

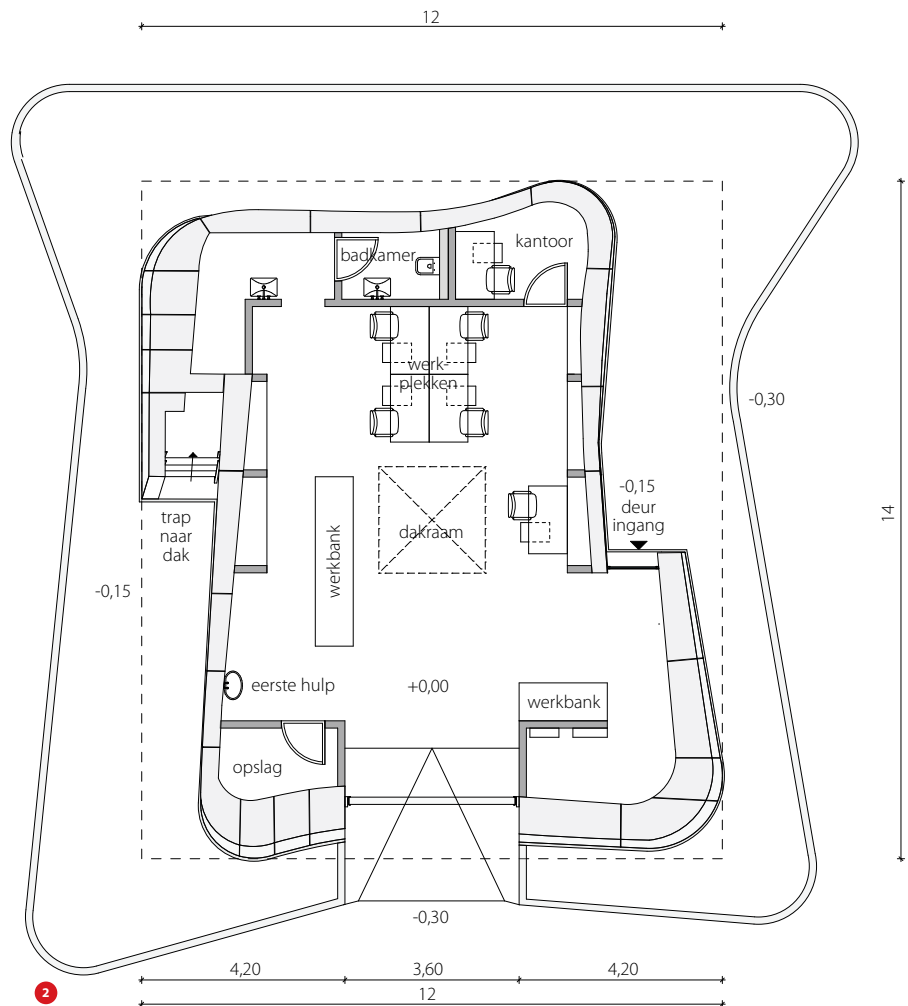
Laboratorium in Dubai ter plaatse geprint

3D-betonprinten in de woestijn



ing. Hans Laagland,
dr.ir. Paul Teeuwen
Witteveen+Bos
Berry Hendriks
CyBe

1 R&Drone Laboratory in Dubai
2 Plattegrond



In de woestijn van Dubai is in 2017 het eerste op locatie geprinte utiliteitsgebouw ter wereld gerealiseerd: het R&Drone Laboratory (foto 1). Het project past in het streven van Dubai om in 2030 25% van alle gebouwen te printen. Speciaal voor het project is een mobiele 3D-printer vanuit Nederland naar het emiraat getransporteerd.

Het R&Drone Laboratory heeft een voetprint van $12 \times 14 \text{ m}^2$ (168 m^2 , fig. 2) en is onderverdeeld in vier zones: een elektronisch, software-, mechanisch en een prototypelab. Het gebouw bestaat uit één bouwlaag met een vrije hoogte van 4,0 m. Het dak is via een trap bereikbaar en vormt een groot terras dat onder andere zal worden gebruikt voor het op afstand besturen en testen van drones.

R&Drone Laboratory

Het laboratoriumgebouw is ontwikkeld in opdracht van DEWA (Dubai Electricity and Water Authority). In het gebouw worden DEWA-drones ontwikkeld. Deze worden onder andere gebruikt voor onderhoud en inspectie van het grootste zonnepark ter wereld, dat op 50 km van Dubai-stad wordt gebouwd. In 2020 moet er voor 1000 MW aan pv-panelen zijn geïnstalleerd.

Constructief ontwerp

De constructie van het R&Drone Laboratory bestaat uit een op staal gefundeerde betonplaat. Hierop zijn on-site, met een 3D-betonprinter, holle wandelementen geprint die de gevel vormen van het gebouw. De wandelementen dragen de uit kanaalplaten samengestelde dakvloer en verzorgen de globale stabiliteit van het gebouw. Boven op de dakvloer zijn

3D-geprinte betonwandelementen geplaatst die de balustrade vormen. In totaal zijn in drie weken tijd 51 elementen geprint.

Wandelementen

De gevel is onderverdeeld in 24 losse wandelementen (fig. 3). Deze zijn van elkaar gedilateerd om krimp en thermische werking te kunnen laten plaatsvinden. De wandelementen zijn 3,75 m hoog en maximaal 2 m breed. De wanddikte varieert over de hoogte van de wand; van brede basis met smalle boven-

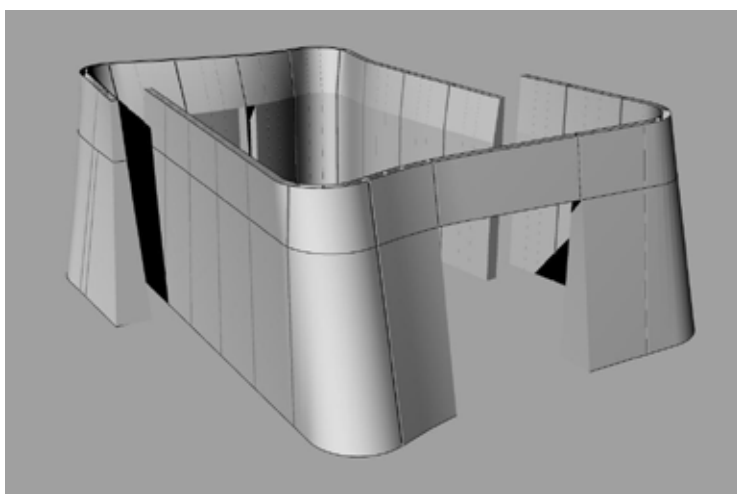
zijde tot smalle basis met brede bovenzijde. De wanddiktes variëren van 330 mm tot 1200 mm. De wandelementen zijn horizontaal en/of verticaal gekromd. Als gevolg hiervan hebben ze allemaal een unieke geometrie. Het op een economische wijze realiseren van dit ontwerp was alleen mogelijk door gebruik te maken van 3D-printtechnologie (foto 4).

Voor het project is een principedetailbibliotheek voor de bouwkundige detaillering ontwikkeld, die voor nieuwe projecten zal worden doorontwikkeld en uitgebouwd.

Doorsnede

De eerste ideeën van de dwarsdoorsnede van een wandelement werden ontwikkeld tijdens een ontwerpsessie. Een belangrijke voorwaarde was dat de doorsnede een gesloten vorm moest hebben om een continu printspoor te realiseren. De techniek biedt vrijheid het materiaal te gebruiken waar nodig. Echter, de breedte van het printspoor is bij voorkeur relatief klein, waardoor lokale stabiliteit de ongesteunde lengte van rechte wanddelen limiteert.

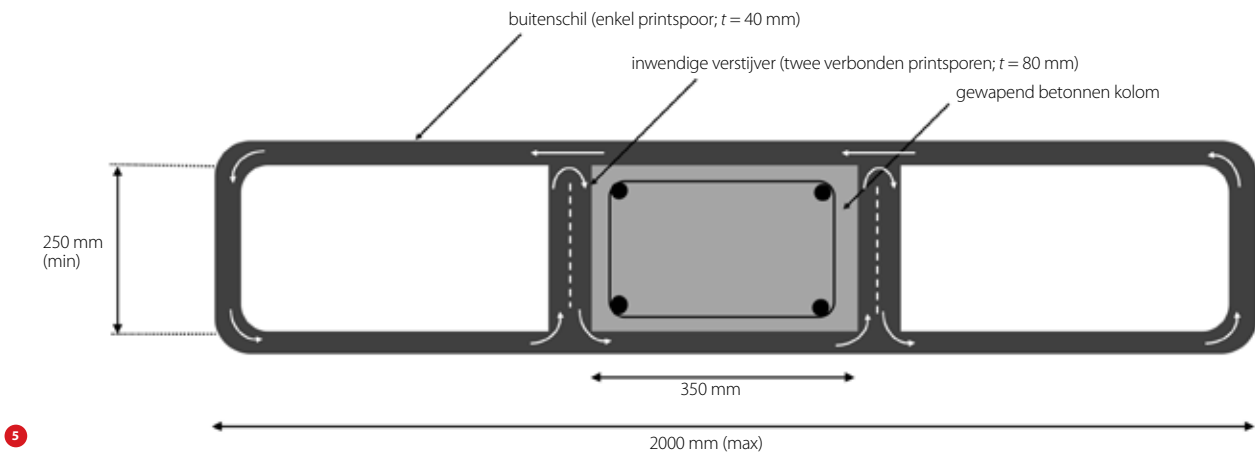
Het resultaat is een wandconcept dat bestaat uit een gekoppelde buiten- en binnenschil met holle ruimte ertussen (fig. 5). De dikte van de schil is gelijk aan de breedte van het printspoor die 40 mm bedraagt. De interne koppelingen functioneren als een verstijver en bieden ondersteuning aan de buitenschil. Ze zijn gerealiseerd met twee volledig verbonden printsporen (samen dus 80 mm).



3



4



3D Concrete Printing (3DCP)

Eigenschappen

Daar waar bij het traditionele betonstorten het beton vloeibaar is en er bekisting nodig is om het materiaal bij elkaar te houden, wordt er bij 3D Concrete Printing (3DCP) gewerkt zonder bekisting. Het 3DCP-materiaal heeft de eigenschap dat het zijn vorm behoudt op de plek waar het door de printer wordt neergelegd. De 3DCP-techniek biedt ontwerpers grote vormvrijheid waardoor bouwwerken kunnen worden gecreëerd die met de traditionele bouwmethoden onbereikbaar zijn. Daarnaast zorgt deze bouwwijze voor een grote besparing in het materiaalgebruik omdat het materiaal alleen daar wordt geplaatst waar het nodig is, zonder gebruik te maken van bekistingsmateriaal. Hierdoor kan 3D-betonprinten een belangrijke rol spelen in duurzaam bouwen. Doordat materiaal efficiënter wordt toegepast, leidt het tot een minimaal materiaal- en transportverbruik en daarmee een verminderde CO₂-uitstoot.

Ontwerpproces

Het ontwerpproces van een gebouw met een 3D-geprinte betonconstructie verschilt fundamenteel van traditionele ontwerpprocessen. Het vraagt andere vaardigheden van de constructeur, zoals het bekend zijn met het productieproces en vaardigheden op het gebied van digital construction.

De mogelijkheden en begrenzingen van het printproces moeten van begin af aan worden meegenomen in het ontwerpproces. Bij een traditionele constructie zijn na het vaststellen van de noodzakelijke betonsterkteklasse de meeste materiaaleigenschappen voor het constructieve ontwerp bekend. Bij 3DCP bepaalt ook het printproces de uiteindelijke eigenschappen van het materiaal.

Regelgeving

Over het materiaal- en constructief gedrag van een 3D-geprinte betonconstructie is nog niets vastgelegd in normen of richtlijnen. Ook ligt niet vast hoe een dergelijke constructie moet worden ontworpen of waaraan een 3D-geprinte betonconstructie moet voldoen. Dit vraagt van alle betrokken partijen een open houding. Gedurende het ontwerpproces is de vergunningverlenende instantie een belangrijke partner. Door het ontbreken van voorschriften wordt met deze instantie afgesproken hoe aannemelijk kan worden gemaakt dat de constructie veilig is. Het is daarom van belang deze zo vroeg mogelijk bij het project te betrekken. Ook is het nodig dat gedurende de ontwerpfase veelvuldig wordt getest en dat randvoorwaarden voor printproces en ontwerp worden vastgesteld.

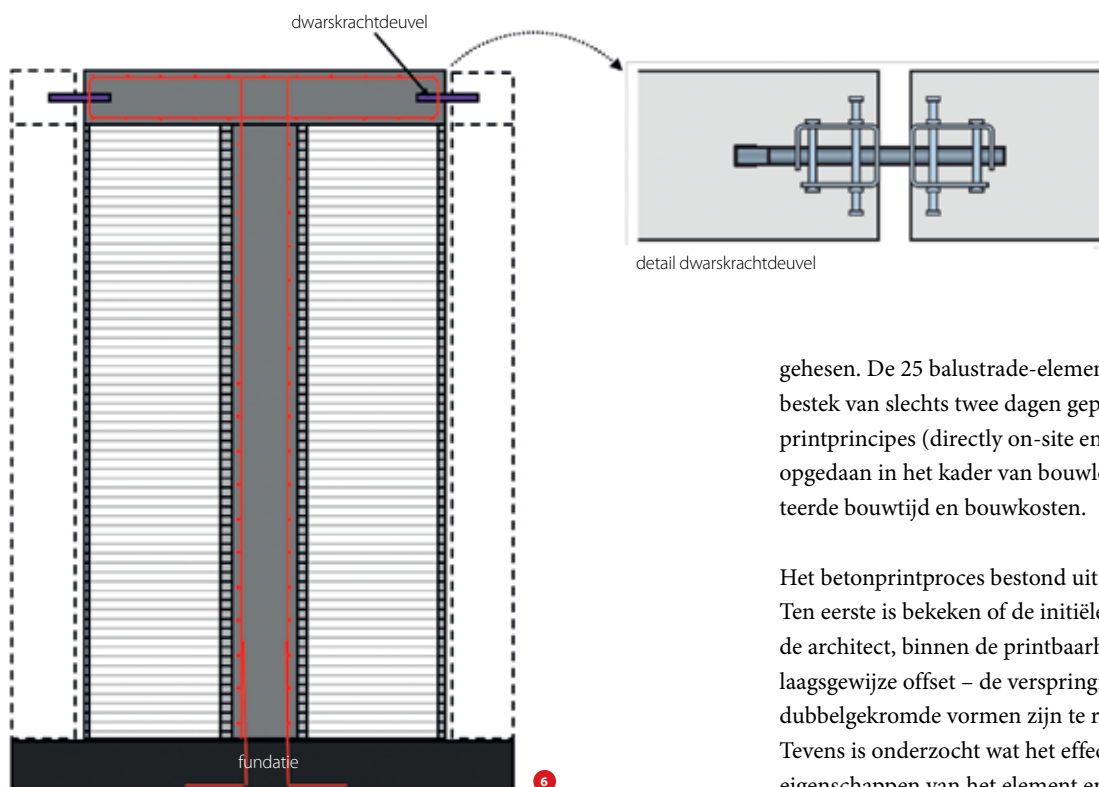
Betonnen kolommen

Omdat het gebouw ook in het geval van een aardbeving voldoende veiligheid moet bieden, is ductiel bezwijkgedrag een vereiste. Bij ongewapend beton is hier geen sprake van. Daarom is in elk 3D-geprint betonwandelement een verborgen gewapend betonnen kolom opgenomen. Na het printen van de elementen zijn vanaf de bovenzijde wapeningskorven ingehesen in het middelste deel van de wand, waarna de holte met beton is gevuld (fig. 6). Het geprinte wandelement fungeerde hierbij als bekisting. Naast de stortbelasting wordt het 3D-geprinte betonelement

hierdoor blootgesteld aan hydratatiewarmte van het in-situ-beton. Het effect van de warmteopwekking en de resulterende spanningen zijn onderzocht. Door gebruik te maken van een low-heat-cement en te werken in een tent (foto 7 en 8) om afkoeling door wind te reduceren, kon scheurvorming van de 3DCP-elementen worden voorkomen.

Betonbalk

Aan de bovenzijde zijn de wandelementen voorzien van een met de kolom verbonden horizontale gewapende betonbalk.



Deze zijn ter plaatse gestort waarbij het 3DCP-element als bekisting fungeerde (fig. 5). Dwarskrachtdeuvels in de kop van de balk koppelen de elementen onderling. De balk fungeert tevens als oplegging voor de kanaalplaten.

Aantonen constructieve veiligheid

Het constructief ontwerp van het R&Drone Laboratory is gebaseerd op een combinatie van experimenteel onderzoek en geavanceerde eindige-elementenberekeningen. In Nederland zijn gestandaardiseerde proeven uitgevoerd om de materiaaleigenschappen van het 3D-geprinte beton vast te stellen (o.a. conform EN 196-3 [1], EN 1015 [2]). Om de treksterkte van het gelaagde beton te bepalen zijn, ter vaststelling van de hechtsterkte, proeven op gelaagd geprint beton uitgevoerd (volgens CUR-Aanbeveling 20 [3] en EN 1542 [4]). Al deze waarden zijn gebruikt in de EEM-berekeningen.

Ondanks het ontbreken van normen voor 3D-geprinte betonconstructies, kon op deze manier worden aangetoond dat de constructie veilig is, waardoor alle benodigde bouwvergunningen werden verkregen.

Printproces

De elementen zijn geprint met een mobiele printer uit Nederland (foto 9). De printer deed, afhankelijk van de exacte afmeting, maximaal twee uur over het printen van één element. Naast de 24 wandelementen zijn ook de 5 binnenwanden geprint. Daarna zijn de balustrade-elementen on-site naast het gebouw geprint (semi-precast) en vervolgens op het dak

gehesen. De 25 balustrade-elementen zijn binnen een tijdsbestek van slechts twee dagen geprint. Op basis van deze twee printprincipes (directly on-site en semi-precast) is ervaring opgedaan in het kader van bouwlogistiek en daaraan gerelateerde bouwtijd en bouwkosten.

Het betonprintproces bestond uit verschillende onderdelen. Ten eerste is bekeken of de initiële vorm die is voorgesteld door de architect, binnen de printbaarheid viel. Gekeken is of de laagsgewijze offset – de verspringing van laag tot laag waarmee dubbelgekromde vormen zijn te realiseren – haalbaar was. Tevens is onderzocht wat het effect was op de constructieve eigenschappen van het element en de stabiliteit van het element tijdens het printproces. Op basis van de ligging van het zwaartepunt kon voor elk moment tijdens het printen worden bepaald of er sprake was van stabiel evenwicht.

Toen bleek dat het model printbaar was, is met de constructeur bekeken of en hoe het model constructief te verantwoorden was. Dit aan de hand van het EEM-model. Hierna is het ontwerp omgezet in een parametrisch model. Hiervoor is door CyBe een softwaretool ontwikkeld, waardoor het design en engineeringproces veel meer geautomatiseerd verliep. Een groot voordeel van dit geautomatiseerde proces was het gemak waarmee het design kon worden aangepast. Tijdens de voorbereiding van het R&Drone Laboratory werd enkele weken van tevoren besloten dat het gebouw vergroot moest worden, van $10 \times 10 \text{ m}^2$ naar $12 \times 14 \text{ m}^2$. De architect kon het parametrisch model als basis gebruiken voor het aanpassen van het ontwerp. Bij de traditionele processen zou dit weken tot maanden vertraging hebben opgeleverd, zeker bij een ontwerp met deze complexe vormen. Met behulp van de softwaretool werd deze periode verkort tot enkele dagen. Toen het ontwerp was goedgekeurd, is het omgezet naar een G-code; de input voor de printer. Hiermee is een koppeling gemaakt tussen de digitale wereld en de printer. Door het gebruik van een zesassige machine (de printer), aangestuurd door deze G-code, konden de elementen op enkele millimeters van elkaar worden geprint. Met deze werkwijze kon zeer nauwkeurig worden gebouwd aangezien de printer is ingesteld tot op de millimeter. Conventionele bouwmethoden houden met grotere toleranties rekening. Dit kan bij de samenwerking met 3D-printtechnieken tijdens de bouw tot conflicterende situaties leiden. In Dubai moest door opgetreden maatafwijkingen de fundatie eerst worden aangevuld tot de exact benodigde breedte, voordat kon worden gestart met het printen.

Terwijl de printer zijn werk deed, kon de operator het object afwerken voor bijvoorbeeld een glad en strak resultaat. Ook konden faciliteiten worden aangebracht zoals voor ventilatie, het verlengen van stekeinden, elektriciteitsbuizen en buizen voor de centerpennen voor het afschoren van de elementen. Dit afschoren was nodig tijdens de bouwphase om problemen bij (harde) te voorkomen.

Het printen is uitgevoerd door een Nederlands printteam (foto 4). Voordat dit team daadwerkelijk afreisde naar Dubai, zijn in Nederland verschillende complexe elementen geprint om te testen of alles werkte zoals bedacht. Na deze laatste controle werd alles naar de locatie getransporteerd. Voor het printen waren, naast de printer, de software voor de aansturing en het materiaal, ook meerdere operators nodig.



Betonsoort

Het beton waarmee de 3D-betonprinter print, heeft andere eigenschappen dan regulier beton. Het geprinte beton moet vrijwel direct in staat zijn bovenliggende lagen te dragen; de 3,75 m hoge wandelementen werden binnen twee uur geprint. Voor dit project is het zogenoemde CyBe MORTAR gebruikt. De uithardingstijd van dat mengsel is veel korter. Ook is de hydratatie tijd sterk gereduceerd. De benodigde sterkte wordt bereikt in 24 uur, waar bij traditionele bouwmethoden rekening moet worden gehouden met 28 dagen. Bijkomend voordeel is de versnelde afwerkbaarheid van een object. Waar normaliter bijna een maand moet worden gewacht met stuken en schilderen, kan dat met dit materiaal al na 24 uur. Dit vergt een strakke planning op de bouwplaats, maar levert als resultaat veel tijdswinst op.





● PROJECTGEGEVENS

project R&Drone Laboratory, Dubai
opdrachtgever Dubai Electricity and Water Authority (DEWA)
architect Wanders Wagner Architects (Dubai)
3DCP construction CyBe Construction
constructeur Witteveen+Bos
aannemer Convrngt Value Engineering (Dubai)
oplevering mei 2017

9

Bij het strikt naleven van de voorschriften (NEN EN 206 + NEN 8005) zou de water-cementfactor niet overeenkomen met de mengverhouding tijdens printen. Hierdoor zouden de proefstukken niet representatief zijn. CyBe heeft daarom procedures ontwikkeld om de eigenschappen op een goede manier te kunnen bepalen. De eigenschappen van het materiaal zijn vastgelegd in de 'material properties datasheet' en gebruikt in de EEM-berekening. Om het mengsel in Dubai te mogen gebruiken, was echter een conformiteitsbeoordeling door Dubai Central Laboratory noodzakelijk. Tijdens de daadwerkelijke uitvoering zijn daarom nogmaals proefstukken vervaardigd om het materiaal te kunnen vergelijken met het beoordeelde materiaal. Op basis van deze materiaalproeven konden de materiaaleigenschappen met voldoende nauwkeurigheid worden aangetoond.

Het tijdsinterval tussen het printen van twee lagen bij het beproeven van het mengsel bedroeg tien seconden. In de praktijk bedroeg dit interval echter twee minuten. Daarom is onderzocht wat de invloed was van het tijdsinterval op de hechtsterkte tussen de printlagen. Die invloed bleek nihil. Daarnaast is ondervonden dat de omgevingstemperatuur vrijwel geen invloed heeft op de uithardingstijd van het materiaal. Nazorg is een veel belangrijkere factor. Na het printen moet zorgvuldig water worden toegevoegd om te garanderen dat er geen scheurvorming ontstaat. Dit is bij alle wanden in Dubai goed gelukt.

Toekomst

In Dubai staat nu het eerste on-site geprinte gebouw ter wereld. Het project laat goed zien welke mogelijkheden en voordelen een 3D-printer biedt bij gebruik in de bouwsector: grote vormvrijheid, besparing in materiaalgebruik en kortere bouwtijd. Ondanks dat 3D-betonprinten de laatste jaren een enorme vlucht heeft genomen, staat de toepassing van de technologie in de bouw nog in de kinderschoenen. De verwachting is echter dat de 3D-betonprinttechnologie in de toekomst de sector als bedrijfstak ingrijpend zal veranderen. Werken met 3DCP vraagt een ander soort vaardigheden dan wapening vlechten of metselen, namelijk het werken met robots, zoals dat in andere sectoren veelal al gebruikelijk is. ☒

● LITERATUUR

- 1 NEN-EN 196-3:2005+A1:2009 - Beproevingmethoden voor cement - Deel 3: Bepaling van begin en einde van de binding en bepaling van de vormhoudendheid.
- 2 NEN-EN 1015-11:1999 / NEN-EN 1015-11:2017 Ontw. en Beproevingmethoden voor mortel voor metselwerk - Deel 11: Bepaling van de buigtrek- en druksterkte van verharde mortel.
- 3 CUR-Aanbeveling 20 - Bepaling van de hechtsterkte van mortels op beton.
- 4 NEN-EN 1542:1999 Producten en systemen voor de bescherming en reparatie van betonconstructies - Beproevingmethoden - Bepaling van de hechtsterkte door middel van de afbreekproef.