

---

# Uitdagingen in het ontwerp

---

*De kostbare collectie van het Museum Boijmans Van Beuningen is in het verleden regelmatig geplaagd door overstromingen. Toen het depot in de kelder van het museum in 2004 voor de zoveelste keer onderliep, werd het tijd voor actie en ontstond het idee voor het 'Depot Boijmans Van Beuningen'. Aanvankelijk werd nog gedacht aan een traditioneel depot, later werd besloten het gebouw publiek toegankelijk te maken en zo inzicht te geven in het behoud en beheer van de belangrijke kunstcollectie. Dit concept, uniek in de wereld, brengt echter wel flinke uitdagingen met zich mee, zoals het in stand houden van het binnenklimaat en het borgen van de beveiliging van het openbare gebouw.*

*Beton speelt hierin een belangrijke rol. →*

auteurs



**WOUT BRABER**

Hoofd huisvesting en  
onderhoud  
Museum Boijmans Van  
Beuningen



**IR. ARJEN KETTING**

Projectleider/architect  
MVRDV



**IR. MICHEL NIENS**

Projectleider  
IMd Raadgevende  
Ingenieurs

*Er zijn slechts  
variëaties van  
2 °C op de tem-  
peratuur en 5%  
op de relatieve  
luchtvochtig-  
heid toegestaan*

**In 2013 heeft MVRDV het winnende ontwerp gemaakt voor het depot; een komvormig gebouw van 40 m hoog, waarvan de gevel in alle richtingen 10 m uitkraagt en dat geheel bekleed is met spiegelende panelen (fig. 2).** Dankzij de

ronde vorm heeft het gebouw geen voor- of achtergevel en keert het zich nergens van de burens af. Om zo weinig mogelijk ruimte van het Museumpark in te nemen en toch ruim 15.000 m<sup>2</sup> brutovloeroppervlak te kunnen realiseren, is het gebouw ingesnoerd op de begane grond (fig. 3). Het verlies aan parkruimte wordt gecompenseerd door het 'bos op het dak', bestaande uit 75 meerstammige berken van 6 tot 8 m hoog en hoge grassen. In dit bos zal een openbaar toegankelijk paviljoen komen met daarin een restaurant en evenementenruimte.

MVRDV wilde de illusie wekken dat het gebouw in zijn geheel voorzichtig op de locatie is neergezet. Dit is de reden dat het spiegelende glas ter hoogte van de begane grond sterk naar binnen buigt, zodat het horizontaal eindigt en het lijkt alsof het onder het gebouw doorloopt.

Centraal in het gebouw bevindt zich een atrium van 40 m hoog en 28 m lang, voorzien van een omloop op elke verdieping die wordt doorsneden door schuine, stalen zigzagtrappen met overspanningen tot 18 m (fig. 4). In deze enorme open ruimte wordt een doolhof gecreëerd door 13 glazen vitrines met kunst op te hangen, waardoor de bezoekers letterlijk de kunst kunnen ontdekken.

De omloop wordt aan weerszijden begrensd door dragende betonwanden, waarin vanwege de toegankelijkheid van de kunstobjecten enorme deursparingen tot 4 m hoog zijn opgenomen.

Bij het opstellen van het Programma van Eisen (2008) werd nog gedacht aan een traditioneel depot, bedoeld voor de centrale opslag van de collectie van circa 151.000 stukken. Dankzij een Rotterdamse mecenas kwam er geld beschikbaar om het gebouw publiek toegankelijk te maken en zo inzicht te geven in het behoud en beheer van de belangrijke en omvangrijke collectie van

Museum Boijmans Van Beuningen. Dit leverde een aantal extra uitdagingen op.

### Dragende schaal

De dragende schaal loopt met de gekromde gevel mee, wat voor dit onderdeel van de hoofd draagconstructie een grote uitdaging opleverde. Deze sluit ter plaatse van de begane grond namelijk onder een kleine hoek aan op de fundering, wat enorme krachten tot gevolg heeft (foto 5). Omdat ter plaatse van de begane grond grote gevelopeningen nodig zijn, worden deze krachten nog groter. Deze openingen zijn nodig voor het publiek, het personeel, uitzicht naar het park en zelfs een gehele vrachtwagencombinatie (18,5 m) die het gebouw in moet kunnen rijden. Beton is constructief in dit geval een goede keuze om deze krachten op te kunnen nemen. Meer over de draagconstructie staat in het artikel 'Krachtsafdracht hoofd draagconstructie Depot Boijmans Van Beuningen'.

### Klimaat

Bij een openbaar toegankelijk gebouw, met een kwetsbare kunstcollectie, is het handhaven van een constant klimaat de grootste en belangrijkste uitdaging. Elk depot, met daarin verschillende volumes en materialen, heeft zijn eigen eis. Gemiddeld genomen moet de temperatuur tussen de 18 en 21 °C zijn en de relatieve luchtvochtigheid 52 %. Hierop zijn gedurende 24 uur slechts kleine variaties toegestaan, te weten +/- 2 °C op de temperatuur en +/- 5% op de relatieve luchtvochtigheid, conform de hoogste klimaatklasse (ASHRAE AA).

In bijvoorbeeld het metaaldepot moet de relatieve luchtvochtigheid veel lager zijn en in het kleurenfotodepot wordt een lagere temperatuur geëist. Door de zogenoemde setpoints (instelling van temperatuur) met de seizoenen mee te variëren wordt energie bespaard.

Hoe kunnen deze belangrijke klimaatomstandigheden worden gewaarborgd in een gebouw dat door wisselende aantallen publiek wordt bezocht?

De keuze voor een betonconstructie met kalkzandstenen scheidingswanden

↓  
**PROJECT  
GEGEVENS**

**project**  
Depot Boijmans  
Van Beuningen  
**opdrachtgever**  
Gemeente Rotterdam  
**gebruiker**  
Museum Boijmans  
Van Beuningen  
**architect**  
MVRDV  
**constructeur**  
IMd Raadgevende  
Ingenieurs  
**installatieadviseur**  
Royal HaskoningDHV  
**bouwfysisch**  
adviseur  
Peutz  
**adviseur**  
glasgevel  
ABT  
**aannemer**  
BAM  
**leverancier**  
betonmortel  
Cementbouw  
**leverancier**  
prefab gevels  
MBS Cascobouw  
**bouwperiode**  
2017-2020



2 Het depot is een komvormig gebouw, geheel bekleed met spiegellende panelen, bron: MVRDV 3 Om zo weinig mogelijk ruimte van het Museum- CEMENT 04 2019 47  
park in te nemen, is het gebouw ingesnoerd op de begane grond, bron: MVRDV 4 Centraal in het gebouw bevindt zich een atrium van 40 m  
hoog en 28 m lang, voorzien van een omloop op elke verdieping die wordt doorsneden door schuine, stalen zigzagtrappen, bron: MVRDV



## MINI-BOOKLETS

Omdat het project zoveel verschillende aspecten kende, zijn tijdens het ontwerpproces deelaspecten geïsoleerd en door de architect samengevat in 'mini-booklets', waardoor het voor het ontwerpteam makkelijker werd om deze onderdelen te behandelen. Een voorbeeld is de invulling van het atrium, die, net als de inrichting van het restaurant op de zesde verdieping en de entree op de begane grond, in samenwerking met een beeldend kunstenaar is ontworpen.

*De dragende schaal sluit ter plaatse van de begane grond onder een kleine hoek aan op de fundering, wat enorme krachten tot gevolg heeft*

tussen de depots is hierbij belangrijk. Kalkzandsteen kan vocht opnemen en afstaan en daardoor de variatie in relatieve luchtvochtigheid afvlakken. De massa van het beton zorgt voor een temperatuurbuffer. Er zijn veel oude bouwwerken die eveneens van hun massa gebruikmaken voor de klimaat-huishouding, waarbij de kunstwerken nog in bijzonder goede conditie zijn.

Aanvullend is er een uitgebreid klimaatstelsel ontworpen, bestaande uit een driekanaalsysteem met mengboxen, dat vrij snel kan anticiperen op veranderingen.

Tot slot is de toegankelijkheid beperkt: per depot mag een bezoek maximaal 11 minuten duren en mogen er maximaal 15 personen per uur naar binnen (fig. 6). Ieder persoon geeft namelijk een verstoring in de warmte- en vochtbalans en dit moet tijdig kunnen worden hersteld door de installaties.

Na de eerste oplevering is er een acclimatiseringsperiode van totaal zes maanden gepland, zodat het gebouw in twee maanden kan drogen en gedurende vier maanden het klimaat kan worden ingeregeld. Daarna volgt een periode van zes maanden voor de verhuizing.

## Beveiliging

De beslissing om delen van het depot openbaar toegankelijk te maken, zorgde ook op beveiligingsgebied voor een enorme uitdaging. Ook hierin speelt de betonconstructie een belangrijke rol; ter plaatse van de dichte geveldelen wordt eenvoudig aan een hoge weerstandsklasse met betrekking tot inbraakwerendheid voldaan. De beveiliging van de verschillende openingen van het gebouw, tot aan het dakluik toe, hebben de nodige inspanning gevraagd van het ontwerpteam. De op de markt beschikbare producten bleken namelijk niet altijd aan de gestelde eisen te kunnen voldoen. Elektronische apparatuur zorgt voor aanvullende beveiliging, naast regels op organisatorisch vlak. Omdat er een aantal depotruimten wordt verhuurd aan particulieren vraagt dit specifieke aandacht.

## Esthetica

Het beton, dat dus een functie heeft voor de constructie, het klimaat en de veiligheid, heeft ook een esthetische functie: het toegepaste beton is allemaal zichtwerk. Voor de aannemer een flinke uitdaging om de betonsoorten met verschillende eigenschappen (hogesterktebeton, zelfverdichtend beton, traditioneel beton, betonnen dekvloeren) dezelfde kleur en uitstraling te geven. Een complicerende factor was het sorteren onder uiteenlopende klimatologische omstandigheden.

Leuk is dat de vorm van de betonnen schaal het gebouw uitdagend maakt voor bezoekers. Zo kan men in de entreehal tegen de binnenkant van de buitengevel oplopen, omdat deze (bijna) horizontaal aansluit op de begane grond.

## Icoon

Om al deze uitdagingen tot een goed einde te kunnen brengen, is het museum volledig betrokken geweest bij het ontwerpproces en de aanbesteding van het project. Hierdoor kon de vertaling van het definitieve Programma van Eisen naar de bestekstukken goed worden bewaakt. Ook de afstemming van de inrichting (zoals schilderijrekken en opslagcomponenten) op het gebouwwontwerp was hierdoor eenvoudiger. Museum Boijmans Van Beuningen is bijzonder trots op dit ontwerp en de samenwerking met architect en adviseurs. Dankzij de zorgvuldige uitvoering van de aannemer begint het gebouw zich inmiddels indrukwekkend af te tekenen tegen de achtergrond van het Museumpark.

De eerste delen van de spiegelende gevelbeplating zijn inmiddels gemonteerd en binnenkort zal de zesde verdiepingvloer worden gestort. In 2021 worden de eerste bezoekers verwacht in dit nieuwe icoon van de stad Rotterdam. ●-

# Kraachtsafdracht hoofddraageconstructie

## Depot Boijmans Van Beuningen

*Voor opdrachtgever en architect was het een grote opgave om het ontwerp van en het gebruik binnen het Depot Boijmans Van Beuningen vast te leggen. En voor de constructeur was het een uitdaging om daarbij een rationele en dienstbare constructie te ontwerpen. Vanzelfsprekend moesten daarbij alle opties worden onderzocht en alternatieven worden aangedragen om het meest optimale integrale resultaat te behalen*

**Op het eerste gezicht lijkt een zes verdiepingen tellend gebouw constructief gezien geen complexe opgave.** Niets is minder waar bij het depot. Immers, het betreft hier het stapelen van zes zwaarbelaste opslagdepots met een gewenste vloerlast van 1250 kg/m<sup>2</sup>, met op de zesde verdieping een openbaar daklandschap voorzien van volwaardige bomen. In combinatie met een footprint van 40 m diameter en een uitkragende bovenste verdieping met een diameter van 60 m, treden er dus zeer hoge belastingen op, vergelijkbaar met hoogbouw. Bij de uitwerking van de constructie zijn dan ook niet-alledaagse berekeningen, analyses en oplossingen toegepast.

### Constructief ontwerp

In het winnende ontwerp van de prijsvraag voor het zogenoemde collectiegebouw was

auteurs



**IR. PIM PETERS RO**

Raadgevend ingenieur  
IMd raadgevende  
Ingenieurs



**IR. MYRTE LOOSJES**

Projectconstructeur  
IMd raadgevende  
Ingenieurs

de schaalvorm al vastgelegd. De eerste stap in het constructief ontwerp was het vastleggen van de juiste hoofdozet voor de constructie. Diverse mogelijkheden zijn bekeken. De meest reële bleken: een Column Structure (een betoncasco met kolommen en betonnen stabiliteitskernen), een Mega Structure (een betonnen dragende schil met kolommen) en een Steel Structure (een staalconstructie met betonnen stabiliteitskernen) (tabel 1 en fig. 2). Uitgangspunt bij de varianten was een vloeroverspanning van 10,8 m en de kolommen hart op hart circa 7,8 m, maten die voortkwamen uit de geometrie van het gebouw.

De staalconstructie viel al snel af vanwege de grotere benodigde constructiehoogte en de gevoeligheid van de vloeren voor trillingen, die niet toelaatbaar zijn voor de gebruiker. De uiteindelijke keuze viel op



1

1 Wandliggerwerking in prefab gevel met behulp van lasplaten, foto: Stieber Fotografie

## Met name de eerste verdiepingsvloer speelt een sleutelrol in de complexe krachtswerking

de dragende schaalconstructie met kolommen (Mega Structure) (fig. 3). Dit was echt een integrale ontwerpkeuze. Een prachtige eigenschap van een schaal is dat de constructie horizontaal onder constante trek staat, als een omgekeerde igloconstructie, waarbij de gehele doorsnede onder druk staat. De ringtrekkrachten houden de schaalconstructie bij elkaar. Naast deze interessante constructieve eigenschap, waren het accumulerende vermogen en de weerstandklasse van de gevel doorslaggevend voor deze keuze. Door de betonnen schil en betonnen vloeren in het zicht te laten was tevens de industriële uitstraling verkregen die MVRDV voor ogen had.

Verder is ondanks de daarbij behorende moeilijkheden in aansluitingsdetails gekozen om zo slank mogelijk te construeren.

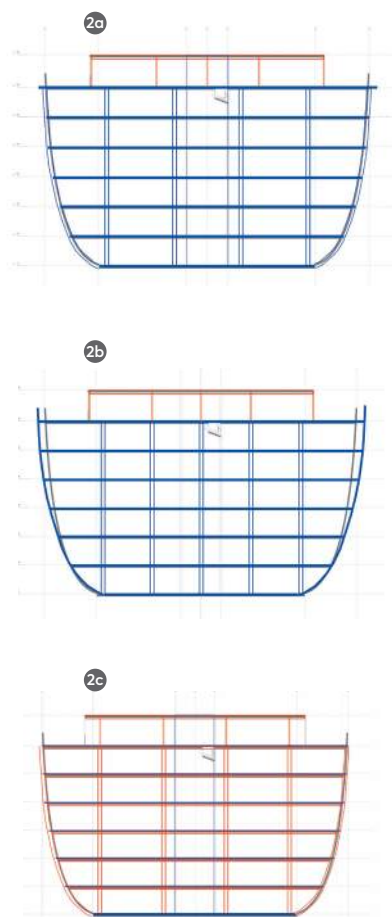
### Dubbelgekromde dragende gevel

De optimalisatie van de betonnen dragende schil was de volgende stap in het constructief ontwerp. De gehele gevel is verdeeld in 64 radialen met één segment per radiaal (fig. 4). Per verdiepingsvloer is met een handberekening bepaald wat constructief gezien het maximum aantal weg te laten segmenten is, om de bovenliggende elementen en vloeren nog op te kunnen vangen. De architect heeft met deze uitgangspunten een eerste digitale voorzet voor de sparingen in

de schil opgegeven. Door daarna de krachtsafdracht van de schil grof te bepalen, zijn de sparingen vanuit constructieve mogelijkheden verder in het bouwkundige ontwerp geïntegreerd.

Door de sterke kromming onderin was duidelijk dat de schaalconstructie op de onderste verdiepingen grote buigende momenten en normaalkrachten moest verdueren. Om deze krachten te kunnen opnemen, zijn de eerste twee lagen van de schaal (de zogenoemde 'sokkel') in het werk gestort, waarmee de schaalwerking optimaal wordt benut. Omdat de kromming en daarmee ook de krachten naar boven toe afnemen, kon de gevel vanaf de tweede verdieping in prefab beton worden uitgevoerd.

De zoektocht naar de meest optimale krachtswerking in de dragende schil was hiermee begonnen. Dat dit geen eenvoudige opgave was, bleek al snel na een eerste analyse van de schaalwerking. De combinatie van de ringtrekkrachten in de schil met de grote hoeveelheid sparingen in de wand, leek niet gemakkelijk te verenigen. Door de onderbreking van de schaal in tangentiële richting – vanwege de aanwezigheid van openingen in de gevel – concentreren de ringtrekkrachten zich in de nog wél aanwezige doorsnede, in dit geval dus in de vloer. Met name de eerste verdiepingsvloer speelt dus een sleutelrol in de complexe krachtswerking.

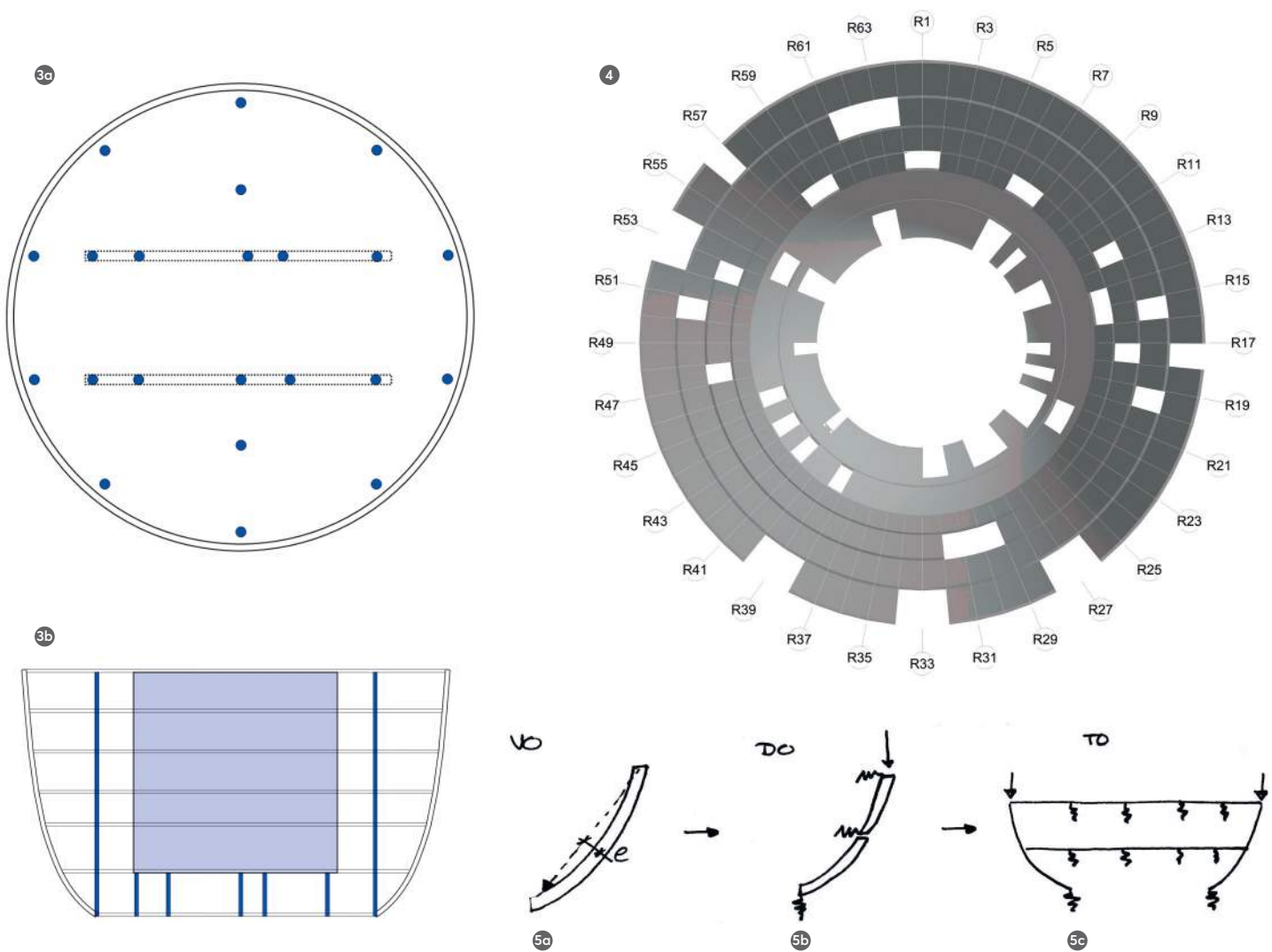


Tabel 1: Afweging alternatieven constructie: Column Structure, Mea Structure en Steel Structure (zie figuur 2)

	Variant 1 Column Structure	Variant 2 Mega Structure	Variant 3 Steel Structure
constructiehoogte vloer	390 mm resp. 450 mm	390 mm resp. 450 mm	710 mm
constructie dak	++	++	-
vloer trillingen	+	++	-
vrijheid vides	++	++	+
stabiliteit	kernwanden	dragende gevel	kernwanden
aanpassing bouwvorm	-	++	+
flexibiliteit in de toekomst	volledig aanpasbaar	(intern) aanpasbaar	volledig aanpasbaar
bouwsnelheid casco	+	-	++
bouwkosten casco	++	+	-
milieulast casco *	€ 850.000	€ 950.000	€ 1.000.000

\*) betreft geen directe kosten maar de preventiekosten om milieudoelen te behalen.





*De eerste handberekening diende als schaduwsoom voor de gevonden krachtswerking vanuit de diverse modellen*

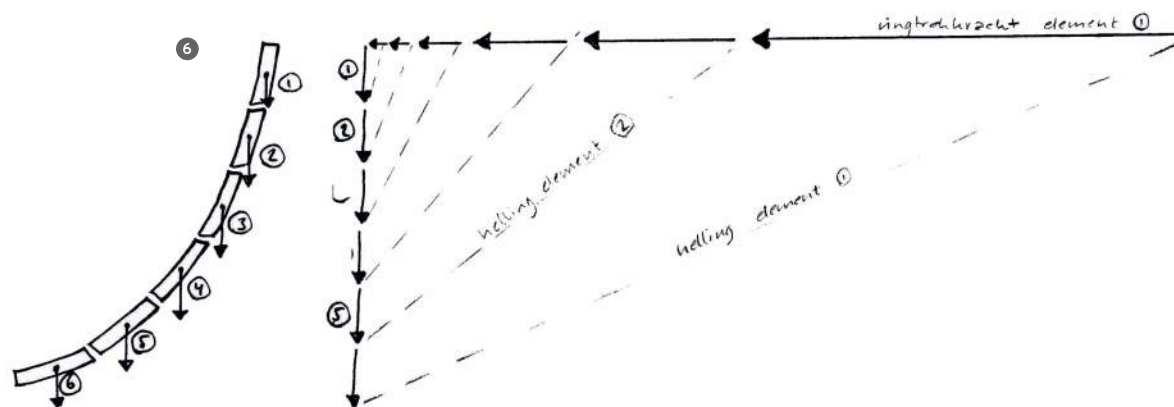
**KRACHTSWERKING IN SCHIL** Om vlot in het traject een inschatting te kunnen maken van de benodigde wapening en de minimale schaaldikte, is als volgt gehandeld. Voor één losstaand segment is op basis van de bovenbelasting en de aanwezige kromming, het maximaal optredende moment bepaald, waarop een eerste inschatting van de wapening is gemaakt (VO-model, fig. 5a). De schaalwerking kan als winst worden behaald op deze eerste grove benadering.

De eerste handberekening diende tevens gedurende het gehele traject als schaduwsoom voor de gevonden krachtswerking vanuit de diverse modellen. Figuur 3 illustreert hoe gedurende het ontwerptraject steeds uitgebreidere modellen zijn ingezet om zo de krachtsafdracht nauwkeuriger

te kunnen bepalen en het 3D-effect meer mee te kunnen nemen. Met de veren worden de ondersteuning in en uit het vlak geschematiseerd, namelijk de schaalwerking (fig. 5b) en de kolommen (fig. 5c).

Ook de maximale ringtrekspanningen zijn eenvoudig in te schatten, door per segment over de hoogte een krachtenveelhoek op te stellen (fig. 6). De verticale as symboliseert de belasting op het element. Via afdracht in lijn met het element (de helling) kan op de horizontale as de spatkracht loodrecht op de gevel worden gevonden door een gesloten krachtenveelhoek te tekenen. Deze spatkracht wordt opgenomen door een samenspel van de trekkracht in de vloer en een ontbonden ringtrekkracht in het vlak van de

3 Plattegrond (a) en doorsnede (b) 4 Dragende gevel bestaande uit 64 segmenten 5 Schematisering rekenmodellen gedurende het ontwerpproces: VO-model één verdieping (a), DO-model twee verdiepingen (b) en TO-model twee verdiepingen (c)



*De trekkrachten in de vloer leiden tot een forse reductie van de dwarskrachtcapaciteit en toelaatbare ponskracht in de vloer*

schaal. Figuur 6 illustreert hoe de trekkracht behoorlijk oploopt ter plaatse van de meest gekromde gevelelementen op de onderste verdiepingen. Deze inschatting fungeert wederom als een schaduwsoort voor de gevonden krachtswerking vanuit de diverse modellen.

**VERVORMINGEN IN RELATIE TOT MOMENTVERLOOP** Tijdens het technisch ontwerptraject is een 3D-model gemaakt waarin de gehele in het werk gestorte sokkel is geanalyseerd. De vervormingen van de sokkel geven een mooi inzicht in het momentenverloop over de hoogte binnen één gevelsegment. Aan de voet is het inklemningsmoment te zien, waarna het moment omslaat binnen de doorsnede. Het totale moment komt overeen met de benadering van het VO-model. Het verschilmoment ter plaatse van de eerste verdiepingvloer, wordt in de vloer opgenomen.

**GEVELOPENINGEN** De gevelopeningen hebben niet alleen een behoorlijke impact op de schaalwerking, maar zorgen ook voor een grote variëteit aan drukkrachten per gevelsegment. Figuur 8a laat zien welk effect de openingen in de gevel hebben op de uniforme verdeling van druk in de gevelelementen. De impact van de sparingen op de schaalwerking is geïllustreerd in figuur 8b. Hoe meer aaneengesloten gevelelementen, hoe groter de bijdrage van de schaalwerking op de totale krachtswerking (zichtbaar door grotere trekkrachten in de figuur).

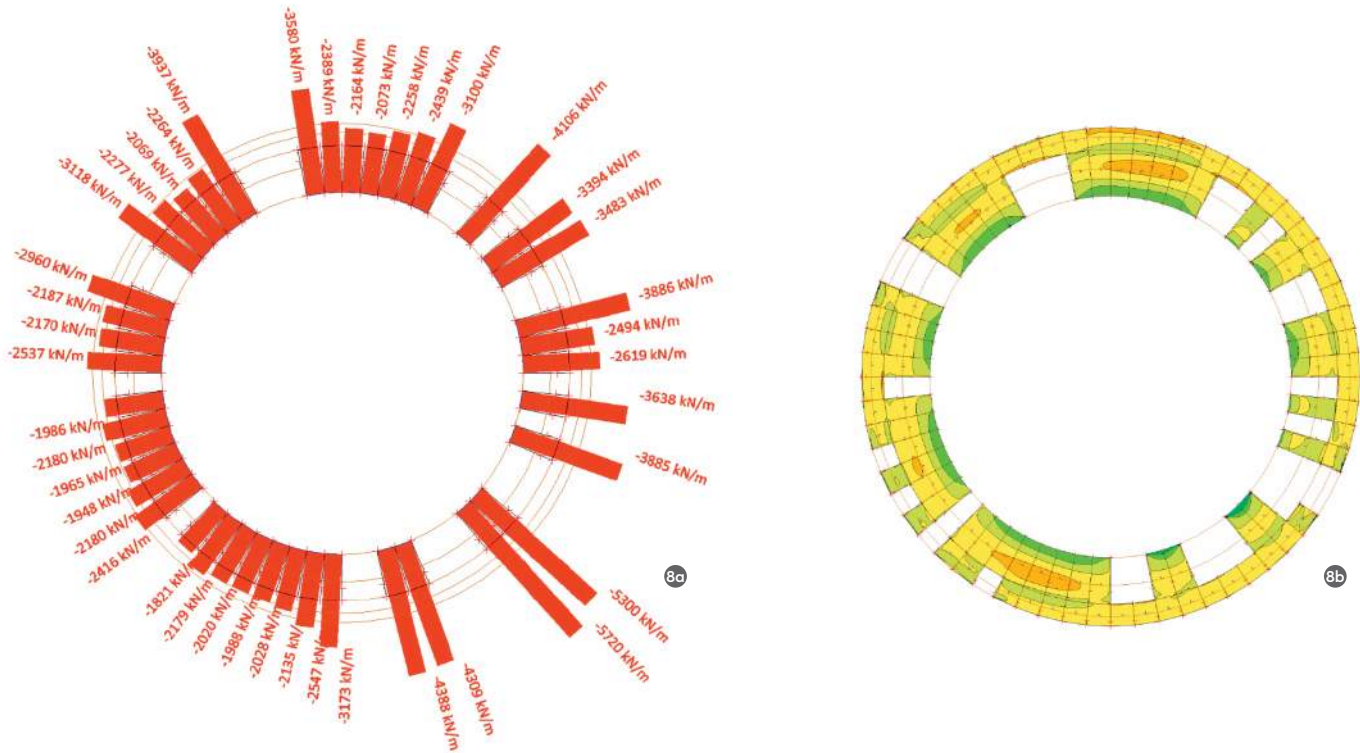
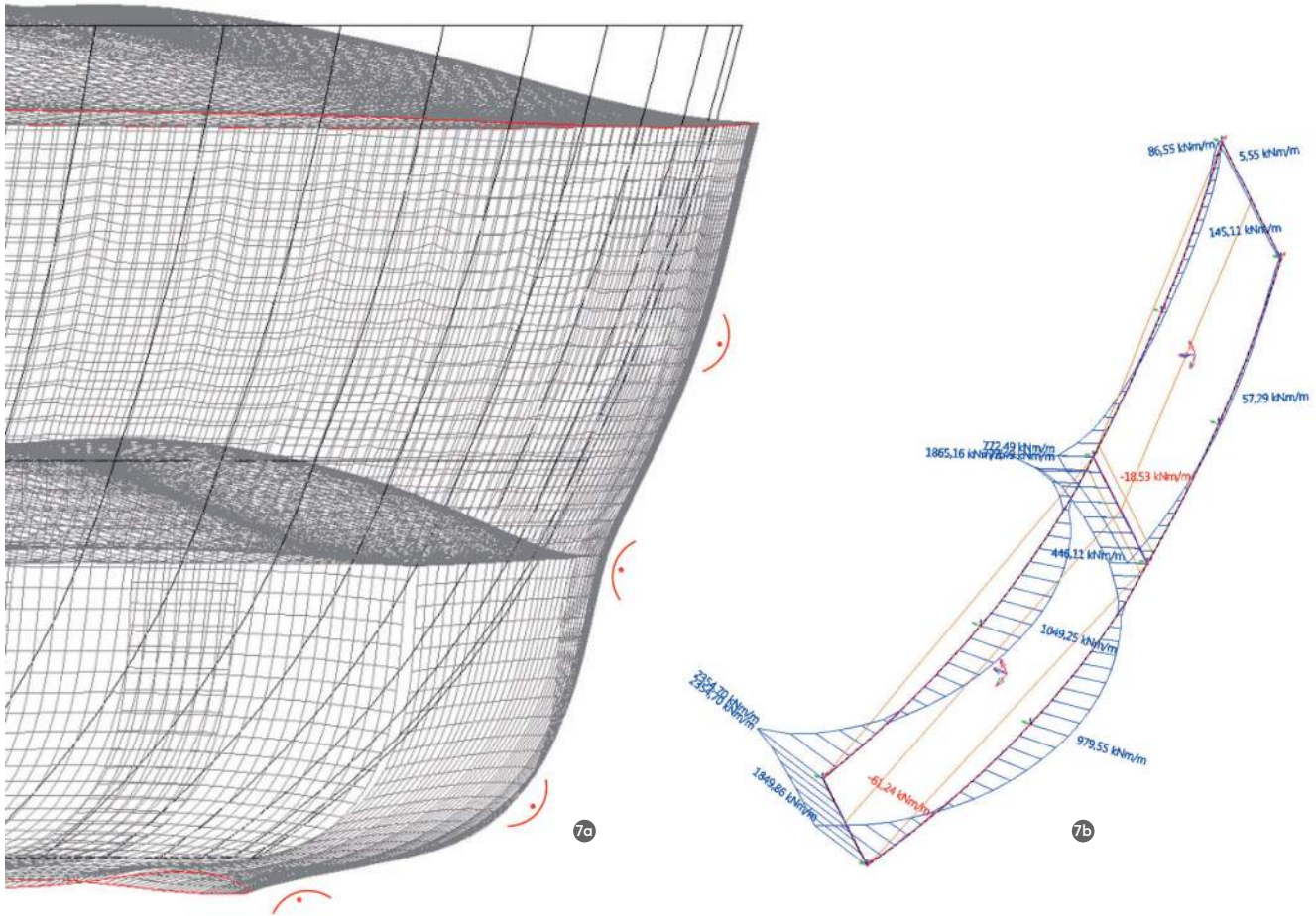
**DIMENSIONERING** De betonschil is uitgevoerd in C55/67. De oorspronkelijke dikte voor de onderste twee lagen bedroeg 450 mm. Op de begane grond is deze, vanwege de grote hoeveelheid sparingen, lokaal vergroot tot 500 mm. Dit omdat de schaalwerking hier niet optimaal kon optreden.

Voor de eerste verdieping is juist een verjonging naar 350 mm doorgevoerd, omdat de krommingen hier aanzienlijk lager zijn.

**VERDIEPINGSVLOEREN** De spatkrachten vanuit de gevel vertalen zich naar alzijdige trekkrachten in de verdiepingvloeren. Met name in de eerste verdiepingvloer zijn die trekkrachten groot. Daarbij komt dat er ter plaatse van het atrium een enorme sparing in de vloer zit.

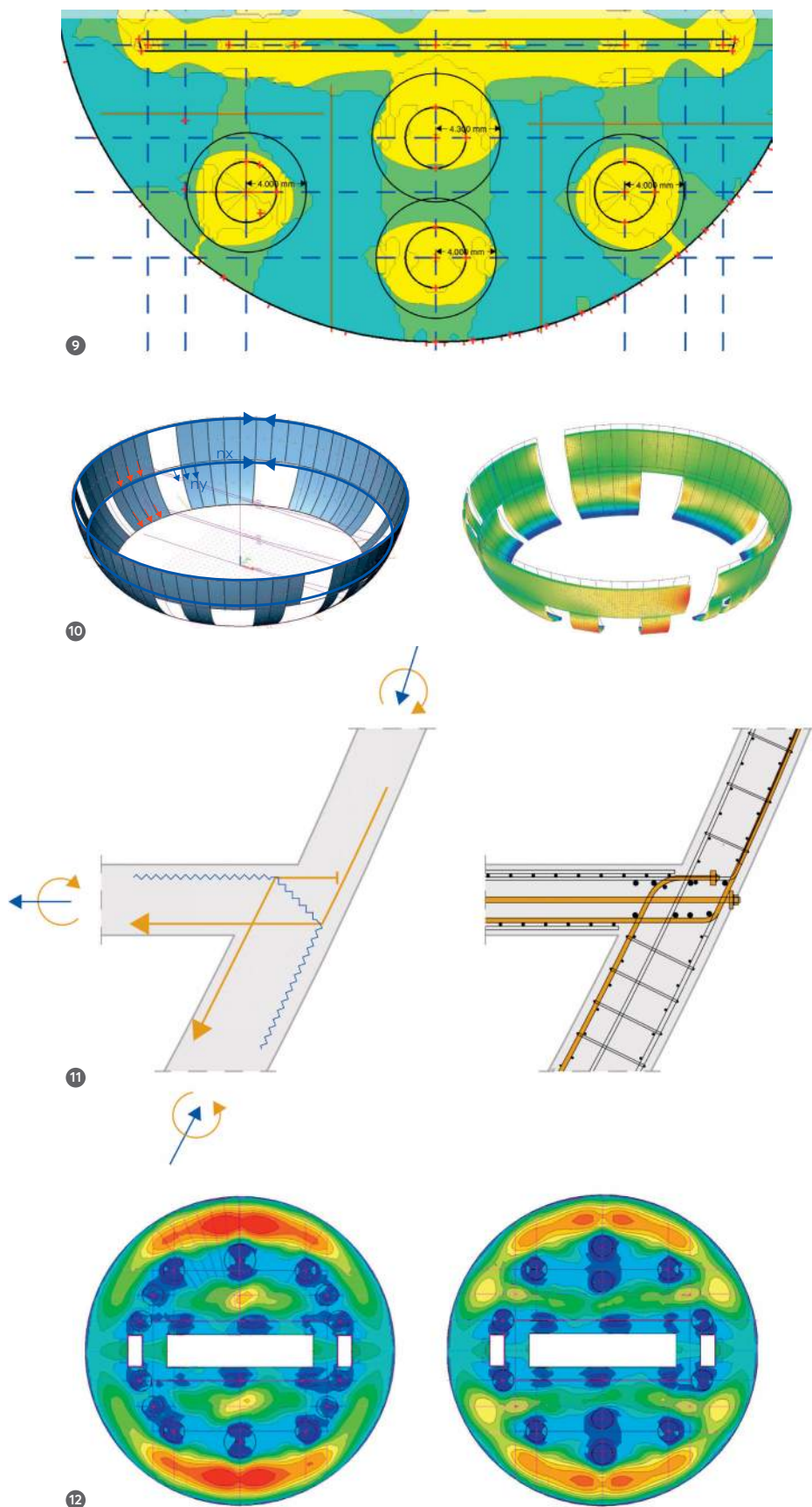
De tweede verdieping is geïntegreerd in de in het werk gestorte sokkel, die als een geheel samenwerkt. De gevel kan dus pas worden ontlast op het moment dat de tweede verdiepingvloer is uitgehard. Vanwege de afnemende kromming over de hoogte, neemt ook de trekkracht in de verdiepingvloeren naar boven toe af.

Om de trekkrachten in de vloer te kunnen opnemen, is overwogen de vloerand als een soort donut met een zware trekband te wapenen (te berekenen met de omgekeerde ketelformule). Dit bleek echter niet haalbaar in verband met zeer grote wapeningshoeveelheden.



7 Momentenverloop in relatie tot vervormingen  
 8 Normalkracht in (a) elementen en (b) ringtrekkrachten

*De laatste stap in het constructief ontwerp was het optimaliseren van de kolomposities*



**56** CEMENT 04 2019 **9** Overlap MyD en MxD t.b.v. momentnulpunten **10** Krachtswerking in sokkel zowel tangentiaal ( $n_x$ ) als radiaal ( $n_y$ ) (a) en vervormingen sokkel n.t.b. (b) **11** Evenwicht en wapening knoop eerste verdiegingsvloer met gevel **13** Momentverloop in de vloer t.b.v. optimalisatie kolomposities



**PONS** Pons was een belangrijk onderdeel in de toetsing van de vloer. De vloer is uitgevoerd met ponskoppen (foto 9). Bij de analyse moest rekening worden gehouden met de trekkrachten in de vloer, die tot een forse reductie leiden van de dwarskrachtcapaciteit en toelaatbare ponskracht in de vloer. Met de Eurocode zit je al gauw vast aan een uitdijende vlek van ponsperiferieën met elk de bijbehorende ponsbeugels. Op zeker moment mag worden aangenomen dat geen sprake meer is van pons maar van dwarskracht. In de Nederlandse norm is echter geen toelichting opgenomen waarin de overgang tussen pons en dwarskracht wordt verklaard. Volgens de theorie treedt pons op ter plaatse van radiale momenten, als gevolg van het ontstaan van tangentiële scheurvorming. Dit suggereert dat buiten het momentennulpunt geen sprake van pons meer kan zijn.

Door een plot te maken van de overlappende momentennulpunten in x- en y-richting, wordt het beeld in figuur 10 verkregen, waarin cirkels ontstaan. Deze zijn als buitenste toetsperiferie aangehouden. De Duitse norm biedt enig houvast om deze theorie te onderbouwen.

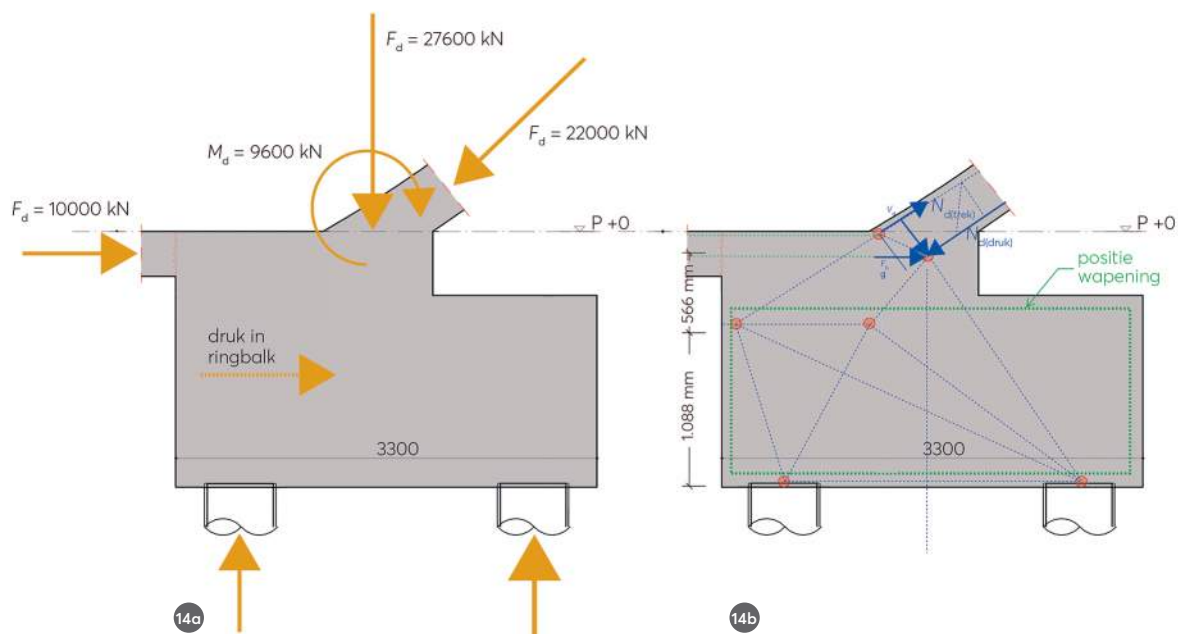
### Knoop

Elk kruispunt van constructieve elementen is een uitdaging op zich, zo ook de knoop waar de eersteverdiepingsvloer en de dragende gevel samenkomen. Zoals eerder genoemd, wordt in deze knoop een moment overgedragen vanuit de gevel naar de vloer. Vanuit het vervormingspatroon van het geheel, ontstaat een opendraaiende knoop tussen de vloer en de wand onder de vloer, met daar bovenop een extra moment vanuit de bovenliggende gevel. Figuur 12 laat zien welke krachten in deze knoop werken.

De verankering van de trekkracht vanuit de vloer is uiteindelijk uit het krachtenevenwicht gehaald en met een ankerplaat aan de buitenzijde tegen de betonschil verankerd.

### Kolom

De laatste stap in het constructief ontwerp was het optimaliseren van de kolomposities. De posities waren al in het definitief ontwerp vastgesteld, maar ze zijn naderhand aangepast. Door de kolom die het meeste vloeroppervlak moest dragen op te delen in twee kolommen, konden er uiteindelijk in totaal twee kolommen vervallen. Bijkomend



voordeel was dat de belasting per kolom meer gelijkwaardig werd verdeeld. En doordat de belasting door de aangepaste overspanningen evenwichtiger werd afgedragen, kon ook worden gereduceerd in wapening.

De kolommen zijn uitgevoerd met een vierkante stalen koker als kern (S460) en met beton C80/95.

### Voet

Door de verlopende diameter over de hoogte van 60 tot 40 m, komt de dragende gevel op de begane grond samen met de voet van enkele zwaarbelaste kolommen. Hier komen dus vele krachten samen. Dit levert ook hier een interessant krachtenspel.

De gehele diameter is ter plaatse van de fundering voorzien van een 'ringbalk', waarin verdikte delen zijn opgenomen als poer. Deze poeren zijn per stuk vergelijkbaar met de grootte en ruimtelijkheid van een *tiny house*.

De drukkracht vanuit de gevel maakt evenwicht met een drukkracht in de begane grondvloer, maar vooral met een drukkracht in de ringbalk. Het optredende moment wordt opgenomen door de palen, die in rijen onder de balk zijn geplaatst. De buitenste rij bevat meer palen, vanwege dit moment en de daaruit volgende verhoogde drukkracht aan de buitenzijde. Figuur 14a

toont de diverse krachten die op één poer samenkomen.

Om de inwendige krachtswerking in de poeren te onderzoeken, is een staafwerkmodel getekend (fig. 14b). Hierin markeren de knooppunten de posities waar knoopen evenwicht wordt gemaakt. De drukkracht in de ringbalk (uit het vlak van de afbeelding) is gesimuleerd met een omgerekende kracht in het vlak (via de ketelformule).

Een interessant fenomeen dat speelt ter plaatse van de samenkomst van kolom en schaalwand is dat door de positionering van de kolom deels in de schaal, de schaalwapening hier lokaal moest worden weggelaten. De toch al zwaarbelaste gevelelementen worden daarom lokaal met wapening gerveeld, waardoor krachtsafdracht aan weerszijden van de kolom mogelijk is.

### Prefab gevel

Aan de hand van een grove analyse is bepaald dat vooral de onderste twee verdiepingen voordeel zouden ondervinden van de mogelijke krachtswerking in een in het werk gestorte schil. In verband met de bouwkosten is er dan ook direct voor gekozen om vanaf de tweede verdieping verder te gaan in prefab-betonelementen. Door per verdieping gebruik te maken van gelijke elemen-

### UITVOERING

Zowel over de uitvoering van de bekisting als over de in het werk gestorte kolommen is een artikel verschenen in *Betoniek Vakblad*: 'De cirkel is rond' en 'Storten zelfverdichtend beton, een precisiewerk'.

ten per radiaal was er maar één mal per verdieping nodig. Hierbij is voor optimalisatie van deze mallen gekozen om de buitenkant, die aan het zicht onttrokken is door de glasgevel, vlak in plaats van gekromd uit te voeren.

Ook de prefab gevel vroeg extra aandacht als het gaat om de krachtsafdracht rondom de sparingen. Aangezien de vloer is berekend op het uitvallen van een willekeurig gevelelement, waarvoor randwapening is opgenomen voor de overspanning van één segment, kan bij grotere sparingen (breder dan één segment) de vloer niet alle bovenbelasting opvangen. De prefab gevelelementen zijn op de posities van onderliggende sparingen, uitgevoerd als wandligger om zo de belasting af te kunnen dragen. Het uitvoeren van de gevelelementen als wandligger is gerealiseerd door het toepassen van lasplaten voor de zijdelingse koppeling en afschuiving, en stekken in de vloer om hier-

mee de trekband in de vloer te kunnen mobiliseren (foto 1).

### Tot slot

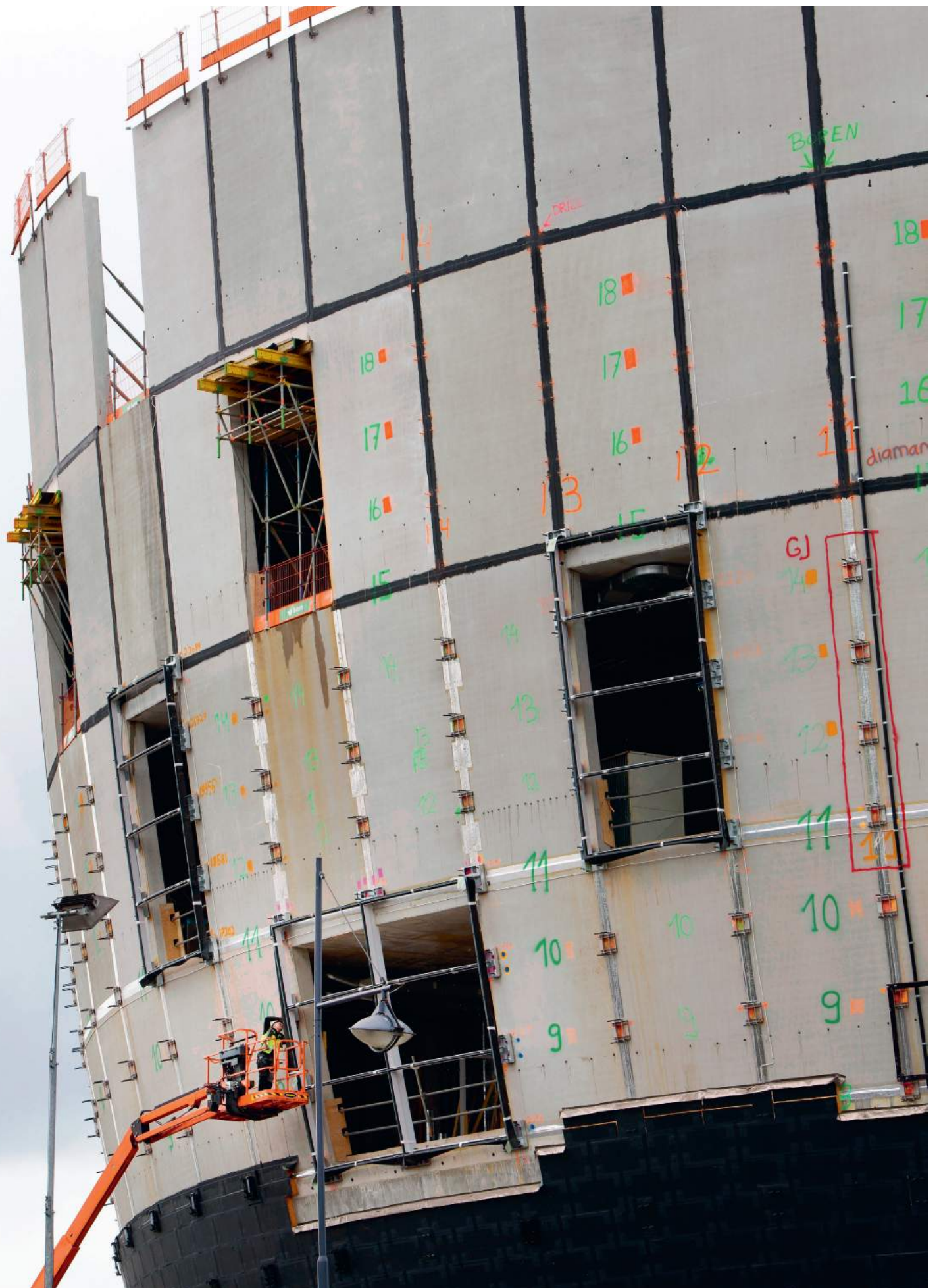
Voor het uitdagende ontwerp van het collectiegebouw was het uitgangspunt in het constructief ontwerp een schaal met bijbehorende schaalwerking. In het ontwerp is in eerste instantie de dimensionering van de schaal afgeschat door het modelleren van de wand als gekromde pendelstaaf.

Gedurende de zoektocht naar de meest optimale en zuivere krachtsafdracht binnen de dragende schaalwand was er een voortdurende schakeling tussen simpele onderbouwende modellen en meer complexe 3D-rekenmodellen. Deze laatste zijn onontbeerlijk om de krachtswerking in zijn totaliteit in samenhang met de vervormingen te analyseren. Echter, de zeer vereenvoudigde ontwerpbenadering met de pendelstaaf bleek achteraf behoorlijk accuraat. ●

*De keuze viel op een betonnen dragende schil met kolommen*



15 Schaalwandwapening met geprefabriceerde korven



1

60 CEMENT 04 2019

1 Het depot gezien vanaf de vijver in het Museumpark, foto: Stieber fotografie



# Robuustheidsanalyse

*Het nieuwe collectiegebouw voor Museum Boijmans Van Beuningen oogt door de vorm van nature robuust. Toch zijn er in het ontwerp en de uitwerking enkele maatregelen genomen om de robuustheid te vergroten. Dit op basis van een praktische robuustheidsanalyse.*

**Volgens NEN-EN 1990 moet een gebouwconstructie worden ingedeeld in gevolgklasse CC3 als het bezwijken ervan leidt tot ‘grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, en/of zeer grote economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving’.** In tabel NB21 wordt een aantal voorbeelden gegeven van bouwwerken die in deze categorie vallen. Daaronder ook bouwwerken met een publieksfunctie, waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen. Het depot valt in die categorie en daarom is, in overleg met Museum Boijmans Van Beuningen, besloten het gebouw in te delen in gevolgklasse CC3.

## Gevolgklasse CC3

Volgens het Bouwbesluit moeten bij het ontwerp van een constructie alleen de bekende buitengewone belastingen in rekening worden gebracht. Maar de *informatieve* bijlage A4 van NEN-EN 1991-1-7 gaat verder. Voor

auteur



**IR. MICHEL  
NIENS RC**

Projectleider  
IMd Raadgevende  
Ingenieurs

gevolgklasse CC3 staat aangegeven: ‘Er behoort een systematische risicoanalyse van het gebouw te zijn uitgevoerd, waarbij met zowel voorziene als onvoorziene gevaarlijke voorvallen rekening is gehouden’. Omdat de eisen aan de analyse niet duidelijk zijn omschreven, is er vroegtijdig overleg gevoerd met de dienst bouw- en woningtoezicht. Al bij de aanvraag van de omgevingsvergunning in 2016 is een robuustheidsanalyse van de hoofd draagconstructie ingediend. Deze robuustheidsanalyse bestaat uit een gevoeligheidsanalyse, risicoanalyse en een omschrijving van de risicobeperkende maatregelen. Hierin zijn zowel de voorziene als onvoorziene voorvallen behandeld. Omdat de onvoorziene voorvallen minder tastbaar zijn en vaak onderwerp van discussie, worden alleen deze in dit artikel behandeld.

## Gevoeligheidsanalyse

De randvoorwaarden voor de constructieve berekeningen zijn niet allemaal exact bekend en/of te bepalen. Met name de veer-

## *Op basis van de gevoeligheidsanalyse is besloten de krachten volgens het basismodel met 10% te verhogen*

stijfheid van de paalfundering en de E-moduli van de gewapende betonconstructies zijn slechts bij benadering bekend. Daarom zijn bij de berekeningen van de diverse dragende onderdelen gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de invloed van deze onzekerheden te onderzoeken. De maatgevende krachtswerking per onderdeel is vervolgens afgestemd op de meest ongunstige randvoorwaarde.

Zo is bij het bepalen van de reactiekracht in de kolommen uitgegaan van een starre ondersteuning, waarbij de atriumwand en de schaal verend zijn ondersteund. Bij het bepalen van de reactiekracht in de wanden zijn deze juist star ondersteund gedacht, waarbij de kolommen verend zijn ondersteund.

Bij het bepalen van de krachtswerking in de schaal en de eerste verdiepingsvloer is gevarieerd met de stijfheid van de funderingspalen onder de schaal en de E-moduli. De E-modulus van de schaal is zowel op de begane grond als op de eerste verdieping gevarieerd, de E-modulus van de eerste verdiepingsvloer was de derde variabele.

Uit de gevoeligheidsanalyse bleek dat de variatie in krachtswerking gemiddeld ongeveer 5% bedroeg met een enkele uitschieter naar 10%. Als gevolg hiervan is besloten de krachten volgens het basismodel met 10% te verhogen en deze als input voor de verschillende wapeningsberekeningen te gebruiken.

### **Risicoanalyse**

Voor de onderdelen van de hoofddragconstructie is het gevolg van falen van elk onderdeel geanalyseerd. Hiermee konden de kritieke elementen (key elements) worden geïdentificeerd. Voor de analyse van de kolommen onder de atriumwand wordt deze werkwijze in het navolgende omschreven.

### **KOLOMMEN ONDER ATRIUM-**

**WAND** Bij falen van een kolom onder één van de twee atriumwanden wordt de belasting door de wand herverdeeld over de resterende kolommen. De wapening in deze wanden in de UGT is met behulp van een plaatmodel bepaald. Ten behoeve van de

robuustheidsanalyse is er een eenvoudiger model gemaakt: een doorgaande ligger op meerdere steunpunten, voorzien van een gelijkmatig verdeelde belasting van 1200 kN/m. Deze gestileerde belasting is afgeleid uit de wapeningsberekening van de wanden.

De wand is als ligger ingevoerd met een dikte van 250 mm en een hoogte van 11 m (twee verdiepingen). De kolommen bestaan uit ronde staal-betonkolommen met een diameter van 600 mm. Deze steunpunten zijn geschematiseerd als veren, rekening houdend met het aantal funderingspalen (met stijfheid  $k = 100$  MN/m per paal).

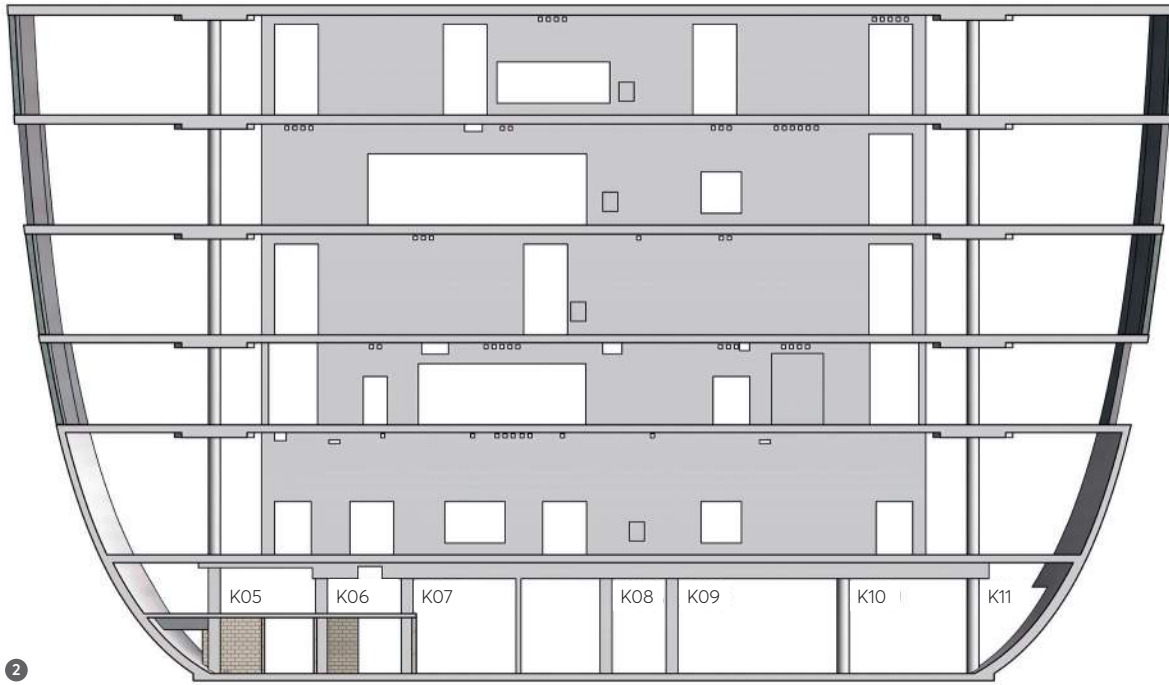
De wand werkt samen met de betonbalk onder de eerste verdiepingsvloer. Aan de rechterzijde, nabij kolom K11 is alleen deze betonbalk aanwezig. Het aandeel van deze balk is in rekening gebracht door onder het rechter uiteinde van de wand een veer te modelleren met een stijfheid passend bij de afmetingen van de balk.

De krachtsverdeling over de steunpunten in het vereenvoudigde liggermodel wijkt enigszins af van de wapeningsberekening, doordat er geen rekening wordt gehouden met wandsparringen. De berekening is echter voldoende accuraat om af te tasten of er voldoende herverdelingscapaciteit in de constructie aanwezig is.

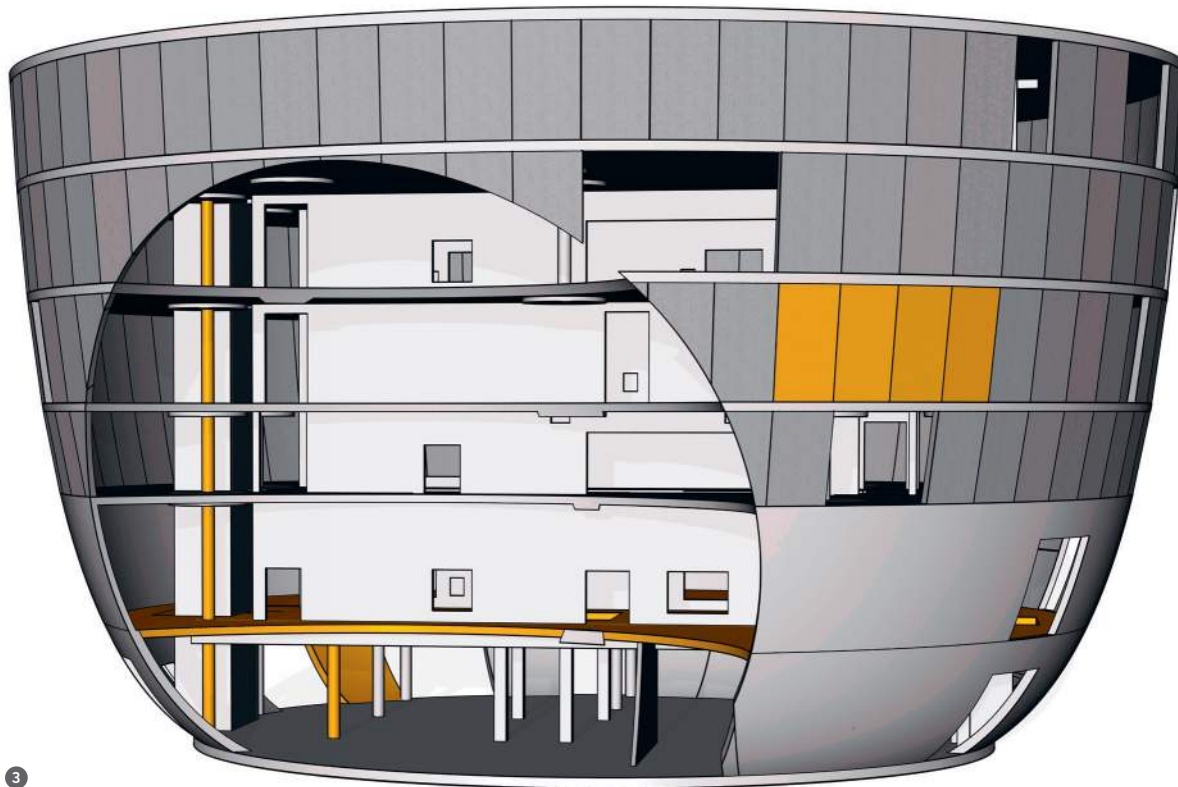
In tabel 1 is in de eerste kolom de reactie in de UGT getoond, inclusief een gewogen belastingsfactor  $\gamma = 1,5$ . Vervolgens wordt telkens een kolom weggenomen, met een wijziging van de kolomreacties tot gevolg. Deze zijn afgedrukt met een belastingsfactor  $\gamma = 1,0$ .

Indien de kolomreacties bij falen lager zijn dan in de gebruiksfase, is herverdeling mogelijk. Dit is meestal het geval. De blauw afgedrukte waarden zijn hoger dan de waarden in de gebruiksfase. De kolommen onder de wand zijn echter allemaal gelijk gewapend en in staat een maximale reactiekracht van 17.100 kN op te nemen. Daarmee voldoen dus ook de blauwe waarden. Ook de funderingspalen hebben voldoende restcapaciteit.

De rood afgedrukte waarde is niet opneembaar voor de kolom en de fundering.



2



3

2 Aanzicht atriumwand met kolommen, waarvan is geanalyseerd wat de gevolgen zouden zijn bij falen 3 De kritieke elementen zijn geel gemarkeerd

Tabel 1: Belastingen bij falen kolommen

Wand as E	Gebruiksfase	Falen K6	Falen K7	Falen expwand	Falen K8	Falen K9	Falen K10
Belasting in kN	$\gamma=1,5$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$
K6	9.837	-	10.164	7.096	7.020	6.485	2.546
K7	9.455	12.675	-	7.084	7.647	7.008	3.574
expeditiewand	4.505	4.306	4.071	-	4.156	3.848	2.999
K8	10.764	8.106	8.705	8.135	-	10.084	12.332
K9	10.613	6.928	7.888	7.787	10.020	-	18.389
K10	12.529	6.773	7.824	8.417	9.623	10.816	-
balk	2.056	1.052	1.187	1.321	1.374	1.600	-
<b>Totaal <math>\gamma=1,5</math></b>	<b>59.759</b>						
<b>Totaal <math>\gamma=1,0</math></b>	<b>39.839</b>	<b>39.840</b>	<b>39.839</b>	<b>39.840</b>	<b>39.840</b>	<b>39.841</b>	<b>39.840</b>

Hieruit wordt geconcludeerd dat kolom K10 een kritiek element is, waarvoor risicobeperkende maatregelen moeten worden genomen.

### Risicobeperkende maatregelen

Op een vergelijkbare manier als de kolommen onder de atriumwand, zijn met behulp van de risicoanalyse alle kritieke elementen geïdentificeerd. Hier zijn vervolgens risicobeperkende maatregelen voor getroffen, onder te verdelen in toevoegingen aan de constructie en extra aandacht voor uitwerking en uitvoering.

**KOLOM K10** De eerder benoemde kolom K10 is voorzien van een zwaarder staalprofiel (HEM340 i.p.v. HEM300) en zwaardere wapening (10Ø32 i.p.v. 8Ø20), waardoor het draagvermogen met circa 18% toeneemt en de kans op falen wordt verkleind. Ter hoogte van de eerste-, tweede- en derde verdiepingvloer zijn trekbanden in de atriumwanden aangebracht, die in combinatie met de verticale wandwapening de voor de herverdeling benodigde wandliggerwerking mogelijk maken.

**SCHAALDELEN** Als toevoegingen aan de constructie zijn op meerdere plekken koppelingen en trekbanden opgenomen. In de prefab schaaldelen zijn gevelopeningen aanwezig, waarboven wandliggerwerking van de prefab gevel moet kunnen optreden. Deze wandliggerwerking wordt mogelijk gemaakt met lasplaten tussen de elementen onder-

ling en trekbanden in de vloer. Deze wandliggers kunnen een grotere overspanning maken dan de breedte van de gevelopening. Mede dankzij deze maatregel zal het bezwijken van een willekeurig prefab geveldeel (met een breedte van ca. 2,5 m) niet leiden tot voortschrijdende instorting.

### EXTRA AANDACHT VOOR UITWERKING EN UITVOERING

De eerste verdiepingvloer speelt een cruciale rol in het opnemen van de trekkracht die vanuit de dragende geperforeerde schaal ontstaat. Daardoor is deze vloer een kritiek element. Naast een aantal toevoegingen aan dit constructieonderdeel, zoals het aanbrengen van trekbanden, is er ook bewust voor gekozen deze vloer in het werk te storten. Hierdoor is er niet alleen maximale ruimte voor wapening beschikbaar, maar wordt ook de engineering van de vloerwapening in eigen hand gehouden. De kans op fouten door miscommunicatie en/of onduidelijke demarcaties tussen verschillende partijen wordt hiermee verkleind.

De delen van de constructie die door deelconstructeurs worden uitgewerkt (hogere verdiepingen, prefab schaaldelen, staalconstructie), worden technisch inhoudelijk gecoördineerd door de engineeringcoördinator van de aannemer. Om aan deze rol extra gewicht te geven, is in het bestek gevraagd om een Register constructeur. De kritieke elementen in deze detailengineering zijn door IMd als coördinerend constructeur uitgebreid gecontroleerd. Dit





*Door de kritische eerste verdiepingvloer in het werk te storten, wordt de engineering in eigen hand gehouden en wordt de kans op fouten door miscommunicatie en/of onduidelijke demarcaties verkleind*



*Om aan de rol van engineering-scoördinator bij de aannemer extra gewicht te geven, is gevraagd om een Register-constructeur*

betekent dat er naast de gangbare controle op uitgangspunten en constructieve samenhang, schaduwberekeningen zijn gemaakt van onderdelen als de staal-betonkolommen en de prefab gevelelementen die als wandligger werken. Voor de interne controle van de door Imd geproduceerde tekeningen en berekeningen is een onafhankelijk schaduwteam bij het werk betrokken. De controles hiervan zijn vastgelegd en, net als alle andere stukken, gedeeld met bouw- en woningtoezicht.

Tot slot zijn er voor de kritieke onderdelen uitgebreide inspecties voorgeschreven. Zo zijn er voor de staal-betonkolommen inspecties geweest in de fabriek en meerdere malen op de bouwplaats. Om deze inspecties mogelijk te maken, heeft Imd de opdracht gekregen om twee dagdelen per week op de bouw het dagelijks toezicht te ondersteunen. Dit toezicht is verzorgd door de constructeur van Imd die ook de berekeningen heeft gemaakt. Vanwege de kennis van de berekeningen is dit toezicht een belangrijke aanvulling gebleken en kon er ook snel worden geschakeld als er omwille

van de maakbaarheid varianten voor de wapening moesten worden onderzocht.

### **Meerkosten**

De risicoanalyse van het depot heeft geleid tot een grotere robuustheid van het gebouw. Een objectieve weging van de robuustheid is echter onmogelijk. Bovendien moeten extra investeringen, die gepaard gaan met het verhogen van de robuustheid, niet uit het oog worden verloren. In het voorbeeld van de behandelde kolom K10 is de keuze voor het staalprofiel dat in de kolom is gestort, ingegeven door wat er praktisch, zonder te veel meerkosten, mogelijk is. Hierdoor neemt het draagvermogen met 18% toe. Uiteraard is het ook mogelijk het draagvermogen verder te verhogen door bijvoorbeeld de kolom te vergroten, maar wanneer is het voldoende?

De ervaring bij het depot heeft geleerd dat het waardevol is de kritieke elementen te benoemen en hier bewust extra aandacht aan te besteden bij de uitwerking, uitvoering en controle. Ook dit verlaagt immers de kans op falen, met een lager risico tot gevolg. ●