



(Foto: Christiaan de Bruin)

Duurzaam beton voor ARTIS-aquarium

Het 142 jaar oude ARTIS-aquarium wordt grootschalig gerestaureerd en gerenoveerd, mede omdat het zoute water de betonnen constructie van het gebouw ernstig heeft aangetast. ARTIS wil het rijksmonument duurzaam restaureren en vernieuwen. Dat was aanleiding voor een uitgebreide zoektocht naar de ideale materiaalkeuze voor de nieuwe aquaria. De keuze is wederom op beton gevallen. Die keuze was niet vanzelfsprekend vanwege de milieu-impact van beton, de wapening en de eindige levensduur. De uitkomst is een mix van traditioneel en duurzaam beton. Eén segment met aquaria wordt traditioneel uitgevoerd, een tweede segment met aquaria met zelfhelend beton en een derde segment met aquaria met basaltvezelwapening. Door met de wapening en het beton te experimenteren hoopt ARTIS een voorbeeld te geven aan de betonbranche hoe duurzamer bouwen met beton ook in extreme omstandigheden mogelijk is. Dit is ook voor bijvoorbeeld Rijkswaterstaat interessant.

Oorspronkelijk is het aquarium vrijwel volledig in metselwerk uitgevoerd. In de jaren '90 zijn de zoutwateraquaria met gewapend beton gerenoveerd, omdat het metselwerk door het zoute water was aangetast. Na circa 30 jaar gebruik was de wapening in het beton alsnog dusdanig aangetast dat de gehele zoutwaterzijde moest worden vervangen. Deze vervanging vindt plaats als onderdeel van een grootschalige restauratie en renovatie van het gehele rijksmonument.

Toepassing van beton in zout water

De omstandigheden in een deels tropisch zoutwateraquarium zijn voor gewapend beton extreem uitdagend. Op de waterlijn wordt het beton blootgesteld aan wisselend natte en droge omstandigheden en chlorides, bij een relatief hoge temperatuur. Onder deze omstandigheden kan relatief snel betonrot optreden omdat CO₂ uit de lucht, water, hoge temperatuur en chloriden factoren zijn die het aantastingsproces versnellen. De toepassing van beton voor de aquaria had, mede



Door betonrot aangetast beton van het aquarium

op basis van bovengenoemd aspect, niet direct de voorkeur van ARTIS. ARTIS wil in 2030 een klimaatpositief natuurpark zijn en streeft daarbij ook naar duurzame materiaalkeuzes. De milieu-impact van het materiaal beton en de daarin toegepaste wapening waren aanleiding om duurzame alternatieven te onderzoeken. De mogelijkheid om de aquaria in andere materialen uit te voeren, zoals kunststof, werd onderzocht, maar liep stuk op verschillende aspecten. Zoals de beperkte ruimte om grote onderdelen het rijksmonument in te hijsen, onzekerheden ten aanzien van de levensduur en zeer hoge kosten.

In de jaren '90, ten tijde van de laatste renovatie, was minder aandacht voor hoe de levensduur van beton kon worden verlengd onder de uitdagende omstandigheden van een aquariumgebouw met miljoenen liters zout water. Tegenwoordig, en zo ook bij deze aquaria, wordt er beton met een lage water-cementfactor, hoogovencement en een grote betondekking op de wapening toegepast. De levensduur zou daarmee in principe minimaal 100 jaar moeten zijn, zeker driemaal de levensduur van het beton bij de eerdere renovatie. Gewapend beton bleek daarom toch de beste oplossing.

Duurzaam en innovatief beton

Nadat de keuze voor beton definitief was gemaakt, is ARTIS met partners op zoek gegaan naar mogelijkheden om de aquariumbakken op een duurzame manier te renoveren. ABT werd benaderd door directievoerder BBN om de mogelijkheden voor de verduurzaming van het gewapende beton te onderzoeken. Na het afwegen van de verschillende mogelijkheden en het testen van een aantal innovatieve technologieën is uiteindelijk gekozen voor het gebruik van zelfhelend beton en basaltvezelwapening in separate aquariumbakken. Voor beide technologieën geldt dat ze een rol kunnen spelen in de verduurzaming van beton, maar in Nederland nog slechts zelden worden toegepast. Als het aquarium in gebruik is kan iedereen, ook achter de schermen, komen aanschouwen dat deze techniek werkt. Het aquarium is hiermee, net als 142 jaar geleden, vooruitstrevend in de toegepaste techniek. Omdat deze techniek ook voor bijvoorbeeld Rijkswaterstaat interessant is om te testen, maar dit op eigen projecten risicovol wordt geacht, heeft zij bijgedragen in de onderzoekskosten en worden de resultaten daarvan gedeeld.

Zelfhelend beton

Voor het zelfhelend beton wordt gebruik gemaakt van bacteriën van *Basilisk* die in het beton worden meegestort en zich gaan vermenigvuldigen als het beton scheurt. De bacteriën zetten dan kalksteen af in de scheur, waardoor deze weer gedicht wordt. Lucht, water en chloriden kunnen daardoor niet meer bij de wapening komen, waardoor betonrot wordt uitgesteld. Bij de aquaria van ARTIS is ervoor gekozen om de wapening in de wanden gelijk te houden, maar bij toekomstige projecten is het ook mogelijk om minder krimpwapening toe te passen, als bredere scheuren kunnen worden toegelaten in het beton.

Basaltvezelwapening

Het gebruik van basaltvezelwapening heeft twee duurzaamheidsaspecten. Enerzijds is de CO₂-impact van basaltvezelwapening lager dan van staal, voornamelijk omdat het veel lichter is en er dus minder energie nodig is om het materiaal te smelten bij de productie. Daarnaast kan basaltvezelwapening niet roesten, waardoor de levensduur in principe oneindig is. Hoewel daar bij de aquaria nog geen gebruik van is gemaakt, kan het beton bij toepassing van basaltvezel met minder cement worden samengesteld, waardoor ook daarvan de impact afneemt.

Onderzoeken en testen

Vooral voor de toepassing van basaltvezelwapening was uitgebreid onderzoek nodig. De sterkte van basaltvezelwapeningsstaven is een factor 1,5 à 2 hoger dan van wapeningsstaal bij dezelfde doorsnede, maar het is ook veel elastischer. Met die elasticiteit is de kans op bredere scheuren die tot lekkage kunnen gaan leiden relatief groot. Om de scheurwijdte te beheersen is gebruik gemaakt van een combinatie van wapenings-



Maco-vezels van basaltvezel



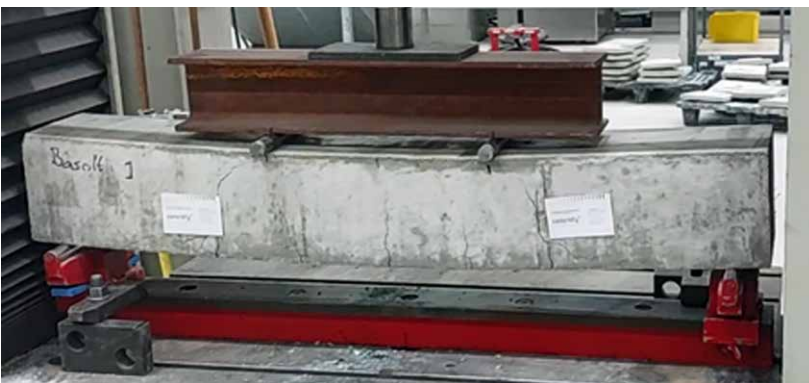
Basaltvezel wapeningsstaaf

staven en macro-vezels van basalt. Zowel de staven als de macro-vezels worden gemaakt uit bundels van heel dun draad dat wordt vervaardigd door basaltsteen te smelten en daar een draad uit te trekken. Voor de aquaria zijn Basbars en Minibars van de leverancier

Reforcetech toegepast, die ook testrapporten van de producten heeft aangeleverd.

Testen

In het laboratorium van Concrefy zijn vierpunts balktesten uitgevoerd op balken met wapeningsstaal en basaltvezel. In het geval van de balken met wapeningsstaal zijn vier staven $\varnothing 8$ mm in de hoeken geplaatst. Bij de basaltvezelwapening zijn vier staven $\varnothing 10$ mm en 15 kg/m^3 minibars toegepast. De combinatie van wapeningsstaven en macrovezels wordt hybride wapening genoemd. Omdat basaltvezel veel lichter is dan staal bedraagt de wapeningsdosering 70 kg/m^3 in geval van staal en 44 kg/m^3 in geval van basalt. Per kilogram is staal uit een hoogoven CO_2 -intensiever dan basalt, namelijk $2,65 \text{ kg t.o.v. } 2,20 \text{ kg CO}_2$ per kg materiaal. Het embodied carbon van de balk met wapeningstaal is dan dus een factor twee hoger dan van basaltwapening. Uit de testen bleek dat de capaciteit van de balken met basaltvezelwapening hoger is, deze een grotere vervorming konden opnemen en minder wijde scheuren vormden. Voor de definitieve wanden kon de wapening dus nog iets worden geoptimaliseerd.



Boven: Balktest met wapeningsstaal kort voor bezwijken op buiging bij 50 kN belasting
Onder: Balktest met basaltwapening kort voor bezwijken op dwarskracht bij 65 kN belasting

Salverda Bouw heeft een belangrijke rol gespeeld in zowel de dialoog over de mogelijke verduurzamingsopties als het maken van mock-ups en de uiteindelijke realisatie. Het uitvoeren van de mock-ups in twee fasen bleek erg belangrijk om een goede afweging te kunnen maken welke technologie verantwoord kon worden toegepast. Uiteindelijk zijn de ideeën dus via labtesten en proefstortst tot daadwerkelijke uitvoering gebracht.

Door Theo Pouw uit Utrecht is het beton met de toevoeging van de Basilisk bacteriën en Reforcetech



Mock-up 1; testwand aquarium inclusief sponning voor het glas



Mock-up 2; miniatuurversie aquarium na ontkisten

minibars in haar eigen laboratorium getest op verwerkbaarheid en vervolgens geleverd voor toepassing in de mock-ups en de definitieve wanden.

De uitvoering van de wanden van de aquaria waarin de innovaties zijn toegepast zijn inmiddels gestort en ontkist, net als de wanden waarin geen innovaties zijn toegepast. Het resultaat in de afbeeldingen laat geen verschil zien. Dat op zich is al een succes. In de komende maanden en jaren zal het gedrag van de verschillende bakken gemonitord worden. Bij een volgende renovatie, wanneer het aquarium 245 jaar oud is, zal men zich wellicht afvragen waarom niet alle aquaria met basaltvezelwapening en zelfhelend beton zijn uitgevoerd, omdat dat de renovatie dan aanzienlijk zou hebben beperkt.

Niki Loonen, ABT



Basaltwapening in de kist



Ontkiste wand 1 (zelfhelend beton)



Ontkiste wand 2 (zelfhelend beton)