

KUNSTWERK EXPOSURE, LELYSTAD

ing. E.P.J. de Winter en S. Harrison

Eelco de Winter is senior constructieadviseur bij Royal Haskoning in Nijmegen en Simon Harrison is directeur van Had-Fab Ltd. Schotland.

Het jong cultureel erfgoed van de provincie Flevoland, internationaal bekend om zijn grote dichtheid van landschapskunst, kreeg recent een omvangrijk werk erbij van de Britse kunstenaar Antony Gormley. Aan de stalen polderreus 'Exposure', een 25,6 m hoog mensbeeld opgebouwd uit staven en knopen, werden hoge eisen gesteld. De constructieve opzet van het vernieuwende ontwerp is complex, onallegaals en zou zonder de jongste software niet binnen handbereik liggen.

Na negen jaar aan planning en ontwikkeling was het dan zover: op 17 september 2010 werd het winnende ontwerp van het zesde landschapskunstproject in Flevoland officieel onthuld. Opdrachtgever is de gemeente Lelystad. Voor zover bekend is niet eerder een dergelijke constructie gemaakt en het is dan ook niet vreemd dat problemen ontstaan bij het bepalen van belastingen, berekenen, dimensioneren en bouwen van de onderdelen.

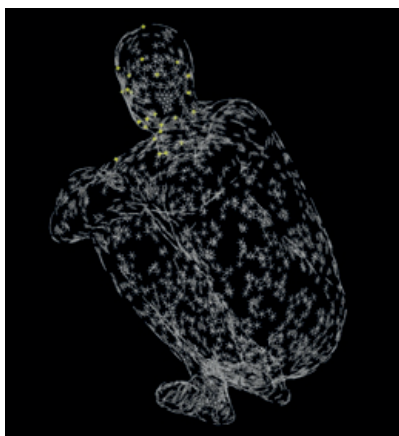
Voor de kunstenaar moest het ontwerp vernieuwend zijn en passen in het polderlandschap, waarin windmolens en elektri-

Bovendien duldde hij geen horizontale en verticale staven en de hoekstalen die samenkomen in één knooppunt dienden in verschillende, willekeurige richtingen te draaien. De afstand tussen de staven onderling en de afstand tot een kruisend knooppunt moesten ook voldoen aan minimumeisen van respectievelijk 200 en 400 mm. Voorts moest het project worden uitgevoerd in gegalvaniseerd staal (S355).

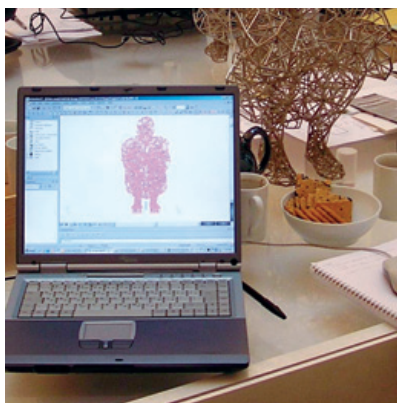
Windbelasting

De windbelasting is de maatgevende belasting voor de sculptuur en is gebaseerd op

Van draadmodel tot polderreus



Virtueel huidmodel.



Digitale weergave draadmodel.

citeitsmasten de boventoon voeren. Al in een vroeg stadium ging Gormley op zoek naar een staalbouwer met ervaring in het maken van elektriciteitsmasten. Dat werd de Schotse staalbouwer Had-Fab, die in 2005 werd gecontracteerd. In datzelfde jaar wordt Royal Haskoning in eerste instantie gevraagd voor het ontwerp van de fundering en het dijkadvies van de strekdam, de locatie van het project aan het Markermeer bij Lelystad. Maar in de loop van het proces blijkt de 25,6 m hoge staalconstructie complexer dan verwacht en neemt het ingenieursbureau vanaf mei 2006 ook het ontwerp van de staalconstructie voor haar rekening.

Specifieke eisen

De kunstenaar heeft zichzelf als hurkende man uitgebeeld in een open structuur van 25,6 m hoog, 13,3 m breed en 18,5 m diep. Aan het ontwerp stelde hij specifieke eisen. De sculptuur moest een open karakter hebben, zelfs in de kritische steunpunten zoals enkels en de onderbenen, en moest zijn opgebouwd uit uitsluitend gelijkbenige hoekstalen met een afmeting van 150-120-100-80-60 mm. Daarnaast mochten in de huid geen driehoekige vlakken voorkomen; deze moest opgebouwd zijn uit veelvlakken.

NEN 6702. De locatie ligt in windgebied II en grenst aan zonegebied I, waarvan ook de invloed is onderzocht. Door het open karakter van de constructie ($\pm 50\%$) is het noodzakelijk om via Eurocode NVN-ENV-1991-2-4 de invloed van de staven achter elkaar te beschouwen en de coëfficiënt voor de windbelasting vast te stellen. Voor de windrichtingen zijn zowel in de loodrechte vlakken als onder alle hoeken van 45 graden in rekening gebracht. De eigenfrequentie van de sculptuur is bepaald, waarmee de windbelasting is verhoogd met de factor f_1 . De grootte van de windbelasting (SH en SM) is bij het grondvlak bepaald. Voor het rekenmodel is de belasting per knoop bepaald in plaats van een gelijkmatige belasting per staaf.

Maakbaar model

Een maakbaar model te krijgen dat voldoende stijf en stabiel is en waarbij enige vrijheid van fabricage bleef, vormde de uitdaging van het constructief ontwerp. De staven zijn verbonden met enkelvoudige geboude platen aan één zijde van de hoeklijn tussen de gelaste knooppunten. Met andere woorden: de verbinding kan aan een willekeurig been worden geplaatst. De drie zwaarste staven zijn met geboude hoeklijnen aan de con-



structie bevestigd. Door het toevoegen van staven of zelfs het weghalen ervan en aanpassingen van de dimensies, kon met een iteratief proces evenwicht worden gevonden. Hierbij is gestreefd naar een gelijkmatige belastingafdracht naar beide benen van de sculptuur. De constructie heeft geen duidelijke belastingafdracht in vergelijking met een elektriciteitsmast, dat kan worden beschouwd als een vakwerk.

Dit heeft erin geresulteerd dat voor het ontwerp verschillende 3D-rekenmodellen nodig waren, waarin scharnieren in het lokale assenstelsel in verschillende y- of z-richtingen van de staven zijn doorgerekend. De gevoeligheid van de constructie is daarnaast nog beschouwd door verschillende stijfheden van de steunpunten in rekening te brengen, te weten starre steunpunten en verende steunpunten vanwege stijfheid van de fundering. Om een knoop stabiel te krijgen zijn minimaal drie staven in verschillende richtingen nodig. Het zwaartepunt van de hoeklijnen snijden elkaar in het hart van de knoop. De excentriciteit van de verbindingen zijn in rekening gebracht bij het dimensioneren van de staven.

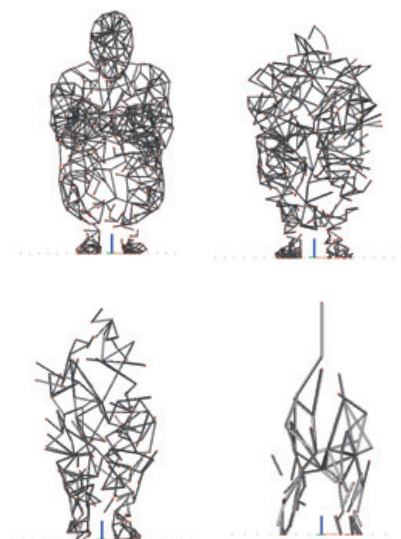
De bouten zijn allemaal in dezelfde richting geplaatst, met de kop aan de buitenzijde van het hoeklijn en de draad met moeren aan de

binnenzijde. Hierdoor ontstaat een rustig beeld van de koppelingen.

Nieuwe software

Het eerste 'draadmodel' was al door de kunstenaar gemaakt met de universiteit van Cambridge en University College London, bij de laatste in de persoon van Sean Hanna die soortgelijke arbeid ook voor Norman Foster verrichtte. Gekozen is voor een puntenwolkgeometrie met een aantal belangrijke knooppunten, zoals hersenen, hart en darmen. De buitenste laag van het lichaam bestaat uit reeksen open veelhoeken, de meeste met vijf of zes zijden, geconstrueerd door voronoi-cellen om de geometrie van de huid te benaderen. Het startpunt was een draadmodel, zonder dimensies.

Er is naar constructieve oplossingen gezocht om het complexe driedimensionale rekenmodel op een vereenvoudigde manier te belasten en te dimensioneren. Door de snelle ontwikkeling van rekensoftware gedurende het ontwerpproces werd het model beter toegankelijk. De staalbouwer was al begonnen in Staad Pro, waarna door Royal Haskoning opnieuw begonnen is met een 3D-model in Esa Prima Win. Deze software was echter nog niet zodanig ontwikkeld om in 3D door het model te 'wandelen' en de conflicten met

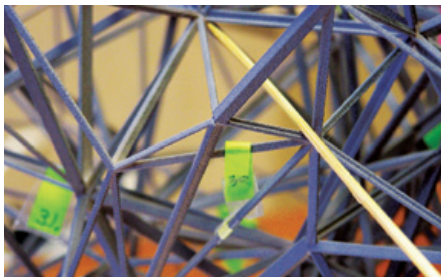


Opbouw van staven met gelijke krachten.

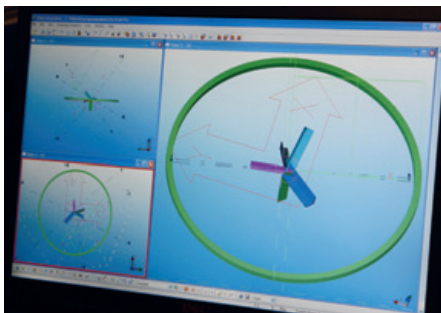
Projectgegevens

Locatie strekdam, Lelystad • **Opdracht** Gemeente Lelystad • **Architectuur** Antony Gormley, London • **Constructief ontwerp** Royal Haskoning, Nijmegen • **Staalconstructie** Had-Fab Ltd, East Lothian (UK) • **Fundering** Van Spijker infrabouw, Meppel • **Start bouw** december 2008 • **Bouwsom** € 1 miljoen

1. De kunstenaar plaatste in het model papieren markeringen en een satéprikker voor alternatieve staven.
2. Detaillering in Tekla.
3. Handwerk met papieren mallen.
4. Montagewiel.
5. Montage kopstuk.
6. Rustig beeld van de koppelingen.
7. Digitale oriëntatie hijspunt.
8. Stalen hulpframe (template) in de fundering.



1.



2.



3.



4.

de staven te onderkennen. Zodra het model gedraaid werd, was het bijvoorbeeld niet mogelijk de dikte van het profiel te zien. Maar al snel kwam de opvolger van het rekenpakket Scia Engineer op de markt. Ook dit pakket kende enige aanloopproblemen door de grootte van het project: 1824 staven en 547 knopen. Daarnaast bleek het verwerken van de rekenresultaten tijdrovend. Om die reden is ervoor gekozen de krachtwerking uit het 3D-model te halen en de toetsing van de staven te verwerken in excel, waarbij de excentriciteit van de staven in rekening zijn gebracht en de controle op knik zijn uitgevoerd. Door de verschillende belastingcombinaties leverde dit vele toetsingsregels op.

Het turen naar een plat scherm om een 3D-model te vervolmaken is een lastige klus. Om de sculptuur beter te kunnen visualiseren, is een kunststof SLS-schaalmodel (selectieve lasersintering) 1:40 gemaakt van ongeveer 0,5 m hoog. De rekendata werden geconverteerd, waarbij de minimale dikte van de hoeklijnen op 40 mm zijn bepaald, zodat in het uiteindelijke schaalmodel de kleinste hoeklijn van 60 mm over zou komen met een dikte van 1 mm en een hoogte van 1,5 mm. Vervolgens gaf Gormley met papieren markeringen aan welke staven nog

niet conform zijn eisen waren opgebouwd. Met saté-prikkers zijn in het schaalmodel alternatieve staven aangebracht om hieraan tegemoet te komen. Daarna zijn de consequenties in het rekenmodel weer doorge-rekend, met vaak weer aanpassingen van de dimensies van de staven tot gevolg. Het schaalmodel heeft overigens in 2008 in een vitrine tentoongesteld gestaan in de Kunsthal in Rotterdam, zonder de markeringen van Gormley.

Precieze detaillering

Voor de fabricage schafte de staalbouwer het ontwerptekeningpakket Tekla aan om de constructie uit te detailleren. Maar de zogenaamde standaardisatie van uitwisseling van de gegevens verliep niet zonder slag of stoot. Het profiel van een hoekstaal kende verschillende uitgangspunten voor de definities. Zo is in de rekensoftware het werkelijke zwaartepunt van het profiel gedefinieerd, terwijl de definitie van het zwaartepunt in het ontwerppakket in het hart van de kruising van het fictieve vierkant van het gelijkzijdige hoekstaal lag. Ook definities van draairichting waren anders. Het heeft enige hoofdbrekers gekost om tot een 'fout' rekenmodel te komen, waarin deze definities – van de draairichting en de excentriciteiten

van de profielen – waren aangepast, zodat na het converteren van dit 'foute' model de juiste informatie in het ontwerppakket beschikbaar kwam. Weer een stap overwonnen in het ontwerpproces.

De detailengineering van dit complexe werk met precieze maatvoering leunde zwaar op een goede samenwerking en mag kritisch voor het succes van het project genoemd worden. Met Tekla Web-Viewer werden de details van de knooppunten in 3D bekeken en beoordeeld. Zo werden de juiste hoeken van de hoekstalen vastgesteld en de rotatie van de staven. Ook beoordeeld werd de gedetailleerde knoopaansluiting om te zien of de hoeklijnen volledig in het hart van de knoop snijden zodat er geen excentrische verbinding ontstond. Voorkomen moest worden dat extra momenten in de knoopverbinding optraden. Het was vrijwel onmogelijk geweest om dit van een tweedimensionale tekening te controleren.

Fundering met stelframe

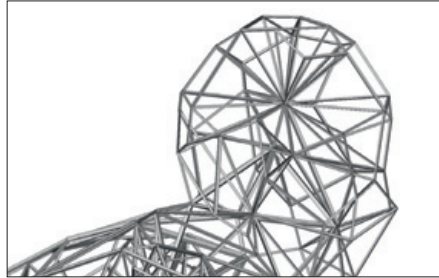
Ook de aansluiting van de sculptuur op de verkanting van de strekdam had nog wat voeten in de aarde. De kunstenaar had een beeld voor ogen waarbij de sculptuur als het ware uit de ruimte was geland. Dus het mocht niet op een voetstuk staan. De funde-



5.



6.



7.



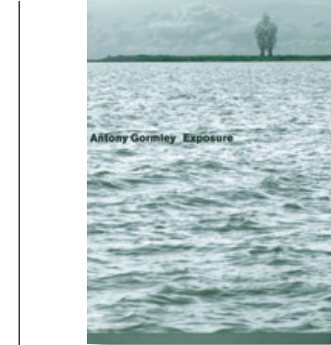
8.

ring is opgebouwd uit acht prefab palen in een dikke betonplaat. Hierop zijn 24 betonkolommen geplaatst, die de fundering vormen van de sculptuur. De staalbouwer verzag een passingsprobleem en ontwierp een stalen hulpframe, een zogeheten template, die in de funderingsplaat is ingestort. Dit stelframe is voorzien van de 24 stalen kolommen, die in twee lagen zijn verbonden door stalen balken. De fundering is in het voorjaar van 2009 gerealiseerd, afgedekt met betonklinkers, om afgemaakt te worden na realisatie van de staalconstructie.

Nauwkeurige fabricage

Bij de bouw zijn ongebruikelijke en innovatieve methodes ontwikkeld om de constructie te realiseren. Oplossingen om de constructie in delen te produceren vielen af vanwege te kleine zinkbaden. Uiteindelijk is gekozen voor een traditionele opbouw per genummerde knoop en staaf – als één grote puzzel. De complexiteit van de bouw heeft doen besluiten om de sculptuur op hun eigen terrein volledig op te bouwen, inclusief fundering en tijdelijke portaalkraan, om passingsproblemen voor te zijn. Zo is de constructie vanaf de grond (voeten) opgebouwd. Knoop voor knoop en staaf voor staaf. Gedurende het proces zijn verbeteringen en versnellingen

toegepast. Halverwege de opbouw hadden zich geen noemenswaardige problemen voorgedaan. De versnelling bestond eruit dat de knopen direct volledig doorgelast en gegalvaniseerd werden om ze in één keer op hun positie op te bouwen. Het tussentijds passen van de staven en knopen, die dan tijdelijk aan elkaar gepuntlast zijn, was niet meer nodig. Het risico dat een knoop niet zou passen, is tot een minimum beperkt. In het begin is nog overwogen om knooppunten met meer dan 14 staven te gieten. Maar tijdens de bouw is zoveel ervaring met het lassen van de knooppunten opgedaan dat zelfs de complexe knopen tot wel 29 staven in elkaar zijn gelast; het laswerk van deze complexe knoop kostte overigens wel drie werkdagen. Duidelijk vanaf begin was wel dat het project uitgevoerd zou worden met 3D BIM software en een Ficep geautomatiseerde machine. De technologie van de Ficep HP16T6 CNC hoeklijn-machine biedt veel nieuwe mogelijkheden waaronder een doorvoersnelheid tot 100 m/min. De machine is voorzien van een automatische invoer, ponsen, boren van gaten met gereedschapwisselaar, het kerven en merken van de individuele staalonderdelen. De machine werd met Steel Projects WinSteel software aangestuurd die de codes uit de ontwerpsoftware



Ter gelegenheid van Exposure verscheen een gelijknamig (kunst)boek. Niet zozeer het technisch ontwerp dan wel de ontstaansgeschiedenis en de kunstenaar zijn visie staan daarin centraal.

A. Gormley (e.a.), *Exposure*, Idea Books, Amsterdam 2010, ISBN 9789081598019, 86 p., Nederlandstalig, 23x28 cm, € 37,50.

(Tekla) importeerde. In totaal zijn 32.000 gaten geponst of geboord in de hoekstalen. Behalve de volautomatische machine was ook nog handwerk nodig. Met papieren mallen (schaal 1:1) zijn de hoeklijnen nog voorzien van sleuven. Daarbij is een Montagewiel ontworpen om de hoeklijnen in de juiste richting te kunnen plaatsen in de knoop. Doordat het Montagewiel loodrecht op een stalen cirkel is geplaatst, is het mogelijk om het Montagewiel in alle richtingen te plaatsen, zodat de juiste hoek kan worden ingesteld. De knopen zijn op ambachtelijke wijze gelast en verbonden met 9.392 strippen of hoeklijnen en 14.248 bouten. Het totale gewicht van het project is ongeveer 60 ton, respectievelijk 44 ton voor de hoofdconstructie en 16 ton voor de verbindingen. De realisatie van de volledige bouw nam bij elkaar 18 maanden in beslag. Voor transport is het kunstwerk in kratten geladen en naar Lelystad vervoerd. Hier is het in zeven weken opgebouwd, zonder noemenswaardige passingsproblemen. •

Op de website van het museum Nieuwland Erfgoed is een korte film te vinden van de opbouw van het project: www.nieuwland-erfgoed.nl/museum/tentoonstellingen/tijdelijk/the-making-of-exposure