



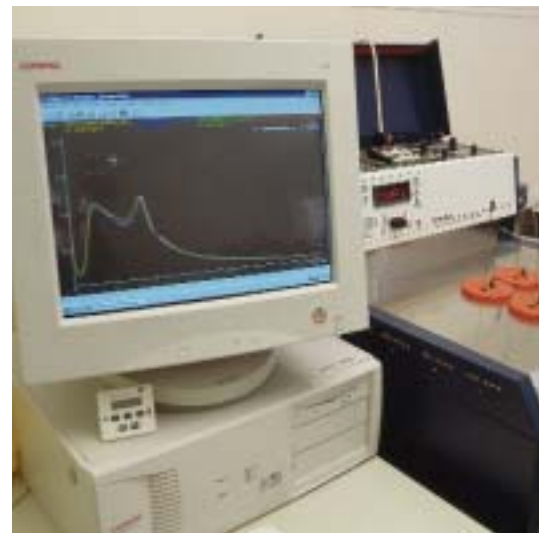
Warmteontwikkeling van cement en beton

Betonspecie wordt samengesteld uit grind, zand, cement en water. Soms worden vul- en/of hulpstoffen toegevoegd. Na het mengen van de grondstoffen is betonspecie een plastisch materiaal. In de uren en dagen daarna treedt in het betonmengsel een chemische reactie op die het mengsel 'versteent'. Bij deze chemische reactie, hydratatie genoemd, komt in korte tijd veel warmte vrij. Zelfs zoveel warmte dat de temperatuur van het beton toeneemt. Afhankelijk van de omstandigheden en de afmetingen van de constructie kan de temperatuur in het beton als gevolg van de hydratatie oplopen tot wel 40 à 50 °C en zelfs hoger. Hierna treedt afkoeling van de constructie in en kan scheurvorming ontstaan. Het is verstandig hiermee van tevoren rekening te houden, zeker in de ontwerp- en uitvoeringsfase.

De zogenaamde hydratatiwarmte van cement kan worden gemeten. Deze is echter niet geschikt om de temperatuurontwikkeling in een betonconstructie mee te berekenen. Daarvoor hebben we een zogeheten adiabaat nodig. Dit is het temperatuurverloop dat in een laboratoriumopstelling wordt gemeten aan verhardend beton.

Hydratatiwarmte van cement

De hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de chemische reactie tussen cement en water kunnen we meten. ENCI gebruikt hiervoor de Thermal Activity Monitor (TAM). Er wordt een kleine hoeveelheid cementpasta aangemaakt (cement + water met een water-cementfactor van 0,40). De pasta wordt direct in de TAM geplaatst en de temperatuur van de pasta wordt constant op 20 °C (isotherm) gehouden. De TAM registreert gedurende 7 dagen de vrijkomende warmte uit de verhardende cementpasta. Deze warmte wordt uitgedrukt in



Met de TAM wordt de hoeveelheid vrijkomende warmte gemeten

Joules per gram cement (J/g).

In de Nederlandse cementnorm (NEN 3550) is een eis vastgelegd voor cementen met een lage hydratatiwarmte (LH). Een cement voldoet aan het LH-criterium als er gedurende 7 dagen bij 20 °C minder dan 270 J/g warmte vrijkomt (tabel 1).

ENCI B.V.

Postbus 3233
5203 DE 's-Hertogenbosch

Technische Voorlichting

Tel: 073 640 12 20
Fax: 073 640 12 84

Email

tv@enci.nl

Internet

www.enci.nl



Tabel 1 Indicatie hydratatiwarmte ENCI-cementen

ENCI-cement	hydratatiwarmte J/g
Portlandcement	
• CEM I 52,5 N	345
• CEM I 52,5 R	350
Samengesteld portlandcement	
• CEM II/B-V 32,5 R	275
Hoogovencement	
• CEM III/B 42,5 N NEN 3550: LH/HS	245
• CEM III/B 42,5 N plus NEN 3550: LH/HS	255
• CEM III/A 52,5 N	350
Composietcement	
• CEM V/A (S-V) 42,5 N	260

De waarden voor de hydratatiwarmte zeggen dus alleen iets over de hoeveelheid warmte die vrijkomt in een specifieke situatie. Het betreft een cementpasta met een water-cement-factor van 0,40, die gedurende 7 dagen verhardt bij een constante temperatuur van 20 °C. De cementproducent bepaalt de hydratatiwarmte van cement alleen om te toetsen of het cement voldoet aan het criterium voor Lage Hydratatiwarmte.

Verskil in cementsoorten

Zoals uit tabel 1 blijkt is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de reactie van cement en water afhankelijk van de cementsoort. Hoe groter het aandeel portlandcementklinker in het cement, hoe hoger de hydratatiwarmte. Daarnaast geldt, hoe fijner het cement is gemalen, hoe sneller de warmte vrijkomt.

Met uitzondering van CEM III/A 52,5 N voldoen de hoogovencementen van ENCI aan het LH-criterium. Dit betekent dat de hoogovencementen een lage hydratatiwarmte ontwikkelen. De reden daarvan is het hoge aandeel hoogovenslak in deze cementen (> 65%). Hoogovenslak reageert bij 20 °C trager dan portlandcementklinker

en produceert ook minder warmte. Cementen met poederkoolvliegias (portlandvliegiascement en composietcement) produceren minder warmte dan portlandcementen. Het ENCI CEM V/A (S-V) 42,5 N voldoet ook aan het LH-criterium. Immers, de gemeten hydratatiwarmte bedraagt minder dan 270 J/g. In tegenstelling tot de hoogovencementen heeft ENCI dit composietcement echter niet als LH-cement gecertificeerd.

Warmteontwikkeling in beton

Tijdens het verharderen waarbij beton-

specie overgaat in beton, heeft warmteontwikkeling plaats. Deze vrijkomende warmte beïnvloedt gedurende de eerste dagen en soms weken de temperatuur van de betonconstructie. Meer er zijn meer invloeden op de temperatuur in een betonconstructie. Enerzijds bepalen de hoeveelheid warmte en de snelheid waarmee die vrijkomt tijdens het verharderen, de temperatuurontwikkeling. Anderzijds staat de constructie warmte af aan de omgeving. De hydratati-reactie is de 'kachel' in het beton. Hoe reactiever het cement, des te harder brandt de kachel en des te hoger wordt de betontemperatuur.

Gevolgen voor de constructie

Bij verwarming zetten materialen uit. Een betonnen balk of wand zal dus tijdens de verharding eerst willen uitzetten. Als de hydratati langzaam verloopt, zal de betonconstructie na eerst te zijn opgewarmd, geleidelijk afkoelen. Bij afkoelen wil een materiaal verkorten. Op zich is dit geen probleem, maar dat wordt het wel als de verkorting wordt belemmerd. Dit treedt bijvoorbeeld op als een wand op een reeds verharde vloer wordt gestort. De wand zal tijdens de hydratati verlgngen en daarna verkorten. De vloer is echter



Massabeton: pijlers in aanbouw voor de stormvloedkering in de Oosterschelde

De ontwikkeling van de temperatuur in beton is voornamelijk afhankelijk van de volgende fenomenen:

betonsamenstelling	Bepalend zijn vooral de cementsoort en het cementgehalte. Een reactiever cement en/of een hoger cementgehalte zullen tot een hogere betontemperatuur leiden.
specietemperatuur	Chemische reacties zijn afhankelijk van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur des te sneller verloopt de reactie. Als de specietemperatuur hoger is, zal sneller een hogere maximumtemperatuur in het beton worden bereikt.
omgevingscondities	De omgevingscondities bepalen onder meer hoe snel de ontwikkelde warmte wordt afgevoerd. Lage omgevingstemperaturen, wind en regen zullen een constructie sneller afkoelen. Zonbestraling kan de constructie minder snel afkoelen, of zelfs verder opwarmen.
type bekisting	De warmte uit de betonconstructie wordt via de bekisting naar de omgeving afgevoerd. Een houten bekisting biedt meer weerstand tegen dit warmteverlies dan een stalen bekisting. Het al dan niet isoleren van een bekisting speelt hierin ook een rol.
afmetingen constructie	Een constructie met een kleine inhoud ten opzichte van een groot oppervlak zal de ontwikkelde warmte snel afvoeren. Constructies met een grote inhoud en een relatief klein oppervlak, zogenaamde massaconstructies, zullen maar heel langzaam afkoelen.

relatief koud en verhindert ter plaatse van de wand-vloeraansluiting het verkorten van de jonge wand. Dit leidt tot trekspanningen onder in de wand. Als die trekspanningen in het jonge beton op enig moment groter zijn

dan de treksterkte, treden er scheuren op. Deze scheuren zijn het gevolg van zogeheten thermische spanningen. Het probleem van thermische spanningen doet zich voor als een betonconstructie wordt vastgestort aan een reeds

verharde constructie. Het kan zich ook voordoen bij grote temperatuurverschillen in een constructie, waarbij de warmteontwikkeling in de kern veel groter is dan aan de buitenkant van de constructie. Hierdoor kunnen trekspanningen in het beton ontstaan met scheurvorming als gevolg. De productinformatie 'Scheuren in jong beton' bevat uitgebreide documentatie hierover.

Maatregelen om scheurvorming te beperken

Welke maatregelen moeten we nemen om de kans op scheurvorming zo klein mogelijk te maken? Het antwoord bestaat uit een aantal voor de hand liggende maatregelen, die op het vlak liggen van ontwerp, betonsamenstelling en uitvoering.

Ontwerp:

- beperken van de afmeting van betonnen bouwdelen (hoe groter de afmetingen, hoe groter de verlenging/verkorting);
- voorkom verhinderde vervorming (nieuw beton vast aan reeds verhard beton);
- slank construeren (hoe minder massa, hoe beperkter de temperatuurontwikkeling);
- functie van wapening (wapening vermindert niet de kans op scheurvorming, maar kan wel de scheurwijdte beheersen).

Betonsamenstelling:

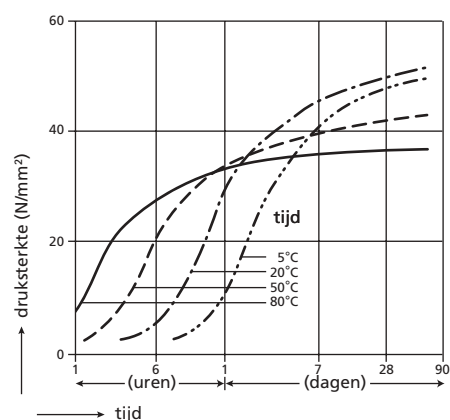
- beperk het cementgehalte; pas een cement toe met lage hydratiewarmte;
- verlaag de specietemperatuur;
- sommige toeslagmaterialen (gebroken kalksteen, graniet, basalt en licht toeslagmateriaal) verminderen de kans op scheurvorming ten opzichte van riviergrind.

Uitvoering:

- fasering van de betonstorten (in verband met verhinderde vervorming);
- keuze bekisting (hout, staal, isolatie);
- vermijd snelle afkoeling (wind en regen kunnen een vers ontstort oppervlak snel afkoelen);
- voorkom ongelijkmatige verwarming door zon/schaduw effect;
- eventueel afvoeren van hydratiewarmte door koelen van verhardend beton.

De sterkteontwikkeling van beton is afhankelijk van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur hoe sneller de reactie verloopt. Als de reactie echter bij een hogere temperatuur verloopt, gaat dit ten koste van de eindsterkte. Hoe hoger de temperatuur tijdens de verharding, hoe lager de uiteindelijke sterkte (fig. 1).

Figuur 1 Invloed verhardingstemperatuur op sterkteontwikkeling

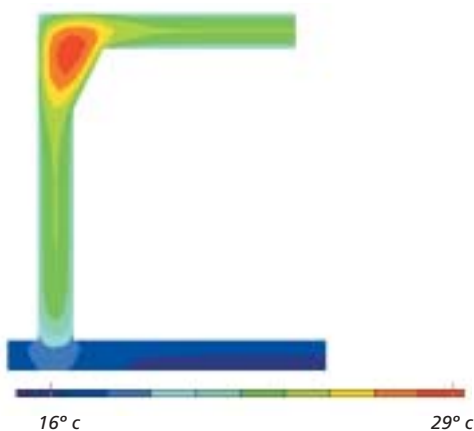


Het oplopen van de temperatuur in verhardend beton kan naast negatieve gevolgen als scheurvorming en lagere eindsterkte, ook een positieve invloed hebben. Bijvoorbeeld kan de temperatuurontwikkeling in de winter ervoor zorgen dat men ondanks een lage buitentemperatuur toch beton kan storten. Hoewel de reactie traag verloopt wordt er wellicht toch voldoende warmte ontwikkeld om bevriezing van het beton te voorkomen.

Temperatuursimulatie

Voor bepaalde betonconstructies kan scheurvorming een probleem zijn, bijvoorbeeld voor constructies met een waterkerende functie, zoals wanden van kelders en tunnels. Bij dergelijke constructies is het van belang om de temperatuurontwikkeling te beheersen opdat scheurvorming wordt voorkomen. Het temperatuurverloop in een betonconstructie tijdens de verharding kan tegenwoordig met geavanceerde rekenmodellen vooraf nauwkeurig worden berekend. Deze modellen rekenen met alle relevante invloedsfactoren, zoals vorm en afmeting van de constructie, weersomstandigheden, betonsamenstelling, type bekisting enz. (fig.2). In de voorbereidingsfase kunnen de gevolgen van verschillende mengselsamenstellingen, bekistingtypen enz.

Figuur 2 Berekende temperatuurverdeling in wand en dak van een tunnel, 36 uur na storten

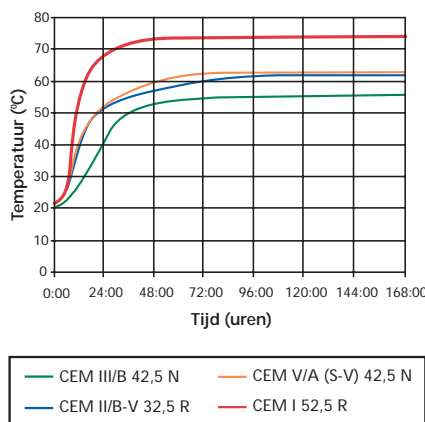


voor het temperatuurverloop worden geanalyseerd. Deze rekenmodellen worden gebruikt door grote opdrachtgevers, gespecialiseerde aannemers en onderzoeksinstituten.

Zoals hiervoor al aangegeven, kan de de hydratatiwarmte van verhardend cement worden gemeten. Dit gegeven is echter niet bruikbaar voor het berekenen van de temperatuurontwikkeling in een betonconstructie. Daarvoor is de karakteristieke temperatuurontwikkeling van de betonsamenstelling zelf nodig, de zogeheten adiabaat.

Een adiabaat geeft de temperatuurontwikkeling in verhardend beton weer, waarbij alle ontwikkelde warmte in het beton blijft. Er heeft dus geen afkoeling plaats. Dit is te vergelijken met de temperatuurontwikkeling in het hart

Figuur 3 Voorbeeld van een adiabaat



van een oneindig groot betonblok. (fig.3) Een adiabaat is afhankelijk van de betonsamenstelling. Het zijn de cementsoort, het cementgehalte, de water-cementfactor en dergelijke die bepalen of het verloop van de temperatuurontwikkeling sneller of langzamer gaat en of een bepaalde maximumtemperatuur wordt bereikt. Een adiabaat wordt bepaald in een laboratoriumbeproeving. De adiabaat van een betonmengsel geldt voor de onderzochte mengselsamenstelling. Als er relevante wijzigingen optreden

in de grondstoffen of de samenstelling, moet de adiabaat opnieuw worden bepaald.

Slot

We weten dat tijdens het verharden van beton warmte wordt ontwikkeld. Deze warmte komt vrij bij de chemische reactie tussen cement en water. Temperatuurontwikkelingen in betonconstructies kunnen aanleiding zijn tot scheurvorming. Het risico op scheurvorming kan vooraf met computermodellen worden berekend. Als invoer voor het model is de warmteontwikkeling van het desbetreffende betonmengsel benodigd. Hiervoor moet een zogeheten adiabaat worden bepaald. De hydratatiwarmte die aan verhardend cement wordt gemeten is hiervoor niet bruikbaar.

Literatuur

1. Betoniek 6/5, Hydratatiwarmte van cement.
2. Betoniek 6/10, Temperatuurontwikkeling in beton.
3. Betoniek 8/15, Eigenschappen van beton.
4. Betoniek 9/23, Warmte en verharding.
5. Betoniek 10/23, Thermische spanningen.
6. Betoniek 11/28, Van kubus tot constructie.

Inlichtingen

Voor aanvullende informatie: Technische Voorlichting ENCI