



Uitzichttoren Wörthersee.

Overgenomen uit "Deutsches Ingenieurblatt" van juli-augustus 2014
vertaald door ir.J.G.M.Raadschelders c.i.

Boven de Wörthersee in Kärnten (Oostenrijk) steekt sinds een jaar een uitzichttoren 100 m in de hoogte. Het bouwwerk op de Piramidenkogel (bergtop) heeft een draagconstructie uit hout en staal en geldt wereldwijd als het hoogste bouwwerk in zijn soort. De geometrie van de toren is slechts gebaseerd op 4 kengetallen, een uitdaging voor de ontwerpers.

Op de plaats van de nieuwe toren stond tot oktober 2012 een 54 m hoge uitzicht- en televisietoren uit gewapend beton uit 1968; deze werd uiteindelijk opgeblazen. Na een bouwtijd van amper acht maanden werd het 8 miljoen euro kostende nieuwe object geopend. Moeilijke eigendomsverhoudingen, veranderde toeristische randvoorwaarden en de slechte bouwtoestand van de vorige toren zorgden ervoor de gemeente Keutschach tot de nieuwbouw besloot. Bij de daarvoor uitgeschreven ontwerpwedstrijd in 2007 stond de wens naar een hedendaagse innovatieve oplossing voorop. Als een van de voorwaarden voor de wedstrijd was bovendien aangegeven dat men hout als lokale grondstof zowel ecologisch als innovatief bouw materiaal diende te gebruiken. Bovendien moest de toren een unieke vorm krijgen en voldoen aan de modernste eisen voor een toeristisch aantrekkingspunt.

SYMBIOSE TUSSEN ARCHITECT EN CONSTRUCTEUR

Het winnende team van de wedstrijd bestond uit de architecten Markus Klaura, Dietmar Kaden en Erich Laure, evenals de constructeur Markus Lackner en de kunstenaar Hanno Kautz. Vanaf het begin moest een begaanbare sculptuur worden ontworpen met een naar alle zijden open constructie, welke rondom een gelijkmatig interessant verschijningsbeeld zou bieden, en dat niet terugvalt op de cirkelvorm.

Het idee, om een geometrisch gegenereerde omhulling te creëren, uitgaande van een elliptische grondvorm, welke telkens over een bepaalde maat om zijn centrum roteert en op deze wijze in de hoogte schroeft en daarbij een organische, bijna vrouwelijke vorm uitbeeldt, overtuigde het team. Deze omhulling vervulde meerdere van de eisen tegelijk: de sterke vorm, de hoge affiniteit met het 360° uitzicht en de mogelijkheid, de constructie in de omhulling op te nemen en daarbij een vrij beschikbare ruimte te behouden.

De uit dit idee voortkomende torenconstructie bestaat uit 16 over één as gebogen kolommen uit lariks lijmhout. De kolomvoeten zijn in een elliptische basisvorm geplaatst, de z-assen (zwakke as) van de kolommen wijzen allen naar het middelpunt. Tien elliptische stalen ringen, welke in de hoogte per elke 6,4 m hoogverschil over 22,5° in de richting van de klok (rechtsom) draaien. De ringen zijn momentstijf uitgevoerd. Verder nog 80 diagonaalstaven voor het verstijven van de constructie. Deze staven schroeven zich als het ware spiraalvormig naar de hemel. De eigenlijke constructie is dus $10 * 6,4 = 64,0$ m hoog. De totale rotatie vanaf de basis tot op 64,0 m hoogte is $10 * 22,5^\circ = 225,0^\circ$.

Het eigenlijke bouwlichaam heeft een hoogte van 64,0 m. Hierop rust de torenkop met de beide open uitzichtbordessen en een verdiepingshoogte van 3,2 m. Het hoogste bordes ligt dus op $64,0 + 2 * 3,2 = 70,2$ m. Een bijzonder uitgangspunt was de gebruikszekerheid en barrièrevrijheid.

De bouwopgave vereiste een strakke samenwerking tussen de architecten en de constructeurs; in de verschillende fasen van de ontwerpplanning moesten de constructieve uitgangspunten met de geometrische eisen telkens in overeenstemming worden gebracht, opdat de vorm van de omhulling volgens de mathematische uitgangspunten als een serie identieke bouwelementen in een geordende totale structuur ontwikkeld konden worden. Deze toren moest de grens van de mogelijkheden van de moderne houtbouw opzoeken. Daarbij kwam de constructeur met het geniale idee voor de oplossing: hij stelde het volume voor als een een taart, op basis van een geëxtrudeerde gedraaide ellips, welke vanuit het middelpunt, alle middelpunten van de ellips staan op een rechte verticale as recht boven elkaar, in even grote stukken wordt verdeeld. Alle hoeken van de taartpunten zijn gelijk aan $360^\circ / 16 = 22,5^\circ$. De daarbij ontstane gebogen snijkanten op de rug van de taartstukken vormen lijnen met een bepaalde te definiëren geometrie. Op deze plaatsen konden de kolommen met exact dit lijnenverloop worden geplaatst. Daarmee was het niet nodig om de vorm van de kolommen de verdraaiing van de omhulling te laten volgen, maar konden als één-assig gekromde kolommen ontworpen worden, welke pasten in de vorm van de omhulling.

Ofschoon de totale constructie met de taartpuntoplossing aanzienlijk was vereenvoudigd, bleef de geometrie voor vele bezoekers een raadsel, gelijk aan een optische verwarring.

DE GROOTSTE BELASTINGEN VRAGEN OM CONSEQUENTE OPLOSSINGEN

De geometrie van de constructie laat zich aan de hand van 4 getallen beschrijven: de beide doorsneden van de ellips ($R1 = 10,00$ m, $R2 = 17,30$ m, $(X/R1)^2 + (Y/R2)^2 = 1$), het aantal kolommen ($n = 16$). Daarmee is zoals bij een spakenwiel de hoek tussen de spaken en de verdraaiingshoek van de kolommen bepaald, waarvan de assen allen naar het middelpunt wijzen ($360^\circ / 16 = 22,5^\circ$), alsmede de verticale afstand van de ellipsen van 6,40 m. Met deze waarden kon het draadmodel worden geconstrueerd, de rest werd hiervan afgeleid.

De constructeurs hebben de constructie in een ruimtelijk staafwerkprogramma (R-stab) ingevoerd. De uitdaging bestond daarbij minder uit de invoer van de geometrische vorm maar veelmeer uit het vaststellen van de realistische windbelasting (het belastinggeval sneeuw is niet relevant) voor een niet centraal-symmetrisch bouwlichaam. Als basis diende een onderzoeksrapport van het Centraal Instituut voor Meteorologie en Geodynamiek, dat speciaal werd opgesteld voor deze constructie en op deze locatie. Daaruit volgde voor het voorlopig ontwerp een gemiddelde windsnelheid op 10,0 m hoogte van 25,0 m/s en een buisnelheid van 38,0 m/s gedurende 2 seconden.

De ingenieurs berekenden op hun staafwerkmodel de uitwerking van deze windbelasting uit 8 verschillende richtingen en probeerden de vervormingen voor de 2e ordeberekening zo realistisch mogelijk in te schatten. Zo konden zij de doorsneden van de profielen voorlopig dimensioneren. Windtunnel-experts hebben vervolgens op een maatgetrouw 3-D schaalmodel (1 : 75) met de juiste afmetingen proeven uitgevoerd om de belastingaannames en berekeningen te toetsen. De ingenieurs hebben daarbij dezelfde windaanstroomberekeningen aangehouden als in de berekening. De verschillen in de resultaten zijn vervolgens geanalyseerd en in het staafwerkmodel zodanig gecorrigeerd dat het rekenmodel en het beproevingsmodel overeenkwamen. De hoogste belastingen in de kolommen traden op bij de kleinste diameter van de ellips. Deze resultaten verplaatsten mee met de verdraaiing van de toren naar de smalste vorm van de doorsnede van de toren. Daar de op te nemen krachten over de hoogte van de toren van onder naar boven afnemen, treden de voor de dimensionering maatgevende belastingen van de kolomdoorsneden geheel onderaan op, tussen de scharnierende voetpunten en de eerste punten van de eerste ellipsring. Met het oog op de eenvormigheid werden alle kolommen gelijk gehouden met een afmeting van 320 x 1440 mm², maar - afhankelijk van de benodigde eisen - uitgevoerd in de verschillende sterkteklassen GL28c, GL28h en GL32h.



STAAL EN HOUT ZONDER TOLERANTIES

Voor de verstijvingselementen werd staal gebruikt. Dat leidde enerzijds tot de gewenste transparantie, anderzijds was het ook noodzakelijk vanwege blikseminslag. De verstijving van de zich verdraaiende torenconstructie wordt verzorgd door de tien stalen ellipsen, welke als kokerliggers segmentsgewijze tussen de kolommen zijn ingebouwd, respectievelijk momentvast aan de kolommen zijn verbonden, evenals de 80 diagonalen uit stalen ronde buizen. Deze schoren zijn alleen nodig bij de zwaarder belaste gebieden van de ellipspunten, zodat hier tussen de ellipsvlakken telkens 2 x 4 diagonalen zijn aangebracht. In de basis gaat het om 8 vakwerkstrangen, welke van onder naar boven over de toren doorgaan.

De geometrie van de staalementen en de aansluitingen zijn overal gelijk, echter de wanddiktes van de staalementen zijn afhankelijk van de benodigde sterkte, gevarieerd/aangepast. In totaal konden de ingenieurs met 4 verschillende typen knopen toe. Voor de houtbouw detaillering en ter voorbereiding van de CNC-tekeningen voor de bewerking stelde de uitvoerende aannemer een tolerantie voor van enkel millimeters. De H-vormige staaldelen en bouten met inwendig draad werden voor een optimale lastoverdracht met epoxyhars in de houtdoorsnede gelijmd. De houtbouwingenieurs ontwikkelden een exact 3-D computermodel, dat alle geometrische vormen tezamen met de uitfresingen voor de aansluitplaten en andere verbindingsmiddelen bevatte. Dit vormde de basis voor de CNC-bewerking van alle hout- en staaldelen. Uit het montage- en transportplan volgde tevens de driedeling van de 65 m lange kolommen in twee 26 m lange stukken en een 13 m lang stuk.

Anders dan dat men bij de eerste indruk zou denken, gaat het niet om 16 unieke kolommen, echter iedere kolom komt op basis van de enkele symmetrische constructie twee maal voor. Op deze wijze zijn er acht verschillende kolomgeometrieën. Vanwege de ongelijke driedeling komt men uit bij 48 enkele kolomdelen, welke zijn onderverdeeld in 32 lange en 16 korte stukken, afhankelijk van de positionering in de constructie.

BUIGSTIJVE KOLOMSTUIKEN MET VERSCHOVEN STAALPLATEN

Voor de kolomstukken is door de ontwerpers de volgende methode gekozen: de kolommen zijn samengesteld uit 3 blokverlijmde doorsneden (2 x 100 mm en in het midden 1 x 120 mm). Voor de blokverlijming werden er aan de einden uitfresingen gemaakt, waarin van gaten voorziene staalplaten werden aangebracht welke door staafdeuvels met de doorsneden zijn verbonden. De beide uitfresingen zijn zo breed gemaakt, dat na de blokverlijming nog een sleuf overblijft, waarin een tweede staalplaat kon worden aangebracht. De staalplaten van de versprongen uitgevoerde aansluitstukken kunnen dan bij de montage eenvoudig in de aanwezige sleufbreedte worden ingeschoven en het geheel kan dan met 7 bouten buigstijf met elkaar worden verbonden. Om te voorkomen dat er water in de stuik kan indringen, werden de kolomkoppen aan de randen schuin naar buiten toe afgeschuind; de kolomvoeten werden van een tegengestelde afschuining voorzien, zodat een rand ontstaat, waarbij het regenwater kan aflopen, zonder naar binnen te kunnen lopen.

Na het gereedkomen van de 1000 ton zware betonfundament begon in februari 2013 de opbouw van de toren. De verdeling van de kolommen in 26 m en 13 m lange stukken was niet alleen gebaseerd op het montageplan en het transport, maar ook op een afwisseling van de plaats van de stuiken. Er was vanuit gegaan om de eerste montagegang met afwisselend lange en korte kolomdelen te beginnen, om dan trapsgewijze naar boven te werken en daarbij de uitstekende kolomdelen als montagehulp te gebruiken. Totdat de eerste kolommenronde met de stalen ringen van de beide eerste ellipsen met daarbij de diagonaalschoren tot een stabiele constructie was verbonden, was het mogelijk om de kolomvoeten aan de fundering vast te verbinden en aan te spannen tot een momentstijve aansluiting. Dit zou niet meer mogelijk zijn bij de volgende beide montagestappen vanwege de hoogte. Door de versprongen plaatsing konden de volgende kolomdelen van de volgende montagestappen, hiervoor werden alleen lange delen gebruikt om de verspronging te behouden, aan de telkens naaststaande doorstekende kolomdelen worden afgesteund. In totaal met de kolomstuik zijn er dan vijf vasthoudpunten per kolomdeel.



Voordat met de tweede montage­stap werd begonnen, werd de op zichzelf stabiele basismontage door een geodeet exact nagemeten en werden de maattoleranties door fijnafstelling millimeter precies gecorrigeerd. Bij de derde en laatste montage­stap werden weer afwisselend korte en lange kolom­delen op de voorgaande geplaatst zodat alle kolommen op gelijke hoogte eindigden.

50 JAAR GEBRUIKSDUUR EN EEN SOLIDE BRANDWERENDHEIDSCONCEPT

De toren is ontworpen voor een levensduur van 50 jaar. Voor de constructeurs was de constructieve hout­bescherming vanaf het begin een centraal thema. De detailaansluitingen werden vanuit de basis van een optimale constructieve hout­bescherming, een maximale levensduur en de beleving van het materiaal hout ontworpen. Echter volgens Eurocode 5 mogen in de open lucht staande gelijmde hout­constructies (gebruik­klasse 3) in het geheel niet worden gebouwd. Men kan alsnog aan de norm voldoen indien de constructeur de draag­constructie zo ontwerpt, dat de buitenste 15 mm van de kolom­doorsneden als omhulling of bescher­mingslaag voor de dragende kern kan worden aangewend. De hout­constructie zelf is daarmee statisch voor slechts 70% uitgenut en 30% is reserve. Voldaan aan deze criteria werd onder andere door de slangenvorm van de kolommen, welke door hun zeer steile en loodrechte vlakken het water geen langdurige aangrijping­spunten bieden. De aansluiting van de ellipselementen en diagonaal­staven aan de gelijmde houten kolom­men bevinden zich op enige afstand, zodat hier geen vocht blijft staan respectievelijk altijd kan drogen. Omdat de verbinding in de hout­doorsnede ingelijmd is, ontstaat bovendien een soort verzegeling, welke het binnentreden van water voorkomt en het hout beschermt. De uitvoering van de kolom­stuiken met aflopende kanten werd eveneens uit het oogpunt van de hout­bescherming ontworpen.

Een solide brandwerendheids­concept was van wezenlijk belang voor de goedkeuring van de houten toren. Zijn stand­zekerheid moest in het geval van brand gewaarborgd zijn, totdat alle personen zijn geëvacueerd. Tegelijkertijd mogen brand en rook zich niet uitbreiden; een zekere vluchtweg naar het aangrenzende terrein moet mogelijk zijn. De bouwkundige eisen verlangen een brand­weer­stand van 90 minuten. Twee vlucht­trappen dienen als vluchtweg. Rook en brand compartimenten verhinderen een brand­uitbreiding. 300 m³ bluswater kunnen bij behoefte door de sprinkler­installatie worden gebruikt. Daarbij komt een bliksema­fleider, veiligheids­verlichting, een zekerheids­lift, een vroegtijdige brand­alarm en videobewaking voor alle zones.

OPMERKINGEN

- Op Internet zijn foto's en films te zien van het opblazen van de oorspronkelijke toren en van de opbouw van de nieuwe toren.
- Op vakantie in deze omgeving moet men de toren gezien en beklommen hebben.

