

# Krachtige evenwichtspunten

Voor een atriumdak is een ontwerp gemaakt van een koepelconstructie met een patroon gerelateerd aan het ontwerp van het bestaande gebouw. De koepel overspant 76 m en bestaat uit een achthoekige hoofdconstructie die een raster van driehoeken met radialen vormt. Binnen deze structuur is een secundaire constructie ontworpen uit dunne buizen waarin de glaspalen zijn opgenomen. In het horizontale vlak is een trekking aangebracht om de permanente horizontale krachten in balans te houden. Op vier plaatsen is deze trekking direct verbonden met de koepel voor een tweede draagweg.

ir. A.P.H.W. Habraken en ing. A. van Beelen

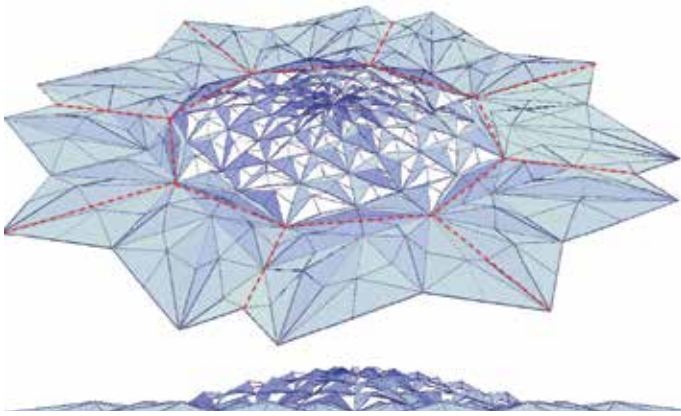
Arjan Habraken is oprichter en eigenaar van constructief ontwerp bureau SIDstudio in Leiderdorp. Daarnaast werkt hij als universitair docent aan de TU in Eindhoven.

Alexander van Beelen is constructeur bij Oostingh Staalbouw/ASK Romein in Katwijk.

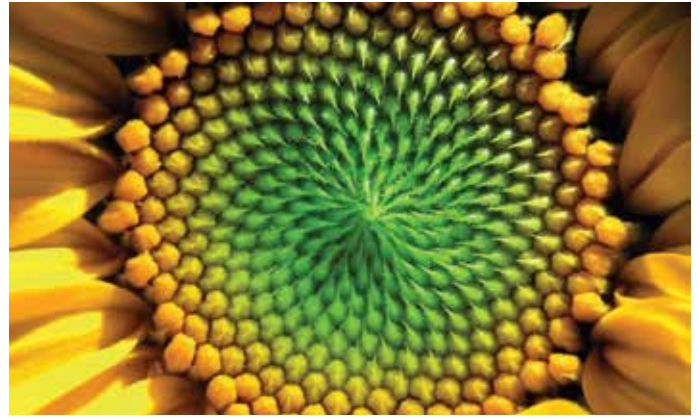








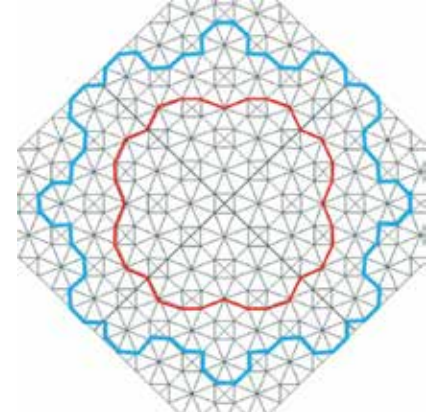
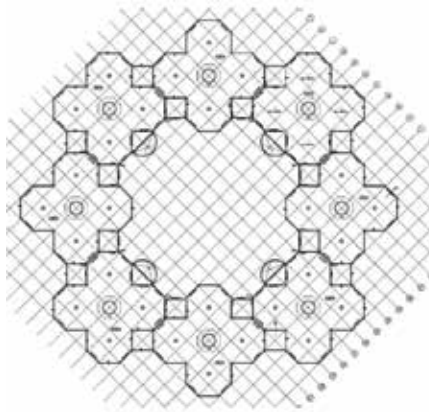
1. Ontwerpvariant zonnebloempatroon met tetraëders.



2. Gulden snede-patroon.



3. Klavervier.

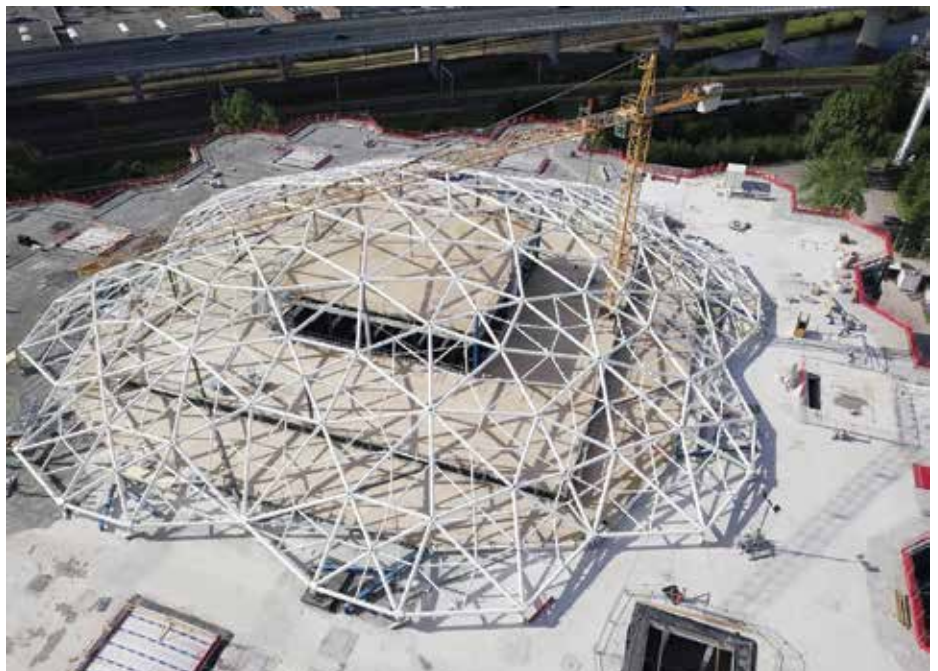


4a. Bestaande draagstructuur met orthogonaal grid (l), octagonaal grid met onderrand koepel in de vorm van een klavertje vier.

In de oksel van de A5-verbinding op de A10-ring van Amsterdam staat het pand Edge Amsterdam West. Het gebouw is in een afrondende fase van een 54.000 m<sup>2</sup> herontwikkeling. Zowel het bestaande pand uit 1970 als het renovatieontwerp komen uit de koker van de Architecten Cie. In opdracht van ontwikkelaar Edge is het gebouw opgewaarderd tot een duurzame kantooromgeving, met BREEAM Outstanding- en Well Platinum-certificaat. Het nieuwe atriumdak speelt hierin een belangrijke rol, niet alleen op duurzaamheidsaspecten, maar op het gehele functioneren en de beleving van het gebouw. Het gebouw aan de Basisweg 10 is cirkelvormig. Een overkapping was gewenst om daarmee de centrale buitenruimte, met een diameter van 76 m, te transformeren tot het nieuwe hart van het gebouw. Het dak laat veel natuurlijk daglicht binnen waardoor kwalitatieve werkplekken ontstaan en het energiegebruik aanzienlijk wordt verlaagd, mede door een extra thermische schil en minder buitengeveloppervlak.

### Ontwerptraject

Tijdens het eerste gesprek tussen architect en constructeur was er nog geen ontwerp, enkel een visie in termen van lichtinval, transparantie, energiewinning en duurzaamheid. Vele ontwerpvarianten zijn bestudeerd waaronder origamistructuren, een houten structuur met

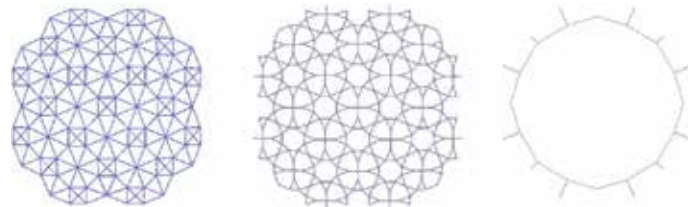
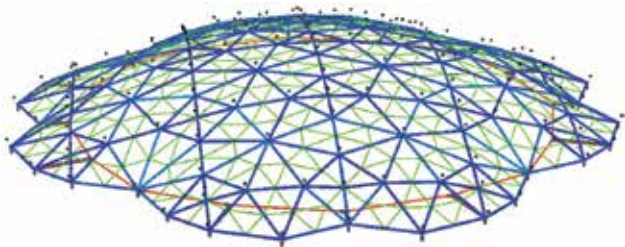


4b. Klauteren met klavers in spiraalvormige configuratie.

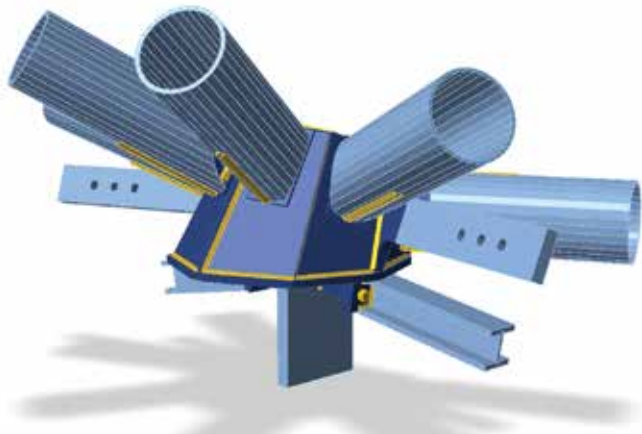
efte-kussens en de in afbeelding 1 getoonde zonnebloemstructuur. Het centrale deel van de zonnebloem overspant het atrium. De bladeren zouden het nieuwe dak van de bovenste verdieping vormen en tevens trekkring zijn voor de centrale koepel. Dit ontwerp is geïnspireerd door spiraalvormige configuratie van de zonnebloemzaden. De zaden zijn vertaald naar tetraëders met zonnecellen waarbij, net als

in de natuur, de gulden snede zorgt voor een maximale onderlinge afstand en dus maximale energieopbrengst. Het patroon toonde echter geen eenduidige relatie met het bestaande gebouw. Op tekeningen en voor onderlinge communicatie wordt altijd gewerkt met een orthogonaal grid, maar de basis lay-out bestaat uit regelmatige octagons. Niet enkel het gebouwde deel, ook het atrium kan geheel wor-





5. Hoofdgrid, secundair grid en trekking.



6. Aansluiting trekking-knoop.



7a. Voorspanlocatie koppelstaaf en ondersteuning koepel door pendelkolom.



7b. Pendelkolom in hoogste knoop.

den bedekt door één doorlopend octagonaal patroon. Dit was de juiste weg vooruit. Meerdere varianten zijn gemaakt op basis van een vierkante koepel, maar door vanuit het octagonaal patroon de koepel op te bouwen, is een randstructuur van een klavertje vier verkregen dat naadloos aansluit op de bestaande verticale draagstructuur. Uit duurzaamheids- en kostenoverwegingen is besloten het platte deel van het dak niet te vervangen, maar te renoveren, en hier plaats te maken voor zonnepanelen. De buitenrand van het klavertje vier is daarmee de buitenrand van het nieuwe dak geworden. Elke driehoek binnen het octagonale patroon heeft een lange zijde tot 9,4 m lang en een korte zijde van  $\pm 6,5$  m.

Deze maat is te groot voor een glaspaneel. Binnen deze structuur is dan ook een 2<sup>e</sup> structuur ontworpen (afb. 5).

### Constructieve werking

De koepel, met een staalgewicht van 59 kg/m<sup>2</sup>, draagt de belastingen van eigengewicht, glas, wind, sneeuw en temperatuur af via hoofdzakelijk axiale krachten. In eerste instantie maakte het secundaire grid nog deel uit van de hoofddragconstructie van de koepel en was er een extra knik voorzien in het hoofdgrid, daar waar het secundaire grid aansluit. Constructief onderzoek heeft aangetoond dat mede kijkende naar de detaillering, productie, montage en kosten, het beter was

om het secundaire grid niet als hoofddraggers mee te laten werken en als dunnere buizen uit te voeren. Ze zullen geen axiale krachten doorgeven en functioneren dus als gordingen tussen de hoofddragstructuur.

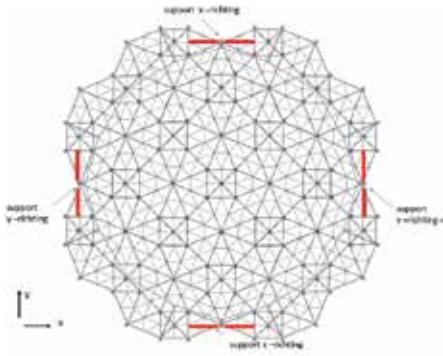
In verticale richting wordt het dak op 32 plaatsen ondersteund bij de knooppunten in de randligger. De horizontale spatkrachten uit de koepel worden opgenomen door een trekking. Ze kunnen niet door het gebouw opgenomen worden, mede vanwege bestaande dilataties. De trekking ligt in het horizontale vlak van de opleggingen en wordt via koppelstaven op twaalf locaties gekoppeld aan de koepelconstructie en op vier plaatsen rechtstreeks gekoppeld aan een knoop van de koepel.

Door lengte-aanpassing van de twaalf radiaal georiënteerde koppelstaven is de trekking voorgespannen. Dit voorspannen is voorafgaand aan het plaatsen van het glas gebeurd, waarbij de koepel voorgespannen wordt met een bepaalde zee om de juiste eindvorm te verkrijgen.

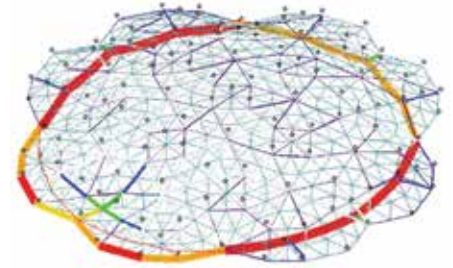
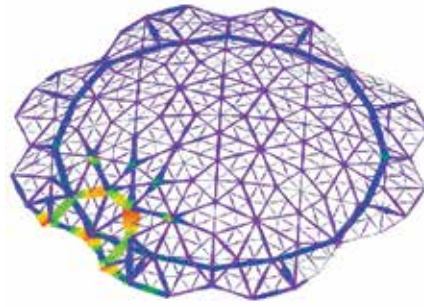
Het dak is gestabiliseerd door horizontale koppelingen aan de dakvloer, die weer verbonden is aan de betonnen stabiliteitskernen. Het is hierbij van groot belang dat het dak bij temperatuurwisselingen naar alle kanten kan blijven uitzetten, maar niet kan verplaatsen of roteren. De 32 steunpunten zijn uitgewerkt als pendelkolommen; twee zijn gesteund in x-richting en twee in y-richting.

### Constructieve controle

Met het octagonale grid, de buitenrand in de vorm van een klavertje vier en een maxi-

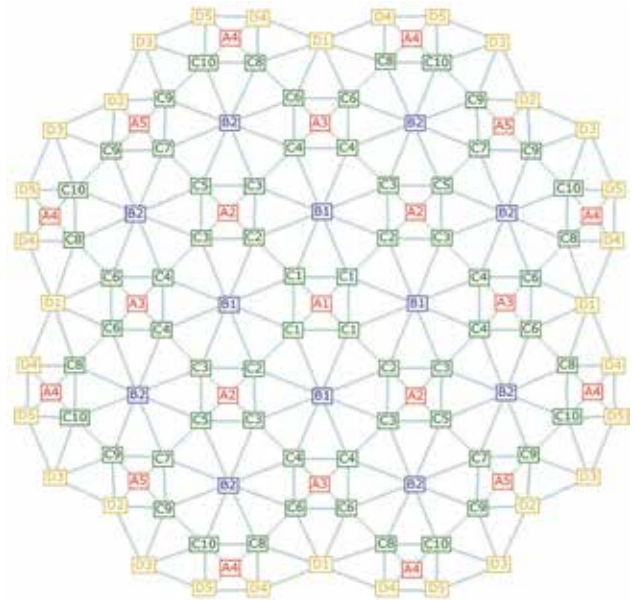


8. Stabilisatie koepel.

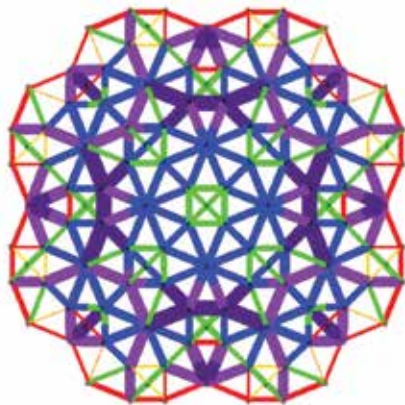


10. Robuustheid. Falen steunpunt (l) en falen trekking.

knoop A
1 x A1
4 x A2
4 x A3
8 x A4
4 x A5 +
21 x A
knoop B
4 x B1
8 x B2 +
12 x B
knoop C
4 x C1
4 x C2
8 x C3
8 x C4
4 x C5
8 x C6
4 x C7
8 x C8
8 x C9
8 x C10+
64 x C
knoop D
4 x D1
4 x D2
8 x D3
8 x D4
8 x D5 +
32 x D



11. Soorten knopen (A t/m D) en geometrieën (1 t/m 10).



9. Symmetrie: omhullende axiale krachten door 170 belastingcombinaties.

male toelaatbare hoogte is begonnen met de bepaling van de juiste koepelgeometrie. Hierbij zijn meerdere methodes geanalyseerd, waaronder de *force density*- en de *particle spring*-methode, beide voor geometrische vormbepaling op basis van krachterevenwicht in knooppunten. Vorm en interne krachswerking zijn gerelateerd. De belasting op de constructie verandert als de vormgeving verandert. De ideale vorm wordt dan ook iteratief gevonden. Doordat de onderrand de vorm heeft van een klavertje vier, ontstaan aanvullende

krommingen die de koepel extra constructief verstijven. Nu zijn er twee spiegelsymmetrische taartpunten die beide vier keer voorkomen. Om rekentijd te besparen is de engineering gedaan door maatgevende asymmetrische sneeuw- en windbelastingen op een kwart van de koepel toe te passen en de dominante resultaten te spiegelen. Op bepaalde momenten zijn toch ook de belastingcombinaties uit alle hoeken geanalyseerd, om zeker te stellen dat symmetrie in de interne krachten gewaarborgd is.

In totaal zijn er 36 belastinggevallen die samen 170 belastingcombinaties maken. Maar om rekening te houden met een aantal onzekerheden met betrekking tot de uitvoering, zijn er berekeningen gemaakt met verschillende knooppstijfheden en niveau van voorspanning in de trekking.

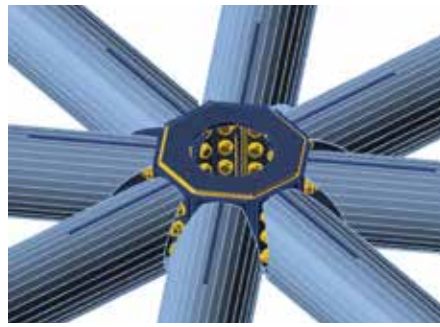
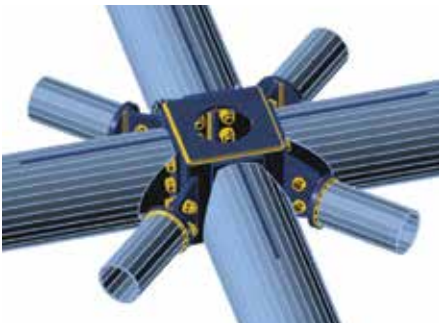
De details zijn volledig met FEM-modellen geanalyseerd om sterkte en stijfheid vast te stellen (*afb. 14a, links*). Omdat een kopplaat-aansluiting met een trekkracht vaak minder momentstijf is dan met een drukkracht, zullen de stijfheden van de knopen variëren. Daarom is een gemiddelde maximale en minimale stijfheid bepaald voor alle kopplaat-aansluitingen en is de koepel voor deze twee

varianten doorgerekend. Ook het niveau van voorspannen van de trekking is in de praktijk niet exact vast te leggen. De hoofdberekening is gemaakt met een minimale voorspanning en met een factor 2 hogere voorspanning. Lagere knooppstijfheden resulteerden in hogere momenten en axiale krachten in de profielen, maar lagere momenten in de knopen. De hogere trekkracht in de trekking resulteerde met name in verlaging van de trekkrachten in de profielen langs de buitenrand. Nadat met statische berekeningen het ontwerp is gecontroleerd, zijn onder andere niet-lineaire, lokale en globale knik, bouwexcentriciteit, steunpuntzakkingen, calamiteiten- en bouwvolgorde-berekeningen gemaakt. Hierna wordt kort ingegaan op de laatste twee berekeningen.

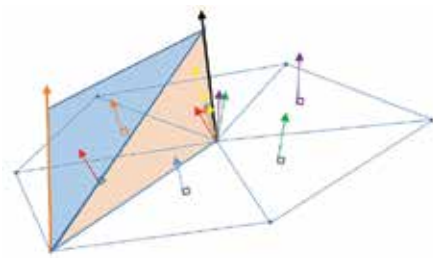
### Calamiteitenberekening

Om de robuustheid van de koepel te beoordelen, zijn drie typen controles gedaan: falen profiel in het hoofdgrid, falen steunpunt en falen trekking. Gezien het driehoekig grid van de koepel kon bij de eerste twee studies eenvoudig een tweede draagweg gevonden worden zonder zorgwekkende spanningsontwikkelingen. In *afbeelding 10* is goed te

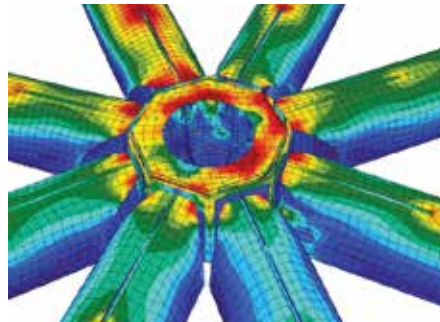




12. Principes vier-, zes- en achtkantsknopen (type A, C en B).



13. Bepaling knooporiëntatie als gemiddelde normaalvector van omringende vlakken.



14a. FEM-analyse knoopverbinding met Idea Connection.



zien hoe een krachtenboog om het falende steunpunt gevormd wordt. Maar bij het falen van de trekkring kan een andere ring het niet zomaar overnemen. Of toch wel? De rand in de vorm van het klavertje vier neemt het deels van de trekkring over. Dit is ook de reden dat de trekkring op vier locaties verbonden is met een knoop. Als de trekkring faalt, dan valt enkel een kwart deel uit en daar neemt de rand van de koepel het over. In deze situatie ontstaan wel vervorming en plastische scharnieren, maar er zal geen voortschrijdend falen van elementen zijn.

### Detailontwerp

Door de symmetrie hoeft maar een achtste deel van de koepel uitgewerkt te worden. In het ontwerp komen dan ook maar een beperkt aantal soorten knopen voor (afb. 11).

- A-knoop: aansluiting van vier primaire en vier secundaire staven.
- B-knoop: aansluiting van acht primaire staven.
- C-knoop: aansluiting van zes primaire staven.
- D-knoop: aansluitingen rand.
- Aansluiting secundaire staven.

Door de verschillen in belastingen, wanddikte en hoeken is geen enkele knoop binnen een achtste deel exact hetzelfde. Vanuit esthetisch oogpunt, maar ook voor het produceren en monteren van de staalconstructie is het van belang hier gelijkmatigheid en repetitie in te vinden. Gekozen is voor een 'wastromel'-principe. Hierbij is de knoop het vaste en repeterende onderdeel en worden de staven hierop aangesloten met een kopplaatverbinding. De knoop is binnen zijn soort (A,



14b. Alle knopen met identieke platen, lassen en boutdiameters voor productie.

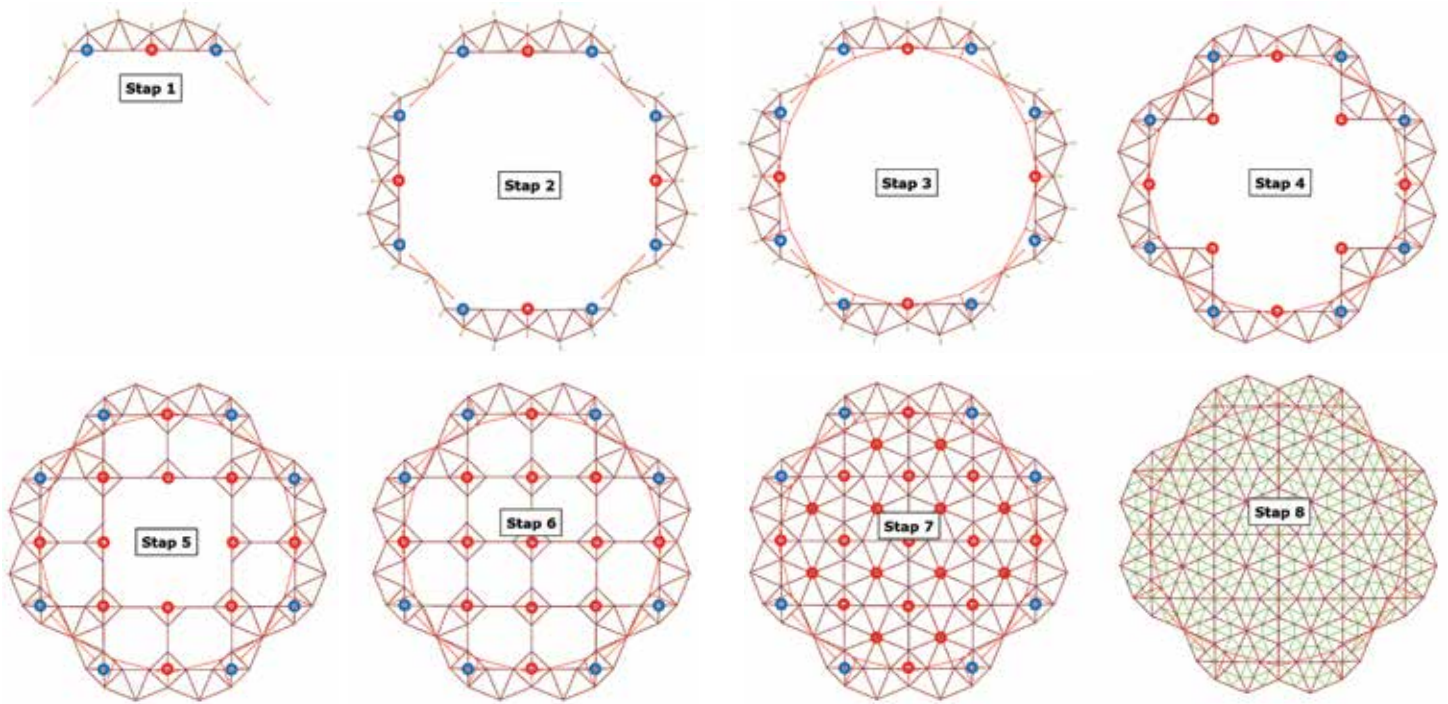
B, C) voor elke positie identiek. Verschillen in hoeken worden verwerkt in de kopplaten. Reden hiervoor is dat de buizen machinaal gesneden kunnen worden waardoor scherpe/kleinere toleranties gehaald kunnen worden en afwijkingen worden geminimaliseerd. Ook al zijn de profilering en optredende krachten zeer divers voor de verschillende posities in de koepelconstructie, er is wel gekozen om alle knopen te voorzien van identieke platen, lassen en boutdiameters voor repetitie.

### Knoopcoördinatie

Voor elke knoop is een eenduidige oriëntatie vastgelegd. De naar buiten toe gerichte centrale as is het gemiddelde van de normaalvectoren van alle aangrenzende driehoekige vlakken. Aan beide zijde van een staaf is de knooporiëntatie dus anders. De staven van

het hoofdgrid zijn in twee delen gesplitst zodat elk deel de oriëntatie gegeven kan worden van de knoop waarop hij aansluit. Dit is van groot belang om de knoopkrachten voor de detailberekeningen in de juiste richting te bepalen. De verschillende eindknooporiëntaties zouden voor bijvoorbeeld een rechthoekig profiel een torsie in het profiel introduceren, maar bij een ronde buis geeft dit geen geometrische complexiteit. De oriëntatie van de secundaire staven is altijd gelijk aan de oriëntatie van het vlak waarin deze ligt. Het berekenen en toetsen van de standaardverbindingen lijkt eenvoudig, maar is nog best een complexe exercitie door de verschillen in interne krachten tussen de diverse posities. De staaf met de maximale drukkracht hoeft nog niet per se de maatgevende situatie voor een samengestelde knoop te geven. Een andere situatie kan bijvoorbeeld weer een





15. Stappenplan.

hogere moment hebben, een hogere sommatie van normaalkrachten of juist een combinatie. Uit de berekeningen kwamen duizenden regels aan staafkrachten. Handmatig controleren is geen optie. De mogelijk maatgevende knooppunten moeten dan ook gefilterd worden voor de verschillende knopen. Tussen constructeur en staalbouwer is hiervoor een eenduidige aanpak besproken over de structuur van aanleveren van gegevens (tabellen van knopen, staven, belastingcombinaties, type interne krachten). Met een Python-script, met daarin geformuleerd koppelen- en zoekopdrachten voor de aangeleverde informatie, zijn de verschillende tabellen aan elkaar gekoppeld. Vervolgens zijn hierin de maatgevende combinaties automatisch bepaald voor elke staaf separaat, maar ook elke samenwerking tussen de verschillende staven op de knopen.

### **Van ontwerp naar product**

Voor de productie is de staalconstructie getekend in Tekla. Uitgangspunt was daarbij het door de constructeur bepaalde hartlijnenmodel met exacte knooplocaties, vastgestelde knooppunten, de profileringen, hun lokale assenstelsel, de onbelaste staallengtes en de interne staaf- en knooppunten van alle belastingcombinaties, zowel in de eindsituatie als tijdens de bouw.

Het Tekla-model is parametrisch opgezet zodat tijdens de engineering en het uittekenen van de details direct alle variabelen in geometrie en interne krachten meegenomen konden worden.

Doordat de koepel veel verschillende hoeken en oriëntaties heeft, maar wel veel gelijk-





## Projectgegevens

Locatie Basisweg 10, Amsterdam • Opdracht Edge Technologies, Amsterdam • Constructief ontwerp koepel SIDstudio, Leiderdorp (Arjan Habraken) • Constructief ontwerp renovatie onderbouw Van Rossum, Amsterdam • Architectuur De Architecten Cie, Amsterdam (Branimir Medić, Eric van Noord) • Uitvoering G&S Bouw, Amsterdam • Staalconstructie Oostingh Staalbouw/ASK Romein, Katwijk • Glas Kingspan Light + Air, Uden • Fotografie Bert Teunissen, Oostingh/ASK



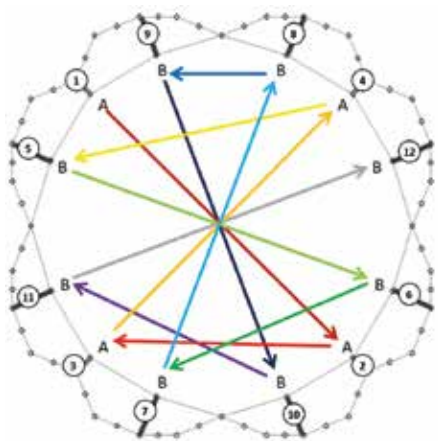
16. Bovenaanzicht stap 6.



17. Tijdelijke verstelbare steun onder hoogste punt.

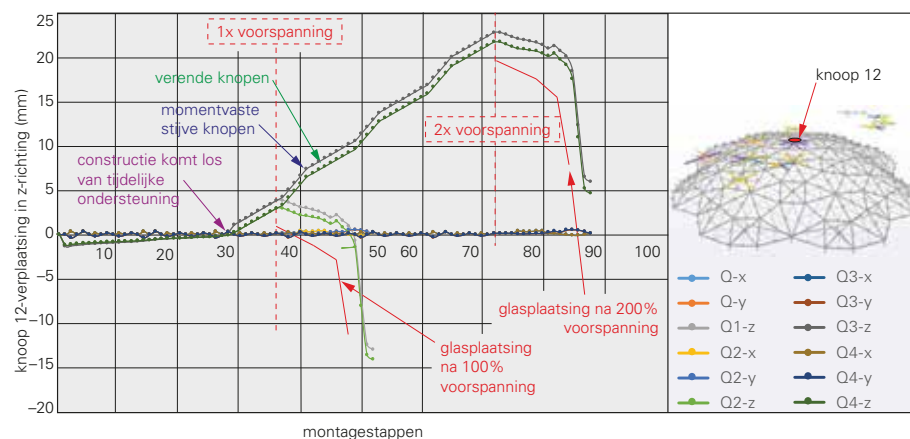


18. Mock-up.



- Stap 1 – tot 50% aandraaien (kruislings 1 t/m 12):  
 – voor A: 5,5 mm inkorten;  
 – voor B: 12,5 mm inkorten.
- Stap 2 – tot 100% aandraaien (kruislings 1 t/m 12):  
 – voor A: nog eens 5,5 mm inkorten tot 11 mm totale inkorting;  
 – voor B: nog eens 12,5 mm inkorten tot 25 mm totale inkorting.
- Controleren hoogtemaatvoering.  
 Eindmaat voorgespannen onbelaste constructie bereikt?  
 – ja: montage is klaar;  
 – nee: stap 3.
- Stap 3 – tot 150% aandraaien:  
 – voor A: nog eens 5,5 mm inkorten tot 16,5 mm totale inkorting;  
 – voor B: nog eens 12,5 mm inkorten tot 37,5 mm totale inkorting.
- Controleren hoogtemaatvoering.  
 Eindmaat voorgespannen onbelaste constructie bereikt?  
 – ja: montage is klaar;  
 – nee: terugkoppeling naar constructeur.

19. Aanspanvolgorde trekking.



20. Analyse rekenmodel verticale verplaatsing topknoop (12) tijdens voorspannen en glasplaatsing.

vormige knopen, is er gekozen om met een API-koppeling een aantal macro's te programmeren. Net als bij de detailberekening zijn er in hoofdlijnen vier typen knopen (macro's) waarbij meerdere hoofdstaven bijeenkomen. Met deze macro's is het mogelijk snel 80% van alle verbindingen te modelleren. Voordat de volledige koepelconstructie in productie ging, werd er een mock-up gemaakt. Met de ervaringen uit deze mock-up

(afb. 18) konden staalbouwer en glasleverancier het productie- en montageplan verder optimaliseren. Hierbij zijn onder andere de optimale posities voor puntmarkering en scribing bepaald en is de keuze gemaakt voor gelaste hoeken (i.p.v. gezet) in de knoop voor een optimale maatnauwkeurigheid. Ook kon de architect de laatste aanpassingen doorgeven. De staalconstructie van de mock-up werd ook gebruikt bij de uiteindelijke constructie.

## Montage

Voor een snelle en veilige montage is elke montageshap (afb. 15) doorgerekend en er gekeken of de tijdelijke optredende krachtwerving en verplaatsingen geen grote invloed hebben op de constructie in de eindfase. In stap 1 t/m 3 wordt een stalen ringstructuur gemaakt met de trekking om vervolgens in een grof grid de grote overspanningen te realiseren (stap 6). Tijdens montage rustte de koepel op 25 tijdelijke steunpunten om de vorm te bewaken. De tijdelijke werkvloer diende ook om de renovatiewerkzaamheden onder de koepel doorgang te laten vinden.

## Voorspannen, maatvoeren, inmeten

Nadat de volledige staalconstructie was gemonteerd, kon er begonnen worden met het voorspannen van de trekking. Om dit zoveel mogelijk gelijkmatig en gecontroleerd te doen is een instructie gemaakt met een kruislingse aandraai volgorde in stappen van circa 6 mm (afb. 19). Na elke cyclus zijn de hoogte van de constructie en de stand van de pendelkolommen ingemeten en vergeleken met de analyse. Als extra controle zijn de aandraaimomenten gemeten van de boutverbindingen om een indicatie te krijgen van de daadwerkelijke spanning die op de verbinding gezet wordt. In afbeelding 20 is de analyse van het rekenmodel te zien van de verticale verplaatsing van de topknoop (node/knoop 12) tijdens de verschillende voorspanstappen en het plaatsen van het glas – zowel voor 100% als 200% voorspannen.

Door uitgebreide en gedetailleerde voorbereiding met nauwe samenwerking tussen de betrokken partijen is de stalen koepelconstructie met een vrije overspanning van 76 m op een efficiënte en tijdsbesparende manier uitgewerkt en vervolgens in acht weken opgebouwd. •