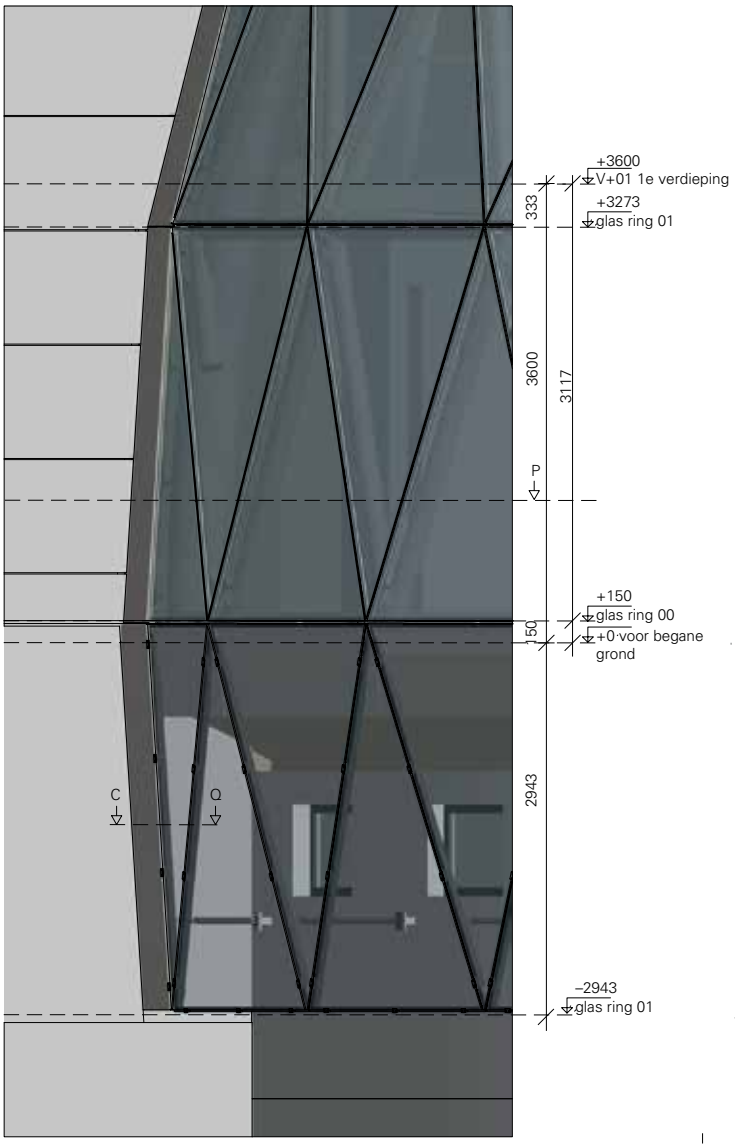
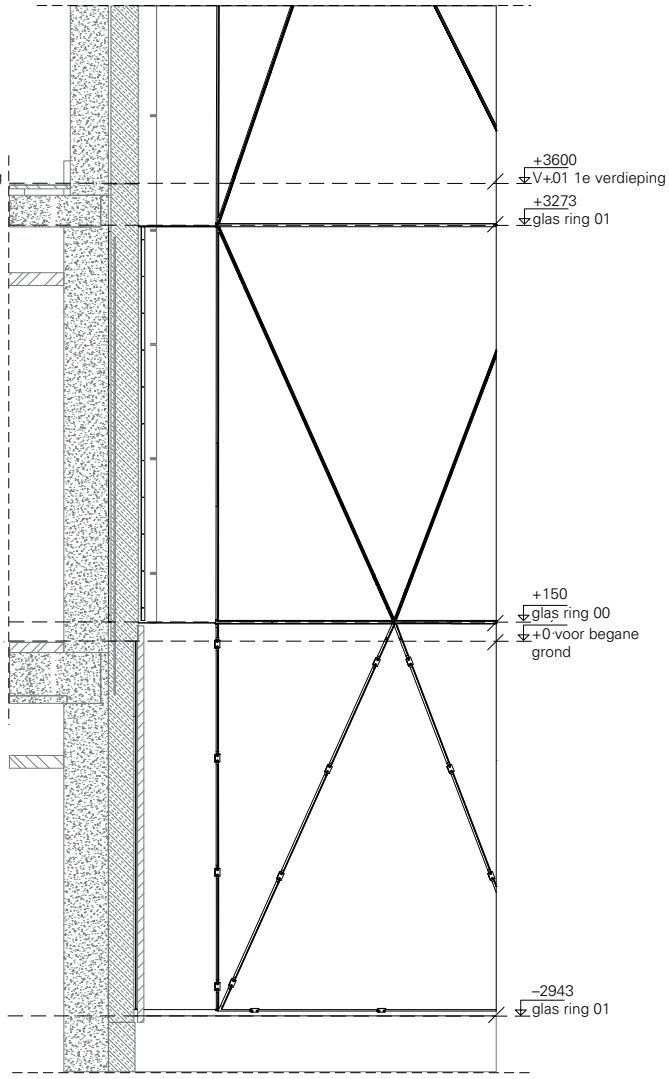
Ordelijke verdeling

Het middenstuk van de Dome heeft 24 verbindingen waar de radii samenkomen en de koepel uit staal heeft 11 ringen, precies passend om de koepel constructief te activeren. De glasmaat is leidend en de staalconstructie is op een zo gelijk mogelijke verdeling ontworpen. Voor een economische repetitie in productie maar zeker ook montage. Maar strikt genomen is geen sprake van een geodetische koepel, want er is een 'hap' uit, voor de toneeltoren. Dat vroeg extra engineering bij de aansluiting.

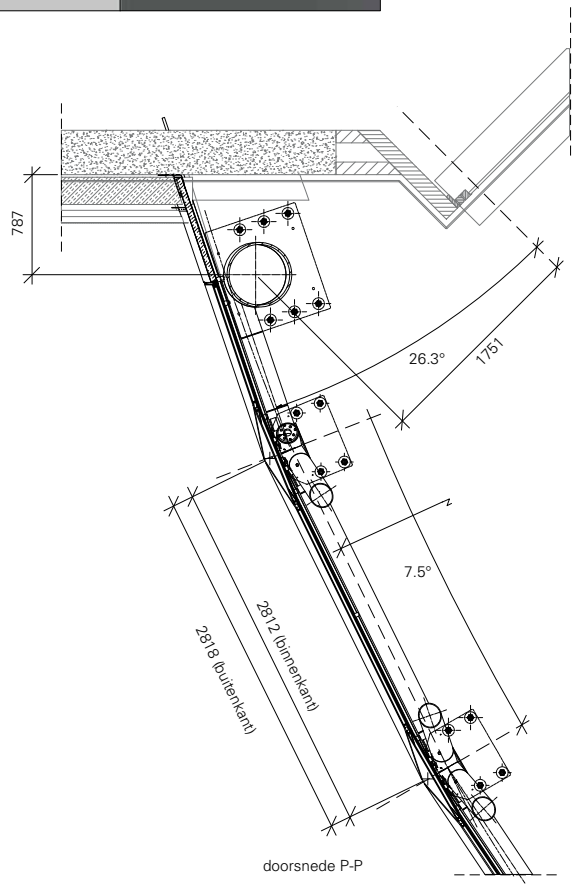
Van de redactie, gebaseerd op de inzending voor de Nationale Staalprijs van Inge Eekhout en met dank aan Arjan Klem. Beiden van Octatube, Delft.

De staalconstructie van de koepel is opgebouwd uit stalen buizen met een diameter van 178 mm. Ieder knooppunt verbindt zes buizen. Het midden van de knoop bestaat uit een korte cirkelvormige buis (diameter 140 mm) met loodrecht op de omtrek zes gelaste verbindingstukken waarop de buizen aankomen. De maximale breedte van het glas (3,2 m) was bepalend voor de geometrie. De knopen en buizen vormen een patroon die de driehoekige glaspanelen volgen. Aan de basis van de constructie waar de glaspanelen het grootst zijn, zijn ook de driehoeken het grootst (hxb: 3087x2781 mm). Richting de top van de koepel worden de driehoeken (en glaspanelen) kleiner (hxb: 2806x1045 mm). Een cirkelvormig sluitstuk met een diameter van 3 m dicht de staalconstructie aan de top af. Dit sluitstuk is opgebouwd uit dezelfde ronde buizen als de rest van de koepel. Het sluitstuk heeft 24 connecties met de koepel die allemaal precies moesten passen, om de koepel constructief te activeren. Bij te grote



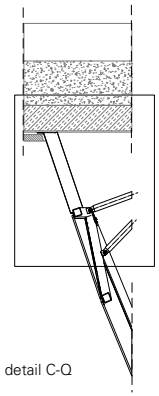


doorsnede C

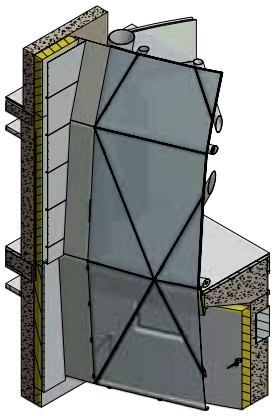


doorsnede P-P

De koepel bestaat uit elf ringen. Fragment van drie horizontale ringen. De driehoekige glaspanelen worden richting de top van de koepel geleidelijk kleiner.

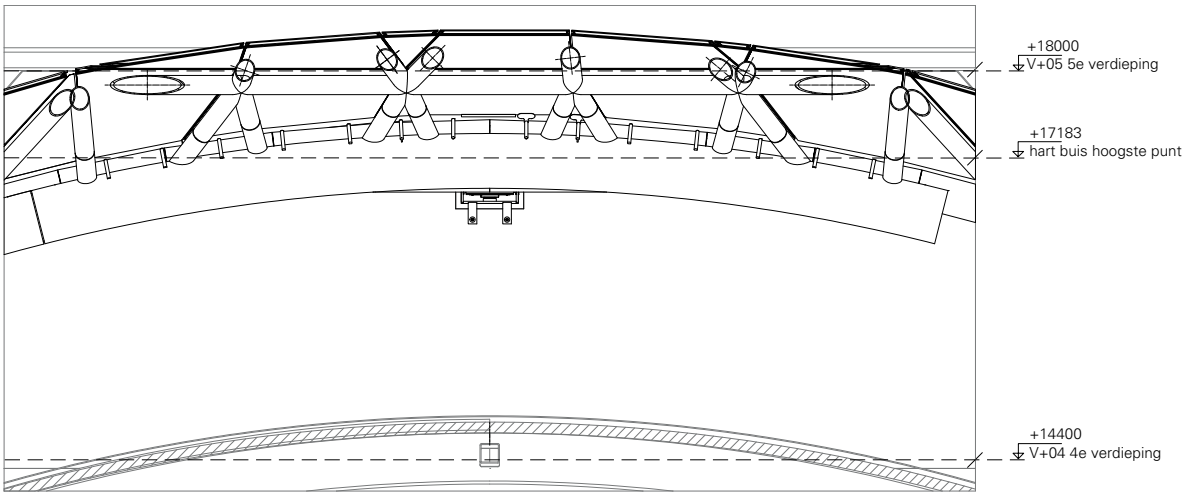


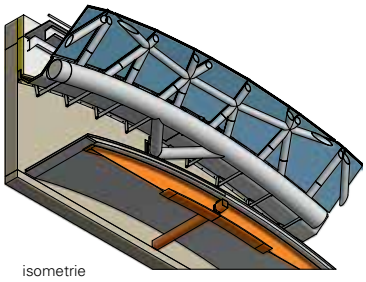
detail C-Q



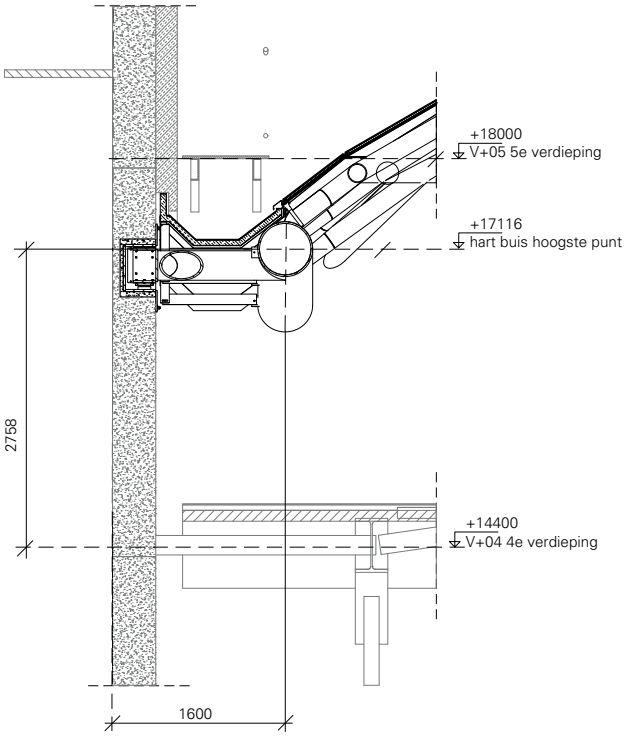
isometrie

Links. Onderste steunpunt, uitgevoerd als bolscharnier om verschillende rotaties op te kunnen vangen.

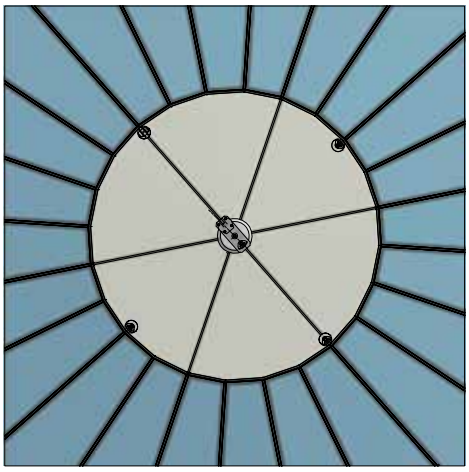




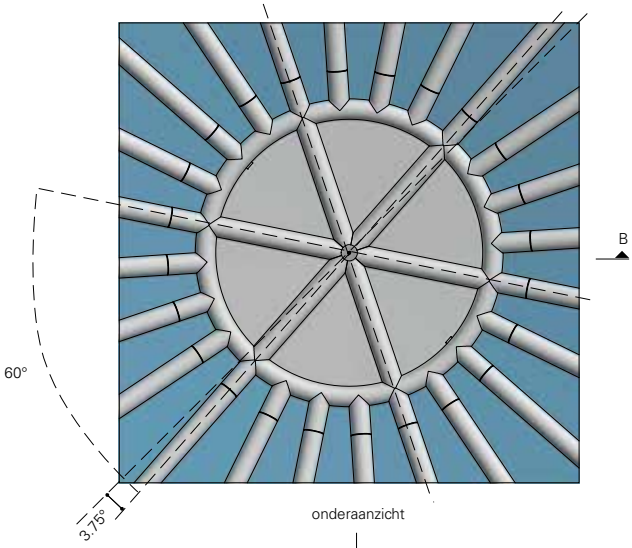
isometrie



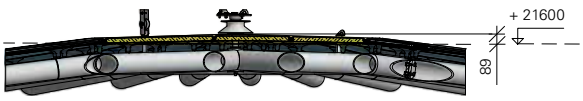
Boven: aansluiting met zware randligger tegen betonwand.
Rechts: tussen koepel en toren ligt een 1 m brede goot, waarbij de aansluiting is afgewerkt met gebruikelijke rubbers en slabben.
Onder: het constructieve en esthetische sluitstuk, de 'kroon'.



bovenaanzicht

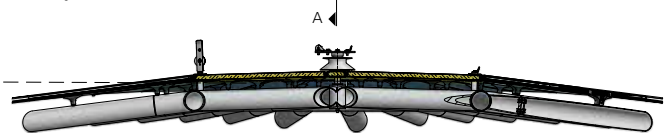


onderaanzicht



onderaanzicht

doorsnede A



doorsnede B

Ieder knooppunt verbindt zes buizen.

Sluitstuk met 24 connecties.

afwijkingen zou de bol niet integer (stabiel) zijn. Bovenin de 'kroon' zit een *boulder* (bevestigingspunt) waar de automatische glaswasrobot vanaf kan *abseilen*.

Buisconstructie

Het Programma van Eisen was redelijk summier. Staal voor de hoofddraagconstructie, U = 1,3 W/m²K voor het glas, geen specifieke afwerkingseis voor het staaloppervlak, behalve de kleur (RAL 9010) en maximale transparantie. Zo luidde de wens van Just Architects en geestelijke vaders Steef en Ton van der Veldt.
Het model van Pieters Bouwtechniek, gebaseerd op het architectonisch ontwerp, was uitgangspunt voor een variantenstudie waarin vrijwel direct duidelijk werd dat een systeem met stalen buizen de beste constructieve vorm was. Uitgangspunt was dat de buizen de glaslijnen moeten volgen om het glas te kunnen bevestigen. De praktische maximale glasmaat bepaalde daarbij de geometriestudie voor een optimaal aantal onderdelen. Momenteel is een glasbreedte van ± 3,2 m maximaal haalbaar. Vervolgens is de staalconstructie ontworpen op een zo gelijk mogelijke verdeling over de omtrek van de koepel voor een economische repetitie in productie en montage. Hierdoor zijn zowel het staal als de glaspanelen ordelijk verdeeld over de koepel, zonder storende afwijkingen in het patroon.
In totaal bestaat de koepel uit elf horizontale ringen. De driehoekige glaspanelen worden richting de top van de koepel geleidelijk kleiner. Om te voorkomen dat de driehoeken te scherp en daardoor moeilijker te produceren werden, gaat de glasverdeling per ring tussen ring 9 en 10 van 48 naar 24 stuks. In totaal zitten er bijna 1000 glaspanelen in de koepel.

Knooppunten

Per ring zijn de aansluitingen identiek. In principe dus elf varianten, op de aansluitingen tegen de toneeltoren na (waarover straks meer). Doel was om de knopen zo consistent mogelijk te maken voor een goede passing van de koepel en daarnaast om de lassen zo min mogelijk zichtbaar te laten zijn. Consistent houdt in: per koppeling dezelfde afwijkingen, met een tolerantie van 1 mm geënt op de glastoleranties. Hiervoor zijn diverse testen gedaan en mallen (met klemmen) gemaakt die gelijkvormigheid garanderen. De kroon is eveneens geprefabriceerd in een mal, voor dezelfde millimeter nauwkeurige productie.

Gietstukken

Architectonisch was een visuele ontkoppeling van de glazen schil en de stalen constructie van belang. Een doorlopend profiel of een gelaste bevestigingsplaat op de buis was dus geen optie. Standaardoplossingen voor de bevestiging vielen daarmee af. Speciaal voor dit project zijn door Octatube gietstukken ontworpen en berekend, en door Deltaplus Metaalproducten geproduceerd (in China). Het glas moet om de 60-100 cm worden ondersteund. De grote hoeveelheid (3000 stuks donkerblauw gepoedercoate voetjes) maakte gietwerk economisch haalbaar. De donkere *spacers* in het glas en afdichtingsrubber laten de voetjes vervolgens buiten het zicht verdwijnen. Hierdoor lijkt het alsof de glazen schil los over de staalconstructie gevouwen is. Ook van buitenaf is de verbinding niet zichtbaar.

'Hap'

De koepel grenst aan de theatertoren en is daarom niet helemaal bolvorming: er is een 'hap' uitgenomen. Hierdoor verliest het van nature sterke constructieve principe drastisch aan stijfheid. De uitsnede is niet ideaal, want asymmetrisch en vroeg extra engineering bij de aansluiting. Door sneeuwbelasting zou de koepel 100 mm kunnen doorbuigen en mocht niet trekken aan of duwen tegen de theatertoren. Daarom is een randbalk van 500 mm hoog ontworpen die de krachten van de koepel afvoert naar de vloer. De rand bevat veel unieke onderdelen en aansluitingen die per stuk zijn uitgewerkt. Daarbij gaat het niet alleen om de diameter van het staal, maar om alle specifieke krachten op de aparte aansluitingen (zie Steunpunten).
De randbalk (geproduceerd door Oostingh Staalbouw) – en daarmee de rest van de koepel – is constructief losgekoppeld van de theatertoren en enkel via drie steunpunten aan de toren verbonden. Omdat de koepel theoretisch bedekt kan zijn met veel sneeuw, waren deze steunpunten noodzakelijk voor spatkrachten. Ook is de wanddikte van de staalconstructie rond de randbalk lokaal verdikt tegen torsie, 12 in plaats van 6 mm.

Gietstukken voor visuele ontkoppeling staal-glas.

Randbalk (rechts) van 500 mm.

Elk knooppunt bevat een lichtpunt.

Steunpunten

De onderste (buitenste) steunpunten zijn uitgevoerd als bolscharnieren om alle verschillende rotaties op te kunnen vangen. Die twee steunpunten kunnen horizontaal vrij bewegen. Het middelste steunpunt bovenin daarentegen is horizontaal in het vlak van de toren gefixeerd, eveneens met een bolscharnier. Het vormt het nulpunt van de constructie: het vaste punt waaruit de koepel kan vervormen. Vanwege de symmetrische bolvorm, zet de constructie rondom hetzelfde uit of krimp het door temperatuurswisselingen, en lost de krachtswerking zichzelf in principe 'intern'op, maar fixatie is wel noodzakelijk.

Snijden

Om de zes buizen per verbinding nauwkeurig te laten aansluiten op een knooppunt was het belangrijk dat ze precies op maat werden afgesneden. Een buis is echter nooit helemaal rond, maar altijd enigszins ovaal, tot wel 1 cm, wat binnen de producttolerantie valt. Bovendien brengt het snijden extra warmte in de buis waardoor de buis kan vervormen. Hierdoor kunnen afwijkingen ontstaan die ervoor zorgen dat de buizen niet goed passen en moeilijk te lassen zijn. Het herstellen van de afwijkingen tijdens het lassen kost veel tijd. Daarom is extra aandacht besteedt aan het snijden. Met een aantal testen zijn de instellingen van de snijmachine bepaald, voor een tolerantie van maximaal 1 mm. Omdat het snijden niet loodrecht op de buis gebeurt, maar diagonaal en omdat het materiaal schuin afgeknot wordt, is de uitvoering 'handmatig' gebeurd (in Duitsland, vlakbij de Tsjechische grens), waarvoor vakmanschap nodig was. Het snijden zelf is niet handmatig, maar het gekalibreerd meten en afstellen wel. Dat vraagt om inzicht van de man achter de machine. In dit geval is de productie specifiek rondom één persoon gepland die het ambacht verstaat.

Montage

Opvallend is dat slechts drie monteurs samen de staalconstructie hebben opgebouwd in een tijdsbestek van vijf dagen per ring. Eén monteur bediende de hijskraan en hees de onderdelen op hun plek, terwijl de andere twee de stalen buizen monteerden. Er is bewust gekozen om geen grote prefab frames te gebruiken maar juist te werken met losse buizen en knooppunten die ter plekke zijn gemonteerd. De montage is niet per se simpel, maar het concept is wel eenvoudig: er is immers veel repetitie. Kleinere elementen (van max. 2,7 m) zijn bovendien relatief makkelijk te hanteren in zowel de werkplaats als on site en vragen weinig planning en daardoor minder tijd en moeite: het transport is eenvoudiger, de kraan is kleiner en er zijn minder mensen nodig. De opbouw verliep per knooppunt waaraan een enkele buis voorgemonteerd was. Dat vergemakkelijkte de stapeling.
Door de nauwkeurige prefabricage pasten alle onderdelen precies. Maar een koepel werkt constructief pas goed als deze af is. Cruciaal moment tijdens montage was sowieso het begin vanwege de verankering, daarna is het simpel doorbouwen. Maar het inhijsen en monteren van het sluitende element in het 'dak' was spannend: er was immers een kans dat de koepel rondom het gat naar binnen zou 'leunen' door het eigengewicht – ondanks alle berekeningen, mock-ups en tests. Als dat het geval was geweest, dan had het gat op een of andere manier naar buiten moeten worden gedrukt. De spanning bleek onnodig; het laatste sluitstuk paste precies waardoor zo'n actie uitbleef.
Daarna is het glas aangebracht.

Verwarming

In eerste instantie zouden verwarmingsbuizen achter de staalprofielen, onder het glas, worden aangebracht. Door DGMR is tijdig berekend dat die verwarmingsbuizen overbodig waren. De luchtverwarming bleek toereikend. Prettige bijkomstigheid: de kans op thermische glasbreuk is direct voorkomen.

Verlichting

Ook zou eerst de verlichting via buizen geklemd aan de constructie aangebracht worden. Maar met de verlichtingsontwerper is besloten om de verlichting te integreren in de constructie.
In elk knooppunt is een lichtpunt aangebracht dat separaat in alle richtingen gedraaid kan worden om de foyer aan te lichten. Er is ook een lamp naar buiten gericht dat in elke mogelijke kleur geschakeld kan worden. Hierdoor is de koepel in de avond duidelijk herkenbaar.
De bedrading voor de verlichting zit volledig weggewerkt in de buizen. Een installateur kan bij de bedrading en aansturing van de ledverlichting via klepjes voor onderhoud of reparatie/vervanging. De klepjes zijn tevens gebruikt als montageopening voor de bevestiging van de buizen aan het middenstuk en diende daardoor een dubbele functie. Ze zijn niet zichtbaar, aan de buitenzijde van de knoop gepositioneerd. •