



Complexe vormen OV-Terminal Arnhem zorgen voor gecompliceerde krachtswerking

# Constructieve interactie

*De bouw van de OV-Terminal in Arnhem is op dit moment in volle gang. Het project wordt gekenmerkt door de complexe vorm, innovatieve uitvoeringstechnieken en een beperkt aantal scheve steunpunten. Bovendien sluiten diverse constructies (bestaand, beton, staal) op elkaar aan. Dit alles heeft een ingewikkelde krachtswerking tot gevolg.*

De OV-Terminal is het sluitstuk van de vernieuwing van station Arnhem en bestaat onder meer uit de stationshal, een verhoogd maaiveld met een kiss- en ride-zone en een fietsenstalling. Het gebouw, ontworpen als één ongedeelde constructie, wordt in twee fasen gebouwd. Fase 1 is inmiddels gerealiseerd en omvat onder meer de fietsenkelder, een gedeelte van het verhoogde maaiveld (wegbrug) en de vloer van de centrale hal. Fase 2 omvat een kantoorgebouw (gebouw K5) en de stationshal van de OV-Terminal. Belangrijke onderdelen hierin zijn het balkon en daaraan verbonden het resterende deel van de wegbrug, beide uitgevoerd in beton. Het complex gevormde dak van de hal wordt uitgevoerd in staal, gebruikmakend van scheepsbouwtechnieken. Verder omvat het project diverse in het oog springende constructieonderdelen met de typische namen als twist, backtwist, flip en trompet (fig. 2 en 3). Aangevuld met een aantal scheefstaande wanden vormen deze elementen de ondersteuning van het balkon, wegbrug en het dak.

Door de complexiteit kende het project een lang voortraject en een bijzondere tenderfase. Deze zijn in *Cement* 2013/2 beschreven (zie kader 'Meer over OV-Terminal Arnhem'). In dit artikel zal nader worden ingegaan op de betonconstructie van fase 2.

De verschillende onderdelen zijn op punten fysiek aan elkaar gekoppeld. Het stalen dak staat bijvoorbeeld voor het grootste gedeelte op de betonconstructie van het balkon en de wegbrug, maar sluit ook aan op de in fase 1 gebouwde onderdelen. Zo is in fase 1 de basis van de twist al gerealiseerd en wordt een deel

- 1 OV-Terminal Arnhem in aanbouw; de betonconstructies van het balkon en de wegbrug vormen samen een soort hoefijzer  
*foto's: Maarten Meuleman, Bouwcombinatie OV-Terminal Arnhem VOF*
- 2,3 Dak van de OV-Terminal (ca. 90° gedraaid) en met de onderliggende betonconstructie; de bestaande opleggingen van het balkon aan de linkerzijde zijn niet getoond

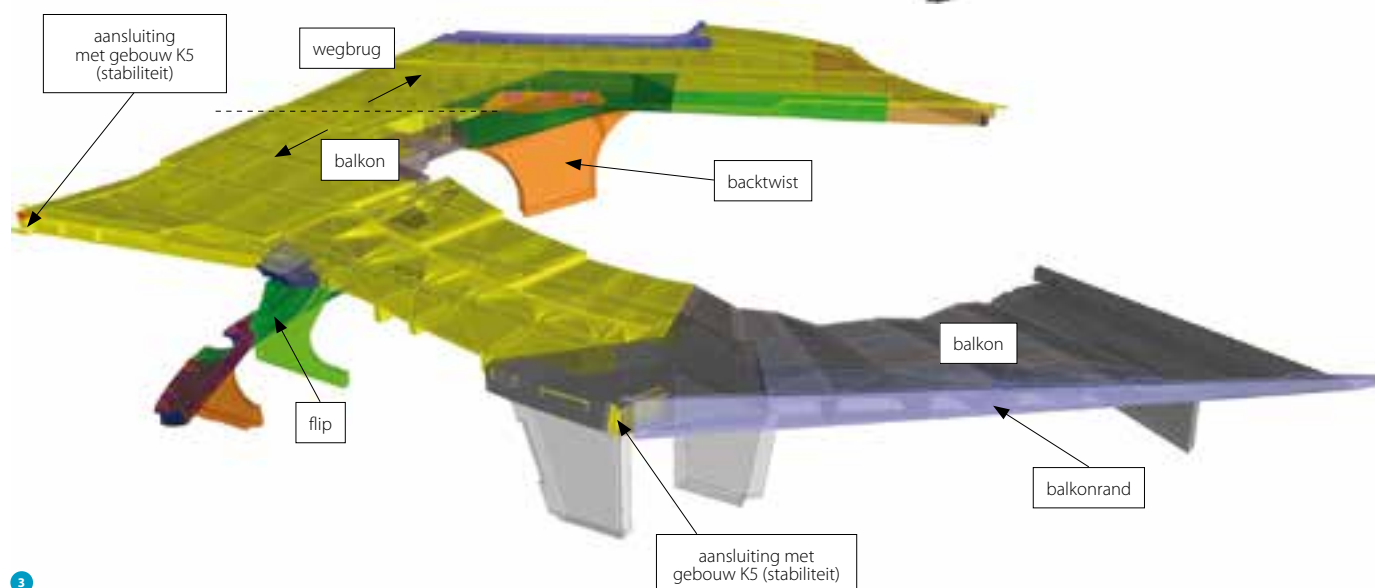
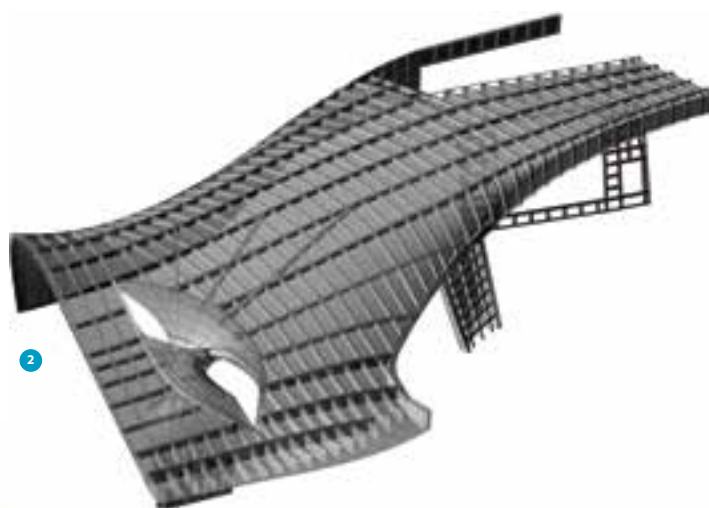
### Meer over OV-Terminal Arnhem

Over zowel het besteks- als het uitvoeringsontwerp is in 2013 al een *Cement* artikel verschenen:

'Ontwerp van een complex schaaldak' en  
'Scheepsbouwtechniek in OV-Terminal Arnhem'. Beide artikelen zijn beschikbaar op [www.cementonline.nl](http://www.cementonline.nl).



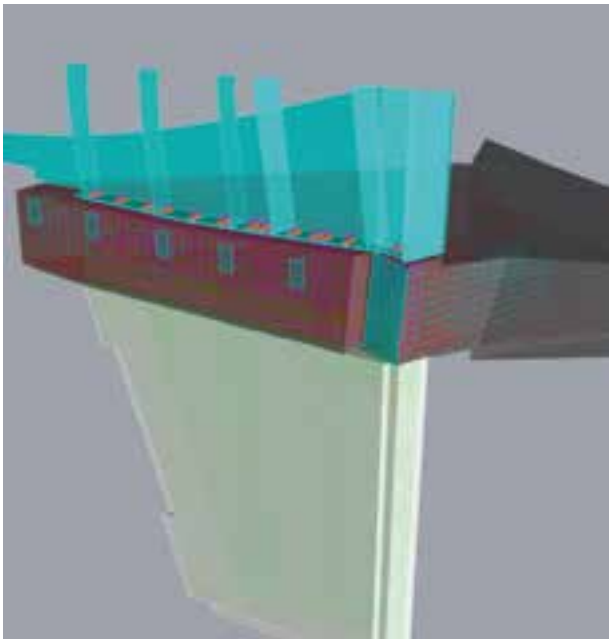
van het nieuwe dak aangesloten op het bestaande deel van de wegbrug. Door deze koppeling bestaat er een complexe interactie tussen de verschillende onderdelen en materialen. Dit maakte een zorgvuldige afstemming noodzakelijk tussen hoofdconstructeur, de constructeur van het stalen dak en de constructeur van de bestaande constructie.



4 Aansluiting wand F, balkon en stalen dak; volledig in 3D gecoördineerd en afgestemd

5 Impressie K-frames

bron: UNStudio



4



5

### Balkon als betonnen hoefijzer

De betonconstructies van het balkon en de wegbrug vormen samen een soort hoefijzer (foto 1). Het hoefijzer overbrugt een hoogte van circa 6 m, waardoor een soort wenteltrap met een flauwe helling ontstaat (fig. 2 en 3). Er is een soort landschap ontworpen dat gebruikmaakt van aaneengesloten hellende vlakken met verschillende lengten en hellingen. In het onderste gedeelte van het balkon zijn deze vlakken in twee richtingen hellend, in het hoger gelegen deel slechts in één richting. Dit deel is ook deels getrapt. Van de rest van het balkon en van de wegbrug is de bovenzijde vlak. De dragende betonconstructie onder dit landschap volgt de vorm nauwkeurig.

Het balkon is ontworpen als plaatvormige constructie, ondersteund door primaire en secundaire balken. De primaire balken hebben een vrije overspanning van circa 26 m bij een hoogte variërend van 1,2 tot 2,0 m. Als gevolg van de bijzondere vorm en krachtwerving worden hiermee de grenzen bereikt van wat haalbaar is in gewapend beton. Constructief gezien vormen de balken en de vloer een T-vormige doorsnede. De secundaire balken zijn toegepast uit gewichtsoverwegingen. Hiermee kan de vloer zo dun mogelijk worden uitgevoerd. De positie van de secundaire balken ter plaatse van knikken van het vloervlak is bewust gekozen. Dit is gedaan om zo de spatkrachten loodrecht op het vloervlak, ten gevolge van normaalkrachten in de vloerschijf, op te kunnen nemen.

De constructie van de wegbrug bestaat evenals het balkon uit primaire balken en secundaire balken. Behalve een boven-

Tabel 1 Verticale en horizontale krachten in opleggingen

oplegging	scheefstand	$R_v$ [kN]	$R_{Hx}$ [kN]
flijp	3:5	14 000	8400
trompet	2:5	6250	2500
backtwist	--	18 000	2000
wand E	1:12	13 000	1100

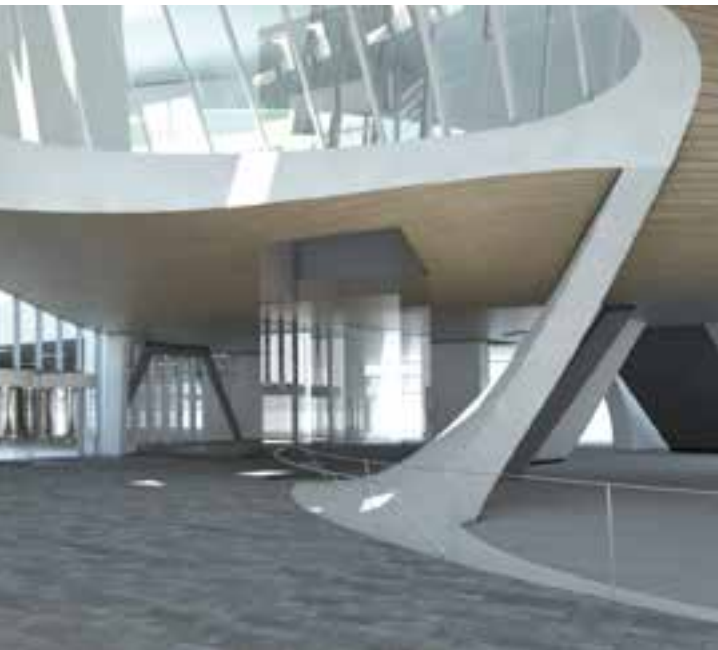
plaat heeft de wegbrug ook een onderplaat, waardoor de constructie in feite een gewichtsbesparende plaatvloer is.

De vloeren van het balkon en de wegbrug zijn uitgevoerd met breedplaten. Alleen de onderplaat van de wegbrug is in het werk gestort (onderzijde is schoonbeton). De vloerschijven moeten naast buiging ook trek-, druk- en schuifkrachten overdragen. In veel gevallen treedt hierdoor resulterende trek in de vloer op en is beugelwapening in de vloer noodzakelijk om voldoende dwarskrachtcapaciteit te garanderen. De breedplaten zijn daarom geheel of gedeeltelijk van beugels voorzien.

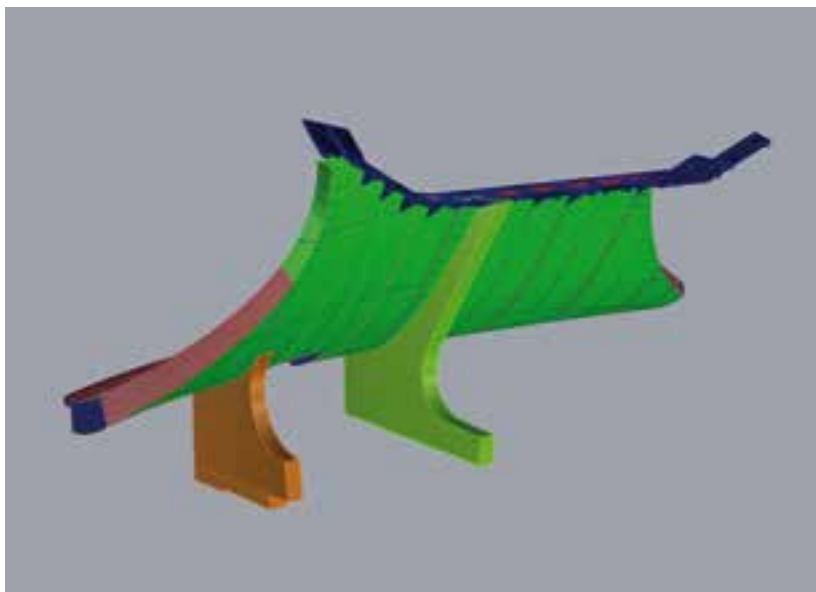
Ter plaatse van de oplegpunten is de constructie massief uitgevoerd om een geleidelijke krachtsinleiding van hoge reacties mogelijk te maken en om de diverse balken met verschillende oriëntaties samen te brengen.

### H-krachten en opleggingen

De betonconstructies van het balkon en de wegbrug (tezamen hoefijzer) verzorgen de stabiliteit van de OV-Terminal. Het



balkon waarborgt tevens de stabiliteit van het gebouw K5 dat naast de OV-Terminal is gelegen. Zowel dit gebouw als het dak is in horizontale richting gekoppeld aan het hoefijzer en draagt hieraan dus horizontale belastingen af. Het hoefijzer draagt op zijn beurt de horizontale belasting als een horizontale (deels geknikte) schijf af naar de opleggingen. Tot slot neemt het balkon alle horizontale belasting op die ontstaat doordat de steunpunten onder het balkon scheef staan.



Zowel het beginpunt als het eindpunt van het hoefijzer sluit aan op de bestaande constructie van fase 1. Deze punten fungeren als oplegpunt voor alle zes de richtingen. De overige oplegpunten van het balkon worden gevormd door de twist, de backtwist, de flip en drie andere wanden (fig. 2 en 3). Slechts één van deze wanden kan als een zuiver 'recht' steunpunt worden opgevat. De overige steunpunten staan scheef of zijn gekromd.

Juist deze scheefstand veroorzaakt de grootste horizontaalkrachten in de constructie. Door deze horizontale componenten ontstaat er een complex, meervoudig statisch onbepaald krachtenspel dat per belastingsgeval/ en -situatie verschillend is. Om dit gedrag inzichtelijk te maken, is gebruikgemaakt van diverse rekenmodellen. Hiermee is bepaald hoe de belastingen naar de steunpunten worden afgedragen. Daarnaast zijn ook zogenoemde belastingspaden gedefinieerd. Dit zijn arbitrair gekozen paden waarlangs de diverse horizontaalkrachten in het balkon evenwicht maken met de krachten in de onderbouw. Op deze manier wordt gegarandeerd dat altijd krachteenwicht mogelijk is en de constructie dus stabiel is.

Om een indruk te geven van de krachten die op het balkon en de wegbrug werken, is in tabel 1 een overzicht gegeven van de grootste  $H$ -krachten uit scheefstand.

In een aantal gevallen komen diverse constructies bij elkaar, die allemaal grote  $H$ -krachten overdragen. Een goed voorbeeld hiervan is de knoop ter plaatse van het massief in het balkon. In deze knoop komen de betonconstructie, een belangrijk oplegpunt van het stalen dak en van een spant uit gebouw K5 samen. Gezien de complexe betonvorm en de samenkomst van een dicht wapeningsnet, met zowel ankers in horizontale als verticale richting, is deze volledig in 3D uitgewerkt en afgestemd met de betrokken partijen om clashes in de uitvoering te voorkomen (fig. 4).

Aan de westzijde van de OVT bevindt zich het al gereali-seerde gebouw K4 wat tevens deel uitmaakt van het masterplan voor het stationsgebied. De constructie van het hoefijzer is opgelegd op vier wandschijven uit dit gebouw K4. Omdat ook deze wandschijven scheef staan, veroorzaakt de verticale belasting uit de OVT ook hier aanzienlijke horizontale krachten. Aangezien ter plaatse van deze aansluiting een dilatatie is voorzien waarbij de constructie van OVT glijdend is opgelegd, kunnen geen  $H$ -krachten aan de OVT worden afgedragen. De horizontale stabiliteit van de wanden wordt daarom verzorgd door twee K-frames die tussen de kolommen zijn aangebracht (fig. 5).

### Flip

De flip is naast de twist één van de meest kenmerkende onderdelen van het gebouw en dient als steunpunt voor het balkon.

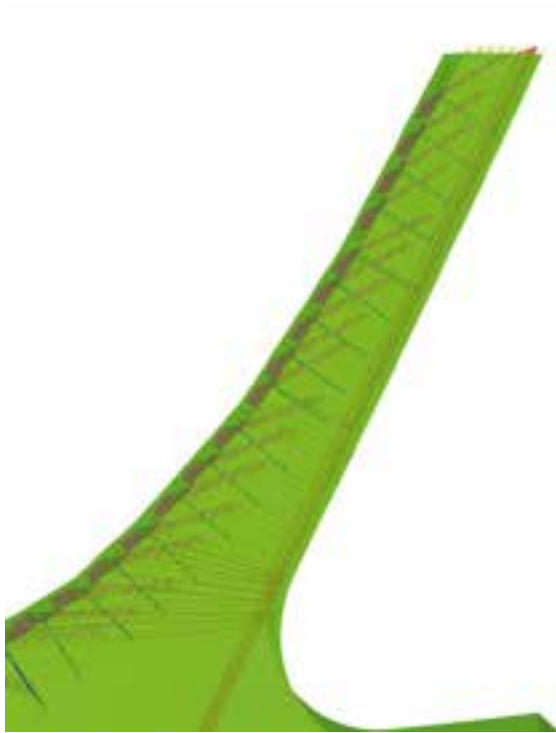
Het is een sterk gekromde constructie die begint als vloer en overgaat in een wand onder een hoek van 70° (fig. 6). Onder deze gekromde wandschijf bevinden zich twee penanten die de flip extra stijfheid geven en tevens de afdracht van de verticale belasting uit het balkon verzorgen.

Vanwege de complexe vorm, is ervoor gekozen de wandschijf, net als de dakconstructie, in staal uit te voeren met behulp van scheepsbouwtechnieken. De flip wordt in stalen secties op de bouw aangeleverd.

De ondersteunende wanden zijn wel uitgevoerd in beton (schoonbeton volgens CUR100). Deze wanden werken constructief samen met de gekromde wandschijf. Grote schuifkrachten moeten vanuit de stalen flip worden afgedragen aan

de wanden. Hiervoor zijn veel details bedacht, zoals een tandvormige aansluiting, stalen doken en aangelaste wapening. Om ongewenste spanningsconcentraties in het beton te voorkomen, is ervoor gekozen de aansluiting te realiseren met aangelaste wapening. Deze verbinding is relatief flexibel waardoor enige herverdeling in de constructie kan optreden wanneer de werkelijke, moeilijk te voorspellen krachtswerking afwijkt van de berekende. Hiermee kan scheurvorming in de wanden worden beperkt. In figuur 7, foto 8a en 8b zijn de wapeningsdetails gegeven.

Een direct gevolg van de keuze voor een verbinding via aangelaste wapening is dat de wanden onder de secties van de flip in het werk moesten worden gestort. Alleen zo kon een natte knoop worden gemaakt. De secties dienden hierbij als koptisten van de



7



8a



8b

### Meer over uitvoering

Over de bekisting van het balkon en de wegbrug en over de ondersteuningsconstructies verschijnt een artikel in *Betoniek Vakblad*. Dit artikel zal zodra het is verschenen (april) tijdelijk gratis zijn te raadplegen voor abonnees van *Cementonline* op [www.cementonline.nl](http://www.cementonline.nl).



wanden. Deze secties zijn eerst zeer nauwkeurig in positie opgehangen aan een hulpconstructie waarna de wanden eronder zijn gevlochten. De nauwkeurige positionering van de secties (binnen enkele millimeters) was nodig om later de resterende secties te kunnen plaatsen en lassen. Scheepsbouw kent doorgaans een veel hogere nauwkeurigheid dan betonwerk.

Voor het storten van de betonwanden is zelfverdichtend beton gebruikt. De reden hiervoor was dat door de vorm van de wanden trillen erg moeilijk en niet controleerbaar is. Daarnaast bevindt zich veel wapening in de wanden en is de kans op luchtbellen door toepassing van zelfverdichtend beton aanmerkelijk kleiner. De flip is ruim 9 m hoog. Om ontmenging door de grote valhoogte te voorkomen, is een stortkoker in de wanden aangebracht. Om clashes te voorkomen, is de wapening vooraf volledig 3D uitgetekend inclusief de stortkoker.

## Modellering constructie

Voor de modellering van een dergelijk complexe constructie zijn diverse rekenmodellen gebruikt. Het primaire doel van het rekenmodel is inzicht te krijgen in de belastingsafdracht en de krachtwerving in de constructie (fig. 9). Om dit te bereiken, zijn de volgende aspecten in het model meegenomen:

- invloed van de horizontaal- en verticaalkrachten;
- invloed van de belangrijkste vormaspecten (knikken, scheefstanden, enz.);
- interactie met de overige constructies (bestaande constructie en stalen schaaldak).

De eerste twee punten zijn voornamelijk geometrische effecten en kunnen worden meegenomen door de scheve steunpunten, knikken en externe  $H$ -krachten in het model te betrekken. Om de interactie met de bestaande constructie te beschrijven, is het relevante deel van de constructie van fase 1 mee gemodelleerd. De randvoorwaarden (stijfheden en capaciteiten) van de bestaande constructie zijn door de constructeur van deze constructie opgegeven. Deze heeft tevens getoetst of de belastingen vanuit OVT op de al bestaande constructie opneembaar zijn.

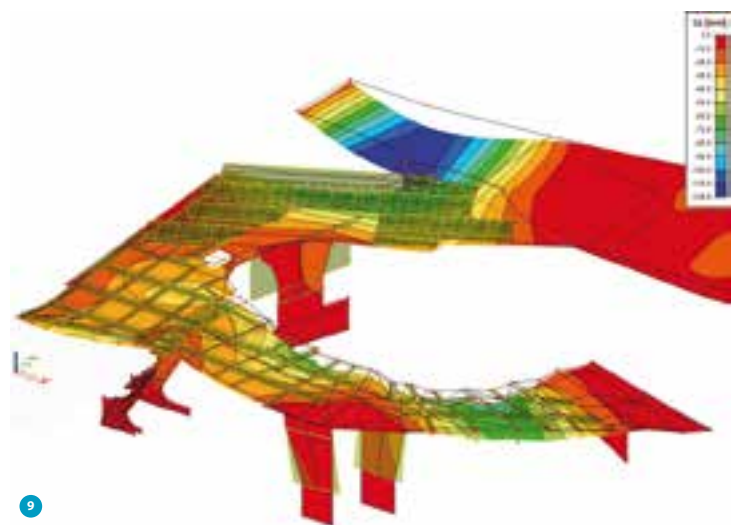
Doordat de betonconstructie volledig monoliet is verbonden met de stalen constructie van het dak (als gevolg van een vormeis van de architect) ondervinden deze onderdelen een sterke constructieve interactie. Zo veroorzaken belastingen op het balkon spanningen in de staalconstructie van het dak en omgekeerd. Deze interactie is op een bijzondere wijze afgestemd. Het was niet mogelijk beide delen in één model te beschouwen. Contractueel is namelijk vastgelegd dat het dak door de scheepsbouwer wordt geleverd en geëngineerd terwijl de betonconstructie van het balkon en de wegbrug door de

## Bouwfaserig

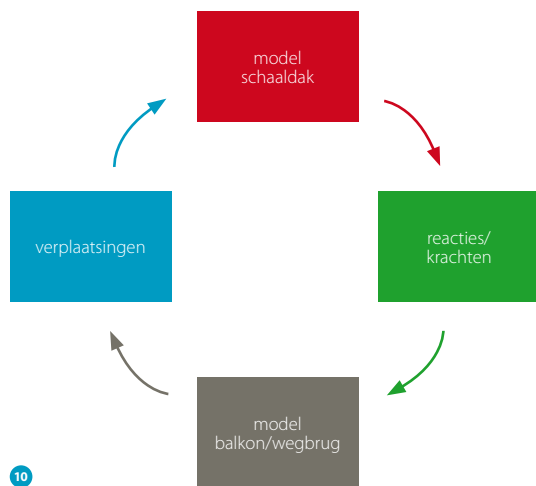
De grote  $H$ -krachten in de constructie geven de nodige randvoorwaarden voor de bouwfase. Het systeem is pas volledig in evenwicht als de gehele constructie gereed is. Er is echter een aantal oorzaken te noemen waardoor de constructie niet in één keer kan worden belast:

- de grootte van de constructie;
- reizigersstromen die zich tijdens de bouw onder en rondom de bouwplaats bevinden;
- de snelle ontlasting om verkleuring te voorkomen (schoonbeton).

Er is voortdurend overleg tussen de uitvoering en de hoofdconstructeur over de uitvoeringsvolgorde in relatie tot het horizontale evenwicht van de constructie. In een aantal gevallen bleek het noodzakelijk aanvullende hulpconstructies te plaatsen, of bepaalde ondersteuning langer te laten staan om het evenwicht in de bouwfase te garanderen (zie ook kader 'Meer over uitvoering').



hoofdconstructeur wordt uitgewerkt. In dit afstemmingsproces gaf de hoofdconstructeur belastingen en randvoorwaarden op aan de constructeur van het dak, waarna hij de respons van het dak bepaalde. Echter, bij het vaststellen van de randvoorwaarden ontstonden de nodige uitdagingen. Het bleek voor een aantal oplegpunten van het stalen dak niet mogelijk deze als een normale veer te karakteriseren. Er waren namelijk oplegpunten die een tegenstelde verplaatsing vertoonden ten opzichte van de richting van de kracht in de aansluiting. Dit merkwaardige gedrag ontstaat doordat de scheve steunpunten onder het balkon een horizontale verplaatsing veroorzaken die



10

soms tegengesteld is aan de richting van de kracht tussen het dak en het balkon. Het dak 'voelt' dus een belasting in een richting die tegengesteld is aan de richting waarin het verplaatst. Aangezien een negatieve veerwaarde geen enkele fysische betekenis heeft, is ervoor gekozen de belastingen en verplaatsingen tussen het schaaldak en de betonconstructie, per belastingsgeval, iteratief vast te stellen (fig. 10).

Om het draagvermogen van een betonconstructie te toetsen, is er behoefte aan momenten, normaal- en dwarskrachten in de doorsnede. Zowel de balken als de vloerschijven en de wanden zijn gemodelleerd met plaalementen. Door de balken ook als platen te modelleren, is het eigen gewicht van de constructie in één keer goed meegenomen (het eigen gewicht is het grootste belastingsaandeel). Over de plaalementen konden vervolgens integratiestroken worden aangebracht, waarmee snedekrachten konden worden bepaald. Door middel van vergelijkende balkberekeningen en controles van momentensommen ( $\Sigma M = 1/8 q L^2$ ) zijn deze geverifieerd.

### Schoonbeton

Grote gedeelten van de betonconstructie worden in schoonbeton op basis van CUR100 uitgevoerd. Dit heeft duidelijke gevolgen voor de betonconstructie. Bijvoorbeeld voor de toelaatbare scheurwijdte, de mengselsamenstelling en de uitvoering. Alle drie de onderdelen hebben ook weer invloed op elkaar en moeten vooraf goed worden afgestemd. Bij dit project is door een eigen betontechnoloog een mengsel op maat bepaald. In verband met de kleurstelling en het beperken van hydratatie-warmte is gekozen voor een mengsel waarbij hoogovencement overheerst.

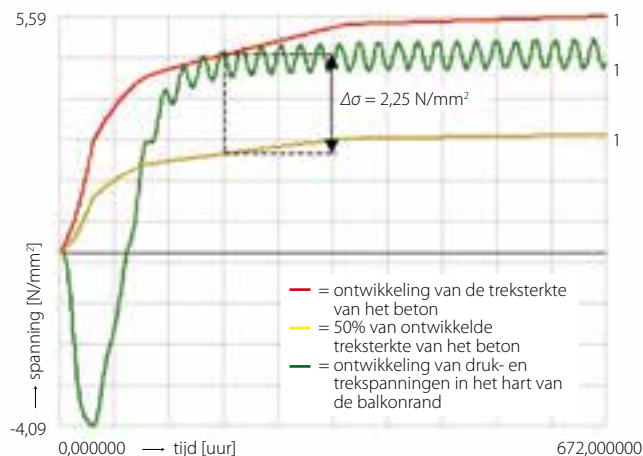
- 10 Afstemming krachtswerking rekenmodel schaaldak met balkon/wegbrug
- 11 Spanningsontwikkeling (druk- en treksterkte) in de doorsnede van de balkonrand ten gevolge van hydratatie-warmte; de kans op scheurvorming is groot en er zijn maatregelen getroffen  
*bron fig. 11 en 12: Ballast Nedam Engineering, M.R. van der Wolf, M. Nowak*
- 12 Dwarsdoorsnede van de balkonrand met spanningsgradiënten

Daarnaast moet volgens de eisen van CUR100 scheurvorming worden beperkt. Voor OVT is de oorzaak van de te verwachten scheurvorming uitwendige belasting, verhinderde opgelegde vervorming of een combinatie van beide.

In geval van uitwendige belasting wordt scheurvorming beheerst door voldoende wapening aan te brengen. Voorbeelden hiervan zijn de onderkant van de wegbrug en de balkonrand.

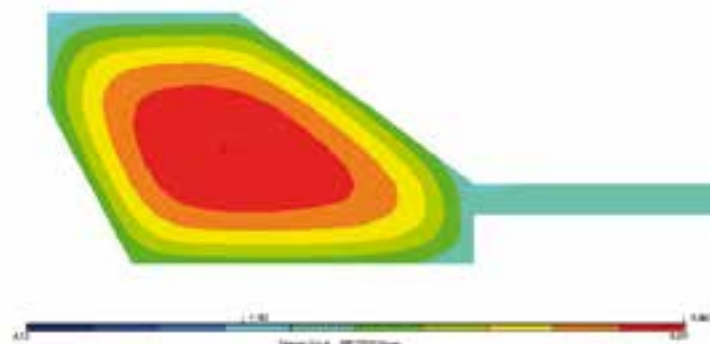
Scheurvorming als gevolg van opgelegde vervormingen kan ook op andere manieren worden voorkomen (fig. 11). Zo kunnen trekspanningen ten gevolge van verhinderde krimp worden voorkomen door de onderdelen in schoonbeton eerst uit te voeren en hier vervolgens andere constructieonderdelen tegenaan te storten.

Deze truc gaat bij trekspanningen ten gevolge van hydratatie-warmte helaas niet op. Bij de massieve onderdelen (zoals de balkonrand) is een temperatuur- en spanningsberekening gemaakt om te beoordelen of maatregelen ter voorkoming van scheurvorming noodzakelijk waren (fig. 11). Hoewel een mengsel met een lage temperatuurontwikkeling wordt toegepast (veel



11

12



- 13 Vlechten wapening balkonrand
- 14 Vlechten wapening balken balkon
- 15 Eerste stort beton van balkon gereed

13



14



#### ● PROJECTGEGEVENS

**project** OV-Terminal Arnhem

**opdrachtgever** ProRail namens ministerie van I&M, gemeente Arnhem en NS

**architect en masterplan** UNStudio

**constructeur** BAM Advies & Engineering

**constructeur (toetsend)** ABT

**constructeur fase 1** Arup

**aannemer** Bouwcombinatie OV-Terminal Arnhem VOF (Ballast Nedam en BAM)

15



hoogovencement), is dit alleen niet voldoende. Daarom zijn de volgende (aanvullende) maatregelen overwogen:

- koelen;
- verlagen specietemperatuur;
- isoleren;
- wapenen.

Uiteindelijk is om uitvoeringstechnische redenen gekozen ook bij scheurvorming als gevolg van hydratatiewarmte deze te beheersen door middel van wapening.

Wanneer het beton uiteindelijk is gestort, mag het niet te lang in de kist blijven zitten om verkleuring te voorkomen. Beton dat lang in aanraking geweest is met de bekisting heeft de neiging blauw-grijs te verkleuren. Wanneer de bekisting wordt verwijderd en het oppervlak aan zuurstof wordt blootgesteld, verdwijnt deze verkleuring weer. Hier gaat echter een lange tijd overheen. Als gevolg hiervan kunnen oppervlakken

die lang in de kist hebben gezeten bij oplevering (het ijkmoment) een andere kleur hebben dan oppervlakken die kort in de kist hebben gezeten. Hiermee is in de bouwfase met de ondersteuning rekening gehouden (zie ook kader 'Bouwfasering').

#### Tot slot

De uitvoering van het betonwerk van OV-Terminal Arnhem verloopt voorspoedig mede door de goede voorbereiding op papier en computer. De verwachting is dat het laatste deel begin mei van 2014 kan worden ontkist. Vooralsnog staat er een betonconstructie van formaat die qua vormgeving en complexiteit niet snel zal worden geëvenaard. Na oplevering van het betonwerk is OVT alles behalve gereed. De op zichzelf zeer interessante en complexe betonnen schijf wordt vanaf dat moment letterlijk en figuurlijk het podium voor de opbouw van het dubbelgekromde stalen dak. ☒