

Betoniek

Eigenschappen
Sterktebepaling

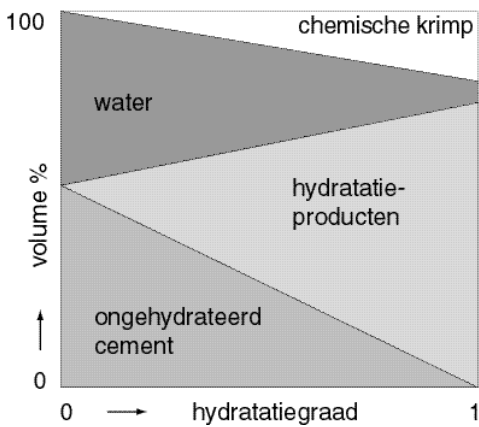
Elektrisch sterkte bepalen

In deze aflevering van **Betoniek** behandelen we een splinternieuwe methode voor het volgen van de sterkteontwikkeling van jong beton. Deze methode is gebaseerd op de elektrische eigenschappen van verhardend beton. Bij het toenemen van de betonsterkte veranderen deze eigenschappen als gevolg van het hydratatieproces. We behandelen het meetprincipe en kijken naar de toepassingsmogelijkheden aan de hand van laboratoriumbeoordelingen en de eerste resultaten van metingen in de praktijk.

Na het storten en verdichten van betonspecie begint een ingewikkeld chemisch en fysisch proces: de hydratatie. Hydratatie is de reactie tussen cement en water. Hierbij wordt het water in het poriënsysteem chemisch gebonden en ontstaan cementhydraten. Deze overbruggen de ruimte tussen de cementdeeltjes en groeien in elkaar. Zo ontstaat geleidelijk een steeds sterker wordende cementsteen en ontwikkelt het beton steeds meer sterkte. Bij toenemende sterkte veranderen ook de elektrische eigenschappen van het verhardende beton. Met name de geleidbaarheid voor elektrische stroom verandert sterk.

Elektrische eigenschappen van beton

De elektrische eigenschappen van beton worden grotendeels bepaald door het water dat zich in de poriën van de cementsteen bevindt. Dit water bevat veel opgeloste ionen en andere elektrisch geladen deeltjes, waardoor beton elektrische stroom kan geleiden (zie kader op blz. 2). Tijdens het hydratatieproces neemt de geleidbaarheid af, omdat de hoeveelheid met water gevulde poriën afneemt. Dit water reageert immers met cement tot cementhydraten (figuur 1).



1 De componenten in cementsteen bij toenemende hydratatie

Over elektrische geleidbaarheid

Weerstand

Elk voorwerp dat elektrische stroom geleidt, zou je een weerstand kunnen noemen. 'Stroom geleiden' betekent dat er elektrisch geladen deeltjes (elektrische lading) door het voorwerp stromen. Voorwerpen van metaal geleiden elektriciteit doordat negatief geladen elektronen er vrij doorheen kunnen bewegen. Water waarin zouten zijn opgelost, geleidt ook elektrische stroom. In dit geval zijn de positief en negatief geladen zoutionen voor het ladingstransport verantwoordelijk. De elektrische weerstand van een voorwerp is afhankelijk van het materiaal en van de afmetingen.

'Waterweerstand'

Vaak wordt elektrische stroom vergeleken met stromend water: een drukverschil zal een waterstroom op gang brengen wanneer er een 'watergeleidend pad' bestaat. De sterkte van de waterstroom wordt enerzijds bepaald door het drukverschil en anderzijds door de weerstand die het watergeleidend pad voor het water vormt. Zo zal door een korte, dikke tuinslang het water beter stromen, dan door een lange, dunne tuinslang. Een korte, dikke tuinslang heeft een veel kleinere 'waterweerstand' dan een lange, dunne tuinslang.

Wet van Ohm

Wanneer we in het watervoorbeeld het begrip 'drukverschil' vervangen door 'spanningsverschil' en het begrip 'waterstroom' door 'elektrische stroom' dan kunnen we de tegengestelde

Diezelfde cementhydraten zijn verantwoordelijk voor de sterkteontwikkeling van het beton. De afname van de geleidbaarheid voor elektrische stroom gaat dus samen met de toename van de betonsterkte. Door de geleidbaarheid van verhardend beton te meten, kunnen we dus iets zeggen over de sterkteontwikkeling. Er is nu een meetmethode ontwikkeld, die van dit principe gebruikmaakt: de Consensor.

De Consensor bestaat uit een 'voeler' (sensor) waarmee de geleidbaarheid van het beton kan worden gemeten en een computer met software die de sensor aanstuurt en de gemeten gegevens bewaart en daaruit de relatie geleidbaarheid - betonsterkte berekent (foto 2)

werking van spanningsverschil en weerstand op de stroomsterkte uitdrukken als de wet van Ohm:

$$\text{Stroom} = \frac{\text{spanning}}{\text{weerstand}}$$

De wet van Ohm laat zien dat de stroomsterkte evenredig is met het spanningsverschil en omgekeerd evenredig met de weerstand.

Geleidbaarheid

De eenheid van elektrische weerstand is de Ohm (Ω)

Voorwerpen die de stroom goed geleiden, hebben een lage weerstand.

Geleidbaarheid wordt ook wel met een andere eenheid aangegeven: de Siemens (S)

In deze **Betoniek** wordt de eenheid milliSiemens (mS) gebruikt.

$$1 \text{ Siemens} = \frac{1}{1 \text{ Ohm}}$$

Een voorwerp met een weerstand van nul Ohm heeft een oneindig grote geleidbaarheid.

Temperatuurafhankelijkheid van weerstand

De weerstand van een voorwerp hangt af van de temperatuur.

Bij metalen neemt weerstand toe met de temperatuur.

Bij hogere temperatuur ondervinden de vrije elektronen die het ladingstransport verzorgen meer wrijving tijdens hun reis door het metaalatomrooster dat bij hogere temperatuur heftiger vibreert. Er bestaan echter ook stoffen waarvan de weerstand juist afneemt met de temperatuur. Daarom zit er in de Consensor-software een factor om op temperatuur te corrigeren.

plaatsingsgereedschap

handheld computer



elektrodeset

diëlektrische sensor



temperatuursensor

2 De onderdelen van de Consensor

Relatie geleidbaarheid en betonsterkte

Uit onderzoek aan de TU-Delft is gebleken dat de relatie tussen geleidbaarheid en betonsterkte kan worden weergegeven met de volgende formule:

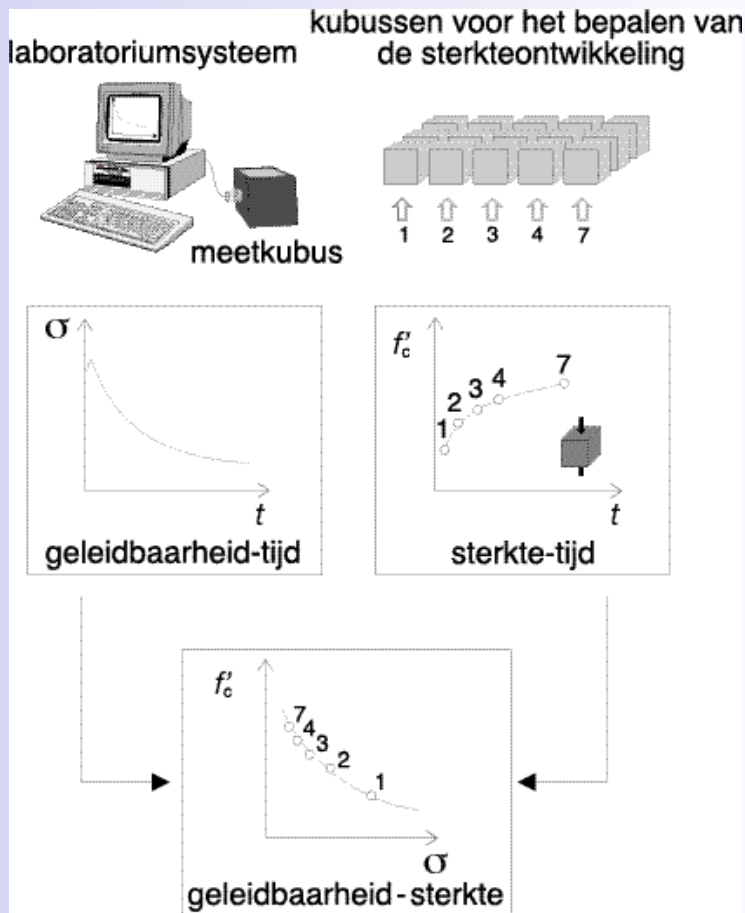
$$f'_c = A - B(\sigma_0)^m$$

Hierin is:

- f'_c : de berekende druksterkte in N/mm^2 .
- σ_0 : de op een bepaald tijdstip gemeten geleidbaarheid in mS/cm (milli-Siemens per cm)
- A : de theoretische druksterkte van een beton zonder poriën in de cementsteen (bij geleidbaarheid σ_0) in N/mm^2 . Deze sterkte zal in werkelijkheid nooit behaald worden omdat beton altijd poreus blijft.
- B : de reductiefactor die bepaalt in welke mate de poriën effect hebben op de sterkte van het beton.
- m : een constante die de geleidbaarheid vertaalt naar een hoeveelheid poriën in een betonmengsel.
- $B(\sigma_0)^m$: de reductie op de theoretische maximale druksterkte veroorzaakt door de poriën in het beton.

Werken met elektrische sterktebepaling

De werkwijze bij de elektrische sterktebepaling van beton lijkt veel op die bij de methode van de gewogen rijpheid (*Betoniek* 11/19). Alleen moeten we in plaats van de rijpheid (betontemperatuur en verhardingstijd) de geleidbaarheid van het verhardende beton meten. Bij de elektrische sterktebepaling is ook een ijkgrafiek nodig. Daarin moet de relatie tussen de geleidbaarheid en de druksterkte van een bepaalde betonsamenstelling worden weergegeven. Deze relatie moeten we, net als bij de gewogen rijpheid, vooraf experimenteel bepalen. Dat gebeurt door zowel de geleidbaarheid als de sterkteopbouw van het verhardende beton op een aantal tijdstippen te bepalen. Daartoe vullen we een set kubusmallen met een bepaalde betonsamenstelling. Eén mal heeft een demontabele zijde waarin de sensor met de elektroden wordt geplaatst om de geleidbaarheid te meten. De overige kubussen, die onder dezelfde omstandigheden verharden als de kubus met de elektrodeset, gebruiken we om de sterkteontwikkeling te volgen. Dat doen we door de druksterkte te bepalen bij een ouderdom van bijvoorbeeld 1, 2, 3, 4 en 7 dagen. Op die momenten wordt in de kubus met de elektroden ook de geleidbaarheid gemeten (figuur 3).



3 *Bepalen van de relatie tussen geleidbaarheid en druksterkte, schematisch weergegeven*

Op basis van deze meetgegevens kan de Consensor-software de relatie druksterkte - geleidbaarheid berekenen (de software gaat daarbij uit van de formule van blz. 3). Hieruit volgen de waarden voor A, B, α en m, waarmee we de ijklijn kunnen beschrijven. Vervolgens kunnen we door in het werk de geleidbaarheid te meten de druksterkte (f'_c) berekenen op basis van de gevonden relatie.

Temperatuurcorrectie

De geleidbaarheid van het beton is ook afhankelijk van de temperatuur. Om een betrouwbare benadering voor de druksterkte te krijgen, moet de gemeten geleidbaarheid gecorrigeerd worden voor de

gemeten temperatuur. Daartoe is in de Consensor-software een temperatuurcorrectie ingebouwd. Deze correctie kan worden weergegeven met de volgende formule:

$$f_{corr} = f_{meas} (1 + (20 - T) \alpha)$$

Hierin is:

- f_{corr} : de voor de temperatuur gecorrigeerde geleidbaarheid in mS/cm
- f_{meas} : de gemeten geleidbaarheid in mS/cm
- α : de temperatuurcoëfficiënt in $1/^\circ\text{C}$
- T : de gemeten temperatuur in $^\circ\text{C}$

De temperatuurcoëfficiënt varieert tussen 0,01 - 0,03 per °C. Deze coëfficiënt kan worden bepaald door een verhard proefstuk op te warmen of af te koelen en daarbij de veranderingen in de geleidbaarheid te bepalen. De temperatuurcoëfficiënt van jong beton blijkt voornamelijk afhankelijk van de gebruikte cementsoort.

Vochtverlies aan betonoppervlak

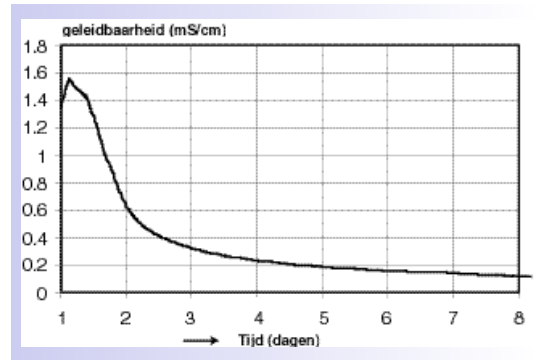
De tot nu gebruikte sensor meet de geleidbaarheid vrij dicht bij het betonoppervlak. Plaatselijke afwijkingen in het vochtgehalte kunnen de meting verstoren. Daarbij moet je denken aan sterk uitdrogen of benatten van het oppervlak. De sensor dient daarom zo veel mogelijk afgeschermd te worden voor deze invloeden.

Voorbeeld opstellen ijklijn

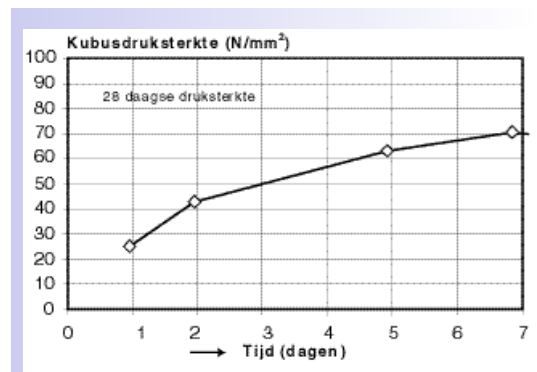
In dit voorbeeld gaan we uit van beton in sterkteklasse B 65. Daarvan gaan we met behulp van de Consensor-apparatuur de relatie druksterkte - geleidbaarheid bepalen. De betonspecie wordt in een serie kubusmallen gestort, waarvan er één voorzien is van de elektrodeset. Aan laatstgenoemde kubus wordt de elektrische geleidbaarheid gemeten. De overige kubussen worden gebruikt om na 1, 2, 5 en 7 dagen de druksterkte te bepalen (zie ook "Werken met elektrische sterktebepaling").

Om de relatie geleidbaarheid - druksterkte te bepalen, zijn de gemeten kubusdruksterktes in de computer ingevoerd. De software combineert deze meetwaarden met de gemeten geleidbaarheid en berekent de waarden A , B , α en m uit de formule op blz. 3. De geleidbaarheid gedurende de eerste 7 verhardingsdagen is weergegeven in figuur 4 en de sterkteontwikkeling in de tijd in figuur 5.

In figuur 4 zien we dat de geleidbaarheid de eerste uren toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door het in oplossing gaan van ionen. Daarna neemt de geleidbaarheid alleen nog maar af. In de eerste twee dagen gaat dat relatief snel, daarna veel langzamer. In principe zien we dit verloop bij elke betonsamenstelling. Het exacte verloop is echter afhankelijk van de samenstelling van het beton.



4 Geleidbaarheid in de tijd van een betonsterkteklasse B 65

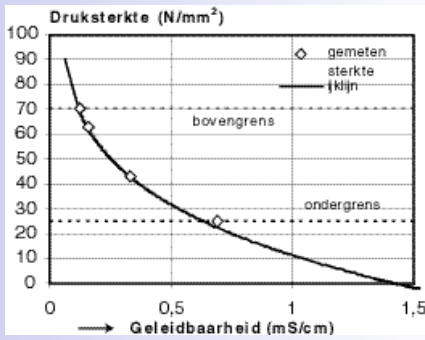


5 Sterkteontwikkeling in de tijd van een betonsterkteklasse B 65

De relatie tussen geleidbaarheid en druksterkte (ijklijn) kan nu berekend worden met de formule van blz 3 (zie tabel). Deze relatie is natuurlijk alleen geldig in het gemeten gebied: hier tussen de laagste (25 N/mm²) en de hoogste druksterkte (71 N/mm²) die bepaald zijn voor de ijklijn. Bij extrapolatie onder en boven deze waarden kan een grote afwijking ontstaan tussen de berekende en de werkelijke sterkte in de constructie. De relatie geleidbaarheid - druksterkte voor het onderzochte betonmengsel staat in figuur 6.

Tabel. De in het voorbeeld berekende waarden voor de ijklijn

A	163	N/mm ²
B	150	
α	0,02	mS/cm
m	0,2	



6 Relatie tussen geleidbaarheid en druksterkte van een betonsterkteklasse B 65

Wanneer vervolgens de gemeten geleidbaarheid van een betonconstructie ingevoerd in de formule $f'_c = A - B(\sigma - \sigma_0)^m$ kan de betonsterkte berekend worden. Een rekenvoorbeeld maakt het duidelijker: Indien een geleidbaarheid van 0,4 mS/cm wordt gemeten wordt de druksterkte als volgt bepaald :

$$f'_c = 163 - 150(0,4 - 0,02)^{0,2} = 36,4 \text{ N/mm}^2,$$

Bij een gemeten geleidbaarheid van 0,2 mS/cm:

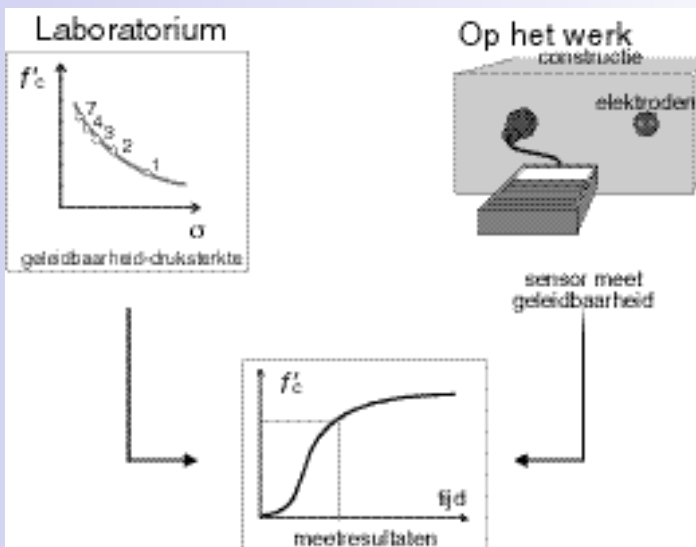
$$f'_c = 163 - 150(0,2 - 0,02)^{0,2} = 56,5 \text{ N/mm}^2$$

Ontwikkeling Consensor

De sensor die de basis vormt voor de elektrische sterktebepaling van beton is oorspronkelijk ontwikkeld voor vochtmetingen in de bodem door een landbouwkundige onderzoeksinstelling: IMAG-DLO. Vervolgens is het principe opgepakt door OFFIS, een bureau dat innovatieve ontwikkelingen naar de markt brengt. Samen met de kennis over jong verhardend beton, aanwezig op sectie betonconstructies van de TU Delft, kon de sensor voor sterktebepaling van beton worden ontwikkeld. De apparatuur, die verkrijgbaar is onder de naam 'consensor', is dus voortgekomen uit een samenwerking tussen verschillende onderzoeksinstellingen.

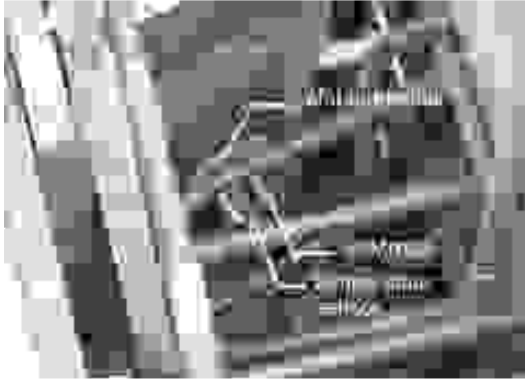
Bepalen van de sterkte in het werk

Met de gemaakte ijkgrafiek waarin de relatie tussen de geleidbaarheid en druksterkte van één bepaalde betonsamenstelling is beschreven, kan de sterkte in de betonconstructie bepaald worden. Daarvoor dient in het werk de geleidbaarheid in de betonconstructie te worden gemeten (figuur 7 en foto 8 en 9).



7 Schematische opstelling voor het bepalen van de sterkte op het werk

De relatie geleidbaarheid - druksterkte, die in het laboratorium bepaald is, wordt in de computer gebracht. De computer leest de sensor uit en slaat de gemeten geleidbaarheid en temperatuur van het beton op. Met deze gegevens is het mogelijk om de op dat moment bereikte druksterkte te berekenen.



8 *Plaatsing van de sensor bij het bepalen van de sterkte in het werk*



9 *Zo wordt na het ontkisten de elektrische geleidbaarheid gemeten.*

Ervaringen

Inmiddels is zowel op laboratoriumschaal als in de praktijk de nodige ervaring opgedaan met deze nieuwe meetmethode. Daarbij is van een groot aantal verschillende betonsamenstellingen en betonkwaliteiten de relatie geleidbaarheid - druksterkte bepaald. Deze samenstellingen verschilden onder meer ten aanzien van de cementsoort, het cementgehalte, de water-cementfactor, het sterkteniveau en de aard van het toeslagmateriaal. Ook zijn verschillende verhardingsomstandigheden gesimuleerd. Uit het onderzoek is gebleken dat de relatie geleidbaarheid - druksterkte goed reproduceerbaar kan worden vastgelegd.

Evenals bij de methode van de gewogen rijpheid geldt deze relatie voor slechts één betonsamenstelling. De methode lijkt relatief ongevoelig voor het niveau van de water-cementfactor. Daarmee bedoelen we dat de relatie geleidbaarheid - druksterkte niet (sterk) wijzigt als de water-cementfactor verandert.

Wél is gebleken dat de hoeveelheid en het soort cement grote invloed hebben op de relatie. Het is bekend dat ionentransport in beton met hoogoven cement veel langzamer verloopt dan bij beton met portlandcement. Ook de aard van het toeslagmateriaal en de toepassing van hulpstoffen kan de geleidbaarheid beïnvloeden.

De invloed van vochtwisselingen in het betonoppervlak op de gemeten geleidbaarheid is eerder genoemd. Indien de sensor hiertegen wordt afgeschermd, zijn betrouwbare metingen mogelijk. Ook het verder verkleinen van de sensor, zodat deze dieper in de betonconstructie kunnen worden aangebracht, kan in de toekomst hiervoor uitkomst bieden.

Een optie die op dit moment nader wordt onderzocht, is de relatie tussen geleidbaarheid en duurzaamheid. De elektrische weerstand van beton is ongetwijfeld gerelateerd aan de (snelheid van) de chloride-diffusie in beton. Dit is een belangrijke duurzaamheidsparameter!

Tot slot

Het grootste voordeel van de methode is wellicht dat elke meetwaarde met behulp van de ijkgrafiek kan worden vertaald in een druksterkte. Dit betekent dat, in tegenstelling tot de methode van de gewogen rijpheid, de 'voorgeschiedenis' van het beton niet bekend hoeft te zijn. De ouderdom of het temperatuurverloop tot het moment van meten spelen immers geen rol.

De tot nu opgedane ervaringen uit uitgebreide laboratoriumproeven en de tot nu toe uitgevoerde praktijkproeven geven aan dat deze meetmethode onze serieuze aandacht verdient.

Literatuur

- **Betoniek** 11/19 Rijpheid in ontwikkeling
- **Betoniek** 6/20, Gewogen rijpheid
- Hilhorst M.A., Dielectric Characterisation of Soil, proefschrift, p. 141, Wageningen, 1998.
- Beek van A., Diëlektrische betonsterktemeter, Metingen bij betonmortelcentrale Van der Velden, Stevin rapport 25.5-99-6, p. 17, 1998.
- Beek van A., K. van Breugel, M.A. Hilhorst, In Situ monitoring system based on dielectric properties of hardening concrete, Structural faults + Repair -97, Volume 2 'Concrete + Composites', Edinburgh, pp. 407 - 414, July 1997.
- Beek van A., Horeweg E.M., Diëlektrische sterkte bepaling van jong beton bij uitbouwbrug te Vianen, Stevin rapport 25.5.99-7, p. 27, 1999.
- Beek van A en D. van Amstel, Consensor, een nieuwe methode voor de sterktebepaling van jong beton, *Cement* 2000, nr. 1. pp. 56-59, januari 2000.

Met dank aan A. van beek (TU-Delft) en F.C. van Rijn (Groningen) voor hun bijdrage aan deze *Betoniek*.

In onze volgende uitgave

Het eeuwige leven?

De gebruikelijke manier om bij het ontwerp van betonconstructies te zorgen voor de duurzaamheid is het opvolgen van een aantal 'recepten' die in de betonvoorschriften zijn vastgelegd. Als deze worden opgevolgd, mogen we aannemen dat de betonconstructie voldoende duurzaam is. De werkelijke levensduur van de constructie is echter niet bekend, net als de hoeveelheid onderhoud die gedurende het leven van de constructie nodig is. In de afgelopen jaren is een ontwikkeling in gang gezet om constructies ook op basis van levensduur te ontwerpen, uitgaande van prestaties en betrouwbaarheid. Deze filosofie is inmiddels toegepast bij het ontwerp van de boortunnel onder de Westerschelde. Daarom in de volgende *Betoniek* een kennismaking met ontwerpen op levensduur.

Colofon

Betoniek is een praktijkgericht voorlichtingsblad op het gebied van de betontechnologie en verschijnt 10 keer per jaar. In de redactie zijn vertegenwoordigd: de Nederlandse cementindustrie, MEBIN, CUR, vocBETONBOUW en de Bouwdienst Rijkswaterstaat.

Uitgave: ENCI Media
postbus 3532, 5203 DM 's-Hertogenbosch
Redactie: 073 - 640 12 22
Abonnementen: 073 - 640 12 31
Adreswijzigingen per fax: 073 - 640 12 99

Overname van artikelen en illustraties is toegestaan, onder voorwaarde van bronvermelding.

Abonnementsprijzen:
Nederland f 34,- (€ 15,43)
België f 35,- (€ 15,88)
Andere landen f 49,- (€ 22,24)

Abonnementen lopen per kalenderjaar en worden automatisch verlengd, tenzij voor 1 december schriftelijk wordt opgezegd.
ISSN 0166-137x

