
Binnenstedelijke hoogbouw haalbaar door slimme constructie

Uitdagingen Grotius Den Haag door bijzondere vormen,
grote hoogte en kenmerkende kronen



Ingeklemd tussen de Koninklijke Bibliotheek, de Utrechtse Baan en de Randstadrail in Den Haag, zijn twee woontorens gerealiseerd, Grotius I en II (foto 2), met in totaal 655 appartementen. De tweelaagse ondergrondse parkeergarage, de bijzondere vormen, de grote hoogte van 100 en 120 m, en de kenmerkende kronen van de torens maakten dit project een flinke uitdaging. Voor de constructeur vroeg het niet alleen technische vaardigheden om de constructie te ontwerpen en te berekenen, maar vooral de inzet om het project financieel haalbaar te maken.

De locatie ‘Grotiusplaats’ was aanvankelijk bestemd voor kantoren, maar in 2015 zag ontwikkelaar Provast een betere mogelijkheid voor woningbouw. Dit mede dankzij de geplande plaatselijke overkapping van de Utrechtsebaan, waardoor de geluidsbelasting fors af zou nemen. Provast selecteerde voor het complexe binnenstedelijke project architectenbureau MVRDV. Dit bureau is gespecialiseerd in stedelijke verdichting en heeft voor Grotius een bijzonder ontwerp gemaakt met ‘gepixelde’ kronen (met schijnbaar willekeurig geplaatste blokjes), natuurstenen gevels en een verticale gradient in kleuren en afmetingen van de balkons (foto 3). Door alle randvoorwaarden, hoge kosten en beperkte opbrengsten (gedeeltelijke sociale huurwoningen), stond de financiële haalbaarheid onder druk. Een logische en efficiënte draageconstructie was daarom een vereiste.

Constructieve opzet

Het streven naar een duidelijke en eenvoudige constructie is goed te zien bij de hoofdopzet van de grillig gevormde torens. Met behulp van variantenstudies (zie figuur 4 voor de variantenstudie van Grotius I) kwam al snel de meest efficiënte hoofdconstructie (variant B) naar boven, die voor de andere disciplines voldoende ontwerpvrijheden bood. De dragende en stabiliserende beton-

wanden zijn grotendeels woningscheidend, terwijl de woningen op veel verdiepingen anders zijn verdeeld. De stramienmaat van 8100 mm past op de parkeerfunctie en de vloer is niet dikker dan nodig voor het instorten van leidingen.

Met het oog op een efficiënt stabiliteitsstelsel was in het ontwerp aanvankelijk een verdieping opgenomen met verspringende sparingen in de betonwanden, zodat op de verdiepingen geen lateien nodig waren. Later echter werd de voorkeur uitgesproken om alle verdiepingen op dezelfde manier uit te voeren. Hierdoor kregen de betonwanden plaatselijk slanke, zwaar gewapende lateien, ook in de centrale gangzone. Voor de bovenbouw was het van belang dat de constructie nog met verschillende bouwmethoden kon worden uitgevoerd. Uiteindelijk is door de aannemerscombinatie gekozen voor het ter plaatse storten van de betonconstructie.

Constructieve analyse in twee en drie dimensies

Als gevolg van de heldere constructieve opzet konden beide torens met betrekkelijk eenvoudige 2D-berekeningen worden geanalyseerd. Hierbij zijn er berekeningen gemaakt van elke wand, waarbij de horizontale belastingen op basis van stijfheidsverschillen zijn verdeeld.

Op verzoek van de aannemer is later ter verificatie een 3D-model opgesteld →



PROJECTGEGEVENS

project
Grotius Towers Den Haag
ontwikkelaar
Provast
aannemer
Combinatie JP van
Eesteren en Besix
architect
MVRDV
constructeur
IMd Raadgevende
Ingenieurs
geotechnisch advies
Geomet
adviseur installaties
Ingenieursburo Linssen

auteurs



IR. REMKO WILTJER RO

Raadgevend Ingenieur /
Partner
**IMd Raadgevende
Ingenieurs**



IR. MATTHIJ MOONS RC

Projectconstructeur
**IMd Raadgevende
Ingenieurs**

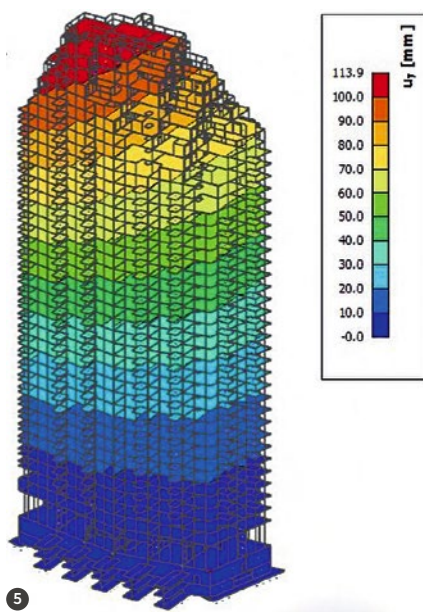
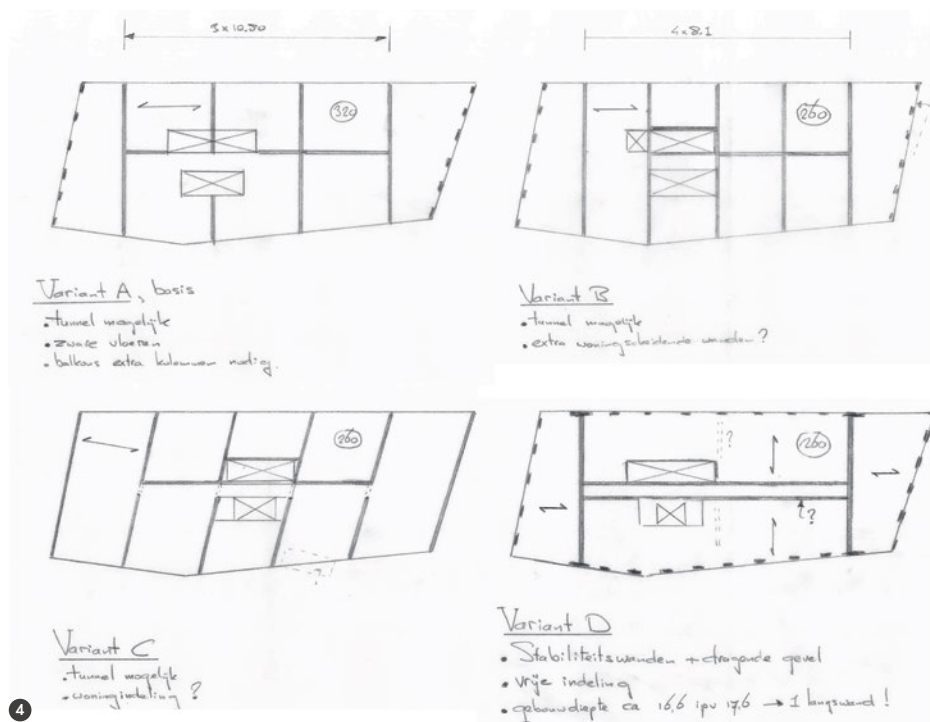


IR. MICHIEL NIENS RC

Projectleider
**IMd Raadgevende
Ingenieurs**



Dankzij een 3D-analyse van de krachtwerking werd de uitvoering eenvoudiger



van de volledige constructie van de hoogste toren, Grotius I, inclusief de funderingspalen (fig. 5).

Uit de 3D-analyse bleek dat de afdracht van de neerwaartse belasting zeer goed overeenkwam met het 2D-model. Voor de windbelasting bleek het 3D-model wat stijver dan uit de eenvoudiger berekening werd geconcludeerd. Dit is logisch, omdat de kolommen in de gevels een kleine bijdrage leveren, die in het 2D-model niet zijn opgenomen.

Het 3D-model is ook gebruikt voor de analyse van de effecten door de vervorming van de overgeconsolideerde kleilaag vanaf NAP -54,0 m, die zich circa 25 m onder het gemiddelde paalpuntniveau bevindt. Uit de geotechnische analyse bleek dat in deze laag in de loop van de tijd een theoretische zetting van maximaal 32 mm in het midden en 23 mm aan de rand op zal treden. Deze waarden zijn in het 3D-model als opgelegde vervorming bij de paalpunten ingevoerd.

Hoewel de absolute waarde van de zetting én het zettingsverschil van 9 mm beperkt zijn, is het effect op de krachtwerking niet verwaarloosbaar door de grote stijfheid van de wand in de langsrichting (fig. 6). Dit effect is merkbaar aan de uiteinden bij de

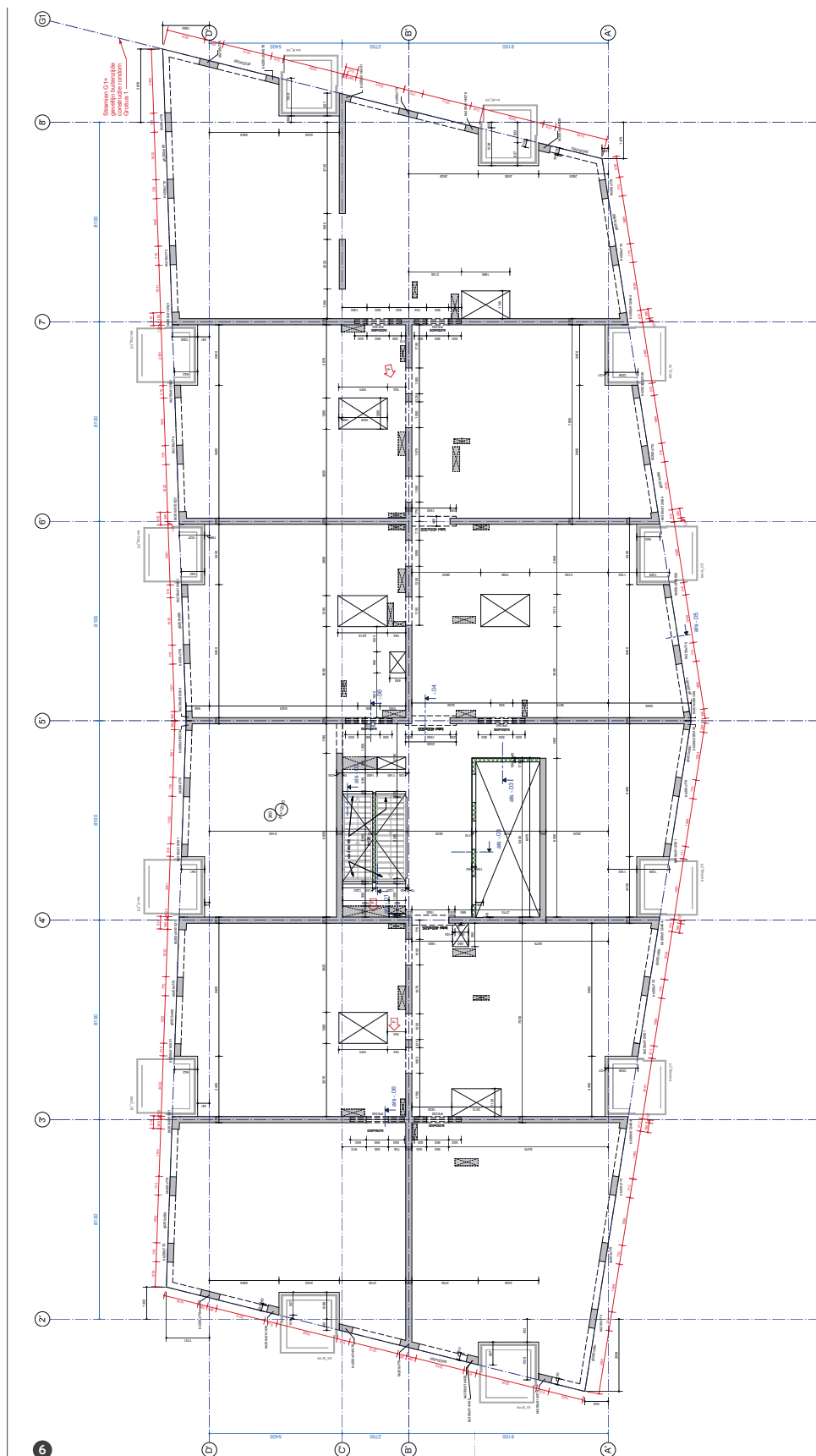
kopgevels en tot de tweede verdieping; hierboven is het uitgedempt.

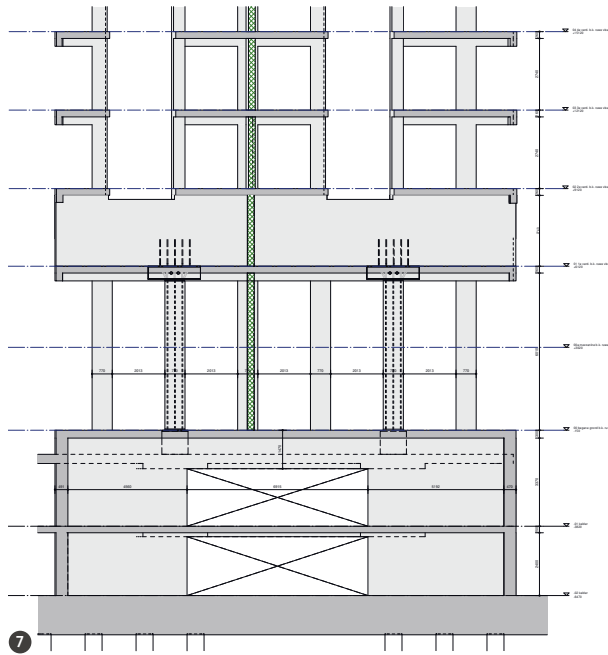
Beide uiteinden van de langswand, waar de krachten worden verhoogd door dit effect, eindigen precies boven de rijbaan van de parkeergarage en worden door een wandligger in dwarsrichting opgevangen (fig. 7). De kolommen onder deze wandligger zijn zwaar gewapend en voorzien van een versterkt staalprofiel HEB600, om de grote kracht van 24.000 kN op te kunnen nemen.

Op basis van de eerder gemaakte 2D-berekeningen waren de belastingen uit dit zettingsverschil nog iets hoger ingeschat en was een vijzelconstructie met werkvolgorde bedacht om de belasting over meerdere kolommen te kunnen verdelen. Door de nauwkeurige 3D-berekening bleek dit niet meer nodig en kon worden volstaan met de staalbetonkolommen zonder vijzels.

Het grote voordeel van de 2D-berekeningen is dat de analyse van de resultaten betrekkelijk eenvoudig is. Wel moet er bij het opstellen van het rekenmodel meer aandacht worden besteed aan de randvoorwaarden en de wisselwerking met andere elementen. Dit laatste gaat in een 3D-model min of meer →

*Voor de pixels
in de kroon
zijn een aantal
eenvoudige
constructieve
spelregels
opgesteld*





vanzelf, echter vergt dan de interpretatie van de resultaten de nodige aandacht.

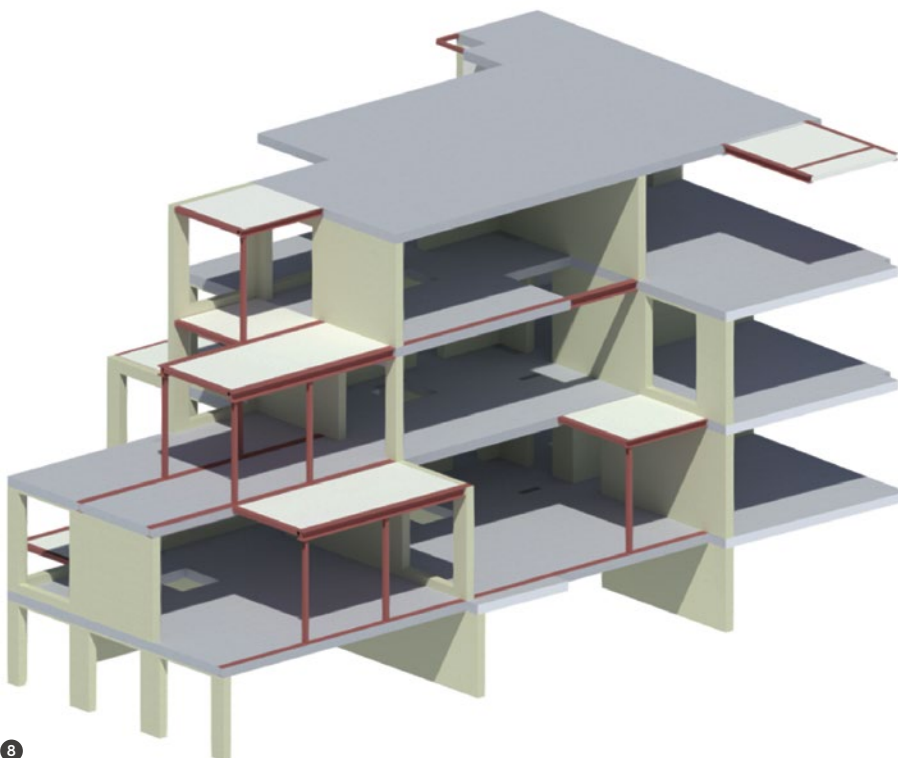
Pixels

Een opvallend onderdeel van het ontwerp is de kroon van beide torens. In het beeld van de

architect ‘verdwijnen’ aan de bovenkant van de torens steeds blokjes (pixels), waardoor het beeld van een afbrokkelende rots ontstaat. Mede hierdoor wordt de grote hoogte van de torens vanaf het maaiveld als kleiner ervaren. Bij Grotius I (120 m) begint het afbrokkelen al op 90 m hoogte, bij Grotius II (100 m) op 76 m.

Om deze schijnbaar willekeurige inbreuk op de hoofdstructuur maakbaar en financieel haalbaar te maken, is deze in overleg gerationaliseerd, waarbij zware overgangsconstructies moesten worden vermeden. Imd heeft hiervoor een aantal eenvoudige constructieve spelregels opgesteld. De architect is erin geslaagd met deze spelregels het gewenste beeld te handhaven. Eén van de randvoorwaarden was dat de pixels moesten passen op een substramien van 2700 mm, passend in het hoofdstramien van 8100 mm. Hierdoor konden de betonwanden van de hoofdstructuur zo veel mogelijk worden doorgezet, al dan niet in een getrapte vorm (fig. 8). Daar waar de betonwanden konden worden doorgezet, werden ook de standaard betonvloeren van 260 mm dikte doorgezet.

Vervolgens konden tussen de betonwanden verschillende combinaties van pixels voorkomen, die werden gemaxi- →



7 Wandaanzicht oostgevel Grotius I (wand naast 8) met staalbetonkolommen

8 Fragment kroon met pixels, met in het grijs en geel het casco van betonwanden en vloeren en in rood en gebroken wit de substructuur bestaande uit staal en staalplaatbeton

Een drielaagse kelder bleek niet realistisch, waarna een zoektocht naar een parkeeroplossing in twee lagen begon

meer op drie: twee naast elkaar en één erboven in alle mogelijke varianten.

Het gewicht van de pixels moest kunnen worden opgevangen door de eerste onderliggende massieve betonvloer met de standaard overspanning. Hiertoe werd deze vloer versterkt met een stalen ligger, die slechts een flensdikte onder de vloer uit mocht komen. Het gewicht van de pixels is zo laag mogelijk gehouden door staalplaatbetonvloeren en een staalskelet van liggers en kolommen toe te passen.

Trillingen Door deze oplossing ontstond het risico op het doorgeven van trillingen tussen de appartementen met de lichtere vloeren. Uit een analyse bleek dat dit effect beperkt was, maar het heeft er wel toe geleid dat een aantal stalen liggers iets stijver zijn gekozen dan voor de sterkte nodig was.

Brand De pixelconstructie maakt geen deel uit van de draagconstructie onder brandomstandigheden. Wel moest er aan de wdbbo-eis van 60 minuten worden voldaan. Voor de dunne staalplaatbetonvloeren is dit geen probleem. De stalen liggers en kolommen zijn voorzien van een brandwerende beplating.

Kelder en fundering

Tussen de torens is een klein stadspark ontworpen, waaronder een parkeergarage met 245 plaatsen moest worden gerealiseerd. De bouwlocatie is gelegen tussen de Koninklijke Bibliotheek, de Utrechtse Baan en een pijler van de verhoogde Randstadrail en daardoor erg krap. Het was daardoor noodzakelijk om ook onder de torens parkeerruimte te vinden. Daarbij was het streven om een diepe en daardoor kostbare bouwput te vermijden.

In een eerste haalbaarheidsstudie is een compacte drielaagse kelder onderzocht, om op voldoende afstand van genoemde belendingen te kunnen blijven. Dit bleek echter niet realistisch. Bij de bijbehorende ontgravingsdiepte zou een te dure onderwater-betonvloer nodig zijn, omdat de aanwezige kleilaag op circa 14 m diepte op zou kunnen barsten.

Daarmee begon de zoektocht naar een parkeeroplossing in twee lagen. Dit werd be-

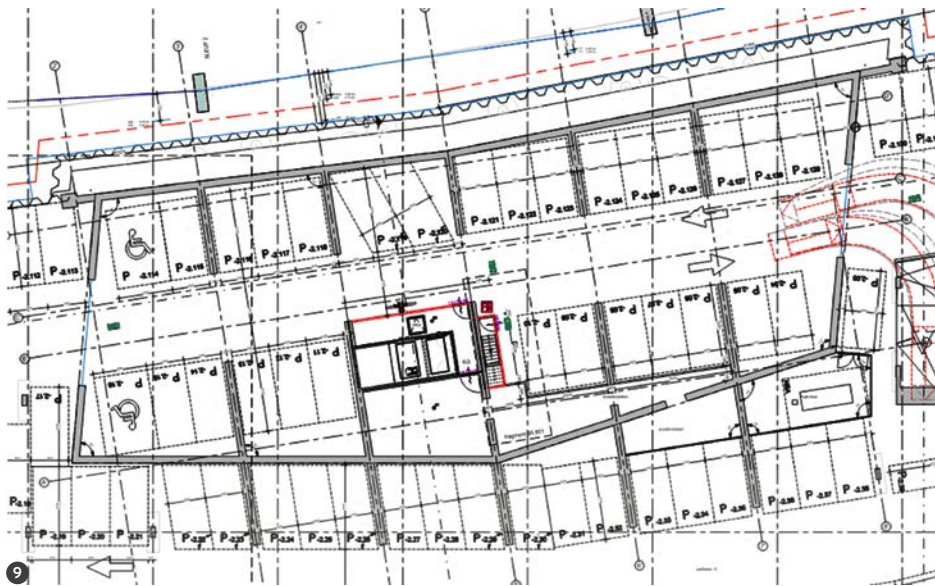
moeilijk door de fundering van beide torens. Immers, als deze fundering te breed zou zijn en diep onder de kelder uit zouden steken, zou er alsnog een risico op opbarsten van de kleilaag bestaan.

Met de gekozen constructieve opzet van Grotius I (vloeren met een overspanning van 8100 mm, gedragen door betonwanden) is er onder deze toren ruimte om te parkeren. De meer grillige vorm van Grotius II leent zich hier veel minder voor. Daarom is ervoor gekozen om in Grotius II de functies zoals technische ruimten, fietsenstallingen en bergingen op te nemen. Hierdoor zijn er hier meer gesloten wanden waarmee de fundering grotendeels in de onderste kelderlaag is gerealiseerd. Onder de keldervloer kon worden volstaan met stroken voor de paalfundering, met een dikte van slechts 1 m inclusief vloer, en dat bij een hoogte van de toren van 100 m.

Om ook onder Grotius I, met 120 m de hoogste toren van de twee, zware funderingselementen te voorkomen, zijn de betonwanden in de kelder aan één zijde verlengd tot naast de toren, passend in de parkeerlay-out (fig. 9). Zo konden onder deze mega-consoles van twee verdiepingen hoog, ook funderingspalen worden geplaatst.

Aan de andere zijde is de grondkerende kelderwand betrokken bij de fundering van de dragende dwarswanden. De paalposities zijn daarbij zo gekozen dat het zwaartepunt ervan vrijwel gelijk valt met het zwaartepunt van de belasting, ondanks de asymmetrie in de fundering.

Maar dat was niet voldoende om het grote aantal palen (550 in totaal, waarvan de helft onder Grotius I) zonder funderingsstroken kwijt te kunnen. Daarom is gekeken of bredere stroken mogelijk waren, om het benodigde aantal palen eronder kwijt te kunnen. In overleg met de geotechnisch adviseur is onderzocht welke strookafmetingen nog veilig ontgraven konden worden. Immers de grond tussen de ontgraven stroken werkt als bovenbelasting mee tegen het opbarsten van de bouwputbodem. Het gaat daarbij dus om zowel de diepte als de breedte van de ontgraven stroken. Deze strookbreedte was niet voldoende om de benodigde drie rijen palen onder de wanden



te plaatsen, tenzij deze onder een kleine schoorstand geplaatst zouden worden. Zo kon de hart-op-hart-afstand aan de bovenzijde van de palen worden verkleind, en bij de punt toch voldoende afstand worden gecreëerd voor het benodigde geotechnische draagvermogen. De stroken zijn breed genoeg gekozen om een relatief grote paalafwijking toe te laten, zonder later de wapening aan te hoeven passen. Omdat de palen vanaf het maaiveld werden geïnstalleerd en de bovenzijde zich op circa 6 m diepte bevond, was er een reële kans op een flinke positie-afwijking, waarop op deze wijze is geanticipeerd. Op deze manier is het funderingsoptimaliseerd op functionaliteit in de kelder, maakbaarheid en veiligheid van de bouwput.

Paalsysteem Ook bij de keuze voor de schroef-combinatiepaal met groutinjectie speelde de maakbaarheid een belangrijke rol. De paal is niet alleen gekozen vanwege het hoge draagvermogen en de trillingsvrije installatie. Ook het ontgraven van de bouwput na het schroeven kon aanzienlijk worden vereenvoudigd, doordat de achthoekige prefab kern niet langer is dan nodig. Het gedeelte van de paal boven de onderste kelder-vloer is gemaakt met een verdund grout-mengsel, dat eenvoudig verwijderd kon worden tijdens het ontgraven.

Damwand De damwand, nodig om de bouwput te kunnen maken, is in het deel van de kelder naast de torens, permanent ingezet. Dit leverde een aantal voordelen op ten opzichte van een tijdelijke damwand met een permanente betonwand; een besparing in tijd, geld en ruimte en een verkleining van het risico op schade aan de belendingen. De Koninklijke Bibliotheek en een pijler van de trambaan zijn immers nabij, aanleiding om de invloed van het maken van de bouwput nauwkeurig te onderzoeken en te monitoren. De damwanden zijn geotechnisch niet dragend, maar dragen wel de verticale belasting uit de beganegrondvloer en de -1-vloer met behulp van deuvels over naar de onderste keldervloer. Hierbij is veel zorg besteed aan een goede detaillering.

De beganegrondvloer en de kelder-vloer -1 bestaan uit massieve betonvloeren op verzwaarde stroken. De randoplegging van de vloeren wordt gevormd door de permanente damwanden. Daar waar de stroken eindigen op de permanente damwand, is een kolom voor de damwand geplaatst, om te hoge lokale spanningen in de damwand te voorkomen.

Hiermee werd tevens een tweede draagweg mogelijk bij brand; de begane- grondvloer kraagt dan uit en zal niet bezwijken als gevolg van een door brand bezweken deel van de damwand. Hierdoor kon op →

