Woontoren Montevideo, Rotterdam

Heldere stapeling van principes

Waarom zijn alle hoogbouwtorens zo saai? Hoe komt het dat bij hoogbouw altijd wordt gesproken over de 'hoogste' maar nooit over de 'mooiste' toren. Waarom mag het project Montevideo als uniek worden bestempeld? Het constructief ontwerp is bij Montevideo een deel van het architectonisch ontwerp geworden. Het is absoluut uniek met een stapeling van een aantal stabiliteitssystemen en grote overgangen in materialen en structuren. De denkwijze is helder. Maak lagen met eigen karakteristieken, los het probleem per zone optimaal op, maar denk tevens in oplossingen om de zones goed te verbinden. Zo wordt een gebouw slim hoog en mooi bovendien.

ir. W. Spangenberg
ir. A.R. van Eerden
Walter Spangenberg en Sander van Eerden zijn respectievelijk constructief ontwerper en projectingenieur constructies bij ABT in Delft

Het masterplan van Mecanoo met links (blauw) Montevideo.

Het ontwerp kwam niet uit de lucht vallen. De naam Montevideo verwijst naar de benaming van de oude pakhuizen, die op de Wilhelmina Pier in Rotterdam vroeger dienst deden voor het verwerken van goederenstromen uit de grote havenschepen. Toen architect Francine Houben de opdracht kreeg voor het ontwerpen van een masterplan voor de Wilhelmina Pier, waren er aan de noordzijde van de pier al een aantal projecten in uitvoering. Het World Port Center van Norman Foster, naast Hotel New York, was nagenoeg gereed. Ook het KPN-gebouw van Renzo Piano, net naast de Erasmusbrug, was in uitvoering. De schetsen van het gigantische bouwvolume van 'De Rotterdam' van Rem Koolhaas circuleerden. Het masterplan van Mecanoo probeerde het evenwicht in het totale gebied te herstellen. Het betrof een totaalvisie op het gebied en een pleidooi om iets minder op zichzelf staande gebouwen te realiseren. Hierbij werd nadrukkelijk gezocht naar een totale compositie met doorkijken van de ene naar de ander zijde van de Wilhelminapier. Montevideo vormt een onderdeel van deze compositie.

Het ontwerp van Montevideo

Montevideo mag worden gezien als 'een kleine stad' in de stad. Met een gevarieerd programma van ongeveer 45.000 m^2 is het een gebouw, waarin de mogelijkheid bestaat om wonen, werken en ontspannen te combineren. De 192 uiterst luxueuze appartementen, 6.000 m^2 kantoorruimte, 270 parkeerplaatsen, 1.600 m^2 winkels en horeca en een health club voor de bewoners van 700 m^2, zijn verdeeld over drie gebouwdelen: de woontoren, het plintgebouw en de zogenoemde cantilever (het deel dat uitkraagt over de kade).
Tijdens het ontwerpproces is het programma aangescherpt. Niet voor niets bestond het aansturende team, vanuit de opdrachtgever ING Real Estate, uit een projectmanager en een ontwikkelingsmanager. De haalbaarheid van de bouw van een complex met een hoogbouwtoren, en helemaal een woontoren, wordt sterk bepaald door de marktwaarde van de bvo's. In het definitief ontwerp moest er vanuit dat oogpunt een optimalisatie slag worden gemaakt. Het aantal woningen is uitgebreid en er zijn zelfs nog twee lagen aan de toren toegevoegd. Bij het aantrekken van de woningbouwmarkt ontstond daarmee een omslagpunt in de haalbaarheid. ING Real Estate vond het toen een verantwoorde investering om de ontwikkeling door te zetten.

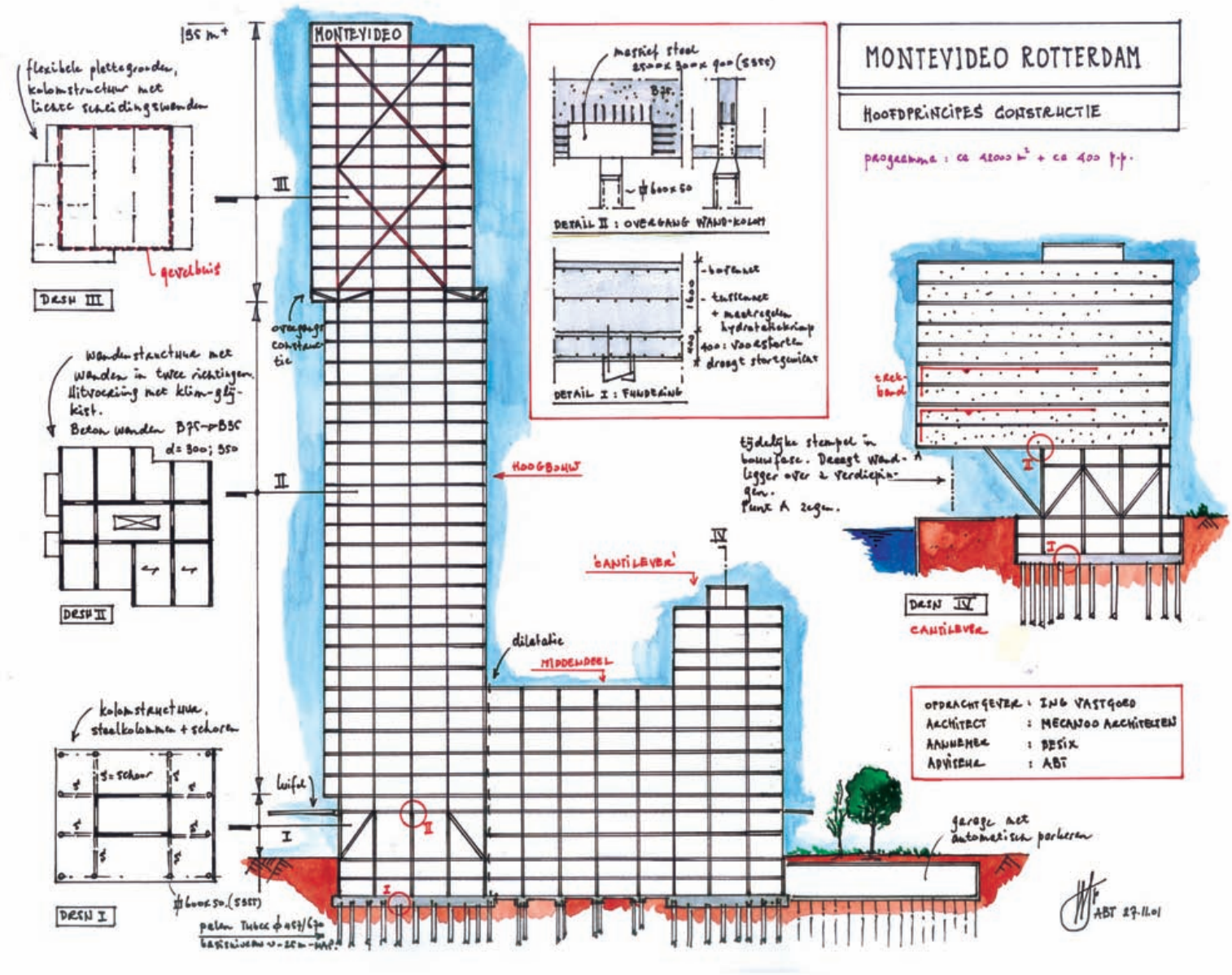
Waarom zijn hoogbouwtorens zo saai?

Hoogbouwtorens kenmerken zich meestal door een constructief regulier, en daardoor enigszins saai systeem. Het constructieve concept dat voor een toren wordt gekozen, is namelijk veelal over de gehele hoogte van het gebouw hetzelfde.
De woontoren Montevideo, met een hoogte van 152,32 m de hoogste woontoren van Nederland, vormt hierop een uitzondering! In het ontwerp heeft de architect de verschil-

Woontoren Montevideo zet Hotel New York letterlijk in de schaduw. Links nog net zichtbaar de toren van Foster.

lende programma's vertaald in zones. De flexibiliteitsbehoefte bleek per zone sterk verschillend. Zo zouden de bovenste appartementen in de toren (de zogenoemde 'Sky appartementen') een volledig flexibele structuur moeten hebben. De zone hieronder mocht, met veel gefixeerde wooneenheden, vast ingedeeld worden. Architectonisch gezien, verspringt hier het volume van de toren ten opzichte van de onderbouw. De onderste lagen moesten, vanwege de entree van de woningen, de retail ruimten en de kantoren, weer een open flexibele structuur hebben. Bovendien moest de totale structuur direct worden afgestemd op de onderliggende twee parkeerlagen.
Bij het constructieve ontwerp van de toren is de volgende aanpak gevolgd:

- het gebouw is opgedeeld in een viertal zones;
- de verschillende zones mochten hun eigen karakter hebben;
- de constructies moesten naadloos op elkaar aansluiten;
- er zijn vier stabiliteitsprincipes in het ontwerp verweven:
  - een systeem van wanden en kolommen in de kelder;
  - geschoorde constructies op de onderste lagen boven maaiveld;
  - een zone met meer gesloten wandliggers;
  - een open 'gevelbuis' constructie voor de bovenste zone van het gebouw;
- excentriciteiten en constructieve overgangsconstructies zijn geoptimaliseerd.



Constructieve schets van Walter Spangenberg.

Een praktisch probleem vormde de excentriciteit van de toren in de bouwfase. In de afgebouwde situatie komt het zwaartepunt van de palen overeen met het zwaartepunt van de belastingen. Tijdens de bouwsituatie is dit niet het geval. Uiteindelijk is besloten het gebouw bij aanvang van de bouw hoger op te zetten, maar zonder scheefstand te bouwen.

Hybridisch gebouw

Bij dit gebouw is sprake van een ultiem hybridisch gebouw, dat inspeelt op de gewenste functiestapeling en de gevraagde mate van flexibiliteit. Uitvoeringstechnisch gezien, is het merkbaar dat aannemers geen voorstander zijn van een hybridische wijze van bouwen. Daarom is besloten de hybridische bouwwijze met de zonnering mee te laten lopen. De wanden en kolommen in de kelder en de zone met massieve wanden (wandliggers) zijn hoofdzakelijk uitgevoerd in beton. De eerste lagen juist boven maaiveld en het bovenste gedeelte van de toren is ontworpen als staalconstructie.

Ontwerptechnisch bestond het idee om de woningen met de zware betonwanden uit te voeren met behulp van een tunnelkist. Tot ongeveer 100 m hoogte is dat normaal gesproken, economisch gezien, goed mogelijk. Bij toepassing van een tunnelkist zijn er wel technische problemen. De wanden van Montevideo moesten bijvoorbeeld in een hogere betonkwaliteit worden uitgevoerd dan de vloeren. Daarnaast zouden de wanden onderin de toren bij voorkeur dikker moeten zijn. Aannemer Besix werd tijdens het definitief ontwerp in het bouwteam-traject betrokken. Nadat ABT en Mecanoo een toelichting aan deze aannemer op het ontwerp hadden gegeven, kwam Besix met het voorstel de wanden van de toren uit te voeren met een klimbekisting. Alle nadelen van de tunnelbekisting waren hiermee vervallen. Het grootste voordeel van de klimbekisting was volgens Besix het niet meer afhankelijk zijn van de wind en een beperking van de kraaninzet. Als ontwerpers waren we aangenaam verrast door deze inbreng. Te vaak wordt de inbreng in een bouwteam beheerst door een afremmende houding. Deze inbreng was gericht op het denken in mogelijkheden en oplossingen in plaats van het denken in problemen.

De plint en de cantilever

De aandacht bij Montevideo wordt sterk getrokken door de hoogbouw. De plint (het deel tussen de hoogbouw en het uitkragende bouwvolume, de cantilever), is een minder opvallend onderdeel van het gebouw. Dit bouwdeel bevat de kantoren, bergingen voor de woningen en de healthclub. Getracht is om de constructie in dit deel binnen een ordentelijk grid op te lossen. Dat heeft geresulteerd in een regelmatige kolommenstructuur met op de bergingslaag een aantal overgangswanden. De stabiliteit wordt verzorgd door

Met het plaatsen van de grote M – een open staalconstructie van 8 m hoog en een gewicht van 9 ton – heeft het gebouw zijn hoogste punt van 152,317 m bereikt. De M vormt als windwijzer het beeldmerk van Montevideo en steekt trots boven de skyline van Rotterdam uit. De watertank van de kunstenares Ineke Hauer op het lagergelegen dak maakt het Holland-Amerikagevoel compleet.

een horizontale koppeling te maken met de toren en de cantilever.
De cantilever mag ook bijzonder genoemd worden. De constructie bestaat uit een combinatie van geschoorde staalconstructies op de begane grond en uitkragende wanden op de verdiepingen.
In het eerste ontwerp voor de uitkraging werden de belastingen uit de verdiepingen met stalen V-verbanden naar achteren gebracht. Hoewel dit een vrijere ruimte opleverde onder de uitkraging op de kade, had dit consequenties voor de zichtbaarheid van de constructies in de woningen, de gevelindeling en de maakbaarheid van de constructie.
Uiteindelijk bleek een geschoorde constructie op de begane grond, die tot buiten het gebouw doorloopt en daarmee de uitkraging beperkt, de beste oplossing. De wanden bovenop de geschoorde staalconstructie zijn op een aantal verdiepingen voorzien van een trekband. Alleen voor de uitvoering van de eerste verdiepingen is een stempelconstructie op de kademuur aangebracht. Met een uitgekiende fasering was het voor de aannemer mogelijk de stempeling zo snel mogelijk weer te verwijderen om de betonwanden vervolgens zichzelf te laten dragen.

De impact van 11 september 2001

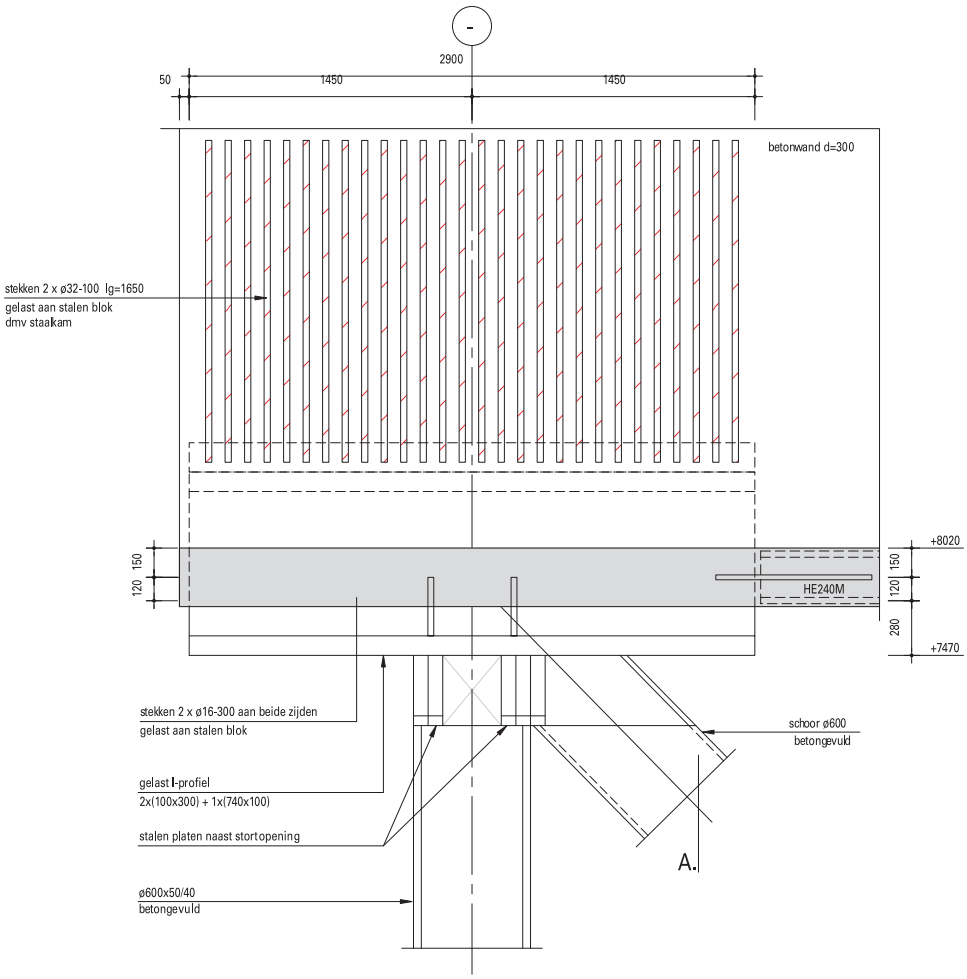
Gedurende het ontwerpproces leidde de ramp met de Twin Towers in New York tot een discussie in het ontwerpteam. In hoeverre kun je een hoog gebouw beschermen tegen uiteenlopende calamiteiten?
Dit heeft geresulteerd in een veiligheidsfilosofie voor Montevideo. Montevideo werd door ons niet bestempeld als een direct gevoelig gebouw voor terroristische aanslagen. Het gebouw is dan ook niet berekend op de impact van een vliegtuig. Wel zijn er voor onderdelen van het gebouw tweede draagwegen gecreëerd. Zo zijn de toren en de cantilever bestand tegen het wegvallen van een kolom of diagonaal uit de geschoorde staalconstructie op de begane grond of in de parkeergarage. De stalen kokerprofielen op de begane grond zijn bovendien voorzien van enige extra capaciteit door ze te vullen met beton.

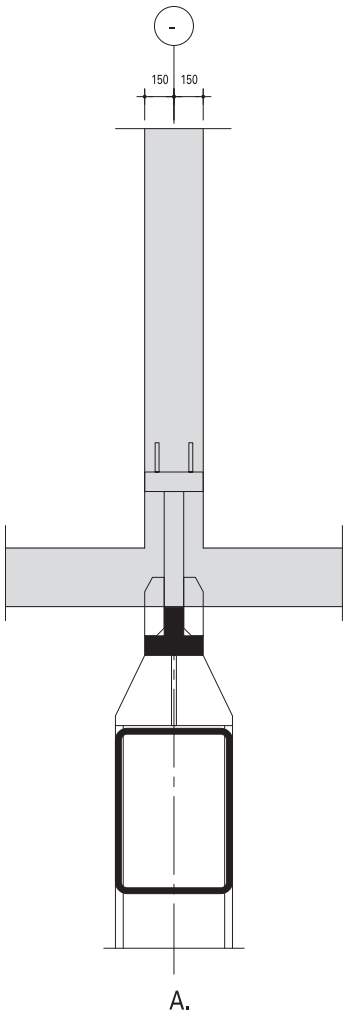
Innovatieve stapelingen

Voor de toren van Montevideo is een uniek hybridisch systeem ontworpen waarin meteen de architectonische verspringing in de verticale geometrie is meegenomen. Voor het constructief ontwerp zijn drie bekende constructieve principes samengevoegd: een geschoorde staal-betonconstructie, dragende betonwanden en een staalskelet voorzien van een 'gevelbuisstructuur'. Deze systemen werken als hoofddraagconstructie en stabiliteitssysteem over de hoogte met elkaar samen. Dit vraagt wel de nodige aandacht voor de onderlinge aansluiting van de systemen.
In de parkeergarage wordt de basis voor de toren gelegd door toepassing van zware staalbetonkolommen. De constructie van de begane grond tot en met de tweede verdieping bestaat uit een geschoorde constructie van verticale en diagonale, met beton gevulde, stalen kolommen. Deze werken samen met een centraal in de toren geplaatste betonnen kern. Er is hier voor deze oplossing gekozen vanwege de gewenste vrije indeelbaarheid van de entrees van de woningen en de commerciële ruimten op de begane grond.
De constructie van de 26 erboven gelegen verdiepingen bestaat uit dragende betonwanden met daartussen in het werk gestorte betonvloeren. Deze verdiepingen zijn voor de 'vast ingedeelde' woningen. De aannemer heeft voor deze wanden gebruik gemaakt van een klimbekisting waarmee één verdieping per vier werkdagen kon worden gemaakt. De betonvloeren zijn vervolgens tussen de wanden ingestort. De achtentwintigste verdieping van de toren, de bovenste laag van dit constructiedeel, is uitgevoerd als installatieverdieping. Door het ontbreken van een stopplaats voor liften wordt deze laag de '27A verdieping' genoemd. Verdieping 27A biedt plaats aan stalen overgangsconstructies die de bovenliggende staalconstructie – die enigszins verschoven is aangebracht – moeten dragen.

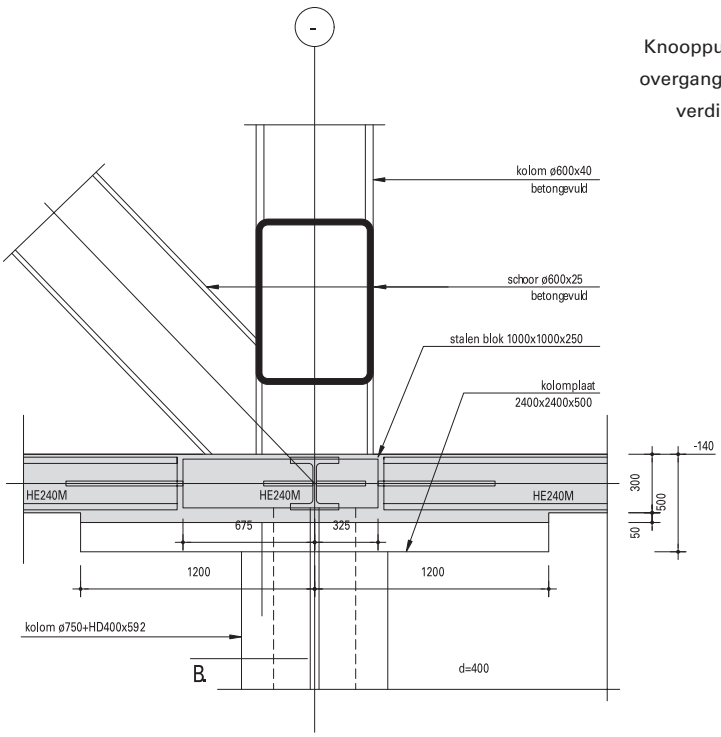
Open staalstructuur

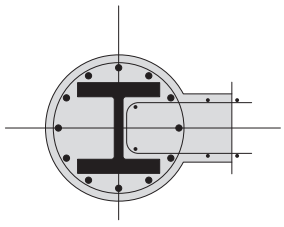
De hoofddraagconstructie van de 29ste tot en met de 43ste verdieping bestaat uit een open staalstructuur. Het sleutelwoord voor deze verdiepingen was 'maximale flexibiliteit'. Een beoogde koper van een woning moet niet alleen de grootte van de woning, maar ook de complete indeling ervan zelf kunnen bepalen.





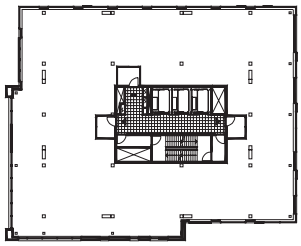
Knooppunten bij overgangsniveau verdieping 2.





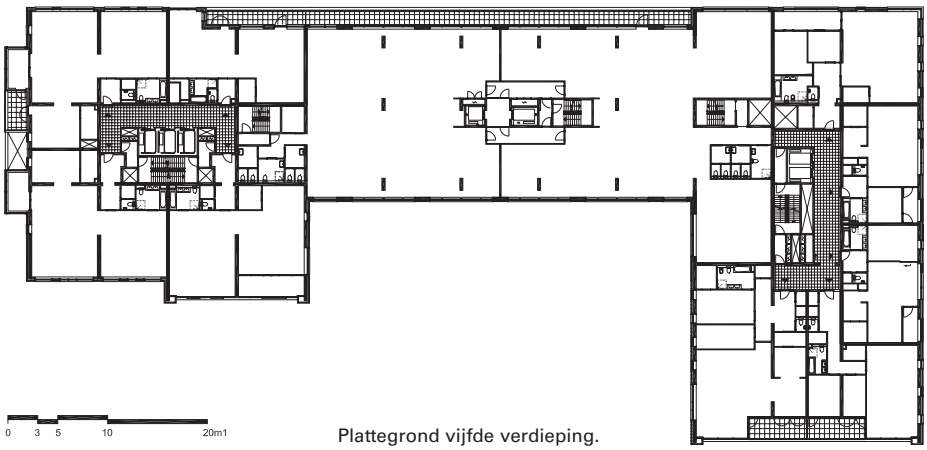
Details van het knooppunt bij de overgang op de tweede verdieping.

Het overgangsniveau op verdieping 27A.



Plattegrond dertigste verdieping ('Sky-appartementen').

De 'Sky-appartementen' worden casco geleverd.



Plattegrond vijfde verdieping.

Het skelet bestaat daarom uit stalen kolommen en stalen vloerliggers met een maximale 'openheid'. De stabiliteit wordt verkregen uit een stalen 'gevelbuisconstructie' die zich net achter de gevel bevindt.
Voor de vloeren zijn op deze verdiepingen breedplaatvloeren toegepast, die zijn opgelegd op de onderflenzen van HE-profielen. Dit was mogelijk omdat voor de sprinklerleidingen en de ventilatiekanalen een bouwkundig verlaagd plafond sowieso noodzakelijk was.

Torderende windbelasting

Bij de cantilever is voor de aanzet in de kelder dezelfde oplossing gekozen als bij de woontoren. Ook daar is – aan de kadezijde – voor zware staal-betonkolommen gekozen. Op de begane grond gaat de constructie over in verticale en diagonale stalen kolommen die zijn gevuld met beton. Deze kolommen zijn geplaatst in de richting van de uitkraging.
De stalen profielen werken samen met een kernconstructie van betonnen wanden die is geplaatst in het midden van de cantilever.
Om de torderende windbelasting op de uitkraging in de constructie op te nemen, is een extra stalen windbok op de begane grond aan de constructie toegevoegd.
Op de tweede en derde verdieping vindt de overgang plaats naar de betonnen wanden van de bovenbouw. Deze betonnen wandliggers zijn in combinatie met massieve betonnen vloeren tot het dak toe door gezet.

Twee constructieve overgangsniveaus: verdieping 27A

De innovatieve stapeling van constructiesystemen maakt dat er in de woontoren twee zeer belangrijke overgangsniveaus ontstaan: de tweede verdieping en de 27A verdieping. Op deze verdiepingen is sprake van een wisseling van het constructiesysteem. Dit gaat gepaard met enorme geconcentreerde krachten die oplopen tot ruim 30.000 kN!
De installatieverdieping op niveau 27A vormt de overgang tussen de stalen top van de woontoren en het betonskelet van de lager gelegen verdiepingen. Op deze laag komt de techniek in de vorm van installaties en overgangsconstructies bij elkaar samen.
De hoogste verdiepingen van de toren zijn opgebouwd uit een staalskelet met breedplaatvloeren. In de gevelbuis bevinden zich kolommen variërend van HE 280M/ HE 300B tot HE 300A profielen. Hoewel de stalen top geometrisch verschoven staat ten opzichte van de onderbouw, zijn alle kolommen van de bovenbouw op betonwanden geplaatst. Dat geldt niet voor een aantal gevelkolommen. Door toepassing van een aantal speciale vakwerkliggers dragen deze kolommen hun belasting af naar de betonwanden.
De plaats van de installaties en het verloop van de kanalen is afgestemd op de vorm van deze vakwerkliggers. Door de excentriciteit van de stalen bovenbouw worden de kolommen enigszins ongelijkmatig belast. De maximaal over te dragen verticale belasting op de betonwand op dit niveau bedraagt ongeveer 9.700 kN.
De inleiding van deze krachten moest zorgvuldig gebeuren om te voorkomen dat de beton bij de oplegpunten zou worden verbrijzeld. Om de belastingen in de staalconstructie te spreiden, is er gebruik gemaakt van stalen blokken onder de kolommen. De blokken zijn voorzien van aangelaste wapening om het effect van de ongelijkmatige drukverdeling onder de profielen op te vangen. De blokken hebben een maximale lengte van 1200 mm en zijn 300 mm hoog.
Niet alleen verticale belastingen, maar ook horizontale belastingen moeten worden afgedragen uit de stalen bovenbouw, op de betonwanden. Deze overdracht van krachten vindt voornamelijk plaats in de vloer van niveau 28. Deze vloer is de onderrand van de gevelbuis. Aan de horizontale liggers van de gevelbuis is wapening gelast om de belasting in te leiden in de betonvloer. Door het aanbrengen van trekbanden in de vloer functioneert de vloer als horizontale stabiliteitsschijf.

Twee constructieve overgangsniveaus: verdieping 2

Daar waar op niveau 27A geconcentreerde belastingen aangrijpen op een betonwand, gebeurt op de tweede verdieping precies het omgekeerde. In plaats van een geconcentreerde belasting bevindt zich hier een geconcentreerde oplegging onder de betonwand. Alleen de wanden bij de kern in het midden van het gebouw lopen als wand door naar de kelder.

Aansluiting luifel op kolom aan de voet van de toren.

Stalen windbok tegen torderen (cantilever).

Constructie in het zicht in het penthouse.

Projectgegevens

Ontwerp 1999 - 2002 • *Uitvoering* 2003 - 2005 • *Opdrachtgever* ING Real Estate, Den Haag • *Architect* Mecanoo architecten, Delft • *Constructeur* ABT, Delft • *Installatieadviseur* Schreuder Groep, Heerhugowaard • *Adviseur bouwfysica* Adviesbureau Peutz & Associes, Zoetermeer • *Aannemer* Besix, Brussel • *Bruto vloeroppervlak* 57.530 m^2, waarvan wonen 36.867 m^2, zwembad, fitness en serviceruimten 905 m^2, kantoren 6.129 m^2, retail 1.608 m^2 en parkeergarage 8.413 m^2

Het principe van de krachtswerking is vergelijkbaar met niveau 27^A: de krachten moeten worden gespreid om de beton niet te doen splijten. De optredende krachten op dit niveau zijn wel ongeveer drie keer zo hoog als op de installatieverdieping. Hier moeten dan ook 26 (betonnen) verdiepingen meer gedragen worden.
De maximaal in te leiden kracht op niveau 2 bedraagt ongeveer 32.000 kN. Ondanks de toepassing van betonkwaliteit B65 zijn hiervoor grote stalen I-profielen nodig. De I-profielen, kwaliteit S355, zijn samengesteld uit flenzen en lijfplaten van 100 mm dikte, de hoogte van de profielen bedraagt 940 mm en de profielen zijn maximaal 2900 mm lang.
Voor de afdracht van horizontale belastingen vanuit de betonwanden naar de schoren van de staalconstructie is gebruik gemaakt van ingestorte profielen. Door middel van aangelaste wapening en aangelaste deuvels worden de horizontale belastingen overgedragen naar de vloer van de tweede verdieping. Deze zelfde vloer moet verticaal wel gekoppeld blijven met de bovenliggende betonwanden. Ook hiervoor is wapening aan de stalen liggers gelast. In het werk zagen deze liggers eruit als ware stekelvarkens. Via de vloer kunnen de horizontale belastingen oversteken naar de stabiliteitselementen van de zware staal-betonconstructie op de begane grond.

Verticale koppelingen bij cantilever

Vanaf de kade is de ondersteunende staalconstructie van de cantilever goed zichtbaar. De zware stalen kokerprofielen dragen de betonnen wandliggers op de verdiepingen. Ook hier vindt de inleiding van spanningen in de stalen diagonalen plaats door de toepassing van grote I-liggers in het beton.
De horizontale krachtscomponent wordt met behulp van zware trekwapening in de betonwanden verankerd tot achter de laatste kolom. De uitvoerbaarheid hiervan lag erg kritisch omdat de dikte van de betonwand maar 300 mm bedraagt!
De details van de verbindingen vertonen sterke overeenkomsten met de detaillering van de woontoren. Sommige details zijn zelfs nog zwaarder uitgevoerd als gevolg van de koppeling met omliggende wanden en vloeren.

Naar een hoger plan

Montevideo is een gebouw waarbij de constructieve samenwerking tussen de materialen staal en beton naar een hoger plan is getild. Gezien de steeds fraaiere architectonische ontwerpen en de vraag naar meer flexibiliteit zal het hier in de toekomst zeker niet bij blijven. Uit de samenwerking met de aannemer, zoals deze in bouwteamverband bij dit project heeft plaatsgevonden, blijkt dat ook de aannemerij steeds meer open staat om een dergelijk complex hybridisch project op een inventieve manier aan te pakken. •

Monteren van de geschoorde constructie onder de toren.

Knoop bij de aanzet van de staalconstructie.

De staalconstructie van de liftschacht.

Beproeven laswerk

De overdracht van krachten tussen de constructiestaal en gewapend beton vindt bij Montevideo veelvuldig plaats. Het meest opvallend zijn de zware samengestelde blokken die zijn toegepast op de overgangsverdiepingen van de toren en de cantilever om de verticale belastingen over te dragen. Maar ook voor de horizontale krachtsoverdracht zijn stalen liggers ingestort in de betonvloeren. Aan al deze stalen verbindingselementen is wapening gelast in verschillende diameters. Dat varieert van wapeningsstaven ø 16 mm tot ø 40 mm!
Deze lassen kunnen niet door elke lasser worden aangebracht, dat verlangt toch een zekere expertise. De hoge kwaliteit van het wapeningsstaal kan door een verkeerde manier van lassen namelijk nadelig worden beïnvloed. Omdat geen duidelijke regelgeving bestaat met betrekking tot de gelaste verbinding tussen wapeningsstaal en constructiestaal is een aantal jaren geleden de praktijkrichtlijn NPR 2053 opgesteld. Deze praktijkrichtlijn geeft aan hoe de koppeling moet worden ontworpen en hoe de verbinding moet worden uitgevoerd. Deze richtlijn is bij Montevideo in het bestek van kracht verklaard.
Omdat er nog geen opleiding tot gekwalificeerde lassers voor dit soort verbindingen bestaat, schrijft de richtlijn voor dat de aannemer van iedere type verbinding die wordt toegepast

minimaal drie proeven moet uitvoeren. Dit is bij Montevideo gebeurd. Van alle type verbindingen - en dat zijn er bij Montevideo gezien de variatie aan wapeningsdiameters en plaatdikten heel wat – zijn proefstukken gelast. Deze zijn vervolgens op een trekbank in een laboratorium beproefd. Op bijgaande foto zijn twee proefstukken te zien. Tot tevredenheid van alle betrokken partijen bleek de gelaste verbinding in alle gevallen ruim te voldoen aan de sterkte-eisen. De staven bezweken niet op de las maar snoerden in bij een spanning van circa 560 N/mm^2. De kwaliteit was hiermee verzekerd.