

Krachtenafdracht hoofdraageconstructie

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/m², 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 hoofdropzet 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 aansluitingsdetaileringen gekozen om zo slank mogelijk te construeren.

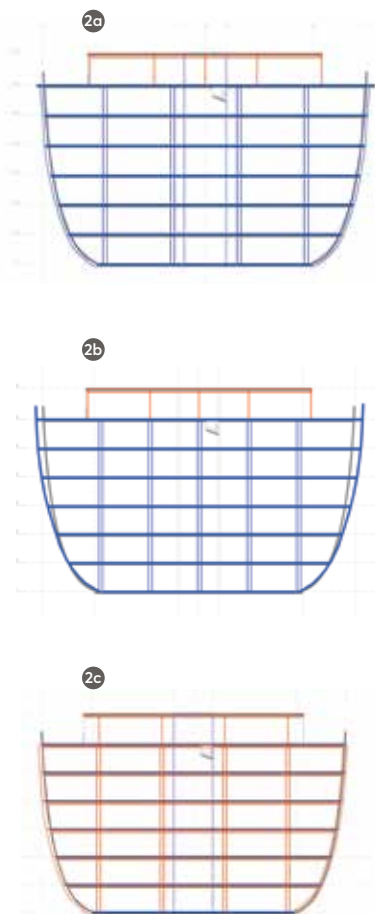
Dubbelgekromde dragende gevel

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 verduren. 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.

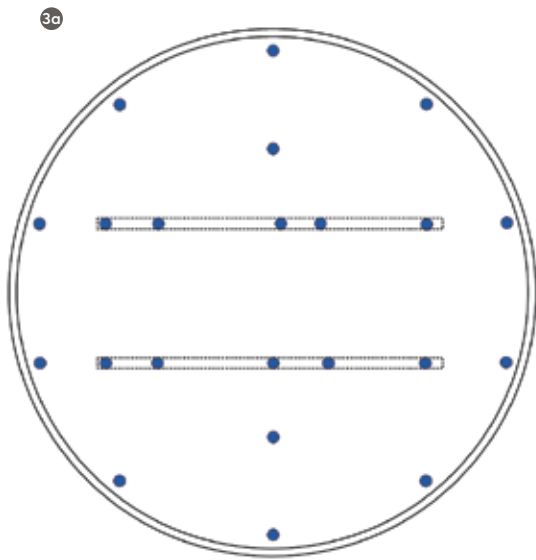
De zoektocht naar de meest optimale krachtswerking in de dragende schil was hiermee begonnen. Dat dit geen eenvoudige opgave was, bleek al snel na een eerste analyse van de schaalwerking. De combinatie van de ringtrekkrachten in de schil met de grote hoeveelheid sparingen in de wand, leek niet gemakkelijk 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, Mega 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

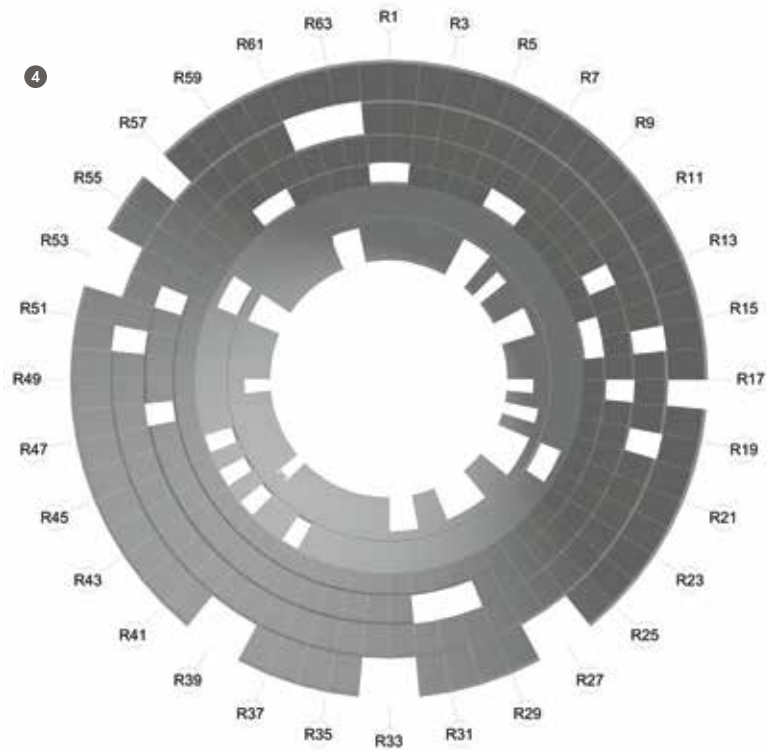
*) betreft geen directe kosten maar de preventiekosten om milieudoelen te behalen.



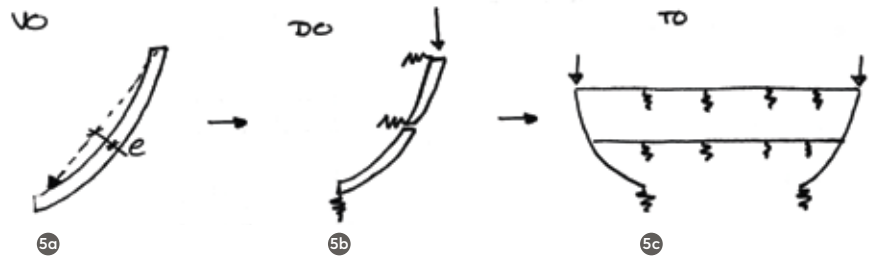
3a



3b



4



5a

5b

5c

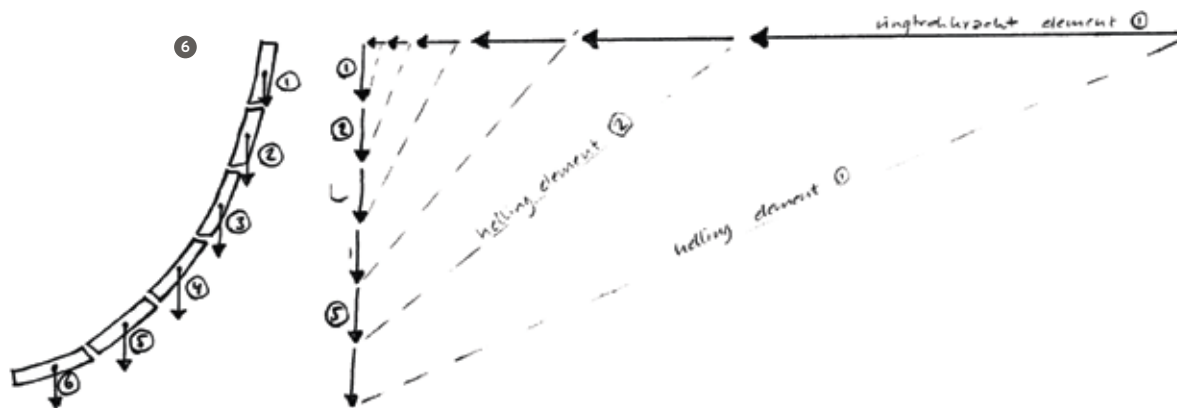
De eerste handberekening diende als schaduwsum voor de gevonden krachtswerking vanuit de diverse modellen

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 schaduwsum 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



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 schaduwsom 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 inklemmingsmoment 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 drukkkrachten 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).

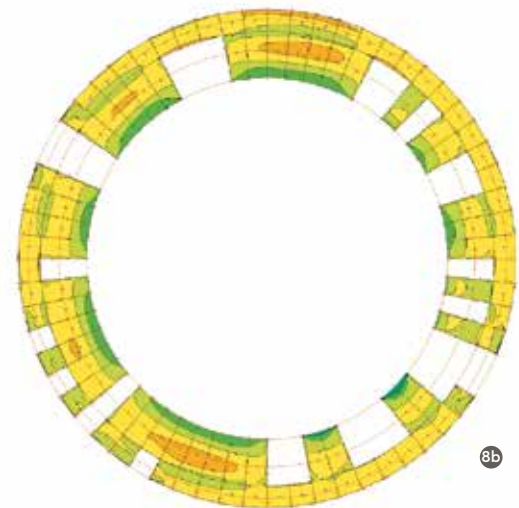
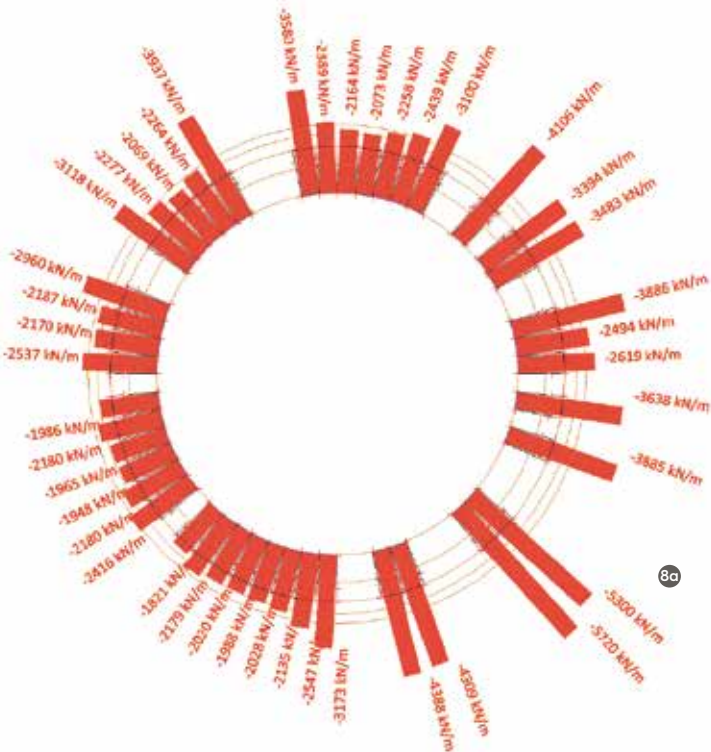
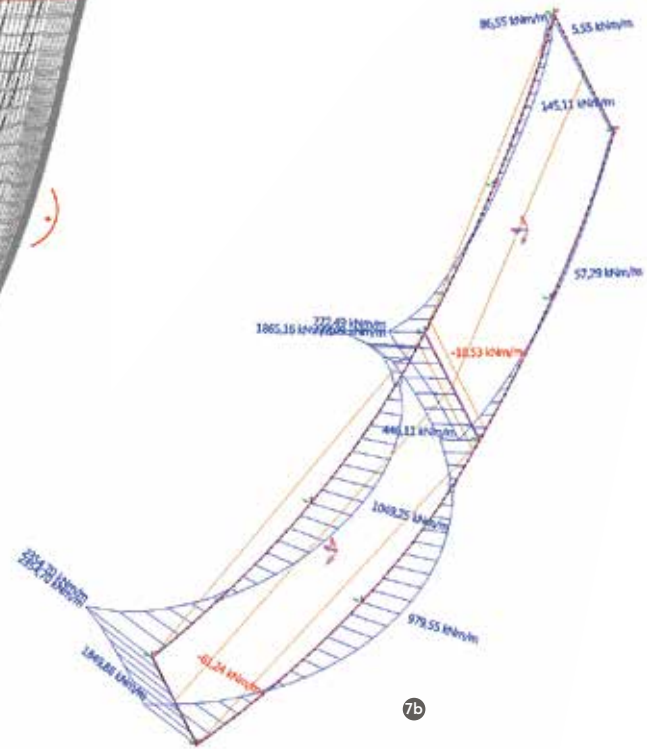
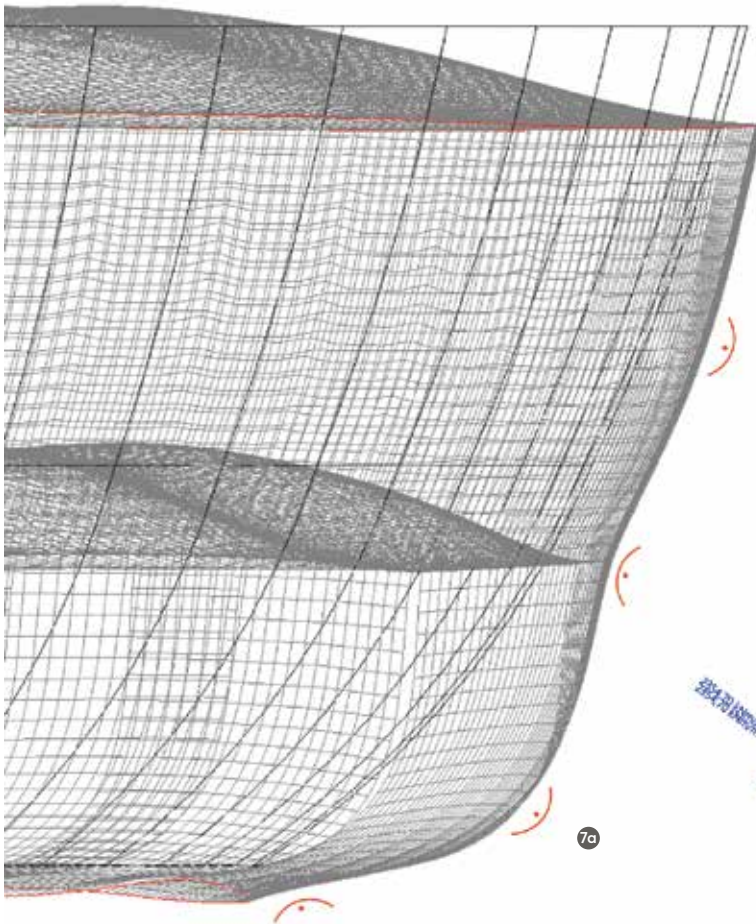
DIMENSIONERING De betonschil is uitgevoerd in C55/67. De oorspronkelijke dikte voor de onderste twee lagen bedroeg 450 mm. Op de begane grond is deze, vanwege de grote hoeveelheid sparingen, lokaal vergroot tot 500 mm. Dit omdat de schaalwerking hier niet optimaal kon optreden.

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

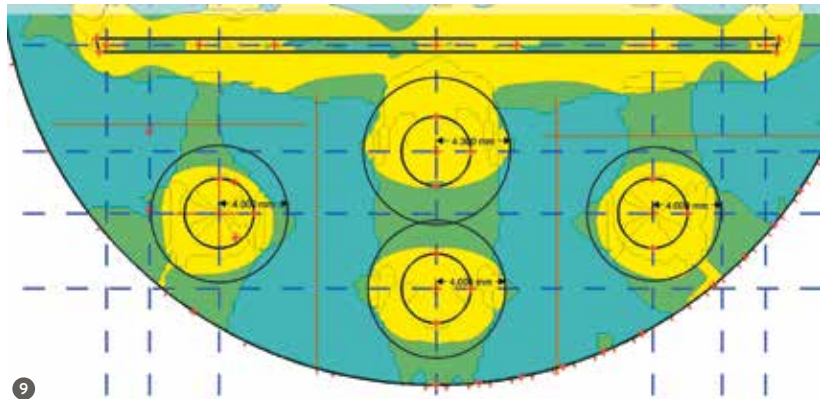
VERDIEPINGSVLOEREN De spatkrachten vanuit de gevel vertalen zich naar alzijdige trekkrachten in de verdiepingvloeren. Met name in de eerste verdiepingvloer zijn die trekkrachten groot. Daarbij komt dat er ter plaatse van het atrium een enorme sparing in de vloer zit.

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 tweeverdiepingvloer is uitgehard. Vanwege de afnemende kromming over de hoogte, neemt ook de trekkracht in de verdiepingvloeren naar boven toe af.

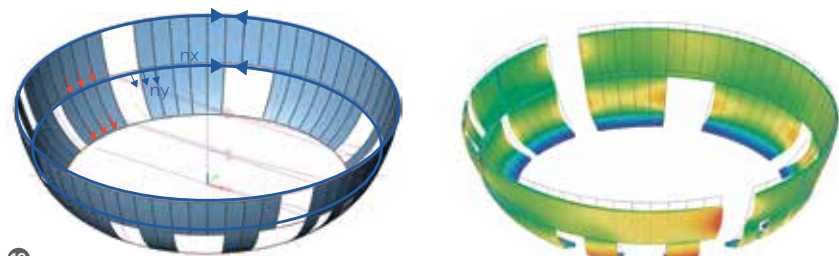
Om de trekkrachten in de vloer te kunnen opnemen, is overwogen de vloerwand als een soort donut met een zware trekband te wapenen (te berekenen met de omgekeerde ketelformule). Dit bleek echter niet haalbaar in verband met zeer grote wapeningshoeveelheden.



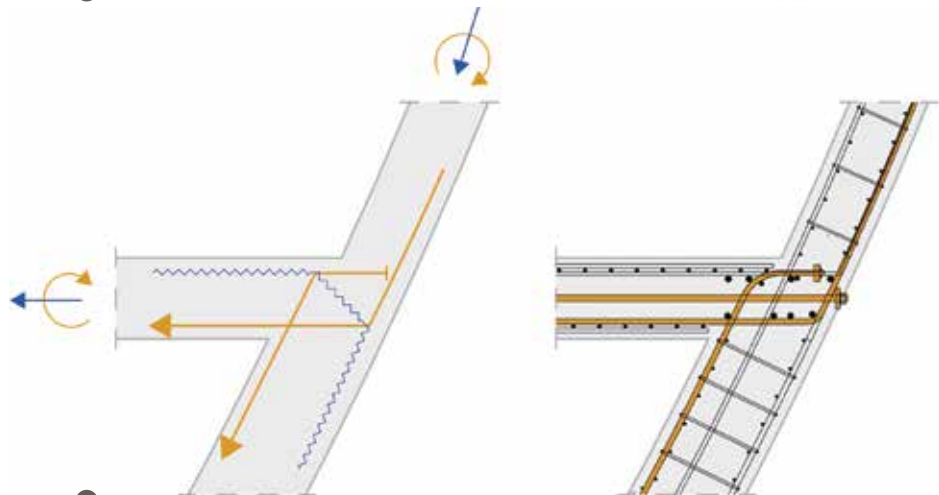
De laatste stap in het constructief ontwerp was het optimaliseren van de kolomposities



9



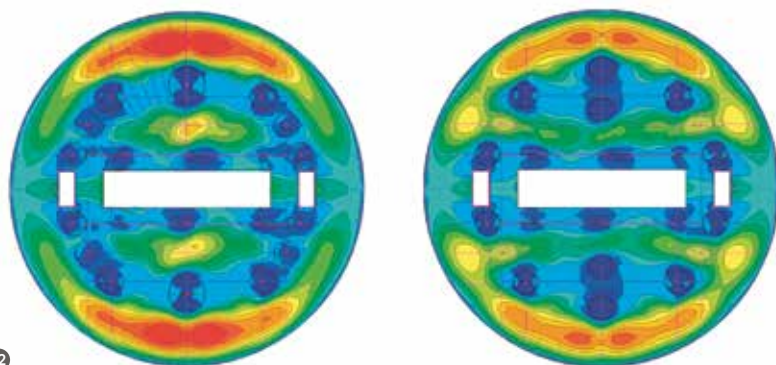
10



11



12





13

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 dwarskrachtpaciteit 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.

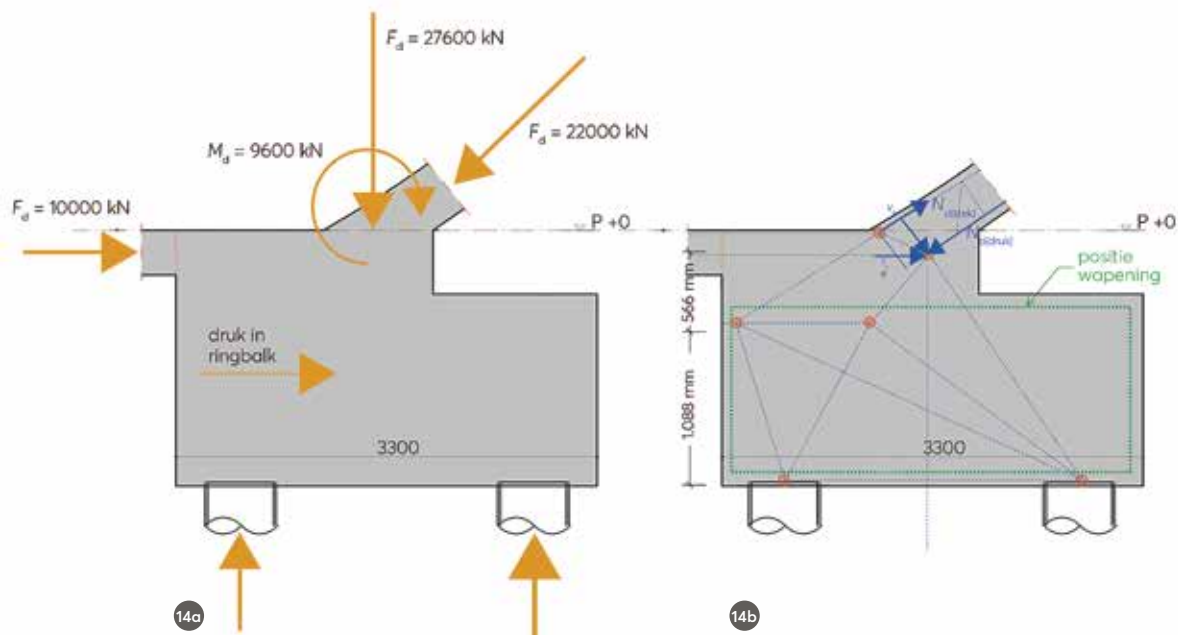
Knoop

Elk kruispunt van constructieve elementen is een uitdaging op zich, zo ook de knoop waar de eerste verdiepingvloer 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 gevelementen 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 gevelement, 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 gevelementen zijn op de posities van onderliggende sparingen, uitgevoerd als wandligger om zo de belasting af te kunnen dragen. Het uitvoeren van de gevelementen 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

