

Nederland is een waterrijk en dichtbevolkt land, zodat bruggen en viaducten behoren tot de gebruikelijke infrastructuur. Met de toenemende mobiliteit door het nog steeds groeiende woon-werkverkeer, de doorvoerfunctie, de hoge economische activiteiten en het steeds doorgroeiend autobezit is de behoefte de infrastructuur aan te passen aan de vraag groot, maar de beschikbare ruimte en ook de bouwbudgetten zijn daarvoor te krap.

Daar waar vroeger bruggen of viaducten eenvoudig in het landschap konden worden ingepast en een eenvoudige kruising prioriteit kreeg, is die prioriteit nu vervallen. Bruggen en viaducten worden ingepast in de overgebleven beschikbare ruimte. En het is verbazend te constateren dat de oplossingen daarvoor steeds weer worden gevonden. Scheve kruisingen, veelhoekig of rond tracé, afgesloten vorm van de doorsnede, kleine constructiehoogten, het blijkt mogelijk prefab-betonoplossingen aan te dragen bij steeds grotere overspanningen.

Prefab beton is veelvuldig toegepast vanwege de mogelijkheden, de hoge bouwsnelheid, de duurzaamheid en de (integrale) kosten per m² dekconstructie. Zowel de steeds hogere betonsterkteklasse die kan worden toegepast, als de moderne reken- en voerspanttechnieken maken het mogelijk om de overspanningen te vergroten totdat de maximale voerspancapaciteit of de interne hijscapaciteit is bereikt. Het materiaalgebruik per m² brugdek neemt nog steeds relatief af. Voorspannen is nu mogelijk tot 1500 ton en 2000 ton per ligger. Het maximale hijsvermogen in de fabriek en op het tasterrein is 120 ton en zelfs op één locatie al meer dan 200 ton. De elementen moeten evenwel transporteerbaar blijven, zodat de te volgen route naar de bouwplaats of transport over het water steeds moeten worden afgewogen.

De montage- en stortwerkzaamheden op de bouwplaats worden in de huidige ontwerpen en systemen geminimaliseerd. De toepassing van kokerliggers in allerlei vormen en doorsneden is sterk gegroeid sinds de introductie op de markt, in het midden van de jaren '80.

De toepassing van Zelfverdichtend Beton (ZVB) vereenvoudigt de fabricage van kokers, terwijl tevens de visuele kwaliteit toeneemt. Gezien de ontwikkelingen van de afgelopen vijftien jaar is er nog lang geen eind aan de ontwikkeling gekomen. Nederland is op het gebied van prefab-betonbruggen en -viaducten wereldwijd gezien zeer vooraanstaand.

Auteur: ing. S.J de Boer, Ballast Nedam Engineering te Utrecht. Tot begin 2002 werkzaam bij Haitsma Prefab Beton te Maarssen.

13 BRUGSYSTEMEN EN VIADUCTEN

Inhoudsopgave

13.1	Prefab brugliggersystemen	3
13.2	Transport.....	9
13.3	Montage.....	10
13.4	Montagestabiliteit.....	12

Bijlagen

I	Brücken und Viadukte aus Fertigteilen in den Niederlanden - <i>Betonwerk und FertigteilTechnik</i> , 1994 nr. 5	15
II	Grote gebogen prefab kokerliggers voor de Beneluxlijn - <i>Cement</i> , 1999 nr. 5	
III	Vrijheid in vormgeving - <i>Cement</i> , 1999 nr. 5	
IV	Polyester bekisting voor bruggen Leidschenveen - <i>Cement</i> , 2000 nr. 3	
V	Vorm en functie hand in hand - <i>Cement</i> , 2001 nr. 4	

Literatuurlijst

- [13.1] VBB 1992 - Voorschriften Betonnen Bruggen 1992 - Uitgave Nederlands Normalisatie Instituut te Delft.
- [13.2] NEN 6702 - TGB Algemeen - Belastingen - Uitgave Nederlands Normalisatie Instituut te Delft.

13.1 PREFAB BRUGLIGGERSYSTEMEN

De fabrikanten van prefab brugliggers in Nederland hebben ieder een pakket aan standaardliggers dat in grote lijnen universeel is. De exacte profieldoorsneden verschillen van elkaar, maar het principe van de oplossingen komt in grote lijnen overeen.

Als eerste worden de standaard liggers behandeld voor hun specifieke toepassingsgebied met de bijbehorende overspanningen.

Plaatliggers

Dit type brug wordt vaak voor lagere belastingsklassen, klasse 45 en 30, toegepast. Plaatliggerbruggen bestaan uit voorgespannen platen welke in het werk van een gewapende druklaag worden voorzien. De platen worden in de lengterichting voorgespannen. In dwarsrichting wordt een wapening van FeB 500 aangebracht.

Nadat de prefab platen op de landhoofden zijn opgelegd, wordt een dwarswapening over de platen aangebracht. Deze wapening bestaat uit een dubbel net voor het opnemen van zowel negatieve als positieve momenten en dwarskrachten. De druklaag kan worden gestort zonder dat de platen verder worden ondersteund. De dikte van de druklaag bedraagt meestal 150 tot 200 mm, wat neerkomt op een massa van 3,75 tot 5,0 kN/m². Het storten van de druklaag is dus een belangrijk belastingsstadium voor de platen. De spanningen ten gevolge van deze belasting blijven gedurende de gehele levensduur van de brug bestaan. Op deze wijze ontstaat een dekconstructie met verschillende stijfheden in de overspanningsrichting en de dwarsrichting. In langsrichting is het dek door de voorspanning in de fabrieksfase ongescheurd. In dwarsrichting is het dek gewapend, waardoor met een lagere, gescheurde, stijfheid moet worden gerekend.

Plaatliggerbruggen worden tot een overspanning van circa 8,0 m toegepast. Het dek kan zowel statisch bepaald als statisch onbepaald worden toegepast. Bij een statisch onbepaalde uitvoering wordt ter plaatse van het steunpunt tussen de platen een voeg van circa 100 mm gehouden. Deze wordt tezamen met de druklaag aangestort. Hierdoor ontstaat een doorgaande constructie waarmee door het aanbrengen van steunpuntwapening negatieve momenten kunnen worden opgenomen.

Volstortliggers

De verschillende fabrikanten hebben ieder eigen profielen die qua vorm niet al te veel verschillen. Het systeem komt in grote lijnen overeen met de plaatliggerbruggen. Het verschil zit in de capaciteit van de ligger om ook bij een grotere overspanning het stortgewicht te kunnen dragen zonder dat hierdoor een groot deel van de draagcapaciteit van de brug wordt weggenomen. Het profiel bestaat uit een omgekeerde T-ligger. De liggers worden naast elkaar gelegd. Door sparingen in de ribben wordt onderwapening gestoken. De bovenwapening wordt over de liggers heen aangebracht.

Vervolgens wordt de ruimte tussen de ribben van de T's volgestort tot circa 80 mm boven de ligger. Hierdoor ontstaat een monoliete plaatbrug. De eigenschappen van de plaat zijn in de overspanningsrichting en dwarsrichting verschillend. In langsrichting blijft de brug zich gedragen als een voorgespannen plaat. In dwarsrichting ontstaat een gewapende plaat met een constructiehoogte die gelijk is aan de totale plaatdikte minus circa 120 mm. Dit is de dikte van de onderflens van de liggers. De naad tussen de onderflenzen van de liggers wordt niet gevuld.

Volstortliggers kunnen tot een overspanning van circa 16,0 m worden toegepast. Ze kunnen zowel statisch bepaald als statisch onbepaald worden uitgevoerd, zie bijlage I, pag. 19.

T- liggers

De T-liggers worden naast elkaar gelegd en in het werk van een druklaag voorzien. Hierdoor ontstaat een dekconstructie. In het algemeen worden T-liggers toegepast voor bruggen met een lagere verkeersklasse en waar de beschikbare constructiehoogte groot is. Tevens worden ze gebruikt als rand-liggers bij een T-ligger dek. T-liggerdekken zijn niet geschikt voor statisch onbepaalde uitvoering. Ter plaatse van de oplegging worden de liggers vaak gekoppeld door een in het werk gestorte dwarsdrager. In de montagefase en tijdens het storten van de druklaag dient de stabiliteit van de liggers gewaarborgd te worden. Omdat de liggers op de relatief smalle onderzijde worden gesteld zijn ze gevoelig voor kantelen.

T-liggers zijn niet erg geschikt voor het opnemen van aanrijdbelastingen. Volgens de Voorschriften Betonnen Bruggen (VBB) [13.1] moeten bruggen en viaducten die over een weg passeren, worden gecontroleerd voor het bijzondere belastingsgeval aanrijding.

Voor autosnelwegen dient te worden gerekend met een aanrijdbelasting van 2000 kN met een belastingsfactor van $\gamma = 1,0$.

Omdat de onderflenzen van T-ligger bruggen niet onderling zijn gekoppeld moet de aanrijdbelasting door één liggerlijf naar de bovenflens worden overgedragen. Dit is voor deze grote belasting vrijwel onmogelijk of gaat gepaard met zeer zware beugelwapening in het lijf van de liggers. De toepassing is dus geschikt voor plaatsen waar geen gevaar voor aanrijding aanwezig is.

Omgekeerde T-liggers

Omgekeerde T-liggers worden op dezelfde wijze gelegd en van een druklaag voorzien als T-liggers. Met dit verschil dat een bekisting tussen de liggerlijven moet worden aangebracht. Bij een gesloten onderzijde van het dek wordt meestal een verloren houten bekisting gebruikt. Bij liggerafstanden groter dan de onderbreedte van de liggers wordt een betonnen bekistingsplaatvloer toegepast waarvan de wapening ook in het definitieve stadium wordt benut. Dit type ligger is de meest economische oplossing voor brugdekken met overspanningen tussen 16,0 en 35,0 m met voldoende constructiehoogte.

De beschikbare constructiehoogte wordt door de opdrachtgever vastgesteld. In veel gevallen moet een brug of nog vaker een viaduct van verhoogde opritten worden voorzien om een vrije kruising te kunnen maken.

De hoogte van de opritten wordt zo veel mogelijk beperkt teneinde een economisch optimaal ontwerp te verkrijgen. Dit kan leiden tot het verlaten van de meest economische keuze voor de dekconstructie waarbij omgekeerde T's worden vervangen door kokerliggers, met hun lagere constructiehoogte. Dit type ligger kan eenvoudig geschikt worden gemaakt voor het opnemen van aanrijdbelastingen. De voegen tussen de onderflenzen van de liggers worden gevuld met mortel zodat een volledige schijf over het gehele oppervlak van de brug wordt gevormd. Deze schijf kan de aanrijdbelasting die in het midden van de liggers aangrijpt over alle oplegblokken verdelen.

Ter plaatse van de opleggingen worden de omgekeerde T-liggers voorzien van dwarsdragers. Door de dwarsdragers wordt een wapening aangebracht welke als een ophangwapening kan dienen voor het verdelen van de horizontale aanrijdkracht over de oplegblokken (zie fig. 13.001). Doordat de bouw van het brugdek in twee fasen plaatsheeft, dient men dit in de berekening te betrekken. Leeftijds- en betonsterkteklasseverschillen tussen de liggers en het later gestorte dek leiden tevens tot inwendige spanningen ten gevolge van krimp en kruip.

Kokerliggers

Kokerliggers vormen in het werk een volledig dek uit prefab beton. De liggers behoeven dus geen stortbelasting van een druklaag te dragen in de bouwfase. Hierdoor kan de volledige capaciteit van de liggers worden aangewend voor het dragen van de veranderlijke belasting. Dit resulteert in een kleine constructiehoogte. De holle ruimte in de ligger wordt verkregen door toepassing van een polystyreen kern of door de ligger in twee fasen te storten. In het laatste geval wordt eerst een U-vormige doorsnede geproduceerd. Zodra deze voldoende is verhard (na circa 3 uur) wordt het dek op een verloren bekisting gestort. Het uiteinde van de kokerliggers is massief over een lengte van circa 1,0 m.

Er worden in principe twee types dwarsverbinding toegepast om de liggers tot een dek samen te stellen:

- Kokers met gewapende voeg

Hierbij worden de liggers voorzien van zijdelings uitstekende wapening uit de bovenflens. De liggers worden naast elkaar geplaatst en de voeg wordt in het werk gestort.

- In dwarsrichting voorgespannen

De dwarsverbinding van de liggers bestaat hier uit voorspanning.

De voorspanning wordt door sparingsen gevoerd die in het dek van de ligger zijn opgenomen. De voeg tussen de liggers wordt aangegoten met een krimparme mortel.

Horizontaal gebogen kokers

Horizontaal gebogen kokers zijn in 1996 als eerste in Nederland geïntroduceerd. Voor kunstwerken die in een bocht liggen werden tot dan rechte liggers toegepast. Vooral bij kleinere bochtstralen ontstaat naast de randliggers een sterk in breedte verlopende uitstekende 'flap'. Esthetisch is dit een minder fraaie oplossing. Voor dit soort viaducten is een gebogen kokerligger ontworpen. Tot nu toe is de kleinst toegepaste boogstraal 100 m. De breedte van de kokerligger is mede daardoor bepaald. Het zwaartepunt van de ligger moet binnen het oplegvlak zijn gelegen, anders is er geen stabiele oplegging! Naarmate de straal kleiner wordt, zal de kokerligger breder worden of de overspanning worden beperkt. De liggers worden in het werk dwars voorgespannen zoals bij de meeste normale kokerdekken het geval is.

De productietechniek van dit soort liggers is zeer gecompliceerd. De voorspanstrengen moeten zo dicht mogelijk de as van de ligger volgen. De strengen worden via frames horizontaal afgebogen. Hierdoor volgen de strengen een geknikte lijn. De afwijking van de geknikte lijn van de strengen ten opzichte van de zwaartelijns van het profiel geeft dwarsmomenten in de ligger. Indien deze excentriciteit wordt beperkt tot circa 15 mm zijn de dwarsmomenten verwaarloosbaar.

Gebogen kokers worden meestal in een breedte van 1500 mm geproduceerd. Dit heeft als voordeel dat de ligger ook bij een kleine straal niet kantelt ten gevolge van zijn eigengewicht en zonder verankering kan worden geplaatst.

Speciaaloplossingen

Voegloos dwars voorgespannen liggers (contactliggers)

Dit is een massieve rechthoekige ligger die dwars wordt voorgespannen. Er wordt geen voeg tussen de liggers toegepast. Om een goede pasvorm te verkrijgen worden de liggers gecontramald door een reeds geproduceerde ligger als randbekisting voor de volgende ligger te gebruiken.

Horizontaal gebogen hoofdkokers met ingehangen dek

Dit type constructie (foto's 13.001 en 13.002) is bijvoorbeeld toegepast bij de Beneluxlijn voor de Metro te Rotterdam. De constructie bestaat uit twee zware kokerliggers aan de buitenzijde van het dek. In het werk wordt op het niveau van de onderzijde van de liggers een dekconstructie gestort. Hiervoor worden stekken in de randliggers opgenomen. Hierdoor ontstaat een constructie met een laaggelegen rijvloer en dus een kleine effectieve constructiehoogte.



Foto 13.001: Gebogen kokerligger



Foto 13.002: Montage gebogen kokerdek

In hoogte verlopende dwarsdoorsnede

In het kader van steeds meer vrijheid in de vormgeving van prefab dekken is een kokerdek ontwikkeld met een verlopende hoogte in dwarsrichting van het dek (foto's 13.003 t.m. 13.005). De onderzijde van het dek is langs de randen afgeschuind of de totale onderzijde is in dwarsrichting afgerond. Hierdoor ontstaat een groot aantal unieke liggers. De ombouwsnelheid van de bekisting is hier van groot belang om toch een dagcyclus in de productie te kunnen handhaven.



Foto 13.003: Montage vleugelbrug met tijdelijke ondersteuning randligger



Foto 13.004: Vleugelbrug met tijdelijke ondersteuning randligger



Foto 13.005: Landhoofd met oplegging vleugelbrug

Getoogde liggers

Voor kleinere bruggen in uitbreidingsplannen worden steeds vaker getoogde dekken ontworpen (foto 13.006). Er bestaan enkele concepten van getoogde liggers in rechthoekige en U-vormige doorsnede voor overspanningen tot circa 16,0 m.



Foto 13.006: Voorgespannen boogbrug uit U-liggers met in het werk gestorte druklaag

13.2 TRANSPORT

Transport van prefab-betonelementen geschiedt in Nederland hoofdzakelijk per as. In enkele gevallen waar brugliggers boven water moeten worden gemonteerd wordt over het water getransporteerd. Dit is tevens afhankelijk van de bereikbaarheid van de bouwplaats per as en van de ligging van de productielocatie ten opzichte van vaarwegen.

Bruggen

Tot een gewicht van 300 kN kunnen de liggers met normaal transport over de weg worden vervoerd. Er wordt veelal gebruikgemaakt van uitschuifbare vrachtauto's. Boven de 300 kN wordt gebruikgemaakt van losse dollystellen. Dollystellen zijn wielstellen waarvan het achterste stel niet mechanisch aan het voorste is gekoppeld. Op het achterste stel moet een aparte bestuurder meerijden of er moet besturing plaatsvinden via een geavanceerde computer-regeling. Hierbij is altijd politiebegeleiding noodzakelijk.

Het aantal beschikbare wielstellen in Nederland is beperkt zodat er vaak meerdere malen met dezelfde stellen heen en weer gereden moet worden. Hiermee moet in de planning rekening worden gehouden speciaal ten aanzien van eventuele wegafsluitingen.

Voor het transport van elementen geldt in grote lijnen:

- de maximale belading van een vrachtauto bedraagt in Nederland 300 kN;
- de grootste breedte die zonder bijzondere maatregelen over de weg kan worden getransporteerd bedraagt 3,5 m. De meeste vervoerders hebben hiervoor een doorlopende ontheffing;
- de grootste hoogte bedraagt 4,20 m;
- de lengte is in principe onbeperkt. De in de utiliteitsbouw gebruikte elementen hebben een lengte van minder dan 10,0 m en kunnen op normale standaard trailers worden vervoerd. Prefab-betonpalen worden tot lengtes van circa 30,0 m op uitschuifbare wagens vervoerd.

13.3 MONTAGE

De montage dient altijd zeer gedetailleerd te worden gepland met alle betrokken partijen.

Een vast aantal items moet altijd worden onderzocht:

- planning (montage planning);
- veiligheid;
- tooggegevens van de liggers;
- beschikbare montage uren;
- bereikbaarheid bouwplaats;
- draagkracht van de ondergrond;
- elementgewicht;
- uiterste reikwijdte van kraan;
- droge of 'natte' verbindingen;
- benodigde losse materialen;
- stabiliteit in montagestadium.

Er wordt altijd een montagehandboek opgesteld waarin het montagesysteem stapsgewijs wordt besproken en met name aandacht wordt besteed aan de veiligheidsmaatregelen.

Planning

De montage van de prefab-betonelementen maakt vaak een belangrijk deel uit van de totale bouw. In de fase dat de opdracht voor de levering van prefab onderdelen wordt afgesloten moet het tijdstip waarop de montage plaats zal vinden vastliggen. Ook de relatie met de andere onderdelen van de bouw zoals fundering en afbouw dient vast te liggen. Aan de hand van de beschikbare bouwtijd kan dan de benodigde inzet van montageploegen en zonodig kranen worden vastgesteld. Hierbij is het jaargetijde waarin moet worden gemonteerd van invloed op de te verwachten montagesnelheid. In de montageplanning wordt zeer gedetailleerd, soms op elementniveau, aangegeven wanneer welk element moet worden gemonteerd. De leverancier wordt door middel van afroepschema's geïnformeerd over de juiste volgorde, leverdatum en het tijdstip dat het element op de bouw moet worden aangevoerd.

Veiligheid

De veiligheidsvoorzieningen tijdens de montage hebben betrekking op mensen en materieel. Voor de veiligheid van de montagemedewerkers dienen zaken als randbeveiligingen rondom veiligheidslijnen te worden geregeld. Eventueel dienen verkeersmaatregelen te worden getroffen.

Van het materieel dienen certificaten beschikbaar te zijn met betrekking tot de vereiste keuringen.

Tooggegevens van de liggers

Aan de verschillen in opbuiging van twee naast elkaar gelegen liggers worden eisen gesteld. Vaak is de eis dat het verschil niet groter mag zijn dan 1/1000 van de overspanning. Door verschillen in de samenstelling van het beton, door variatie in de verhardingsomstandigheden en door de manier van opslaan kunnen de toegen van liggers soms sterk verschillen. Door de oplegpunten in de opslag te verschuiven kan de opbolling door voorspanning enigszins worden beïnvloed. Grote toogverschillen kunnen niet worden weggewerkt. Door de liggers met dezelfde lengte op toeg bij elkaar te zoeken kunnen toogverschillen in de montage worden beperkt.

Indien er toch verschillen optreden die de norm te boven gaan kan door het aanbrengen van knevels in de voeg tussen twee liggers het verschil worden genivelleerd tot een aanvaardbaar niveau, maar ook dat heeft zijn grenzen.

Beschikbare montage-uren

Afhankelijk van de plaats waar gemonteerd wordt kunnen de uren waarbinnen mag worden gemonteerd sterk variëren. In een stedelijke omgeving moet rekening worden gehouden met geluidoverlast waardoor de montage slechts tussen bepaalde uren mag worden uitgevoerd. In veel steden geldt op bepaalde uren een verbod voor de toegang van zwaar verkeer. Bijvoorbeeld tussen 7.00 en 10.00 uur. Dit betekent dat het transport vaak al zeer vroeg in de ochtend op de bouwplaats aanwezig moet zijn om tijdig te kunnen starten.

Bij het monteren van bruggen en viaducten over bestaande wegen moet het verkeer gedurende enige tijd worden gestremd. Dit dient enige maanden vooraf te worden vastgelegd in overleg met de wegbeheerder. Op drukke trajecten zal men dikwijls slechts in de avonduren of in de weekenden een afsluiting kunnen krijgen.

Bereikbaarheid bouwplaats

De ruimte voor het manoeuvreren met vrachtcombinaties moet worden onderzocht. Soms is de aanleg van een bouwweg naar het project noodzakelijk.

Deze kan dan vaak ook worden gebruikt voor de opstelling van de kraan.

De draagkracht van de ondergrond dient voldoende te zijn om de stempelkrachten van de kraan op te kunnen nemen. Hiertoe zijn vaak drukverdelende schotten nodig.

Droge of 'natte' verbindingen

Bij bruggen spelen de onderlinge verbindingen van de liggers niet zo'n grote rol als in de utiliteitsbouw. De verbindingen bestaan in hoofdzaak uit aangegoten voegen al dan niet met dwarsvoorspanning of in het werk gestorte druklagen. Voor kleinere overspanningen bestaat het systeem van contactliggers. De liggers worden in het werk door middel van dwarsvoorspanning tegen elkaar gespannen. Het is belangrijk dat de togen van de liggers onderling niet teveel afwijken.

Oplegblokken

Brugliggers worden in het algemeen opgelegd op rubber oplegblokken.

Voor de kleinere overspanningen wordt gebruikgemaakt van ongewapende oplegblokken of stroken. Bij langere liggers is voor de dimensionering van de blokken een combinatie van normaalkracht, rotatie en afschuiving maatgevend. In de VBB 1992 worden hiervoor dimensioneringsregels gegeven.

De dimensionering bestaat in grote lijnen uit de controle van de door de verschillende belastingen opgeroepen schuifspanningen. De schuifspanning ten gevolge van de rotatie van de liggereinden kan door toepassing van schegstukken op de blokken worden opgeheven. Dit geldt uiteraard maar voor één specifiek belastingsgeval. Aan de rubberdikte wordt een limiet gesteld. Om toch voldoende rubberdikte te krijgen voor het opnemen van hoekverdraaiingen worden de rubberlagen tussen staalplaten aangebracht.

De opleggingen van de brugliggers moeten zodanig tijdig voor de montage worden geplaatst dat de verharding van een mortelopstorting of kunstharslaag voldoende is uitgehard. Oplegblokken dienen altijd horizontaal te worden gesteld. Hierdoor wordt voorkomen dat er een constante horizontale kracht op de oplegging werkt in de vorm van een ontbondene van het eigen gewicht. De sterkte van de mortellaag onder het blok wordt bepaald door de optredende drukspanningen op de oplegging. In veel gevallen wordt een hoge sterkte gekozen omdat deze gepaard gaat met een snel verhardingstempo. Het blok kan dan binnen enkele dagen worden belast.

Stabiliteit in montagestadium

Tijdens de montage moeten de liggers tegen kantelen worden verzekerd. Dit betreft met name randliggers van omgekeerde T-dekken. Dit zijn L-vormige liggers waarvan het zwaartepunt ver naar buiten kan liggen. In dat geval diens de ligger door middel van een schoorconstructie te worden gesteund. Omgekeerde T-liggers worden meestal op één oplegblok opgelegd. Tijdens het storten van de druklaag moeten de liggers tegen kantelen worden gezekeerd.

Elementgewicht en uiterste reikwijdte van kraan

De kraancapaciteit dient zorgvuldig op de gewichten van de liggers te worden afgestemd. De plaats van de kraan tot de positie van de ligger is sterk bepalend voor de kraancapaciteit.

In veel gevallen kan met één kraan worden volstaan. Soms wordt de ligger door één kraan opgepakt, verplaatst en door een tweede kraan mede aangepikt waarna plaatsing in het werk volgt. Dit vereist een uitgebreide kennis van de situatie ter plaatse, de beschikbare kranen en ervaring.

Het zal soms goedkoper zijn twee hydraulische kranen in te zetten dan één grote zware opbouwkraan.

13.4 MONTAGESTABILITEIT

Tijdens de montage van een gebouw moet op ieder moment de stabiliteit van de verschillende elementen en hun samenstellingen te worden gecontroleerd. In het algemeen zijn de belastingen waaraan een element wordt onderworpen in deze fase het eigengewicht van het element en windbelasting.

NEN 6702 [13.2] regelt de bouwphase door middel van:

- de veiligheidsklasse. Bouwwerken worden tijdens de bouwphase ingedeeld in veiligheidsklasse 1 (art. 5.1.1);
- de belastingsfactoren. Hiervoor dienen de factoren behorend bij klasse 1 te worden aangehouden; $\gamma_g = 1,2$ c.q. 0,9 en voor $\gamma_q = 1,2$;
- de reductiefactor. De reductiefactor voor de extreme waarde van de veranderlijke belasting is afhankelijk van de duur van de montagefase. In NEN 6702 wordt voor de montagefase van bouwwerken een referentieperiode ingevoerd van minimaal 1 jaar of gelijk aan de duur van de bouwphase. De reductiefactor bedraagt dan

$$\psi_t = 1 + ((1-\psi) / 9) \ln (t / t_{50a})$$

ψ = de momentaanfactor volgens hoofdstuk 8

t = de referentieperiode ≥ 1 jaar

$t_{50a} = 50$ jaar.

De factor ψ_t is met name van belang voor de windbelasting. Met $\psi = 0,0$ en een bouwphase van 1 jaar wordt de $\psi_t = 0,57$.

In sommige gevallen moet worden overwogen of het risico van reductie van de windbelasting aanvaardbaar is in relatie tot de mogelijke schade aan personen of zaken.

Voor de montage van prefab-betonconstructies kan in het algemeen met een tijdsduur van minder dan een jaar worden gerekend. Hierbij geldt een reductiefactor van $\psi_t = 0,57$.

Het eigengewicht van een element kan excentrisch aangrijpen ten opzichte van de ondersteuning. Voorbeelden hiervan zijn:

- horizontaal gekromde brugliggers;
- niet-prismatische kolommen.

In deze gevallen dient een stabiliserend element te worden aangebracht. Voor gekromde liggers zijn dit bijvoorbeeld verankeringen aan het landhoofd waarmee een inklemmingsmoment kan worden opgenomen.

Voor een niet rechte kolom betekent dit in het algemeen dat de schoorconstructie die normaliter nodig is voor de windbelasting op de extra belasting uit scheefstand moet worden berekend.



Foto 13.007: Ribcage-brug Vinexlocatie Leidschenveen

Brücken und Viadukte aus Fertigteilen in den Niederlanden

Prefabricated Concrete Bridges and Viaducts in the Netherlands

Wim Bennenk, Koudekerk/Rhijn

1 Die Infrastruktur der Niederlande – ein historischer Überblick

Holland – Wasserland: ein gut gewählter Name. Die Franzosen sprechen von „les Pays Bas“, den tiefen Ländern, die Deutschen von den „Niederlanden“. Dieser Name gibt die Situation wieder, wie sie wirklich ist. Die Höhenschichtenkarte zeigt, daß – grob gesagt – nur der Osten und der Südosten des Landes über dem Meeresspiegel liegen; der Rest liegt ein gutes Stück darunter. Seit Jahrhunderten haben die Niederländer dem Meer Land abgerungen, um eine geschützte Küstenlinie zu erhalten. Zahlreiche Seen, die teilweise durch diese Korrekturen entstanden, wurden trockengelegt oder eingepoldert.

Die einstige Zuidersee wurde vom Meer abgeriegelt und erhielt den Namen IJsselmeer. Nach der Sturmflutkatastrophe von 1953 wurde mit der Ausführung des Deltaplans begonnen, dessen letztes Teilprojekt, der Maesland-Damm bei Rotterdam, zur Zeit im Bau ist: das letzte Glied eines umfassenden Küstenschutzsystems.

Die Niederlande sind mit dem Wasser vertraut. Das Land verdankt seinen Wohlstand der geographischen Lage am Meer und an der Mündung von Rhein und Maas. Mit seinen Seen, Kanälen und Flüssen ist Holland in der Tat ein Wasserland. Die Lage am Meer, das große Hinterland und die großen Flüsse machen die Niederlande zu einem ausgesprochenen „Transitland“.

Die Niederlande sind sehr dicht bevölkert. Am höchsten ist die Bevölkerungsdichte in der „Randstad“, dem städtischen Ballungsraum an der Küste zwischen den Häfen Rotterdam und Amsterdam. Zur Randstad gehört neben großen Städten wie Den Haag, dem Regierungssitz, auch der nationale Flughafen Schiphol. Die Industrie in diesem Gebiet ist der Motor der niederländischen Wirtschaft. Die Häfen von Rotterdam und Amsterdam werden zusammen mit dem Flughafen Schiphol heute das „Tor zu Europa“ genannt – in Wahrheit kommt ihnen diese Funktion schon seit langem zu.

Ein so kleines und so dichtbesiedeltes Land braucht gute Verbindungen, sowohl für den Binnerverkehr als auch für den Verkehr von und zu den Nachbarländern. Für den Güterverkehr ist zusätzlich zu den Wasserstraßen und den Autobahnen der Ausbau des Schienennetzes geplant.

Die Infrastruktur spielt von jeher eine wichtige Rolle in den Niederlanden, die sich in den letzten 50 Jahren als kleines Land in dem wachsenden Europa gedeihlich entwickelt haben. Auch in den kommenden Jahren wird der Verbesserung und dem Ausbau der Infrastruktur daher großes Gewicht beigemessen werden.

2 Brückenkultur

Bei all dem ist es kein Wunder, daß die Holländer eine eigene Brückenkultur entwickelt haben. Sie bauten ihre Brücken zunächst aus Holz, später mit größeren Spannweiten aus Stahl und schließlich aus Beton sowie – etwa seit Anfang der fünfziger Jahre – aus Spannbeton. Aus den fünfziger Jahren stammen auch die ersten industriell gefertigten, also aus Fertigteilen gebauten Betonbrücken in den Niederlanden. In jener Zeit wurde die Spannbeton B. V. errichtet, die heute bereits seit einigen Jahren zu den Unternehmen von Partek Beton gehört.

Neben den großen Flußbrücken und den mächtigen Bauwerken des Deltaplans, so imposant sie auch sein mögen, hat Holland glücklicherweise auch dem Freund der ländlichen Idylle mit den malerischen Holzbrücken noch immer viel zu bieten (Bild 1).

1 The infrastructure of the Netherlands, a historical perspective

Holland, waterland. The name is well-chosen. As the French say, les Pays Bas, the Low Countries, the Netherlands. This name reflects the actual situation, for the contour map shows that roughly speaking only the eastern and south-eastern parts of the country lie above sea level, while the remaining parts are well below it. For centuries, the Dutch have been reclaiming land from the sea in order to establish a well-protected coastline. Many lakes, some of which were the result of these corrections, have been pumped dry or made into polders.

The Zuiderzee was sealed off from the sea and became the IJsselmeer. Following the great flood of 1953 the Delta works were begun, the last section of which, the Maesland dam, is now being constructed near Rotterdam as the finishing touch to the coastal defences guarding against the sea.

The Netherlands are familiar with water and the country thanks its prosperity to its position on the seafront as well as to the fact that the Rhine and Maas rivers pass through it on their way to the sea. With its lakes, canals and rivers, Holland is a real waterland. Its proximity to the sea, its large hinterland and great rivers make the Netherlands into a real „transit country“.

The Netherlands are very densely populated, with the largest concentration of people living in the urban agglomeration known as the Randstad. This covers the area along the North Sea between the ports of Rotterdam and Amsterdam. An area containing large cities, such as the government centre, The Hague, and our national airport, Schiphol. The industry in this area drives the Dutch economy. The ports of Rotterdam and Amsterdam, with Schiphol airport, are now called the „Gateway to Europe“, but in fact that is what they were all along.

A small country like this, densely populated as it is, needs good connections, within the country itself as well as to and from its neighbours. In addition to transport by water and by road, preparations are also under way to expand the transport facilities by rail.

The infrastructure has always played an important role in the Netherlands, which in the past 50 years have prospered as a small country within a growing Europe. Much of the effort in the next few years will therefore again be focused on improving and expanding the country's infrastructure.

2 A culture of bridges

It is hardly surprising then that the Dutch have developed a culture for bridges, first in wood, then, particularly for longer spans, in steel, and later in concrete, starting more or less with the introduction of prestressed concrete in the early fifties. The first industrially manufactured, i.e. prefabricated concrete bridges in the Netherlands date from around that time. It was also the starting period of Spanbeton B. V., which for some years now has been an „Unternehmen von Partek Beton“.

Impressive though large bridges across our rivers and as part of the Delta works may be, happily Holland still has much to offer to the devotee to rural charms and quiet beauty spots with their picturesque wooden bridges (Fig. 1).

3 Why choose prefabricated concrete bridges?

Looking back on the more than 40 years of building prestressed concrete bridges, one can see a constant growth in the number of prefabricated bridges, both absolutely and relatively speaking.



Bilder 1. Brücken im ländlichen Holland: eine alte Brücke (a) und eine neue Fertigbaubrücke aus weiß gefärbtem Beton (b)



Figs. 1. Bridges in the dutch countryside – an old (a) and a new precast concrete bridge with white coloured concrete (b)

Figs. 1. Pont située en zone rurale en Hollande: vieux pont (a) et pont en préfabriqué peints en béton blanc (b)

3 Warum Fertigbetonbrücken?

Wenn wir die über 40jährige Geschichte des Brückenbaus aus Spannbeton überblicken, stellen wir ein stetiges Wachstum der Zahl der Fertigbetonbrücken fest, sowohl absolut als auch relativ. In all diesen Jahren hat die Technologie und mit ihr auch das Anwendungsspektrum sich immer rascher entwickelt. Grob geschätzt wird heute die Hälfte aller Brücken und Viadukte in den Niederlanden aus Spannbeton-Fertigteilen gebaut.

Die Gründe dafür sind einfach:

Möglichkeiten

- Es sind Brückensysteme von hoher Qualität verfügbar.
- Entwurf und Ausführung genügen hohen Anforderungen.
- Die verfügbaren Systeme bieten eine Lösung für jede Situation.
- Provisorische Stützkonstruktionen sind überflüssig.

Transport

- Bis zu 80 Tonnen schwere Elemente können auf der Straße transportiert werden (auf manchen Straßen nur mit Geleitz).
- Der Transport auf dem Wasser ist in vielen Fällen möglich und für Teile über 80 Tonnen die einzige Möglichkeit.

Montage

- Es stehen spezialisierte Monteure zur Verfügung.
- Die Montage beansprucht wenig Platz.



Bilder 2. Beim Brückenbau mit Ort beton wird der Verkehr durch den Schalungsbau länger behindert (a), bei Fertigbetonbrücken wird die Verkehrsbehinderung auf das Minimum reduziert



Figs. 2. Cast-in-situ bridge, extended formwork a hinder for the traffic (a) and a precast bridge a minimum of hinder for the traffic (b)

Figs. 2. Lors de la construction du pont avec du béton coulé sur place, la circulation est longtemps perturbée par la confection du coffrage (a), alors que pour les ponts en béton prêt à l'emploi elle est réduite à un minimum (b)

Along the way, the technology, and with it the extent of application, developed in an increasingly fast tempo. Very roughly speaking it can be said that half of the bridges or viaducts in the Netherlands are now being constructed in precast prestressed concrete.

The reasons for this are simple:

Possibilities

- High-quality bridging systems are available.
- Design and finish can meet high standards.
- The available systems offer a solution for any situation.
- No temporary supports are required.

Transport

- Transport of sections of up to 80 tons by road is possible, albeit that an escort will be required on some roads.
- Transport by water is often possible and is a must for sections heavier than 80 tons.

Erectionworks.

- Specialist professionals are available for assembly;
- Erection works require little extra space.
- Erectionworks can usually take place without obstructing traffic, if necessary from water.

Construction (Figs. 2)

HEFT 5/1994

BETONWERK + FERTIGTEIL-TECHNIK

85

- Die Montagearbeiten können gewöhnlich ohne Verkehrsbehinderung ausgeführt werden, nötigenfalls sogar vom Wasser aus. Bauarbeiten (Bild 2)
 - Die Bauarbeiten bringen nur minimale Wartezeiten für den Verkehr mit sich.
 - Der Zusammenbau kann in kurzer Zeit erfolgen, in manchen Fällen sogar über Nacht.
 - Die gesamte Bauzeit ist wesentlich kürzer.
- Kosten**
- In vielen Fällen ist der Preis von Fertigbetonbrücken im Vergleich zu Ortbetonbauten konkurrenzfähig.
 - Die kontrollierte Qualität von Fertigbeton mit seiner hohen Dichte und die große Erfahrung in der Detailgestaltung bieten die Gewähr für niedrige Instandhaltungs- und Verwaltungskosten.

4 Entwicklungen

Steilere Überquerungsbauwerke (Bild 3)

Bis 1980 wurden Fertigbetonbrücken für mehr oder weniger normale Situationen entworfen. In den letzten Jahren sind die praktischen Anforderungen höher geworden. Wurden Viadukte und Brücken anfangs mit geringem Neigungswinkel gebaut, so werden heute extrem steile Überquerungen verlangt. Mit Fertigbetonbrücken können diese Anforderungen erfüllt werden.

Aufprallstabilität

Da Viadukte und Brücken der Gefahr von Aufprallbeschädigungen ausgesetzt sind, wurden die Konstruktionen in dieser Hinsicht optimiert.

Kastenträger

Die letzten zehn Jahre haben außerdem auch neue Brückentypen gebracht. Zu ihnen gehört die Kastenträgerbrücke, die eine noch weitere Optimierung und neue Konstruktionsmöglichkeiten bietet. Mit Kastenträgern sind schlanke Bauwerke möglich, deren Zufahrten – zumal in der holländischen Landschaft – viel weniger Erdbewegung erfordern.

Semiflexible Fugen gegenüber durchgehenden Feldern (Bild 4)

Manche Systeme können auch als statisch unbestimmte Bauwerke genutzt werden, also mit durchgehender Brückendecke. Die Entwicklung der semiflexiblen Fuge bedeutete, daß ein durchgehender Baukörper nicht mehr erforderlich war. Bei Verbundtragwerken wird er indessen auch heute noch benutzt.

Größere Felder (Bild 5)

Der Bedarf an Trägern für größere Felder hat schnell zugenommen. Die nachstehend besprochenen Systeme bestehen sämtlich aus vorgefertigten Spannbetonelementen, die mit vorgespanntem Stahl auf einer langen Produktionsstraße hergestellt werden. Dem Bedarf an Brücken und Viadukten mit größeren Spannweiten und entsprechend stärkeren Trägern konnte durch Anpassungen der Produktionsanlagen und höhere Krankapazitäten für über 120 Tonnen schwere Träger sowie durch den Bau von Spannankern, die bis zu ca. 1 600 Tonnen aufnehmen können, entsprochen werden. Bild 5 zeigt die Zunahme der Länge und des Gewichts der vorgefertigten Spannbetonbrückenträger in den vergangenen 40 Jahren.



Bild 3. Eine schräge Fertigbetonbrücke
Fig. 3. A skew precast bridge
Fig. 3. Pont oblique en béton préfabriqué

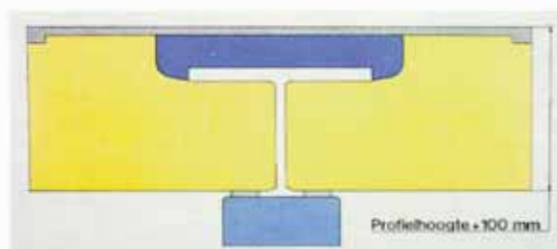


Bild 4. Schema einer flexiblen Fugenausbildung
Fig. 4. The scheme of a flexible jointslab
Fig. 4. Schéma d'une configuration de joints flexible

- Construction with minimum delays for passing traffic.
- Assembly can take place in a short time span, sometimes overnight.
- Substantial reduction of overall construction time.

And, last but not least:

Cost

- In many cases precast concrete bridges can compete in price with concrete structures cast in situ.
- The controlled quality of precast concrete with its high density and extensive experience in detailing make for relatively low maintenance and managing costs.

4 Developments

More oblique crossings (Fig. 3)

The pre 1980 precast bridging systems were designed for more or less standard situations. Over the last 10 years, the prerequisites for use have become tougher. At first viaducts and bridges had to cross at slight angles, but these days applications with extremely

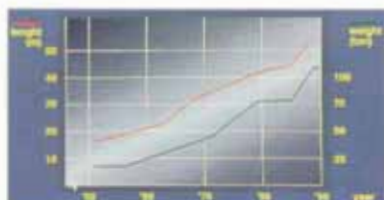


Bild 5. Veränderungen von Länge und Breite bei Fertigteilbrücken in den Niederlanden. Van-Briene-noord-Brücke in Rotterdam (a); Fertigteilträger von über 50 Meter Länge (b); Spannvorrichtung mit einer Kapazität von mehr als 1600 Tonnen (c)



Fig. 5. The growth of the length and the weight of precast bridgebeams (a) Van Brieneoordbrug Rotterdam: precast girders over 50 m long (b); the prestressing installation, capacity over 1600 tons (c)
Fig. 5. Augmentation de la longueur et de la largeur (a) de poutres de ponts en préfabriqué; pont Van-Brieneoord à Rotterdam (a); poutres en béton préfabriqué d'une longueur supérieure à 50 mètres (b); installation de précontrainte d'une capacité de plus 1600 tonnes (c)

Schwerere Belastungen

Auch für den Bedarf an Brückendecken, die extrem hohen Belastungen – wie zum Beispiel bei der Landung von Flugzeugen – gewachsen sind, wurde eine Lösung gefunden. Sie wird an anderer Stelle in diesem Artikel näher beschrieben.

Spezialbauwerke

Die jüngste Entwicklung ist ein horizontal gebogener Kastenträger aus Spannbeton, der nachstehend besprochen wird. Darüber hinaus eröffnet die Verwendung von vorgefertigten Brückenträgern, die zunächst in Position gebracht und dann nachgespannt werden, völlig neue Möglichkeiten für den Bau von Viadukten.

Kleine Brücken

Trotz des hier beschriebenen Trends zu größeren und komplexeren Bauwerken bleibt auch ein Markt für kleine Brücken bestehen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

Ästhetik

Fertigbaubrücken haben einen anderen Charakter als herkömmliche Brücken aus Ortbeton. Es ist verlockend, die Stärken einer Fertigbaubrücke auch in ihrem Erscheinungsbild hervorzuheben. Verschiedene Entwicklungen haben das noch leichter gemacht:

- Kastenträger ermöglichen schlanke Bauwerke, falls erforderlich, mit horizontaler Biegung (bei Viadukten).
- Spezielle Randbalken erlauben ein anspruchsvolles Design.
- Indem die vertikalen Flächen und/oder die Pfeiler mit einem speziellen Betonanstrich versehen werden, kann die Wirkung des Bauwerks – auch in Kombination mit besonderen Betonrandausbildungen – gesteigert werden (Bild 1b).

Technologische Leistung

Neben der großen Beachtung, die dem Erscheinungsbild und der Einfügung in die Umgebung gewidmet wird, zeugen die Brücken und Viadukte aus Fertigbeton in den Niederlanden heutzutage von einem hohen technologischen Niveau. Bei Ausschreibungen werden in der Regel die spezifischen Möglichkeiten aller Brückensysteme gegeneinander abgewogen und von den Anbietern jeweils neue Varianten erarbeitet, um sich einen Vorsprung vor anderen Fertig- oder Ortbetonangeboten zu verschaffen.

Materialverbrauch pro m² Brückendecke

Sehr gut veranschaulicht werden die dargelegten Entwicklungen durch das Diagramm. Bild 6, das den Materialverbrauch pro Quadratmeter Brückendecke bei verschiedenen Systemen, Typen und Spannweiten von Brücken zeigt. In diesem Diagramm ist auch der jeweilige Anteil von Fertig- und Ortbeton pro Quadratmeter Brückendecke angegeben. Da das Gewicht der Brückendecke selbst eine wichtige Rolle spielt, ließe sich erwarten, daß der Betonverbrauch mehr oder weniger proportional zur Überbaufläche steigt. Daß das nicht der Fall ist, ist der stetigen Arbeit an der noch weiteren Verbesserung der Technologie zu verdanken.

Weitere Entwicklungen

Ich bin überzeugt, daß der vorstehend skizzierte Entwicklungsstand keine Endstation ist. Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der Werkstoff- und Betontechnologie werden neue Anstöße zur Entwicklung neuer Lösungen mit sich bringen.

5 Bestehende Systeme

Bild 7 zeigt die verschiedenen standardisierten Systeme und ihren Anwendungsbereich. An dieser Stelle will ich nicht jedes dieser Systeme für sich besprechen; die Übersicht soll lediglich einen Eindruck von den verschiedenen Möglichkeiten vermitteln.

6 Einige Anwendungsbeispiele

„Ringlinie“ – Überführung mit horizontal gebogenen Kastenträgern

Das städtische Verkehrssystem Amsterdam wird mit einer neuen, oberirdischen Schnellbahnlinie rund um die Innenstadt erweitert. Die zweigleisige Hochstrecke hat eine Länge von 9,5 km und kreuzt die bestehende Infrastruktur an mehreren Stellen. Für die 24 Überführungen, die von dem Amsterdamer Ingenieurbüro entworfen wurden, sind fast ausnahmslos vorgefertigte Brückenträger vorgesehen.

Zu einem dieser Bauwerke gehört ein Abzweig der bestehenden Schnellbahnstrecke, die 10 bis 15 m über dem Boden in einem Bogen von 90 Grad verläuft. Das Bauwerk besteht aus zwei

oblique crossings are required. The remarkable fact is that these bridging systems could satisfy these conditions.

Collision loads

Making the most of the fact that viaducts and bridges are prone to collision damage has led to extreme optimization of designs.

Box girders

In addition, the past ten years have seen the coming of new bridging systems. The box girder bridge was introduced, offering further optimization and more structural possibilities. Box girders offer the possibility of building slimline structures, which, especially in the Dutch landscape, means that much less earth need be moved for constructing the access roads.

Semi-flexible joint versus continuous spans (Fig. 4)

Some systems can also be used as statically indeterminate structures, i.e. with a continuous bridge surface.

The development of the semi-flexible joint meant that a continuous structure was no longer a necessity. However, continuous construction is still being used in composite systems.

Longer spans (Fig. 5)

The demand for sections for longer spans increased rapidly. The systems that will be discussed below are all constructed from factory-made prestressed elements, i.e. manufactured using prestressed steel on a long linesystem. This demand for bridges and viaducts with longer spans and consequently heavier sections could be met by adapting the factory production means and lifting capacity to sections weighing more than 120 tons, and by building prestressing anchorage-units that could take up to approx. 1 600 tons. Figure 5 shows the increase in length and mass of the prestressed prefab bridge sections over the past 40 years.

Higher loads

The demand for a bridge surface capable of withstanding extremely heavy loads, such as imposed by landing aircraft was also met. This will be described in greater detail elsewhere in this article.

Special structures

The latest development is a horizontally curved box girder manufactured using prestressed steel, as discussed elsewhere in this article. In addition, the use of prefabricated bridge sections that are brought into position and then posttensioned allows viaducts to be constructed in a completely different manner, as will be described elsewhere.

The small bridge

In spite of the above-mentioned increase in scale and complexity, a market still remains for the small bridge, which will not be discussed further here.

Aesthetics

The prefab bridge differs from the traditional cast-in-situ bridge in character. It is inviting to accentuate the strong points of a precast bridge in the bridge's appearance.

A number of developments make this easier to do:

- The use of box girders makes for a slimline structure, if necessary with horizontal curves in curved viaducts;

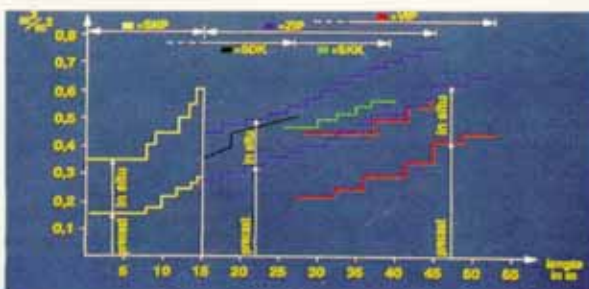


Bild 6. Anteil von Fertig- und Ortbeton pro m² bei verschiedenen Fertigbau-systemen für Brücken

Fig. 6. The volume of precast and in situ concrete per m² bridgedeck for several precast bridge systems

Fig. 6. Part de béton prêt à l'emploi et de béton coulé sur place par m² avec différents types de fabrication préfabriquée pour ponts

HEFT 5/1994

BETONWERK + FERTIGTEIL-TECHNIK

87

nebeneinanderliegenden eingleisigen Viadukten mit einer Gesamtlänge von je 600 m (Bild 8). Da die erhöhten Viadukte im Stadtbild dominieren, wollte der Architekt die Unterseiten der Viadukte als Kurven gestalten.

Auf Einladung des Amsterdamer Ingenieurbüros erarbeitete Spanbeton eine Lösung mit horizontal gebogenen Betonträgern als Alternative zu einer Lösung mit Stahlträgern. Wegen des attraktiven Erscheinungsbildes und des niedrigeren Preises entschied sich der Städtische Verkehrsbetrieb für die Lösung mit vorgefertigten Betonkastenträgern.

Bild 9 zeigt den Querschnitt einer Brückendecke. Drei Kastenträger von 1 450 mm Breite und 1 650 mm Höhe wurden zu einem eingleisigen Brückenüberbau von über 40 m Länge kombiniert, und zwar mittels vor Ort gegossener Fugen von 330 mm Höhe und 50 mm Breite mit Querspannung (Dywidag-Stäbe). Der schwerste Träger wiegt 112 Tonnen. Der kleinste Krümmungshalbmesser beträgt 235 Meter, das entspricht einer horizontalen Abweichung der Geraden von 900 mm.

Bild 10 zeigt ein Brückenfeld von oben gesehen. Die Kastenform des Trägers bietet hohe Torsionssteifigkeit, die einerseits Stabilität des Trägers in jedem Baustadium und andererseits optimale Lastverteilung zur Folge hat.

Die Strecke besteht aus geraden Abschnitten mit Biegungen sowie aus durchgehenden Kurven. Durch die Verwendung gleichmäßig gebogener Träger mit minimaler Abweichung von der theoretischen Linie für die Biegungen konnte die Zahl der verschiedenen Hauptelemente wesentlich reduziert werden.

Das Gußformsystem war so ausgelegt, daß Träger mit jedem beliebigen Krümmungshalbmesser über 200 m auf derselben Anlage gefertigt werden konnten.

Die Träger wurden im Long-bench-Verfahren hergestellt. Die benötigte Spannkraft von 1 200 Tonnen wurde erreicht, indem 90 Stahlgabeln (JH 83 mm), Qualität FeP 1860, in den Trägerquerschnitt aufgenommen und an mehreren Stellen in horizontale und vertikale Richtung gebogen wurden (Bild 11).

Die Biegekräfte werden durch spezielle Vorrichtungen im Rahmenwerk aufgefangen.

In Kürze werden die Träger auf dem Wasser zur Baustelle und mit hydraulischen Mobilkränen in Position gebracht werden. Jeder einzelne Schritt der Fertigung und der Montage ist genau festgelegt in einem detaillierten Logistikplan mit räumlichen und zeitlichen Streckenbeschreibungen für jeden Träger. Bild 12 zeigt die für den Transport zur Baustelle bereiten Träger auf dem Lagerplatz.

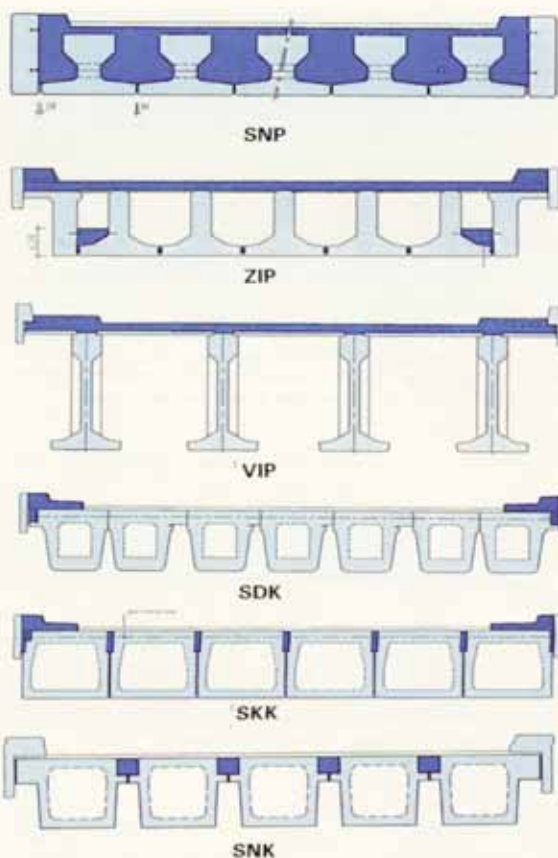
Fertigbetonbauten für die Erweiterung des Flughafens Schiphol. Die folgenden Anwendungsbeispiele betreffen Brückendecken in der unmittelbaren Umgebung von Schiphol Airport bei Amsterdam. Dieser Flughafen führt zur Zeit einen großangelegten Plan zur Erhöhung der Kapazität durch. Auch hier erfolgen die Bauarbeiten in der Nähe der bestehenden Infrastruktur, so daß es auf schnelle Ausführung und möglichst geringe Behinderung des Verkehrs ankommt.

Plattform

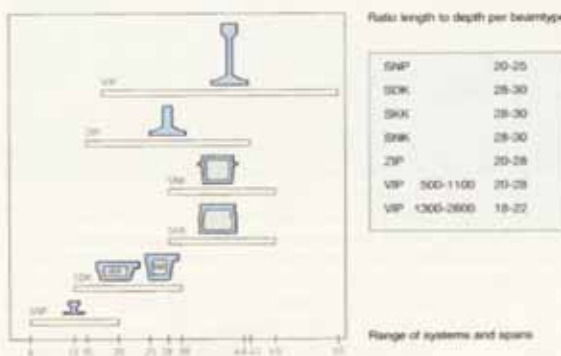
Betrachten wir zunächst eine Hochplattform für den Verkehr von und zur Abflughalle.

Diese neue Plattform ist insgesamt 660 m lang und 21,25 m breit. Verlangt wurde eine Lösung mit begrenzter Bauhöhe und Bauzeit, deshalb wurden vorgefertigte Träger ohne Stützbalken und mit sehr schlanken Ausragungen verwendet. Die Straßendecke besteht aus 315 Fertigbetonelementen mit einer Breite von etwa 2 m, die die Plattform in Querrichtung ganz überspannen. Auf der Baustelle werden diese Träger, die 1,05 m hoch und 50 t schwer sind, auf provisorischen Stützen zwischen den Pfeilern nebeneinandergelegt. Sie sind durch 30 mm breite Fugen getrennt und bilden Viaduktabschnitte mit Längen von 1 bis 4 Feldern (die Feldlänge variiert zwischen 12,60 und 16,40 m).

Die Fugen werden gefüllt und nach dem Abbinden der Vergußmasse wird jeder Abschnitt in Längsrichtung der Plattform nach-



	SNP	ZIP	VIP	SDK	SKK	SNK
beam length	200-1700	300-1700	500-2800	450-900	700-1600	700-1700
beam width	600	1100	1100	900/1300	1100	1100
cast in situ topping required	X	X	X			
wet joints					X	X
transverse posttensioning				X	X	X
special abutment	X	X	X	X	X	X
single span system	X	X	X	X	X	X
continuous system	X	X	X			
collaborative system	X	X	X	X	X	X
flexible joint slab		X	X	X	X	X



Bilder 7. Standardsysteme für Fertigteil-Brückenträger von Spanbeton

Figs. 7. Standard precast bridgebeam systems of Spanbeton

Figs. 7. Systèmes standards pour poutres de pont en béton préfabrique de beton précontraint



Bild 8. Überführungen für die Ringlijn von oben gesehen
Fig. 8. Topview of the "Ringlijn" fly-overs
Fig. 8. Passages supérieurs pour ligne de ceinture vue de dessus

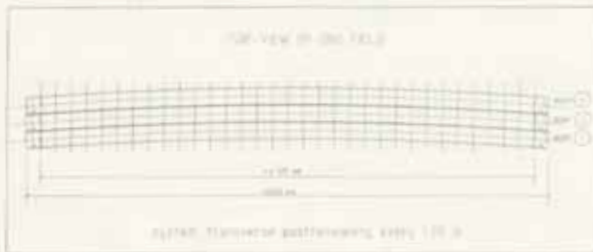


Bild 10. Eine gebogene Brückendecke von oben gesehen
Fig. 10. Topview of a curved bridgedeck
Fig. 10. Revêtement de pont courbe vu de dessus



Bild 11. Spannkraftschema für einen gebogenen Träger
Fig. 11. Scheme of the prestressing force in a curved beam
Fig. 11. Schema de force de précontrainte pour poutre courbe



Bild 12. Transportfertige gebogene Träger auf dem Lagerplatz
Fig. 12. Curved beams on the stockyard, ready for transportation
Fig. 12. Poutres courbes prêtes au transport sur aire de stockage

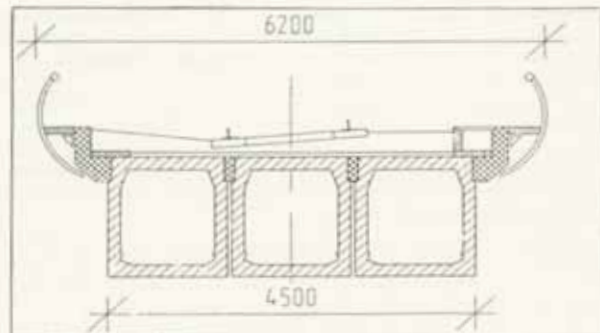


Bild 9. Querschnitt einer gebogenen Brückendecke
Fig. 9. Cross section of a curved bridgedeck
Fig. 9. Section d'un revêtement de pont courbe

- Special edge beams allow challenging designs;
- By painting vertical surfaces and/or pylons with special concrete paint, the structures appearance may be improved, possibly in combination with specially treated concrete edgings (Fig. 1 b). An engineering product

In addition to the great attention that is being given to appearance and making the structure fit in with its surroundings, prefabricated bridges and viaducts in the Netherlands have become engineering products. Almost always, the preparation stages of a tender involve playing with the possibilities offered by each of the various bridging systems, and if necessary, a one-off solution is prepared if this offers better competition towards other prefabricated manufacturers or an alternative cast in situ.

Use of material per m^2 of bridge surface

The above-mentioned developments are most clearly illustrated by the graph showing the use of material per m^2 of bridge surface in relation to the bridge system, type, and span. This is shown in Fig. 6, which also indicates which part of the concrete per m^2 bridge surface is prefabricated, and which part needs to be added on the building site. As the weight of the bridge surface itself plays an important role, it might be expected that the quantity of concrete used would increase more or less with the square of the span; however, thanks to extensive engineering efforts, this is not the case.

Further developments

I am convinced that the developments outlined above will not be the last. Recent developments in the field of materials, concrete technology, will give new impulses to find other solutions.

5 Existing systems

Figs. 7 shows a graphical overview of the various standardized systems and their range of application. Obviously, it is not my intention to discuss each of these systems separately, so this should only be seen as an indication of various possibilities.

6 A closer look at some applications

"Ring line", fly-over with horizontally curved box girders

The municipal transport system of Amsterdam is being extended with a new above-ground express tram line around the inner city. This elevated double-track rail system has a length of 9.5 km and passes the existing infrastructure in several places.

Almost every one of the 24 fly-overs was designed by the Amsterdam Engineering Office using prefabricated bridge girders.

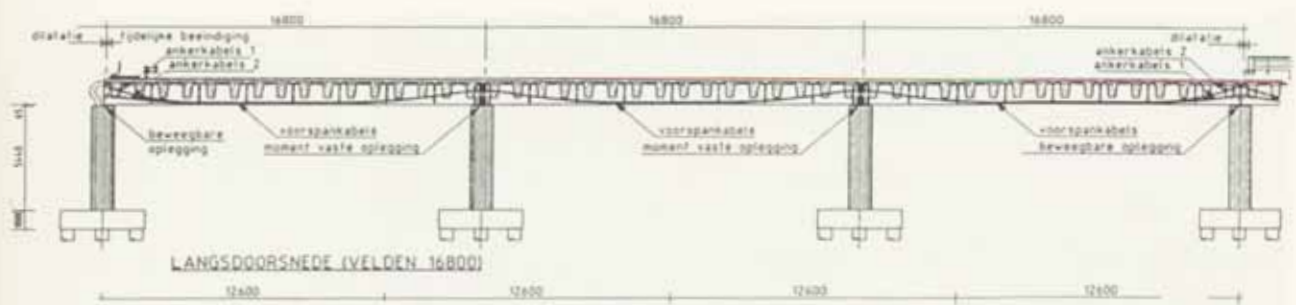
One of the structures involves a branch off the existing express tram line, with the tracks elevated 10-15 m above ground level and travelling through a 90 degree arc. This structure consists of two adjacent single-track viaducts with a total length of 600 m each (Fig. 8). As the elevated viaducts dominate the urban scenery, the architect wanted the undersides of the viaducts to be constructed as actual curves.

On the invitation of the Amsterdam Engineering Office, Spanbeton designed a solution with horizontally curved concrete beams as an alternative to a solution with steel girders. In view of the attractive design in combination with the lower price level, the

HEFT 5/1994

BETONWERK + FERTIGTEIL-TECHNIK

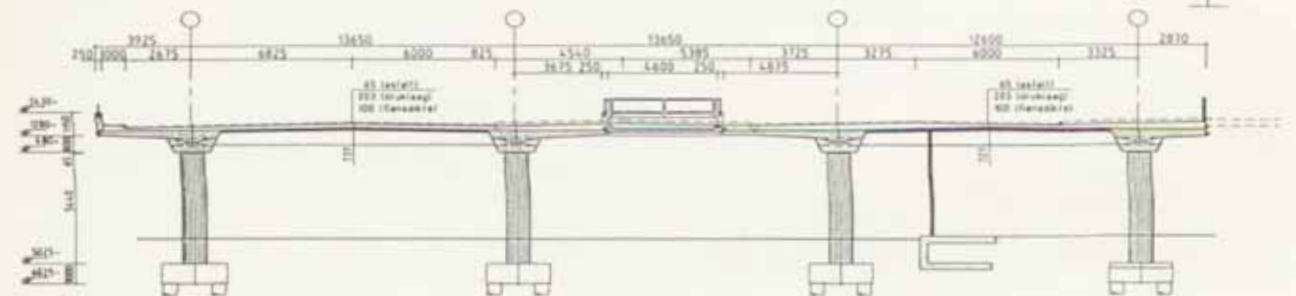
89



Bilder 13. Quer- und Längsschnitt der Plattformkonstruktion (a); Montage der vorgefertigten Segmente (b); Plattform (c)

Figs. 13. Cross section and longitudinal section of the platform structure (a); erection of the precast segments (b); the platform (c)

Figs. 13. Coupes transversale et longitudinale d'ouvrage en plate-forme (a); montage de segments préfabriqués (b); plate-forme (c)



doorsnede voor stationsgebouw west



gespannt. Danach wird die gesamte Plattform mit einer wasser-dichten Deckschicht aus Stahlbeton versehen. Die Höhe des fertigen Bauwerks beträgt 1 200 mm. Die auf herkömmliche Weise bewehrten Abschnitte haben eine Doppel-T-Form zwischen zwei massiven Querbalken (den Hauptbalken) und zwei flachen Auslegern. Die Feldlängen basieren auf einem System mit einer ganzen Zahl von Abschnitten unterschiedlicher Breite. Die Spannkanäle verlaufen in leichtem Auf und Ab durch die beiden Hauptträger (also auch durch die Fugen), was bedeutet, daß ihre Position und Zahl je Abschnitt verschieden ist. Die Probleme, die dies für die Verrahmung und die Produktion mit sich brachte, wurden durch die Verwendung separater Schotte mit je Abschnitt unterschiedlichen Kanaldurchführungen gelöst. Die Oberseite der Fugen wurde nach Entfernung des Rahmenwerks gesandstrahlt.

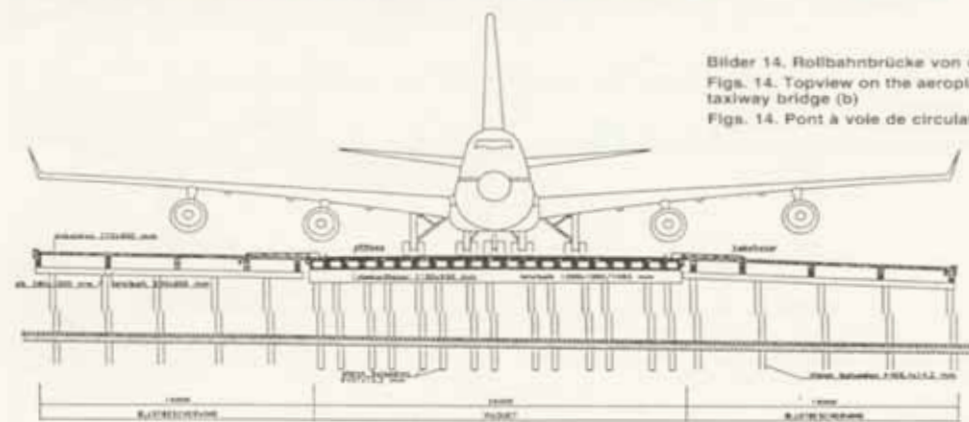
Bild 13 zeigt die hier gewählte Lösung.

Amsterdam Municipal Transport Authority (GVB) opted for the solution with the prefabricated concrete box girders.

Figure 9 shows a cross section of a bridge surface. Three box girders, 1 450 mm wide, 1 650 mm high are combined into a single-track bridge surface of over 40 m length by means of joints cast in situ, 300 mm high and 50 mm wide, with transverse prestressing using Dywidag bars. The maximum girder mass is 112 tons. The smallest curve radius is 235 m, resulting in a horizontal deviation from a straight line of 900 mm.

Figure 10 shows a top view of a bridge span. The box shape of the girder offers high torsion resistance, resulting on the one hand in girder stability during every stage of the construction process, and on the other hand in optimum load distribution along the girders.

The express tram cars travel through a complete curve on both viaducts, i.e. the stretch includes straight sections and intermedi-



Bilder 14. Rollbahnbrücke von oben gesehen (a); Querschnitt (b)
Figs. 14. Topview on the aeroplane taxiway bridge (a), cross section of the taxiway bridge (b)
Figs. 14. Pont à voie de circulation vu de dessus (a); section (b)

Pisten und Rollbahnen

Im Rahmen der Erweiterung von Schiphol Airport ist ein neues Rollbahnsystem vorgesehen. Diese Rollbahnen kreuzen die bestehende Autobahn Den Haag-Amsterdam, für deren Überquerung neue Bauwerke erforderlich sind. Außerdem wird die Autobahn verbreitert, so daß die bestehende, 470 m lange Unterführung unter einer Rollbahn um zwei neue Tunnel ergänzt werden muß.

Beide Brückenüberbauten müssen einer Belastung mit einem Flugzeug von ca. 580 t Gesamtgewicht standhalten. Ein Hauptfahrgestell hat vier Räder, so daß die Flächenlast pro Rad 317 kN beträgt, also das Sechsfache der Belastung bei normalem Verkehr.

Beide Bauwerke werden aus Fertigbetonträgern hergestellt, im übrigen ist ihre Bauweise jedoch völlig verschieden.

Flugzeugviadukt

Die Rollbahnkreuzung wurde in Form eines Viadukts von 170 m Länge aus Kastenträgern realisiert.

Die Länge der 10 Felder variiert zwischen 7,70 und 20,10 m. Der Kreuzungswinkel zwischen Viadukt und Straße beträgt 72 Grad. Die Straßendecke ist 23 m breit (Bild 14 a). Jedes Feld besteht aus 21 Kastenträgern mit einer Breite von 1 180 mm (Bild 14 b).

Die Kastenträger sind 950 mm hoch. Die Träger sind durch Querspannkabel, die parallel zu den Stützen verlaufen und die Verfüugungen zwischen den Trägern daher in einem Winkel von 72 Grad passieren, miteinander zum Brückenüberbau verbunden.

Die daraus resultierenden Längsscherkräfte werden durch spezielle Fugenzapfen aufgefangen.

Tunneldecke

Abschließend eine kurze Beschreibung des Tunnelüberbaus der beiden neuen, 470 m langen Tunnel unter der Autobahn. Bild 15 zeigt einen Querschnitt.

Die Tunnel sind 12,10 bzw. 16,80 m breit und werden mit zusammengesetzten Spundwänden, Stahlbetonquerträgern und einem

ate curves as well as sections with a constant curve.

By constructing the intermediate curves from constant curve girder shapes with a minimum deviation from the theoretical line, the number of different main parts could be substantially reduced.

The mouldsystem was designed to enable any possible curve radius larger than 200 m to be made with the same installation. The girders were manufactured using the long bench process. The necessary 1 200 ton prestressing forces are obtained by embedding 90 prestressing bars (0.5/93 mm²), FeP 1860 quality, in the girder cross-section and bending them in horizontal and vertical directions at a number of positions (Fig. 11).

The bending forces are counteracted by special provisions in the framing installation.

The girders will soon be floated to the building site and moved into position by mobile hydraulic cranes.

Each step in the production and assembly process has been predetermined in an accurately detailed logistical plan which prescribes the movement of each girder both in space and in time. Figure 12 shows the girders on the storage site, ready for transport to the building site.

Prefab structures for the Schiphol Airport extension

The following application descriptions all concern prefabricated bridge surfaces on or in the direct vicinity of Schiphol Airport near Amsterdam. This airport is currently realizing a master plan to increase its air travel capacity. Again, construction takes place in the vicinity of existing infrastructures, so construction speed and minimum obstruction are the keywords.

Platform

The first to be discussed will be an elevated platform for traffic to and from the departure lounge.

The total length of this new platform is 660 m and its width is 21,25 m.

The prerequisites included a solution with limited structural height and construction time, so prefabricated sections without support-

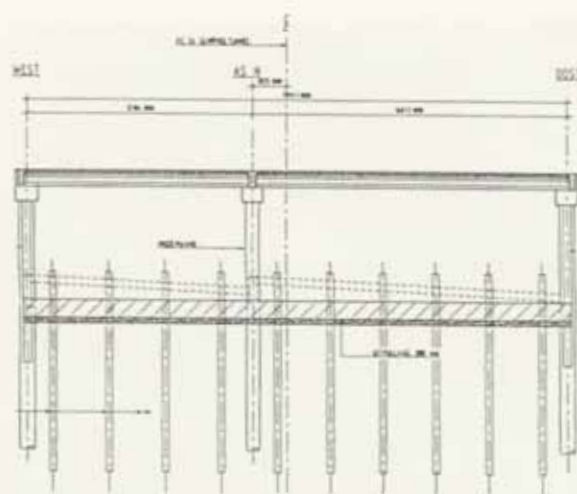


Bild 15. Querschnitt des zweiten Autobahntunnels bei Schiphol
Fig. 15. Cross section of the 2nd Schiphol motorway tunnel
Fig. 15. Section du deuxième tunnel autoroutier près de Schiphol



Bild 16. Fertigbetonträger für den Tunnelüberbau
Fig. 16. Application of precast beams for the tunneldeck
Fig. 16. Poutre en béton préfabriqué pour superstructure de tunnel

Massivüberbau von 900 mm Dicke ausgeführt. Ein bewehrter Stahlbetonboden mit Zugpfählen unterfängt das Bauwerk und fungiert gleichzeitig als Fahrbahn der Autobahn. Die Deckschicht ist semiflexibel mit den Wänden verbunden und sichert den Abstand zwischen ihnen.

Da die Bauzeit für den gesamten Tunnel auf genau ein Jahr begrenzt war, entschied der Bauunternehmer sich für ein Bauwerk aus Fertigteilträgern von 750 mm Höhe und 1 190 mm Breite, und zwar kombiniert mit einem Massivüberbau aus Stahlbeton von 900 mm Dicke (Bild 16).

Dieser Überbau ist sehr hohen, konzentrierten Belastungen gewachsen, was zum Teil eine Folge der optimalen Wechselwirkung zwischen den Fertigbetonträgern und dem Betonüberbau ist.



Prof. Dipl.-Ing. H. Wim Benneik (1936); Konstrukteur, Planer und Konstruktionsberater. Seit 1985 Technischer Direktor und Leiter der Entwicklungsabteilung bei Schokbeton und Spanbeton (Partek Beton Nederland). Professor für Betonfertigteile und Spannbeton an der Technischen Universität Eindhoven auf Teilzeitbasis.

ing beams and with very slim overhangs were used. The road surface consists of 315 prefabricated segments with a width of approx. 2.00 m which fully span the platform in transverse direction. On the building site, these girders, which are 1.05 m high and weigh 50 tons, are positioned next to each other onto temporary supports between the columns, separated by 30 mm joints, to form viaduct sections with lengths varying between 1 and 4 spans (span lengths vary from 12.60 to 16.40 m).

Once the joining grout has set, each section is posttensioned in the longitudinal direction of the structure, after which a watertight topping of reinforced concrete is applied to cover the entire platform. The final structure height will be 1 200 mm.

The traditionally reinforced sections have a double T shape between two solid transverse beams (the main beams) and two flat cantilevers. The span lengths are based on a system with a whole number of sections of varying width.

The prestressing ducts run gradually up and down through the two main beams (and consequently through the joints), which means that their position and number vary per section.

The framing and production problems this posed were resolved by using separate bulkheads with ducting provisions for different layout of the ducts per section. The surface of the joint face was sand-blasted after the framing had been removed.

Figures 13 shows the solution adapted.

Runways and taxiways

The extension of Schiphol Airport includes a new system of taxiways. These taxiways cross the existing The Hague-Amsterdam motorway, so new structures will be required to allow the road to be crossed. In addition the motorway is being widened so two new tunnels tubes will be added to an existing 470 m long underpass under a runway.

Both bridge surfaces are designed to withstand the load of a theoretical aircraft with a total weight of 580 tons. A main undercarriage consists of 4 wheels, resulting in a surface load per wheel of 317 kN, which is 6 times the wheel load of normal traffic!

Both structures will be constructed in prefab beams, albeit using completely different construction methods.

Aircraft viaduct

The taxiway crossing has been realized by means of a viaduct of 170 m length constructed from box girders.

The length of the 10 spans varies between 7.70 and 20.10 m. The crossing angle between the viaduct axis and the road is 72 degrees. The road surface is 23 m wide (Fig. 14 a).

Each span consists of 21 box girders with a width of 1 180 mm (Fig. 14 b).

The box girders are 950 mm high. The girders are linked together to form a bridge surface by means of transverse prestressing cables that run parallel with the supports and which consequently pass through the wet joints between the girders at an angle of 72 degrees.

The resulting longitudinal shear forces are counteracted by special joining pins.

Tunnel surface

Finally, a short description of the tunneldeck of the two new 470 m long tunnels passing under the runway.

Fig. 15 shows a cross-section.

The tunnel tubes are 12.10 m and 16.80 m wide respectively and will be constructed using pile combination walls; reinforced concrete crossbeams, and a solid deck of 900 mm thickness.

A structural reinforced concrete floor with tension piles underpins the structure and also acts as the road surface.

The covering surface is semi-flexibly connected to the walls and secures the distance between the walls.

As the construction time of the entire tunnel was limited to exactly 1 year, the contractor opted for a structure consisting of prefab beams of 750 mm height and 1 190 mm width, combined with a reinforced concrete topping to form a solid deck of 900 mm thickness (Figs. 16).

This surface will withstand very high concentrated loads, which is partly the result of the optimum interaction between the prefab girder and the concrete topping.

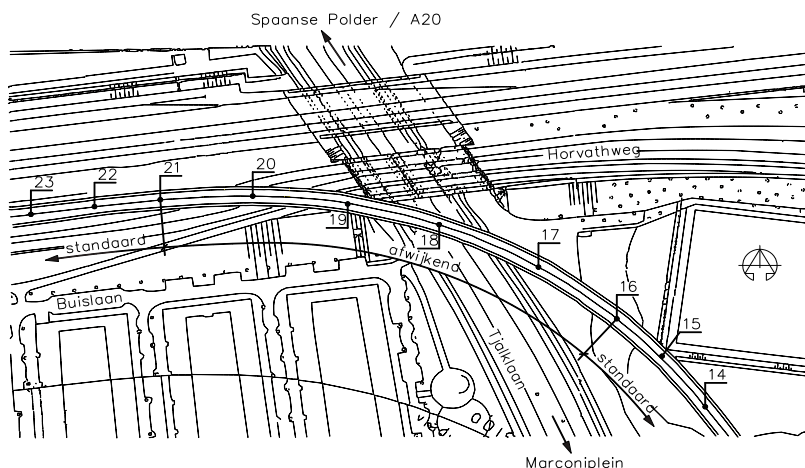
Constructie & uitvoering
Bruggenbouw

Grote gebogen prefab kokerliggers voor de Beneluxlijn

ir. F.C.J. Schuitemaker, Ballast Nedam Engineering

Het Rotterdamse metronet wordt uitgebreid met de Beneluxlijn, een nieuw tracé van circa 11 km. Een groot gedeelte van deze lijn is uitgevoerd als viaduct, bestaande uit vrij opgelegde overspanningen van circa 30 m. De horizontale krommingen in het spoortracé worden doorgezet in de overspanningen. Ter plaatse van de kruisingen met de Tjalklaan en de Horvathweg in Schiedam buigt de lijn sterk af. De combinatie van twee kruisingen én een grote kromming heeft geleid tot vijf afwijkende velden met veel grotere overspanningen en krommingen dan het standaardveld (fig. 1).

Dit artikel gaat in op het ontwerp en de uitvoering van de tien prefab liggers die bij deze vijf velden worden toegepast.



1 | Situatie vijf afwijkende velden

De dwarsdoorsnede van het viaduct is opgebouwd uit twee prefab kokerliggers, waartussen ter plaatse een cassettevloer is gestort voor de twee sporen. De liggers voor de standaardvelden zijn 1,65 m hoog, met onderzijde ligger gelijk aan onderzijde vloer. De afmetingen van de liggers voor de vijf afwijkende velden

zijn samengevat in tabel 1, de breedte bedraagt 1,18 m.

Vanwege functionele eisen ligt bij de hoge liggers de vloer op halve liggerhoogte (fig. 2). Voor de verbinding van de vloer met de liggers is een sponning in de ligger voorzien, waarin ook een verticale vertanding aanwezig is.

Deze dubbele vertanding dient voor opname van dwars- en langsschuifkrachten. Voor het door koppelen van de vloerwapening zijn in de liggers twee rijen koppelankers met schroefverbinding ingestort.

Ontwerp liggers

Dwarsdoorsnede

In het bestek zijn de uitwendige afmetingen van de liggers en het viaduct vastgelegd. Het detailontwerp omvat het bepalen van de inwendige holle ruimte, de overspanning en de wapening.

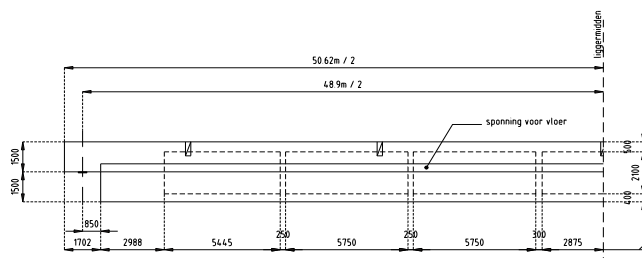
Figuur 3 toont de dwarsdoorsnede van de 3 m hoge ligger. De holle ruimte wordt gevormd door polystyreen blokken die worden onderbroken door betonnen schijven ter plaatse van de dwangschotten. Het liggereinde is vanwege de inleiding van de voorspankrachten en de grote hoeveelheid wapening, massief uitgevoerd over een lengte gelijk aan de liggerhoogte.

Het verschil in lijfdikte is een gevolg van de benodigde ruimte voor de koppelankers voor de vloer en het aansluitmoment ervan op het binnenste lijf.

De drukzone wordt alleen gevormd door de bovenflenzen van beide liggers. Om een zo groot mogelijke hefboomsarm te krijgen is de bovenflens zo dik gemaakt, dat deze in de uiterste grenstoestand juist geheel onder

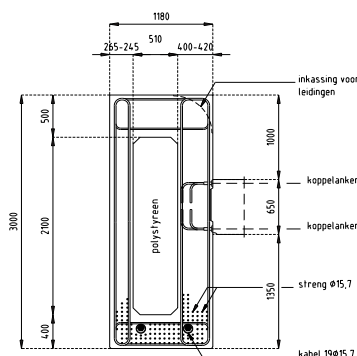
Tabel 1 | Kenmerken liggers (buitenbocht)

veld	lengte	hoogte	kromte- straal	massa	pijl kromming	excentriciteit zwaartelijn t.o.v. oplegging (e_{opl})
	(m)	(m)	(m)	(ton)	(m)	(m)
16	44,6	2,45	250	243	0,99	0,58
17	50,6	3,00	250	340	1,28	0,74
18	43,6	2,45	250	238	0,95	0,55
19	43,5	2,45	265	236	0,89	0,52
20	43,3	2,45	425	235	0,55	0,31

Constructie & uitvoering
Bruggenbouw

druk staat. Een dünnere bovenflens is weliswaar gunstig voor het eigen gewicht, maar verkleint de inwendige hefboomsarm doordat de minder effectieve lijven dan een deel van de drukzone gaan vormen.

De drukspanning in de bovenflens bleek kritisch te zijn voor het ontwerp: niet alleen in de uiterste grenstoestand, maar ook bij de controle op vermoeiing. In



een vroeg stadium is daarom al besloten om, in afwijking van het bestek, niet B 55 maar B 65 toe te passen.

Voorspanning**Voor- of nagerekt voorspanstaal**

Bij prefab liggers wordt in principe alleen voorgerekt voorspanstaal toegepast. Vanwege het ontlastingstijdstip en/of de spanbankcapaciteit kan echter ook worden gekozen voor een combinatie van beide systemen. De maximaal benodigde voorspanning bedraagt 31 000 kN, terwijl de spanbankcapaciteit op het productieterrein te Kats 27 500 kN is.

Voor de grootste liggers is daarom een combinatie van 115 voor-

gerekte strengen $\phi 15,7$ mm en 2 nagerekte kabels 19- $\phi 15,7$ toegepast. Het aantal voorgerekte strengen voor de overige liggers varieert van 100 tot 126.

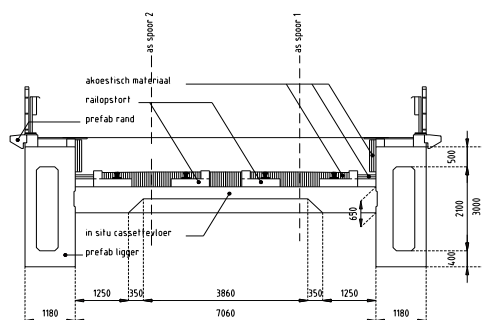
Verticaal verloop strengen

Traditioneel ligt de voorspanning in het veldmidden zo laag mogelijk en wordt een aantal strengen opgebogen om de aanvangsdruk- en trekspanningen ter plaatse van het liggereinde te beperken. Bij deze liggers is dit principe ook toegepast; er zijn drie groepen strengen te onderscheiden (fig. 4): een horizontale groep, een groep die wordt opgebogen tot de onderzijde van de onderste rij koppelankers en een groep die achter de koppelankers langs wordt opgebogen tot in de tand. Het aantal opgebogen strengen wordt sterk beperkt door de koppelankers en de gesloten beugel van de onderflens. Hierdoor ligt het voorspanzwaartepunt aan het liggereinde eigenlijk te laag en worden er strengen onthecht om het effectieve zwaartepunt te verhogen.

Horizontaal verloop strengen

Bij horizontaal gekromde liggers dienen de strengen ook in horizontale richting afgebogen te worden, opdat de afwijking tussen het rechte voorspanverloop en het gekromde liggerverloop aanvaardbaar blijft. Het aantal horizontale afbuigpunten hangt af van diverse factoren.

Hoe groter de h.o.h.-afstand tussen de afbuigpunten, des te groter de excentriciteit van de voorspanning ten opzichte van het horizontale zwaartepunt van de doorsnede. Dit leidt tot onge-



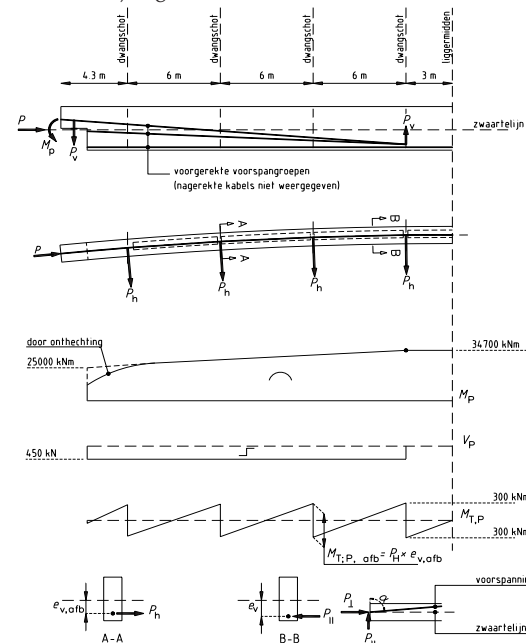
wenste buiging om de verticale as. Daarnaast leiden grote h.o.h.-afstanden ook tot een reductie van de effectieve breedte waarbinnen de strengen kunnen worden aangebracht, omdat zowel ter plaatse van het afbuigpunt als midden tussen twee afbuigpunten aan de dekkingseis moet worden voldaan. Daarentegen brengt elk afbuigpunt extra werkzaamheden en materiaalgebruik met zich mee, zodat vanuit de productie het aantal afbuigpunten zo gering mogelijk dient te zijn.

De toegepaste h.o.h.-afstand van 6 m leidt bij de minimale kromtestraal van 250 m tot een horizontale afwijking van 18 mm tus-

2 | Aanzicht ligger (zonder tussenvloer) en dwarsdoorsnede viaduct veld 17

3 | Dwarsdoorsnede 3 m hoge ligger (links)

4 | Voorgerekte voorspanning in 3 m hoge ligger



Constructie & uitvoering
Bruggenbouw

Ligger in stabiliteitsframe

sen het gekromde betonvlak en de rechte voorspanstreng. De excentriciteit van de voorspanning varieert tussen circa +10 mm en -10 mm. Het gatenpatroon in de dwangschotten is zo uitgekiend, dat het zwaartepunt van de voorspanning als het ware om de zwaartelij van de ligger 'slingert'.

Belasting door voorspanning

Bij rechte liggers met alleen verticaal opgebogen strengen bestaat de voorspanbelasting uit twee kopmomenten M_p en verticale opwaartse krachten P_v ter plaatse van de opbuigingen. Bij gekromde liggers treden daarnaast ook nog horizontale afbuigkrachten P_h op (fig.4).

Omdat deze krachten een excentriciteit $e_{v,afb}$ hebben, oefenen zij discrete torsiemomenten uit op de ligger ter grootte van

$$M_{T,p,afb} = P_h e_{v,afb}$$

De situatie tussen de afbuigpunten wordt toegelicht met een doorsnede loodrecht op de liggeras. De doorsneden strengen maken in het horizontale vlak een hoek $\alpha \neq 90^\circ$ met het doorsnede vlak. De voorspankracht

kan dus, afgezien van een eventuele verticale component, worden ontbonden in een loodrechte normaalkracht $P_{\perp}$ en een in het vlak liggende horizontale kracht $P_{\parallel}$. Deze laatste leidt, mits de streng een verticale excentriciteit e_v heeft, tot een torsiemoment

$$M_{T,p} = P_{\parallel} e_v$$

Het torsiemomentenverloop over de liggerlengte krijgt zo de vorm van een zaagtand.

Bij deze hoge liggers blijken deze torsiemomenten, maximaal 300 kNm, van dezelfde orde van grootte te zijn als bijvoorbeeld de torsiemomenten door de metrotreinen, maximaal 540 kNm, en zijn derhalve niet verwaarloosbaar.

Bij gekromde nagerechte voorspankabels ontstaan geen torsiemomenten. Bij een snede loodrecht op de liggeras is er nu namelijk geen ontbondene in het doorsneden vlak en is er dus ook geen torsiemoment.

Stabiliteit van de liggers

De grootste bijzonderheid van deze liggers is de grote kromming: het zwaartepunt van de twee grootste liggers valt zelfs buiten de liggerdoorsnede (zie tabel 1). Voor de overige liggers ligt het zwaartepunt weliswaar (net) binnen de doorsnede, maar het benodigde oplegvlak zou er wel buiten komen. Zonder hulpconstructies vallen de liggers dan ook om. Dit heeft grote consequenties voor de uitvoering bij opslag, transport, montage en storten van de tussenvloer.

Enkele ligger in opslag, transport en montage

De stabiliteit van de ligger is alleen gewaarborgd indien beide uiteinden worden ingeklemd om de liggeras (fig. 5). De grootte van het benodigde torsie-inklemmingsmoment, voor de grootste ligger circa 1300 kNm, is afhankelijk van de verticale oplegreactie $\frac{1}{2} G$ en de excentriciteit van de zwaartelij e_{opl} ten opzichte



van hart ligger (zie tabel 1) bij het oplegpunt:

$$M_{T,opl} = \frac{1}{2} G e_{opl}$$

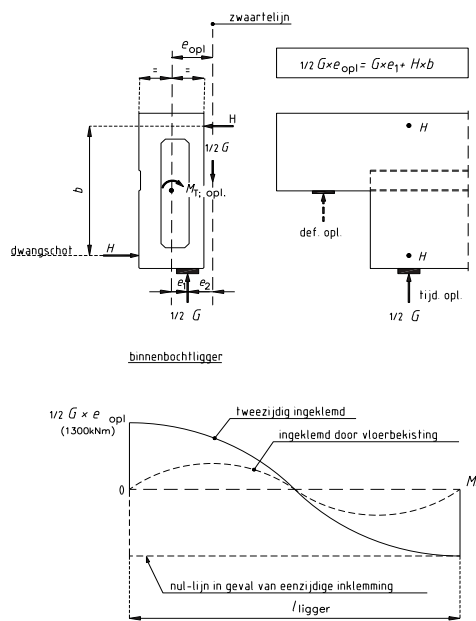
In de verschillende stadia van hijsen, opslag, transport en montage wordt gebruikgemaakt van diverse stalen hulpconstructies om de massieve liggereinden. Het inklemmingsmoment bestaat in deze frames meestal uit twee bijdragen:

$$M_{T,opl} = M_{T,1} + M_{T,2} \text{ bestaande uit:}$$

- een excentrisch geplaatst oplegpunt: $M_{T,1} = \frac{1}{2} G e_1$;
- een horizontaal koppel: $M_{T,2} = Hb$ (gelijk aan $\frac{1}{2} G e_2$).

De grootste ligger tordeert bij tweezijdige inklemming aan de liggereinden in het liggermidden slechts 4 mm over een hoogte van 3 m als gevolg van alleen het eigen gewicht. Deze grote torsiestijfheid betekent dat een geringe opgelegde torsierotatie aan één liggereinde tot een grote verschuiving van de nullijn in het torsiemomentenverloop leidt. De situatie dat één liggereinde alle torsie opneemt, in figuur 5 gestippeld weergegeven, heeft reeds plaats bij een verschilrotatie van 12 mm over de liggerhoogte. Op dit zeer ongunstige torsieverloop is de liggerwapening niet berekend, reden waarom hoge eisen worden gesteld aan de verschilrotatie tussen beide liggereinden. Door tijdens de uitvoering gebruik te maken van driepunts-opleggingen en gekoppelde vijzels, wordt deze verschilrotatie geëlimineerd tot praktisch nul.

5 | Principe torsie-inklemming liggereinde binnenbocht en torsiemomentenlijn door eigen gewicht ligger



Constructie & uitvoering

Bruggenbouw

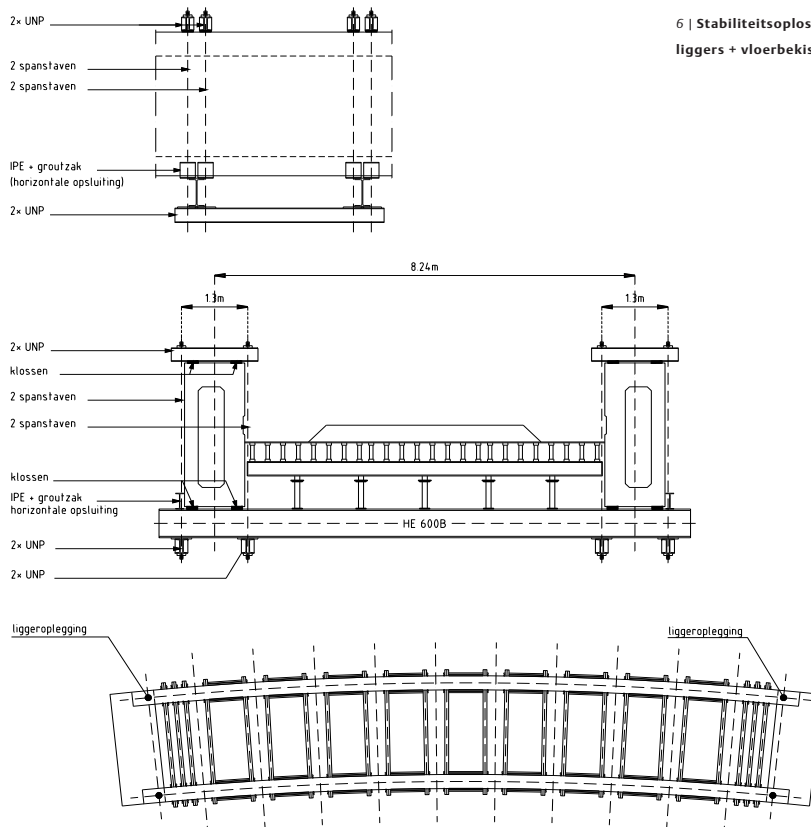
Twee liggers met vloerbekisting

De stabiliteit van de liggers tijdens het storten van de vloer wordt op geheel andere wijze verzorgd. De onderslagbalken van de vloerbekisting, HE 600B-profielen, worden met hangstaven tegen de onderzijde van de ligger gespannen (fig. 6). Zo ontstaat een samengesteld systeem van twee gekromde liggers, met daaronder tegen de liggers geklemde dwarsliggers. De 20 à 24 HE-profielen zijn ruimschoots in staat om de gehele torsiebelasting, veroorzaakt door het ligger- en stortgewicht, gespreid op te nemen.

Cruciaal voor deze oplossing is het verzorgen van de inklemmingsvaste verbinding tussen het HE-profiel en de kokerligger. Dit wordt bereikt door het voorspannen van de hangstaven en het toepassen van twee nauwkeurig geplateerde klossen tussen ligger en HE-profiel. De torsie-inklemmingen aan de liggereinden worden verwijderd, omdat deze anders alsnog een groot deel van de torsiebelasting zouden opnemen.

Op het systeem werken twee belastinggevallen:

- eigen gewicht liggers: beide liggers willen dezelfde kant op 'kantelen', waardoor de HE-profielen een S-vormige vervorming ondergaan (fig. 7);
- storten vloer: de HE-profielen worden belast met het stortgewicht. Hierdoor wil de binnenligger in dezelfde richting draaien als door zijn eigen gewicht, de buitenligger wil juist naar de andere kant draaien.



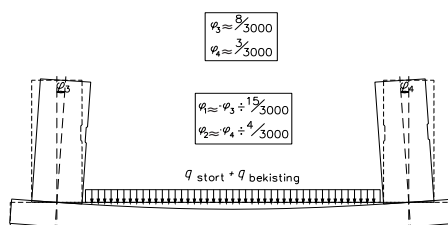
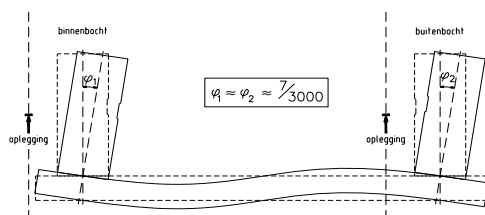
6 | Stabiliteitsoplossing voor liggers + vloerbekisting

Voordelen van deze stabiliteitsoplossing zijn vooral:

- een gunstiger verloop van de torsiemomenten in de ligger: de continue opbouw van het torsiemoment vanuit het liggermidden wordt telkens afgebroken door de tegengestelde inklemmingsmomenten van de HE-profielen (fig. 5);
- aan het liggereinde is geen 'vasthoud'-frame meer noodzakelijk, omdat er aan het einde geen torsiemoment meer is.

Een nadeel van de oplossing zijn de relatief grote torsierotaties: maximaal 15 mm over 3 m hoogte. Hiertegen zijn de volgende maatregelen getroffen:

- de oplegblokken worden tijdelijk zodanig gepositioneerd dat de binnenliggerlengte gelijk is aan de buitenliggerlengte. Door de kromming zijn deze lengtes in de eind-situatie namelijk ongelijk. Door deze maatregel worden de doorbuigingsverschillen



7 | Vervormingen veldmidden

- a. eigen gewicht ligger, torsie-inklemming liggereind verwijderd
- b. storten vloer

Constructie & uitvoering
Bruggenbouw



Montage ligger op
kolomtafel

8 | Hulpconstructie voor
aflaten voorspanning en
hijsen

tussen beide liggers geminimaliseerd, waardoor er geen extra torsierotatie ontstaat; de binnenligger krijgt een voorrotatie. De buitenligger heeft deze voorrotatie niet nodig, omdat de rotaties door eigen gewicht tegengesteld en nagenoeg gelijk aan die door het storten van de vloer zijn.

Wijziging statisch
systeem

Na het verhardn van de vloer is het statisch systeem gewijzigd. In eerste instantie dragen de twee kokerliggers het bekistings- en stortgewicht. Tijdens het ontkisten treedt herverdeling van het vloergewicht op als gevolg van gewijzigde stijfheidsverhoudingen.

Na verloop van tijd zal door krimp- en kruipverschijnselen de krachtsverdeling wederom wijzigen. In de berekening van liggers en vloer zijn daarom twee situaties beschouwd: de situatie direct na het ontkisten en de situatie die optreedt nadat alle tijdsafhankelijke herverdelingen zijn opgetreden.

Uitvoering liggers

De verschillende bouwstadia na het gereedkomen van de ligger worden toegelicht.

Ontkisten, aflaten
voorspanning en hijsen

Het afbuigen van de voorspanstrengen heeft plaats door stalen dwangschotten, voorzien van een gatenpatroon, in de ligger mee te storten. De afdracht van de afbuigkrachten naar de bekistingsvloer heeft plaats door middel van twee horizontaal verstelbare zware doken. Deze steken aan weerszijden van de ligger door de bekistingswand en passen precies in komvormige uitsparingen op het dwangschot. Vanwege de zwaar belaste voorzieningen hebben alle dwangschotten een vaste positie met onderlinge afstand van 6 m.

Het ontkisten gebeurt door de bekistingswanden hydraulisch 0,70 m naar buiten te bewegen, zonder dat de dwangschotdoken worden gelost. De volgende stap is het aflaten van de voorspanning, waarbij twee aspecten van groot belang zijn:

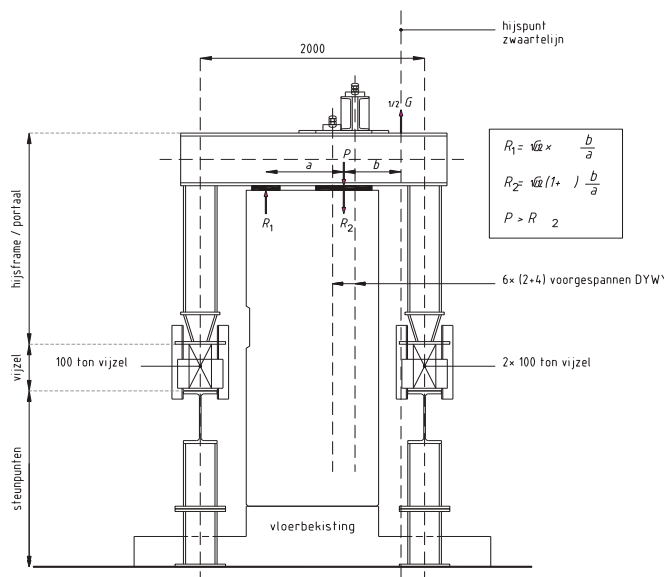
- de nog volledig aanwezige horizontale afbuigkrachten,

die ertoe leiden dat de ligger wil gaan verschuiven in dwarsrichting;

- het opbuigen van de ligger, waardoor deze gaat dragen op de einden en daardoor meteen wil kantelen.

De dwangschotdoken kunnen het verkorten en opbuigen van de ligger tijdens het aflaten van de voorspanning niet volgen, omdat zij in de ligger steken en alleen loodrecht op de liggeras kunnen vervormen. Hun functie wordt daarom overgenomen door horizontale vijzels die boven de doken, tegen de zijkant van de ligger worden aangebracht. Tijdens het aflaten van de strengen zullen de horizontale afbuigkrachten op de vijzels steeds kleiner worden en uiteindelijk geheel verdwijnen.

Het omvallen van de ligger wordt tegengegaan door steunpunten naast de liggereinden te creëren (fig. 8). Tevens voorkomen deze het afboeren van beton tijdens het verkorten van de ligger, doordat de ligger niet op de liggereinden kan gaan dragen. De twee portaalvormige hijsframes worden met voorspanstaven op de



Constructie & uitvoering

Bruggenbouw

ligger gespannen. Tussen de portaalpoten en de ondergrond worden hydraulische vijzels geplaatst, zodat de steunpunten in hoogte verstelbaar zijn. Om er zeker van te zijn dat de ligger op de tijdelijke poten gaat dragen, worden de vijzels voor het aflaten begint 2 à 3 mm uitgezet. De uitslag van de vijzels mag echter nog niet te groot zijn, omdat de ligger niet in staat is zijn eigen gewicht te dragen zonder (gedeeltelijke) voorspanning. Vervolgens wordt de voorspanning circa 30% afgelaten, waarna de vijzels 10 mm worden uitgezet. Nadat de voorspanning volledig is afgelaten op de ligger, hangt deze als het ware in de twee portalen. Deze doen daarna dienst als hijsframes.

Opslag en transport

Vanuit de kist wordt de ligger op het tasveld in twee opslagjukken geplaatst. Het transport heeft zowel over water als per as plaats. In beide gevallen wordt gebruikgemaakt van dezelfde opslagjukken als op het tasveld.

Montage op kolomtafel

Het principe van de montage is weergegeven in figuur 9. Naast het definitieve oplegpunt op de kolomtafel wordt een tijdelijk oplegpunt buiten de kolomtafel gerealiseerd. Op dit oplegpunt rust het stabiliteitsframe dat om het liggereinde is gespannen. In totaal is dus sprake van 2 x 2 oplegpunten. De twee vijzels op de tijdelijke oplegpunten worden

gekoppeld, vanwege de vereiste driepunts-oplegging in verband met de geringe toelaatbare verschilrotatie. Als de ligger op de vier punten rust kan de juiste dwarshelling worden ingesteld, rekening houdend met een eventuele voorrotatie. Het stabiliteitsframe en tijdelijk oplegpunt worden verwijderd nadat de vloerbekistingsconstructie is aangebracht én aangespannen.

Een stabiliteitsvoorziening alleen om de tand lijkt eenvoudiger, maar de tand bevindt zich in een sponning van de kolomtafel, waardoor dit niet mogelijk is. Bovendien zou de tand dan het gehele torsiemoment moeten opnemen en daar is het huidige ontwerp niet op berekend.

Storten tussenvloer

De gehele vloer wordt in één keer gestort. Dit zal gepaard gaan met rotatie- en buigingsvervormingen van de kokerliggers en HE-profielen. Om te voorkomen dat er als gevolg hiervan een gaping ontstaat ter plaatse van de vloerliggeraansluiting, zijn de volgende maatregelen getroffen:

- het vloerstort start in het midden en gaat met twee fronten richting opleggingen. Zo treedt de meest excentrische belasting en dus grootste rotatie in het begin van het stort op, als het beton nog plastisch is. Wanneer het beton in het midden begint op te stijven, zal de bijkomende rotatie gering zijn;

- de bekistingsconstructie is zodanig uitgevoerd dat de vloervorming gelijk is aan die van de HE-profielen. Zo wordt de rotatie van de liggers over de gehele vloerbreedte 'uitgesmeerd';
- er wordt gebruikgemaakt van vertragers, zodat er na het storten ter plaatse van de vloer-liggeraansluiting kan worden nagetrild. ■

Projectgegevens

opdrachtgever:

Rotterdamse Elektrische Tram (RET)

directie en hoofdontwerp:

Gemeentewerken Rotterdam,

Ingenieursbureau Beton- en Staalbouw

aannemer viaduct:

Combinatie Metro Rotterdam, bestaande uit Züblin (D), Welling Didam,

Voormolen en Vermeer Beton- en waterbouw

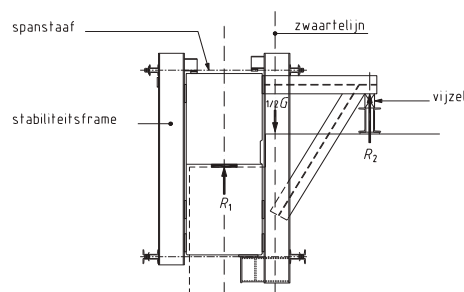
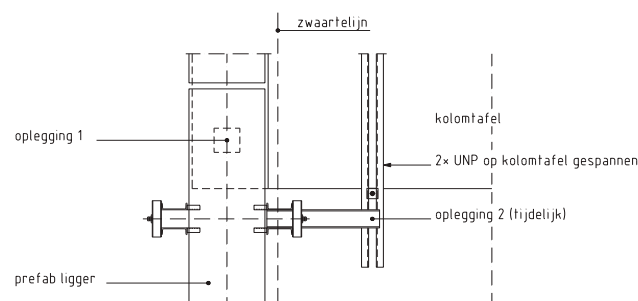
productie liggers:

Combinatie Oosterschelde, bestaande uit Ballast Nedam Beton- en Waterbouw en Van Hattum en Blankevoort

detailontwerp en berekening:

Ballast Nedam Engineering

9 | Hulpconstructie voor montage binnenligger op kolomtafel



Constructie & uitvoering
Bruggenbouw

Vleugelbrug geeft prefab beton nieuwe kansen

Vrijheid in vormgeving

W.A. de Bruijn, Bouwdienst Rijkswaterstaat, S. de Boer, Haitsma Beton, en A.Vos, Ballast Nedam Beton- en Waterbouw

Bij het ontwerpen van betonnen bruggen en viaducten moet de afweging worden gemaakt tussen ter plaatse storten en prefabriceren. Hierbij zal een architect al snel kiezen voor ter plaatse storten vanwege de grotere vormgevingsvrijheid, terwijl om praktische redenen prefabriceren de voorkeur heeft. Alle reden dus voor de prefab-betonindustrie om te onderzoeken of de recht-hoekige (en soms lompe) vormgeving kan worden verlaten. In dat kader zocht betonwarenfabrikant Haitsma in 1995 contact met de afdeling Bruggenbouw van de Bouwdienst Rijkswaterstaat. In overleg tussen Haitsma, de Bouwdienst en architect Hans van Heeswijk werd zo de 'vleugelbrug' geboren.



De vleugelbrug is productierijp gemaakt voor en daadwerkelijk tot uitvoering gebracht bij het viaduct Heemraadsingel over rijksweg A59 tussen Raamsdonk en Raamsdonksveer. Het bestaande viaduct was enerzijds functioneel verouderd en anderzijds zodanig aangetast door ASR (alkali-silicareactie), dat tot een versnelde vervanging werd besloten.

Het viaduct was onderdeel van een grotere reeks over de A59. De vormgeving van deze reeks wordt gekenmerkt door een zeer slanke dimensionering van brugdek en tussenpijler. Het nieuwe viaduct mocht in de reeks niet al te zeer uit de toon vallen. Een slanke vormgeving was dus gewenst.

Het viaduct moest in zeer korte tijd worden vervangen. Daarom werd gekozen voor het toepassen van prefab liggers. Een dergelijke oplossing levert echter een nogal

'zwarte aanblik' op. Dat effect wordt nog vergroot door de oplegging van de liggers op de middenpijler op een oplegtafel of oplegblok. Doordat zo'n blok tevens de twee buitenste liggers moet opsluiten, is nog eens extra hoogte nodig. De ontwikkeling van de nieuwe ligger richtte zich daarom op het wegnemen van deze beide visuele nadelen.

Vormkeuze vleugelbrug

Het zijaanzicht van het viaduct werd al veel slanker door in het dwarsprofiel een gebogen onderlijn in de vorm van een vleugel

aan te brengen. Door de dwarsvoorspanning in de dwarsdragers te concentreren en de randliggers op deze dwarsdragers op te leggen, kon verder het oplegblok ongeveer anderhalve ligger vanaf de buitenzijde naar het midden toe worden ingekort. Daardoor werd de visuele waarneming van het blok veel minder prominent. Zo ontstond in het aanzicht een over de middenpijler heengaande, scherpe belijning, die de gewenste slanke uitstraling voor het hele viaduct opleverde.

Vanuit het ontwerpuitgangspunt van de gebogen onderlijn is gezocht naar een liggerprofiel waarmee deze vorm zo optimaal mogelijk kon worden benaderd. Om de constructiehoogte zo klein mogelijk te houden, is gekozen voor een volledig profiel in geprefabriceerd beton, dat wil zeggen zonder in het werk te storten druklaag. De ligger zou daardoor in de bouwfase niet extra worden belast door het stor-

De Bouwdienst en de markt

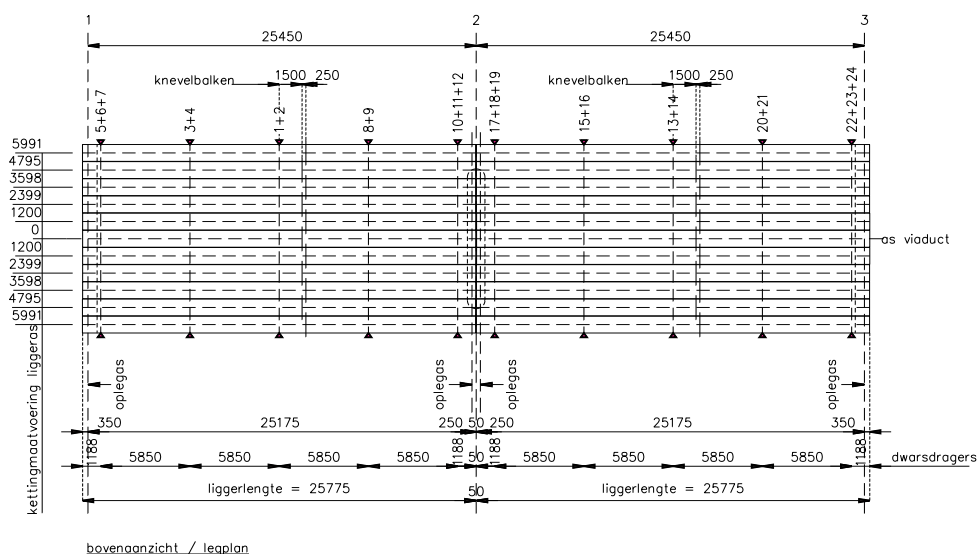
In haar Strategisch Plan geeft de Bouwdienst aan dat zij innovaties wil stimuleren. Soms kan een samenwerking met het bedrijfsleven aan te raden of zelfs noodzakelijk zijn. De ontwikkeling van de vleugelbrug illustreert dit. Het prefab-betonbedrijfsleven kan immers zelf beter bepalen of uitvoering van een gemaakt ontwerp in de fabriek tot de reële mogelijkheden behoort.

Het ontwerp van de vleugelbrug is in een nauw overleg tussen de esthetisch adviseur van de Bouwdienst, Haitsma en de Bouwdienst tot stand gekomen. Door zijn grote ervaring in de bruggenbouw heeft de Bouwdienst sterk kunnen bijdragen in het uiteindelijke ontwerp. Voor een werk van Rijkswaterstaat mag een innovatie echter niet leiden tot een product dat maar door één marktpartij kan worden geleverd. Uit oogpunt van concurrentie kan dat product dan namelijk door Rijkswaterstaat niet (of slechts moeizaam) worden toegepast.

Bij het onderhavige project is gekozen om het project in bouwteamverband tot uitvoering te brengen, waarbij Ballast Nedam Beton- en Waterbouw als moeder van Haitsma Beton eenmalig het voordeel heeft gekregen om deze vleugelbrug 'uit de hand' gegund te krijgen. Een en ander is te rechtvaardigen uit het feit dat Haitsma de initiatiefnemer van dit product is.

Constructie & uitvoering

Bruggenbouw



1 | Legplan van de 'rooster-vloer' met oplegvlakken

ten van een druklaag en kon slank worden uitgevoerd. De hoogte van de randkoker is in hoofdzaak bepaald door de minimale eis dat de ligger in het montagestadium zijn eigen gewicht kan dragen plus een eventuele belasting tijdens montage.

Belastingsafdracht

In tegenstelling tot een normaal kokerdek is bij de vleugelbrug de dwarsvoorspanning geconcentreerd in dwarsdragers die in de liggers zijn opgenomen. Het systeem van de dekconstructie bestaat dus uit een roostervloer. De randliggers kragen via de dwarsdragers uit het dek uit. Het eerste oplegblok vanaf de zijkant van de brug bevindt zich onder de tweede koker vanaf de rand, juist voor de meest naar binnen gelegen ribbe (fig. 1).

In de montagefase liggen de randliggers op tijdelijke ondersteuning. Door het aanbrengen van de dwarsvoorspanning gaan de randliggers aan de meer naar binnen gelegen hogere liggers hangen. De voorspanning is zodanig excentrisch aangebracht, dat aan de bovenzijde druk ontstaat. Om dit belastinggeval te kunnen schematiseren zijn de oplegreacties uit het

eigen gewicht als een belasting op het balkrooster aangebracht. Door de verlopende vorm en de dwarsspreiding van de belastingen is het aantal strengen in de lage randliggers in langsrichting vrijwel gelijk aan dat van de hogere middenliggers. Het streven is uiteraard om ervoor te zor-

gen dat de opbuiging van de liggers door voorspanning ongeveer gelijk is aan de doorbuiging door het eigen gewicht.

Bekistingstechniek

De liggers worden op een langebanksysteem geproduceerd. Door de vorm van de dwarsdoor-

Innovaties

Enkele innovaties met betrekking tot prefab in de bruggenbouw kenmerken de vleugelbrug:

- de onderzijde van het rijdek is gesegmenteerd gekromd. Hieraan dankt de vleugelbrug niet alleen zijn naam, maar ook zijn slank en sierlijk uiterlijk;
- het rijdek kraagt uit ten opzichte van de steunpunten. Geïntegreerde nagespannen dwarsdragers zorgen ervoor dat de minder hoge randliggers als het ware worden opgelegd op de 'hogere' liggers in het midden;
- het afschot in dwarsrichting van de bovenzijde van het rijdek is geïntegreerd in de liggers. De extra hoogte van de liggers naar het midden toe is constructief benut en heeft aan de randen tot een slankere constructie geleid;
- het toepassen van een kist met een verstelbare bodem;
- de gehanteerde filosofie luidt: 'zo slank mogelijk'. Uit oogpunt van economie was tot nu toe de filosofie meer gebaseerd op 'zo goedkoop mogelijk', zijnde het gebruiken van zo weinig mogelijk materiaal;
- de betonsterkteklasse is opgevoerd van B 55 naar B 65, in combinatie met een cement met ten minste 50% hoogovenslak. (Een dergelijk cement heeft een veel hogere weerstand tegen aantasting door ASR.) Hoogovencement heeft daarnaast het voordeel van een lichtere kleur. Tegen verwaarloosbare kosten kan de prefab-industrie bij de gegeven condities de betonsterkteklasse overigens nog enigszins verder opvoeren (bijv. tot B 75).

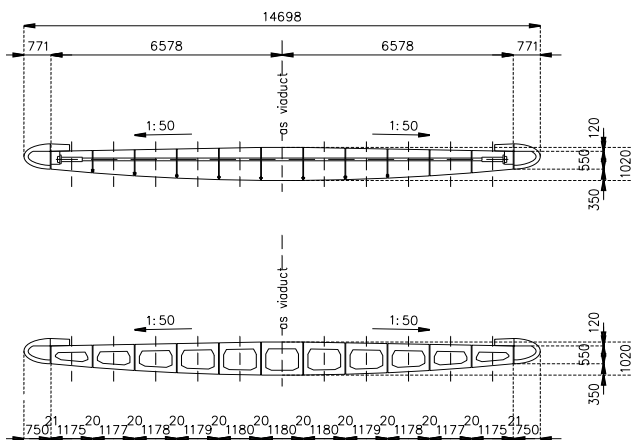
Constructie & uitvoering

Bruggenbouw

2 | Dwarsdoorsnede t.p.v. dwarsdrager (boven) en t.p.v. v.oeg (onder)

snede van het dek (fig. 2) is de doorsnede van de individuele liggers twee aan twee gelijk. De beëindiging is echter verschillend, zodat in dit geval met twee gelijke overspanningen steeds na twee liggers andere kopschotten moesten worden toegepast en na vier liggers naar een andere doorsnede moest worden omgebouwd.

Voor dit brugtype is een speciale stalen mal ontwikkeld, die binnen de normale productiecycclus van één dag kan worden omge-



bouwd naar een volgende doorsnede. Alle liggers zijn dus in dezelfde bekisting gemaakt. In de kist is een verstelbare bodem aangebracht die traploos kan worden ingesteld.

Als verloren binnenkist voor de kokers is polystyreen toegepast.

Montage

Onvermijdelijke toegverscillen tussen de liggers zijn met knevels ter plaatse van de voegen genivelleerd. Na het vullen van de voegen ter plaatse van de dwarsdragers is de dwarsvoorspanning aangebracht (fig. 2). De langvoegen tussen de liggers zijn hierna met mortel gevuld. Met deze fasering moet worden voorkomen dat de voorspanning uit de dwarsdragers over het totale dek wordt gespreid, waardoor

het niveau van de voorspanning in de dwarsdragers onvoldoende zou kunnen worden beheerst.

Enthusiasme

Bij dit eerste project met de vleugelbrug in Raamsdonksveer zijn 22 prefab betonnen kokerliggers van elk 25 meter lengte toegepast. Opvallend aan deze innovatie is dat alle bij het project betrokkenen - het projectteam, de opdrachtgever, de betrokken gemeente en de bouwers - van meet af aan enthousiast waren over het product. Ook tijdens de bouw waren er volop complimenten. De vleugelbrug wordt als een sprong vooruit gezien voor de mogelijkheden van vormgeving bij prefabricage in de bruggenbouw. ■

Projectgegevens

opdrachtgever:

Bouwdienst Rijkswaterstaat namens Rijkswaterstaat directie Noord-Brabant

architect:

Hans van Heeswijk, Amsterdam

aannemer:

Ballast Nedam Beton- en Waterbouw, Capelle aan den IJssel

constructeur onderbouw:

Ballast Nedam Engineering, Amstelveen

onderaannemer prefab:

Haitsma Beton, Maarssen

constructeur prefab:

Ingenieursbureau Mozes & De Boer, Harlingen

Oude fundering deels hergebruikt

Tijdens de werkvoorbereiding is een uitgebreide risicoanalyse gemaakt. Van ieder onderkend risico werden zowel de kans van optreden als de kosten en de vertraging bepaald. Deze analyse is besproken met de opdrachtgever.

Om de nieuwe landhoofden te kunnen funderen, zouden de oude betonnen heipalen moeten worden getrokken, wat een verstoring van het talud zou veroorzaken. Vervolgens zou een heistelling op het steile (2:3) talud zwaar heiwerk moeten uitvoeren. De risicoanalyse gaf aan dat, indien het talud nog verzadigd zou zijn met water (de regenperiode van najaar 1998), er mogelijk een gevaarlijk glijvlak naast de snelweg zou kunnen ontstaan. Dat was aanleiding om een alternatieve uitvoeringsmethode uit te werken. Deze bestond uit het hergebruiken van de oude palen en het plaatsen van enkele palen achter de bestaande palenrij. Op deze wijze werd het probleem van het gevaarlijke glijvlak voorkomen. Tevens bleek deze oplossing ook nog kostenverminderend te werken.

Constructie & uitvoering
Prefabricage

Complex ontwerp vraagt om innovatieve maltechniek

Polyester bekisting voor bruggen Leidschenveen

ing. E. van de Brug, Ballast Nedam Beton en Waterbouw B.V., Capelle aan den IJssel

ing. S.J. de Boer, Haitsma Beton B.V., Maarssen

ing. H. Grasmayer, Ballast Nedam Engineering, Amstelveen

Prefab betonelement
vlak voor ontkisten
foto: Gert Gort, Harlingen



In Leidschenveen, een Vinex-locatie bij de gemeente Leidschendam, zijn maar liefst 49 bruggen gepland. Prof.ir. Jan Brouwer (XX Architecten) ontwikkelde hiervoor een bijzonder plan, 'The ribcage', dat verder is ontwikkeld met Ballast Nedam Beton en Waterbouw. Vorig jaar is in Cement (nr. 5) al aandacht besteed aan het uiterst complexe ontwerp. Een ontwerp dat vroeg om een alternatieve wijze van bekisten van de prefab betonnen liggers. De keuze is gevallen op glasvezelversterkt polyester; en met succes.

Gelijktijdig met het ontwerpproces is de uitvoering van de brug voorbereid. XX Architecten en Ballast Nedam Beton en Waterbouw stelden de geometrische vorm van de brug centraal. Aanpassingen aan deze vorm mochten alleen als dit noodzakelijk en onoverkomelijk was. Dit, en het grote gewicht van de te maken prefab betonnen ligger (50 ton) leidde tot zware eisen aan de be-

kisting voor de prefab betonnen ligger:

- De complexiteit van de vorm moet in de bekisting worden gevolgd.
- De bekisting moet een totaal van circa 50 ton beton kunnen dragen.
- De drie verschillende liggerbekistingen moeten 25 tot 40 maal kunnen worden ingezet, afhankelijk van de variant van

de ligger. Er zijn in totaal 75 liggers in drie varianten: recht, schuin links en schuin rechts.

- De bekisting moet verplaatsbaar zijn, in verband met de beschikbare ruimte voor het fabriceren van de ligger.
- Ten slotte moet de bekisting betaalbaar zijn.

Welk bekistingsmateriaal?

In eerste instantie is gekeken naar de traditionele bekistingsmaterialen hout en staal. Hout kan in de goede vorm worden gemaakt. Echter de bekisting kan alleen worden samengesteld uit kleine onderdelen, wat de sterkte nadelig beïnvloedt. Daarnaast is het de vraag of een houten bekisting bestand is tegen veelvuldig ge-

bruik (maximaal circa veertig keer per liggebekisting). Bovendien is het onderhoud gecompliceerd, tijdrovend en duur.

Een bekisting van staal kan niet of nauwelijks in de goede vorm worden samengesteld. Een stalen bekisting moet worden gelast uit een groot aantal kleine onderdelen. De uiteindelijke vorm van de bekisting zal dan handmatig moeten worden geslepen. Hierdoor is alleen het maken van de bekisting al een moeizame en dure opgave. Het gewicht van de bekisting zal daarnaast zo hoog worden dat het verplaatsen moeilijk zal zijn.

Geconfronteerd met deze problemen is gekeken naar een alternatieve wijze van bekisten. Gezien de complexe vorm lag een kunststof bekisting voor de hand. De vraag was echter of de gevraagde kunststof bekisting in deze grootte (14,0 x 3,0 m²) wel te maken was. Uit literatuuronderzoek bleek dat een dergelijke grote vorm eerder is toegepast bij een voetgangersbrug in Harlingen, geproduceerd door Poly Products uit Werkendam. Omdat ook aan de overige gestelde eisen naar verwachting kon worden voldaan, werd gekozen voor een kunststof bekisting.

Samen met Poly Products is de bekisting verder ontwikkeld. Dit is een langdurig proces geweest, waarbij ook de architect, constructeur, mallenbouwer en leverancier van het prefab beton betrokken waren.

Kunststof bekistingen

Bij de ontwikkeling van de kunststof bekistingen voor liggers en landhoofden zijn twee punten van groot belang gebleken. Allereerst moesten alle betrokkenen goed worden geïnformeerd over de stand van zaken en moesten zij de mogelijkheid hebben om het uiteindelijke ontwerp mede te bepalen. Dit moest al in een vroeg stadium gebeuren om te voorkomen dat genomen besluiten moesten worden terugge-

Het ontwerp

Het ontwerp van de Ribcage-bruggen bestaat hoofdzakelijk uit een betonnen ligger, met over de gehele onderzijde van het dek een betonnen rib. Vanwege de grote massa van beton moest de hoeveelheid beton worden geoptimaliseerd. Daartoe is in de lengte-overspanning een 'ruggengraat' ontworpen die in het midden van de overspanning de grootste hoogte heeft en bij de opleggingen breed uitloopt. De dunne ribben in de dwarsrichting verstijven de brug en zorgen voor een optimale hoeveelheid beton.

Het ontwerp kent twee verschillende basistypen, te weten een brug haaks over de watergang en een brug schuin over de watergang. Beide typen zijn samengesteld uit standaardtypen landhoofden en brugliggers. Al naar gelang de gewenste breedte worden een, twee of drie standaardtypen naast elkaar geplaatst. Het verschil tussen de typen zit vooral in de plaatsing van de dwarsribben: deze zijn altijd evenwijdig aan de watergang, dus haaks of schuin op de langsrib.

De brugliggers hebben een tandoplegging, waardoor de brugligger lijkt te zweven tussen de landhoofden. Het landhoofd kent een uitkraging waarop de brugligger rust.

De brugliggers worden uitgevoerd in voorgespannen beton met nagerekt voorspanstaal.

De ligging van de kabels verloopt parabolisch voor een optimaal materiaalgebruik. Door toepassing van een tandoplegging met uitermate geringe constructiehoogte, voorziet het ontwerp van de opleggingen in een staalconstructie die volledig in het beton wordt opgenomen en die de geconcentreerde oplegkracht opvangt en verplaatst naar een doorsnede waar de voorspanning volledig werkzaam is.

De huidwapening in langsrichting is hoofdzakelijk werkzaam in de periode na het storten van het beton van de ligger en voor het definitieve afspannen. De vormgeving, met name de aanwezigheid van de dwarsliggers, maakt het noodzakelijk dat de vers gestorte ligger uit de mal wordt gehesen voordat de ligger kan worden afgespannen. De huidwapening in dwarsrichting verzorgt de sterkte en stabiliteit van de ligger.

Bij toepassing van diverse liggers naast elkaar, worden de liggers gekoppeld door een in het werk gestorte strook gewapend beton. De momentvaste koppeling draagt aanzienlijk bij in de totale wringstijfheid van het samengestelde brugdek.

De landhoofden worden in gewapend beton uitgevoerd en zijn gefundeerd op geprefabriceerde voorgespannen betonpalen. Ook in de landhoofden heeft de vorm van de oplegging toepassing van in het beton opgenomen staalconstructies noodzakelijk gemaakt.

In Cement 1999 nr.5 is een artikel verschenen over het ontwerpproces van de Ribcage-bruggen.

draaid, omdat bepaalde zaken over het hoofd waren gezien. Daarnaast moesten alle partijen een grote mate van aanpassing en begrip aan de dag leggen. Want zij verschillen niet alleen van discipline, zij bewegen zich ook in totaal verschillende markten. Enkele vooroordelen moesten worden bestreden. Zo hadden de leverancier van het prefab beton en de aannemer in eerste instantie hun vragen bij het materiaal polyester ('Daar worden toch alleen maar plastic boten van gemaakt?').

Het ontwerpproces heeft geleid tot bekistingen van glasvezelversterkt polyester. Omdat de vorm-

geving en het uiterlijk van de liggers zeer belangrijk zijn, is het ook van belang dat de polyester bekistingen niet beschadigen tijdens het productieproces.

De bekisting wordt op dezelfde wijze gemaakt als alle polyester mallen. Eerst wordt een positief vervaardigd van het te produceren product. Dit model van de toekomstige brug op ware grootte is geheel uit hout vervaardigd.

Voor de lossing wordt een waslaag aangebracht. Over het model wordt in verschillende lagen de vezelversterkte polyester bekisting gevormd. De dikte van de bekistingshuid van de ligger is circa 10 mm en van het landhoofd circa 7 mm. Na het lossen van de

Constructie & uitvoering

Prefabricage

Blik in de polyester mal
foto: Gert Gort, Harlingen



Prefab element wordt naar
tasveld getransporteerd



bekisting van de basisvorm beschikt men over een mal, die echter veel te slap is om beton in te storten. De mal is daarom versterkt met een stalen frame. Om de vormvastheid van de mal te garanderen, wordt de gehele rugzijde van de bekisting versterkt met een steunbed van polyurethaan schuim.

Door deze opbouw van de bekisting is het gebruik van bekistingstrillers niet mogelijk. Voor het verdichten van de specie wordt gebruikgemaakt van trilnaalden.

**Prefabricage van de
brugliggers**

De vormgeving van de brug is uiterst complex. De gehele brug is opgebouwd uit paraboloides, waardoor iedere doorsnede verschillend is. Het tekenwerk voor de vorm van de brug is volledig 3-D uitgevoerd. De wapeningstekeningen zijn in 2-D gemaakt. De mal voor de liggerbekisting is gemaakt voor een halve ligger. Nadat van deze mal twee bekistingen zijn gemaakt, worden deze samengesteld tot één liggerbekisting.

De ligger wordt vervaardigd in betonsterkteklasse B 65 met een mengsel van hoogoven- en portlandcement. Om het lossen van de kist te vergemakkelijken is aan de onderzijde van de mal een aantal punten gemaakt waar via slangetjes lucht tussen de bekisting en het betonproduct kan worden geperst. Het betonelement wordt als een gewapend element uit de mal gehesen. De betondruksterkte na 18 uur bedraagt dan circa 40 N/mm². Er is gekozen voor het aanbrengen van voorspanning met nagerekt staal, omdat het verloop van de voorspanning zeer grillig is. De ligger zou slechts met een groot aantal vasthoudpunten met voorgerekt staal kunnen worden uitgevoerd. Na enige dagen in de opslag worden de elementen voorgespannen en kunnen ze op hun uiteindelijke opleggingen worden gelegd.

Constructie & uitvoering

Prefabricage

Stand van zaken

Op dit ogenblik zijn drie liggerbekistingen geleverd en zes landhoofdbekistingen. De eerste liggers zijn begin maart gestort bij Haitsma Beton. De resultaten van het eerste stort zijn zeer goed. Het oppervlak van de elementen is glad en dicht. Een praktische zaak waarmee rekening dient te worden gehouden is dat laswerkzaamheden voor kleine veranderingen aan de wapening niet meer in de kunststof mal kunnen worden uitgevoerd.

De eerste landhoofdbekisting is eind november 1999 afgeleverd op de bouwplaats in Leidschenveen. De eerste landhoofden voor enkele bruggen zijn gestort, en de resultaten zijn goed. De bekisting levert een glad oppervlak zonder grindnesten of andere ongeregelheden. De landhoofdbekisting is daarnaast goed te verplaatsen en in te zetten op de bouwplaats. Hoe de landhoofdbekisting (en ook de liggerbekistingen) zich zullen houden nadat er verschillende elementen in gemaakt zijn, moet worden afgewacht. Problemen worden hierbij echter niet verwacht. ■

Projectgegevens

opdrachtgever:

Ontwikkelingsbedrijf
Leidschenveen

architect:

prof.ir. Jan Brouwer,
XX-architecten, Delft

constructeur:

Ballast Nedam Engineering,
Amstelveen/De Boer T & M,
Eembrugge

aannemer:

Ballast Nedam Beton en Waterbouw,
Capelle aan den IJssel

leverancier VVK-bekisting:

Poly Products, Werkendam

leverancier prefab liggers:

Haitsma Beton, Maarssen/
Kootstertille



Voor deze brug worden twee standaardtypen naast elkaar geplaatst



Staalconstructie in het landhoofd



Landhoofden wachten op overbrugging

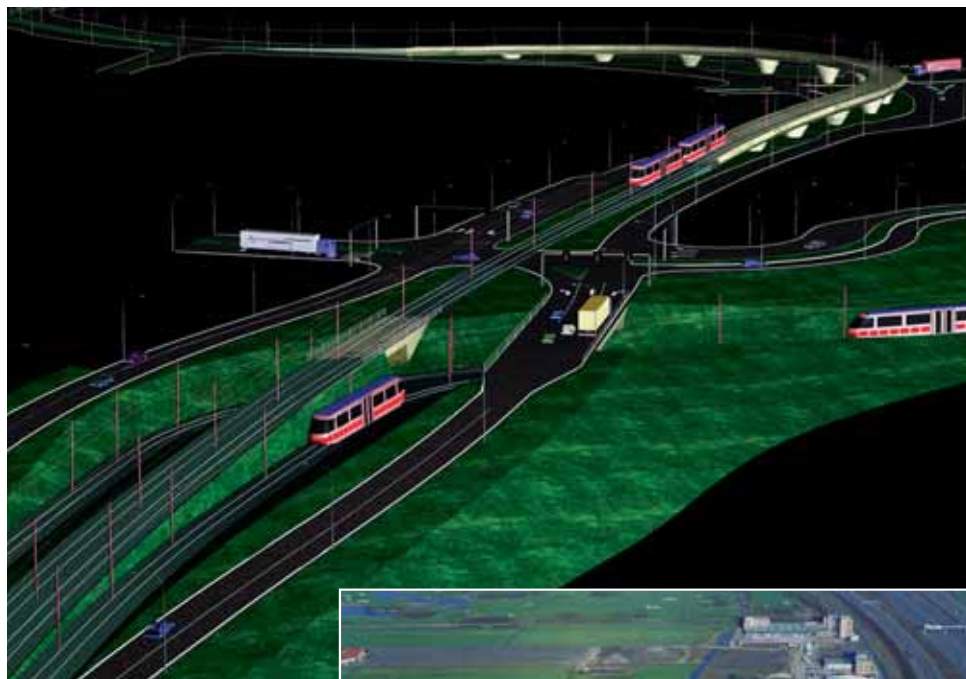
Constructie & uitvoering

Bruggenbouw

*Fly-over Ypenburg voor raillijn 15***Vorm en functie hand in hand**

ir. D.M. Alsem en ir. R.L.J. Lukassen, HASKONING Nijmegen

Artist impression fly-over gezien vanaf de Hoornbrug over de Vliet (richting Den Haag). De rijbanen van de ontsluiting naar Ypenburg lopen aan weerszijden van de trambaan. Op de voorgrond lijn 1 richting Delft



Raillijn 15 is opgezet om de nieuwbouwwijk Ypenburg bij Rijswijk met openbaar vervoer te ontsluiten. Deze verbinding wordt als tramlijn aangelegd, in de toekomst uit te breiden naar Lightrail.

Het ontwerp is sterk gedictieerd door de beperkte ruimte ter plaatse. Nadat de gemeente reeds kavels voor kantoorgebouwen had uitgegeven, bleef voor de ontsluitingsweg slechts een smalle gekromde strook over. In deze strook moest tevens de ongelijkvloerse kruising van het tram- en autoverkeer worden aangelegd. In verband hiermee is gekozen voor een sterk gekromde fly-over voor de tram, met opritten vlak naast de ontsluitingsweg. Er is niet gekozen voor de oplossing met een breed wegviaduct over de raillijn, omdat dit tot veel hogere bouwkosten zou leiden.

De fly-over (fig. 1) is bestemd voor tweesporig tramverkeer, zowel met de huidige trams (GTL-8) als met de toekomstige modellen (type Agglonet). Het eerste en laatste deel zijn recht; met overgangsbogen wordt overgegaan op een cirkelvormig deel met een



1 | Situatie fly-over; rechts is de aanzet van verkeersplein Ypenburg te zien

straal van 106 m. Ter plaatse van het cirkelvormige middendeel is de brug geschikt gemaakt voor een toekomstige aftakking van de tramlijn. De funderingsvoorzie-

ningen hiervoor zijn, voor zover deze na het gereedkomen van de fly-over door ruimtegebrek niet meer gemaakt kunnen worden, reeds nu aangelegd.

De lengte van de fly-over is 328 m, de breedte 7 m. De maximale helling van opritten voor spoorconstructies bedraagt 2%.

De fly-over rust op twee laaggelegen landhoofden en elf pijlers; negen zijn voorzien van een pijlertafel voor prefab liggers (de standaard-pijlers), twee ondersteunen een ter plaatse gestort dek voor de toekomstige aftakking. Het stramien van de pijlers is bepaald op 28 m. De pijlertafels zijn 8 m lang; de overspanning van de tussenliggende dekken bedraagt daarmee 20 m. Met deze geringe overspanning kon de constructiehoogte beperkt blijven.

Fundering

De landhoofden (fig. 2) en pijlers zijn gefundeerd op Vibro-palen Ø 506 mm. De landhoofden op 10 palen, de standaard-pijlers op 28 palen en de twee pijlers onder het ter plaatse gestorte dek op 40 palen. Vanwege de benodigde

trekcapaciteit en de stijve zandlagen is gekozen voor het heien van Vibro-palen met een stalen casing.

Pijlers

De pijlers zijn opgebouwd uit omgekeerde kegels van verschillende hoogte met daarop de pijlertafel (fig. 3) of het ter plaatse gestorte dek, met tandopleggingen. De pijlers en pijlertafels zijn in het werk gestort. De pijlers zijn uitgevoerd met een bekisting van prefab schaalementen. Deze zijn geplaatst in een stalen ondersteuningsconstructie (foto 4), als duigen voor een ton, waarna aan de binnenzijde van de kegel de wapening is aangebracht en met een houten binnenbekisting het beton is gestort. Na verharding van het beton is de ondersteuningsconstructie verwijderd. De kegelwapening bestaat uit ringwapening in omtreksrichting en langswapening in hoogterichting.

Agglonet

Verscheidende overheidsinstanties zijn op allerlei gebieden actief om Nederland leefbaar en bereikbaar te houden. Het Bereikbaarheidsplan Haaglanden, opgesteld door het stadsgewest Haaglanden, is hiervan een concreet voorbeeld. Dit plan voorziet onder meer in de aanleg van een nieuw openbaar-vervoersysteem, het Agglonet. Dit is een openbaar-vervoersysteem voor de middellange afstanden (10 – 30 km), dat wordt gekenmerkt door een hoge gemiddelde snelheid, hoge frequentie, goede en vlotte op- en overstapvoorzieningen en betrouwbaarheid.

De pijlers zijn gebouwd op 1,5 m dikke, achthoekige funderingspoeren met een grootste afmeting onder de standaard-pijlers van 8 m (fig. 5) en onder de twee pijlers voor het ter plaatse gestorte dek van 10 m.

Prefab dekken

Tussen de pijlertafels en de landhoofden zijn elf dekken gemonteerd. Elk dek bestaat uit vijf voorgespannen prefab betonnen kokerliggers, voorzien van een in

Duigen en lamellen

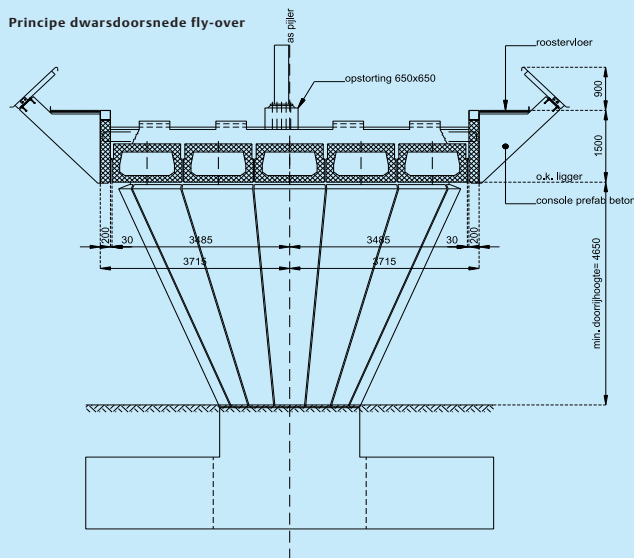
Architect Syb van Breda heeft vanaf het begin duidelijk zijn stempel op het kunstwerk gedrukt. "Nederland is een tweedimensionaal land, waar viaducten zich doorgaans met veel kracht aan het maaiveld onttrekken. Dat komt door de flauwe opritten, die meestal bestaan uit massief ogende dijklichamen. Het krachten spel en de 'zompige' ondergrond maken verder een relatief zware constructie noodzakelijk. In het buitenland zijn viaducten evenwel vaak ijle elementen in een bergachtig landschap; de opritten maken daar deel uit van het natuurlijk reliëf. Een dergelijk beeld kan in ons land dan misschien niet haalbaar, maar wel benaderbaar zijn."

Van Breda ontwierp daartoe elementen die 'licht' ogen, en noemde ze 'duigen' en 'lamellen'. Voor de pijlers bedacht hij een omgekeerde kegelvorm, opgebouwd uit verticale elementen (duigen). Hiermee schetste hij het beeld van een 'fijn' fundament met een relatief groot draagvlak. Door op de kegel bovendien een tafelbladoplegging te creëren, kon de maximale overspanning nog verder worden 'opgerekt'. De liggers ten slotte zijn aan de randen afgewerkt met smalle prefab elementen (lamellen). Het resultaat is een optimale transparantie.

Het is kenmerkend voor de architectuur van Haskoning vorm en functie te combineren en hele constructies uit één enkel elementtype op te bouwen. Zo is de bekleding van de kegels (de duigen) opgebouwd uit gelijkvormige, prefab-betonnen schaalementen, die tevens dienst doen als bekisting. En de lamellenrand bepaalt niet alleen het aanzicht van de brug, maar draagt bovendien de plaatstalen borstwering en het inspectiepad. De prefab betonelementen van de lamellenrand kunnen achteraf, separaat van de doorbuiging van het dek, tot een continue zichtlijn worden gesteld.

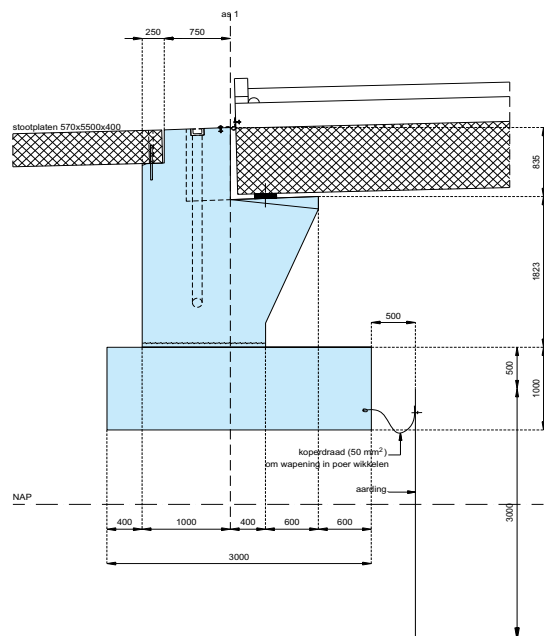
De elementaire opbouw zorgt voor een korte bouwtijd, het herhaald toepassen van dezelfde elementen voor een lage bouwsom en beheersing van de hoge kwaliteit.

Principe dwarsdoorsnede fly-over

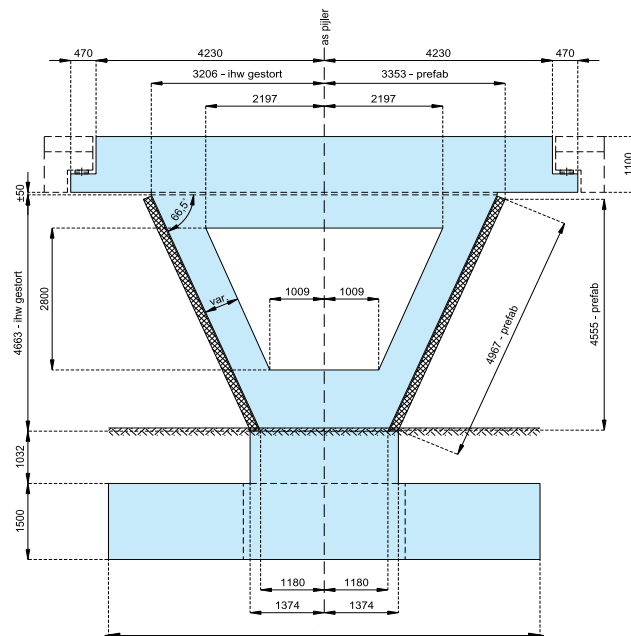


Constructie & uitvoering

Bruggenbouw



2 | Landhoofd. De inkassing is voor horizontale oplegging van de middelste ligger



3 | Principe langsdoorsnede over standaard-pijler; bovenmaat kegel bij alle pijlers gelijk, ondermaat en hoogtemaat per pijler verschillend



- 4 | Plaatsen prefab schaal-elementen
5 | Palen onder poer voor standaard-pijler

het werk gestorte druklaag van 300 mm.

Vier dekken zijn uitgevoerd met rechte liggers, de overige met horizontaal gebogen liggers. In de overgangsbogen hebben de liggers een straal van 220 m, in het meest gekromde deel een straal van 106,4 m. Met deze drie typen liggers was het mogelijk de gehele fly-over met een geringe tolerantie binnen de ideale lijnen te ontwerpen.

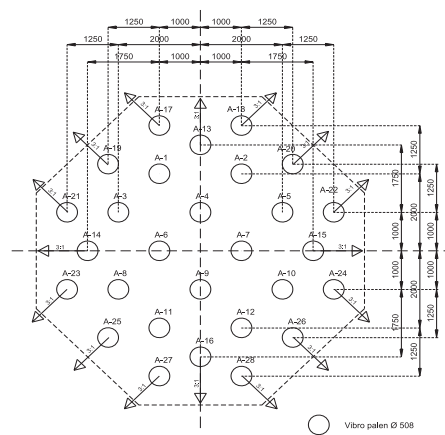
De liggers zijn 800 mm hoog, hebben een werkende breedte van 1400 mm en zijn 20 m lang. De massa is 34 ton. De liggers liggen met een tandoplegging op de pijlertafels.

In het bestek was in de bovenflenzen van de kokerliggers dwarsvoorspanning voorgeschreven. Aangezien de liggers zijn voorzien van een druklaag, is door de leverancier van de elementen een ontwerp aangeboden zonder

dwarsvoorspanning. Naast een kostenvoordeel werd hiermee een tijdsbesparing van enkele weken behaald.

Montage prefab liggers

De montage van de liggers is uitgevoerd in twee fasen. In de eerste fase, begin maart 2001, zijn 25 liggers gemonteerd, in de tweede fase, eind maart, de resterende 30. De liggers zijn gemonteerd met 200 en 300 tons hydraulische



Vibro palen Ø 508

Constructie & uitvoering

Bruggenbouw

kranen. Bij één veld werden de liggers over de weg heen gemon- teerd. Voor het monteren van elke ligger werd het verkeer tussen 9.00 en 15.00 uur stilgelegd, na en voor de spits.

Om te voorkomen dat de druklaag tijdens het storten scheurt door een ongelijke belasting van de liggers, zijn deze na het monteren voorzien van een koppeling in het midden van de liggers.

Ter plaatse gestort dek

Tussen de assen 9 en 10 is het dek in het werk gestort. Dit dek is gedimensioneerd op het eventueel aanbouwen van een toekomstige aftakking (foto 6); de breedte bedraagt 7 m, de lengte 28 m.

Het dek vormt één geheel met de pijlers. De aftakking kan met de fly-over worden verbonden door aan de buitenboog van het dek ankers in te boren.

Het dek is monoliet tussen de pijlers gestort; tijdens de verharding van het beton is het dek gekoeld om de langsspanningen door de verharding van het beton te beperken. Bij de dimensionering van de langswapening is rekening gehouden met deze verhinderde krimpspanningen.

Oplegblokken

De prefab liggers liggen aan weerszijden op twee met staalplaat gewapende, rubber opleg- blokken, Ø 250 mm, dik 74 mm. De blokken zijn gesteld in kunstharsmortel.

Voor het opnemen van de krachten in horizontale richting zijn aan de druklaag horizontale neuzen gestort, die passen in spar- ingen in de pijlertafels c.q. in het ter plaatse gestorte dek. De meest gekromde dekken zijn voorzien van twee neuzen, breed 800 mm, aan weerszijden tussen de railop- stortingen, de overige dekken van een enkele neus, breed 1400 mm, ter plaatse van de middenligger (fig. 7). Bij de landhoofden steekt de middelste ligger door.

Tussen de neus, c.q. ligger, en de sparing bevindt zich aan weers-

zijden een met staalplaat gewa- pend, rubber oplegblok 250 x 200 mm², dik 41 mm, vast ge vulcane- seerd op een stalen plaat 400 x 200 x 15 mm³, met ankers in het beton bevestigd.

Spoorconstructie

Voor het comfort van de tram- passagiers is gekozen voor voeg- loos spoor. Om bij temperatuur- uitzetting en toepassen van een ballastbed het niet te beheersen verschuiven van het gekromde spoor in dwarsrichting te voorko- men, is gekozen voor ballastloos spoor, bevestigd op railopstorten op het betondek.

Voor de railbevestiging was in eerste instantie uitgegaan van een betonnen gootconstructie waarin de rail zou worden ondergoten met een elastische massa. In een later stadium is uit kostenoverwegin- gen overgegaan op een standaard- klemverbinding. De stekken voor de verbinding worden ingeboord in de wapeningsvrije zone in de railopstorten.

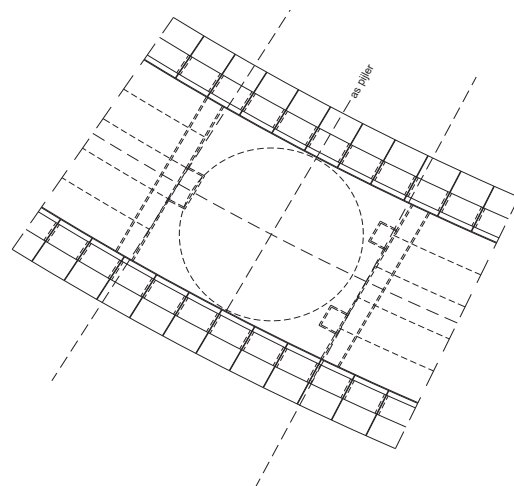
Aanvankelijk is overwogen het gedeelte van de railopstorten ter plaatse van de toekomstige aftak- king als een staalconstructie uit te voeren. Vanwege de onzekerheid over de toekomstige aftakking is dit gedeelte toch in beton uitge- voerd. Bij het eventueel realiseren van de aftakking worden deze ge- sloopt en opnieuw aangebracht voor de aftakking.

Modellering

Schaalmodellen

Van de pijler en het ter plaatse gestorte dek zijn integrale schaal- modellen gemaakt. Voor de pijler zijn palen, poer, kegel, pijlertafel en tandoplegging in één 3D- model samengevoegd. Op deze manier zijn de krachten op alle constructieonderdelen direct be- schikbaar en kan de wapening worden gedimensioneerd. Op de- zelfde manier is ook het ter plaatse gestorte dek gemodel- leerd, zonder en met aftakking.

In het schaalmodel van de pijler- tafel zijn de palen gemodelleerd



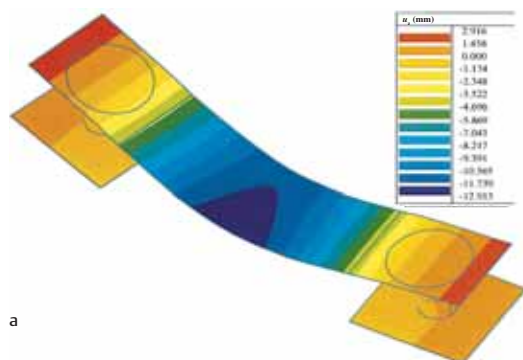
als veren. De poer bestaat uit ele- menten met een dikte van 1,5 m. De kegel bestaat uit twee delen, een kegelnek en de kegel zelf. De elementen zijn gemodelleerd op de hartlijnen van de kegel. De pijlertafel bestaat uit elemen- ten van 1,8 m dikte (het midden van de pijlertafel) en van 1,1 m dikte (de rand van de pijlertafel). De poer en kegel bezitten de eigenschappen van beton B 35. Voor de tafel is B 65 gekozen om de verhinderde krimp van de gestorte tafel te beperken.

Het schaalmodel van het in het werk gestorte dek heeft in prin- cipe dezelfde opbouw als de al- leenstaande pijler, met uitzonde-

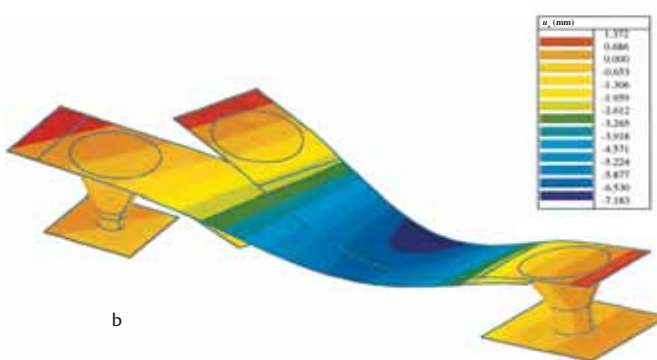
- 6 | Ter plaatse gestort dek voor toekomstige aftakking
- 7 | Enkele en dubbele neuzen voor afdracht horizontale krachten op pijler 7

Constructie & uitvoering

Bruggenbouw



8 | Verticale verplaatsingen u_z ter plaatse gestorte dek zonder (a) en met aftakking (b)



9 | Stand werkzaamheden april 2001



ring van het dek zelf. Er is in dit geval gebruikgemaakt van twee kegels met bijbehorende palen en poeren. In het geval van de uitbreiding van het ter plaatse gestorte dek is zelfs sprake van drie kegels met bijbehorende palen en poeren. Het dek is gemodelleerd over de twee c.q. drie kegels met een dikte van 1,1 m. Het dek wordt uitgevoerd in B 65, eveneens om de verhinderde krimp van het gestorte dek te beperken.

De belastingen op de pijlertafel en op het ter plaatse gestorte dek konden direct op de tafel c.q. het dek worden gezet. Hierbij zijn ook de middelpuntvliedende kracht van de tram en de temperatuurkrachten, veroorzaakt door de railconstructie, meegenomen. Deze krachten zijn berekend met een temperatuurmodel.

In figuur 8 zijn de verplaatsingen

weergegeven van het ter plaatse gestorte dek, zonder en met aftakking.

Temperatuurmodel

Doordat de temperatuuruitzetting van het voegloze spoor in langsrichting wordt verhinderd en door de kromming van het spoor, veroorzaakt dit krachten op de onderbouw in dwarsrichting. Voor het bepalen van deze krachten is een 2D-model gemaakt, waarbij de horizontale veerstijfheden van fundering en pijler in rekening zijn gebracht. Een bovengrens van de krachten was te bepalen door de uitzetting als volledig verhinderd te beschouwen en hiermee een analytische schatting te maken. Het bleek dat fundering en pijler in horizontale richting vrij stijf waren, doordat de reactiekrachten van de fundering maar lichtelijk onder de krachten van de analytische benadering vielen.

De krachten die ontstonden zijn vervolgens meegenomen in de 3D-schaalmodellen van de pijler en het in het werk gestorte dek. Uiteindelijk heeft dit mede geleid tot de schoorpalen in de fundering.

Langskrachtenmodel

De doorbuiging van het kunstwerk veroorzaakt langskrachten in het spoor. Om de grootte van deze krachten te bepalen is een langskrachtenberekening van het spoor uitgevoerd. In een model is de volledige lengte van het viaduct meegenomen, plus een deel van

het toeleidende spoor naar het kunstwerk. Alle horizontale en eventuele verticale veerstijfheden van de constructie zijn in rekening gebracht, zoals de veerstijfheden van de funderingspoeren en de bijbehorende rotatiecentra, de veerstijfheden van de opleggingen en van de spoorverbinding op de betonconstructie. Vanzelfsprekend zijn ook alle buig- en rekstijfheden van de betonnen liggers en het in het werk gestorte dek in rekening gebracht. Doordat de overspanningen per stramen beperkt zijn, bleken de langskrachten binnen de gestelde grenzen te vallen.

Ten slotte

De bouwtijd van de fly-over bedroeg elf maanden. De constructie is rond mei 2001 opgeleverd. Foto 9 toont de laatste werkzaamheden. De fly-over is volgens planning gebruiksgereed in september 2001. ■

Projectgegevens

opdrachtgever:

Stadsgewest Haaglanden

exploitatie:

HTM, Den Haag

architect:

HASKONING, Amsterdam

ontwerp en directie:

HASKONING, Nijmegen

aannemer:

Strukton, Utrecht

productie liggers:

Betonson, Son

fundering:

Terracon, Werkendam