

1



auteurs



ING. FREEK SCHAAP
RC

Projectleider Constructie
**BAM Advies
& Engineering**



**IR. JORIS
HESELINK PMSE**

Adviseur Constructie en
Bouwmethodieken
**BAM Advies
& Engineering**



Zalmhaven: hoogste woontoren van de Benelux

**Snel naar grote hoogte dankzij uitvoering
met prefab beton en hijsloods**

Op steenworp afstand van de Erasmusbrug in Rotterdam wordt hard gewerkt aan de bouw van De Zalmhaven: twee woontorens van elk 70 m en een van 215 m hoog. Het wordt daarmee het hoogste woongebouw van de Benelux. Het project is grotendeels uitgevoerd in prefab beton, aangebracht met behulp van een indrukwekkende hijsloods.

De *high-rise* van De Zalmhaven (215 m) heeft een footprint van circa 35 × 35 m² en wordt 61 verdiepingen hoog. De toren bestaat voornamelijk uit woningen. In de plint zijn de entree, een aantal kantoren, een gym en vier lagen met bergingen voorzien. Vanaf de 5e tot en met de 56e verdieping bevinden zich de woonlagen. Op de 57e en 58e verdieping (ca. 179 m+ en 183 m+) is het panoramarestaurant gesitueerd. Vanaf hier springt de contour van de toren naar binnen. In de bovenste drie smallere lagen zijn techniekruimten voorzien. De dakvloer ligt op circa 202 m+ en een naald van 13 m maakt de toren af tot 215 m+.

Naast de *high-rise* zijn er in het complex nog twee *mid-rise*-torens van 70 m hoog en verschillende stadswoningen gesitueerd. Tussen de stadswoningen aan de buitenzij-

den is de parkeergarage geplaatst met daarboven op een grote gemeenschappelijke daktuin. Het totale vloeroppervlak bedraagt 15.500 m².

Constructief ontwerp *high-rise*

De toren is opgebouwd uit betonnen woning-scheidende wanden en een dragende gevel. In de onderbouw zijn gevelkolommen voorzien. In het oorspronkelijke ontwerp werd uitgegaan van een volledig in het werk gestorte betonconstructie met massieve wanden en vloeren voor de gehele toren (zie ook *Cement*-artikel 'Hoogtepunt voor binnenstedelijke woningbouw' van Zonneveld Ingenieurs). Vanwege de bouwveiligheid en de bouwsnelheid is voor de bovenbouw vanaf de vijfde verdieping gekozen voor een skelet van prefab beton. De onderste vijf lagen zijn in het werk gestort beton gebleven (fig. 3, 4 en 5).



PROJECTGEGEVENS

project

De Zalmhaven

opdrachtgever

Zalmhaven CV

(AM b.v. en Amvest

Vastgoed b.v.)

aannemer

BAM Bouw en Techniek

Grote projecten, Bunnik

architect 'high-rise'

Dam & Partners

Architecten, Amsterdam

architect 'mid-rise'

KAAN Architecten,

Rotterdam

ontwerpend

constructeur

Zonneveld ingenieurs

b.v., Rotterdam

coördinerend

constructeur

BAM Advies &

Engineering, Bunnik

toetsend constructeur

Van Rossum Rotterdam

geotechnisch adviseur

Geobest, Vianen

leverancier prefab

Byldis, Veldhoven

leverancier hijsloods

Civiele Technieken

deBoer, Nieuwegein

installatieadviseur

Techniplan Adviseurs b.v.,

Rotterdam

bouwfysisch adviseur

Peutz b.v., Zoetermeer

opleverdatum

maart 2022

Om zo weinig mogelijk hijsbewegingen en elementverbindingen te krijgen, is gezocht naar zo groot mogelijke wandelementen



Aanpassing ontwerp De constructieve haalbaarheid van de omzetting naar prefab beton is in de prijsvormingsfase in nauw overleg tussen Zonneveld, BAM Advies & Engineering en Byldis onderzocht. Van de maatgevende penanten, lateien en natte knopen zijn berekeningen gemaakt om de hoeveelheid wapening te bepalen en de passing te garanderen. Dit heeft geleid tot het verdikken van de prefab gevelwanden van 300 naar 400 mm op de 5e t/m 8e verdieping.

Vanwege de krachtsafdracht en ten behoeve van de stijfheid wordt het merendeel van de betonwanden gekoppeld door middel van natte knopen. Dit zorgde voor een complexe puzzel van elementindelingen en wapeningsknopen (fig. 5). Om zo weinig mogelijk hijsbewegingen en elementverbindingen te krijgen, is gezocht naar zo groot mogelijke wandelementen. Het uitgangspunt hierbij was de maximale hijscapaciteit van

de bovenloopkraan van circa 35 ton. Op de standaardverdiepingen resulteerde dat in een maximale wandlengte van 13,9 m bij een wandhoogte van 2,76 m.

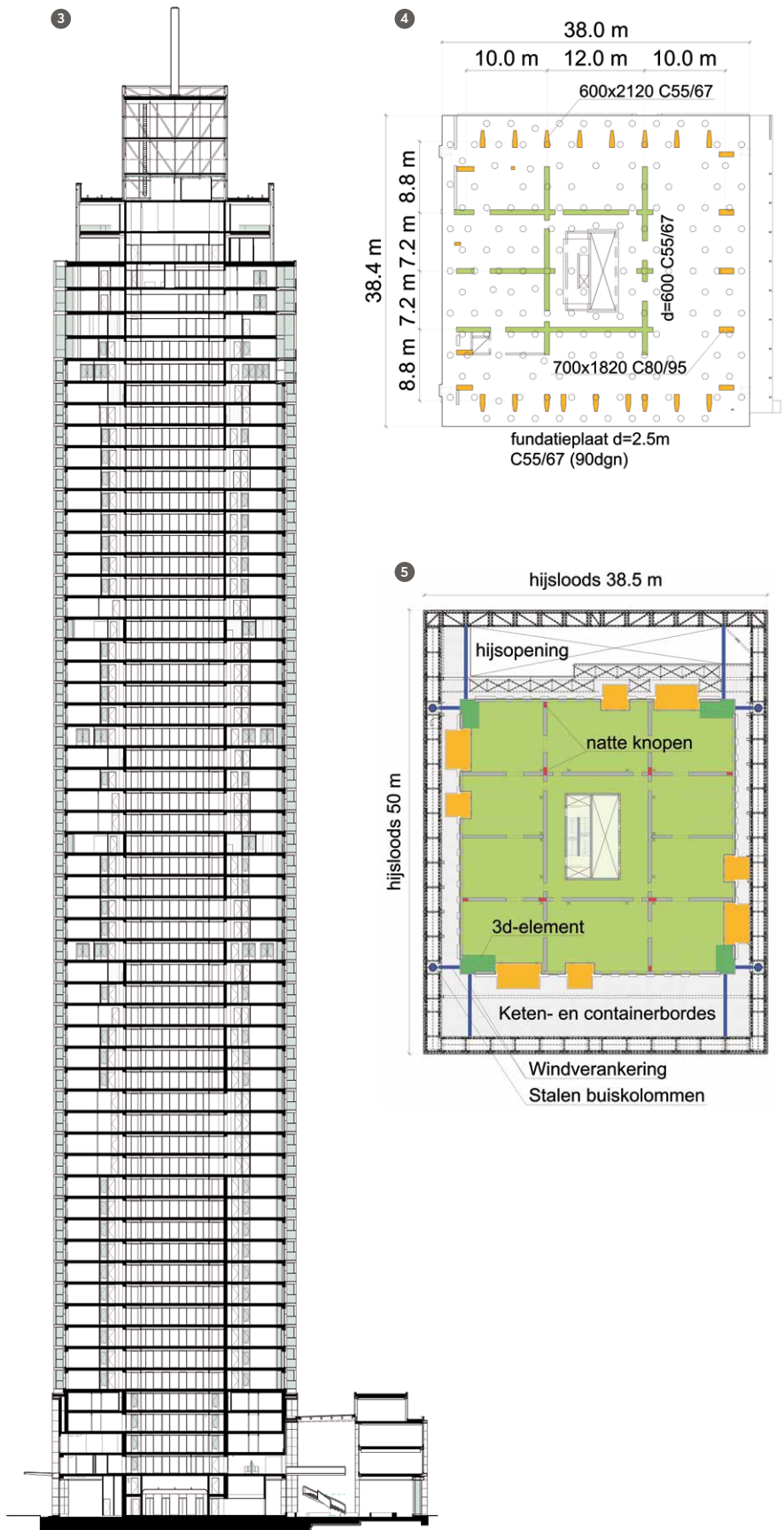
Oorspronkelijk was het het idee de prefab wanden op elkaar door te stapelen, waarbij de vloeren tussen de wanden in zouden worden gestort. De vloeren zouden daarbij met stekkenbakken aan de wanden worden gekoppeld. Uiteindelijk is besloten de prefab wanden te verlagen en de vloeren over de wanden heen te storten. Dit betekent wel dat de vloeren nu ook in een hoge betonsterkteklasse (C55/67) moeten worden gestort, maar het scheelt kilometers stekkenbak uitbuigen en het levert ook een robuuster detail op.

Gevel De gevelelementen worden in de fabriek van de leverancier samengesteld. Aan het prefab binnenspouwblad wordt het natuursteen inclusief isolatie bevestigd. Ook



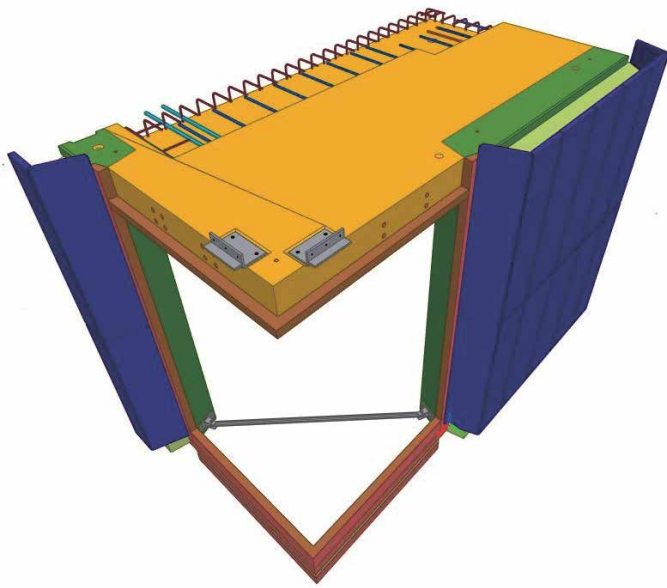
de beglaasde kozijnen worden al bij de prefab leverancier in het element geplaatst. De elementen worden *just in time* geleverd op de bouwplaats en direct geplaatst op de juiste locatie in het gebouw. Er zijn hierna geen handelingen meer nodig aan de buitenkant van het gebouw zodat een gevelsteiger achterwege kan blijven.

Hoekaansluitingen Om vanuit de woonkamers van de appartementen vrij uitzicht te creëren, zijn hoekkozijnen ontworpen. Er mochten hier geen kolommen of dragende elementen aanwezig zijn. Een hoekaansluiting van twee kozijnen in twee prefab elementen was niet mogelijk vanwege de maatafwijkingen en toleranties. Als oplossing is door de prefab gevelleverancier een 3D-element gemaakt, waarbij twee loodrecht op elkaar staande penanten en een stuk vloer in één keer worden geprefabriceerd. Op deze manier ontstaat er een vorm-

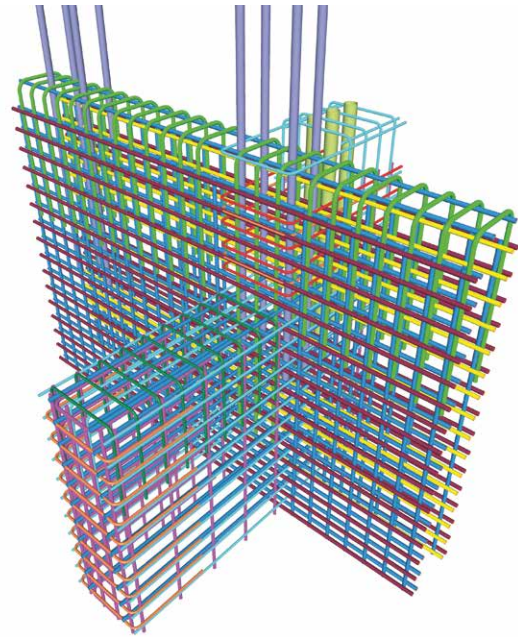


3 Doorsnede Zalmhaventoren
 4 Plattegrond onderbouw
 5 Plattegrond bovenbouw met hysloods

6



7



Voor de hoeken zijn 3D-elementen gemaakt, waarbij twee loodrecht op elkaar staande penanten en een stuk vloer in één keer worden geprefabriceerd

vast geheel waar de hoekkozijnen wel van tevoren gemonteerd kunnen worden (fig. 6).

Fundering

De basis van de toren ligt op NAP -65 m (66 m onder maaiveld). Tot op dit niveau zijn 163 Tubex-groutinjectionpalen geboord, een trillingsvrij, grondverdringend systeem met permanente stalen buis. De palen hebben een diameter van 762 mm en een punt van Ø950 mm. Ze zijn in twee delen van 33 m aangebracht, waarbij de buizen in het werk aan elkaar zijn gelast. In oktober 2018 is gestart met het boren van de palen, waarna in maart 2019 kon worden gestart met het vlechtwerk voor de funderingspoer.

Onder de toren bevindt zich één grote funderingspoer van $38 \times 38,4 \times 2,5$ m³. Die is in één continue stort in betonkwaliteit C55/67 gerealiseerd. Om ervoor te zorgen dat de warmteontwikkeling binnen de perken bleef en de aantasting door ettringiet wordt voorkomen, is het betonmengsel zorgvuldig samengesteld door de betontechnologen van BAM en Dyckerhoff Basal. Het was een mengsel met een lage temperatuurontwikkeling waarbij de eindsterkte pas na 90 dagen werd bereikt. Daarnaast zijn maatregelen genomen om de schade door een eventuele temperatuurschok te voorkomen.

In de prijsvormingsfase is uitgegaan

van een basisnet met staven Ø32 en Ø40. Bij de nadere uitwerking is gekozen voor een basisnet van 4 lagen Ø25. Bij de grote veldmomenten en ter plaatse van de randpalen is in een 5e en 6e laag bijlegwapening Ø40 toegevoegd. De staven Ø25 zijn vanwege het gewicht handmatig aan te brengen, zodat de (beperkte) kraancapaciteit minder hoeft te worden aangesproken. Bijkomend voordeel is dat de trekbandwapening ter plaatse van de palen hoger komt te liggen, wat positief is voor de CCT-knoopcontrole in het staafwerkmodel.

Onderbouw

Vanwege de hoge krachten in de onderbouw zijn de onderste vijf lagen in het werk gestort beton gebleven. De wanden hebben een dikte van 600 mm en de kolommen hebben afmetingen van 700×1820 mm² en 600×2100 mm². De betonsterkteklasse van de gehele onderbouw is C55/67 op enkele zwaarbelaste kolommen na; deze worden gestort in C80/95. De wanden en kolommen worden gestort in slagen van 6 m hoog, dus twee verdiepingen in één stort. Hierdoor wordt in deze zwaargewapende wanden een grote hoeveelheid wapening bespaard doordat er minder overlappingsen zijn. De breedplaatvloeren op 6, 12 en 18 m+ worden over de wanden gestort in dezelfde betonsterkte-

klasse als de wanden. De breedplaatvloeren op 3, 9 en 15 m+ worden tussen de wanden gestort. Voor de oplegging en verankering zijn hier doorgaande koppelankers meege-nomen in de wanden en kolommen.

Vanwege de belastingsafdracht van de dragende gevel van de bovenbouw naar de kolommenstructuur in de onderbouw is tus-sen de 3e en 5e verdieping een 6 m hoge betonnen wandligger ontworpen van 500 mm dik. Omdat hierdoor een blinde gevel wordt gemaakt, zijn op deze verdiepingen de ber-gingen van de woningen gesitueerd. Verder verzorgt deze wandligger de tweede draag-weg in geval van een calamiteit bij uitval van een kolom op de begane grond.

De wandliggers zijn gewapend met 20 staven Ø40 onderin. Vanwege de grote hoe-veelheid wapening en de knopen bij de kolomstekken en dwarswanden is de wape-ning 3D uitgewerkt, waarbij alle staven en overlappingsen zijn uitgetekend (fig. 7).

Kroon

De bovenste woonlagen waren vanwege de verspringende gevelopbouw ontworpen als staalconstructie en staalplaatbetonvloeren. In het Technisch Ontwerp is de vorm van de kroon vereenvoudigd zodat ook deze vloeren in het werk gestort kunnen worden. Dit komt de robuustheid ten goede en zorgt er ook voor dat de 120 min brandwerende be-handeling van de staalconstructie in een (private) woning kan komen te vervallen. Dit levert een voordeel op voor de gebruiksfase omdat een brandwerende coating periodiek gecontroleerd moet worden, hetgeen nu niet meer van toepassing is.

Rekenmodel

In de DO-fase is voor de ontwerpberekening gebruikgemaakt van SCIA Engineer (door Zonneveld). Bij de uitwerking van gewichts- en stabiliteitsberekeningen is de toren door BAM Advies & Engineering opnieuw opgezet in het programma ETABS. Hierdoor kon het oorspronkelijke rekenmodel worden geveri-fieerd. ETABS wordt wereldwijd veelvuldig ingezet bij de engineering van hoogbouw maar is in Nederland nog relatief onbekend. Het grote voordeel van ETABS is dat het erg goed te benaderen is vanuit andere software

zoals Python. Met eenvoudige scripts kan er veel pre- en postprocessing plaatsvinden. Alle penanten en lateien van De Zalmhaven zijn bijvoorbeeld automatisch op een logi-sche manier gelabeld met in het label de verdieping en het stramien. Bij de uitvoer van de krachten worden deze labels ook weergegeven, zodat snel kan worden gefil-terd op krachten in bijvoorbeeld één speci-fieke latei. Daarnaast kunnen de interfaces tussen de prefab elementen op een eenvou-dige manier worden gemodelleerd. Het na-deel van ETABS is dat de grafische uitvoer niet kan worden weergegeven zoals we in Nederland gewend zijn. Verder kan model-verstrekking voor externe controle niet plaatsvinden omdat partners niet over de-zelfde software beschikken.

Bouwmethodiek

Tijdens de prijsvormingsfase zijn een aantal verschillende ruwbouwssystemen onder-zocht op de aspecten technische haalbaar-heid, veiligheid, bouwtijd en kosten.

Klimbekisting Aangezien de toren was ontworpen als volledig in het werk gestorte betonconstructie, lag een hydraulische klimbekisting voor de wanden in combinatie met breedplaatvloeren voor de hand. Het is een bewezen bouwsysteem waarmee diverse hoogbouwprojecten in binnen- en buiten-land zijn gerealiseerd. Met een bekistingsle-verancier zijn plannen gemaakt en cyclustij-den bekeken. Bij een hoge bouwsnelheid zoals beoogd, zouden de verhardingstijden van de pasgestorte betonwanden maatge-vend worden. De grote krachten op de klimankers, zeker bij hoogbouw waarin de windbelasting aanzienlijk toeneemt in de hoogte, zorgt ervoor dat de betonwanden een bepaalde betondruksterkte en dus verhardingstijd nodig hebben voordat er geklommen kan worden. Extra schoorvoor-zieningen (fig. 8), maatregelen voor versnelde verharding en veiligheid waren nadelige factoren van dit bouwsysteem.

Glijbekisting Naast de klimbekisting is met een andere leverancier een glijbekistingssys-teem onderzocht. Het tempo met de glijbekis-ting is ongeveer 2 m per werkdag van 12 uur.

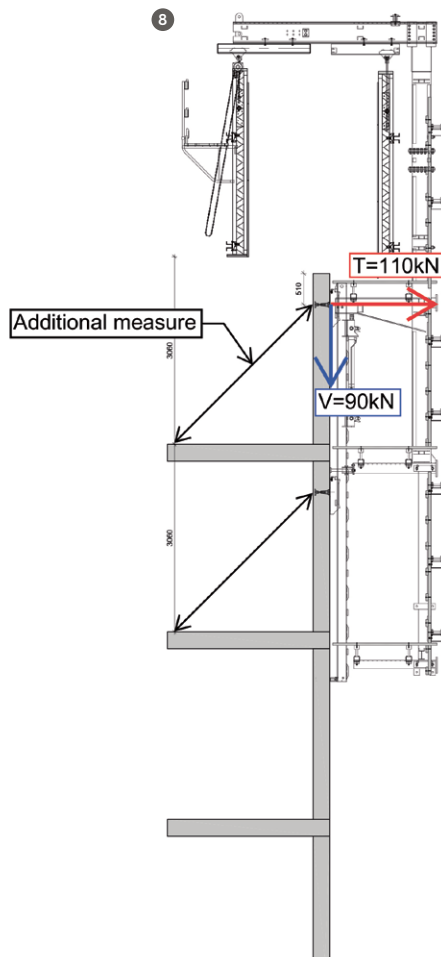
*Voor de poer
is gekozen
voor een
betonmengsel
dat de
eindsterkte
pas na 90
dagen bereikte*

TOETSING

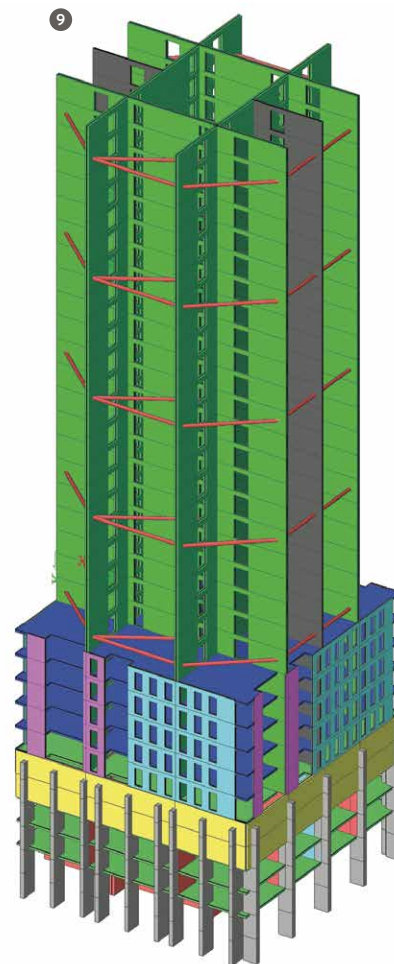
Het beleid binnen BAM schrijft voor dat voor CC3-gebouwen altijd een externe constructeur – die niet eerder betrokken is bij het ontwerp – wordt aangesteld om de zogenoemde CC3-toetsing te verrichten. Hiervoor is bij dit project Van Rossum Rotterdam betrokken. Het ont-werp is getoetst door het WSP Middle East uit Dubai, een bureau met veel buitenlandse hoogbouwervaring. Om waardevolle ontwerp-kennis niet verloren te laten gaan, is ook Zonneveld, in opdracht van Zalmhaven CV, betrokken bij de toetsing van de stukken voordat deze zijn ingediend bij bouw- en woningtoezicht.

HIJSLOODS

Bij toepassing van een hijsloods wordt een fabriekshal op/om het gebouw gemaakt. In deze hal wordt één complete verdieping inclusief gevelsluiting gerealiseerd, waarna de hijsloods een verdieping omhoog wordt gevijzeld en de bouwcyclus van een verdieping opnieuw begint. Deze cyclus herhaalt zich totdat het gebouw op hoogte is. Daarna wordt de hijsloods gedemonteerd, de afbouw afgemaakt en is het gebouw gereed. In de hijsloods bevinden zich twee bovenloopkranen. Eén kraan doet dienst als hijskraan voor verticaal transport door de bouwelementen vanaf maaveld omhoog te hijsen. De tweede kraan is voor het horizontale transport in de hijsloods en doet dienst als montagekraan. De bouwmethode met de hijsloods is van oorsprong een Japanse uitvinding en eerder succesvol toegepast bij de bouw van de Delftse Poort (1989) en Erasmus MC (2013), beide ook in Rotterdam.



Bij zes werkdagen per week kan een tempo van bijna vier bouwlagen per week worden gehaald. Voor de wanden zou het gewenste tempo van één verdieping per week dus ruimschoots worden gehaald. Het probleem bij dit bouwsysteem zit hem dan ook met name in de vloeren en de gevel. Vanwege alle in te storten installaties en het wind- en waterdicht maken van de gevel, zou slechts één hele verdieping per week kunnen worden gehaald. In deze situatie loopt het maken van de wanden te snel vooruit ten opzichte van de vloeren en gevel. Doordat de wanden in de bouwfase wel horizontale windbelasting vangen terwijl er nog weinig verticale belasting aanwezig is, zouden er trekkrachten in de wanden optreden in de bouwfase, terwijl dit in de eindsituatie niet het geval is. Dit zou leiden tot een aanzienlijke verhoging van de hoeveelheid wapening. Verder zou de torenkraan al op een hoog werkniveau moeten staan, terwijl er op een veel lager niveau aan



de vloeren en gevel wordt gewerkt. Het windverlet van de kraan zou aanzienlijk toenemen, wat weer nadelig is voor de planning van de vloerencyclus. Beide problemen hadden voorkomen kunnen worden door de toren in meerdere fasen te glijden, maar dan nog was er het probleem van de stabiliteit in de bouwfase. Het stabiliteitssysteem van het gebouw is geen torsiestijve kokerconstructie, maar bestaat uit uitkragende wanden. Deze wanden, aangeblazen door wind, zijn knikgevoelig, dus zouden zware stalen, tijdelijke schoorvoorzieningen nodig zijn (fig. 9). Dit alles in combinatie met de bouwveiligheid leidde ertoe dat glijden niet ideaal was voor de Zalmhaventoren.

Prefab met hijsloods Naast de in het werk gestorte varianten is een variant met prefab beton bekeken. De verdiepingen bevatten veel repetitie en de dragende gevel leent zich uitstekend voor sandwichelementen, waar-

door prefab een aantrekkelijk bouwsysteem is. In overleg met Byldis zijn elementdelingen voorgesteld en natte knopen ontworpen. Naarmate de elementen groter worden, nemen het aantal delingen en dus het aantal koppelingen af. Echter, de hijsgewichten worden dan groter waardoor een grotere kraancapaciteit nodig is. De in Nederland gangbare torenkranen hebben doorgaans een capaciteit tot ongeveer 20 ton. Het gebruik van een hijsloods (zie kader 'Hijsloods') met bovenloopkranen kan uitkomst bieden.

Bouwveiligheid Afgezien van technische of financiële haalbaarheid van alle bouwsystemen, speelt bouwveiligheid een grote rol. Sinds een dodelijk ongeval in mei 2016 op een project in Den Haag zijn de veiligheidsregels rondom bouwprojecten aangescherpt en is de Richtlijn Bouw- en Sloopveiligheid uitgebracht. Een van de belangrijkste regels uit deze richtlijn is de bepaling van bouwveiligheidszones (BVZ) rondom bouwprojecten. Zie ook het *Cement*-artikel 'Omgevingsveiligheid drukt stempel op uitvoering'. Bij de high-rise van De Zalmhaven was de benodigde BVZ 21 m. Het naastgelegen kantoorpand en een aantal woningen aan de overzijde van de straat vallen vanaf een zekere bouwhoogte binnen de BVZ. Door te werken met een hijsloods worden maatregelen getroffen om te voorkomen dat elementen en kleine objecten kunnen vallen. Dit is een gelijkwaardige oplossing binnen de mogelijkheid die in de Richtlijn Bouw- en Sloopveiligheid wordt gegeven. De hijsloods wordt aan de onderzijde langs de rand van het gebouw afgedicht met houten vlonders en een rubberen slabbe, zodat én veilig gewerkt kan worden op hoogte én de kans op vallen van objecten nihil is. Verder wordt er op een vaste positie gehesen. Bij De Zalmhaven is hier voor de noordzijde van de toren gekozen, op de positie van het parkkantoor. Dit deel is onderdeel van het project en wordt later gebouwd. Op deze manier wordt er altijd binnen de bouwhekken gehesen en zo ver mogelijk van de belendingen en openbaar gebied vandaan. Naast de verhoogde veiligheid zijn de bijkomende voordelen van een hijsloods:

- minder weersverlet;
- betere arbeidsomstandigheden;
- hogere bouwkwiteit.

Keuze: hijsloods De prefab variant met hijsloods bleek uiteindelijk het meest geschikte systeem dat kon voldoen aan de bepalingen zoals gesteld in de Richtlijn Bouw- en Sloopveiligheid. Hoewel het een richtlijn betreft die nog niet wetmatig is voorgeschreven, is de keuze op dit systeem gevallen, mede omdat het in deze situatie ook financieel concurrerend is ten opzichte van de in het werk gestorte varianten.

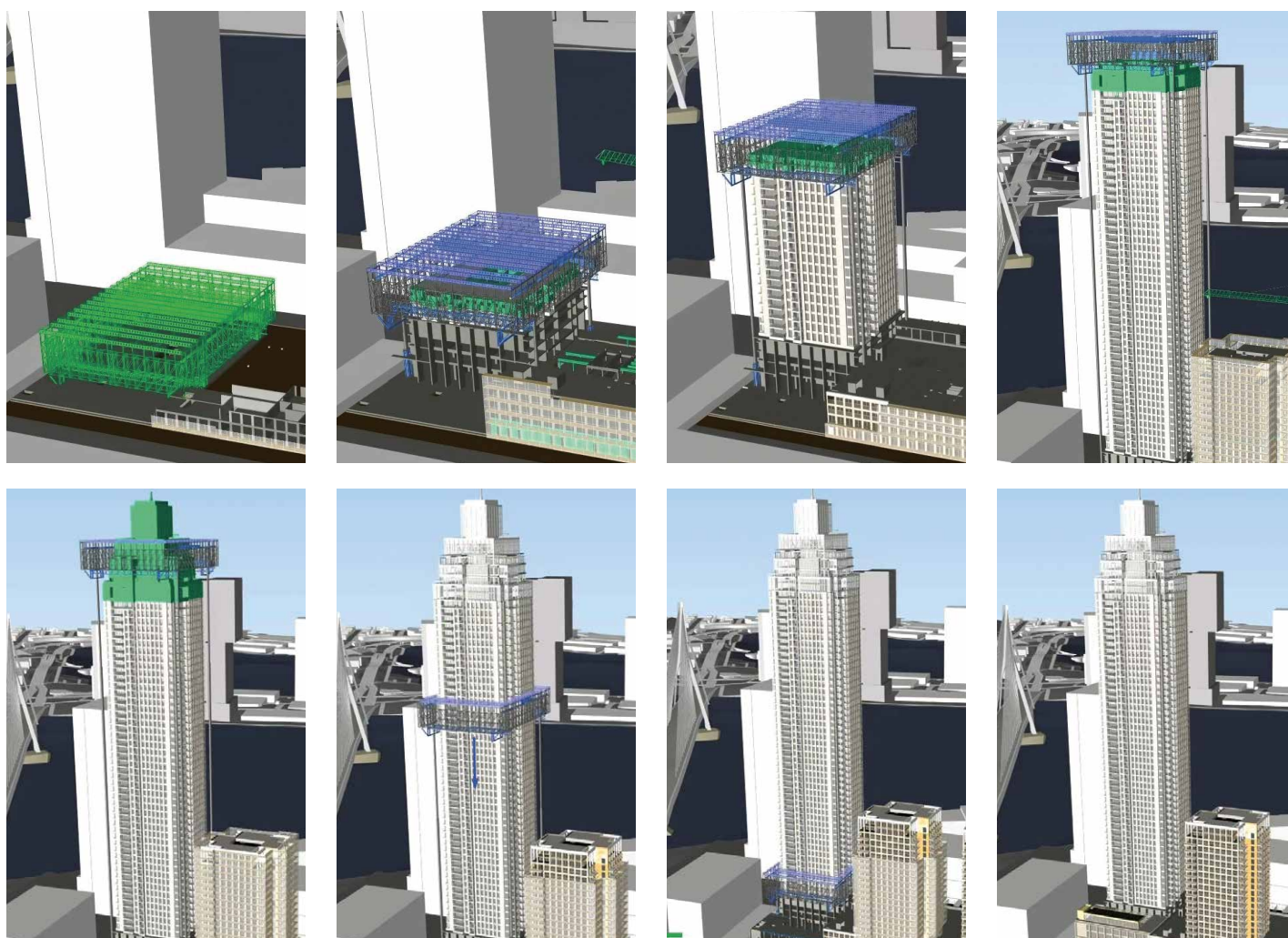
Ontwerp hijsloods

In samenwerking met Civiele Technieken deBoer is een hijsloods van 50 m lang, 38,5 m breed en 12 m hoog ontworpen met twee geïntegreerde 40-tons bovenloopkranen (fig. 5 en foto 1). De hijsloodsen van de Delftse Poort en Erasmus MC klossen beide aan het gebouw. Vanwege de afbouw en de demontage is ervoor gekozen de hijsloods van de Zalmhaventoren op vier grote stalen kolommen ($\text{Ø}813 \times 16 \text{ mm}$) – als een soort offshoreplatform – buiten het gebouw te funderen. De vijzelconstructie (foto 10) staat beneden op de funderingspoer en hier worden telkens stalen kolomdelen met een lengte van ongeveer 6 m toegevoegd. Extra ingenieur aan het systeem is dat de hijsloods modulair is opgebouwd uit standaardsecties. Voor een eventueel volgend hoogbouwproject kan de hijsloods vrij eenvoudig groter of kleiner worden gemaakt.

Verankeringen De horizontale windbelasting wordt direct onder de hijsloods aan het gebouw afgedragen door de zogenoemde 'windvangconstructie'. Dit betreft een zware verankering op de vier hoekpunten van het gebouw in twee richtingen, dus acht posities totaal (fig. 5). Voor de stalen kolommen zijn voorzieningen getroffen om uitknikken te voorkomen, de zogenoemde 'kniksteunen'. Deze voorzieningen worden om de zes verdiepingen (18,36 m) aangebracht. Zowel de windvang als de kniksteunen zijn in verticale richting als glijdende verbindingen uitgevoerd, omdat de hijsloods vanaf beneden wordt gevijzeld.

Vanwege de afbouw en de demontage is gekozen de hijsloods op vier grote stalen kolommen buiten het gebouw te funderen





Demontage Bij Erasmus MC (120 m) is de hijsloods naderhand met een grote en zware mobiele kraan gedemonteerd. Dit is bij de Zalmhaventoren nagenoeg onmogelijk, gezien de hoogte van meer dan 200 m. Omdat de hijsloods op vier tijdelijke kolommen buiten het gebouw is gezet, kan de hijsloods langs het gebouw zakken nadat het gebouw gereed is (fig. 11). Hiervoor moeten eerst de dakplaten en dakliggers worden verwijderd, maar hier is rekening mee gehouden in het ontwerp. Op het niveau van de 6e verdieping wordt de hijsloods gedemonteerd met relatief kleine mobiele kranen.

Kroon De bovenste lagen van het gebouw springen naar binnen. Hier kan de hijsloods geen horizontale steun uit de vloerranden halen. Omdat het dak van de hijsloods

geopend moet worden voor het naar beneden vjzelen, is er bedacht de kroon van het gebouw in een soort jack-blockbouwsysteem uit te voeren. Hierbij wordt eerst de bovenste verdieping gemaakt, waarna deze omhoog wordt gevijzeld. Vervolgens wordt er een verdieping onder gebouwd en worden deze twee verdiepingen omhooggevijseld. Dit herhaalt zich een aantal keer totdat het gebouw op hoogte is.

Opbouw De onderbouw van het gebouw betreft een in het werk gestorte betonconstructie. Deze wordt op traditionele wijze gemaakt met bekistingen en kranen. Om na het gereedkomen van de onderbouw direct te kunnen starten met de prefab bovenbouw, is de hijsloods op beganegrondniveau gemonteerd om de onderbouw heen. Vanaf

hier wordt deze opgevijseld en bij voldoende hoogte worden de bovenloopkranen in gebruik genomen en de dakliggers aangebracht. Vanaf januari 2020 zal worden begonnen met de hijsloods en de prefab bovenbouw.

Tot slot

Over ruim twee jaar, in het voorjaar van 2022, zal de hoogste woontoren van de Benelux en het hoogste prefab-betonnen gebouw ter wereld worden opgeleverd. Sinds de jaren tachtig verrijst het ene na het andere hoogbouwproject in Nederland uit de grond. Niets wijst erop dat deze tendens zal stoppen. Het is dan ook slechts een kwestie van tijd dat de hoogte van de Zalmhaventoren zal worden overtroffen door een ander geweldige hoogbouwtoeren. ●