

HOOGWAARDIG BETON

Hoe is de eis 'minder water voor meer sterkte en duurzaamheid' te verzoenen met de eis 'meer water voor een betere verwerkbaarheid' ? Het ontwarren van die gordiaanse knoop vormde de inzet van jarenlang betontechnologisch onderzoek. De ontdekking van zeer krachtige superplastificeers zorgde voor de doorbraak. Deze hulpstoffen hebben als effect dat zij beton vloeibaarder maken zonder toevoeging van water. Zij liggen aan de basis van de ontwikkeling van hoogwaardig beton dat vooral in de prefab sector zijn toepassing gevonden heeft.

Hoogwaardig beton heeft een verbeterde duurzaamheid en een hogere sterkte. Het kan hogere lasten dragen of slanker worden uitgevoerd. Het kan een meer complexe vorm aannemen en grotere ruimten overspannen.

In wat volgt wordt eerst aandacht besteed aan nieuwe betontechnologische ontwikkelingen. Vervolgens worden de samenstelling, de verwerking en de eigenschappen van hoogwaardig beton behandeld. Tenslotte worden mogelijke toepassingen toegelicht aan de hand van enkele voorbeelden.

DOSSIER CEMENT

40
juli 2007

beton
mechanische
prestaties

	f2	(J4)
BBS/fB		

1. Hogesterktebeton

De druksterkte wordt doorgaans beschouwd als de meest kenmerkende eigenschap van beton. Sinds de ontdekking van het gewapend beton was onderzoek erop gericht methoden te vinden om die sterkte te verhogen. De laatste decennia vooral is er op dat vlak een enorme vooruitgang geboekt. In de Verenigde Staten van Amerika werd in de jaren 1950 een druksterkte van 35 MPa al als hoge sterkte beschouwd. In de jaren 1970 was de grens al opgelopen tot 70 MPa, terwijl in 1990 het begrip hogesterktebeton voorbehouden was voor een beton met druksterkte tussen 80 en 100 MPa. En de evolutie houdt niet op! Voor sommige zeer recente constructies worden zelfs druksterktes vermeld van meer dan 120 MPa. Het begrip ‘hoge sterkte’ is dus erg relatief, en blijkbaar evolutief. Het is dan ook niet verwonderlijk dat er verschillende definities van ‘hogesterktebeton’ bestaan.

Volgens de nieuwe Europese norm EN 206-1 wordt beton als ‘hogesterktebeton’ beschouwd vanaf een sterkteklasse van C55/67. Het eerste getal achter de letter C verwijst naar de karakteristieke druksterkte gemeten op cilinders van 300 mm hoog met een diameter van 150 mm, het tweede naar de karakteristieke druksterkte gemeten op kubussen met een zijde van 150 mm. De definitie vermeldt geen maximale sterkteklasse. De facto kan zij wel afgeleid worden uit de lijst van mogelijke sterkteklassen die oploopt tot klasse C100/115 (tabel 1).

2. Hoogwaardig beton

De toename van de druksterkte van beton gaat vaak gepaard met de verbetering van andere belangrijke eigenschappen, zoals de treksterkte, de stijfheid, de slijtvastheid, de duurzaamheid, enz... Voor sommige toepassingen kunnen deze eigenschappen zelfs van groter belang zijn dan het behaalde sterkteniveau. In dat geval moeten de keuze van de bestanddelen en de samenstelling niet zozeer afgestemd worden op het bereiken van een zo hoog mogelijke sterkte, maar eerder op het behalen van een zo goed mogelijke prestatie van de gewenste eigenschappen. De bereikte hogere sterkte is dan – bij manier van spreken – een effect van tweede orde.

In dat opzicht dekt de naam ‘hogesterktebeton’ onvoldoende de lading. Daarom gaat de voorkeur uit naar ‘hoogwaardig beton’, een naam die veel omvattender is. Het is zelfs mogelijk een beton te bekomen dat hoogwaardig is met betrekking tot een bepaalde eigenschap, doch geen uitgesproken hoge sterkte bezit. Zo werd zelfverdichtend beton in Japan aanvankelijk omschreven als hoogwaardig beton, omwille van de uitzonderlijke verwerkbaarheid en de (naar alle verwachting) toegenomen duurzaamheid. Zelfverdichtend beton hoeft echter niet noodzakelijk een ‘hogesterktebeton’ te zijn.

3. Afbakening van het onderwerp

Het onderwerp ‘hoogwaardig beton’ is erg uitgebreid. Het behelst alle aspecten die het verschil uitmaken met traditioneel beton. Het gaat dus over veranderingen met betrekking tot zowel de bestanddelen, de samenstelling, de verwerking als de eigenschappen.

Elk van deze vier onderwerpen wordt verder behandeld. Vooraf wordt echter gepeild naar de nieuwe inzichten en ontwikkelingen op betontechnologisch vlak die de productie van hoogwaardig beton mogelijk maken.

De uitgebreidheid van het onderwerp noopt tot synthese. Omwille van het zeer specifieke concept van zelfverdichtend beton wordt deze ontwikkeling niet besproken in deze tekst (zie Dossier Cement - bulletin nr. 36).

4. Algemeen: nieuwe ontwikkelingen op betontechnologisch vlak

Het dilemma: meer of minder water...

Jarenlang werden alleen granulaten, cement en water gebruikt voor het maken van beton. Water vervult daarbij een dubbele rol: het verzekert de cementshydratatie en geeft aan de betonspecie de nodige verwerkbaarheid. Deze verwerkbaarheid vraagt echter meer water dan strikt nodig voor de hydratatie. Een gedeelte van het water – bij een water-cementfactor gelijk aan 0,5 ongeveer de helft van het aanmaakwater – blijft dan ook over na het bindings- en verhardingsproces. Het zit overal in het beton verspreid, en veroorzaakt een netwerk van poriën en holten. Naarmate het overschot aan water omvangrijker is, zullen de gemiddelde poriëndiameter en het poriënvolume toenemen. Meer en grotere poriën veroorzaken een zwakkere materiaalstructuur, en leiden dus tot een minder sterk beton.

Tabel 1 – Sterkte-eigenschappen en vervoormingskenmerken volgens de norm EN 1992-1-1:2004

		Sterkteklassen													
		└─ hogesterktebeton													
f _{ck}	karakteristieke cilinderdruksterkte [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f _{ck,cube}	karakteristieke kubusdruksterkte [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f _{cm}	gemiddelde druksterkte [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f _{ctm}	gemiddelde rechtstreekse treksterkte [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
E _{cm}	secans elasticiteitsmodulus [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε _{c1}	vervorming bij belastingspiek [%]	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8

Er bestaat dus een rechtstreeks verband tussen de druksterkte en het toegevoegde aanmaakwater in het beton, of – meer wetenschappelijk geformuleerd – tussen de druksterkte en de verhouding van de water- tot de cementhoeveelheid, de zogenaamde water-cementfactor, W/C. Naarmate die factor hoger of lager is, zal de sterkte af- of toenemen. Deze vaststelling is niet nieuw. De Fransman René F  ret kwam reeds in 1894 proefondervindelijk tot hetzelfde besluit (fig. 1). De sterkte-toename is evenwel begrensd. Vanaf een bepaalde te lage water-cementfactor wordt het beton onverwerkbaar. De holten en de poriën die daarvan het gevolg zijn, doen de sterkte weer verminderen, zoals aangegeven in de figuur.

Gaandeweg ontdekten de onderzoekers dat er ook een verband bestaat tussen de water-cementfactor en de duurzaamheid. Het poriënvolume is uitgesmeerd over een netwerk van oneindig veel, grillig gevormde ruimten. De meeste van die ruimten of poriën bezitten een diameter van 10^{-9} tot 10^{-8} m – de zogenaamde gelporiën – en zijn zo klein dat transport van moleculen (damp, gassen, enz.) daardoor onmogelijk is. Maar er zijn ook grotere poriën – de zogenaamde capillaire poriën – met een diameter van 10^{-7} tot 10^{-5} m. Hun aandeel hangt af van de water-cementfactor en van de mate waarin het cement gehydrateerd is, uitgedrukt door de hydratatiegraad. Hoe hoger de hydratatiegraad, hoe meer cement gehydrateerd is, hoe meer water gebonden is, en hoe minder vrij water er dus over is. In figuur 2 is aangegeven hoe het capillair poriënvolume daalt bij een dalende water-cementfactor en een stijgende hydratatiegraad. In de capillaire poriën kunnen vocht, waterdamp, gassen en allerhande schadelijke stoffen relatief gemakkelijk binnendringen, migreren en het materiaal van binnenuit eventueel aantasten. Een beton wordt dus duurzamer naarmate het poriënvolume verkleint (lagere porositeit, grotere compactheid) en de poriën versmallen (lagere permeabiliteit). De water-cementfactor moet dus zo laag mogelijk zijn ...

Fig. 1 – Verband tussen druksterkte en water-cementfactor

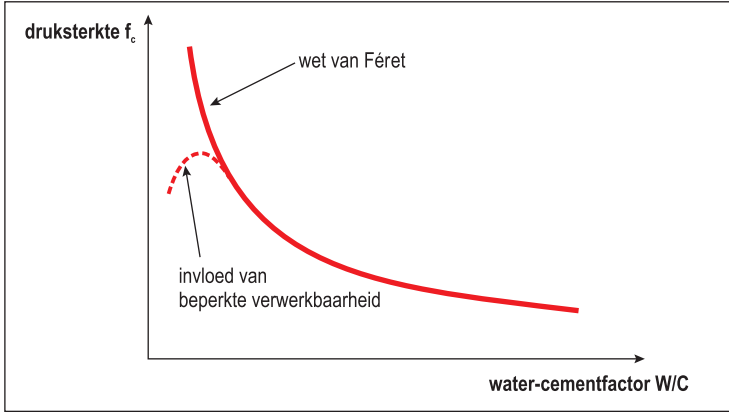
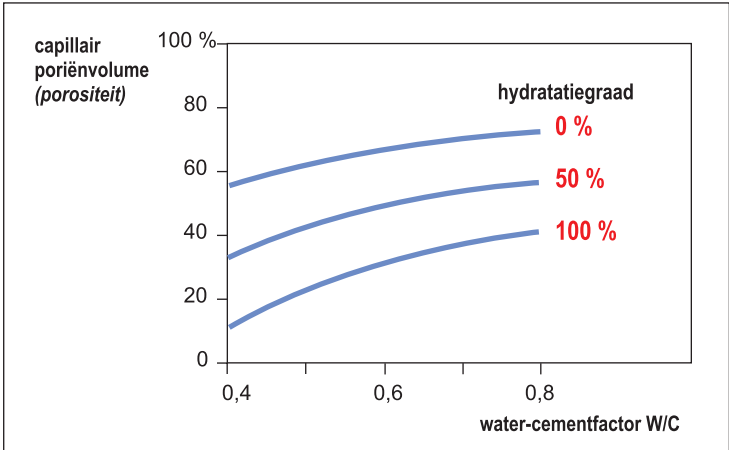


Fig. 2 – Verband tussen porositeit en W/C-factor voor verschillende hydratatiegraden



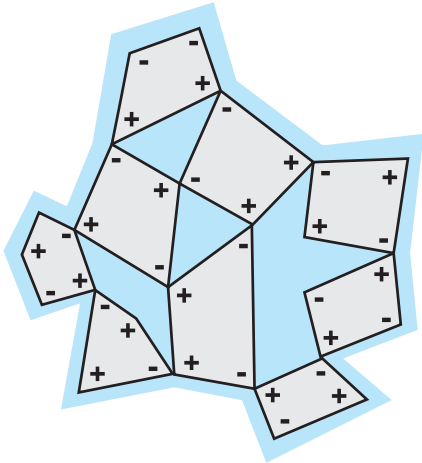
Maar wat dan met de verwerkbaarheid? Hoe is de eis ‘minder water voor meer sterkte en duurzaamheid’ te verzoenen met de eis ‘meer water voor een betere verwerkbaarheid’? Het ontwarren van die gordiaanse knoop vormde de inzet van jarenlang onderzoek.

Ontdekking van superplastificeerders

De ontdekking van plastificeerders – en dan vooral van zeer krachtige superplastificeerders in de jaren 1970 – zorgde voor de doorbraak. Deze hulpstoffen hebben als effect dat zij beton vloeibaarder maken zonder toevoeging van water.

Het oppervlak van elke cementkorrel bevat vrije elektrische ladingen. Tegengestelde ladingen trekken elkaar onderling aan. In contact met water zullen de korrels zich daarom in vlokken aan elkaar rijgen. Het aanmaakwater dat zich tussen de vlokken bevindt, geraakt evenwel ingesloten (fig. 3). Vanaf dat moment draagt het niet meer bij tot de vloeibaarheid van de cementpasta. Meer aanmaakwater is daarom nodig om de gewenste verwerkbaarheid te verkrijgen.

Fig. 3 – Tegengestelde ladingen op het oppervlak van de cementkorrels veroorzaken vlokvorming



Superplastificeers verhinderen de nefaste vlokvorming (fig. 4). Moleculen van de superplastificeerder hechten zich door adsorptie vast op het grensvlak tussen cementkorrel en aanmaakwater. Eens geadsorbeerd vormt de superplastificeerder een negatieve lading rond elk cementkorreltje. Hierdoor stoten de korrels zich onderling af. De dispersie die hiervan het gevolg is, verlaagt de viscositeit van de cementpasta en doet de verwerkbaarheid toenemen. Ook de moleculaire opbouw – in de vorm van lange kettingen – van de superplastificeerder draagt bij tot dit effect. Aan elkaar geregen tot slierten met vertakkingen in verschillende richtingen slingeren de moleculen zich tussen de cementkorrels door en belemmeren zo hun onderlinge toenadering. Met moderne ‘kamvormige’ polymeerstructuren is het mogelijk de water-cementfactor te verlagen tot minder dan 0,3. Door enkel gebruik te maken van een superplastificeerder is het mogelijk druksterkten te halen tot ongeveer 80 MPa.

Fig. 4 – Superplastificeers verhinderen vlokvorming :

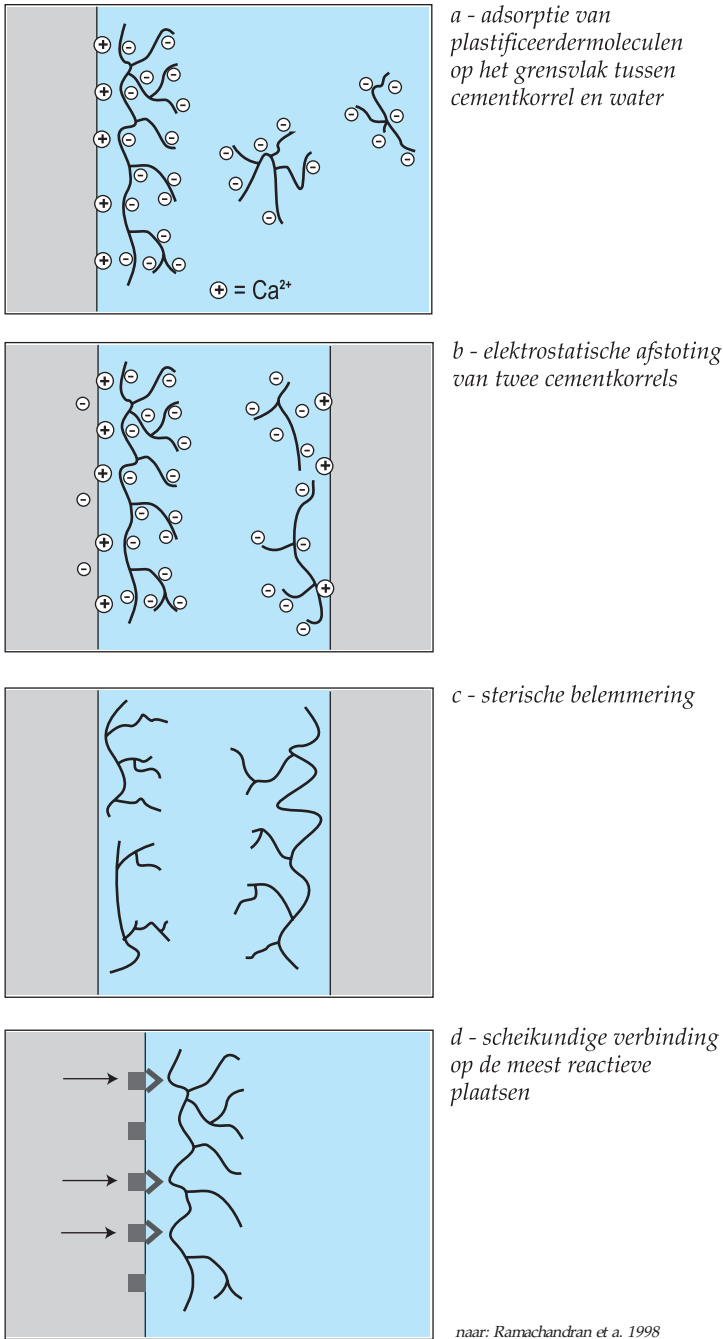
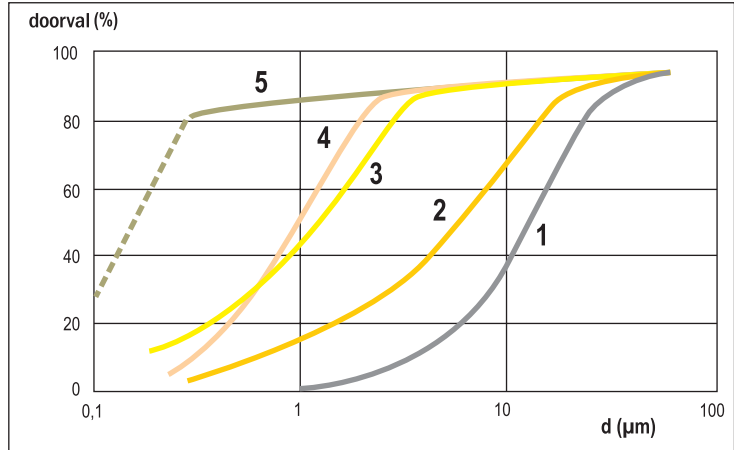


Fig. 5 – Korrelverdeling van fijne stoffen:
1 - cement
2 - fijne kalksteendeeltjes
3 - ultrafijne kalksteendeeltjes
4 - ultrafijne siliciumhoudende deeltjes
5 - silica fume



Effect van uiterst fijne stoffen (toevoegsels)

De vermindering van de water-cementfactor door het toevoegen van een superplastificeerder leidt tot een compacter beton. Onderzoek heeft evenwel uitgewezen dat de samenstelling van de belangrijke overgangszone tussen de granulaten en de cementsteen onveranderd blijft, dus niet compacter wordt. Deze zone is erg poreus en weinig sterk. Zij is slechts 40 μm breed, maar speelt een cruciale rol bij de krachtsopname door het beton.

Door het toevoegen van uiterst fijne stoffen (fig. 5) is het mogelijk om de miniholten in die overgangszone op te vullen. De aanwezigheid van superplastificeerder is daarbij essentieel om vlokvorming te vermijden. Mogelijke stoffen zijn onder andere vliegash, kalksteenfiller, gemalen kwarts, gemalen hoogovenslakken en silica fume. Silica fume heeft door haar kleine afmetingen en haar immens specifiek oppervlak het meeste effect. Het specifiek oppervlak van silica fume situeert zich tussen 15 000 en 25 000 m²/kg en is vele malen groter dan dat van cement, begrepen tussen 350 en 500 m²/kg. Tegelijk heeft silica fume ook puzzolanische eigenschappen. Zij bindt met de kalk die vrijkomt tijdens de cementhydratatie en draagt zo bij tot de sterkte.

Buiten de verdichting van de cementsteen rond de granulaten zorgen deze ultrafijne deeltjes voor een algemene betere vulling van het korrelskelet in het fijnste gebied. De dichtheid neemt toe, wat de duurzaamheid ten goede komt. Een bijkomend positief effect van deze toevoegsels is hun gunstige invloed op de stabiliteit van de specie. Deze invloed is vooral van belang voor het vervaardigen van beton-specie met een zeer hoge verwerkbaarheid. De sterkte van beton op basis van superplastificeerder en silica fume kan oplopen tot meer dan 100 MPa.

5. Samenstelling

Hogesterktebeton, of meer algemeen hoogwaardig beton, bestaat uit granulaten, water, cement, superplastificeerder en eventueel een toevoegsel (dikwijls *silica fume*). Soms wordt er ook een vertrager aan toegevoegd om de verwerkingstijd te verlengen. De superplastificeerder en de vertrager moeten onderling verenigbaar zijn, evenals met het gebruikte cement. Daar de betonsterkte uiteraard ook afhankelijk is van de cementsterkte, wordt voor hogesterktebeton meestal cement van klasse 52,5N aangewend, of eventueel 52,5R indien een zeer hoge aanvangsterkte gewenst is.

De gekende granulaten voor gewoon beton zijn in principe eveneens geschikt voor hogesterktebeton. Naarmate een hogere sterkte geïseerd wordt, neemt de mechanische weerstand van het granaat zelf aan belang toe. Zo zijn sterktes boven 100 MPa moeilijk haalbaar met kalksteen, maar wel met porfier of grind. Ook de vorm speelt een rol: gebroken granulaten leiden tot een sterktewinst van meer dan 10 MPa. Bovendien mag de maximale korreldiameter niet te groot zijn. Over het algemeen is de elasticiteitsmodulus van de granulaten immers hoger dan die van de cementsteen, zodat er spanningsconcentraties ontstaan ter hoogte van de granulaten. Door te opteren voor een kleinere korrel vlakken de concentraties uit tot kleinere pieken. Tegelijkertijd vermindert de gemiddelde hechtspanning tussen granulaten en cementsteen omdat het specifiek oppervlak toeneemt en er meer mortel nodig is om alle korrels te omhullen. Uiteraard mag de maximale korreldiameter ook niet te klein worden omdat anders het benodigde water om de granulaten te bevochtigen te groot wordt. Meestal neemt men een maximale korreldiameter tussen 10 en 20 mm, bijvoorbeeld 16 mm.

De samenstelling moet zodanig geoptimaliseerd worden dat de korrelopbouw van de grove tot de uiterst kleine delen zo compact mogelijk is. Enkel door het volume aan holten tussen de korrels tot een minimum te herleiden is het mogelijk om met een minimum aan cementpasta en water de combinatie van gewenste sterkte en verwerkbaarheid te verkrijgen. Door de veelheid aan bestanddelen is het bepalen van de optimale samenstelling geen sinecure. Een typische samenstelling bevat 450 kg cement, een water-cementfactor van 0,30, niet meer dan 10 % silica fume op basis van de cementmassa, en 10 liter superplastificeerder per m³ beton. De maximale korreldiameter bedraagt doorgaans niet meer dan 16 mm.

6. Verwerking

Gevoelig...

Samenstelling en eigenschappen van de verschillende bestanddelen zijn niet constant, maar variëren doorgaans binnen een bepaald tolerantiegebied. Kleine afwijkingen of onregelmatigheden bij het afwegen, mengen, vervoeren, storten en trillen zijn eveneens onvermijdelijk. Afhankelijk van de grootte van al die verschillen en hun interacties variëren de eigenschappen van het verse en het verharde beton in min of meerdere mate rond een gemiddelde waarde.

De voornaamste veranderlijken zijn het watergehalte en de cementhoeveelheid. De werkelijke water-cementfactor zal verschillen van de vooropgestelde en variëren binnen een bepaald gebied, het zogenaamde variatiegebied $\Delta_{w/c}$. Tussen de water-cementfactor en de druksterkte is er een verband zoals voorgesteld in *figuur 6*. Uit de figuur blijkt eveneens dat voor een bepaalde $\Delta_{w/c}$ het overeenstemmend variatie-interval van de druksterkte groter wordt voor een kleinere water-cementfactor. Met andere woorden, verschillen in watergehalte en cementdosering induceren een grotere sterktevariatie bij een lage water-cementfactor. Hoogwaardig beton is hieraan dus veel gevoeliger dan beton met normale sterkte. Het afwegen, mengen, storten, enz. moeten dus uiterst nauwkeurig gebeuren binnen zo klein mogelijke tolerantiemarges.

Nabehandeling

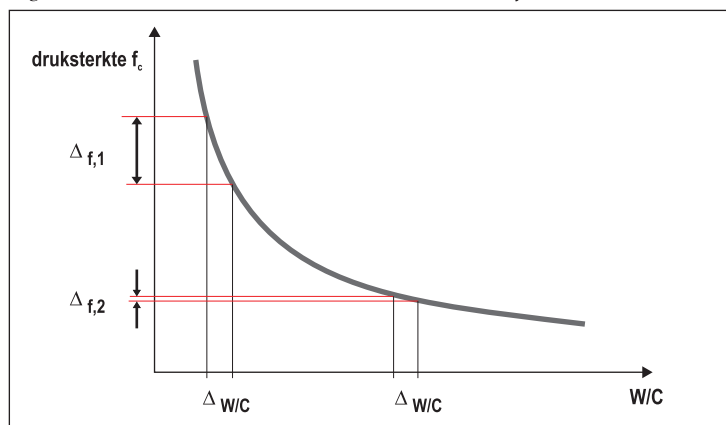
Het weinige water dat gezien de lage water-cementfactor in hoogwaardig beton aanwezig is, moet na het storten in het beton blijven voor de reactie met het cement. De ultrafijne deeltjes die het korrelskelet aanvullen tot een zeer compact, dicht geheel, verhinderen dat water migreert van de kern naar het oppervlak. Water aan het oppervlak kan wel verdampen, maar wordt niet aangevuld vanuit de kern. De capillairen in de oppervlaktezone lopen dus stilaan leeg en geraken onderhevig aan almaar toenemende samentrekkende krachten die het beton aan het oppervlak doen krimpen. De nog minieme treksterkte van de specie kan de ontstane spanningen niet opvangen met scheurvorming tot gevolg. Hogesterktebeton is dus meer dan gewoon beton gevoelig voor, wat men noemt, plastische scheurvorming. Nabehandeling van het pas gestorte beton door het nathouden van de onbeschermde oppervlakken of door het aanbrengen van een *curing* tegen het verdampen of het afdekken met een folie is onontbeerlijk...

7. Eigenschappen

7.1 Temperatuureffecten in verhardend beton

Door het hoge cementgehalte en het gebruik van fijn cement (klasse 52,5) is de warmteontwikkeling die gepaard gaat met het hydratatieproces intenser in hoogwaardig beton dan in gewoon beton. Hierdoor kunnen, zelfs in elementen die men niet onmiddellijk als 'massief' zou bestempelen, vrij hoge thermische spanningen ontstaan. Ook al kan hogesterktebeton meer trek opvangen, toch is er aanzienlijk meer kans op scheurvorming. Bij het ontwerp en tijdens de uitvoering moet dit fenomeen voldoende aandacht krijgen. Maatregelen om verandering zo veel mogelijk uit te sluiten dringen zich op. Spanningsberekeningen in functie van de verwachte warmteontwikkeling en de eigenschappen van het verhardend beton zijn wenselijk.

Fig. 6 – Verband tussen druksterkte en water-cementfactor



7.2 Gedrag onder drukbelasting

Wanneer beton met normale sterkte op druk belast wordt, zullen de aanhechtingsscheuren tussen mortelmatrix en granulaat zich uitbreiden rondom de granulaatkorrels. Bij het benaderen van de druksterkte zullen deze hechtscheuren zich verder zetten doorheen de mortelmatrix, met de vorming van mortelscheuren tot gevolg. Uiteindelijk zal het beton bezwijken door een netwerk van doorgaande mortelscheuren, terwijl de granulaatkorrels geen schade vertonen (fig. 7).

Bij hoogwaardig beton is er een verbeterde aanhechting tussen de granulaatkorrels en de cementmatrix. Bovendien benadert de matrixsterkte nagenoeg de sterkte van de granulaatkorrels. Het gevolg is dat de vorming en aangroei van hechtscheuren of microscheuren wordt uitgesteld. Bij het benaderen van de breuk zullen de scheuren nu doorgaans ook doorheen de granulaatkorrels lopen (fig. 8).

In het diagram spanning-vervorming (fig. 9) uit dit zich in een iets meer uitgesproken lineair gedrag in vergelijking met beton met conventionele sterkte. Bovendien vertoont het hoogwaardig beton een sterkere terugval na het bereiken van de druksterkte. Na het bereiken van de druksterkte, met andere woorden na het bezwijken van het beton, zal de draagkracht bijzonder snel naar nul terugvallen. Hoogwaardig beton vertoont met andere woorden een brosser breukgedrag dan beton met conventionele sterkte.

Fig. 7 – Gewoon beton :
hechtscheuren en scheuren door mortelmatrix

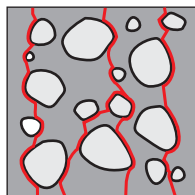


Fig. 8 – Hoogwaardig beton :
ook scheuren door granulaatkorrels

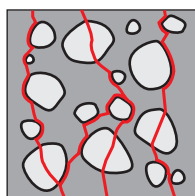
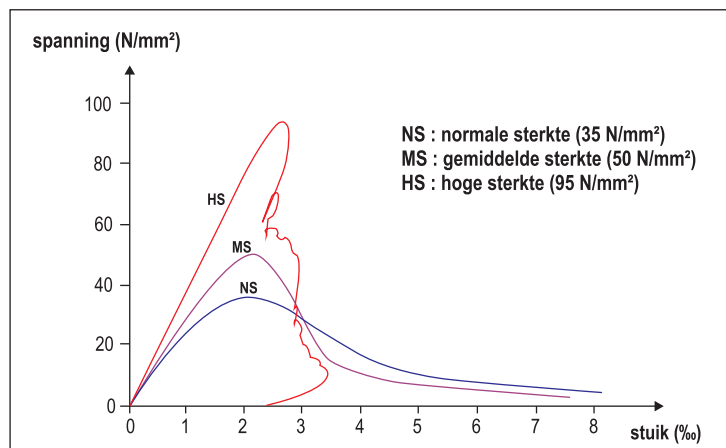


Fig. 9 – Spanning-vervormingdiagram



7.3 Gedrag onder trekbelasting

Doorgaans wordt de treksterkte van beton gerelateerd met de druksterkte. Voor conventioneel beton zijn hier verschillende formules gangbaar. In EN 1992-1-1:2004 wordt voor hogesterktebeton een andere formule vermeld dan voor conventioneel beton (tabel 1). Belangrijk is evenwel het eerder vermelde brosse karakter van hoogwaardig beton. Eens de sterkte bereikt is, zal de draagkracht bijzonder snel naar nul terugvallen.

7.4 Stijfheid

De elasticiteitsmodulus van beton wordt hoofdzakelijk bepaald door de eigenschappen van de granulaatkorrels en van de mortelmatrix. Naargelang de matrix sterker en stijver wordt, zal ook het beton een grotere stijfheid vertonen (cfr. tabel 1). De elasticiteitsmodulus van hoogwaardig beton is dus nog steeds gerelateerd aan de druksterkte.

7.5 Krimp

Zowel hogesterktebeton als normaal beton zijn onderhevig aan plastische krimp (zie hoger), autogene krimp, en uitdrogingskrimp.

Autogene krimp

Cement reageert met een bepaalde hoeveelheid water. Dit proces gaat gepaard met een volumevermindering. In vergelijking met het oorspronkelijk door water en cement ingenomen volume zal dat van het reactieproduct na volledige hydratatie ongeveer 10 % kleiner zijn. Bij de aanvang van de reactie vangt het nog plastische beton de volumevermindering probleemloos op. Van zodra het beton stijver wordt, wordt de contractie verhinderd. Hierdoor ontwikkelen zich trekspanningen in de met water gevulde ruimten. Deze poriën in wording zetten uit waardoor er onderdruk ontstaat die buitenlucht doet aanzuigen. In de nu onvolledig met water gevulde ruimte ontstaan capillaire krachten die de poriën doen samentrekken. Deze inwendige krimp is dus het resultaat van twee processen: een chemisch en een fysisch. In een gewoon beton waarin er overmaat aan water is, blijft de autogene krimp beperkt tot ongeveer 100×10^{-6} . In hogesterktebeton waar er veel minder water aanwezig is, zuigt het cement het weinige water naar zich toe. De poriën die geleidelijk aan uitdrogen, geraken onderhevig aan alsmaar toenemende capillaire krachten, waardoor de autogene krimp duidelijk hogere waarden kan bereiken. Enkele waarden zijn gegeven in tabel 2. Het is duidelijk dat de autogene krimp toeneemt met een stijgende sterkte en vooral plaatsheeft op korte termijn. Aangezien de autogene krimp het gevolg is van het hydratatieproces, is deze steeds aanwezig, ook bij een perfecte nabehandeling van het beton. Enkel nieuwe concepten met betrekking tot inwendige nabehandeling kunnen enig soelaas brengen. Dit valt echter buiten het bestek van deze tekst. De autogene krimp van hoogwaardig beton verdient hoe dan ook de nodige aandacht. Samen met de eventuele thermische spanningen ten gevolge van de aanzienlijke hydratatiewarmte kan de autogene krimp tot ernstige scheurvorming leiden in het jonge hoogwaardige beton.

Uitdrogingskrimp

Uitdrogingskrimp treedt op in een omgeving die niet met water verzadigd is. In dat geval kan er water verdampen uit de poriën. Hierdoor ontstaan er capillaire krachten die de poriën doen samentrekken met een volumevermindering als resultaat. De mate van de uitdrogingskrimp hangt in belangrijke mate af van de hoeveelheid verdampbaar water in het beton. Een belangrijke fractie zal onder normale omstandigheden niet verdampen omdat het chemisch gebonden is of vastzit tussen de hydratatieproducten.

f _{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
RH = 50 %	belasting na 5 dagen	3,91	3,60	3,21	2,82	2,52	2,27	2,08	1,91	1,77	1,55	1,38	1,25
	10 dagen	3,62	3,34	2,97	2,61	2,33	2,11	1,92	1,77	1,64	1,44	1,28	1,16
	15 dagen	3,44	3,17	2,82	2,48	2,21	2,00	1,83	1,68	1,56	1,36	1,22	1,10
	20 dagen	3,30	3,04	2,71	2,38	2,12	1,92	1,75	1,61	1,50	1,31	1,17	1,05
	30 dagen	3,10	2,85	2,54	2,23	1,99	1,80	1,64	1,51	1,40	1,23	1,09	0,99
	50 dagen	2,84	2,62	2,33	2,05	1,83	1,65	1,51	1,39	1,29	1,13	1,00	0,91
RH = 80 %	belasting na 5 dagen	2,69	2,48	2,24	2,00	1,82	1,66	1,54	1,43	1,34	1,20	1,08	0,99
	10 dagen	2,50	2,30	2,07	1,86	1,68	1,54	1,43	1,33	1,25	1,11	1,00	0,92
	15 dagen	2,37	2,18	1,97	1,76	1,60	1,46	1,35	1,26	1,18	1,05	0,95	0,87
	20 dagen	2,27	2,09	1,89	1,69	1,53	1,40	1,30	1,21	1,13	1,01	0,91	0,845
	30 dagen	2,13	1,97	1,77	1,59	1,44	1,32	1,22	1,14	1,06	0,95	0,86	0,78
	50 dagen	1,96	1,80	1,62	1,45	1,32	1,21	1,12	1,04	0,98	0,87	0,79	0,72

(*) randvoorwaarden bij berekening: fictieve dikte = 100 mm, cement R ('rapid'), lange termijn

7.7 Duurzaamheid

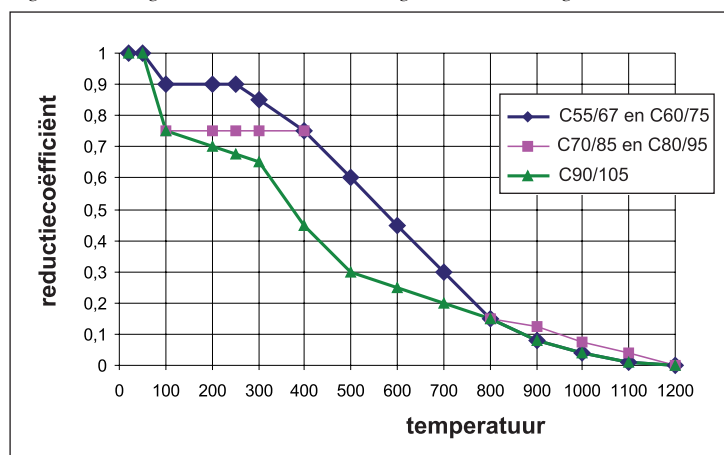
Gezien de dichtere poriënstructuur van hoogwaardig beton, vertoont dit materiaal een beter gedrag met betrekking tot aantastingsmechanismen. De meeste degradatieprocessen worden immers veroorzaakt door het binnendringen van agressieve stoffen, zoals chloriden, koolstofdioxide, zuren,... Indien de penetratie van deze stoffen in het beton bemoeilijkt wordt, zoals het geval is in hoogwaardig beton, zullen de degradatieprocessen die eraan verbonden zijn uiteraard veel minder snel kunnen optreden. Hoe dan ook dient nog steeds gelet te worden op de zuiverheid van de samenstellende bestanddelen van het beton, teneinde aantasting door inwendige mechanismen te vermijden (inmenging van sulfaten, alkaliën, reactieve granulaten, ...).

De gebruiksduur van een constructie wordt echter in grote mate ook bepaald door de uitvoeringsomstandigheden. In dit verband werd hoger reeds gewezen op het risico van vroegtijdige scheurvorming ten gevolge van thermische effecten en (vooral autogene) krimp. De aanwezigheid van dergelijke scheuren kan de duurzaamheid van de constructie uiteraard bijzonder sterk beïnvloeden.

7.8 Brandweerstand

Is de duurzaamheid van hoogwaardig beton in het algemeen een stuk beter dan voor conventioneel beton, toch is er een bijzonder aandachtspunt, namelijk de brandweerstand. Door de zeer dichte poriënstructuur kan de stoomdruk, die inwendig in het beton ontstaat bij temperaturen boven 100 °C, moeilijk afgevoerd worden. De stoom kan immers niet snel naar buiten afgevoerd worden, wegens de zeer dichte structuur van het materiaal. In vergelijking met conventioneel beton zal daarom hogesterktebeton in het temperatuurgebied boven 100 °C vlugger zijn sterkte verliezen. Informatie over de toe te passen reductiefactor vindt men in NBN EN 1992-1-2 (zie eveneens fig. 10). Door de opgebouwde stoomdrukken moet er tevens nagegaan worden of er geen gevaar is voor spatgedrag. Voor beton van sterkteklassen C55/67 tot C80/95 volstaan de regels voor conventioneel beton om spatten te vermijden op voorwaarde dat het gehalte aan silica fume kleiner is dan 6 % van de cementmassa. Bij hogere gehalten aan silica fume en bij sterkteklasse C90/105 is het nodig speciale maatregelen te nemen, zoals het inmengen van minstens 2 kg/m³ polypropyleenvezels. Bij hoge temperaturen gaan deze vezels smelten, zodat open kanaaltjes achterblijven waarlangs de stoomdrukken sneller afgevoerd kunnen worden.

Fig. 10 – Daling van de druksterkte van hogesterktebeton volgens EC2 Brand



8. Toepassingen

Hoogwaardig beton heeft een aantal interessante 'technologische' voordelen in vergelijking met traditioneel beton:

- Verbeterde duurzaamheid met betrekking tot fysisch-chemische aantasting (geringere permeabiliteit, betere bescherming van de wapening tegen corrosie, verminderde penetratie van chloriden-ionen, minder risico op alkali-silikareactie, betere weerstand tegen vorstaantasting,...). Deze verbeterde duurzaamheid biedt belangrijke voordelen met betrekking tot het onderhoud op lange termijn.
- Doorgaans zeer hoge vloeibaarheid in verse toestand. Dit vergemakkelijkt de verwerking van het beton, ook in zones met een hoge wapeningsconcentratie.
- Verhoogde sterkte op jonge ouderdom. Dit resulteert in een kortere bekistingtijd en een snellere realisatie van de voorspanning. Kortere uitvoeringstermijnen kunnen dus nagestreefd worden.
- Een hogere eindsterkte na verharding, wat kan leiden tot een vermindering van de benodigde betonsectie en dus een lager eigengewicht van de constructie (zie eveneens achteraan kaderstuk 'Plaats- en geldbesparing').
- Een hogere elasticiteitsmodulus, wat de aërodynamische stabiliteit van slanke bruggen kan verhogen.
- Een verminderde kruip, wat voordelig is met betrekking tot het beheersen van de vervormingen van een constructie, evenals met betrekking tot voorspanverliezen.

Ook op architecturaal vlak biedt hoogwaardig beton een aantal nieuwe mogelijkheden. Zo kan de aanwending van hoogwaardig beton leiden tot de realisatie van slankere constructies. Dit is nu al duidelijk bij de realisatie van kunstwerken (bruggen), maar kan evenzeer van toepassing zijn op gebouwen. Op dit ogenblik worden de voordelen van hoogwaardig beton voornamelijk aangewend voor de realisatie van zo veel mogelijk nuttige binnenruimte, doch evenzeer kan gedacht worden aan een gewijzigde bouwhuid, met vernieuwde aandacht voor architecturale elementen zoals ribben, bogen, schalen,...

De gevel van een gebouw kan bovendien geherdefinieerd worden door de mogelijke aanwending van grotere modulematen. Daar waar de modulemaat nu doorgaans 6 meter bedraagt, kan deze door middel van hoogwaardig beton opgedreven worden tot 7 à 8 meter. Deze toename kan een andere gevelconceptie mogelijk maken, en hieraan gekoppeld een gewijzigde binneninrichting die beter in overeenstemming is met actuele internationale normen.

De grotere vrijheid van de binneninrichting van een gebouw geldt ook voor de inrichting van de horizontale nuttige oppervlakte. Door de wijziging van de modulemaat kunnen de vrije ruimten groter worden. Dit biedt de architect grotere mogelijkheden voor de opvatting en indeling van zowel woonruimten als kantoorruimten.

In de prefabindustrie biedt de aanwending van hoogwaardig beton ook nieuwe mogelijkheden (zie ook verder). Vermeldenswaardig is de mogelijkheid om te komen tot complete geprefabriceerde cellen, mede mogelijk gemaakt door de besparing in eigengewicht. Het lijkt op deze wijze niet uitgesloten dat een gebouw evolueert in de tijd, door de uitwisseling van compatibele geprefabriceerde cellen. Een slaapkamer kan dan vervangen worden door een zitkamer, een badkamer, een keuken,...

Een bijkomend voordeel van hoogwaardig beton in vergelijking met conventioneel beton is het visueel aspect van de betonoppervlakken, en dit zowel ter plaatse gestort als geprefabriceerd. Het ontstaan van luchtbelletjes aan het oppervlak is vaak zeer beperkt. Het oppervlak heeft doorgaans een goede textuur, mede dankzij het hoog gehalte fijne materialen in het beton.

Bovendien is hoogwaardig beton weinig onderhevig aan segregatie, zodat grindnesten meestal vermeden worden. Door de aanwezigheid van silica fume kunnen soms donkere tinten verkregen worden. Dit hangt evenwel ook af van de afmetingen van de fijne deeltjes, eerder nog dan van hun gehalte. Door de aanwending van specifieke bekistingtypen (b.v. onbehandeld hout) kunnen mooie resultaten bekomen worden.

Historisch gezien is hoogwaardig beton in de eerste plaats ontworpen voor zeer bijzondere toepassingen zoals hoogbouw. In de Verenigde Staten is het meermaals toegepast voor de realisatie van wolkenkrabbers. Hierbij werden reeds sterktes tot 120 à 130 MPa aangewend. Nochtans, zoals hierboven aangegeven, kan het hoogwaardig beton ook een alternatief zijn voor constructies die normaal in conventioneel beton uitgevoerd worden. Een succesvolle toepassing van hoogwaardig beton vergt hoe dan ook een verregaande samenwerking tussen de eigenaar, de architect, de ingenieur, de aannemer, de betoncentrale en het onderzoekslaboratorium. Enkele gevalstudies worden hierna toegelicht.

9. Gevalstudies

9.1 De tweede Stichtse brug (Nederland)

De tweede Stichtse brug, voltooid in 1997, is de eerste grote brug in hogesterktebeton in Nederland (fig. 11). De brug heeft een totale lengte van 320 m, en is opgebouwd uit drie overspanningen. De hoofdoverspanning bedraagt 160 m. De constructiehoogte van de brug varieert tussen 2,50 m en 6,75 m. De bovenbouw van de brug is gerealiseerd met een vrije uitbouwmethode. De moten, met lengte van 4 tot 5 m, werden in één keer gestort. Dit stelde nogal wat eisen aan de verwerkbaarheid van het beton. De grote hoeveelheid cement en de kleine hoeveelheid aanmaakwater konden leiden tot een snelle terugloop van de verwerkbaarheid, en tot fluctuaties in de consistentie.

De aangewende betonsamenstelling is gegeven in tabel 4. Door de toepassing van hogesterktebeton zijn een aantal specifieke wijzigingen aangebracht tijdens de ontwerpfase. Zo konden de kokerwanden en de ondervloer dunner gemaakt worden, en kon bespaard worden op de nodige hoeveelheid voorspanstaal wegens het eenvoudiger kabelbeloop en de kleinere krimp- en kruipverliezen. De voorspanning kon ook sneller aangebracht worden gezien de snellere sterkteontwikkeling van het beton. Zelfs in de winterperiode werden de benodigde druksterktes zeer snel bereikt. Dit resulteerde tevens in een snellere bouwtijd. Op lange termijn biedt het hoogwaardig beton het voordeel van een betere resistentie van het bovendek tegen indringing van dooizouten.

De praktijk heeft geleerd dat met hoogwaardig beton gladde en vlakke betonoppervlakken verkregen konden worden. Er moest echter terdege aandacht besteed worden aan de juiste consistentie van het mengsel en aan een zorgvuldig geplande en uitgevoerde

CEM III/B 42,5 LH-HS	237 kg
CEM I 52,5 R	238 kg
silica fume (vaste stof)	25 kg
water - cement (+silica fume) factor	0,32
zand 0-4 mm	785 kg
harde steenslag 4-16 mm	960 kg
plastificeerder	0,95 kg
superplastificeerder	9,5 kg

Tabel 4 – Betonsamenstelling 2^{de} Stichtse brug

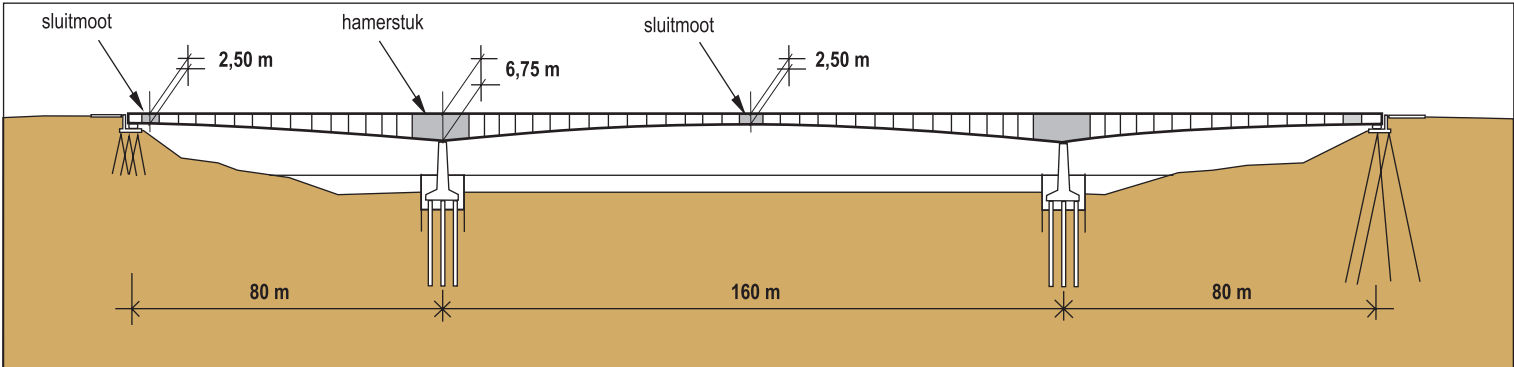
stortvolgorde. Een uitgebreide controle en opvolging, in samenspraak tussen alle betrokken partijen, was hiertoe noodzakelijk.

Een kritiek aandachtspunt was tevens de explosieve temperatuurontwikkeling van het hoogwaardig beton. Hierdoor werden temperaturen tot 60 °C bereikt, wat de kans op scheuren verhoogde. Dit risico van scheurvorming werd bovendien nog versterkt door de autogene krimp. Een afdoende scheurbeheersing kon bekomen worden via een zorgvuldige voorbereiding en begeleiding van ontwerp en uitvoering, het uitvoeren van voorbereidende praktijkproeven op grotere schaal, en het uitvoeren van doordachte geschiktheidsonderzoeken op het werk, in verschillende betonlaboratoria en in de betoncentrales. De ervaring leerde dat krimp- en temperatuuffecten geen belemmering hoeven te vormen voor een verdere succesvolle en economische toepassing van hogesterktebeton in bruggen, vooropgesteld dat bij het ontwerp en uitvoering de nodige aandacht aan deze effecten wordt besteed.

9.2 Prefab draagstructuren

De gecontroleerde en meer ideale productieomstandigheden van een betonfabriek maken dat het gebruik van hogesterktebeton in deze sector meer en meer een courante praktijk geworden is. Sterktes van 55 N/mm² of meer zijn voor prefabelementen zeer gewoon. Vaak worden zelfs druksterktes gelijk aan 90 N/mm² of meer bekomen. Bij parkeergarages kan de aanwending van hogesterktebeton resulteren in een reductie van de kolomafmetingen, zodat meer parkeerplaatsen gerealiseerd kunnen worden op een gegeven oppervlakte. Voor de realisatie van kantoorgebouwen zijn grotere overspanningen haalbaar door de aanwending van hogesterktebeton. Voor industriële gebouwen kunnen vrij grote modulaire oppervlaktes gerealiseerd worden zonder tussenkolommen. De aanwending van hogesterktebeton is eigenlijk in de prefabindustrie een dagelijkse praktijk geworden. Het hoeft niet steeds een spectaculaire brug of een slanke toren te zijn. Ook voor meer courante constructietypes kan de aanwending van hogesterktebeton een nuttige bijdrage betekenen.

Fig. 11 – Tweede Stichtse brug (NL)



DE TORENS 'NORTH GALAXY' TE BRUSSEL

Het complex bestaat uit een ondergrondse parking van vier niveaus en twee torengebouwen. Beide torens, die dienst doen als kantoorruimte, zijn 30 verdiepingen hoog. Het complex bevat ook nog een derde gebouw van 6 verdiepingen en een gelijkvloerse sokkel.

Zowel de parking als de bovenbouw zijn grotendeels uitgevoerd in geprefabriceerd beton.

1 - Ontwerp

Oorspronkelijk was de structuur van het complex grotendeels bedacht in ter plaatse gestort beton. Stalen kolommen omhuld met beton voor de brandveiligheid zouden gecombineerd worden met balken in gewapend beton en vloerplaten volgens het 'hollow-rib' systeem (een combinatie van verloren stalen bekisting met ter plaatse gestort beton).

Het gebouw diende immers goed beveiligd te worden tegen brand en "voortschrijdende instorting" ('anti-collapse'). De gebeurtenissen van New York lagen nog fris in het geheugen.

2 - Verdere studie

Later ontwierp *Ergon* samen met het studiebureau *Ingénieurs Associés* een variatie in prefab beton. Ook de aannemer kon overtuigd worden van de voordelen ervan.

Er diende wel rekening gehouden te worden met belangrijke eisen op het vlak van prijs en uitvoeringstermijn van het geheel. Vooral het samen uitvoeren van de omvangrijke centrale kern met de rest van de structuur vereiste een nauwkeurige beheersing van de planning en in het bijzonder van het kraangebruik.

3 - Definitieve oplossing en uitvoering

A. ONDERBOUW – ONDERGRONDSE PARKING

De ondergrondse parking werd afzonderlijk gebouwd in een eerste fase (2001). De hiervoor aangewende kolommen zijn geprefabriceerd in hoogwaardig beton (C 80/95) en geplaatst volgens een raster van 7,5 m bij 6,85 m. Zij vervangen de omhulde stalen HEM-profielen die aanvankelijk voorzien waren, en maken hierdoor de constructiemethode goedkoper en eenvoudiger. De 3 verdiepingen hoge kolommen uit één stuk hebben een sectie van 590/590 mm voor een maximum belasting van 12 860 kN. Zij werden in de fabriek horizontaal gegoten.

Ter verbetering van de brandweerstand en om spatten bij brand tegen te gaan werden vezels uit polypropyleen toegevoegd aan het beton.

De vloerbalken zijn ter plaatse gestort. Het gebruik van koppelstukken met draad en doorvoeropeningen door de kolommen liet toe om de continuïteit van de wapening te verzekeren. De vloeren zijn samengesteld uit voorgespannen holle welfsels (2 uur brandweerstand) met een ter plaatse gestorte druklaag (C 30/37).

De totale vloeroppervlakte bedraagt 29 000 m² en er staan 159 kolommen.

B. BOVENBOUW

1. Gebouw C (6 verdiepingen)

Zoals voor de ondergrondse parking werd hier een mix gebruikt van prefab kolommen en welfsels met ter plaatse gestorte balken. De uitvoering gebeurde in de loop van het jaar 2003.

2. De sokkel

Dit gedeelte van het gebouw heeft enkel een gelijkvloers en doet dienst als overdekte verbinding en inkomhal van het geheel.

3. Gebouwen A en B, de torens (zie tekeningen op volgende blz.)

In deze gebouwen bestond de grote uitdaging erin om de werken in ter plaatse gestort beton af te stemmen op het oprichten van de prefab structuur.

Volgens de vooropgestelde timing moest één verdieping van beide torens om de 4 werkdagen gerealiseerd zijn. Om dat ritme aan te houden was een tweede arbeidsploeg nodig die instond voor de bijkomende werken, zoals het wapenen van de druklaag, de onderlinge lasverbindingen van de TT-vloerplaten, het plaatsen van de kettingwapening, het betonneren van de druklaag, enz.

De centrale kernen zijn opgetrokken met een automatische klimbekisting. De stijging van deze bekisting had een voorsprong van twee verdiepingen op de montage van de prefab constructie.

De twee verdiepingen hoge prefab kolommen (zie coverfoto) met een doorsnede van 600 mm kunnen een belasting tot 9600 kN dragen. Zij zijn uitgevoerd in hoogwaardig beton (C 60/75), horizontaal gestort in een ronde bekisting met een spleet van enkele centimeter als trechtersvormige gietopening.

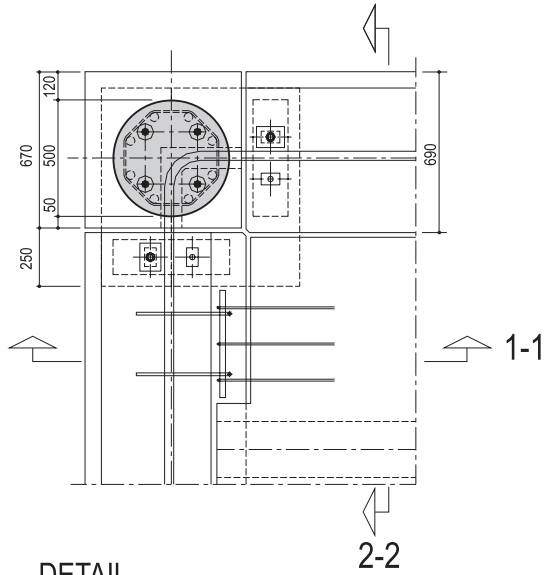
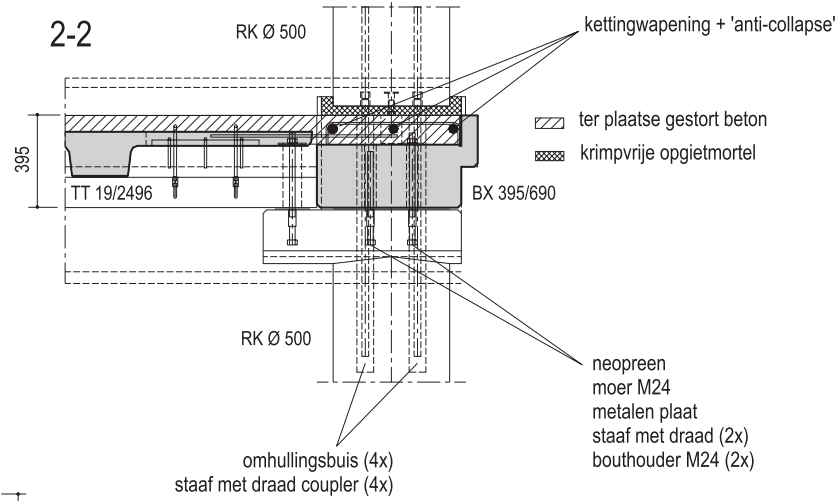
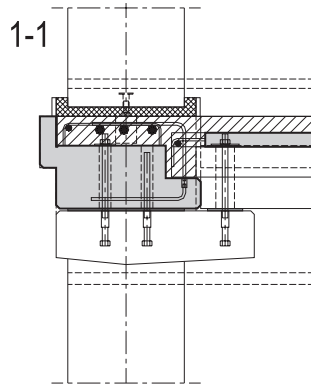
De vloeren moesten licht zijn, niet zwaarder dan in het originele concept, de montagesnelheid hoog en de constructiedikte van de combinatie vloerplaat - balk niet meer dan de origineel voorziene dikte. Een speciaal ontworpen TT-element bleek uiteindelijk de enige mogelijke oplossing. Het gewicht van de platen en de modulatie leverden een element op van 190 mm dikte en 2500 mm breedte. Om de uiteindelijke sterkte en brandweerstand te bereiken werd nog een ter plaatse gestorte druklaag aangebracht van 60 mm.

De balken zijn uitgevoerd in voorgespannen beton. Zij hebben een sectie met minimale dikte en een speciale vorm die het gebruik van een zijbekisting voor het storten van het verbindingsbeton en de druklaag, overbodig maakte. Na plaatsing werd de in de fabriek aangebrachte kettingwapening verder doorheen de kolommen geschoven.

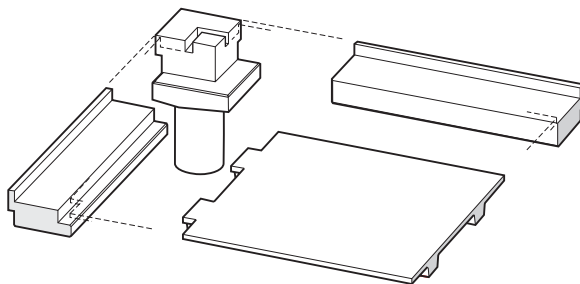
Omwille van de beschikbare ruimte boven het verlaagd plafond werden de balken opgelegd op consoles met beperkte constructiehoogte. Uitsparingen lieten toe om de kettingwapening op een correcte manier te plaatsen. Deze wapening neemt de horizontale krachten, zoals wind en scheefstand, op en belet voortschrijdende instorting bij een ongeval.



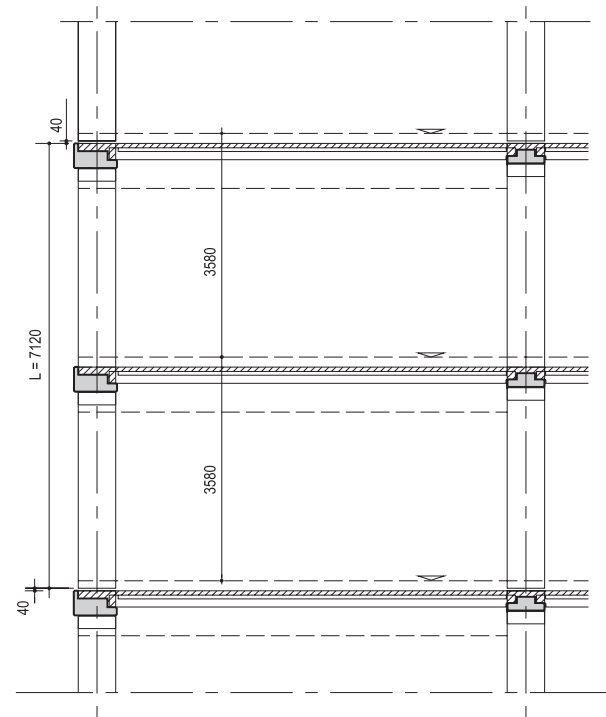
arch. J. Eyers & Partners / Samyn & Partners



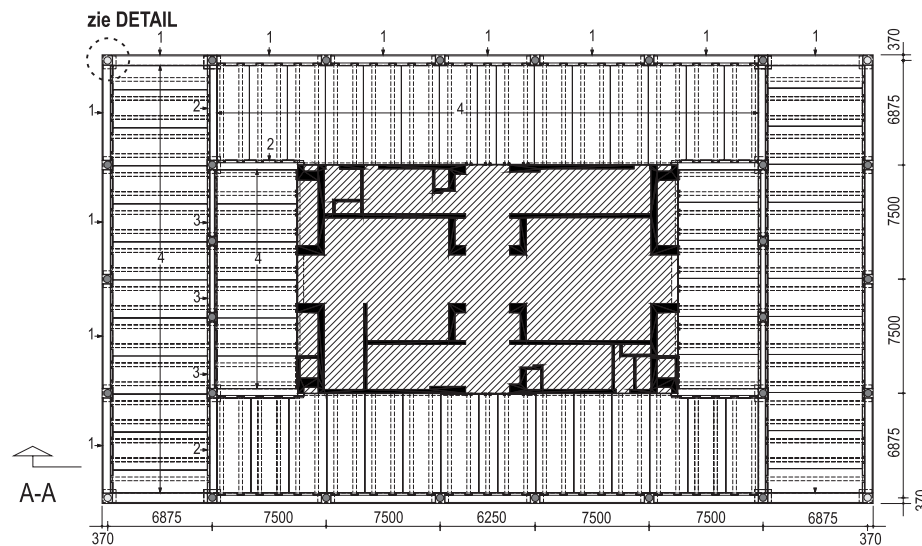
DETAIL



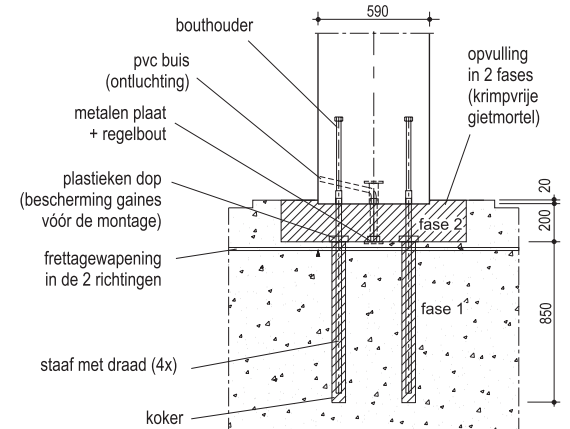
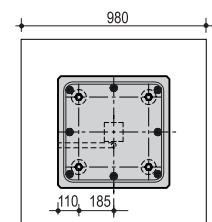
SNEDE A-A



TYPEVERDIEPING



- prefab kolom RK 500/500
- prefab kolom RK 600/600
- kern ter plaatse gestort
- ▨ vloerplaat ter plaatse gestort
- 1 prefab balk BX 395/690
- 2 prefab balk RL 200/590
- 3 prefab balk RT 200/590
- 4 prefab balk vloerplaat TT 190/2496



AANSLUITING KOLOM-FUNDERING

BIBLIOGRAFIE

TAERWE L.
Hogesterktebeton
Studiedag 'Speciale Betonsoorten' - Leuven, 3 nov. 1993

SHAH S.P. ; AHMAD S.H.
High performance concretes and applications
Edward Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994

RAMACHANDRAN V.S. ; MALHOTRA V.M. ;
JOLICOEUR C. ; SPIRATOS N.
Superplasticizers : properties and applications in concrete
Ottawa : CANMET, 1998

FEVRE C. (Ed.)
Projet National BHP 2000 - Les bétons à hautes performances
Guides pratiques (3 delen)
Parijs : IREX, 2002, 2003

BAROGHEL-BOUNY V.
Les spécificités des bétons à hautes performances
Parijs : LCPC, 2004

Seventh International Symposium on the Utilization of
High-Strength/High-Performance Concrete
ACI Symposium Publication 228, Volumes 1 & 2, 2005

Hogesterktebeton : technologie, eigenschappen en rekenwaarden
CUR-rapport 90-9

Hogesterktebeton : interrimrapport onderzoek en aanzet tot
regelgeving
CUR-rapport 93-7

Hogesterktebeton
CUR-aanbeveling 37, 1994

Hogesterktebeton
CUR-aanbeveling 97, 2004

Normen

NBN EN 206-1:2001 - Beton - Specificatie, eigenschappen,
vervaardiging en conformiteit

NBN B 15-00 :2004 - Aanvulling op NBN EN 206-1 - Beton
- Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit

NBN EN 1992-1-1:2005 - Eurocode 2 : Ontwerp en berekening
van betonconstructies – Deel 1-1 : Algemene regels en
regels voor gebouwen

PLAATS- EN GELDBESPARING

Door gebruik te maken van hogesterktebeton is het mogelijk om de nuttige ruimte van een kantoorgebouw flink uit te breiden. Volgend voorbeeld illustreert dit. Stel een kantoorgebouw met ronde kolommen geplaatst in een raster van 7,20 m x 7,20 m.

In een gebouw van tien verdiepingen zouden dan naargelang de betonkwaliteit (sterkteklasse) gelijkvloerse kolommen van de volgende diameter vereist zijn.

Betonkwaliteit	Diameter	Besparing volume
C 30/37	700 mm	
C 40/50	600 mm	24 %
C 60/75	500 mm	49 %
C 80/95	450 mm	59 %
C 90/105	400 mm	68 %

Voor een 24 verdiepingen hoog gebouw zouden op het gelijkvloers kolommen met de volgende diameter nodig zijn :

Betonkwaliteit	Diameter	Besparing volume
C 30/37	1000 mm	
C 40/50	900 mm	19 %
C 60/75	800 mm	36 %
C 80/95	700 mm	51 %
C 90/105	600 mm	64 %

Met C 90/105 is er dus een driemaal kleinere kolomsectie nodig dan met C 30/37 en wordt de nuttige ruimte overeenkomstig groter.

Hogesterktebeton tot sterkteklasse C 80/95 kost ongeveer 1,5 maal meer dan beton van sterkteklasse C 30/37. Voor sterkteklasse 90/105 dient gerekend op 1,8 maal meer.

Deze meerkost weegt niet op tegen de besparingen door de vermindering van de benodigde hoeveelheid materiaal. Er is niet alleen minder beton nodig, maar ook minder wapeningsstaal. Minder materiaal impliceert tevens minder gewicht en dus ook lichtere en goedkopere funderingen.



dit bulletin is een publicatie van:
FEBELCEM - Federatie van
de Belgische Cementnijverheid
Voltastraat 8
1050 Bruxelles
tel. 02 645 52 11
fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@felbelcem.be

auteurs:
Dr. ir. G. De Schutter
UGent
ir. arch. J. Apers

verantw. uitgever:
J.P. Jacobs

wettelijk depot:
D/2007/0280/02