE BETONMENGSEL

Balans *tussen* snelheid en CO₂

In de prefab-betonindustrie is snelheid essentieel. Elementen moeten soms al na 8 uur worden ontkist. Om dat te kunnen realiseren, zijn snelle betonmengsels nodig. Dit staat echter op gespannen voet met de ambitie de CO₂-uitstoot van beton te verminderen. Het is daarom zoeken naar de juiste balans. Bij Voorbij prefab is daarmee positieve ervaring opgedaan met de toepassing van hoogovenslak in combinatie met natriumsulfaat als activator. De redactie van *Betoniek* vroeg betontechnoloog Ruud Out naar de achtergronden van deze ontwikkeling.

In de prefab-betonindustrie wordt in betonmengsels van oudsher gebruikgemaakt van portlandcement (CEM I), in ieder geval voor een belangrijk deel. De reden is dat dit cement snel hydrateert en daarbij in korte tijd hoge sterkten genereert, ook bij lagere temperaturen. Dat is nodig omdat het beton voor een kostenefficiënt proces snel na het storten moet worden ontkist en om schade aan het product bij ontkisten te voorkomen.

Het nadeel van portlandcement is dat de productie van het belangrijkste bestanddeel, de portlandcementklinker, gemoeid gaat met een grote CO₂-emissie. Dit komt vooral doordat CO₂ vrijkomt als restproduct bij het chemische proces, de calcinatie. Hierbij wordt kalksteen (CaCO₃) bij hoge temperatuur in een reactie met zuurstof (O₂) omgezet tot klinker (CaO en CO₂). Een kleiner, maar nog steeds significant deel is te wijten aan het verbruik van energie in de verbrandingsovens.

Bij de productie van cement kunnen als vervanger voor klinker ook bijproducten als hoogovenslak (dat vrijkomt bij de productie van ruwijzer) of poederkoolvliegias (dat vrijkomt

uit kolengestookte elektriciteitscentrales) worden gebruikt. De CO₂-footprint van de betreffende cementen, respectievelijk hoogovencement (CEM III) en poederkoolvliegiascement (CEM II), is veel lager dan die van portlandcement. Het nadeel is dat deze cementen, en dus ook het beton waarin ze worden toegepast, minder snel verharden dan CEM I.

VERSNELLEN

Er zijn verschillende manieren om het verharderen van beton te versnellen. Het type cement is een belangrijke factor. Zo verhardt portlandcement zoals gezegd sneller dan hoogovencement. En er zijn ook nog eens extra snelle typen portlandcement beschikbaar. Maar niet alleen het type cement is bepalend, ook de hoeveelheid: meer cement betekent doorgaans een lagere watercementfactor wat leidt tot een snellere sterkteontwikkeling. Verder speelt de temperatuur waarop beton verhardt een belangrijke rol; cement hydrateert sneller bij hogere temperaturen. Dat is de reden dat beton in de prefab-betonindustrie vaak in klimaatkamers verhardt, bij een constante temperatuur.

Al deze methoden hebben echter een negatieve impact op het milieuprofiel van beton (waarbij de milieu-impact van portlandklinker er met kop en schouders bovenuit steekt). Als alternatief kan een versneller als hulpstof worden toegepast, die de verharding van beton een extra duw in de rug kan geven. De meeste versnellers komen het beste tot hun recht in combinatie met portlandcementklinker. Voor hoogovencement zijn nog geen voldoende effectieve genormeerde, commerciële versnellers beschikbaar. Toch zijn er mogelijkheden om ook hoogovencement te versnellen. Zo komt uit onderzoek naar voren dat natriumsulfaat de vroege sterkte van hoogovenslakhoudende cementen kan versnellen.

NATRIUMSULFAAT

Natriumsulfaat is een kristallijn zout, met als chemische formule Na₂SO₄. Het versnelt de reactiviteit van bindmiddelen met hoogovenslak. Met name de vroege sterkteontwikkeling (tot 24 uur) kan worden bevorderd. De werking van natriumsulfaat als activator is gebaseerd op een versnelling van de reactie van





het C_3S -mineraal uit het klinkeraandeel. Natriumsulfaat bespoedigt de vorming van ettringiet (calcium-sulfo-aluminaat-hydraat), waar vooral de eerste sterkteontwikkeling van kan profiteren. Verder reageert natriumsulfaat met het calciumhydroxide uit het cement tot natriumhydroxide, met een verhoogde pH tot gevolg, waardoor de hoogovenslak wordt geactiveerd (het lost sneller op in het poriënwater). Ten opzichte van activatoren die voor geopolymerbeton worden toegepast, zoals natriumhydroxide (NaOH, natronloog), natriumsilicaat (Na_2SiO_3 , waterglas) en in mindere mate ook natriumcarbonaat (Na_2CO_3 , soda), is natriumsulfaat een relatief zwakke activator. Er is altijd een klein aandeel portlandcement nodig. Ook is er een minimale temperatuur nodig. Bij bijvoorbeeld $5^\circ C$ zal natriumsulfaat weinig doen. Voordeel is dat natriumsulfaat minder agressief is en dat er dus minder veiligheidsrisico's bestaan bij de verwerking ervan. Bovendien blijken veel van die sterkere activatoren niet te werken in combinatie met portlandcementlinker. Natriumsulfaat is beschikbaar als restproduct uit de farmaceutische industrie of als natuurlijk

ACTIVATIE HOOGOVENSLAK EN POEDERKOOVLIEGAS

De samenstelling van gegranuleerde hoogovenslak en poederkoolvliegias is verwant aan die van portlandcementklinker. Met water kunnen de componenten ervan reageren tot een soort cementsteen. Dat gaat echter zeer langzaam (slak) of vrijwel helemaal niet (poederkoolvliegias). We noemen deze materialen daarom ook wel latent hydraulisch (slak) en puzzolaan (poederkoolvliegias).

De reactie kan worden geactiveerd door een verhoogd alkalisch milieu (hoge pH). Dat wordt verkregen door calciumhydroxide, samen met calcium-silicaat-hydraat (CSH) het belangrijkste eindproduct bij de hydratatie van portlandcement. Het portlandcement zorgt als het ware voor de activatie van hoogovenslak en poederkoolvliegias.

De reactie kan door aanvullende alkalische activatie worden bespoedigd, een methode die ook bij geopolymerbeton wordt toegepast. Een van de mogelijkheden voor activatie is de toevoeging van natriumsulfaat, waar het in dit artikel over gaat.

Uit onderzoek komt naar voren dat activatie met natriumsulfaat de vroege sterkte van hoogovenslak-houdende cementen kan versnellen

product. De zuiverheid is belangrijk en kwaliteit moet daarom goed worden onderzocht. Er bestaan immers ook vervuilende soorten. Een alternatief voor natriumsulfaat is kaliumsulfuur (K_2SO_4), dat een vergelijkbare werking heeft.

CO₂-ARM BETON VOORBIIJ

In het streven de MKI van beton voor casco-wanden te verlagen, ging Voorbij prefab in samenwerking met ABT op zoek naar mogelijkheden voor het ontwikkelen van een CO₂-arm beton, dat niet ten koste mocht gaan van

de productiesnelheid en de kwaliteit van het product. Daarbij kwam de mogelijkheid naar voren om gegraneerde hoogovenslak in combinatie met natriumsulfaat toe te passen. Bij de ontwikkeling van een mengsel is gezocht naar een balans tussen vroege sterkte, eindsterkte, aandeel hoogovenslak, aandeel klinker en hoeveelheid natriumsulfaat. Na veelvuldig experimenteren kwam er een ideaal hybride mengsel uit, met de gewenste eind- en ontkistingssterkte. Fijnheid van het bindmiddel (Blaine-waarde) is daarbij een zeer bepalende factor. Het mengsel bestaat uit portlandcement (CEM I 52,5 R), hoogovencement (CEM III/A 52,5N), gegraneerde hoogovenslak en natriumsulfaat. De samenstelling en de korrelopbouw van de bindmiddelen en de hoogovenslakken zorgt ervoor dat het aandeel aan portlandklinker kan worden beperkt (tot ca. 25%). Daarbij is zowel de sterkteontwikkeling als de eindsterkte voldoende. Hoewel Voorbij vrij open is in het delen van kennis, wordt de exacte samenstelling niet gedeeld in een openbaar artikel. Voorbij roept wel andere partijen op samen te werken en is in die samenwerking bereid informatie te delen. Het ontwikkelde mengsel heeft een relatief gunstig milieuprofiel, met een MKI die zo'n 44% lager is dan mengsels die voorheen werden gebruikt. Die 44% geldt voor het mengsel dat wordt toegepast voor de elementen die na 18 uur

worden ontkist (voor de zogenoemde enkelstorts). Een deel van de elementen, degene die in de zogenoemde dubbelstorts worden gemaakt, worden al na 8 uur ontkist. Het mengsel dat daarvoor wordt toegepast heeft een iets minder gunstig milieuprofiel, maar leidt nog altijd tot een besparing van 25% op de MKI. Die winst geldt overigens ten opzichte van de mengsels die in het laatste decennium al flink zijn geoptimaliseerd. Die optimalisatie heeft geleid tot het beperken van de hoeveelheid portlandcement en de toevoeging van hoogovencement (CEM III/A), om daarmee te grote oversterkten te beperken. Zou je het mengsel vergelijken met dat wat 30 jaar geleden werd toegepast, met uitsluitend portlandcement, dan ligt de milieuwinst aanzienlijk hoger. Voorbij voegt in het mengsel zelf gemalen hoogovenslak toe. Beperking van klinker zou natuurlijk ook kunnen door toepassing van uitsluitend hoogovencement in plaats van portlandcement, waarbij de klinker al in de cementfabriek is vervangen door slak. De maling van het hoogovencement met een gering klinker-aandeel (CEM III/B of CEM III/C) is naar de ervaring van Voorbij echter niet voldoende fijn, waardoor de gewenste eindsterkte niet wordt gehaald. Bovendien kan Voorbij door deze aanpak zelf de verhouding klinker/slak bepalen om zo een optimaal mengsel te maken. Mocht er op termijn een extra fijngemalen hoogovenslak

beschikbaar komen, dan zou het zelfs mogelijk zijn uitsluitend portlandcement en hoogovenslak toe te passen, waarmee nagenoeg alle combinaties mogelijk zijn.

RISICO'S

In beton zit een grens aan de reductie van portlandcement, onder meer om het risico op carbonatatie te beperken. Daarom wordt in NEN 8005 een minimaal klinkergehalte geëist bij bepaalde milieuklassen. Die eis geldt niet voor milieuklasse XC1 (droog milieu) en dus ook niet voor de casco-elementen van Voorbij. Ook aan de toepassing van natriumsulfaat kleven risico's. Zo bestaat er een verhoogd risico op ASR in combinatie met gebruik van een reactief toeslagmateriaal. Daarom moet volgens CUR-Aanbeveling 89 het Na₂O-equivalent (Na₂O_e) worden beperkt en daarbij telt het natriumkation uit het natriumsulfaat mee. Dit kan een beperking geven op de toepasbaarheid. Die beperking geldt overigens niet voor een droog milieu en dus niet voor de casco's van Voorbij, omdat daar geen expansie van eventuele ASR-gel optreedt. Om toch alle risico's uit te sluiten, worden momenteel langetermijnproeven uitgevoerd bij Concrefy naar het risico op ASR als gevolg van het natriumsulfaat. De eerste resultaten stemmen positief. Een ander aandachtspunt is de vorming van ettringiet door het sulfaat. Ettringiet is een van de reactieproducten van cementhydratatie. Het ettringiet dat in de eerste 24 uur wordt gevormd, draagt bij aan de vroege sterkte. Ettringiet dat in een latere fase wordt gevormd,

Aandachtspunten zijn het risico op carbonatatie, een verhoogd risico op ASR en de vorming van ettringiet



2 Testwanden Voorbij Prefab

PURDOCEMENT

De ontwikkeling van natriumsulfaat als activator is feitelijk niet nieuw. In de jaren vijftig van de vorige eeuw werd het materiaal in België ontwikkeld door Arthur Oscar Purdon en onder de naam Purdocement op de markt gebracht. Het is echter beperkt toegepast en de productie eindigde in 1958.

In 2010 is onderzoek verricht naar de kwaliteit van met Purdocement gerealiseerde constructies. Daaruit bleek dat het materiaal nog altijd een hoge druksterkte had, maar ook dat het kwetsbaar was ten aanzien van slijtage en carbonatatie [12, 13]. Dit is te wijten aan te hoge sulfaatdoseringen die het beton op lange termijn kunnen beschadigen.

3 Voorbij Prefab slaagde erin een CO₂-arm beton te ontwikkelen, waarmee Voorbij Prefab de CO₂-footprint van haar betonnen woningcasco's fors terugdringt



leidt echter tot expansie en daarmee mogelijk tot schade. Dat speelt vooral bij een hoog sulfaatgehalte door te hoge doseringen natriumsulfaat. Dit risico is onderzocht en blijkt bij de toegepaste mengsels niet aan de orde. Extra aandacht moet uitgaan naar de verwerkbaarheid (consistentie) van het mengsel. De toepassing van natriumsulfaat vermindert de verwerkbaarheid, wat door toepassing van extra plastificeerder kan worden gecompenseerd.

CERTIFICERING

Het ontwikkelde mengsel is uitvoerig onderzocht, onder meer door SGS en Concrefy. Dit om de gelijkwaardigheid met een bekend referentiebeton aan te tonen. Daarbij zijn grenswaarden vastgesteld voor het klinkergehalte, het slakgehalte en de hoeveelheid natriumsulfaat. Hierbij is aangetoond dat onder meer de sterkte van het eindproduct, de levensduur en de bestandheid tegen chemische invloeden voldoen. KIWA heeft dit proces gecontroleerd, wat uiteindelijk heeft geleid tot een goedkeuring op de bindmiddelcombinatie (attest) tezamen met een maximale dosering aan natriumsulfaat.

MILIEUWINST

Zoals aangegeven heeft het hybride mengsel een duidelijk lagere MKI dan de mengsels die eerder in de fabriek werden toegepast. Daarbij moet worden aangetekend dat hoogovenslak niet in overvloed beschikbaar is. Haast alle bruikbare vrijkomende hoogovenslak wordt al toegepast in diverse typen hoogovencementen. Bovendien is de verwachting dat – vanwege nieuwe technologieën bij Tata Steel – het aanbod van de huidige kwaliteit hoogovenslak

in de toekomst kan afnemen. De reactiviteit van die mogelijk nieuwe vrijkomende slak is nog onbekend. Alternatieven voor hoogovenslak moeten worden onderzocht. Grondstoffen als gecalcineerde klei (metakaolien), vulkanische as of gecarbonateerde beton-fines zouden hier mogelijk voor in aanmerking komen. Ook daar wordt binnen Voorbij naar gekeken, maar het vraagt nog aanvullend onderzoek. Verder moet worden aangemerkt dat de genoemde winst geldt in deze specifieke situatie, waarbij snelheid van het mengsel een dominante factor is. Is er meer tijd voor de verharding, bijvoorbeeld bij in-situbeton, dan is het sowieso al mogelijk meer hoogovencement toe te passen, met een gunstiger milieuprofiel. In zijn algemeenheid geldt dat er in de prefab-



4 Voorbij Prefab levert de Groene Voorbij Casco's met isolatie voor het project Nieuw Kralingen in Rotterdam

betonindustrie veel winst is te behalen in de CO₂-uitstoot. Te vaak wordt er gewerkt met pure portlandcement in zeer hoge dosering, waar dat niet nodig is. Door vervanging van klinker maar ook met het gebruik van warmte of isolatie kunnen mengsels meer worden geoptimaliseerd. En proefondervindelijk kan worden vastgesteld of, eventueel in combinatie met voorzichtiger ontwerpen, lagere onkistingssterkten kunnen worden toegepast.

RICHTING 0%

Voorbij heeft met deze ontwikkeling duidelijk de ambitie getoond een steentje bij te dragen aan het terugdringen van de CO₂-footprint van beton. Het ontwikkelde mengsel wordt momenteel in alle casco-elementen toegepast en daarmee in circa 1500 woningen per jaar. Maar het bedrijf weet ook dat het moet doorgaan met innoveren, als de eis van 0% CO₂-emissie in 2050 en de ambities voor de kortere termijn in zicht willen komen. ■

ANDERE TOEPASSINGEN

Voorbij produceert naast wanden ook andere betonelementen zoals heipalen. Ook voor deze toepassingen wordt gekeken naar de mogelijkheden van activatie van hoogovenslak. Voor de heipalen heeft dat geleid tot een serie hybride mengsels bestaande uit portlandcement met slak en/of hoogovencement. Hier kunnen ook CO₂-reducties tot zo'n 42% worden bereikt. Uit ervaringen tot nu toe blijkt verder dat bij elementen met zeer complexe bekistingen, ettringietvorming door activatie problemen kan geven bij het ontwerpen.