



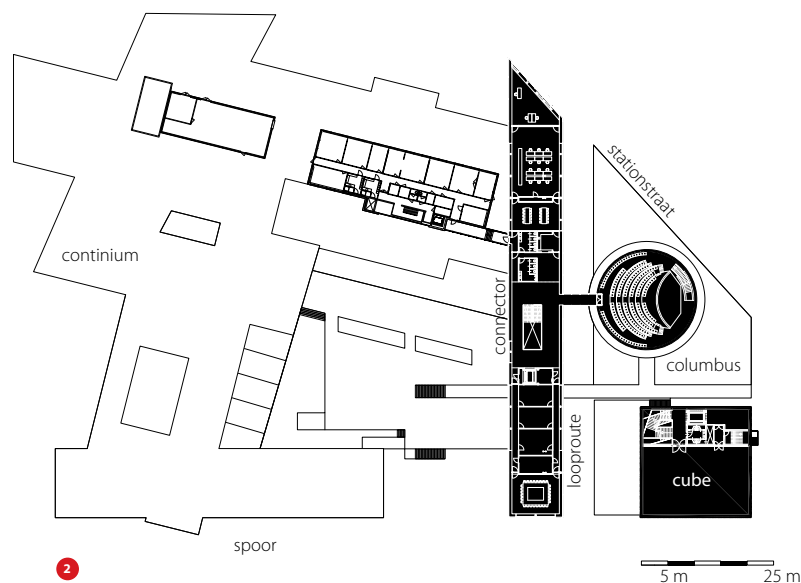
Drie nieuwe gebouwen aan het Museumplein Limburg in Kerkrade

Samenspel elementaire vormen

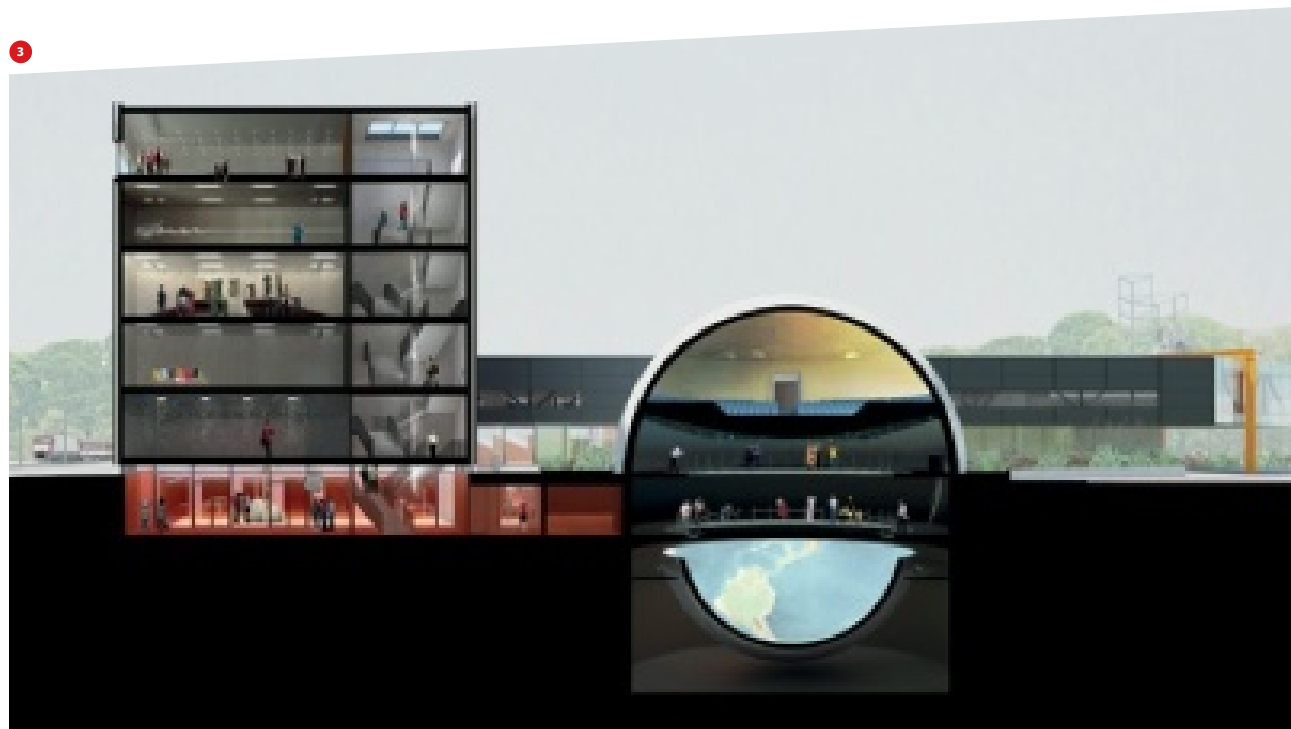
Het Museumplein Limburg heeft een grondige metamorfose ondergaan. Er zijn drie nieuwe gebouwen gerealiseerd in drie elementaire vormen: een kubus, een bol en een prisma (foto 1). Hiermee is een van de drie provinciale musea in Limburg voltooid. Het project kende een aantal niet-alledaagse elementen en daarmee bijzonder interessante constructieve uitdagingen.

Het Museumplein Limburg ligt aan de oostzijde van Kerkrade, ingesloten tussen het spoor, de stationsstraat en het techniek-museum Continium discovery center (fig. 2). Over het plein voert een belangrijke openbare looproute van het centrum van Kerkrade naar het station. De nadrukkelijke wens was deze looproute bij de uitbreiding te behouden en de openbare ruimte op te waarderen en uit te breiden. Aan het plein zijn drie nieuwe, ogenschijnlijk autonome gebouwen verzezen: Cube, Columbus en de Connector (fig. 3). *Columbus* is aan de buitenzijde herkenbaar door een koepel met een diameter van 22 m. Hierin zijn het indrukwekkende Earth Theater (foto 4) en het National Geographic 3D-theater ondergebracht. *Cube* is een gebouw van $21 \times 21 \times 21 \text{ m}^3$ dat schijnbaar boven het maaiveld zweeft en huisvest een design museum met exposities en labs. De *Connector* verbindt de nieuwe bouwdelen met elkaar en met het bestaande techniek-

- 1 Museumplein Limburg
foto: René de Wit
- 2 Plattegrond Discovery Centre Continium
- 3 Bijschrift Impressie/doorsnede project; links Cube, rechts Columbus en daar achter de Connector
bron: Shift



museum. In dit langwerpige gebouw bevinden zich de entrees en de algemene functies van het complex. Vanuit de Connector zijn alle drie de musea bereikbaar. De gebouwen zijn onder maaiveld met elkaar verbonden door middel van de kelder (foto 5). Deze kelder, grotendeels uitgevoerd in rood schoonbeton met plankenstructuur, vormt een ondergrondse wereld die de voormalige mijnbouw representeert. In de kelder zijn ook de installaties ondergebracht. De keldervloer is grotendeels uitgevoerd als dubbele vloer waarin met name de luchtkanalen worden versleept (fig. 6).



Engineer & Build

Het ontwerp van de nieuwe gebouwen kende vele niet-alledaagse elementen en constructieve uitdagingen voor het bouwteam. Het project is aanbesteed als een Engineer & Build opdracht op basis van een Definitief Ontwerp. De aannemer kreeg daarbij de vrijheid optimalisaties door te voeren, zolang deze naar oordeel van de opdrachtgever geen afbreuk deden aan de



4

4 Een kijkje in het Earth Theatre van Columbus.

foto: Kenneth Tan

5 Kelder onder het project uitgevoerd in rood schoonbeton

foto: René de Wit

gevraagde kwaliteit. In dit artikel wordt een aantal bijzonderheden op gebied van betonconstructies uit dit project belicht. Over de bijzonderheden op het gebied van staalconstructies in dit werk is een artikel in *Bouwen met Staal* 250 (04 | 2016) gepubliceerd.

Columbus

Een van de nieuwe gebouwen is Columbus dat wordt gekenmerkt door de grote koepel, met een diameter van 22 m en een hoogte van 11 m.

Spuitsbeton koepel

De koepel bestaat uit een binnen- en een buitenschil met isolatie ertussen (fig. 7). Beide schillen zijn uitgevoerd in gewapend spuitbeton (foto 8). De buitenschil is 130 mm dik, voorzien van een enkel wapeningsnet in het midden van de doorsnede. De binnenschil is 70 mm dik, eveneens voorzien van een enkel wapeningsnet. De binnen- en buitenschil zijn met elkaar verbonden door middel van koppelstaven (fig. 7). Een totale betondikte van 200 mm was vereist in verband met geluidwering van binnen naar buiten.

5

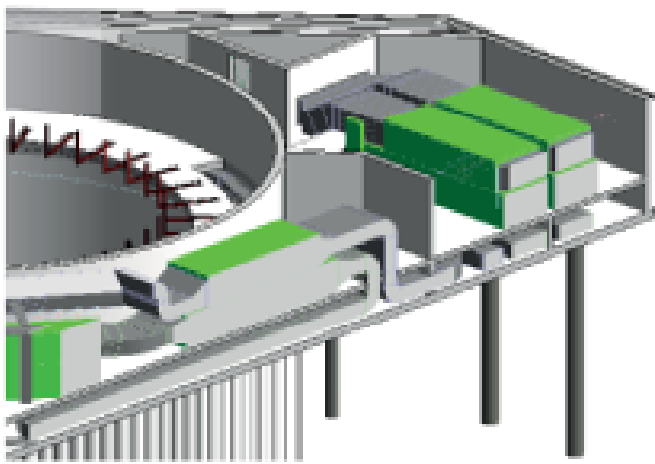


6 De keldervloer is grotendeels uitgevoerd als dubbele vloer

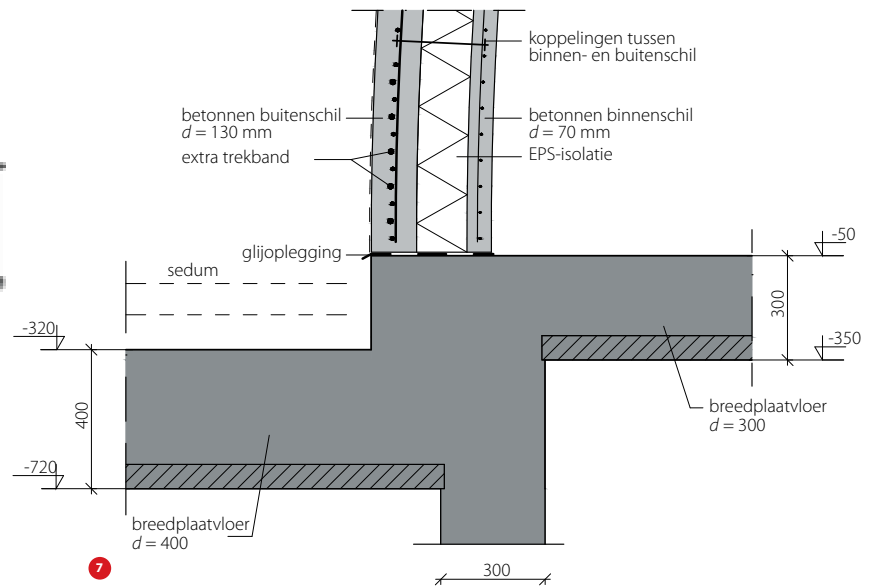
7 Detail schil koepel

8 Aanbrengen spuitbeton

foto: Rick Huibers



6



7

Optredende krachten koepel

De optredende krachten in de schillen van de koepel zijn berekend aan de hand van een EEM-model in AXIS-VM (fig. 9). Omdat de buiten- en binnenschil elkaars krachtwerving beïnvloeden, zijn beide schillen in het model ingevoerd. Hieruit konden ook meteen de krachten worden afgelezen in de koppelingen tussen de schillen.

Permanente belastingen en belastingen als gevolg van sneeuw en wind geven door de geometrie van de constructie feitelijk nauwelijks noemenswaardige krachten in de koepel. Het overgrote deel van de interne krachten in de schillen ontstaat enerzijds als gevolg van temperatuurverschillen tussen binnen- en buitenschil en anderzijds als gevolg van excentrische temperatuurbelastingen op de buitenschil door éénzijdige zonaanstraling.

Bij de berekening van de koepel is rekening gehouden met temperaturen tussen -25 °C en $+60\text{ °C}$ voor de buitenschil en $+20\text{ °C}$ voor de binnenschil. Voor de excentrische temperatuurbelasting is rekening gehouden met $+60\text{ °C}$ aan de ene zijde (ten gevolge van direct zonaanstraling) en $+30\text{ °C}$ aan de andere kant (schaduw). Vooral deze laatste belasting zorgt voor grote interne krachten in de betonnen buitenschil. De wapening is hierop berekend. Voor de E-modulus van de betonschil is $11\,000\text{ N/mm}^2$ aangehouden. De optredende krachten zijn zo afgewapend dat na scheuren van het beton de staalspanning niet hoger wordt dan 250 N/mm^2 .

Ter voorkoming van hoge thermische spanningen is de onderzijde van de koepel losgehouden van de geïsoleerde onderbouw en voorzien van een trekband: als wapening rondom de rand van de koepel (fig. 7). Ter plaatse van de deursparing is de trekband doorgezet in de vorm van een stalen strip.

De koepel is uitgevoerd met een verloren ondersteuningsconstructie in de vorm van een geodetische koepel, ondersteund

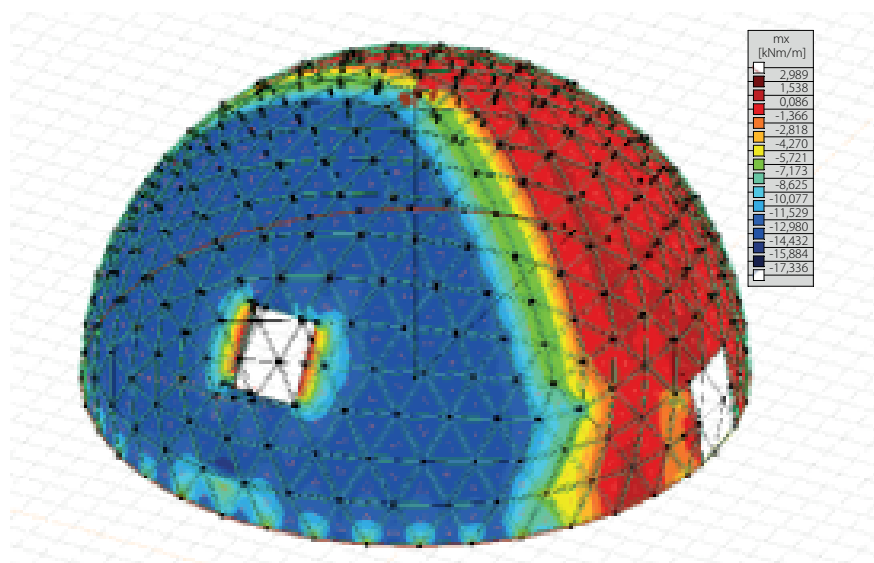
door steigerbuizen (foto 10). Op deze ondersteuningsconstructie werd de buitenschil aangebracht en eronder een wapeningsnet waarop van onderaf het beton voor de onderschil is gespoten. De ondersteuningsconstructie is in de koepel achtergebleven.

Uitvoering kelder

Onder de koepel van Columbus bevindt zich een ronde projectieruimte. Het laagste punt hiervan ligt op 13 m onder maaiveld. Dit verdiepte deel van de kelder heeft, net als de koepel, een diameter van 22 m. De uitvoering van de kelder van dit bouw-



8



9

deel was een van de grootste uitdagingen in het project. In verband met de tijdsdruk was het nodig te starten met de uitvoering van de bovenste 5 m van de kelder.

Voor de uitvoering van het deel van -5 m tot -13 m zijn verschillende opties bekeken. Het oorspronkelijke idee was de kelderwand van de ronde kelder uit te voeren als één grote, 8 m hoge putring en deze te laten zakken door middel van een combinatie van het uitgraven van binnenuit en het naar beneden trekken met trekankers in de grond. Deze uitvoeringsmethode zou echter te veel tijd kosten. In verband met kleef rondom de buitenwand was bovendien het risico te groot dat de benodigde krachten – om de putring naar beneden te krijgen – te groot zouden worden.

Een voor de hand liggend alternatief was het maken van een tijdelijke kering door middel van verankerde of gestempelde damwanden. Omdat damwanden geen drukkrachten kunnen opnemen in horizontale langsrichting, kan geen gebruik worden gemaakt van ringwerking in de constructie. Dit zou betekenen dat de damwanden op meerdere plaatsen zouden moeten worden gesteund door middel van stempelingen of groutankers. Los van de hoge kosten zouden deze voorzieningen ook de uitvoering van de keldervloer en -wanden belemmeren.

Bouwput met boorpalenwand

De ronde put is uiteindelijk uitgevoerd met een boorpalenwand, opgebouwd uit avegaarpalen Ø600 mm. De palen zijn in elkaar versneden waardoor na het gereedkomen van de gehele wand een betonnen cilinder ontstond (fig. 11). Het voordeel van avegaarpalen is dat het een relatief eenvoudig en voordelig systeem is. Bovendien was dit systeem snel leverbaar. Nadeel van avegaarpalen is evenwel dat de momentcapaciteit zeer beperkt is omdat de palen over grotere lengte alleen kunnen



10

worden gewapend met een centraalstaaf. Ook is de versnijding tussen de palen om uitvoertechnische redenen zeer beperkt: theoretisch maar 50 mm.

Door de geometrie van de boorpalenwand kon gebruik worden gemaakt van ringwerking in de betonconstructie zodat de 8 m diepe put in theorie zonder verdere voorzieningen kon worden uitgegraven. Wel is de keldervloer, niveau -1,5, gestort voordat het diepe deel van de put werd ontgraven. De vloer kon zo functioneren als drukring aan de bovenzijde van de boorpalenwand. Nadat de put op diepte was gegraven, is de keldervloer in het diepe deel gestort. Hiermee werd ook een steun op 13 m onder maaiveld aangebracht. Vervolgens is in de hele put een constructief gewapende betonnen voorzetwand van minimaal 200 mm dik gestort. Deze wand is uiteindelijk berekend op de totale belasting in de uiterste grenstoestand.

Risico's boorpalenwand

Het grootste risico was dat de boorpalen niet goed of zelfs niet op elkaar zouden aansluiten, waarmee de ringwerking in de wand niet zou kunnen optreden. Indien de wand perfect zou worden uitgevoerd, zou een denkbeeldige massieve betonwand ontstaan van 240 mm dik. Een relatief kleine afwijking zorgt echter al voor een aanzienlijke vermindering van de doorsnede van de massieve wand. Een minimale dikte van 160 mm was benodigd om de berekende drukkrachten en momenten ten gevolge van excentrische belasting te kunnen opnemen.

Voor de ontgraving is een uitgebreide risicoanalyse uitgevoerd waarin de volgende vragen zijn beantwoord:

- Welke afwijkingen kunnen ontstaan?
- Hoe wordt de kans op afwijkingen verkleind?
- Hoe worden deze afwijkingen geconstateerd?
- Wat te doen als één of meerdere afwijkingen optreden?



- 10 Ondersteuningsconstructie t.b.v. spuitbeton
- 11 Palenwand gerealiseerd door avegaarpalen die in elkaar zijn versneden.

Uitvoeringsvolgorde kelder Columbus

In het kort was de uitvoeringsvolgorde als volgt:

- ontgraven bouwput, met onverankerde stalen damwanden tot niveau -1,5; ± 5,0 m (onder maaiveld);
- maken boorpalenwand;
- storten keldervloer op niveau -1,5; deze funktioneert als stempeling/drukking voor de palenwand;
- ontgraven put tot 13 m onder maaiveld, met dieplepelkraan, onder continue begeleiding en monitoring;
- zo nodig tussentijdse maatregelen treffen;
- storten diepe keldervloer; deze funktioneert ook als stempeling;
- storten van de gewapende constructieve voorzetwand.

Om het risico op afwijkingen te verkleinen, is op het ontgravniveau van de kelder een stalen mal gemaakt die vastgezet is op de ondergrond. De avegaar kon precies op de plaats worden gezet door middel van een stalen ring die op de mal werd gemonteerd. Hierdoor werd de plaatsingstolerantie tot een minimum beperkt. Het risico op afwijkingen zat hem met name in de scheefstand van de palen.

Voor het geval dat zich afwijkingen zouden voordoen, waren diverse scenario's uitgewerkt als:

- het maken van plaatselijk reparaties ('pleisters');
- het alsnog aanbrengen van een stempelraam halverwege;
- de constructieve voorzetwand gefaseerd, in lagen van 2 m, van boven naar beneden uitvoeren.

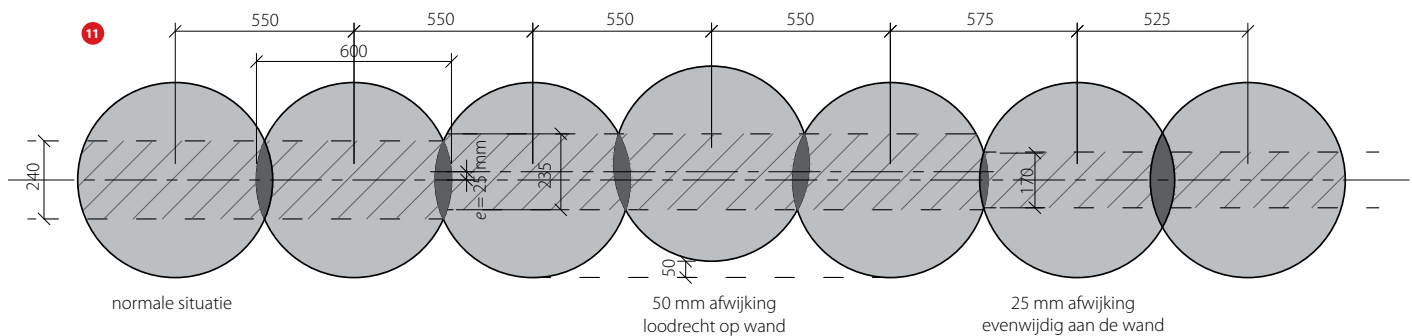
De boorpalenwand werd in fasen (lagen van 2 m) ontgraven en beoordeeld. Indien bij het beoordelen van de wand onregelmatigheden werden geconstateerd, kon daar direct op worden geacteerd met een van bovengenoemde maatregelen. Dit resul-

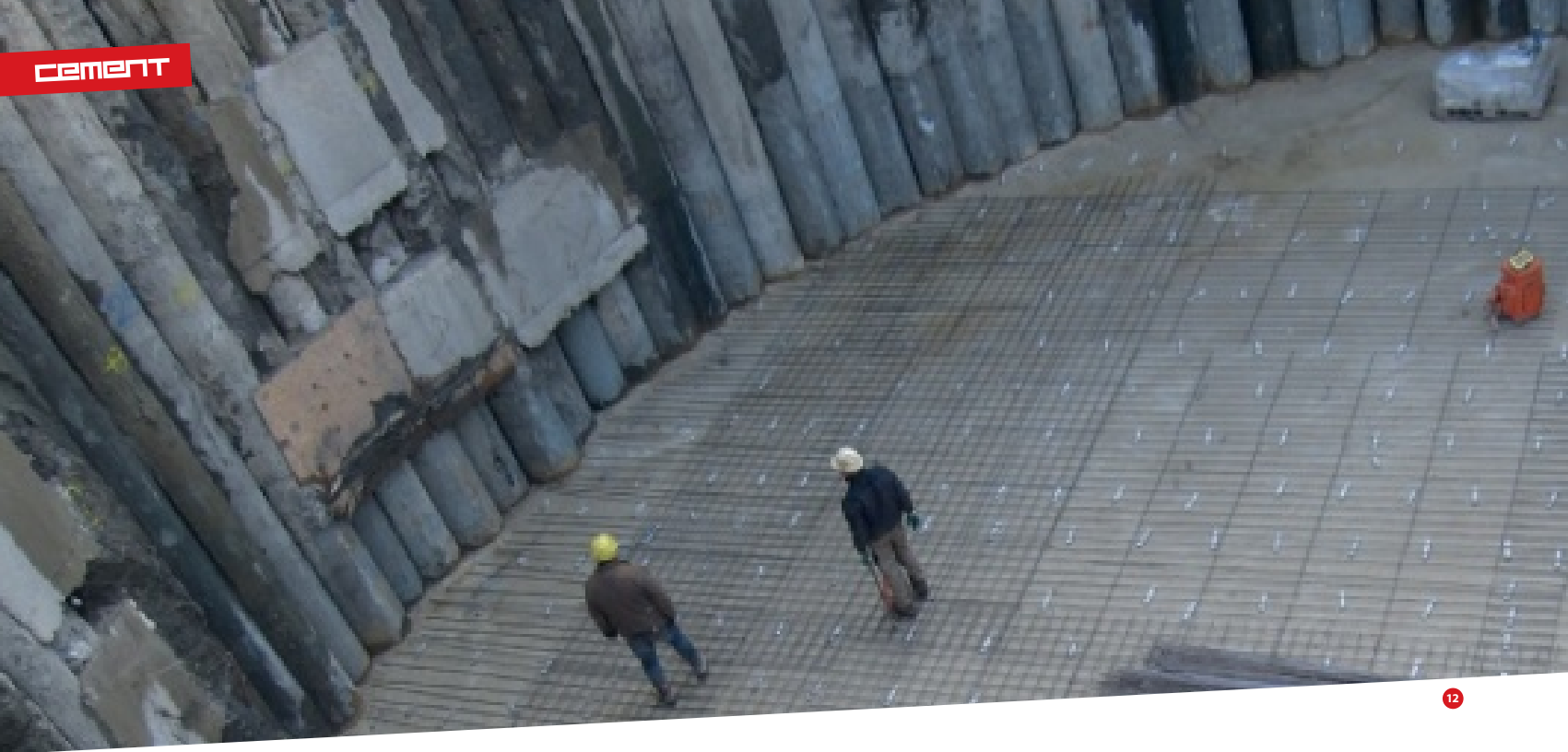
teerde in enkele gevallen in het aanbrengen van betonnen 'pleisters' op de betonwand, omdat enkele palen wat te ver naar buiten stonden (foto 12). Deze aanstorten werden door middel van ingelijmde stekken op de naastgelegen funderingspalen aan de betonwand verankerd. Verder hebben zich geen onregelmatigheden voorgedaan. Was dit wel het geval geweest, dan kon één van de vooraf bedachte noodmaatregelen worden ingezet.

De kunst tijdens dit deel van het project was het inschatten van de mogelijke afwijkingen en risico's en daarnaast het continu meten, monitoren en verifiëren wat er was gemaakt en wat er gebeurde. Hiervoor is een uitgebreid werk- en monitoringsplan gemaakt. De optredende vervormingen bleven beperkt tot enkele millimeters (< 5 mm).

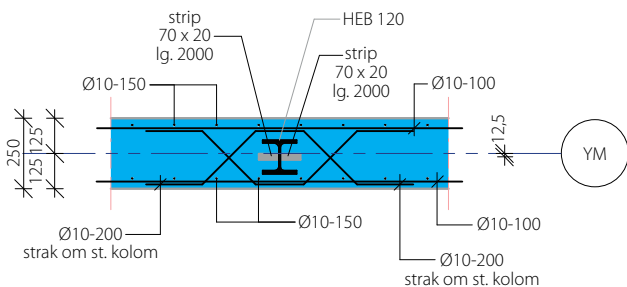
Fundering kelder

Het gehele gebouw is zoals gezegd onderkelderd. De fundering van deze kelder is uitgevoerd als hybride fundering. Een hybride fundering wil in dit geval zeggen dat ter plaatse van hoge belastingen uit de bovenbouw avegaarpalen zijn toegepast en dat de



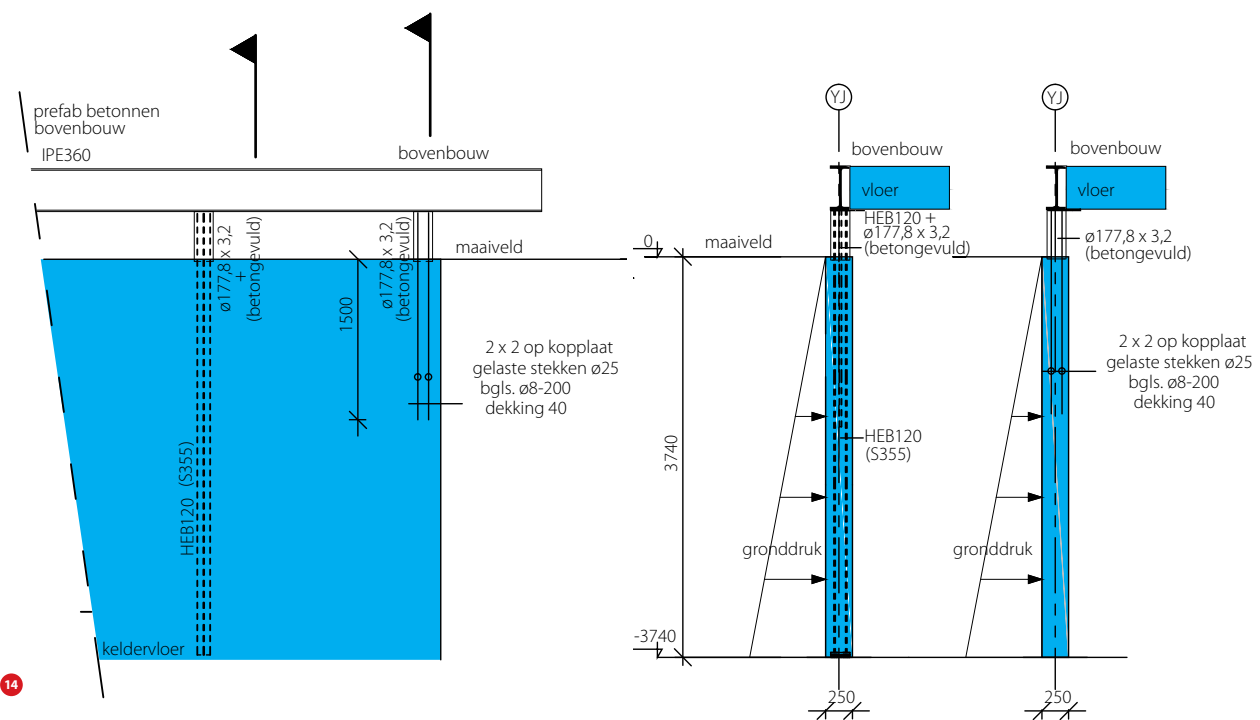


12



13

rest van de keldervloer op staal is gefundeerd. Ook langs de randen van de kelder zijn palen toegepast, enerzijds vanwege de wat hogere belastingen en de beperkte mogelijkheid belasting te spreiden en anderzijds, en misschien nog wel belangrijker, in verband met de negatieve invloed die het trekken van de damwanden heeft op de ondergrond. Door het deels op staal funderen, zijn veel palen uitgespaard en zakkings blijken gelijkmatiger te zijn dan bij toepassing van alleen palen. Voor de berekening van de kelder is gebruikgemaakt van een EEM-model. Omdat met name de berekende veerstijfheden van de ondergrond en de palen vrij grove benaderingen zijn en omdat deze wel een grote invloed hebben op de krachtswerking



14

- 12 Boorpalenwand met 'pleisters'
- 13 Stalen kolom in wand met omhullende wapening en aangelaste strippen
- 14 Vooraanzicht en dwarsdoorsnedes overgangsconstructie

in de fundering, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Dit is gedaan door de berekende veerconstanten van de verschillende ondersteuning te variëren met een factor $\times\sqrt{2}$ en $/\sqrt{2}$. In één model is een hoge veerconstante ($\times\sqrt{2}$) voor de palen ingevoerd en een lage ($/\sqrt{2}$) voor de ondersteuning op staal. In een ander model is dit andersom gedaan. Voor zowel de palen, de controle van de opleggedruk als de wapening zijn de maatgevende resultaten uit beide modellen gebruikt.

Cube

Cube is een zeven bouwlagen hoog, kubusvormig gebouw dat op maaiveldniveau met een aantal zeer slanke pootjes is geplaatst op de onderliggende kelderwand, een 3,5 m hoge rode wand in schoonbeton van 250 mm dik.

Overgangsconstructie – schoonbeton

De aansluiting tussen de kolommen en de onderliggende wand vroeg speciale aandacht. In het DO-detail is door de architect het idee van het gewenste beeld van deze aansluiting weergegeven: een betonwand met daarop een rond stalen kolommetje dat direct de bovenliggende stalen ligger draagt. Naast hoge verticale belastingen voor deze slanke constructie werkt op de kelderwand ook nog een horizontale gronddruk. Deze wordt mede opgevangen dankzij de stalen kolommen die de kelderwand horizontaal steunen.

Detailering

Uitgangspunt bij de detailering was dat verbindingen in het zicht niet gewenst zijn. Dit was een flinke uitdaging voor constructeur en aannemer: hoge belastingen in verhouding tot de beschikbare constructieruimte en geen mogelijkheid iets te corrigeren in de afwerking vanwege het schoonbeton en de hoge esthetische eisen.

Om deze wens toch mogelijk te maken, moest de wand worden gestort terwijl de staalconstructie al was geplaatst. Er is daarom voor gekozen de kolommen van de staalconstructie, uitgevoerd als HE-profielen, op de keldervloer aan te zetten en helemaal in de betonwand op te nemen.

Om het bovenste deel van de HE-kolommen, het deel dat boven de kelderwand uitsteekt, is een ronde stalen buis aangebracht, die vooraf is gevuld met beton (fig. 14). De stalen buis loopt tot net in de betonwand zodat een perfecte scherpe aansluiting tussen betonwand en stalen buis kon worden verkregen.

Het staalprofiel dat maximaal in het detail paste, een HE120B (S355), was niet voldoende om alle werkende krachten op te nemen. De kolom moest dus samenwerken met de betonwand. Aan de kolom zijn stekken gelast om de kracht in het staalprofiel gelijkmatig af te dragen aan de betonwand (fig. 13). Voor het bovenste deel is de betonvulling in de stalen buis ook nog meegenomen in de constructieve sterkte van de kolom.

LEAN-bouwmethode

Naast de constructieve uitdagingen die het project kende, moest de bouw binnen een extreem korte bouwtijd worden gerealiseerd. In augustus 2014 is de opdracht aan de aannemer verstrekt op basis van een Definitief Ontwerp. In november 2014 gingen de eerste palen de grond in en in oktober 2015 is het gebouw opgeleverd. Dit hield in dat de uitvoering van de fundering en de kelder startte terwijl de bovenbouw nog helemaal moest worden uitgewerkt. Dit vraagt om een vooruitziende blik van alle betrokken partijen, wederzijds respect en begrip. Gezien de korte voorbereidings- en uitvoeringstijd is ervoor gekozen dit project aan te vliegen met hulp van de LEAN-methode, zowel in de voorbereiding als in de uitvoering. Het bouwteam heeft hier veel profijt van gehad en heeft er ook veel van geleerd. Een ervaring die in volgende projecten zeker weer van pas zal komen.

Uitvoering

Door de kolommen geheel in de betonwand op te nemen, ontstaat een potentiële plaats waar grindnesten kunnen ontstaan en scheuren zich duidelijk kunnen aftekenen. Dit is natuurlijk niet gewenst in een wand van schoonbeton. Er is dan ook veel aandacht besteed aan de wapening rondom de kolommen, zowel voor de scheurvorming als voor de verdichting van het beton rondom de staalprofielen.

Om ervoor te zorgen dat het beton goed rondom de kolommen kon vloeien, is de horizontale wandwapening in de buitenste (1e laag) gelegd en is de verticale wandwapening ter plaatse van de kolom weggelaten. Om de kolommen heen is nog extra koppelwapening aangebracht om het geheel meer samenhang te geven. Op het uiteinde van de betonwanden was het niet mogelijk een staalprofiel in de betonwand te plaatsen omdat het beton niet voldoende om het profiel zou kunnen vloeien en het risico op grindnesten (of erger) te groot was. Dit risico was, zowel uit constructief als uit esthetisch oogpunt niet acceptabel. Deze kolommen zijn dan ook uitgevoerd als kleine betonkolommetjes met een forse wapening en een stalen omhulling, gelijk aan de andere kolommen. Hier is dus alleen een aantal drukstekken ingestort in de onderliggende wand (fig. 14). ☒

PROJECTGEGEVENS

- project Museumplein Limburg, Kerkrade
- opdrachtgever Continium Kerkrade
- architect Shift Architecture Urbanism Rotterdam
- aannemer Mertens Bouwbedrijf Weert
- constructeur Advies- en Ingenieursbureau Van de Laar Eindhoven
- adviseur constructie (t.m. DO) ABT Delft
- geotechnisch advies ABT Delft en Fugro