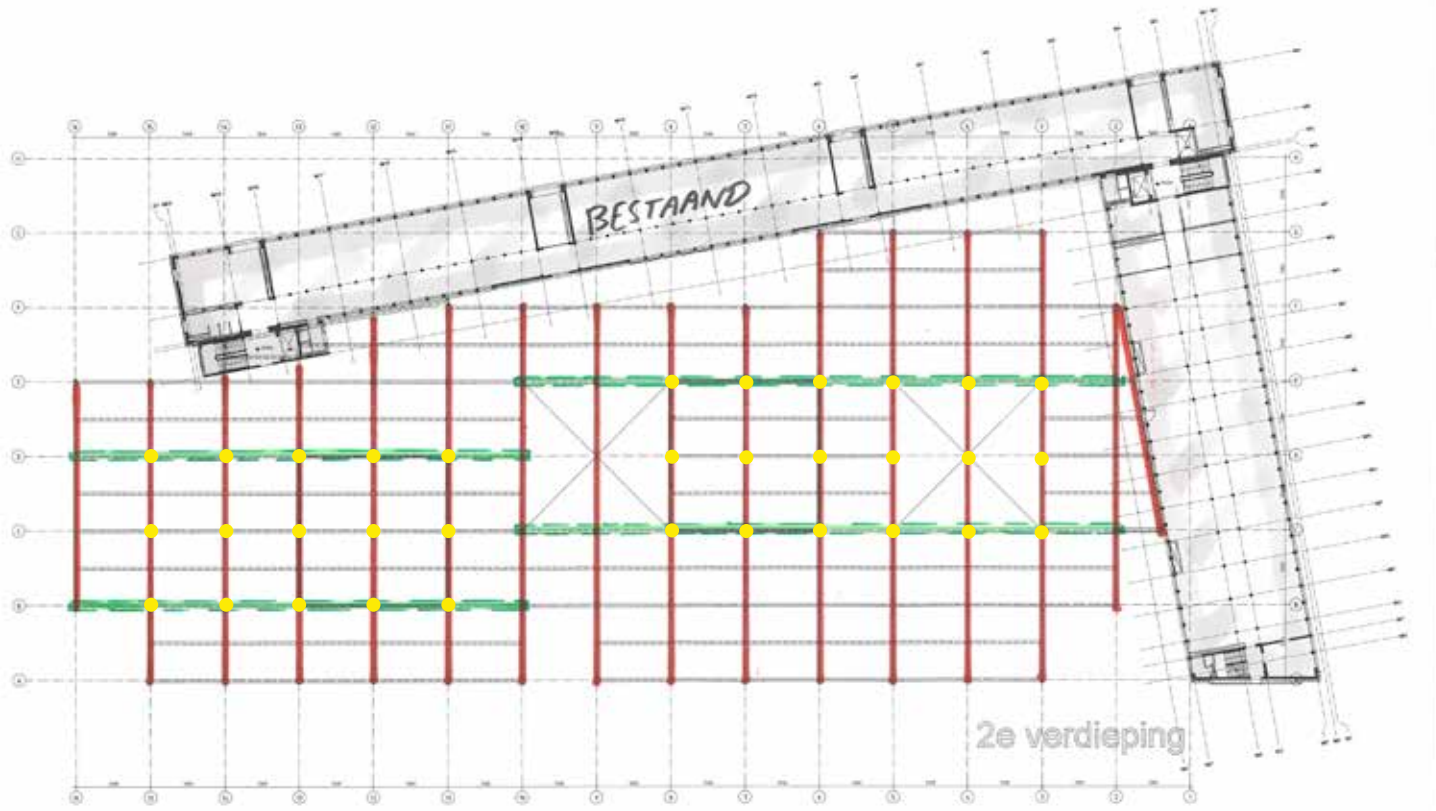
Vakwerk met vierendeelliggers

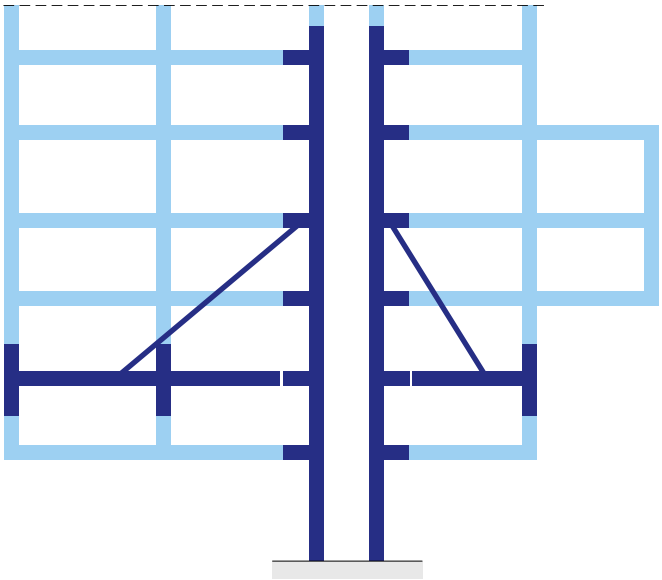
Al vrij snel was duidelijk dat 'de wolk van staal en glas' een bijzonder staalskelet zou krijgen. Opgebouwd met vierendeelliggers die uitkragingen tot wel 20 m bereiken, ging het modulair opgezette Timmerhuis vergezeld van een risicovol ontwerpaspect. Behalve extra toetsing en speciale aandacht voor robuustheid van de hoofdopzet, bleek ook de detailengineering omvangrijk en complex. Onder meer doordat krachten in de knopen bepaald moesten worden uit allerlei belastingsituaties, zoals de uiterste grenstoestand, de montagefase en alle verschillende situaties in een tweede draagweg. Als klap op de vuurpijl is het project volledig stempelvrij uitgevoerd.

ir. R.M.J. Doomen
Rob Doomen is adviseur/directeur Pieters Bouwtechniek in Delft.

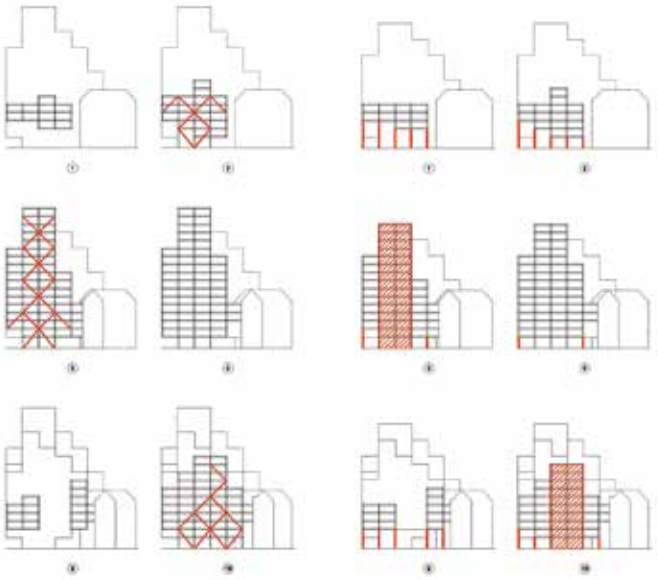
De gevel op de begane grondvloer aan de straatkant is opgebouwd uit warmgebogen isolatieglas, afgesteund op stalen gevelstijlen. De gevel staat onder op het kelderdek en steunt bovenin alleen horizontaal tegen het gebouwskelet. Verticaal is een dilatatie van 50 mm aangehouden.



De vierendeelconstructies (rood), de vakwerkconstructies waarin de vierendeelconstructies zijn opgehangen (groen) en de kolommen die doorlopen tot de begane grond (geel).

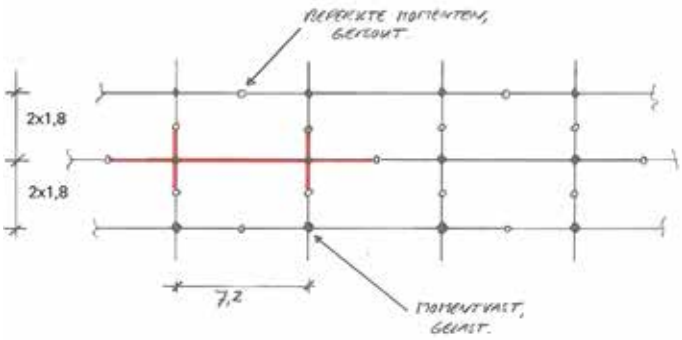


Eerst zijn de kolommen met consoles geplaatst, vervolgens zijn daar de vierendeelliggers ingehangen met een diagonaal montageverband.

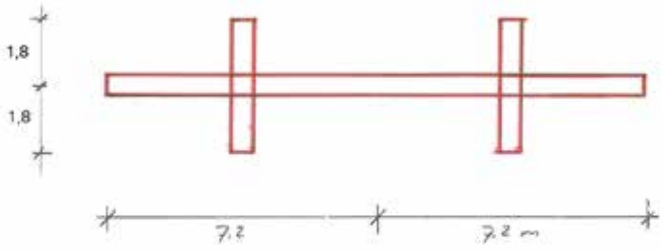


Alternatieve opzet, met één grote stalen kern.

Alternatief, met allemaal kolommen. De betonkernen zijn nu ook van staal.



Grid met inpassing vierendeelliger.



Voor de liggerdimensionering was de stijfheid veelal maatgevend.

De 'pixelberg'. De constructie (3850 ton staal) steunt enkel op kolommen in de twee kernen voor liften en trappenhuizen.

Rotterdam is met het Timmerhuis een karakteristiek gebouw met een bijna ongekende staalconstructie rijker. Het multifunctionele gebouw in het hart van de stad omvat kantoren, een museum, appartementen, winkels en horeca. Het Timmerhuis is een ontwikkeling van de gemeente Rotterdam en kenmerkt zich door een bijzonder ontwerp van glas en staal van architectenbureau OMA.
Het project is een combinatie van het monumentale Stadstimmerhuis en een nieuwbouw die ook wel 'wolk van pixels' wordt genoemd. De pixels zijn in een modulair gebouw gestapeld tot een schijnbaar vormloos geheel. Met deze structuur kon relatief eenvoudig worden ingespeeld op verschillende behoeftes en programma's.
Onderdeel van het complex is het L-vormig, voormalig Stadstimmerhuis, een gemeentelijk monument gebouwd rond 1953, dat geheel gerenoveerd is opgenomen in de nieuwbouw. Het bruto vloeroppervlak van het Timmerhuis bedraagt ± 48.000 m^2.
Op de begane grond vindt het publiek winkels, horeca en Museum Rotterdam. Op de eerste tot en met de vijfde verdieping werken ongeveer 1.800 gemeenteambtenaren. De zesde tot en met de veertiende verdieping tellen 84 appartementen met ruime dakterrassen. Op straatniveau faciliteert de staalconstructie een royale open ruimte. Dit is het middelpunt van het complex, de centrale hal, een tussenliggend gebied dat een actieve betrokkenheid stimuleert tussen het Timmerhuis en de stad.

Staalconstructie

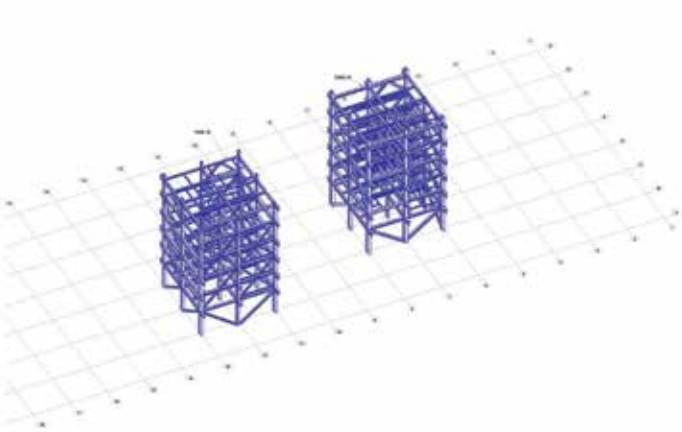
De 'zwevende wolk' wordt overeind gehouden door een robuuste constructie van 3850 ton staal, die uiteindelijk slechts steunt op kolommen in de twee kernen voor liften en trappenhuizen. Grote overspanningen en uitspringende bouwdelen zijn typerend voor het gebouw. De grootste uitkragingen bereiken op het verste punt ruim 20 m. Ook de vrije overspanning tussen de kolommen in de centrale as is ruim 20 m. Vanaf de begane grondvloer tot het dak is de draagconstructie uitgevoerd in staal. Er zijn vierendeelconstructies toegepast in één richting van het gebouw. In de andere richting zijn de constructies versterkt met diagonalen zodat vakwerken ontstonden.
Vierendeelconstructies hebben als voordeel dat er geen diagonalen toegepast worden die een obstakel in de plattegrond zouden zijn. Ze zijn echter relatief duur doordat er veel staal nodig is om de krachten te dragen. Daarom heeft de combinatie met vakwerken geleid tot een optimum van vrije plattegronden met een economisch staalskelet. De grootste kolommen zijn uit staalplaten samengesteld en meten 0,5x1,0 m, maar er is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van standaard walsprofielen. De toegepaste staalsoort is in het algemeen S355.
Aangezien de staalconstructie grotendeels bestaat uit uitkragende vierendeelconstructies is veelal de stijfheid maatgevend geweest voor de liggerafmetingen. Hierdoor is extra capaciteit aanwezig voor robuuste momentvaste verbindingen en een tweede draagweg. De staalconstructie is erop berekend dat deze overeind blijft staan wanneer een van de kolommen, een ligger of een van de diagonalen bij een calamiteit zou wegvallen. De hoofddraagconstructie is op de meeste plaatsen zichtwerk, waardoor deze zijn voorzien van een brandwerende coating.
Onder de staalconstructie is een parkeerkelder van één verdieping gemaakt van beton. De parkeerkelder steekt aan de zijde van het Raamplein buiten het gebouw uit. Voor de kelder is een bouwkuip gemaakt met permanente stalen damwanden en een tijdelijk stempelraam, die voor aanvang van de bouw is gebruikt om tot op een diepte van 6 m archeologisch onderzoek te doen. Onder de kelder zijn grote betonnen poeren gemaakt om de extreem hoge krachten uit de hoogbouw te funderen op Fundex-groutinjectie funderingspalen. Speciaal aandachtspunt was de afstemming van de positie van de nieuwe paalfundering tussen de aanwezige bestaande palen uit de vorige bebouwing.

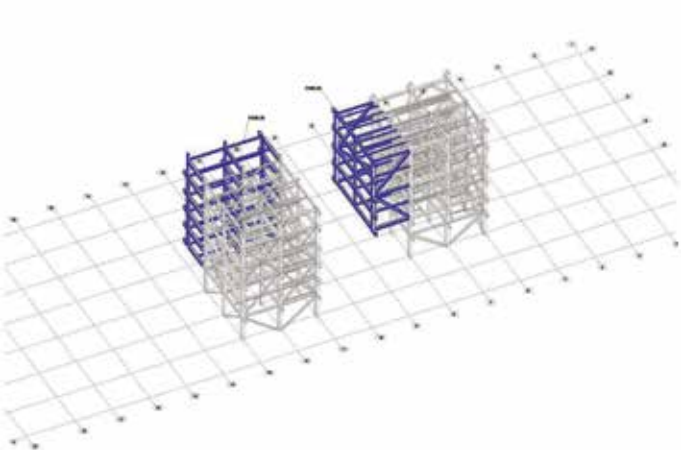
Uitkragingen en indeelbaarheid

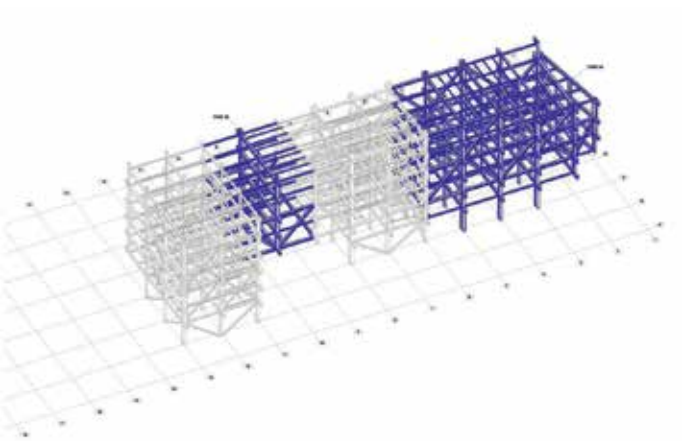
De complete draagconstructie boven de kelder bestaat uit een staalskelet met staalplaat-betonvloeren. Deze staalconstructie maakt de grote uitkragingen mogelijk, met instandhouding van de vrije indeelbaarheid. De staalplaat-betonvloeren rolden als optimale optie uit de variantenstudie, met name vanwege de eenvoud, het lage eigengewicht en de snelheid van (stempelvrije) montage.

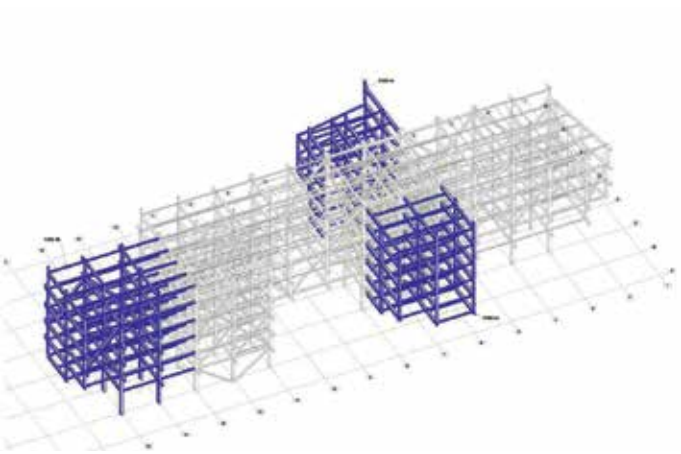
Het constructiemodel van nieuwbouw en monument.

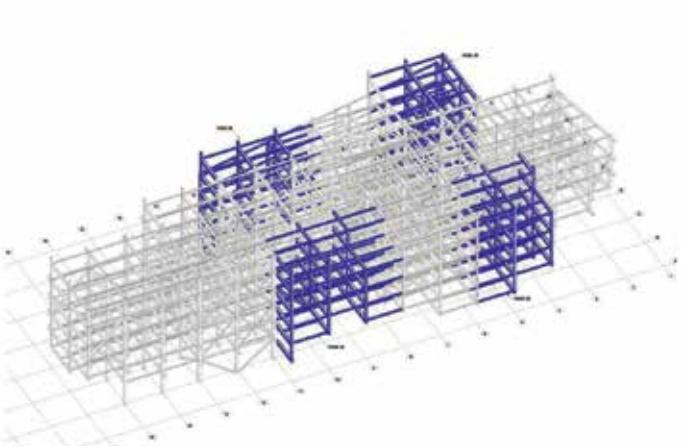
De bouwkuip sluit nauw aan op het monument, waarvoor een uitgebreide risico-analyse is opgesteld en noodscenario's zijn bedacht.

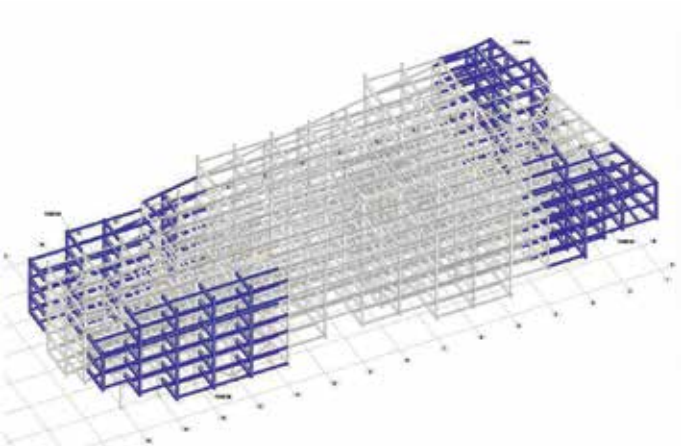


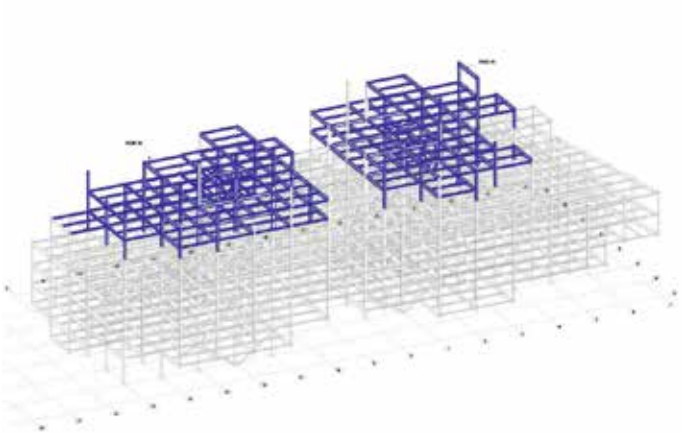


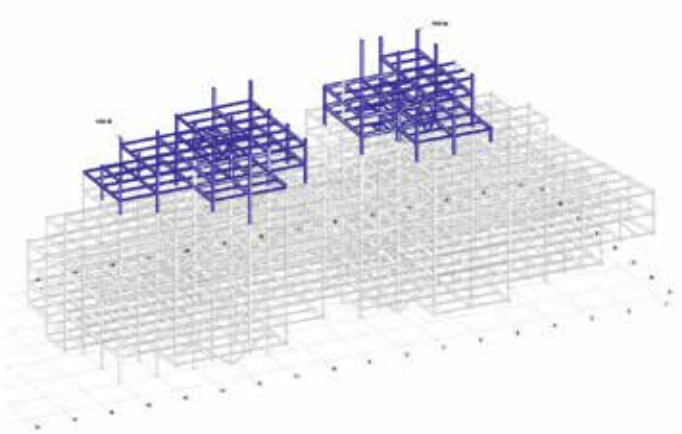


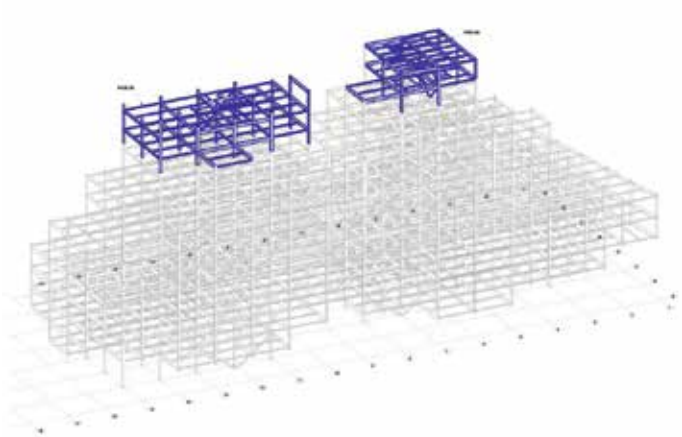


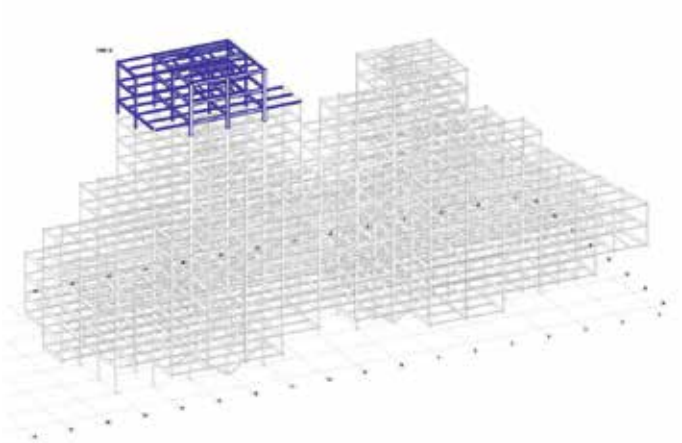


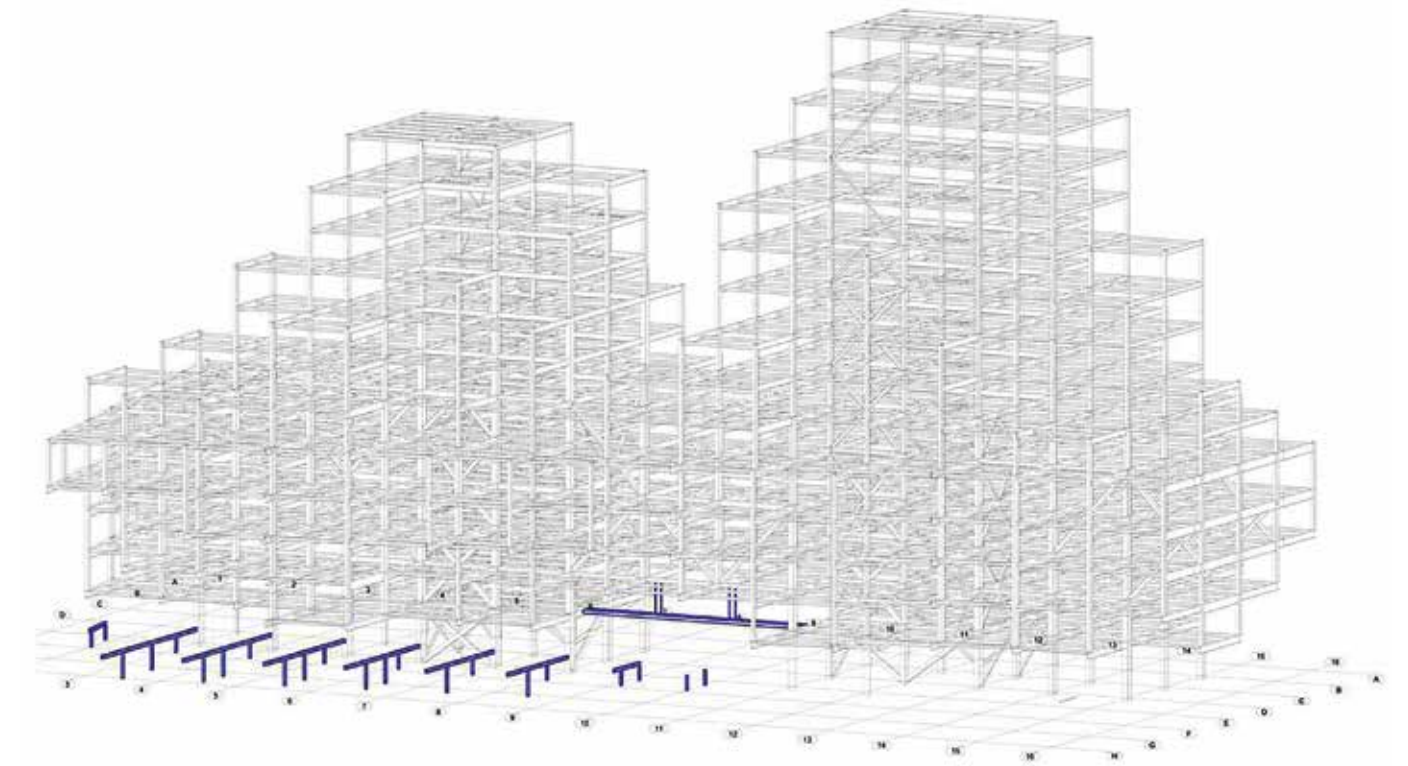




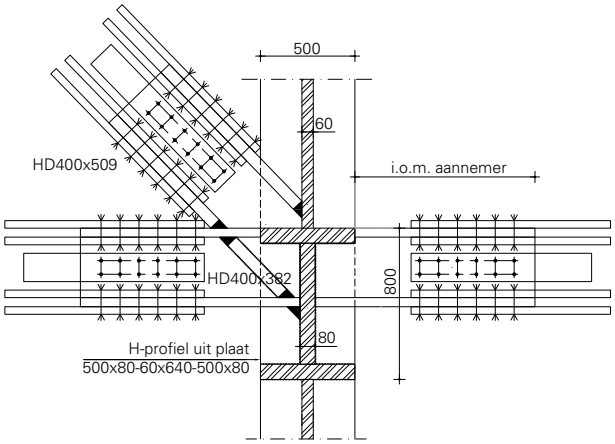




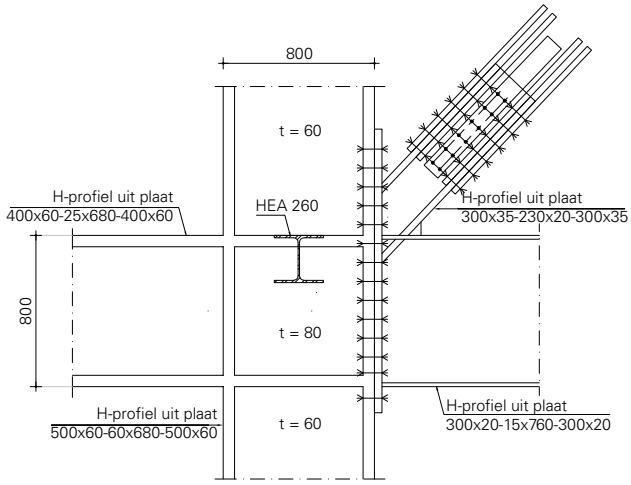




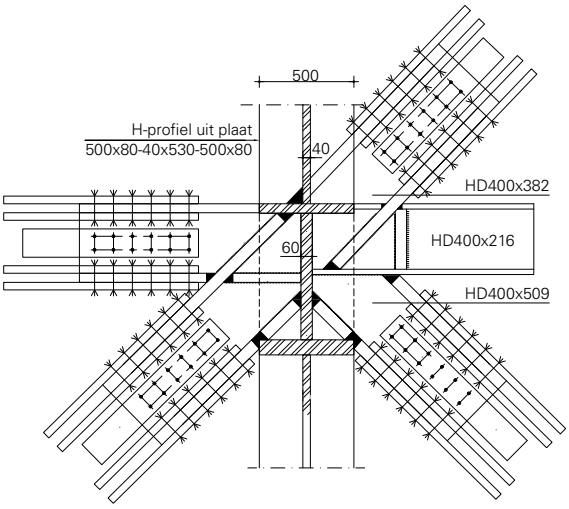
Fasering van de uitvoering met de volgorde van een stempelvrije opbouw. Hulpstaal (diagonalen) staat niet aangegeven. Montagetijd: 36 weken.



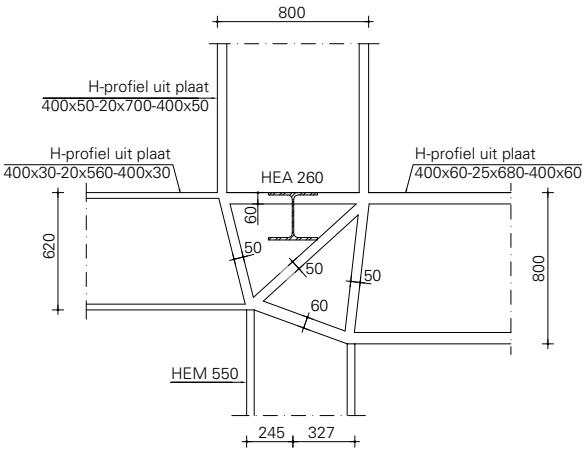
Verbinding vakwerken/windverbanden met de geprefabriceerde staalknopen van de vierendeelliggers.



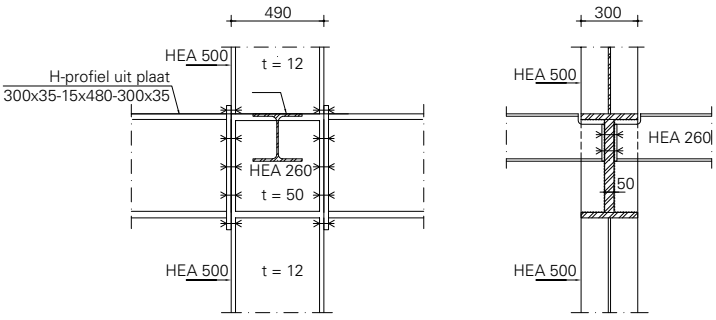
Aansluiting vierendeelliggers bij uitkragingen op de windverbanden in de kernen.



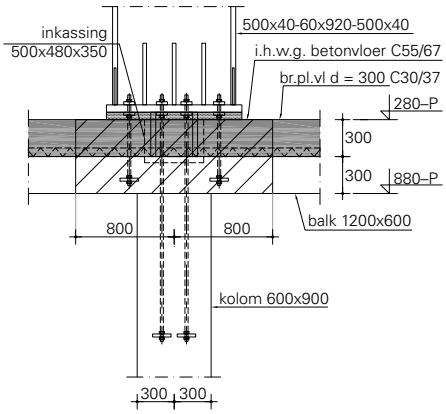
Waar mogelijk zijn de aansluitingen met boutverbindingen uitgevoerd.



Aansluiting profielen met verschillende maten: veel laswerk in de fabriek.



Standaardaansluiting van de 'lichte' verbindingen met bouten (in bovenbouw).



Aansluiting kolomvoet op betonnen kelderdek.

De onderste vijf verdiepingen zijn voor kantoren met meer constructiehoogte. Het grootste deel van de momenten uit het vierendeelsysteem ontstaat dan ook daar.

Voor het skelet zijn vele constructieve optimalisaties onderzocht, waarbij ook de noodzaak van de beperkt aanwezige kolommen, de uitkragingen en grote overspanningen ter discussie stonden. Voor het ontwerpteam en opdrachtgever zijn de vrije indeelbaarheid en de transparante uitstraling op straatniveau doorslaggevend geweest in de vormstudie van het ontwerp. In het vervolgtraject is het staalskelet geoptimaliseerd met behoud van grote overspanningen en uitkragingen, waarbij de oorspronkelijk als beton ontworpen kernen zijn omgezet naar staalconstructies. Waar mogelijk zijn diagonalen aan het skelet toegevoegd die het staalverbruik optimaliseren. Tevens zijn de kolommen in de dichte kernen zodanig verschoven dat er een perfecte balans in de bovenbouw ontstaat en er geen onnodige excentrische belasting is.

Speciale details

Samen met het ontwerpteam van Heijmans en (staal)leverancier CSM is veel aandacht besteed aan het vervormingsgedrag van de constructie en de maakbaarheid ervan. Er zijn speciale details ontwikkeld waarin de verwachtte vervormingen kunnen optreden zonder dat er schade aan de constructie en glazen gevels optreedt. Zo was de aansluiting tussen de bestaande bouw en de 'bewegende' nieuwbouw een belangrijk aandachtspunt. Hier zijn dilataties met een bewegingsvrijheid van meer dan 50 mm (verticaal en horizontaal) gemaakt door 'wiebelstukken' te maken. Ook de detaillering van de bovenaansluiting van de gevel aan de straatzijde, die op de keldervloer steunt, vroeg veel aandacht. De uitkragingen kunnen hier tot 50 mm zakken bij maximale vloerbelastingen en wind. De gevel is horizontaal tegen de verdiepingvloer gesteund, maar door de verticale dilataties kan deze niet stuk worden gedrukt bij een vervorming van de bovenbouw.

Voor een optimale doorlooptijd is na montage van de staalconstructie op de zesde verdieping alvast begonnen met het aanbrengen van de gevels. De gevelelementen van 3,6 m breed hangen op twee punten en kunnen in de onderlinge verticale voegen vrij schuiven. In overleg tussen hoofdaannemer en gevelbouwer is onderzocht hoeveel de achterliggende staalconstructie na montage maximaal mocht vervormen om lekkage en schade in de gevel te voorkomen. Een aandachtspunt was dat de exacte vervorming van het staalskelet voorafgaand aan de montage moeilijk te voorspellen was. Daarom waren er grote stelmogelijkheden nodig in de verankering van de gevels, waarvoor speciale ophangdetails zijn ontwikkeld met lange draadeinden.

Een van de speerpunten in het constructief ontwerp was de benodigde hoeveelheid staal. Om maximale stijfheid van de profielen te kunnen benutten, zonder overtollig gebruik van materiaal, zijn er gelaste profielen samengesteld. In de vakwerken zijn veelal HD-profielen toegepast (ideaal wanneer deze op normaalkracht worden belast). Maar waar de profielen als buigligger fungeren (bij de kolommen en liggers van de vierendeelconstructies) zijn hogere profielen gemaakt met een optimale sterkte-stijfheid verhouding. Zo is overal de beschikbare constructiehoogte optimaal benut. Om deze reden is er ook voor gekozen het kanalentracé voor de installaties door de staalprofielen te voeren. De sparingen hiervoor zijn uitgebreid berekend en het bleek efficiënter om de kanalen door de liggers te steken, in plaats van eronderdoor, en minder hoogte voor constructie te gebruiken.

Bijzondere aspecten uitvoering

De hoofdaannemer en staalleverancier hebben in overleg met de hoofdconstructeur de montagewijze van het skelet bepaald. Het skelet is opgebouwd uit zo groot mogelijke onderdelen zodat in de fabriek gelast kon worden en laswerk op locatie werd beperkt. Het skelet is vanuit de kernen opgebouwd waarna de uitkragende vierendeelconstructies hier evenwichtig aan zijn opgehangen. In de constructies zijn tijdelijke diagonalen toegepast zodat de uitkragende elementen (ligger met gedeelde kolom) exact op hoogte konden worden opgehangen en de knoopverbindingen op het werk konden worden afgelast.

Waar mogelijk zijn de aansluitingen met boutverbindingen uitgevoerd. Voor de stempelvrije uitvoering van de vierendeelconstructies bleek het echter alsnog interessant om diverse zware knopen in het werk te las-

sen. Hiervoor zijn gespecialiseerde lassers ingezet, die vanuit hoogwerkers soms dagen achtereen aan de zware knopen hebben gelast.
Door de montagewijze is er geen steigerwerk nodig geweest. Dit zorgde met name voor een snellere bouwtijd en hierdoor is de onderliggende begane-grondvloer tijdens de uitvoering vrij gebleven voor de uitvoeringswerkzaamheden. Bovendien zijn hiermee extra voorzieningen in de kelder en fundering voorkomen om de steigerconstructies op te vangen. De complete staalconstructie is in 36 weken gemonteerd. In deze periode is het staalskelet op locatie gemonteerd, gelast en zijn de staalplaat-betonvloeren gelegd en gestort.
Tijdens de uitvoering zijn de vervormingen van het staalskelet gevolgd met hoogtemetingen. De gemeten vervormingen werden vergeleken met de theoretisch berekende waarden uit de rekenmodellen, zodat bij onverwachte zakkingen ingegrepen kon worden. De zakkingen waren theoretisch moeilijk in te schatten doordat dwarskrachtvervormingen, verbindingsslip, modelonnauwkeurigheden en thermische vervormingen eigenlijk niet exact te voorspellen zijn. Hiervoor zijn inschattingen gemaakt. Uit de metingen is gebleken dat de berekende waarden zeer goed overeenkwamen met de werkelijke vervormingen.

Engineering

De staalconstructie is berekend met 3D-rekensoftware Robot en gemodelleerd in Revit. Aanvankelijk zijn in het Revit-model de belastingen uit vloeren en gevels ingevoerd en is de geometrie bepaald. Dit model is als invoer gebruikt voor de Robot-berekeningen, zodat het rekenmodel zeker gelijk was aan het tekenmodel. Helaas bleek het niet mogelijk de uitvoer uit deze berekeningen weer efficiënt in Revit terug te brengen en te verwerken.
In het rekenmodel zijn de genoemde optimalisaties onderzocht en is de constructie beoordeeld bij calamiteiten (tweede draagweg). Elke relevante situatie waarbij een van de constructie-elementen (vloerbalk, kolom of diagonaal) vervalt, is in het model onderzocht en berekend. Met deze hoofdberekeningen heeft SBE, het ingenieursbureau dat met CSM de detailberekeningen heeft gemaakt, de berekeningen van lasverbindingen en boutverbindingen gemaakt. De montagestudies zijn door CSM uitgevoerd.
De detailengineering is bijzonder omvangrijk en complex geweest. Met name doordat krachten in de knopen bepaald moesten worden uit diverse belastingsituaties, zoals de uiterste grenstoestand, de montagefase en alle verschillende situaties in een tweede draagweg. Voor de verschillende knopen zijn steeds verschillende situaties maatgevend en gelden steeds verschillende krachten. Daarnaast is door de optimalisatie in het skelet gekozen voor veel verschillende typen en afmetingen van staalprofielen. Hierdoor waren er nagenoeg geen standaard verbindingen aan te wijzen die meerdere keren voorkomen.
Dankzij een nauwe samenwerking tussen SBE, CSM en Pieters Bouwtechniek is de detailengineering toch geslaagd en controleerbaar geweest voor Pieters Bouwtechniek als hoofdconstructeur en voor Bouw- en Woningtoezicht.

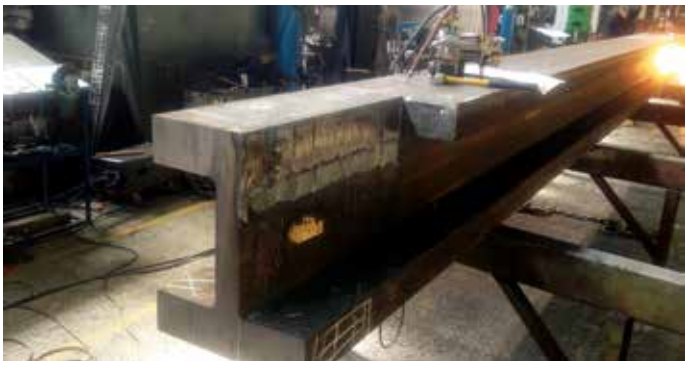
Risicoanalyse

Voor alle betrokken partijen was het bijzondere staalskelet een risicovol ontwerpaspect. Om zeker te zijn dat knelpunten niet over het hoofd werden gezien, is in overleg tussen Heijmans en Pieters Bouwtechniek een externe toetsing afgesproken voor de grootste risicopunten. Aangezien het project is ingedeeld als CC2-project is dit niet vanuit de normen voorgeschreven. Uiteindelijk hebben de volgende extra toetsingen plaatsgevonden.
• Een algemene second opinion op het constructieve ontwerp door Leo van Dorp van LVD adviseurs. In deze toetsing is met name gekeken naar verandering in de krachtsverdeling door zettingen in de fundering. De maximale zetting is door Fugro geprognotiseerd op ± 80 mm, waarbij door de zakking van de kernen het monumentale Stadstimmerhuis op 15 m afstand mee zou kunnen worden getrokken. Door analyse door Fugro van de zettingen van het totale complex in Plaxis bleek de zakking bij het Stadstimmerhuis beperkt tot minder dan 10 mm.
• De berekeningen van de eerste (zwaarste) knoopverbindingen zijn gecontroleerd door de TU Delft, door Frans Bijlaard en Nol Gresnigt. Hieruit bleek dat de aanpak van SBE, CSM en Pieters Bouwtechniek correct was.
• Door TNO zijn mogelijke trillingsproblemen onderzocht. Bij dit onderzoek is vastgesteld dat geluidsoverdracht door vloeren en trillingen van het skelet door wind niet te verwachten zijn. Wel zijn er ontwerpaanpassingen in detaillering doorgevoerd om te voorkomen dat bij gebruik van de glazenwasinstallatie de bewoners in de woningen trillingsoverlast ondervinden.

Bouw- en Woningtoezicht

Al vroeg in het ontwerptraject heeft Pieters Bouwtechniek met Bouw- en Woningtoezicht overlegd over de aanpak van het constructief ontwerp. Aandachtspunten zoals de te kiezen gevolgklasse, en de aanpak tweede draagweg zijn direct besproken, zodat deze zonder onduidelijkheden in het ontwerp konden worden verwerkt. Tijdens de uitwerking (DO en UO) van het ontwerp heeft steeds tussentijds overleg met Bouw- en Woningtoezicht plaatsgevonden, waardoor de controle eenvoudiger plaats kon vinden en er geen onverwachte aanpassingen nodig waren. Zowel voor de gemeente als voor het ontwerpteam is deze samenwerking succesvol gebleken. •

Duurzaamheid - Levensduurbestendigheid
Het Timmerhuis heeft het BREEAM-certificaat met een score van 75,1% behaald. Dat betekent vier sterren en het label 'Excellent'. Voor een multifunctioneel gebouw met woningen, kantoren en retail is dat redelijk bijzonder; op dit moment zijn er in Nederland nog maar 44 gebouwen gerealiseerd met 4 of 5 sterren.



In de vakwerken zijn veelal HD-profielen toegepast.

De grootste kolommen zijn uit staalplaten samengesteld.

De liggers zijn brandwerend gecoat en voorzien van sparingen voor installaties.

Veel verschillende typen en afmetingen van staalprofielen, voor optimalisatie.

Eerste 'paal'. De segmenten zijn bijna 25 m hoog.

Inkassingen leiden windkrachten in het beton.

De tijdelijke diagonalen (blauw).

Constructie is deel van de architectuur.

De onderste 5 verdiepingvloeren zijn al gestort terwijl de rest wordt gemonteerd.

Projectgegevens

Opdracht Ontwikkelingsbedrijf/Gemeente Rotterdam • *Architectuur* OMA, Rotterdam • *Constructief ontwerp* Pieters Bouwtechniek, Delft • *Installatie adviseur* Deerns Raadgevende Ingenieurs, Rijswijk • *Bouwmanagement* Brink groep, Leidschendam • *Bouwfysica* DGMR, Den Haag • *Uitvoering* Heijmans Utiliteitsbouw, Rosmalen • *Staalconstructie* CSM, Hamont-Achel (B) • *Fotografie* Ossip van Duivenbode, Pieters Bouwtechniek

Projectdata

Omvang 48.480 m^2 bvo • *Ontwerpperiode* 2009-2013 • *Uitvoeringsperiode* 2013-2015 • *Staal* 3850 ton S355, excl. hulpstaal en gevelstaal

Wonen...

Werken, en publieke ruimte...

'Wolk van pixels' met karakteristieke dakterrasindeling.