



Schaalsprong in staal

In Arnhem kwam onlangs de langverwachte OV-Terminal uit de steigers, niet in de laatste plaats dankzij de introductie van constructietechniek uit de scheepsbouw waarmee binnen een lastige constructieve configuratie een schaalconstructie in staal mogelijk werd. Inzicht in het constructief ontwerp, dat van beton naar staal werd omgezet, en de uitwerking van het schaaldak.

ir. M.M.J. Spanenburg RC

Mark Spanenburg is adviseur constructies bij BAM Advies en Engineering in Bunnik.

De OV-Terminal is onderdeel van de ontwikkeling van het stationsgebied Arnhem. Deze ontwikkeling is begonnen in 1995, waardoor onderdelen al zijn gerealiseerd. Het stationsgebied bestaat uit de volgende onderdelen.

1. Kantoorgebouwen K1, K2 en K4 (gerealiseerd).
2. Treinperrons (gerealiseerd).
3. Ondergrondse parkeergarage (gerealiseerd).
4. Fase 1: fietsenstalling, aansluitend aan OV-Terminal (gerealiseerd).
5. Fase 2: Kantoorgebouw K5 en OV-Terminal (nu gerealiseerd).
6. Kantoorgebouwen K3, K6 en K7 (vervallen/nog niet gerealiseerd).

Uit *afbeelding 1* blijkt duidelijk dat de OV-Terminal bijna alle onderdelen raakt. Gebouw K5 'hangt' aan de OV-Terminal en ontleent hieraan een groot deel van zijn stabiliteit. Gebouw K4 daarentegen verzorgt weer opleggingen voor de OV-Terminal, terwijl fase 1 een monoliete en daardoor integrale aansluiting verzorgt met de OV-Terminal. Ten slotte rust OVT ook voor het grootste deel op de bestaande parkeergarage

daaronder, waardoor het een complex samenspel met andere gebouwen en onderdelen heeft.

De OV-Terminal zelf is het sleutelstuk in het gehele masterplan. Alle vervoerstromen komen hier samen en de architect heeft hiervoor een gebouw ontworpen om deze rol zowel esthetisch als functioneel waar te maken. Het heeft geresulteerd in een gebouw met onderdelen als de 'fronttwist', de 'backtwist', de 'flip', een balkon in spiraalvorm dat overgaat in de wegbrug en een dubbel gekromd schaaldak (*afb. 2*).

Het grondoppervlak van het totale plan is 40.000 m², in totaal 160.000 m² gebruiksoppervlak. Het is de bedoeling dat in 2020 110.000 reizigers per dag gebruik maken van Arnhem Centraal. De OV-Terminal vormt hierin het centrale punt, waar reizigers vertrekken, aankomen of overstappen. De oplevering vond plaats in september, de officiële opening in november 2015.



1. De OV-Terminal raakt bijna alle bouwdelen.



2. Balkon, wegbrug en dak vloeien naadloos over door complexe steunpunten als de fronttwist, backtwist en flip.

Waarom stalen alternatief?

Oorspronkelijk was het volledige project, inclusief het schaaldak, in beton bedacht. Gezien de vormvrijheid en de wens van een betonnen uiterlijk, ligt een in het werk gestorte betondak voor de hand. De uitvoering van een dergelijk dak is echter zeer complex^[2]. De belangrijkste risico's bij het betonnen dak zijn:

- zware ondersteuningsconstructie om het betonnen dak te dragen;
- weinig afsteunmogelijkheden door onderliggende parkeergarage;
- complexe bekistingsvorm;
- complexe wapeningsvorm;

- variërende dikte betondak;
- hoe verticale schuine onderdelen te storten;
- veel disciplines die in serie werken, vormen groot risico op vertraging.

Door dit hoge risicoprofiel zijn er alternatieven in staal onderzocht: een stalen vakwerkconstructie en een 'omgekeerde sloopshuid' (afb. 3 en 4). De staalgewichten van de verschillende varianten zijn 170 kg/m² wapening voor het betonnen dak, 120 kg/m² voor het ruimtelijke vakwerk en 160 kg/m² voor de omgekeerde sloopshuid. Het is opmerkelijk dat de staalhoeveelheden van de stalen

varianten minder zijn aan de wapeningshoeveelheden van het betonnen alternatief. Gegeven de esthetische randvoorwaarde aan de maximale constructiehoogte is uiteindelijk de keuze gevallen op de variant met de omgekeerde sloopshuid en niet op het ruimtelijke vakwerk. Redenen hiervoor zijn:

- laag risicoprofiel;
- korte bouwtime;
- laag gewicht;
- weinig interferentie met andere disciplines;
- minder gevoelig voor weersinvloeden;
- meest economische aanbieder, ondanks hogere directe bouwkosten.

Scheepsbouwprincipe

Een dak volgens het scheepsbouwprincipe bestaat uit diverse onderdelen die in de bouw minder bekend zijn. Het dak is opgebouwd uit (afb. 5 en 6):

- hoofdlangsdrager (blauw);
- hoofddwarsdrager (groen);
- sloopshuid (geel);
- verstijvers sloopshuid (grijs);
- kipsteun (volgens sloopbouwprincipes).

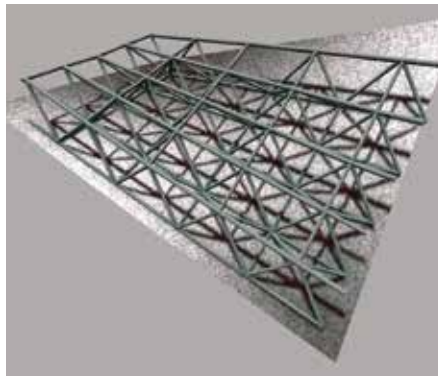
De hoofdlangs- en dwarsdragers hebben een T-vormige doorsnede met een flens van 300x10 mm en een lijf van 525x10 mm. Deze delen het dak op in gelijke vlakken van 4,0x1,6 m². Hiertussen bevinden zich de sloopshuid die gesteund wordt door verstijvers.

In sloopbouwconstructies worden standaard ook kipsteunen meegenomen. Deze kipsteunen worden vanuit vaste detaileringsregels uit de sloopbouw toegepast, maar hebben geen duidelijke constructieve functie in de toetsing. Om deze reden zijn ze niet in de constructieve beschouwing gelaten, maar volgens de detaileringsregels aangebracht (zie p. 38-41).

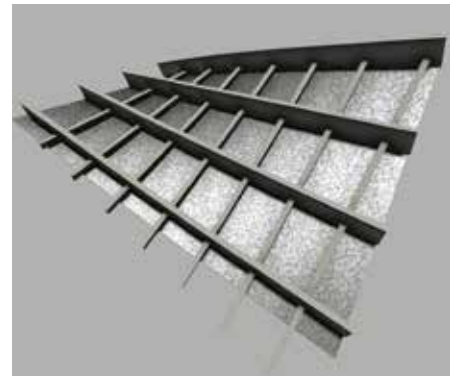
Hoofdkrachtenwerking stalen dak

Bij de uitwerking van het constructieve ontwerp dient rekening gehouden te worden dat het dak onderdeel is van een groter geheel. Dit grotere geheel bestaat uit een betonconstructie dat deels nog gebouwd moet worden, namelijk het balkon en de wegbrug, en een bestaande constructie dat in een eerdere fase is gebouwd. De onderdelen zijn gescheiden van elkaar geëngineerd. Dat is logisch gezien vanuit de materiaalkeuze (staal, beton) en uitwerkingen en levering door verschillende co-makers, maar een onlogische keuze vanuit constructief oogpunt.

Het dak is statisch onbepaald en daardoor gevoelig voor stijfheden en variaties hiertussen (afb. 7). Om hier grip op te krijgen, is een gevoeligheidsanalyse van de stijfheid van de steunpunten uitgevoerd van $\pm 35\%$ voor een individueel oplegpunten en -50% en $+100\%$ voor alle oplegpunten tegelijk. Hieruit wordt snel duidelijk welke steunpunten gevoelig zijn voor variaties in stijfheid en welke niet. Door de variaties te normaliseren met de maximale UGT-waarde bij de gemiddelde



3. Stalen vakwerkconstructie.



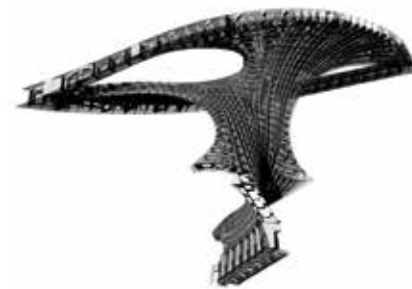
4. Omgekeerde sloopshuid.



Model in zijn geheel.



Flip achterzijde.



Fronttwist.

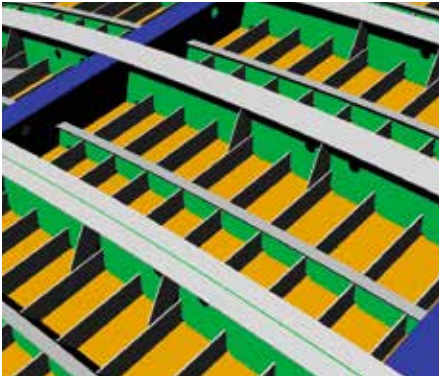


Backtwist.

stijfheid, kan een variatiefactor (γ_{var}) bepaald worden. De krachtsverdeling van het dak wordt op basis van de gemiddelde veerwaarde vastgesteld en later vermenigvuldigd met γ_{var} , die over het algemeen 1,05 was in verticale richting en 1,10 in horizontale richting. Voor afwijkende onderdelen zijn hogere waarden vastgesteld, zoals bij de busvide ($\gamma_{var} = 1,25$ voor G5s) en de rug van het schaaldak ($\gamma_{var} = 1,20$ voor I5s en H5s bij temperatuur)(afb. 8 en 9).

Een ander belangrijk aspect van de knip tussen het stalen dak en de overige constructie bleek de keuze van de absolute veerwaarde van de ondersteuning van het dak. Het bleek

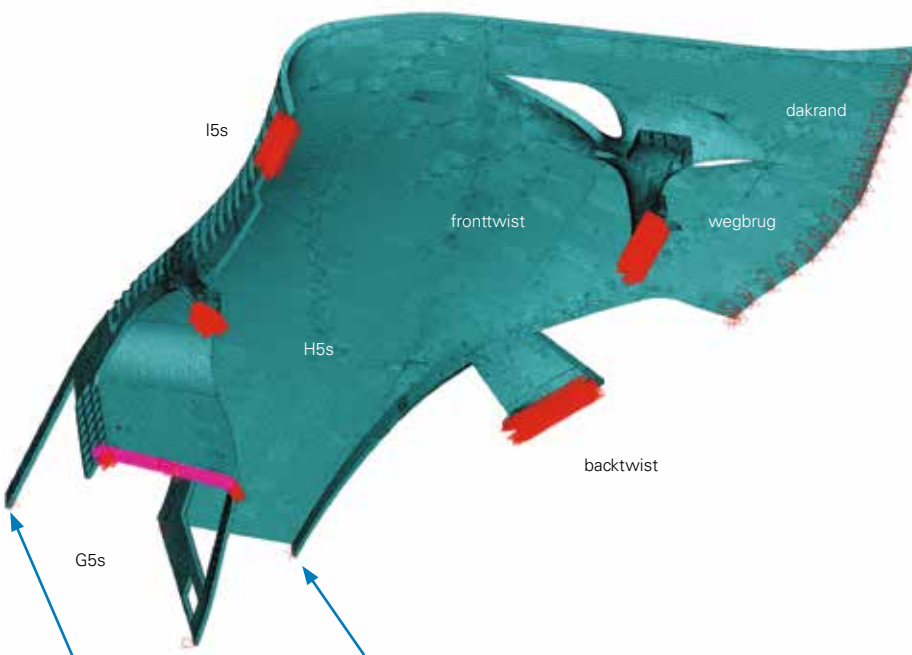
namelijk dat de onderliggende betonconstructie (door de schuine steunpunten) in een aantal gevallen een tegengestelde beweging maakte aan de krachtsrichting uit het dak. Dit resultaat vertaald naar een veerwaarde geeft een negatief getal, dat fysisch geen enkele waarde meer heeft. Om deze reden is ervoor gekozen om per belastinggeval iteratief krachten en verplaatsingen tussen het stalen dak en de betonconstructie af te stemmen, net zolang tot de oplossing is geconvergeerd. Vervolgens kunnen dan de losse belastinggevallen worden opgeteld, uitgaande van een lineaire krachtenwerking. Dit is dan de voorwaarde voor de verdere uit-



5. Opbouw scheepshuid.



6. Uitvoering scheepshuid.



7. Opleggingen schaaldak (blauwe pijlen).

werking van beide constructies. Het lineaire constructiegedrag is dus een belangrijke voorwaarde. Niet-lineair gedrag ontstaat door:

- plastisch of elastoplastisch materiaalgedrag;
- geometrisch niet-lineair gedrag (2^o orde-effect).

Het dak bestaat uit samengestelde plaatvelden uit doorsnedeklasse 4, waardoor de krachtsverdeling op basis van lineair-elastisch materiaalgedrag voorspeld moet worden. Niet-lineaire effecten kunnen daarom alleen nog worden veroorzaakt door het

2^o orde-effect dat is onderzocht met een 2^o orde-model van het schaaldak.

Het last-zakkingsgedrag van een aantal kritiek veronderstelde punten is daarom bekeken (afb. 8 en 9). Hierbij is de UGT-belasting die de grootste verticale reactie veroorzaakt, opgevoerd tot een factor 7 van de oorspronkelijke rekenwaarde. De resultaten hiervan zijn in kracht-verplaatsingsdiagrammen (afb. 10-13) uitgezet. Vanaf ± 40% van de aangebrachte belasting, ofwel $40\% \times 7 = 280\%$ van de rekenwaarde van de belasting, wordt niet-lineair gedrag in de verplaatsingen pas zichtbaar. Hetzelfde gedrag is gevonden in horizontale oplegreacties.

Voordat er gestart is met de 2^o orde-berekening, is er een eigenwaarde-analyse uitgevoerd om de knikbelasting en knikvorm van het dak te voorspellen. Het knikgetal waarbij het dak instabiliteit ging vertonen (plooi van individuele plaatvelden zijn hierbij verwaarloosd), was meer dan 30. Hieruit blijkt dat het dak in globale zin voldoende stabiel is. Dit ondersteunt de gevonden resultaten uit de 2^o orde-berekening. Belangrijke voorwaarde voor het stabiele 2^o orde-gedrag is dat individuele plaatvelden niet de globale stabiliteit mogen beïnvloeden. Dit wordt het knockdown-effect genoemd, wat iedereen kent van het samendrukken van een leeg blikje frisdrank. Het ongunstige na-kritische knikgedrag veroorzaakt bij het plooiën van één onderdeel een kettingreactie dat tot bezwijken van het totale dak leidt (afb. 14 en 15). Dit kan worden voorkomen door de plaatvelden voldoende stijfheid te geven en de zwakste elementen maatgevend te maken voor de toelaatbare spanning in de gehele doorsnede. Dit is in de toetsing meegenomen. Ten slotte dient opgemerkt te worden dat de conclusie over het lineaire geometrisch gedrag enkel van toepassing is op de verplaatsingen en reacties van het dak. Voor het bepalen van de interne spanningen kan herverdeling naar stijvere plaatdelen optreden, waardoor de spanningen in het dak volgens een 2^o orde-berekening bepaald moeten worden.

Plooi plaatvelden en berekeningsmethoden

De staalconstructie bestaat uit dunne, samengestelde platen. De plaathoogte-dikte verhouding zorgt ervoor dat alle platen plooi gevoelig zijn, ofwel in klasse 4 vallen. In de scheepsbouw is de bouw van dit soort constructies gemeengoed, maar in de bouw niet. Dit vormde dan ook nodige hoofdbreken voor dit project, met name bij de plooi toetsing van de dubbelgekromde plaatconstructies.

In de bouwvoorschriften (NEN) kan plooi van vlakke platen getoetst worden, maar niet die van gekromde platen. Doordat men veel ervaring heeft in de scheepsbouw kan de constructie aan de scheepsbouwnormen worden getoetst. Een voorbeeld van een scheepsbouwnorm is de GL (Germanischer Lloyds), die naast rekenregels voor de con-



De dakrand is bekleed met 40 mm dikke gevelpanelen van microbeton. In totaal gaat het om 1540 dak- en gevelpanelen geproduceerd met stalen mallen.

structie, ook eisen stelt aan de fabricage en bouw van de platen en schepen. Nadelen die hierbij echter horen zijn:

- welk veiligheidsniveau wordt er gehaald met de GL?;
- in de GL kunnen alleen enkelgekromde platen worden getoetst (geen dubbelgekromde);
- GL gaat uit van schepen, waarbij voor schepen gebruikelijke (gelijkmatige) belastingen optreden en zich daarvoor bewezen hebben;
- gaat uit van schepen, waarbij knik- en kipschotten op een vooraf bepaald regelmatige afstand van elkaar zitten.

Bovenstaande punten wijken af voor de huidige situatie en zorgen ervoor dat de scheepsbouwnormen niet toepasbaar zijn. Bovendien moet de constructie uiteindelijk aan de NEN-normen voldoen. Reden om de GL los te laten. Beschouwend vanuit NEN-normen zijn er voor het toetsen van dunne plaatvelden twee methoden: de doorsnedereductie-

methode en de spanningsreductiemethode. In de scheepsbouw is het gebruikelijk om te toetsen met de spanningsreductiemethode. Met een FEM-model worden de spanningen in de platen berekend, die dan met formules in de GL worden getoetst. Hieruit volgen dan het aantal verstijvers die nodig zijn om de platen voldoende weerstand tegen plooi te geven. Eventueel kunnen ook plaatvelden dikker uitgevoerd worden, maar vaak is de minimum plaatdikte voor het buigproces in de fabriek maatgevend (minimum 8 mm). Gezien de bekendheid van de scheepsbouwer met het toetsen volgens de spanningsreductiemethode en de daarmee samenhangende engineeringwijze, ligt deze methode het meest voor de hand. Maar dan moet deze methode nog wel omgezet worden naar NEN voor dubbelgekromde platen. Opvallend is dat het in de bouw juist gebruikelijk is om (staaf)constructies met de doorsnedereductie te toetsen. Delen van de plaat die worden verondersteld

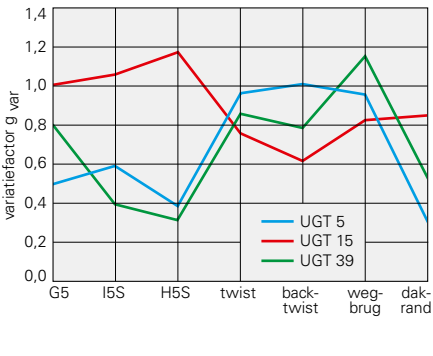
te plooiën, worden in de berekening niet meer meegenomen. In geval van het schaaldak betekent dit dat het model gereduceerd wordt van een plaat-/schaalmodel naar een balkenmodel. Dit verandert het gedrag van het dak dusdanig dat de krachtswerking ook wijzigt. Voor de toetsing van het dak is dit geen probleem, maar voor de belastingafdracht naar de aansluitende constructies en onderbouw wel. In een intensief proces met de constructeurs van de omringende constructies is de krachtswerking al bepaald en getoetst. Dit proces opnieuw ingaan zou te veel tijd vergen, waardoor gekozen is om deze route niet te volgen en te blijven bij het oorspronkelijke plan om te toetsen volgens de spanningsreductiemethode. Wel is de doorsnedereductiemethode als controle gebruikt.

Toetsing spanningsreductiemethode

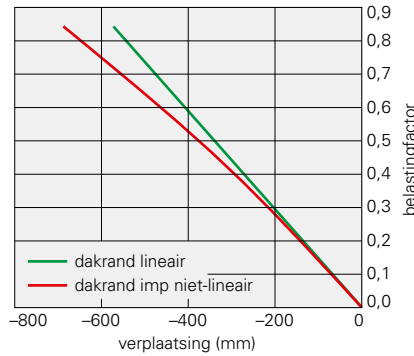
De werkwijze met het toetsen volgens de spanningsreductie is als volgt:

Literatuur

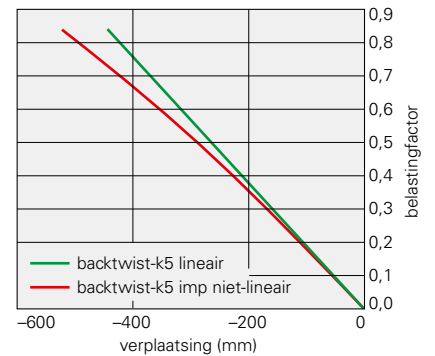
1. J. Coenders, S. Hofman, J. Paul en A. Dingsté, 'Ontwerp van een complex schaaldak', *Cement* 2013/2, p. 28-33.
2. W. Van Dijk, M. Falger en R. Sterken, 'Scheepsbouwtechniek OVT', *Cement* 2013/2, p. 34-41.
3. M. Spanenburg en M. Falger, 'Constructieve interactie', *Cement* 2014/2, p. 36-43.



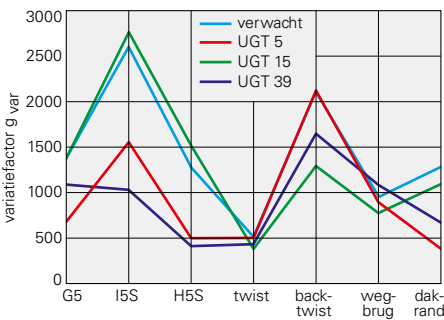
8. Variëtefactor oplegreacties bij verschillende UGT's.



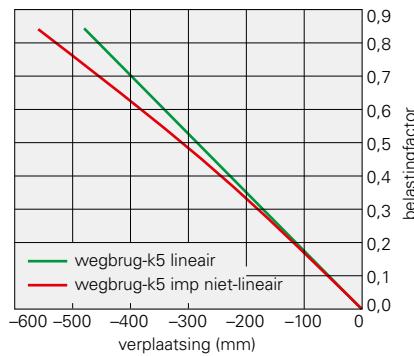
10. Last-zakkingsgedrag dakrand.



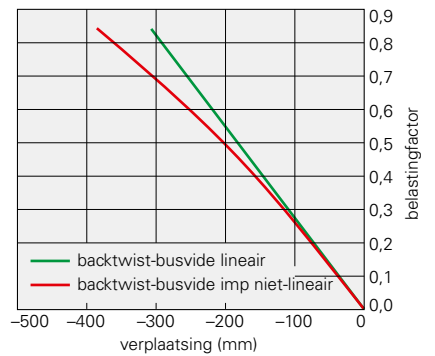
11. Last-zakkingsgedrag backtwist.



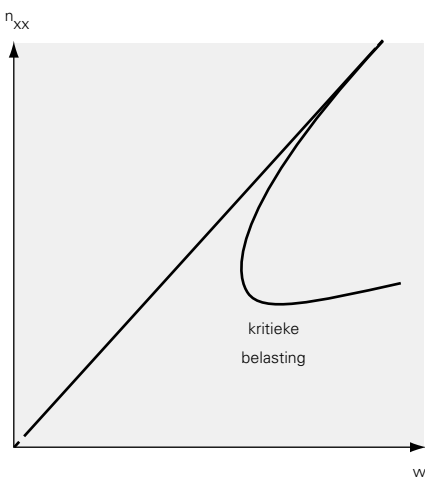
9. Variatie (absoluut) oplegreacties bij verschillende UGT's.



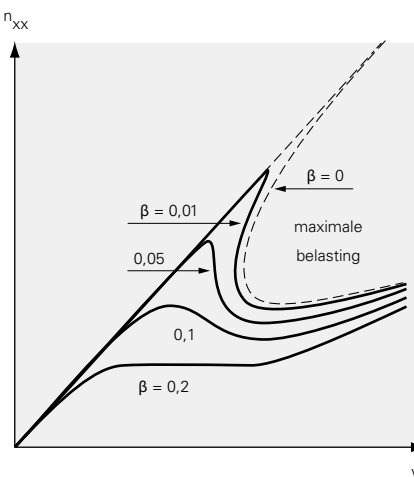
12. Last-zakkingsgedrag wegbrug.



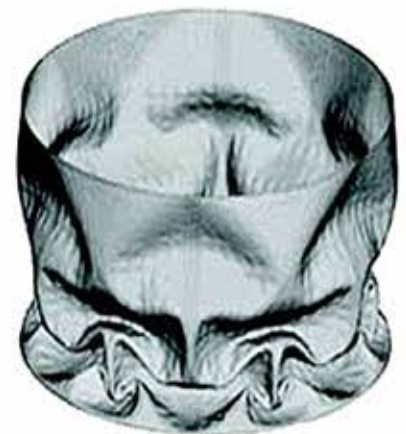
13. Last-zakkingsgedrag backtwist-busvide.



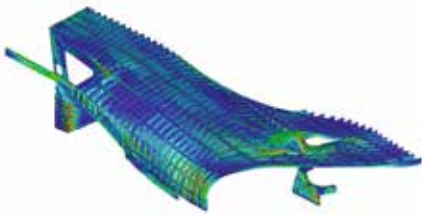
14. Kritieke belasting en knockdown in na-kritieke sterkte.



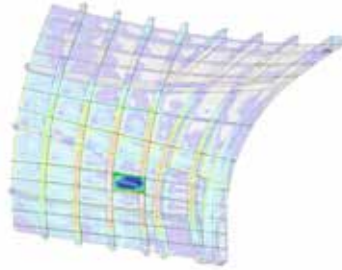
15. Kritisch gedrag en knockdown.



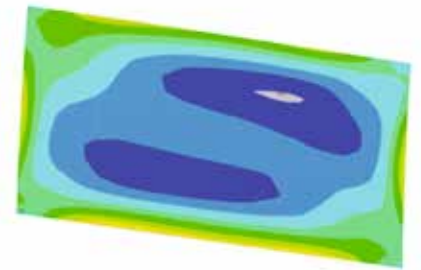
Knockdown-effect.



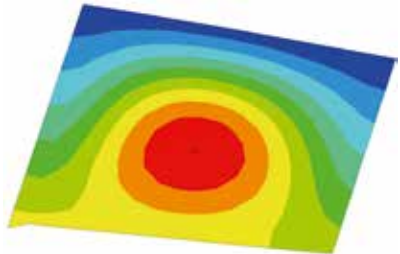
16a. Hoofdmodel.



16b. Submodel.

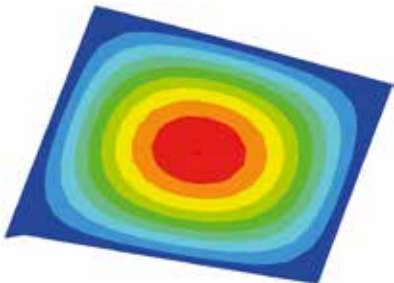


16c. Plaatmodel.



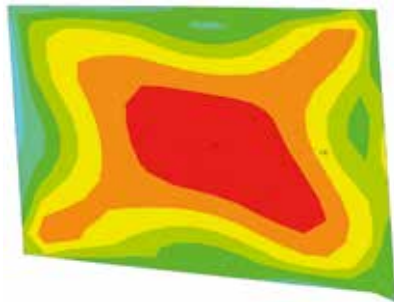
spanning in N/mm^2
7,1 7,2 7,3 7,4 7,5 7,6 7,7 7,8 7,9 8,0

17a. 1^e Orde-uitbuiging plaat uit submodel.



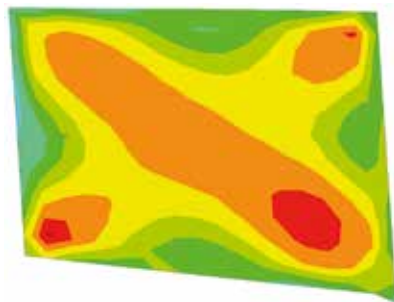
spanning in N/mm^2
0 0,11 0,22 0,33 0,44 0,56 0,67 0,78 0,89 1,00

17b. Lineaire ploovorm voor imperfecties.



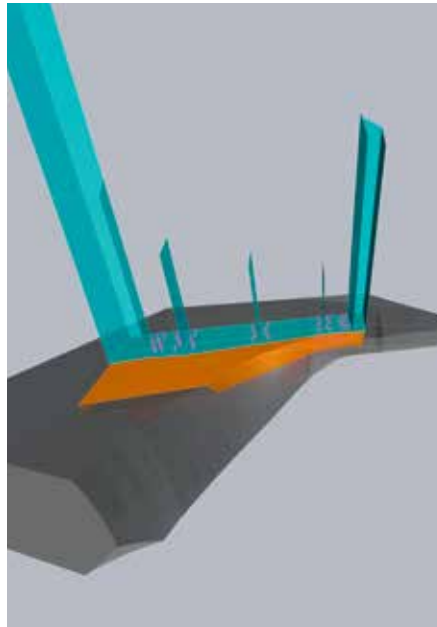
spanning in N/mm^2
8,5 22 35 49 62 75 89 102 116 129

17c. 2^e Orde-vergelijkingsspanning incl. imperfecties bovenzijde.



spanning in N/mm^2
20 56 91 127 162 198 234 269 305 340

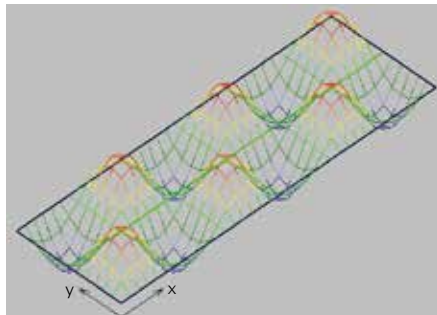
17d. 2^e Orde-vergelijkingsspanning incl. imperfecties onderzijde.



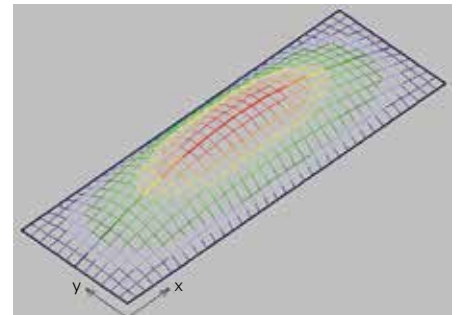
18a. Rhino-model aansluiting staal-beton.



18b. Droge aansluiting.



19a. Lineaire ploovorm plaat met stijve verstijvers.



19b. Lineaire ploovorm met te slappe verstijvers.



20a. Aansluiting op betonpenanten (nat)...



20b. ...die naderhand worden aangestort.



21. De twist in eindsituatie.

- bepalen spanningsverdeling hoofdmodel (geometrisch niet-lineair, GNL)(afb. 16a);
- vertalen spanningen hoofdmodel naar submodel (afb. 16b).
- toetsen dubbelgekromde plaatvelden met geïsoleerde plaatmethode (afb. 16 en 17);
- toetsen rechte plaatvelden met formules uit de NEN-normen;
- toetsen verstijvers met NEN.

Het doel van het submodel is om met een fijnere FEM-mesh de spanningsverdeling inzichtelijk te maken. Hierin worden ook de verstijvers et cetera mee gemodelleerd. De spanningsverdeling wordt berekend door de kinematische randvoorwaarden uit het hoofdmodel op te leggen aan het submodel. Ter controle worden de verplaatsingen en spanningen vergeleken met het hoofdmodel. Uit dit submodel kunnen dan de spanningen voor de plaattoetsing worden afgelezen. Het toetsen van de dubbelgekromde platen kan niet met het submodel maar moet met een GNL-berekening gedaan worden. Aan het submodel zijn de verplaatsingen opgelegd, waarmee in een GNL-berekening niet de juiste krachtsverdeling kan worden berekend. Er is dus een model nodig dat krachten als randvoorwaarden heeft en geen verplaatsingen. Hiervoor wordt een individuele



22. Overgang staal-beton.

plaat geometrisch niet-lineair doorgerekend, waarbij de opgelegde krachten uit het submodel komen en imperfecties volgens de NEN-normen worden aangebracht op de 1° ploovorm. Afbeelding 17 is een voorbeeld van een berekening van de lokale stabiliteit van een plaat. Het toetsen van de rechte plaatvelden en verstijvers (stijfheid, stabiliteit en sterkte) wordt vervolgens met NEN 6772, hoofdstuk 13 gedaan.

Uiteindelijk is het volledig model met alle aangepaste platen nog een keer in een hoofdmodel doorgerekend en beoordeeld. Het bleek dat de constructie de ge-update krachtsverdeling kon opnemen.

Aansluitingen

Het stalen dak moet uiteindelijk worden verbonden met de betonconstructie (afb. 18 en 20). Hoewel het verbinden van een stalen scheepshuid met een betonconstructie niet standaard is, zijn hiervoor twee bekende aansluitprincipes aangehouden, namelijk:

- droge verbindingen (bouten);
- natte verbindingen (instorten).

Droge verbindingen hebben de voorkeur uit montage-oogpunt. Hierbij dient in het detail tolerantie kunnen worden opgenomen, maar moet de aansluiting ook de grote krachten



23. Trompetwand (gebouw K5).

kunnen opnemen. De droge aansluitingen zijn daarom uitgevoerd met overmaatse gaten en ingestorte ankers. De ruimte tussen de ankers wordt aangegoten met lijm-mortel. Vervolgens wordt het gevulde gat afgesloten met een plaat die voor de zekerheid wordt gelast aan de voetplaat. Hierdoor worden ankers gelijkmatig op afschuiving belast, maar kunnen ze ook trekkrachten opnemen. In een aantal gevallen diende de overgang staal-beton architectonisch geïntegreerd te worden. Hiervoor is een natte verbinding toegepast. Om een schuifvaste aansluiting te maken, zijn er deuken of wapening op de staalplaat gelast en wanneer mogelijk is de staalplaat als wapening gebruikt. In een later stadium worden hier dan de dakelementen tegen het ingestorte deel gelast. Toleranties worden opgevangen door met overmaatse secties te werken en deze in het werk in te korten, zodat deze precies passen. Zie afbeelding 20 voor ingestorte aansluitingen bij de flip en de wegbrug. Achteraf bekeken hebben de obstakels die in de voorbereiding en engineering genomen moesten worden, zich dubbel en dwars terug betaald. De bouw met prefab stalen elementen verliep snel en nagenoeg probleemloos. Uiteindelijk heeft het alternatief in staal ervoor gezorgd dat OVTA haalbaar werd binnen budget. •