

VOBN

Bruggen en viaducten in hogesterktebeton

Gietbouw in de infrastructuur



Als het draait om spannende constructies





Hogesterktebeton heeft de toekomst

Slank, licht en duurzaam bouwen

Sinds 1992 is in Nederland bij de bouw van vele bruggen en viaducten ervaring opgedaan met hogesterktebeton (HSB).

Inmiddels is de conclusie gerechtvaardigd dat hogesterktebeton zowel constructief gezien als op het gebied van duurzaamheid een sprong vooruit is. Bouwen in HSB biedt ongekennde mogelijkheden om met minder materiaal en in lager gewicht uitzonderlijk sterke constructies te realiseren.

Voorlopig is ervaring opgedaan met C53/65 en C70/85.¹⁾

Maar in theorie zijn al sterktes tot C800 mogelijk.

De reguliere sterkteklassen van beton gaan tot C53/65. De CUR-aanbeveling 97 'Hogesterktebeton' omvat de sterkteklassen C60/75 tot en met C90/105. Bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat spreekt men van Hogere Sterkte Beton als beton een sterkteklasse van C53/65 of hoger heeft.

De Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft in samenwerking met de Nederlandse betonmortelindustrie vanaf 1992 ervaring opgedaan met hogere betonsterkten bij de bouw van betonnen bruggen en viaducten. Bij deze kunstwerken vormt het eigen gewicht de grootste belasting. Daarom is het aantrekkelijk te zoeken naar methoden om slanker, en dus lichter, te bouwen.

In de Verenigde Staten is HSB al in de jaren tachtig toegepast bij de bouw van wolkenkrabbers. Ook Noorwegen en Frankrijk passen dit materiaal sinds die tijd toe in de offshore- en bruggenbouw.

¹⁾ Sterkteklassen conform NEN-EN 206-1 en NEN 8005. In de VBT 1995 was dit B65 respectievelijk B85.



Waaruit bestaat hogesterktebeton?

Voorbeelden van een mengselsamenstelling zijn:

	C53/65	C70/85
Cement	400 – 450 kg/m ³	450 – 500 kg/m ³
Cementmengsel	25% CEM I 52,5 R (portlandcement) en 75% CEM III/B42,5 (hoogovencement)	circa 50% CEM I 52,5 R en 50% CEM III/B42,5
Watercementfactor	0,35 – 0,40	0,30 – 0,35
Toeslagmateriaal	rond of gebroken	gebroken
Vulstof	geen	20 – 25 kg/m ³ silica fume
Consistentiegebied	>3	>3
Hulpstoffen	(super)plastificeerder	(super)plastificeerder

Waarom hogesterktebeton?

De toepassing van hogesterktebeton in de bouw heeft een aantal voordelen:

- door de zeer hoge sterkte kan er slank en licht worden gebouwd;
- door de zeer grote materiaaldichtheid zijn constructies in HSB duurzaam en vragen minder onderhoud;
- integraal beschouwd is een brug of viaduct in C53/65 of C70/85 niet duurder dan in C35/45;
- bij bruggen en viaducten zijn grotere overspanningen mogelijk: dit is veiliger voor het weg- en scheepvaartverkeer;
- na sloop biedt HSB de mogelijkheid tot hoogwaardig hergebruik.

Kenmerken van hogesterktebeton

Hogesterktebeton onderscheidt zich van grindbeton door de samenstelling. HSB heeft namelijk de volgende kenmerken:

- relatief hoog cementgehalte;
- lage watercementfactor;
- hoge dosering hulpstoffen;
- gebroken harde toeslagmaterialen;
- bij sterkten vanaf C70/85 silica fume als vulstof.



Functie van silica fume

Wereldwijd wordt in beton met hoge sterkte vrijwel altijd silica fume toegepast.

In Nederland gebruiken we dit product in beton met een sterkte vanaf C70/85.

Silica fume is een product dat ontstaat bij de fabricage van ferro-siliciumlegeringen. Het bestaat voor meer dan 90% uit amorf siliciumdioxide (SiO₂). Een kenmerkende eigenschap van dit materiaal is zijn extreem hoge fijnheid. De functie van silica fume in HSB is:

- verbetering van de stabiliteit van de specie;
- vergroting van de dichtheid van het beton, door een betere vulling van het korrelskelet in het fijnste gebied;
- verhoging van de sterkte tussen de cementkorrels.

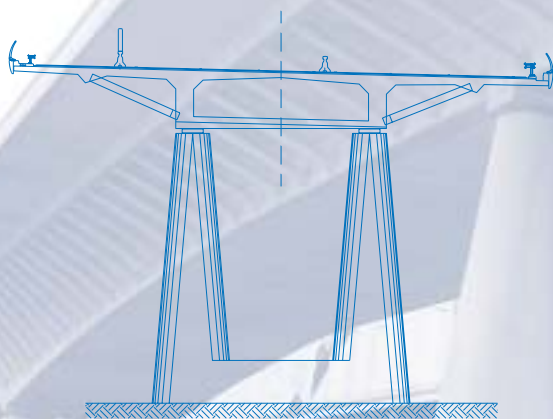
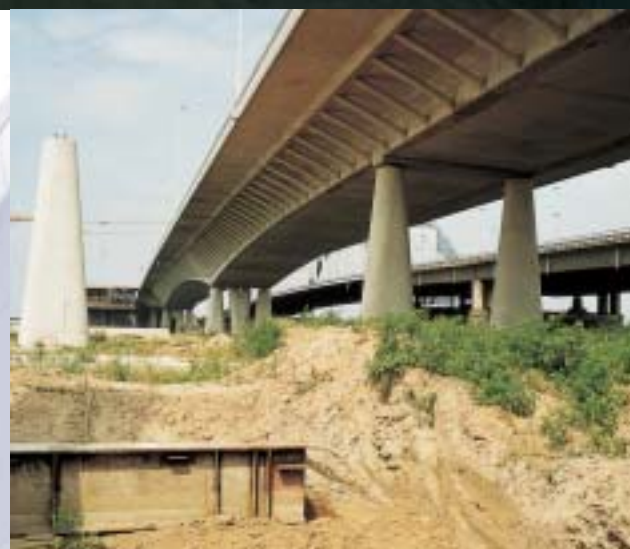




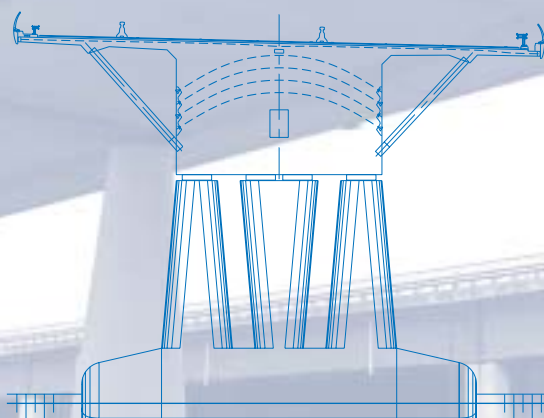
Innovatietraject

Om de ontwikkeling van HSB te begeleiden heeft de Bouwdienst Rijkswaterstaat de kerngroep 'Hogesterktebeton' ingesteld. Behalve Rijkswaterstaat zijn in deze kerngroep ook de betonmortelindustrie en de sectie Betonconstructies van de TU Delft vertegenwoordigd. In 1992 is een eerste praktijkproef hogesterktebeton uitgevoerd. Aansluitend zijn in de periode 1993 – 1995 nog drie praktijkproeven uitgevoerd, waaronder een 82 meter lang viaduct in de A44 bij Burgerveen. Enkele belangrijke conclusies naar aanleiding van deze praktijkproeven:

- voor het verantwoord toepassen van HSB in een project is een langere voorbereidingstijd nodig dan bij normaal grindbeton;
- er zijn extra maatregelen nodig om tijdens de afwerking van het stortoppervlak velvorming als gevolg van de vroege uitdroging van het beton te voorkomen;
- bij een stort in HSB verdient het aanbeveling dat een tweede betoncentrale stand-by staat;
- door de complexe mengprocedures loopt de productiecapaciteit van de betonmortelcentrale bij C53/65 tot circa 80% terug en bij C70/85 zelfs tot circa 50%; daarnaast moeten bij toepassing van C70/85 zowel mixers, mixers als materieel periodiek worden gereinigd hetgeen in de planning moet worden opgenomen;
- er zijn extra maatregelen nodig om de gevolgen van verhardingskrimping (extra krimp in de vroege fase van verharding) te beperken.



Aanzicht uiterwaardpijler



Aanzicht rivierpijler

Laboratoriumonderzoek en monitoring

Door de TU Delft is onderzoek gedaan naar de afwijkende eigenschappen van HSB, zoals autogene krimp en het kruipgedrag. Momenteel vindt vervolgonderzoek plaats door monitoring van deze eigenschappen met behulp van een permanente meetopstelling. Deze is bevestigd aan de Tweede Stichtse brug. Vanuit het Stevinlaboratorium in Delft heeft men rechtstreeks inzage in de meetresultaten.

De invloed van de hydratatiewarmte en verhardingskrimp op uitvoering en ontwerp is bij constructies in hogesterktebeton veel groter dan bij gewoon grindbeton. Door het hoge cementgehalte van HSB komt er bij het verharderen van het beton veel warmte vrij. Als gevolg hiervan kan de temperatuur hoog oplopen, vooral in massieve constructies. Door de hoge temperatuur neemt de verhardingssnelheid nog verder toe en daardoor ook weer de snelheid waarmee de reactiewarmte vrijkomt. Dit proces zal men moeten beheersen. Daarnaast heeft HSB last van autogene krimp (bij HSB vrijwel gelijk aan de verhardingskrimp). In het geval dat betonspecie wordt gestort tegen reeds verhard beton is scheurvorming ten gevolge van de verhardingskrimp en afkoeling moeilijk te vermijden. Maatregelen om ongewenste spanningen of scheurvorming te voorkomen zijn:

- isoleren van constructies of onderdelen daarvan;
- aanbrengen van scheurverdelende wapening;
- koelen van verhardend beton;
- verwarmen van de al verharde beton;
- aanpassen van de stortfasen;
- voorspannen van constructie-onderdelen.

Om scheurvorming te voorkomen heeft men bijvoorbeeld bij de bouw van de Tweede Stichtse Brug de dwarsvoorspanning in de bovenflens van iedere uitbouwmoot binnen 24 uur na het storten gespannen. Hierdoor kon de trekspanning door verhardingskrimp de treksterkte van het beton niet overschrijden. Bij de Dintelhaven-Westbrug heeft men telkens 16 uur na het storten van een moot de dwarsvoorspanning in het dek voor 50% aangebracht. Tevens is op dat moment de dwarsvoorspanning in de voorgaande moot van 50% op 100% gebracht. Door de verkorting in de dwarsrichting van die voorgaande moot werden de verminderde krimpspanningen in de verse moot aanzienlijk lager.



Grote praktijkervaring

Na de vier praktijkproeven zijn in de periode 1996 – 2000 in opdracht van Rijkswaterstaat vele voorgespannen bruggen en viaducten in HSB gerealiseerd. Bij al deze projecten is de betonkwaliteit C53/65 of C70/85 gebruikt. Bekende voorbeelden van deze projecten zijn:

- Tweede Stichtse brug met een hoofdoverspanning van 160 m (C70/85);
- Dintelhaven-bruggen met een hoofdoverspanning van 190 m (C70/85);
- Lekbrug bij Vianen met een hoofdoverspanning van 165 m (C53/65).

Deze drie kokerbruggen zijn met behulp van de vrije uitbouwmethode uitgevoerd.

In toenemende mate worden in de nieuwe rijkswegen viaducten in C53/65 gebouwd die door hun slanke constructie nauwelijks opvallen. Daarin uiten zich de kwaliteiten van hoogwaardig beton.

Voorbeelden zijn te vinden in de A58 (de rondweg om Etten-Leur) en in de verlenging van de A50 naar Eindhoven.

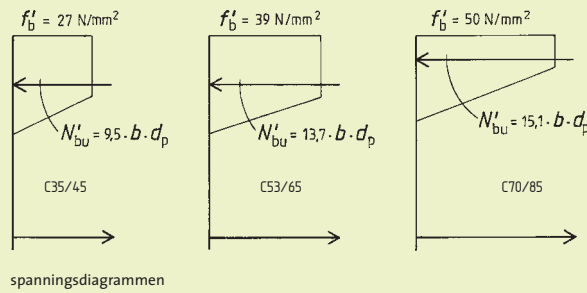
Kortom: de toepassing van hogesterktebeton neemt een grote vlucht in de weg- en waterbouw.

Spannende constructies

Bruggen en viaducten in hogesterktebeton zijn spannende constructies. De gerealiseerde overspanningen maken grote indruk en dat wordt mogelijk gemaakt door de aangebrachte voorspanning in de betonconstructie. Door het optimale gebruik van materiaaleigenschappen van beton en staal kan in voorgespannen beton slanker worden geconstrueerd dan in gewapend beton.

Bij een gelijkblijvende overspanning kan de constructiehoogte worden gereduceerd maar andersom kan bij gelijkblijvende constructiehoogte de overspanning worden vergroot.

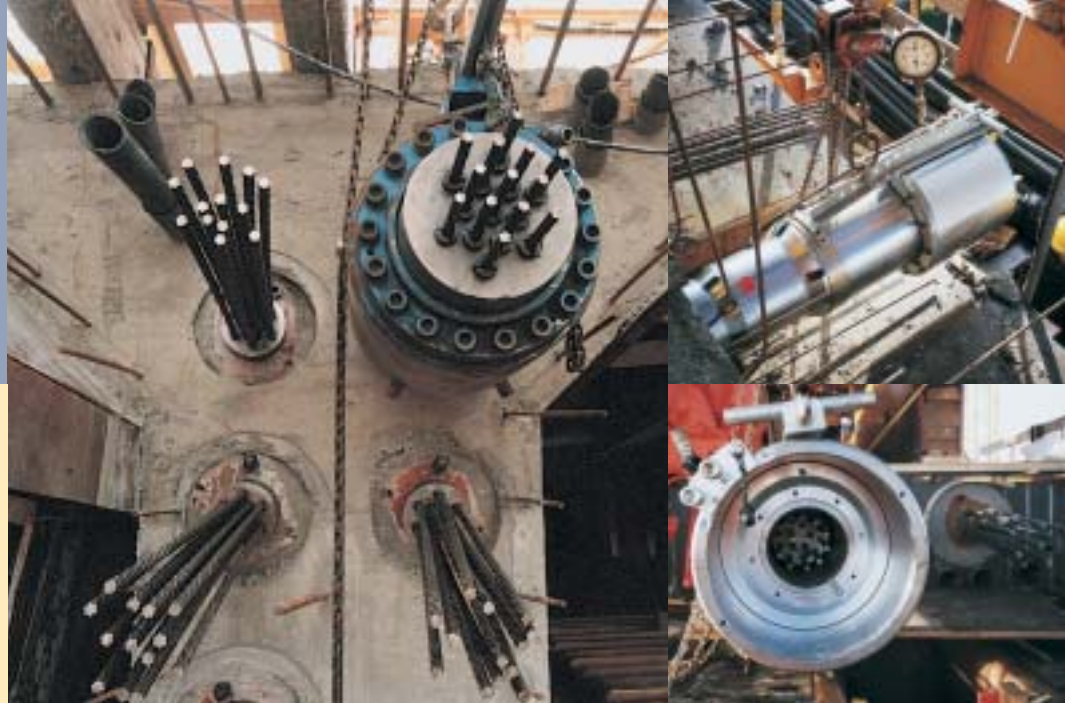
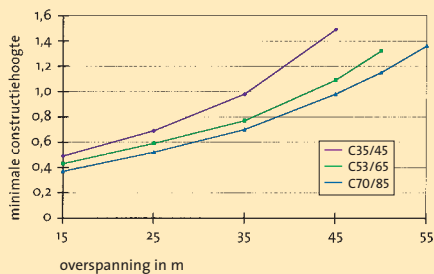
De ontwikkeling van hogesterktebeton in samenwerking met de mogelijkheden van de voorspanteknik maakt het construeren en bouwen van bruggen en viaducten tot een spannende aangelegenheid.



Maximaal opneembaar moment bij sterkteklassen C35/45, C53/65 en C70/85.

C53/65: M_{MAX} circa 45% hoger dan bij C35/45

C70/85: M_{MAX} circa 10% hoger dan bij C53/65



Plaatviaducten met een overspanning tot 65 meter

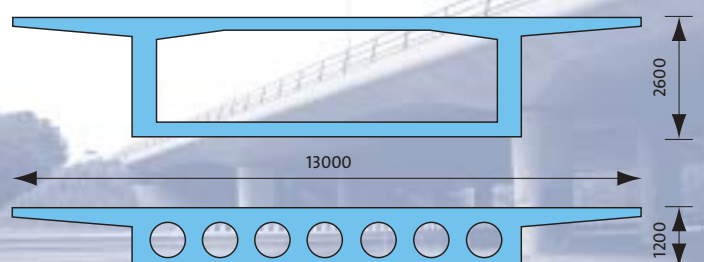
Ongeveer 60% van de bruggen en viaducten die in Nederland worden gebouwd zijn ter plaatse gestorte, voorgespannen plaatviaducten. Tot voor enkele jaren geleden werden deze bruggen en viaducten in grindbeton met een sterkteklasse van C35/45 toegepast. Bruggen met een hoofdoerspanning van meer dan 45 meter werden veelal als kokerbrug ontworpen. Bij dit type is de constructiehoogte ongeveer 1/25 van de overspanning.

Door toepassing van HSB wordt de grens tot welke overspanning plaatviaducten zijn toe te passen verschoven van 45 meter naar 65 meter. Dat scheelt behoorlijk in de constructiehoogte. Een kokerbrug in C35/45 zou bij een hoofdoerspanning van 65 meter een constructiehoogte hebben van 2,60 meter. Bij een holle-plaatviaduct in C70/85 is dat minder dan de helft: 1,20 meter. De meeste winst is overigens te behalen bij de overstap van C35/45 naar C53/65.

Bij de overstap van C53/65 naar C70/85 is de winst in de constructiehoogte kleiner. Dat komt doordat de maximale hoogte van de drukzone bij C70/85 kleiner is. Het maximaal opneembare moment in een bepaalde doorsnede is bij C53/65 circa 45% hoger dan bij C35/45. Tussen C53/65 en C70/85 neemt het maximale moment maar met 10% toe.

Conclusie: voor plaatviaducten is C53/65 het optimum.

Naast een geringere constructiehoogte kunnen de wanden en de ondervloer van de koker van een vrije uitbouwbrug slanker worden uitgevoerd. Door de aanwezige hoeveelheid voerspankabels is de dikte-afname van het dek van de koker echter beperkt. Bij de bouw van de Dintelhaven-Westbrug bleek het dek nauwelijks slanker uit te voeren te zijn. Er is daarom een proef genomen met uitwendige voorspanning. Hierbij zijn over de gehele lengte van de brug vier 'normale' inwendige voerspanelementen vervangen door vier uitwendige corrosiebestendige voerspanelementen van koolstof in de koker van de westbrug.



Ontwikkelingen in sterkte en duurzaamheid gaan door

De betonmortelindustrie heeft de ontwikkelingen van hogesterktebeton altijd gestimuleerd. Door de gekozen aanpak van samenwerking met de Bouwdienst Rijkswaterstaat en de TU Delft is via proefprojecten veel kennis opgedaan bij de toepassing van HSB in grootschalige projecten van uitbouwbruggen. Reeds enkele jaren is duidelijk dat de ontwikkeling niet zal stoppen bij sterktes rond C100. Er wordt reeds gesproken van 'zeer hogesterktebeton' indien de sterkteklasse groter is dan C200.

In het laboratorium zijn onder bijzondere omstandigheden betonsamenstellingen gerealiseerd met sterktes tot C800 en een zeer grote duurzaamheid. Om deze hoogwaardige betonproducten te kunnen realiseren zal het grove toeslagmateriaal worden vervangen door fijn zand om de homogeniteit van de mengsels te verbeteren en zal het aandeel van cement en vulstoffen toenemen. De ontwikkelingen rond C200 maken kleinschalige hoogwaardige toepassingen mogelijk in bijv. gevelpanelen, buizen, damwanden, brugdelen en dunne vloeren. Zo is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om de schuiven in de stormvloedkering in de Oosterschelde te vervangen door schuiven in zeer hogesterktebeton. De voordelen liggen hier vooral op het gebied van duurzaamheid zowel vanuit het oogpunt van onderhoud als in relatie tot de levensduur van de constructie. Het voortdurend technologisch en wetenschappelijk onderzoek zal een stimulans blijven geven aan de toepassing van HSB en andere hoogwaardige betonsoorten.

Duurzaamheid

Uit het oogpunt van duurzaamheid schrijft Rijkswaterstaat in haar bestekken cementsoorten voor die bij de sterkteklasse C53/65 resulteren in een slakgehalte dat ten minste 50% is van het totale cementgehalte.

Dat heeft twee redenen:

- zoveel mogelijk voorkomen van chloride-indringing in de betonconstructie;
- voorkomen van de Alkali Silica Reactie (ASR).

Door een zo hoog mogelijk gehalte aan hoogovencement in het cementmengsel toe te passen kan het slakgehalte op het gewenste niveau worden gebracht. Bovendien vindt Rijkswaterstaat de toepassing van hoogovencement passen in het streven naar beperking van gebruik van primaire grondstoffen. Voor portlandcement moeten immers grote hoeveelheden kalksteen of kalkhoudende materialen worden gewonnen. Voor nog te bouwen kunstwerken in sterkteklassen C70/85 zal Rijkswaterstaat vermoedelijk ook een slakpercentage van minimaal 50% gaan voorschrijven.

Verwerking van hogesterktebeton

Hogesterktebeton heeft hele andere verwerkingseigenschappen dan grindbeton met een sterkte van maximaal C35/45. Om problemen te voorkomen is het zinvol om voorafgaand aan een project enkele proefstukken te maken, zodat de stortploeg kan wennen aan de specifieke eigenschappen.

Belangrijk verschil is bijvoorbeeld dat door de hoge zetmaat van HSB de specie hoog vloeibaar lijkt, maar dat eigenlijk niet is. Door het hoge aandeel fijne vulstoffen en cementpasta heeft de specie namelijk een grote samenhang (taaiheid). De specie is alleen hoog vloeibaar als er energie aan wordt toegevoegd. Bovendien dempen de trilnaalden behoorlijk uit, omdat het mengsel erg stabiel is. De werkingssfeer van de trilnaalden is dus beperkt. Dus ook al vloeit de specie tijdens het trillen mooi horizontaal uit, dan nog is goed en diep trillen op korte afstanden noodzakelijk. Zelfs nog op kortere afstanden dan bij normaal grindbeton!

Tijdens het storten van HSB is een continue en just-in-time aanvoer van de betonspecie eveneens heel belangrijk. De reeds gestorte beton stabiliseert snel. Beton dat 30 minuten later wordt aangebracht mengt niet altijd meer met het reeds aanwezige beton, ook niet met behulp van een trilnaad. In dat geval blijft men de stortnaden altijd zien.

Door de lage watercementfactor is HSB-specie gevoelig voor uitdroging. Bij uitdroging van het betonoppervlak kan hierdoor een vel ontstaan dat de afwerking bemoeilijkt en de kwaliteit van de toplaag vermindert. Om velvorming en uitdroging te voorkomen moet de betonspecie zo snel mogelijk worden afgedekt.



Tweede Stichtse Brug laat voordelen HSB zien

Eén van de bruggen die in de periode 1996 – 2000 in HSB is gebouwd is de Tweede Stichtse Brug in Rijksweg 27 tussen Utrecht en Almere, over het Gooimeer. De hoofdoverspanning van deze brug is 160 meter. De oude brug is in lichtbeton B32,5 gemaakt. De constructiehoogte van de nieuwe brug moest gelijk zijn aan de oude. Er zijn drie alternatieven ontworpen: één in lichtbeton C35/45, één in hogesterktebeton C53/65 en één in hogesterktebeton C70/85. Uiteindelijk is gekozen voor C70/85.

Argumenten waren:

- ontwerp in C70/85 was het goedkoopst;
- ontwerp in C70/85 bood voordelen op het gebied van ontwerp, duurzaamheid en duurzaam bouwen;
- Rijkswaterstaat wilde innovatie op het gebied van hoogwaardig beton en duurzaam bouwen stimuleren.

Hogesterktebeton is goed verkrijgbaar

De spin-off van de ontwikkeling in HSB heeft geleid tot een ruimere toepassing van C53/65 in bruggen en viaducten. Door voortdurende ontwikkelingen op het gebied van de betontechnologie en het productieproces is binnen de betonmortel-industrie belangrijke vooruitgang geboekt en wordt de levering van C53/65 niet meer als uitzonderlijk beschouwd. Meer dan de helft van de betoncentrales in Nederland beschikt inmiddels over een productcertificaat C53/65 zodat voor ieder project in Nederland voldoende producenten beschikbaar zijn.

► De voordelen voor uitbouwbruggen op een rij:

- Gewichtsbesparing: dünnere kokerwanden en kokervloer geven een aanzienlijke reductie van het gewicht, vooral bij de zwaarste doorsneden in de buurt van de rivierpijlers.
- Kortere bouwtime: gebruik van 5,00 meter lange secties in plaats van de even zware 3,50 meter lange secties bij C35/45, waardoor de bouwtime van de Tweede Stichtse Brug drie maanden korter werd.
- Snelle verharding: de bouwsnelheid was één sectie per week (aan elke zijde). De snelle verharding bood echter mogelijkheden om die cyclus bij vertragingen tijdelijk met één of twee dagen te verkorten. HSB leidt dus tot enige logistieke vrijheid.
- Minder voorspanning nodig: door de snelle verharding konden kleinere ankerplaten worden gebruikt. Door de reductie van het gewicht was ook minder voorspanning nodig. Hierdoor konden de voorspankabels in de flens van de kokerligger worden ondergebracht, in plaats van in de wanden. De voorspankabels kruisen daardoor niet meer de verticale beugelwapening in de wanden. Voordelen daarvan zijn dat de beugelwapening eenvoudiger kan blijven; het storten van de dunne wanden niet meer wordt gehinderd door de voorspankabels en dat voor de dwarskrachtberekening de wanddikte niet meer hoeft te worden gereduceerd.

► Algemene voordelen:

- door de zeer hoge sterkte kan er slank en licht worden gebouwd;
- door de zeer grote dichtheid hebben constructies in HSB een dubbele levensduur;
- door de zeer grote dichtheid vragen HSB-constructies minder onderhoud;
- integraal beschouwd is een brug of viaduct in C53/65 of C70/85 niet duurder dan in C35/45;
- bij bruggen en viaducten zijn grotere overspanningen mogelijk: dus een beter zicht voor de weggebruiker;
- HSB is weer hoogwaardig her te gebruiken.



Niet duurder

HSB beton is duurder dan het gebruikelijke grindbeton. Daarbij is het prijsverschil tussen C35/45 en C53/65 kleiner dan tussen C53/65 en C70/85. Oorzaak van prijsverschil is de toevoeging van silica fume, een langere mengtijd en de extra benodigde cement en hulpstoffen. Voor een in HSB uitgevoerde brug of viaduct is echter minder betonmortel nodig dan voor een kunstwerk dat in normaal grindbeton is uitgevoerd.

Een brug in HSB is daardoor slechts enkele procenten duurder dan de variant in C35/45. Daarentegen wordt voordeel behaald door de geringere constructiehoogte: die kan bij C53/65 15 tot 20% minder zijn dan bij C35/45. De hoeveelheid grondwerk ten behoeve van de aarden baan wordt hierdoor aanzienlijk minder. Al in de ontwerpfase kan hiermee rekening worden gehouden.



Januari 2005

Deze brochure is een uitgave van VOBN, de brancheorganisatie van de betonmortelindustrie.

VOBN

Postbus 383
3900 AJ Veenendaal
T 0318 55 74 74
F 0318 55 74 70
E info@vobn.nl
W www.gietbouw.nl

Betoncentra:

Betoncentrum Noord-Oost Nederland
Schrevenweg 1-9
8024 HB Zwolle
T 038 454 87 88
F 038 452 67 24
E betonNON@vobn.nl

Betoncentrum West Nederland
Prins Bernhardlaan 12p
2405 VT Alphen a/d Rijn
T 0172 65 35 08
F 0172 65 35 12
E betonWN@vobn.nl

Betoncentrum Zuid Nederland
Bosscheweg 57
5056 KA Berkel-Enschot (Tilburg)
T 013 455 91 83
F 013 455 91 85
E betonZN@vobn.nl

Ontwerp en vormgeving:

springvorm bno, 's-Hertogenbosch

Fotografie:

AeroCamera, Michel Hofmeester, Rotterdam
Studio Henk van der Veen, Maassluis
Wim de Bruijn, Tilburg
Bob de Ruiter, Helvoirt



