

Spanwerk weer fier

De Drieklimatenkas uit 1993 van de Hortus Botanicus moest grondig worden gerenoveerd, met behoud van de markante, bovendakse staalconstructie. Nieuw dubbel gevelglas en etfe-dakkussens veroorzaken andere belastingen, constructieschema's en krachterspel. Hoe een karakteristiek spanwerk in stand wordt gehouden.

ir. E.J. Brok, ir. K.D.K. Oosterman, P.A. Klijn en drs. E.L. Wissink

Eric Brok is projectleider bij ABT in Velp. Kay Oosterman is architect/partner bij ZJA Architects & Engineering in Amsterdam en Pieter Klein is technisch directeur bij Vic Obdam Staalbouw in Obdam. Else Wissink is architectuurhistoricus in Amsterdam.





Gesticht als Hortus Medicus (1638) bij het Regulierenklooster resideert de Amsterdamse Hortus Botanicus sinds 1682 aan de Plantage Middenlaan, in hartje Amsterdam. Na het afstoten van de tuin door de Universiteit van Amsterdam was het de Drieklimatenkas die in 1993 de doorstart naar een publiekstuin markeerde. In de markante kas konden bezoekers planten uit de woestijn, tropen en subtropen bewonderen en de verschillende klimaten ervaren.

Dertig jaar later wordt de wereld bedreigd door een klimaatcrisis en het daarmee gepaard gaande verlies van biodiversiteit. De noodzakelijke renovatie van de oude kas kreeg dan ook extra urgentie. Niet alleen als geoptimaliseerd onderdak voor planten uit uiteenlopende windstreken, maar ook als een zichtbaar duurzame en toekomstbestendige locatie. De plek waar de Hortus van nu het verhaal van het belang van de biodiversiteit kan vertellen en bezoekers kan aanspreken

bewust te gaan handelen voor het behoud van (het) leven op aarde.

Blikvanger

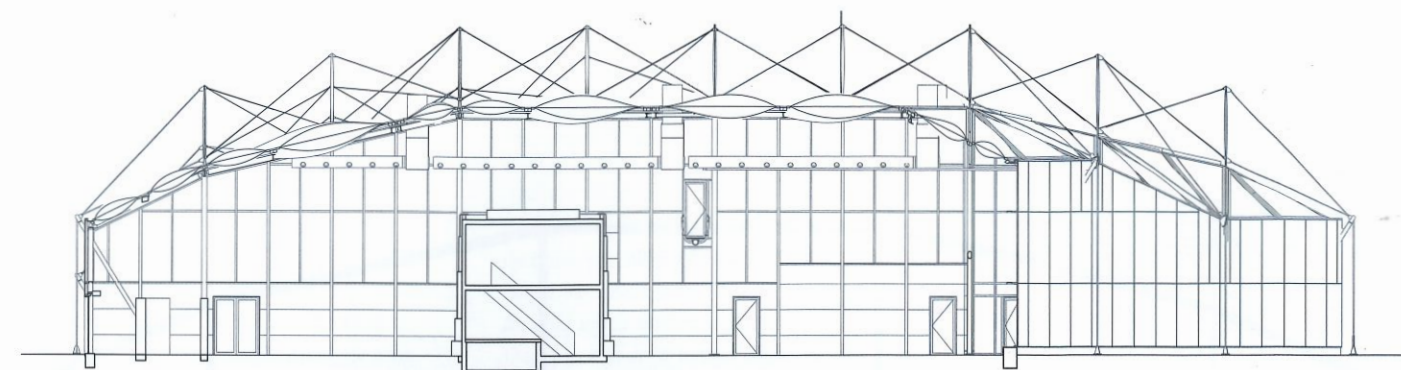
Begin jaren '90 ontwierp ZJA de Hortus als een eigentijdse verschijning van glas en staal, die tegelijkertijd aansloot op de historische omgeving. Met een verspringende hoogte van vier tot elf meter en de fijne roedeverdeling van de glazen vlakken, volgt het silhouet van de 'hightech' kas als een getrapte gevelpartij de kade en schermt het tegelijkertijd de besloten binnentuin af.

Voor het ontwerp maakten de architecten gebruik van de gangbare bouwstenen in de kassenbouw, maar nu met een radicaal ander constructief principe. Een uitwendig skelet van stalen elementen houdt het bouwwerk overeind, met een in het zicht gelaten samenspel van trekstangen en drukstaven. Deze constructie faciliteert een ontwerp dat licht in gewicht is, veel vormen kan aannemen

en maximaal daglicht toelaat. Dat resulteert in een indrukwekkend lichte ruimte, met een oppervlak van 1.500 m². Glazen wanden scheiden de drie klimaatzones (tropisch, subtropisch en woestijn) en midden door de kas meandert een transparante loopbrug. Vanaf daar kunnen bezoekers zowel de plantencollectie als de ruimte vanuit een ander perspectief beleven.

Silhouet

De Drieklimatenkas werd al snel een bezienswaardigheid, en de opvallende verschijning is inmiddels niet meer weg te denken uit het Amsterdamse straatbeeld. Reden voor de Hortus om niet te kiezen voor – een financieel voordeligere – sloop, maar voor het 'vertalen' van het ontwerp naar het nu. Met duurzaamheid en educatie als uitgangspunten voor de vernieuwing. De kas wisselt al sinds 2016 warmte en koude uit met het nabijgelegen H'ART Museum en



1. Doorsnede nieuwe opzet.

wordt na de vernieuwing de eerste gasloze publieksskas van Nederland. Daarnaast draagt het nieuwe ontwerp de duurzame vernieuwing zichtbaar uit, terwijl het silhouet herkenbaar blijft.

De ontwerpers hebben de bestaande karakteristieke hoofdconstructie weten te behouden. Met de huidige, strengere eisen op het gebied van duurzaamheid, toegankelijkheid en lichtdoorlatendheid bleek dat nog lang niet makkelijk. Maar met ingenieuze ontwerpoplossingen en eigentijdse inzichten is het toch gelukt om de oorspronkelijke uitgangspunten – licht en slank voor optimale daglichttoetreding – te behouden en de focus nog meer op de unieke hoofdconstructie te leggen. Het enkelglas in de gevel is vervangen door isolerend dubbelglas en het dak is voorzien van lichtgewicht, isolerende drielaagse etfe-luchtkussens; een 'ultieme' vorm van lichtgewicht bouwen. Buiten de goede isolerende eigenschappen en lichtdoorlatendheid is er voornamelijk voor etfe gekozen omdat de bestaande dakconstructie geen nieuw dubbelglas kon dragen. Ook het specifiek ritme en de verfijning van de bestaande gevel met witte belijning komen terug in het nieuwe ontwerp.

Inrichting

De kas is niet alleen voorzien van een isolerend dak, dubbelglas, een opslag voor hergebruik van (regen)water en slimme, energiezuinige ingepaste klimaatsystemen; ook de inrichting ging op de schop. Naast de inrichting van de nieuwe Kaapse ruimte en het vernieuwde tropische deel, ontworpen door BOOM Landscape, ontwierp Designwolf de tentoonstelling om het verhaal van



2. 'Oude' Hortus Botanicus.

biodiversiteit en de relatie met het klimaat op wereldschaal uit te leggen. De beeldbepalende loopbrug blijft behouden en zal een nieuwe waterval passeren, die de technische installaties centraliseert en grotendeels verbergt. Daarnaast komen er een uitzichtplatform en een introductie- en reflectiezone. Door de nieuwe klimaatinstallaties en de omwisseling van de plantencollecties, zal het groen straks optimaal van het gerenoveerde gebouw en de (her)oriëntatie kunnen profiteren.

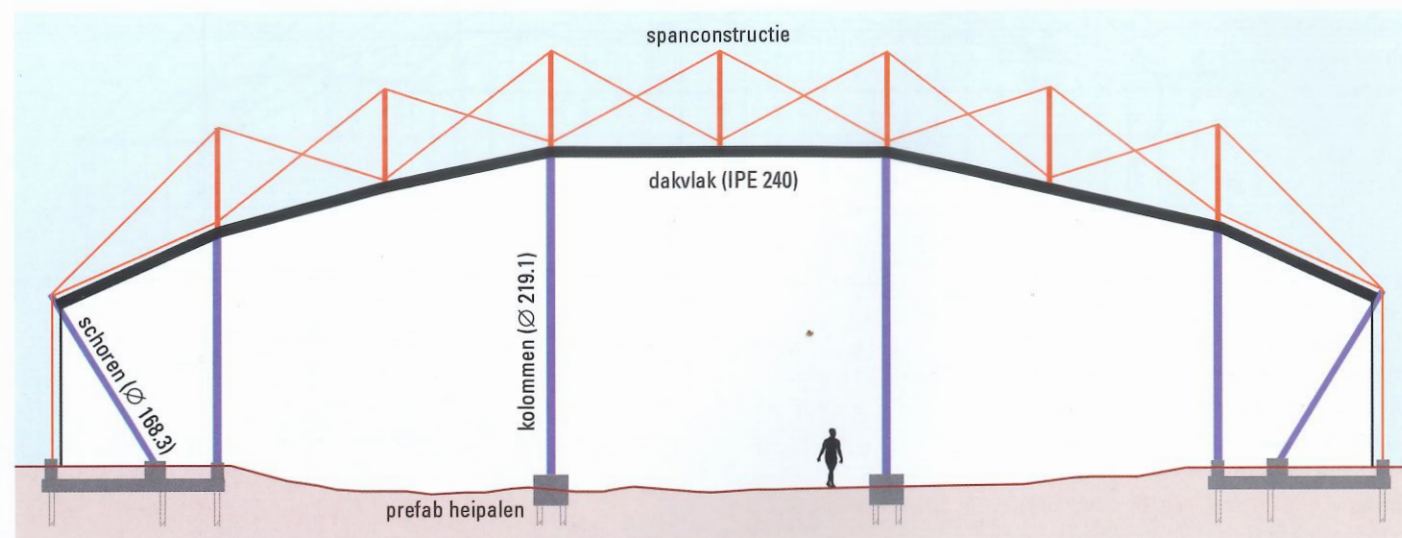
Bevlogen

De Hortus wilde de kas graag openen tijdens het 750-jarige bestaan van Amsterdam in 2025. Dat dit daadwerkelijk gaat lukken,

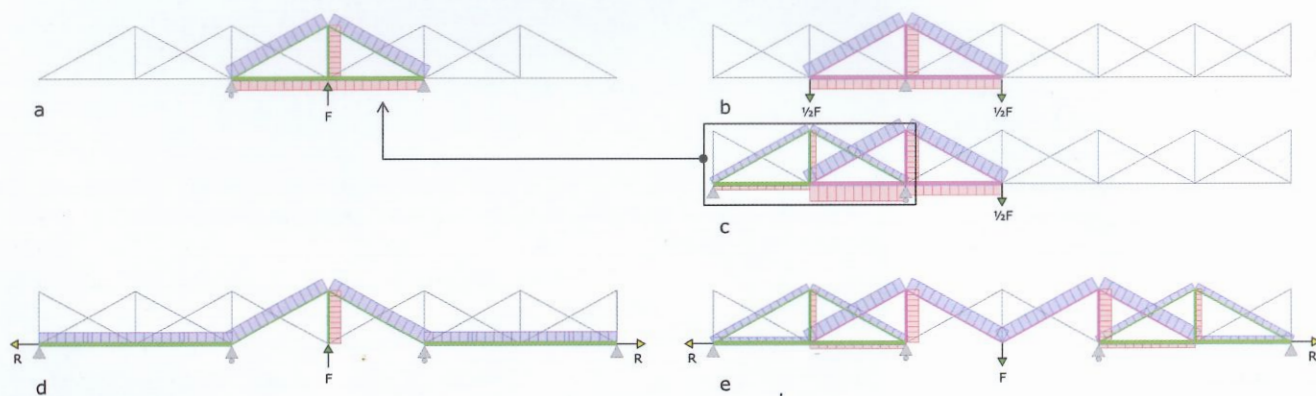
komt mede door de bevoegdheid van de opdrachtgever en een betrokken ontwerp- en bouwteam, gecoördineerd door CRHS.

Tent

Voordat we de stap naar het tweede leven van de Drieklimatenkas zetten, kijken we eerst terug naar het oorspronkelijke constructief ontwerp. Het doorgronden ervan is noodzakelijk om te kunnen beoordelen hoe en in welke mate de constructie geschikt is voor hergebruik en om vast te stellen waarvoor en welke aanvullende constructie benodigd is. De constructie van de Drieklimatenkas vertoont grote overeenkomsten met een tentconstructie, waarbij het dak (tentdoek) op



3. Doorsnede constructie.



4. Schema's.

een regelmatig patroon is ondersteund met kolommen (tentstokken) en het geheel met trekabels (scheerlijnen) aan het maaiveld is verankerd. Net zoals bij een tent is de algehele stabiliteit van de constructie hiermee gewaarborgd. Het afkruisen van de gevels is hierdoor niet nodig.

Constructieve opzet

Wat de constructie in verschijningsvorm uniek maakt, is het zeer slanke, bovendakse spanwerk, dat samen met de dakliggers de dakconstructie vormt. Door het totaal aan kabels in verschillende richtingen en de geknikte dakvlakken ontstaat een intrigerend lijnenspel. De primaire functie van het span-

werk is om een tussensteunpunt te vormen voor de dakliggers (IPE 240) die tot wel 16 m overspannen tussen de kolommen. Afbeelding 3 geeft het constructieprincipe van de kas op doorsnedeniveau weer. De constructieve opzet van de dakconstructie is terug te brengen tot slechts een aantal basisprincipes, afhankelijk van de belastingsrichting (opwaarts of neerwaarts). Om deze principes overzichtelijk en inzichtelijk te maken, worden ze verder toegelicht op basis van vereenvoudigde aannames:

- 2D platte vlak en recht;
- een puntlast (F) in het midden van de overspanning.

Allereerst de situatie van de opwaartse belas-

ting: dan ontstaat een mechanica-schema dat vergelijkbaar is met een omgekeerde overspannen ligger (afb. 4a), waarbij een deel van kabels op trek (blauw) komen en de dakligger op druk (rood). De overige kabels zijn functieloos voor deze belastingsrichting. Doen we hetzelfde voor de situatie van een neerwaartse belasting, dan ontstaat een krachten spel dat overeenkomsten vertoont met dat van een tuibrug. Deze situatie is in evenwicht als beide puntlasten van gelijke grootte zijn (afb. 4b). Dit is echter geen realistisch scenario. Voor de verschilbelasting is een aanvullend krachtenpad benodigd (afb. 4c). Op het moment dat de verschilbelasting als opwaartse kracht wordt uitgedrukt, is het

krachtenpad bekend, namelijk het eerder beschreven principe voor opwaartse belasting. Het krachtenschema wordt gevormd door een combinatie van beide principes. Op een aantal locaties ontstaat de bijzondere situatie dat de aan de kabels gekoppelde dakligger niet in het vlak van het spanwerk zelf ligt (voorbeeld: afb. 5, aanduiding *), waardoor in de betreffende overspanning de eerder beschreven principes zich niet geheel kunnen ontwikkelen. De krachten in de kabels blijven gelijk, maar worden nu afgespannen aan de aangrenzende velden. Afbeelding 4d en e geven de situatie weer. Een horizontale reactiekracht (R) resteert, die door de aansluitende constructie wordt opgenomen en inwendig in evenwicht wordt gebracht of afgevoerd naar de fundering door op te spannen tussen de schoorconstructie die rondom het gebouw aanwezig is. De constructie van de Drieklimatenkas (afb. 5) krijgt de uiteindelijke vorm door bovenstaande principes in vier verschillende richtingen te combineren en te schakelen, waarbij deze geometrisch zijn afgestemd op de beoogde dakvorm. Het dak is vervolgens ondersteund door de gebouwkolommen en de dragende gevelstijlen. Het geheel staat op funderingsbalken en poeren, die zijn ondersteund door prefab funderingspalen.

Hernieuwde dakconstructie

Zoals beschreven wordt de gehele dak- en gevelschil tot aan de hoofdconstructie verwijderd en vervangen door een etfe-kussendak en nieuwe glazen gevels. De constructieve motivatie achter het etfe-dak is dat, in tegenstelling tot een dak met (veiligheids-) isolatieglas, het dakgewicht nagenoeg onveranderd blijft ten opzichte van het oorspronkelijke enkellaags glazen kassendak. Hiermee wordt voorkomen dat de bestaande constructie overbelast wordt. Etfe-kussens zijn meerlaagse membranen die met een lichte overdruk worden opgeblazen. Hiermee krijgen deze kussens sterkte en stijfheid om belastingen uit wind en sneeuw op te vangen. Deze membraanwerking resulteert behalve in verticale krachten ook in horizontale krachten die aangrijpen op de aansluitende constructie. De bestaande hoofdconstructie van de kas is uitermate geschikt voor

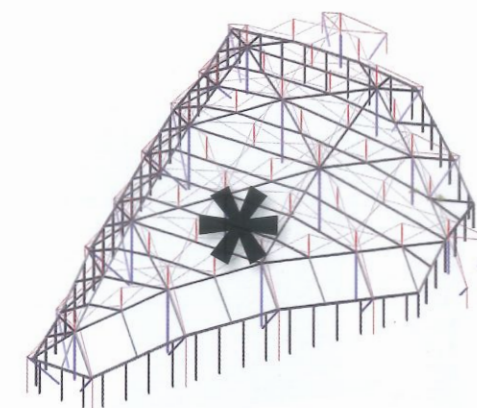
het opvangen van verticale belasting, maar is niet ontworpen voor het opnemen van horizontale belastingen evenwijdig aan het dakvlak. Daar komt bij dat de zwaartelij van de horizontale kracht uit de kussens minstens de halve profielhoogte van de dakliggers hoger aangrijpt, waardoor ten opzichte van de dakliggers torsiemomenten ontstaan. Daarnaast is door het verwijderen van het oorspronkelijke glazen dak, inclusief het hulpstaal, de steun tegen kip en knik (om de zwakke profiel-as) van de dakliggers (IPE 240) verdwenen. De ongesteunde lengte van de IPE 240 kan oplopen tot ongeveer 16 m. Aanvullende constructie is dus benodigd. De volgende opties zijn overwogen om de knik- en rotatiestijfheid te verbeteren:

- dwarsliggers tussen de dakliggers;
- aanvullende kabelconstructies als horizontale steun voor de dakliggers;
- toevoegen van aanvullende staalprofielen boven op de bestaande dakliggers.

Door dwarsliggers toe te voegen en op te sluiten in het stabiliteitssysteem kan zowel de knik- als kiplengte van de hoofdliggers worden verkleind en hoeven torsiemomenten een minder lange afstand te overbruggen. Twee typen dwarsliggers komen hiervoor in aanmerking.

- Rechte liggers: hierdoor neemt het aantal etfe-kussens toe, wat sterk kostenverhogend werkt.
- Gekromde liggers onder de buik van de etfe-kussens door. Hierdoor kan het aantal kussens worden geoptimaliseerd. De negatieve impact op afmeting en visuele impact neemt wel aanmerkelijk toe.

Voor beide opties geldt dat ondanks de dwarsliggers de torsiestijfheid en -capaciteit van de hoofdliggers beperkt blijft. Uiteindelijk is het geen haalbare oplossing gebleken. Het toevoegen van een kabelconstructie loodrecht op de dakliggers heeft als groot voordeel dat dit slank (vrije daglichttoetreding) kan worden uitgevoerd en het materiaalgebruik tot een minimum beperkt kan blijven. Een dubbel kabelnet is nodig om zowel horizontaal- als torsiële krachten op te kunnen vangen. Toch is uiteindelijk ook niet voor deze oplossing gekozen, voornamelijk



5. Totale constructie.

vanwege onderstaande argumenten.

- De kabels moeten onder de buiken van de etfe-kussens doorlopen, waardoor aanvullende excentriciteiten ontstaan.
- Er is al een kabelsysteem bovendaks aanwezig. Hierdoor ontstaat een dubbel kabelsysteem, waarmee het krachten spel in alle kabels erg onvoorspelbaar wordt.
- Het verloop en de afspanning van de kabels is complex door de verschillende geknikte dakvlakken.

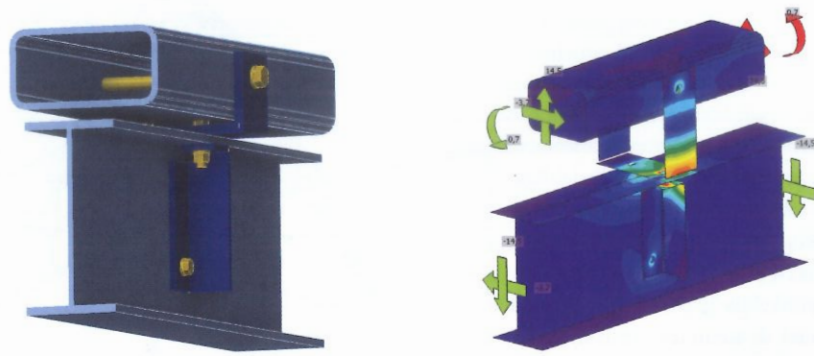
De oplossing is uiteindelijk gevonden door een extra profiel boven op de huidige dakliggers te plaatsen. Qua bevestiging en aansluiting van de kussens ligt een UNP-profiel voor de hand. Dit met de open zijde naar boven gericht, zodat ook afwateringsgoten ontstaan. Dit principe is eerder toegepast in bijvoorbeeld de mangrovehal van Burgers' Zoo. Voor het opvangen van de horizontale krachten kan hiermee voldoende extra sterkte en stijfheid worden verkregen. Mits goed gekoppeld kan ook de knikweerstand van de onderliggende IPE 240-dakligger worden verbeterd. Echter, dit profiel is niet geschikt om de dakliggers tegen kip te steunen en de torsiële krachten uit de etfe-kussens op te nemen. Dit heeft geresulteerd in de keuze voor platte kokers, die wel goede torsie-eigenschappen bezitten (afb. 6). De breedte van de kokers is afgestemd op de ongesteunde lengte in horizontale richting. Het nadeel van kokers is dat de aansluitdetails complexer worden.

Details

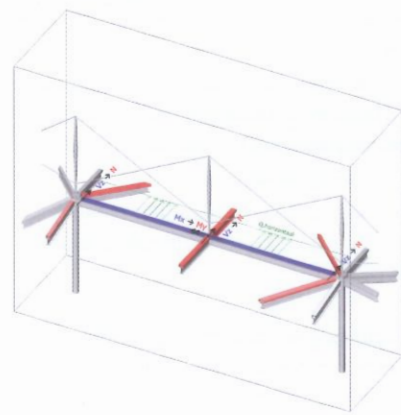
Het belangrijkste uitgangspunt voor de aansluiting en detaillering van de nieuwe staalconstructie is dat deze zodanig wordt

Projectgegevens

Opdracht Hortus Botanicus Amsterdam • Architectuur ZJA Architects & Engineers, Amsterdam • Constructief ontwerp ABT, Velp • Landschapsarchitectuur BOOM Landscape, Amsterdam • Ontwerp inrichting Designwolf, Amsterdam • Uitvoering AKOR, Rijssen • Staalconstructie Vic Obdam Staalbouw, Obdam • Projectmanagement C&R Hospitality Services, Amsterdam • Installatieadvies/PM Infinitus Solutions • Dak Buitink Technology, Duiven • Gevel Kingspan (Light + Air), Duiven • Installaties Lek/Habo, Ter Aar • Inrichting kas Copijn, Utrecht • Museale inrichting Kloosterboer, Purmerend • Data ontwerp 2019, start bouw 2023, oplevering 2025 • Fotografie en visuals ZJA, ABT, AKOR, Vic Obdam, Rob 't Hart



6a. Profielkoppeling met 6b. Interne krachswerking.



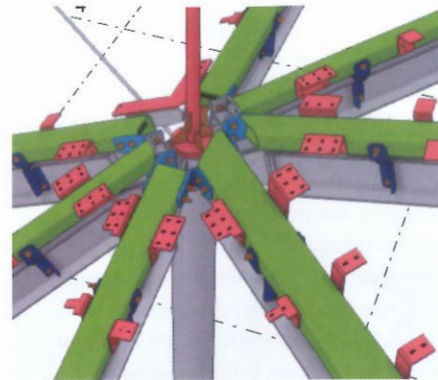
8. Principe krachswerking.

ontworpen dat de benodigde extra sterkte en stijfheid worden geleverd, zonder het krachterspel in de hoofdtraagconstructie te verstoren. Hierdoor hoeft de gehele bestaande staalconstructie niet opnieuw te worden beoordeeld. Om verstoring te voorkomen, is het belangrijk dat de nieuwe kokers niet schuifvast aan de bestaande dakliggers worden bevestigd en niet doorlopend over de kolomondersteuning worden gelegd. Ook moet de nieuwe kokerconstructie zorgen voor het onderling in balans brengen van de horizontaal krachten uit de etfe-kussens en het opvangen van de torsiekrachten uit de excentrische aansluiting hiervan. Het niet schuifvast bevestigen kan eenvoudig worden opgelost door het toepassen van slobgaten tussen beide profielen. Echter, het koud op elkaar bevestigen van de staalprofielen brengt het risico met zich mee dat de conservering, als gevolg van onderlinge

verschuiving (wrijving), kan beschadigen. Dit is vanzelfsprekend niet wenselijk, zeker niet in de hoog corrosieve omgeving waarin het grootste deel van de kas zich bevindt. Een koppeling is ontwikkeld (afb. 6a en b) die een aantal functies slim combineert

- Verticale ondersteuning van de kokerliggers op regelmatige afstand, voor de belastingsoverdracht naar de dakliggers.
- Onderling vrij bewegen van de liggers, door de profielen op afstand te houden en van bewegingsvrijheid te voorzien (slobgaten in kokers). Op strategische plekken is per ligger eenmalig een starre koppeling voorzien, zodat de nieuwe constructie wel op haar plek blijft.
- Het steunen van de IPE 240-dakliggers tegen knik om de zwakke as en kip, door de onder- en bovenzijde van de IPE's te koppelen met de torsiestijve kokerprofielen. Onderzocht is hoeveel koppelingen nodig zijn om de zijdelingse rekenkundige knik- en kiplengtes voldoende te reduceren. De hiervoor benodigde verbindingen zijn vervolgens getoetst met IDEA-Statica (afb. 6b).

Bij de hoofdkolommen komen veel liggers samen, vaak ook nog in verschillende hoeken (afb. 7). Om de aansluitdetails uitvoerbaar te maken, is er voor gekozen om de onderlinge koppeling tussen de aansluitende kokers te beperken tot het minimaal noodzakelijke, namelijk het onderling overdragen van horizontaal krachten uit de kussens en kniksteunkrachten. In de onderhavige ligger resulteert dit in een dwarskracht (V_x), die als normaalkracht (N) in de aansluitende liggers wordt afgedragen (afb. 8). De torsiekrachten



7. Kipsteun.

(M_x) uit de kussens en de kipsteunkrachten worden via de koker als een buigend moment (M_y) in de aansluitende kokerligger in het midden van de overspanning overgedragen. Dit principe is, afgestemd op de betreffende situatie, consequent doorgevoerd in de gehele dakconstructie.

Randligger

De bestaande randligger is een UNP-profiel dat de daklijn volgt en op diverse plekken van knikken en onderlinge koppeling is voorzien. Hierdoor is deze ligger ongeschikt om de extra krachten uit de etfe-kussens op te nemen. Daarom is ook hier gekozen om een kokerprofiel toe te voegen, maar in tegenstelling tot bij de dakliggers wordt deze niet ondersteund door de onderliggende UNP, maar werkt deze geheel onafhankelijk voor zowel verticale als horizontale belasting, waarmee de functie van de UNP is komen te vervallen. Dit is mogelijk gemaakt door het profiel direct boven op de gevelstijlen te bevestigen, waardoor de overspanning beperkt blijft. De horizontaal kracht maakt evenwicht met de dakvlakconstructie, terwijl de verticaal kracht en het kopmoment door de excentriciteit uit de etfe-kussens op de bovenzijde van de gevelstijlen wordt ingeleid. Om dit mogelijk te maken, is een 'handje' over de bestaande UNP geplaatst en aan de gevelstijl gekoppeld (afb. 9).

Gevelstijlen

Naast windlasten is het krachterspel in de gevelstijlen aan enige verandering onderhevig. Enerzijds door de zwaardere gevel en anderzijds door het extra kopmoment uit de nieuwe randligger. De aanwezige sterkte is



9. Bevestiging gevelstijl.



11. Boutverbindingen voor losmaakbaarheid.

ruim voldoende. Om de knik- en kiplengte van de slanke gevelstijlen te verbeteren, zijn regels toegevoegd. De stabiliteitskrachten zijn opgesloten in nieuwe kruisverbanden. Deze zijn, in de geest van het oorspronkelijke ontwerp, bewust niet doorgezet tot het dak, zodat er geen interactie ontstaat met de op zichzelf stabiele dakconstructie.

3D-scannen en BIM

De bestaande staalconstructie van de Klimatenkas vormt de basis voor alle nieuw toegevoegde elementen. Omdat de aansluiting van de nieuwe staalconstructie zeer nauwkeurig moest gebeuren, is met een 3D-scan (FARO HW-LS Focus S150 scanner) een pointcloud gemaakt van de gehele bestaande constructie. Omdat de kas op dat moment nog in gebruik was en de groene collectie grotendeels tot aan het dak en de gevels reikte, waren drie scanacties nodig om alle data te verzamelen en de



10. Bouwlocatie aan de Nieuwe Herengracht.



12. Loopbrug blijft gehandhaafd.

scans zodanig te koppelen dat de grondslag exact klopte. Alle data zijn vervolgens omgezet naar een BIM-model, waarin alle nieuwe onderdelen zijn toegevoegd en onderzocht op clashes. Een extra opgave hierbij was dat niet bekend was hoe de spanconstructie zich zou gedragen nadat het bestaande dak was verwijderd. Om te garanderen dat alle nieuwe onderdelen exact zouden passen, is een berekening gemaakt met een vermoedelijke terugvering van de constructie. Met het ontwerp en de uitwerking van het detail is rekening gehouden met deze terugvering, waardoor alle onderdelen uiteindelijk perfect pasten. Ook de onderdelen van de gevelbouwer en dakleverancier zijn met het inmeetmodel uitgewerkt. Zonder het gebruik van digitale technologieën zoals 3D-scanning en BIM was dit een complexe en tijdrovende exercitie geweest.

Losmaakbaar

Voor de montage van de nieuwe aansluitdetails is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van boutverbindingen. Hierdoor blijft de benodigde bewegingsvrijheid in de constructie behouden, en het is gunstiger voor het verzinkproces. Bijkomend voordeel is dat op deze manier een vrijwel volledig losmaakbare constructie is ontstaan. Wanneer de Klimatenkas aan het eind van zijn technische levensduur komt, kunnen verbindingen en kokers eenvoudig worden gedemonteerd voor hergebruik.

Ook de bestaande constructie is relatief eenvoudig geheel te demonteren. Hoe de verre toekomst van de kas er ook uitziet, de staalconstructie kan met gemak een derde termijn in.

Bouwplaats

Naast alle technische aspecten vormde ook de bouwplaatsinrichting een complexe puzzel. Rondom de kas was slechts een strook van drie meter beschikbaar. Daarom werden alle materialen just-in-time op het project aangeleverd. Bovendien werden sommige materialen via de Amsterdamse grachten naar de bouwlocatie vervoerd vanwege de beperkte wegtransportmogelijkheden in het centrum. Ook de bouwketen werden in de gracht geplaatst om de toch al beperkte werkruimte optimaal te benutten (afb. 10). •

02125 303

BOUWEN MET

vakblad over staal en staalconstructies

STAAL

