



Ontwerp bouwput voor diepste parkeergarage van Nederland

Ronde owb-vloer met staalvezels

De parkeergarage Lammermarkt, aan de rand van het centrum in Leiden, is de diepste garage van Nederland. Het realiseren van een waterdichte kuip bleek geen eenvoudige opgave, gezien de ronde vorm van de put en de enorme ontgravingsdiepte. Door inzet van innovatieve materialen en bouwmethoden is het toch gelukt.

De parkeergarage Lammermarkt is cilindervormig en heeft zeven parkeerlagen, alle ondergronds (fig. 2). De diameter bedraagt 60 m. De wanden zijn uitgevoerd als diepwanden die zowel tijdens de bouw als in het gebruiksstadium voor de grond- en waterkering zorgdragen. Deze diepwanden dragen tevens de parkeervloeren.

De bodem van de bouwput is gerealiseerd met vezelversterkt onderwaterbeton. In de gebruiksfase verzorgt een definitieve constructievloer de waterdichtheid van de parkeergarage. De



ir. Jeroen Meijdam,
 ir. Marjorie Greveling de Vos,
 ir. Arjen Ramkema
 Dura Vermeer

Diepwanden

Over de diepwanden van de parkeergarage Lammermarkt is het artikel 'Uitdagingen bij ontwerp ronde bouwkuip' verschenen, elders in deze *Cement*.

opwaartse druk op de onderwaterbetonvloer (owb-vloer) en de definitieve constructievloer wordt opgenomen door Gewi-palen die in beide vloeren zijn verankerd (fig. 3). De poeren zijn geïntegreerd in de owb-vloer en de constructievloer (foto 1 en 7). Op die plaatsen is het onderwaterbeton gewapend. Het spectaculaire aan de bouwput is dat er geen stempelraam is gebruikt. Dat terwijl er circa 25 m grond en water moest worden gekeerd. Boven op de diepwanden bevindt zich wel een ringbalk.

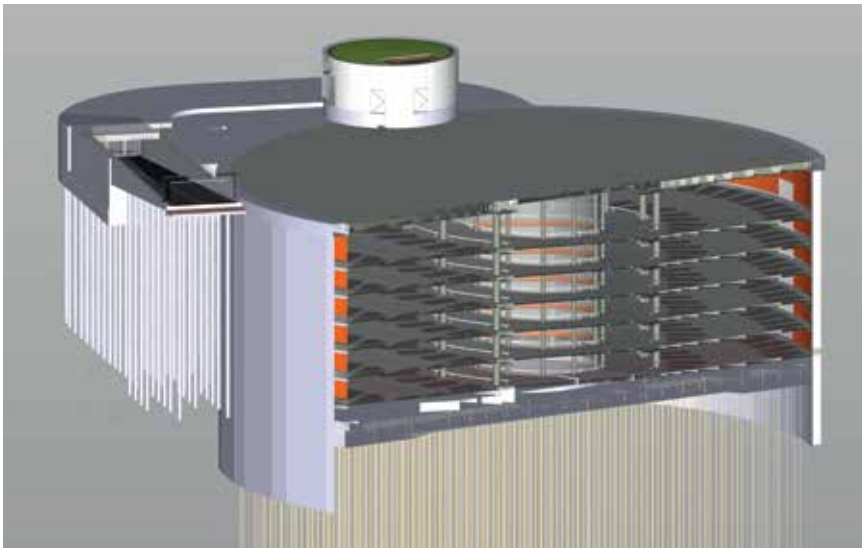
Voorwaarde voor ontwerp

Er zijn diverse zaken die een rol hebben gespeeld bij het ontwerp van de owb-vloer. Zo is het zeer bepalend of er druk vanuit de diepwanden op de vloer wordt uitgeoefend. Ook krimp van de vloer en temperatuurbelastingen spelen een rol.

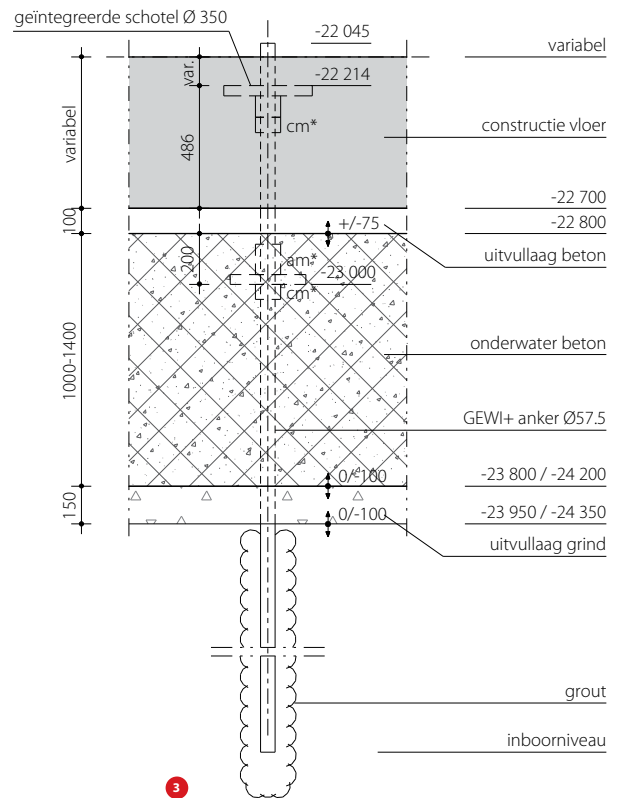
Drukkracht vanuit diepwanden

De gronddruk op de diepwanden van de cilindervormige bouwput is deels symmetrisch en de waterdruk is volledig symmetrisch. De vraag was of door de cilindervorm de belasting geheel zou worden opgenomen door horizontale normaalkrachten in de cilinder, of dat er buiging in de diep-

2



- 1 De bouwput van de parkeergarage Lammermarkt is 25 m diep
foto: in2Contracts
- 2 Doorsnede van de parkeergarage
- 3 Detail verankering Gewi-palen in owb- en constructievloer



wanden en een stempelkracht in de owb-vloer zou optreden. Dat is zeer bepalend voor het ontwerp van de owb-vloer. Over dit gedrag is een separaat artikel 'Uitdagingen bij ontwerp ronde bouwkuip' geschreven, elders in deze *Cement*.

Krimp

Bij het ontwerpen van de vloer speelde krimp een nadrukkelijke rol. Ook dit fenomeen is bepalend of er een normaaldrukkracht in de vloer ontstaat.

Verhardingskrimp

Na de stort van het onderwaterbeton komt de chemische reactie in het beton op gang, waarmee het materiaal verhardt. Tijdens deze verhardingsfase warmt het beton op tot enkele tientallen graden Celsius. Deze opwarming zorgt ervoor dat het nog vloeibare mengsel in de hoogte uitzet. Als het beton voor een groot deel is uitgehard, daalt de temperatuur weer. Dit vertaalt zich in krimp, ook horizontaal. Deze krimp wordt vaak de verhardingskrimp, of ook wel adiabatische krimp genoemd.



4

Uitgaande van een temperatuurverschil van 20 °C, een uitzettingscoëfficiënt van 10^{-5} en een lengte van 60 m bedraagt de krimp:

$$u = \Delta T \alpha L = 20 \cdot 10^{-5} \cdot 60\,000 = 12 \text{ mm (ofwel 6 mm aan elke zijde)}$$

Autogene krimp

Naast de verhardingskrimp komt ook de autogene krimp op gang. Over de grootte van deze krimp is informatie opgenomen in Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1) en in de SBRCURnet-publicatie 'Autogene krimp'. In de SBRCURnet-publicatie staat niet exact aangegeven hoe de grootte van deze krimp moet worden bepaald, maar vast staat wel dat de eerste vier weken na de stort het onderwaterbeton zal verkorten als gevolg van dit fenomeen.

Volgens Eurocode 2, artikel 3.1.4, formule 3.12, bedraagt de rek als gevolg van de autogene krimp:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) 10^{-6} = 2,5 (37 - 10) \cdot 10^{-6} = 6,75 \cdot 10^{-5}$$

Na 28 dagen is deze krimp slechts deels ontwikkeld. Volgens Eurocode 2 (3.11 en 3.13) bedraagt deze krimp:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ca}(t) &= \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \\ \beta_{as}(t) &= 1 - \exp(-0,2 t^{0,5}) \\ \varepsilon_{ca}(28) &= (1 - e^{-0,2 \cdot 28^{0,5}}) \cdot 6,75 \cdot 10^{-5} = 0,65 \cdot 6,75 \cdot 10^{-5} = 4,38 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Uitgaande van een diameter van de vloer van 60 m, bedraagt de verplaatsing aan één zijde:

$$u = 4,38 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{60\,000}{2} = 1,3 \text{ mm}$$

Volgens de SBRCURnet-publicatie kan deze werkelijke krimp wel eens 3 tot 4 keer groter zijn dan berekend volgens de Eurocode. De vervorming kan dus 5,2 mm bedragen.

Uitdrogingskrimp

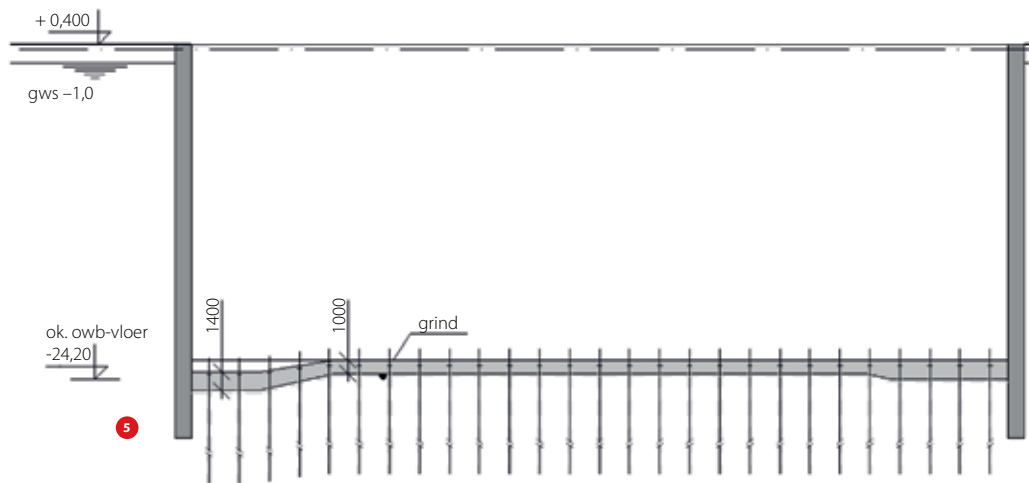
Als laatste vorm van krimp noemen we uitdrogingskrimp. Aangezien het onderwaterbeton de eerste vier weken zeker onder water zou blijven, was het bij het ontwerp niet nodig van uitdroging uit te gaan.

Totaal

De totale krimp van het de owb-vloer is daarmee geschat op:

adiabatische krimp	6 mm
autogene krimp	1,3 – 5,2 mm
uitdrogingskrimp	0 mm
totaal	6 tot 11 mm

Deze vervorming kan zich vertalen in een kier ter plaatse van de aansluiting van de owb-vloer op de diepwand (foto 4). De krimp van de stijve owb-vloer wordt immers niet of nauwelijks tegengehouden door de ondergrond en de Gewi-palen, en ter plaatse van de aansluiting bevindt zich de zwakste plek. Door deze kier kan de vloer omhoogkomen. Bovendien vormt de kier een mogelijke bron van lekkages. Hoe deze kier is dicht-gezet, wordt uitgelegd in een artikel in *Betoniek Vakblad* dat in juni verschijnt. Net als de cilindervorm van de diepwanden zorgt ook het eventuele ontstaan van deze kier ervoor dat niet op voorhand kan worden gesteld dat er een stempeldruk zal optreden in de owb-vloer. Doordat niet zeker is of de voegen tussen de diepwandpanelen zullen vervormen, is het immers niet zeker dat de diepwanden kunnen meebewegen met de vervorming van de vloer. Met deze onzekerheid moest rekening worden gehouden in het ontwerp.



- 4 Aansluiting diepwand op het onderwaterbeton
- 5 Dwarsdoorsnede bouwkuip
- 6 Bovenaanzicht vloer

Temperatuurverschil

Zoals gesteld zal tijdens het verharden van het onderwaterbeton de temperatuur in het beton oplopen. Doordat het beton aan de boven- en onderzijde wordt gekoeld door water en in de kern niet, kan er een temperatuurverschil ontstaan over de hoogte van het verhardende beton (temperatuurgradiënt). Gedurende de verharding vertaalt dit temperatuurverschil zich in een verschil in krimp over de hoogte van de doorsnede. Hierdoor kunnen inwendige spanningen en daarmee scheuren optreden, die zich in een later stadium kunnen vertalen naar watervoerende scheuren en naar verlies van sterkte van het onderwaterbeton. Om deze reden is het verstandig de hoogte van de owb-vloer te beperken. Anders gezegd: een grotere dikte van de vloer betekent niet meteen een betere constructie.

Samenvattende randvoorwaarden

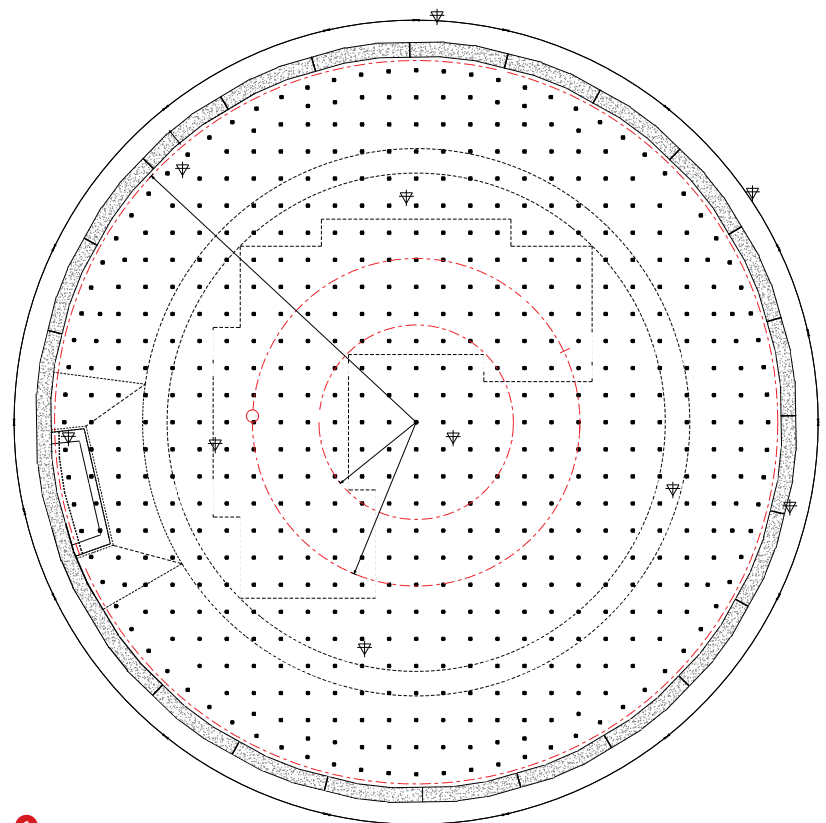
Kort samengevat leverde het voorgaande de volgende voorwaarden op voor het ontwerp van de owb-vloer:

- Het optreden van stempeldruk in de vloer is niet zeker.
- Mogelijk kan de owb-vloer langs de diepwand omhoogkomen. Maar er zal ook rekening moeten worden gehouden met de mogelijkheid dat het onderwaterbeton toch aan de diepwand blijft vastzitten (vastwigen, volgens CUR-Aanbeveling 77) en dat hier dus toch een belasting wordt overgedragen.
- De ontgravingsdikte en de dikte van de owb-vloer moeten enigszins binnen de perken blijven.

Ontwerpoverwegingen

Er is veel tijd geïnvesteerd in het vinden van een ontwerp dat aan alle randvoorwaarden voldeed. Eerst is bekeken of een ongewapende owb-vloer mogelijk was. Dat zou een extreem dikke vloer opleveren.

Vervolgens is onderzocht of een gewapende owb-vloer haalbaar was. Aangezien een deel van het onderwaterbeton ter plaatse van de poeren toch al moest worden gewapend, leek dit een voor de hand liggende keuze. In dat geval zou een doorgaand wapeningsnet moeten worden toegepast in twee richtingen, over de gehele owb-vloer. Het berekenen van een dergelijke wapening is relatief eenvoudig. Maar het ontwerpen van wapeningskorven die op de bodem konden worden geplaatst en in



twee richtingen moesten worden gelast, is dat zeker niet. Toepassing van een volledig gewapende owb-vloer bleek al met al zeer kostbaar.

Daarna is de toepassing van staalvezelbeton (SVB) onderzocht. Al snel werd geconcludeerd dat het toepassen van staalvezelbeton economischer en praktischer is dan het toepassen van een volledig gewapende owb-vloer.

De vloer met deels staalvezelbeton en deels traditionele wapening is verder uitgewerkt. De dikte van de vloer is daarbij zo beperkt mogelijk gehouden. Hierbij is uitgegaan van een hogere toelaatbare treksterkte van het SVB (zie onder kop 'Uitwerking met staalvezelbeton'). Uiteindelijk volstond een vloerdikte van 1000 mm voor het grootste deel van de vloer. Langs de diepwand is een dikte toegepast van 1400 mm (fig. 5 en 6). Ter plaatse van de liftputten is de owb-vloer lager aangebracht.



7 De bouwput van parkeergarage Lammermarkt
foto: Buro JP

7

Uitwerking met staalvezelbeton

Door het toepassen van staalvezels behoudt het beton zijn sterkte nadat er buigscheuren zijn ontstaan. Op de posities waar de eerste buigscheuren ontstaan, nemen de staalvezels de spanning over en zal het materiaal dus niet bezwijken. Op die plekken treedt wel een kromming op. Over de gehele hoogte van de scheur ontwikkelt zich een trekzone en in het ongescheurde gedeelte een drukzone (fig. 8). Naarmate de scheur verder gaat openstaan, wordt de trekzone over de hoogte groter, en wordt de drukzone kleiner. Als gevolg hiervan neemt de trekkracht in de scheur toe en neemt de drukkracht in de drukzone toe. Daarmee zal ook het opneembare buigend moment toenemen. Door toepassing van staalvezels neemt de vervormings- en momentcapaciteit dus toe en gaat het beton zich plastisch gedragen.

Stijfheid

Bij toepassing van staalvezelbeton moet worden gerekend met de stijfheid van een gescheurde doorsnede. De fictieve E-modulus van een gescheurde doorsnede met staalvezels is aanmerkelijk lager dan de E-modulus van een ongescheurde doorsnede zonder staalvezels. Voor het ontwerp van het onder

waterbeton in de parkeergarage Lammermarkt is uitgegaan van een mengsel met sterkteklasse C30/37 en 35 kg/m^3 staalvezels (type Dramix 3D 65/60 BG). Uit het $M-\kappa$ -diagram (fig. 9) volgt een E-modulus van 5000 N/mm^2 .

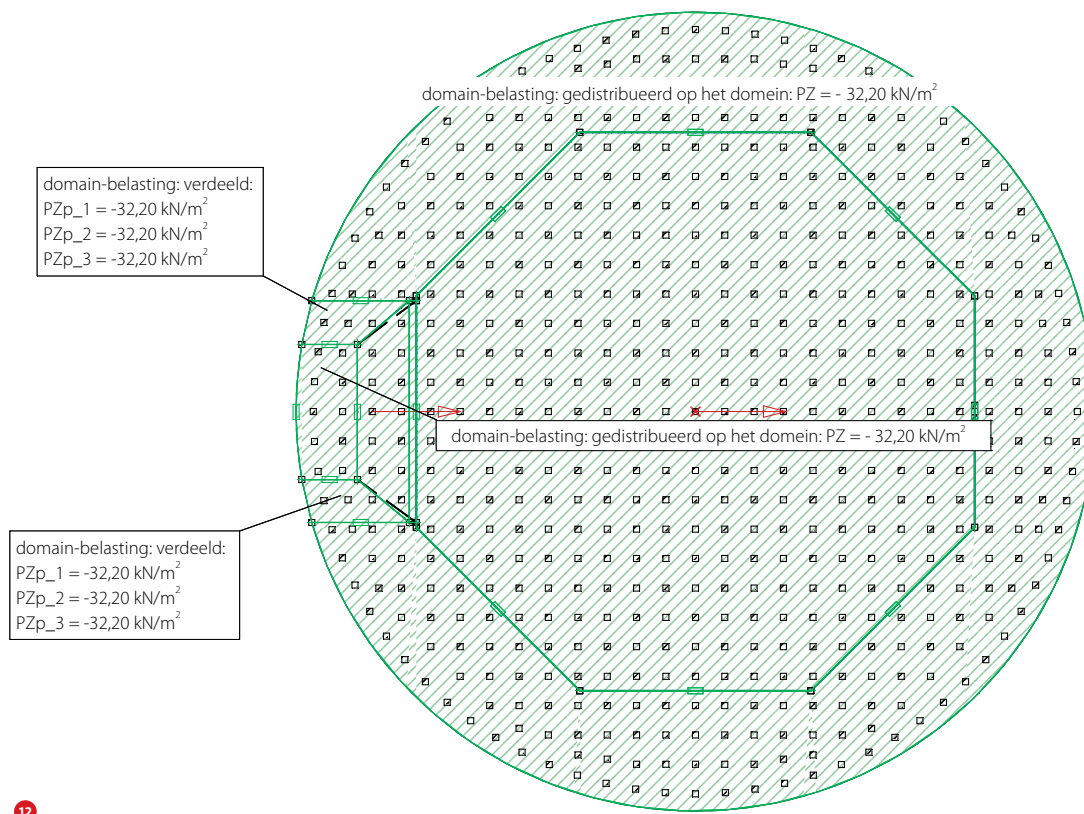
Het toepassen van een aanmerkelijk lagere E-modulus voor staalvezelbeton heeft als gevolg dat de buigende momenten lager zijn en dat ook het gebied waar de hogere momenten optreden kleiner is (fig. 10 en 11).

Rekenmodellen

De owb-vloer van de parkeergarage is ontworpen volgens CUR-Aanbeveling 77 'Onderwaterbeton' (CUR77). Deze aanbeveling geeft drie verschillende modellen voor het berekenen van onderwaterbeton: model A, model B1 en model B2. Voor het toepassen van model B2 moet de waterdruk niet groter zijn dan 10 m. Om deze reden kon dit rekenmodel niet worden toegepast.

Voor rekenmodel B1 geldt dat de stempeldruk in het onderwaterbeton bepalend is voor de sterkte van de vloer. Omdat de stempeldruk in dit geval niet kan worden gegarandeerd, is ook deze methode niet toepasbaar.

12 Bovenaanzicht rekenmodel uit AxisVM



palen. Daartoe zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze analyses zijn gecombineerd met verschillen in het wel of niet optreden van stempeldrukken en het vastwiggen van de owb-vloer tegen de diepwand aan. Al deze verschillende uitgangspunten hebben geresulteerd in twee scenario's met elk twee verschillende rekenmodellen. Scenario 1 gaat uit van een vrije vervorming van de owb-vloer langs de diepwanden. Deze berekening is uitgevoerd met verschillende stijfheden van de Gewi-ankers. Scenario 2 gaat ervan uit dat de owb-vloer wordt vastgewigd aan de diepwand, en de verticale belasting uit de owb-vloer volledig wordt overgedragen aan de diepwand. Maatgevend bleek het scenario te zijn waarbij de owb-vloer vastgewigd bleef zitten achter de diepwand, en waarbij de lage veerstijfheid van 17 000 kN/m werd aangehouden voor de Gewi-palen. Voor de verticale veerstijfheden van de diepwand is uitgegaan van 100 000 kN/m².

Uit de berekening blijkt dat in een enkel geval de trekankers iets overbelast werden. Door de ankers als niet-lineaire veren in te voeren, is de slip van de ankers gemodelleerd. De conclusie is dat deze situatie voor het onderwaterbeton acceptabel is. Over het slippen van de palen is een artikel geschreven in *Geotechniek*.

Waterdichte bouwkuip

Gedurende de aanleg van de owb-vloer en de constructievloer zijn de vervormingen gemonitord. Hieruit bleek, achteraf, dat de vloer wel degelijk is vastgewigd aan de diepwand. Meer over de metingen aan het onderwaterbeton is terug te vinden in het artikel over dit werk in *Betoniek Vakblad* dat in juni verschijnt. Al deze inspanningen hebben geresulteerd in een voldoende waterdichte bouwkuip, een onderwaterbetonvloer met voldoende sterkte om de waterdruk te kunnen afdragen, en een omgeving waarin probleemloos het inbouw pakket van de gehele parkeergarage kon worden aangebracht. ☒

PROJECTGEGEVENS

opdrachtgever Gemeente Leiden
hoofdaannemer Combinatie
 Parkergarages Leiden bestaande uit
 Dura Vermeer en Besix
hoofdconstructeur Royal
 HaskoningDHV

architect JHK Architecten
diepwanden Franki Grondtechnieken
gewi-palen Bauer Funderingstechniek
duikwerkzaamheden DISA
staalvezelbeton Cementbouw /
 Bekaert

Verwerkbaarheid

Het toepassen van staalvezels in het onderwaterbeton heeft ook gevolgen voor de vloeimaat en de verwerkbaarheid van het onderwaterbeton. Om te onderzoeken of de staalvezelbeton tussen wapeningsnetten kon worden gestort, is een stortproef uitgevoerd. Meer over deze stortproef is te lezen in een artikel in *Betoniek Vakblad* dat in juni verschijnt.