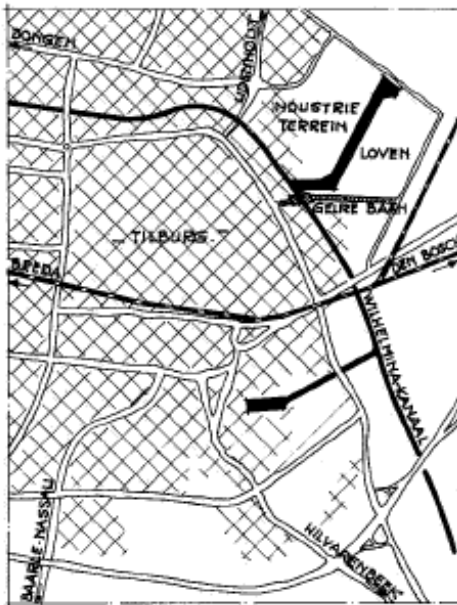


De brug over het Wilhelminakanaal te Tilburg

ir.B.Overmars

adjunct directeur Raadgevend Ingenieurs-
bureau Aronsohn BV, Rotterdam

A. Het ontwerp



1
Situatie in Tilburg
Situation in Tilburg

Inleiding

Door Tilburg, industriestad in het hart van Brabant en achtste stad in Nederland met ca. 160000 inwoners, een beroepsbevolking van 60 000 zielen, waarvan 30 000 werkzaam in de industrie, loopt het Wilhelminakanaal (fig. 1).

Het nieuwe industrieterrein 'Loven', dat een oppervlakte heeft van ca. 100 ha en voorzien is van een spoorwegraccrochement en een insteekhaven aan het kanaal, is gesitueerd aan de oostzijde van het kanaal. Om dit industrieterrein beter te ontsluiten, werd besloten een nieuwe oeververbinding tot stand te brengen en het terrein door middel van een brug in de Gelrebaan met de Ringbaan Oost te verbinden.

Het Wilhelminakanaal is 68 km lang, heeft een breedte van 25 m en is geschikt voor 500-tons schepen met een diepgang van 1,90 m maximaal. De minimale doorvaartbreedte bij sluisen en bruggen bedraagt 7,00 m. Het kanaal heeft ter plaatse van de kruising met het tracé van de Gelrebaan een breedte van ca. 24 m.

De westelijke oever wordt gevormd door de Lovense Kanaaldijk waarop zich een weg bevindt voor lokaal verkeer. Er bestaan overigens plannen om het Wilhelminakanaal in de toekomst te verbreden tot 48 m. Het huidige kanaalpeil van 12,50 m + NAP zou in de plannen ongeveer gelijk blijven, terwijl de bodemdiepte van 10,10 m + NAP naar 8,20 m + NAP zou worden gebracht. De minimale vrije doorvaarhoogte bedraagt 5,75 m.

Na de verbreding van het kanaal moet ook op de oostelijke oever gerekend worden op een weg voor lokaal verkeer. De hoek waaronder deze weg en het kanaal elkaar kruisen bedraagt ter plaatse van de as van het huidige kanaal 59,1860 gr.

De Gelrebaan

Het tracé van de Gelrebaan zal bestaan uit 2 maal twee rijstroken voor snelverkeer, gescheiden door een middenberm en aan weerszijden voorzien van vluchtstroken. Tevens zullen fietspaden aan weerszijden van de weg worden aangelegd.

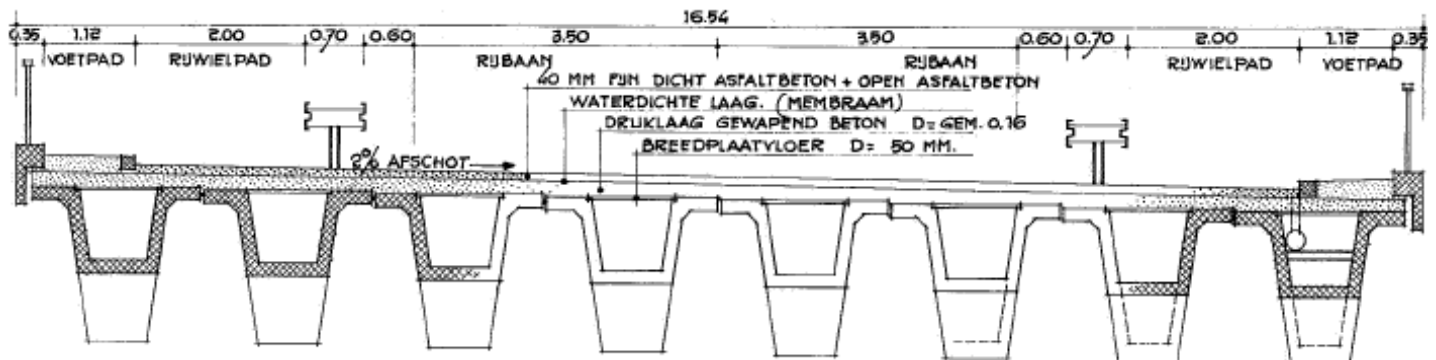
Ter plaatse van de kanaalkruising bevindt zich een bocht in de Gelrebaan met een straal van 1500 m' en een aangehouden verkanting van 2%. De verticale straal bedraagt 4000 m'. De door de Dienst Gemeentewerken Tilburg ontworpen stedenbouwkundige situatie resulteerde in een tweelingbrug op vijf steunpunten met overspanningen van resp. 35, 38, 38 en 35 m'. De westelijke pijler en de middenpijler werden zo gesitueerd dat het huidige kanaaltracé hier vrij tussendoor loopt. Bij de (eventuele) toekomstige verbreding van het kanaal zal de middenpijler in het hart van het kanaal komen. In de huidige fase wordt alleen de noordelijke brug met de daarop aansluitende wegen uitgevoerd (fig. 2).

Het ontwerp

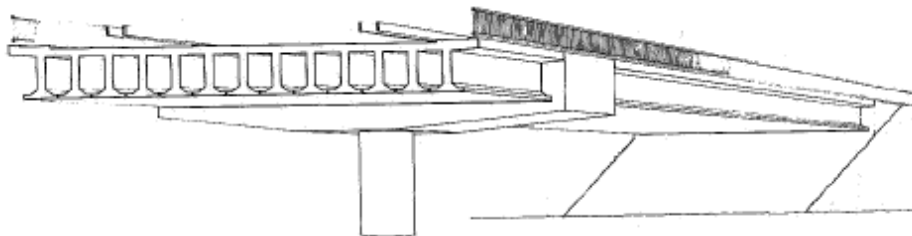
Aan de opdrachtgever werden vier ontwerpen voorgelegd.

Allereerst een ontwerp (fig. 3) waarbij het brugdek ter plaatse van de pijlers ondersteund werd door één zware kolom, met daaroverheen een brede dwarsbalk. Tussen deze dwarsbalken waren geprefabriceerde voorgespannen liggers gedacht. De breedte werd zo gekozen dat,

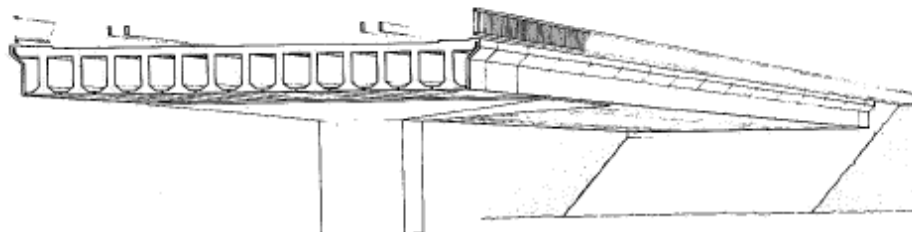
2
Dwarsdoorsnede van de brug
Cross section of the bridge



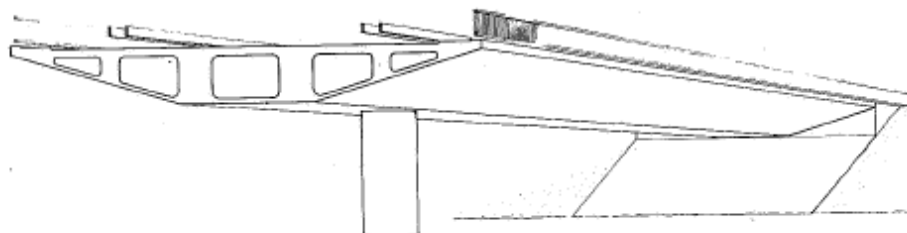
Figuur 3



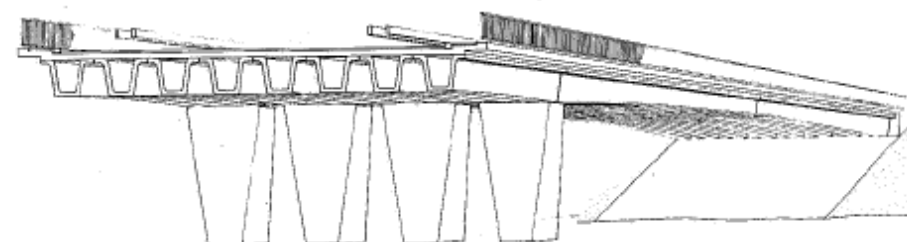
Figuur 4



Figuur 5



Figuur 6



indien asymmetrisch aangebracht op de kolommen, de lengte van de prefab-liggers voor alle velden gelijk zou worden, namelijk 32 meter.

Omdat de brug in een horizontale bocht ligt, ontstaan er over de breedte afwijkingen in de overspanningen. Deze afwijkingen konden in de maatvoering van de dwarsbalken opgevangen worden. De zijkanten van de prefab-balken bleven in het zicht evenals de kop van de dwarsbalk, hiermee de ondersteuning duidelijk accentuerend.

Als tweede een ontwerp (fig. 4) met dezelfde constructieve opzet, waarbij echter het zij-aanzicht van de brug gevormd zou worden door geprefabriceerde elementen met verticale voegen. In tegenstelling tot ontwerp 1, werd door het visueel laten wegvallen van de dwarsbalk, duidelijk het accent gelegd op het doorgaande karakter van het brugdek over de steunpunten.

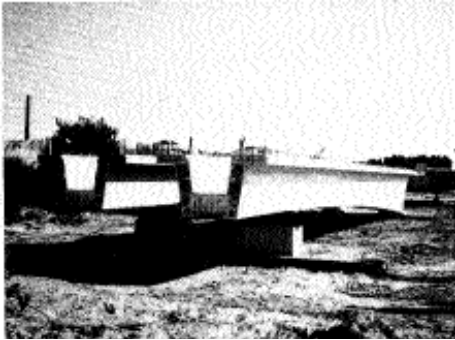
Verder werd een ontwerp voorgelegd (fig. 5) van een in het werk gestorte kokerliggerbrug, eveneens opgelegd op één enkele kolom per pijler. De kokerligger was daarbij gedacht als een doorgaande voorgespannen ligger. Het betonoppervlak aan onder- en zijkanten moest worden uitgevoerd in een bekisting, gemaakt van houten delen.

Van de drie bovengenoemde ontwerpen waren de brugdekken uitgevoerd gedacht met over de gehele lengte prismatische liggers. Een kolom fungeerde als pijler.

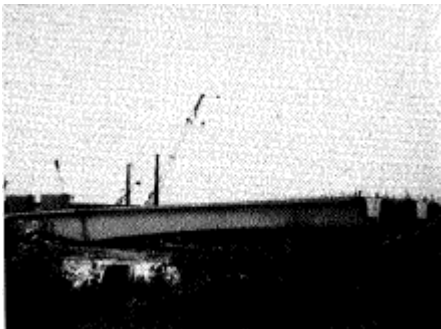
Ten slotte werd als contrast met de voorgaande drie ontwerpen van brugdekken gevormd uit prismatische liggers, een ontwerp (fig. 6) voorgelegd met parabolvormige geprefabriceerde liggers. Ter plaatse van de pijlers worden de liggers rechtstreeks ondersteund door vier kolommen, waarbij elke kolom twee liggers ondersteunt.

Om de veiligheid en de vrije doorvaart van de scheepvaart te garanderen worden tijdens het bouwen boven het kanaal hoge eisen gesteld aan de uitvoering. Bij beschouwing van ontwerp 3 bleek al snel dat dit ontwerp daardoor financieel-economisch gezien niet realiseerbaar zou zijn. De kosten van de ontwerpen 1 en 2 ontlieden elkaar weinig, omdat ze geen principiële verschillen vertoonden. Wel bleken de parabolvormige liggers van ontwerp 4 in aanschaf duurder dan de prismatische liggers, maar de constructiehoogte bleek in dit geval maatgevend te zijn.

Gezien de korte afstand tussen kanaal en Ringbaan Oost, waarin het hoogteverschil tussen bovenkant brug en niveau Ringbaan overbrugd moest worden, was het van veel belang de genoemde bovenkant zo laag mogelijk te houden. Ook bij het grondverzet voor de aansluitende aardebaan bleek het verkleinen van de constructiehoogte van wezenlijk belang. Na uitvoerige studies en prijsvergelijkingen werd besloten tot het uitwerken van ontwerp 4 (fig. 6).



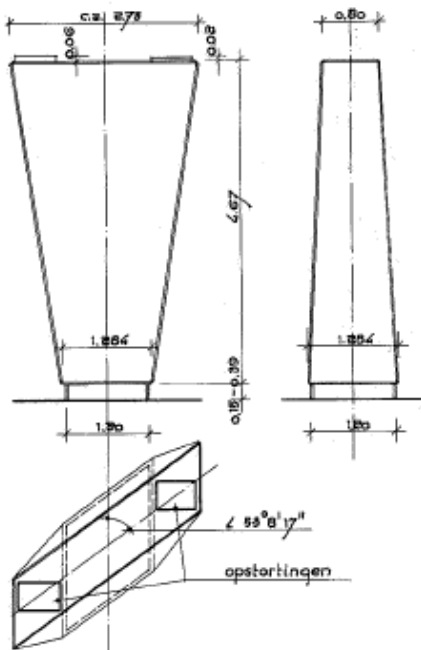
*De liggers zoals zij werden gefabriceerd en getransporteerd
The girders as they were fabricated and transported*



*Een uit twee elementen samengestelde ligger klaar voor montage
Girder, made of two elements, ready for assembling*

7

*Voor-, zij- en bovenaanzicht van een kolom
Front, side and top view of a column*



De fundering

Uit het ter plaatse verrichte grondonderzoek bleek de grondslag vanaf het maaiveld, dat in hoogte varieerde van 13,00 m + NAP tot 15,15 m + NAP, te bestaan uit een 0,5 à 1 m dikke laag teelaarde, met daaronder tot ca. 9 m + NAP afwisselend matig vaste zand- en leemlagen. Vanaf 9 m + NAP tot ca. 6 m + NAP werd een vast tot zeer vast zandpakket aangetroffen met conusweerstand tot 40 N/mm². Vervolgens werden veenhoudende zandlagen verkend waarbij een zeer sterke teruggang in gemeten conusweerstand optrad. Deze slappe lagen bevinden zich op 6 m + NAP tot 5 m + NAP. Ten slotte werd tot de verkende diepte van 1 m + NAP opnieuw een vast tot zeer vast zandpakket aangetroffen.

Volgens de geologische kaart van Nederland wordt tot een diepte van ca. 3 m + NAP het middenteras van de Maas aangetroffen met overwegend fijnkorrelig zand. Hieronder bevindt zich het hoogterras van Maas en Rijn met matig fijn zand en plaatselijk klei- of leemlagen. Voor de beide landhoofden werd als funderingsniveau een diepte van 8 m + NAP gekozen. In verband met de toekomstige verdieping van het Wilhelminakanaal en eventuele uitschuring van de bodem ter plaatse van de pijlers, werd besloten voor alle pijlers een funderingsniveau te kiezen van 3 m + NAP om te voorkomen dat onvoldoende gronddekking boven het inheinniveau van de palen gegarandeerd zou zijn. In totaal waren 168 palen nodig met een draagvermogen van 80 tf. Gekozen werd voor gladde geprefabriceerde voorgespannen betonpalen. Bij het ontwerpen van de fundering bleek de invloed van de horizontale belasting aanzienlijk te zijn. Daarvoor kunnen twee oorzaken worden genoemd.

A. De toegepaste liggers zijn doorgaand, alleen bij de landhoofden zijn dus voegen aanwezig. De totale lengte tussen de voegen bedraagt 146 m. De oplegblocken moeten temperatuurinvloeden opnemen die betrokken zijn op 73 m bruglengte. Bovendien worden de liggers in het werk voorgespannen, wat betekent dat ook rekening moet worden gehouden met elastische verkorting, krimp en kruip. Deze invloeden worden voor een deel opgevangen door flexibiliteit van de rubber oplegblocken.

Via de weerstand van de oplegblocken zijn de op de fundering overgebrachte krachten echter nog aanzienlijk. Grotere flexibiliteit van de oplegblocken in horizontale richting om daarmee de horizontale krachten te verkleinen werd niet wenselijk geacht.

B. De westelijke pijler bevindt zich langs de oever van het kanaal, waardoor de fundering ook op horizontale gronddruk berekend moet worden. Hetzelfde geldt ook voor de oostelijke pijler bij toekomstige verbredening van het kanaal.

De middenpijler bevindt zich thans aan de oostelijke oever van het kanaal en is berekend op horizontale gronddruk. Bij verbredening van het kanaal komt deze pijler in het midden van de waterweg. Als de grondbelasting wegvalt komt de dan beschikbare reserve ten goede aan de aanvaringsweerstand.

Uit het bovenstaande volgt dat voor de landhoofden op grote horizontale krachten gerekend moet worden in de richting van de brug en voor de pijlers in de richting van de brug en in de richting loodrecht op de pijleras. Bij de middenpijler speelt bovendien het aanvaringsgevaar een rol. Dit alles heeft er toe geleid dat de palen onder het landhoofd hoofdzakelijk schoor staan in de richting evenwijdig aan de as van de brug en bij de pijlers in twee loodrecht op elkaar staande richtingen.

De kolommen

Het brugdek wordt per pijler ondersteund door vier kolommen. De vorm van deze kolommen is zodanig gekozen dat voor de hoofdvorm met één kolomkist volstaan kon worden (fig. 7). Om het hoogteverschil van 24 cm tussen de kolommen aan de binnenzijde van de horizontale boog waarin de brug komt te liggen en die aan de buitenzijde van de boog te overbruggen, werden onder de kolommen sokkels gestort waarin dit verschil is verwerkt. Als bekistingmateriaal werd voorgeschreven betonplex van 22 mm dikte.

De liggers

De keuze van de liggers is reeds omschreven bij het ontwerp. Bij het nader uitwerken van het gekozen ontwerp moest met het volgende rekening worden gehouden:

- de brug ligt in een horizontale boog ($R = 1500 \text{ m}'$);
- de brug ligt in een verticale boog ($R = 4000 \text{ m}'$);
- scheve kruising van de weg met het kanaal (hoek ca. 53°);
- verkanting van de brug van 2%.

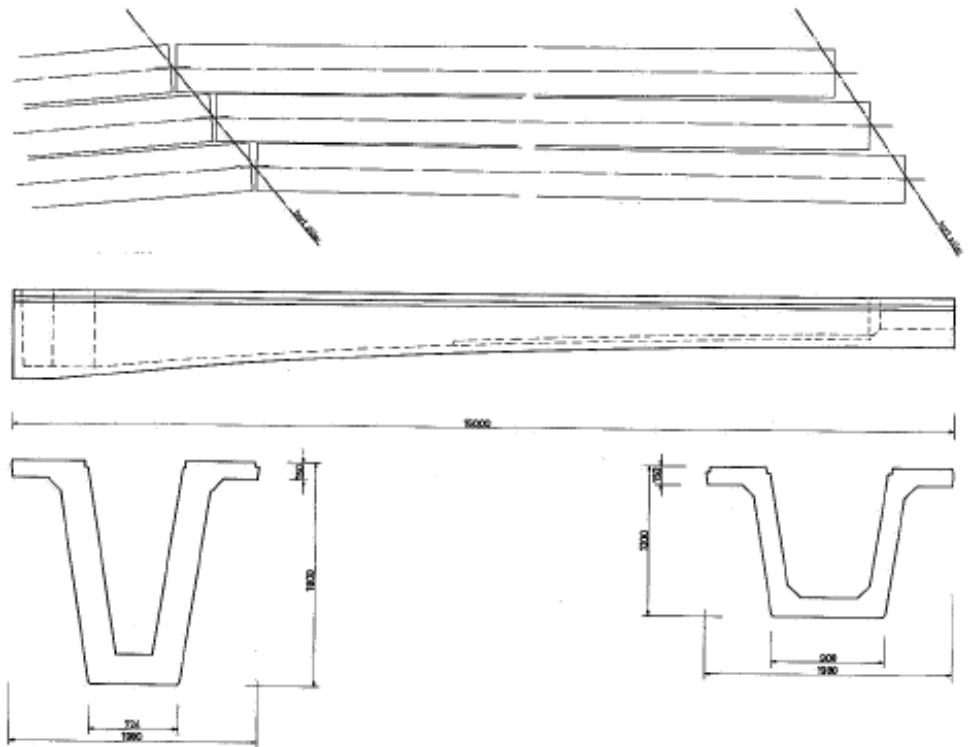
De punten b en d hebben gevolgen voor de verticale maatvoering en kunnen het beste bij de maatvoering van de kolommen in rekening worden gebracht.

Voor de liggers zijn de punten a en van belang. Deze punten hebben betrekking op de horizontale maatvoering. Daar de paraboolliggers doorgaande liggers zijn met een totale lengte van 146 meter, moet men bij de plaatsing van liggers hiermee rekening houden.

Daarbij komen de volgende problemen naar voren.

- Wanneer de pijlers en de landhoofden evenwijdig lopen aan de as van het kanaal zullen de lengten van de liggers per overspanning gelijk zijn, maar wordt de breedte van de brug steeds groter, dat wil zeggen ook de kolommen moeten verder uit elkaar staan, bovendien hebben de kolommen per pijler dan verschillende hoeken.
- Wanneer de as van de pijlers overal eenzelfde hoek maakt met de (gebogen) as van de weg, dan lopen de pijlers niet evenwijdig en bovendien vallen de snijpunten van deze assen van de pijlers en die van het kanaal niet samen.

Figuur 8



9

Zijaanzicht en twee doorsneden van een parabolisch liggerelement
Side view and two cross sections of a parabolic girder element

De pijlers zijn in dit geval gelijk, ook de kolommen hebben identieke vormen, alleen de liggers zijn per veld alle ongelijk van lengte.

Aangezien de liggers per veld uit twee elementen bestaan, zijn deze (geringe) lengteverschillen op te vangen in de in het werk te storten voegen. Daardoor werd deze laatste oplossing de meest aantrekkelijke.

- De hoekpunten van de horizontale knikken in de brug liggen op de assen van de pijlers. Deze vallen niet samen met de bissectrice van deze hoek, waardoor het onmogelijk was de liggers tegen elkaar te leggen (fig. 8). De ruimte tussen de liggers wordt voorzien van een als bekisting dienstdoend afdekplaatje voor het storten van de druklaag.

De liggers bestaan uit een trogvormig parabolisch element waarvan de hoofdafmetingen in figuur 9 zijn weergegeven. De liggers worden gekoppeld dooreen in het werk gestorte druklaag waardoor een achttal kokerliggers ontstaat (fig. 2). 1er plaatse van de pijlers en de landhoofden worden deze kokerliggers verbonden door een koppelbalk.

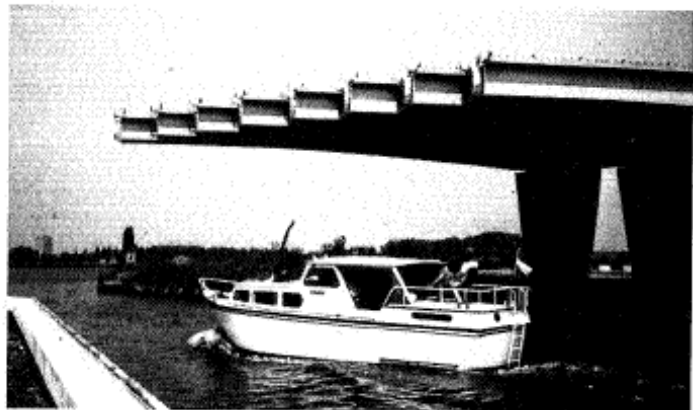
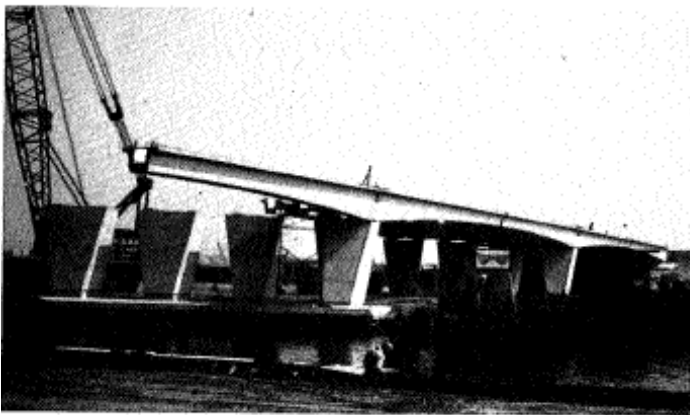
Om het brugdek dat een verkanting heeft van 2% overal even dik te maken, verspringt de bovenzijde van de opeenvolgende liggers zodanig dat de helling van het brugdek wordt gevolgd. Dit om ongelijke belasting van de liggers door eigen gewicht plus druklaag te voorkomen.

De randen van het brugdek worden gevormd door geprefabriceerde betonelementen, die de horizontale boog, waarin de brug ligt, geheel volgen. Verankering vindt plaats door uitstekende wapening, die in het trottoir wordt ingestort.

De eerste samengestelde ligger is op zijn steunpunt gelegd
The first composite girder has been fixed on his support

Het gedeelte van de brug boven het water is gereed
The part of the bridge above the water is completed

Opdrachtgever: Gemeente Tilburg
Architect/constructeur: Raadgevend Ingenieursbureau Aronsohn BV, Rotterdam
Hoofdaannemer: Smallegange BV, Aerdenhout
Aannemer prefabliggers: Liesbosch Beton BV, Utrecht



B. Fabricage en montage paraboolliggers

Inleiding

Om aan de vraag naar geprefabriceerde liggers voor zeer grote overspanningen te kunnen voldoen, is door Liesbosch Beton een balk ontworpen die - ondanks deze vereiste grote lengte - toch gemakkelijk getransporteerd kan worden.

De balkdoorsnede is trogvormig, zodat in combinatie met een in het werk te storten druklaag, een kokerprofiel ontstaat. In het transportstadium is de balk al zeer vormvast en wringstijf. Om het gewicht bij transport beperkt te houden, wordt de balk in halve lengten gefabriceerd. Op de bouwplaats worden de twee balkhelften op maaiveldhoogte, vlak naast de pijlers, aan elkaar gespannen tot één balk. Vervolgens wordt de balk zodanig opgetild en in het werk gemonteerd, dat het balkmidden op de pijler komt te rusten.

Het buigend moment van de balk is dus maximaal ter plaatse van het balkmidden, gelegen op de pijler. Daarom is de balkhoogte verlopend ontworpen; boven de pijler maximaal en aan de balkeinden minimaal. De kromming van deze verlopende hoogte volgt een tweede-graads parabool, reden waarom deze balk 'parabooligger' wordt genoemd.

Na montage van de paraboolliggers op de pijlers worden de voegen in het veldmidden aangestort. Door middel van continuïteitskabels wordt de langsvorspanning aangebracht en kan de druklaag gestort worden. Na voldoende verharding van deze druklaag wordt de langsvorspanning opgevoerd en kan de brug de nuttige last dragen.

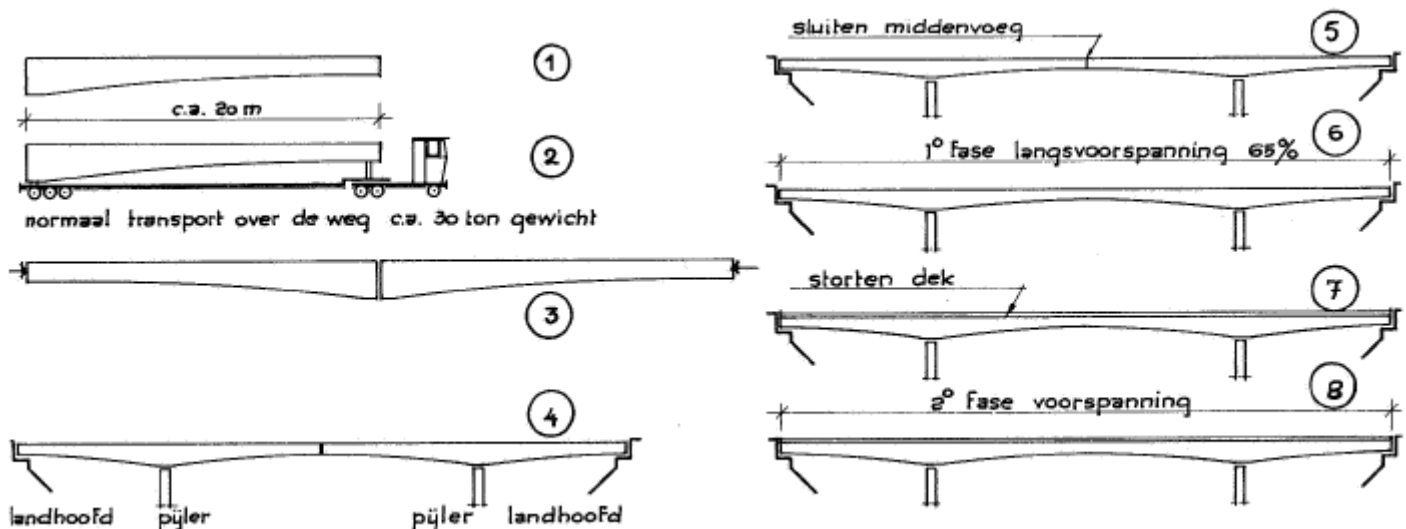
Schematisch zijn de volgende bouwfases te zien (fig. 1):

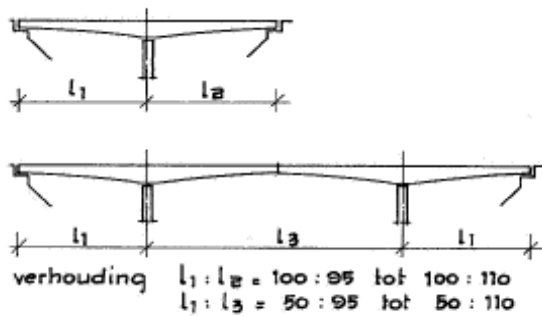
1. op de betonfabriek worden de halve paraboolliggers gefabriceerd;
2. transport van halve liggers naar het werk;
3. assembleren van twee halve paraboolliggers tot één vleugelbalk;
4. montage van de vleugelbalken op de pijlers;
5. sluiten van de middenvoegen;
6. aanbrengen van BBRV-kabels voor de langsvorspanning eerste fase;
7. storten van de druklaag;
8. aanbrengen tweede fase van de langsvorspanning.

Het toepassingsgebied

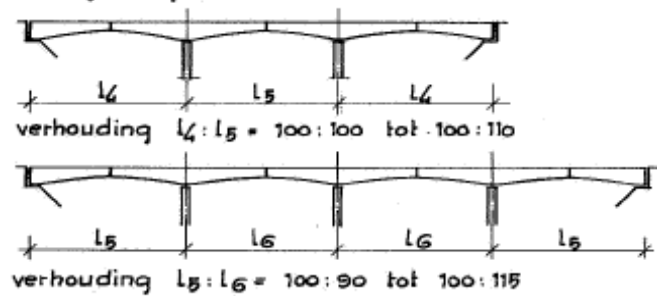
Omdat de paraboolliggers tot vleugelbalken geformeerd moeten worden, is het noodzakelijk dat in de brugoverspanning ten minste één pijler aanwezig is. Figuur 2 laat enkele mogelijke brugvormen zien.

1
 Produktie- en bouwfases
 Production and construction stages

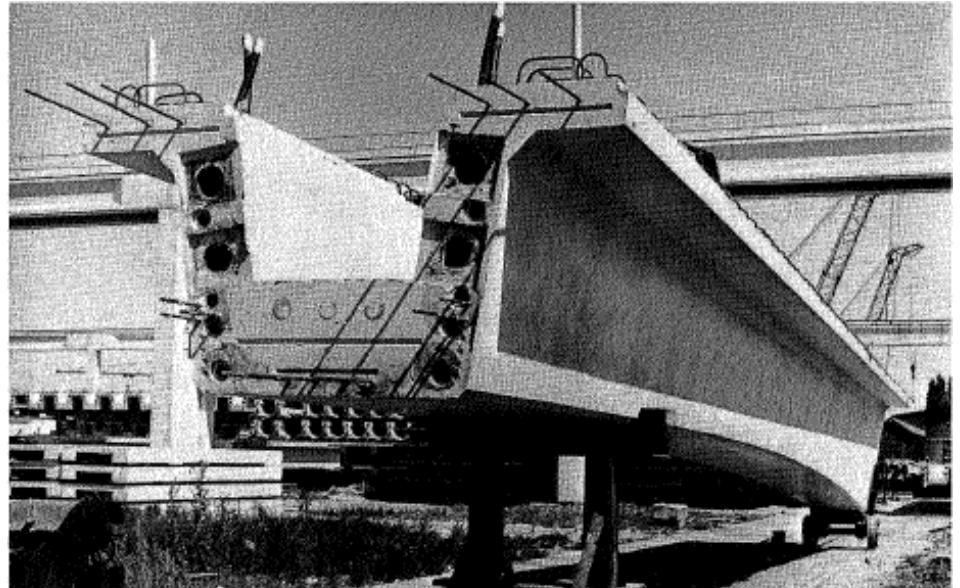




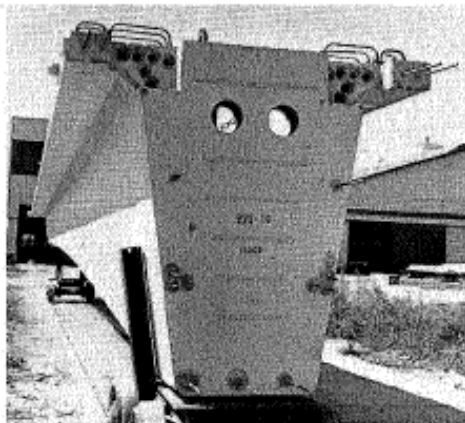
bij toepassing van grotere eindvelden:



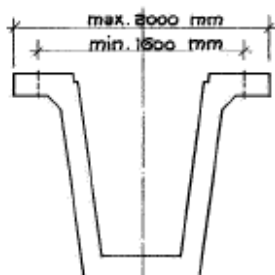
2
 Verschillende brugvormen
 Some possible bridge shapes



Paraboolligger van twee kanten gezien, alsmede de wapening in de mal
 Parabolic girder, with views on the girder ends, and also the reinforcement in the mould
 foto's: Ab Koers/Amsterdam



3
 Variabele breedtematen
 Variability In width



Een halve paraboolligger bezit een standaardlengte van 18 m. Van deze lengte is 16 m in parabolvorm, de resterende 2 m is prismatisch uitgevoerd. Hierdoor is het mogelijk de paraboolliggers in lengte te variëren. Het bereik strekt zich uit van minimaal 16 tot maximaal 21 m. De maximum overspanning wordt derhalve 42 m en de kortste 32 m voor een middenveld en 16 m voor een eindveld.

Dwarsdoorsnede

De normale breedte van een trogvormige ligger bedraagt ongeveer een halve rijbaanbreedte, ter grootte van 1,85 m. Als de trottoirs en de vangrailconstructies eveneens een breedte vergen van 1 ligger, dan omvat een brugdwarsdoorsnede een aantal liggers van 2 maal (het aantal rijstroken + vluchtstroken) + 2 liggers.

Voor drie rijstroken van 3,60 m + één vluchtstrook van 3 m, met de benodigde verfstripen of banen voor wegmarkering, wordt het aantal liggers: $2 \times (3 + 1) + 2 = 10$ liggers; de brugbreedte is dan 18,50 m.

Variatie in de breedte is binnen bepaalde grenzen zonder extra kosten mogelijk. De minimale maat bedraagt 1,60 m, de maximale maat 2,00 m. De variatie wordt gevonden in de bovenflenzen (fig. 3).

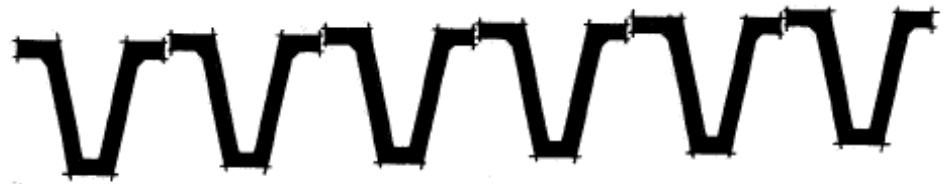
Constructiehoogte

De paraboollijger bezit een constructiehoogte boven de pijlers van 1,96 m, inclusief de druklaag. In het veldmidden is de hoogte 1,16 m, ook inclusief druklaag. Deze verhouding van constructiehoogte moet ongeveer 2 bedragen; bij een grotere verhouding worden de buigspanningen in het veld maatgevend, bij een kleinere verhouding dan 2 zijn de buigspanningen boven de pijlers maatgevend.

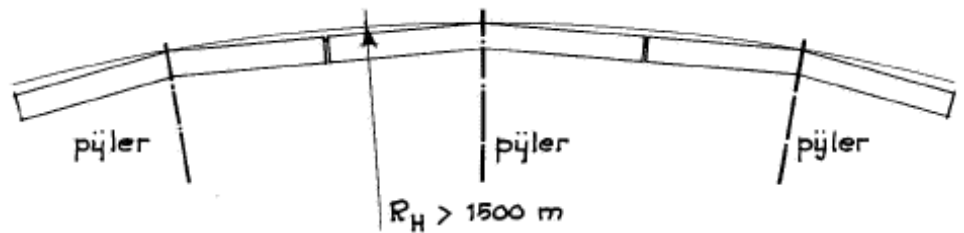
Bijzondere eisen

De verkanting in het wegprofiel kan in de brug worden doorgezet. De liggers worden echter waterpas op de oplegblokken gelegd, maar om de verkanting te realiseren worden de liggers telkens iets hoger gelegd (fig. 4).

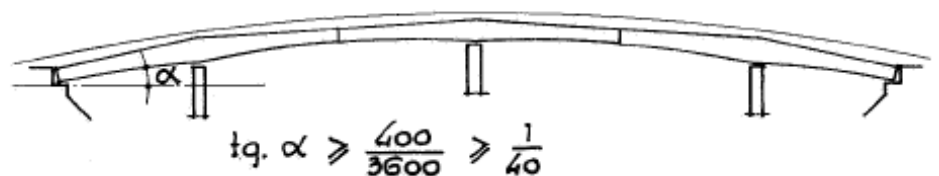
Figuur 4



Figuur 5



Figuur 6

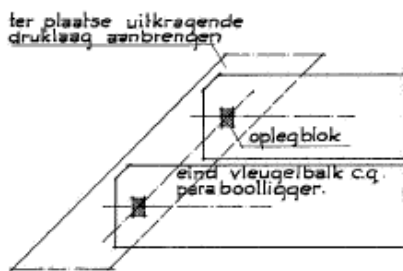


Als de brug in een bocht ligt is het mogelijk de elementen onder een hoek aan elkaar te spannen. De vleugelbalken verkrijgen dan een geknikte vorm, de minimale straal bedraagt 1500 m (fig. 5).

Bij een brug die in een verticale bocht ligt is het mogelijk de elementen onder een bepaalde hoek aan elkaar te spannen. De vleugelbalken verkrijgen dan een geknikte vorm (fig. 6).

Bij scheve kruisingen bestaat de mogelijkheid om toch smalle pijlers toe te passen. Boven de pijler namelijk is de balk tot één doorgaande vleugelbalk geformeerd, zodat een vrij gering oppervlak nodig is om de brug te dragen.

Ter plaatse van het landhoofd is de ligger haaks beëindigd. De ruimte tussen het haakse ligger-einde en het scheef weglopende landhoofd moet ter plaatse gebetonneerd worden (fig. 7). Deze constructiewijze is gekozen om de vrij grote langsvorspankrachten (volgend uit de continueitskabels) op de juiste wijze de ligger in te kunnen voeren.



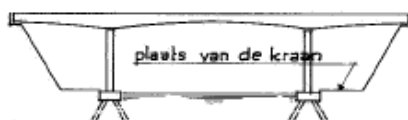
Figuur 7

Economische voordelen

Door de geringe constructiehoogte in het veldmidden van de paraboollijger, in vergelijking met een equivalente prismatische ligger, zijn de op- en afritten van de brug minder hoog. Het totale kostenpakket 'brug + zandlichaam' wordt bij een paraboollijgerbrug derhalve gunstiger.

- ∴ Het monteren van de brugliggers boven water kan geheel vanaf het land gedaan worden (fig. 8).
- ∴ Naar moeilijk bereikbare bouwplaatsen is het aanvoeren van halve liggers kostenbesparend.

Figuur 8



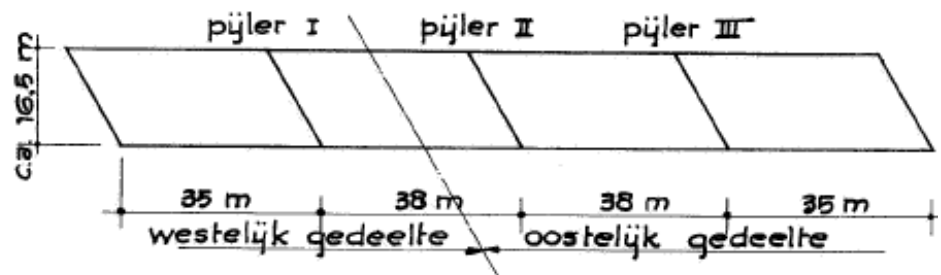
Montage van de brug te Tilburg

Voor de bouw van het prefab-gedeelte van de brug over het Wilhelminakanaal in Tilburg zijn 64 paraboolliggers geproduceerd. In de afgelopen maand augustus zijn deze liggers gemonteerd. Tevens werd de langsvorspanning aangebracht. Figuur 9 toont de plattegrond van de brug.

De paraboolliggers (foto 10), ter lengte van een halve overspanning, werden zonder moeite per as van Utrecht naar het bouwterrein vervoerd. Een 50-tons rupskraan plaatste de 30 ton wegenparaboolliggers direct van de trailer op de hulpjukken. Om de liggers nu gereed te kunnen maken om ze boven op de pijlers te leggen, werden telkens twee liggers in eikaars verlengde gelegd met de grootste hoogten tegen elkaar. De 200 mm brede tussenvoeg kon vervolgens gestort worden (foto 7). Na het verharden van de voeg werden de vier montagekabels BB 65 gespannen en ontstond een vleugelbalk (foto 12).

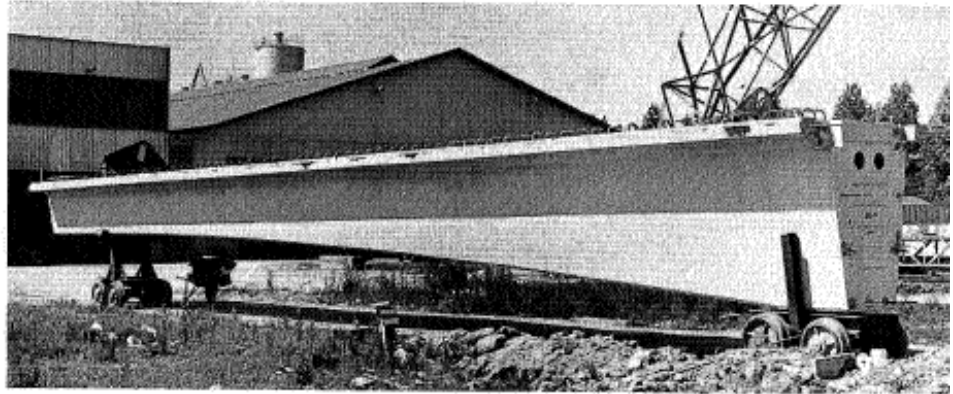
9

Plattegrond van de brug
Plan of the bridge



10

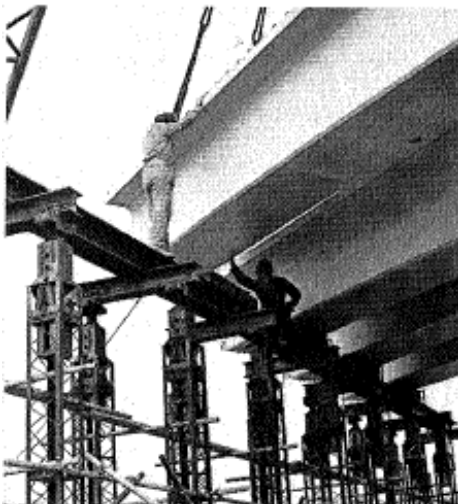
Paraboolligger op het fabrieksterrein
Parabolic girder leaving the factory
foto's: Ab Koers/Amsterdam



11-12

Na het storten van de tussenvoeg
ontstond een vleugelbalk

After concreting the joint between the
two parabolic girders, a cantilevering
beam is formed



13

Opleggen balken op de hulpsteiger
Placing the beams on the auxiliary pier

14

Plaatsen van de landhoofdliggers
Fixing the abutment beams





15
Plaatsen vleugelbalken op de eerste pijler
Fixing the cantilevering beams on the first pier

76
De middelste pijler is volgelegd
All the beams on the middle pier are placed

Tijdens het formeren van de paraboolliggers tot vleugelbalken werd de hulpsteiger gebouwd (foto 13), die in het eerste veld kwam te staan en wel iets uit het midden naar het landhoofd toe. Na het gereedkomen van deze hulpsteiger werden de Lasto-neopreen oplegblokken op het landhoofd geplaatst en gesteld. Nu konden de landhoofdiggers (foto 13) worden aangevoerd en direct van de trailer op hun definitieve plaats in het werk worden gesteld (foto 14). De Lasto-neopreen oplegblokken werden op de pijler I gelegd en gesteld. Daarna werden de vleugelbalken op de eerste pijler gelegd (foto 15). De in het veldmidden benodigde tijdelijke koppeling tussen deze vleugelbalk en de landhoofdigger werd vervolgens aangebracht. Hiervoor werden vier INP 80 balken op de flenzen van de trog vastgebout.

Uit figuur 9 kan worden opgemaakt dat de overspanning van veld I 3 meter korter is dan veld II. Hierdoor zijn de halve paraboolliggers dus ook ongelijk van lengte geworden. De vleugelbalk voor de eerste pijler verkreeg aan één zijde een balklengte van 19 m en aan de andere zijde 17,5 m. Om het monteren van deze vleugelbalk mogelijk te maken werd een contragewicht-ballastblok gemaakt, zodat het evenwicht werd hersteld en de vleugelbalk weer horizontaal in de hijskraan kwam te hangen.

Het stellen van de vleugelbalken vorderde gestadig tot op het moment dat pijler II (middelste pijler) was volgelegd (foto 16). Op dat moment werd de oostelijke oever verlaten en werd vanaf de westelijke oever de montage ongewijzigd voortgezet. Na het volleggen van de gehele brug konden de stortvoegen in de veldmiddens gevuld worden. Na verharden van deze voegen werden de continuïteitskabels ingevoerd en voor 65% gespannen. Per ligger waren acht BB 65 kabels nodig.

Over de voegen in de veldmiddens I en IV werd extra voorspankracht toegepast volgens het systeem Dywidag - Ø 26 QP 105. Zodra de voeg voldoende was verhard, werd deze extra voorspankracht aangebracht.

In de voeg bij de velden II en III was deze extra voorspankracht niet nodig; de aanwezige voorspankracht uit de continuïteitskabels was voldoende.

Na deze werkzaamheden bestond de brug uit 8 los naast elkaar liggende trogvormige paraboolliggers. Als dit nummer van *Cement* verschijnt, zijn de werkzaamheden tot zover als aangegeven gereed. Uitgevoerd moet nog worden het ter plaatse storten van het brugdek, waarna de resterende 35% langvoorspankracht aangespannen kan worden.

Horizontale kromming van de brug

De brug ligt in een bocht met een straal van 1500 m. Hierdoor ontstaat een pijl van ca. 850 mm per overspanning van 35 000 mm. De knikpunten zijn op de pijlers geprojecteerd. In het werk zijn deze knikpunten goed te zien. Door het voorspannen ontstaan géén vormveranderingen in deze knik, omdat de voorspanning symmetrisch om de verticale as loopt.

Verticale kromming van de brug

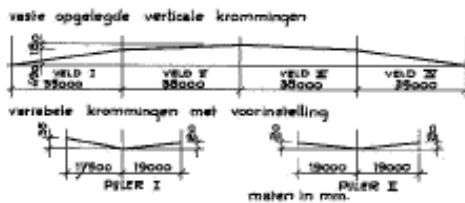
Deze kromming bestaat eigenlijk uit twee gestrekte hellingen. De eerste loopt van landhoofd naar pijler I en bedraagt 490 mm per 35000 mm (= overspanningslengte van veld I); de tweede loopt van pijler I naar pijler II en bedraagt 180 mm per 38000 mm (overspanningslengte veld II). Door de pijlers ongelijk van hoogte te bouwen kon deze kromming gerealiseerd worden.

Verticale verplaatsingen in het midden van de velden

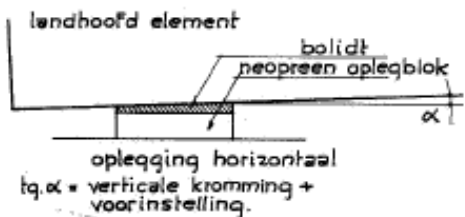
De verticale verplaatsingen in de veldmiddens worden veroorzaakt door krimp, kruip, voorspanning, verwijdering hulpsteunpunten, storten van de druklaag, aanbrengen asfaltlaag en brugranden, de nuttige belasting, temperatuurinvloeden, zakkingen van de definitieve steunpunten en het eigen gewicht van de constructie. Van al deze invloedsfactoren zijn de krimp en kruip en de relaxatie van de voorspanning bovendien nog tijd-afhankelijke.

Door de bouwdirectie is de eis gesteld dat de brug géén doorzakking mag vertonen bij 50% van de nuttige belasting, ongeacht de tijdsinvloeden. Daarom heeft een voorinstelling plaatsgevonden van resp. 35 mm extra omhoog voor het midden van veld I en 20 mm extra omhoog voor het midden van veld II (tabel 1).

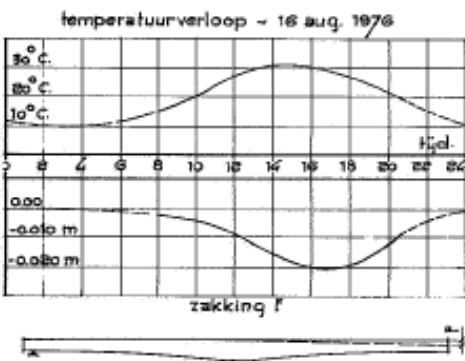
Tabel 1
Overzicht van de berekende vervormingen



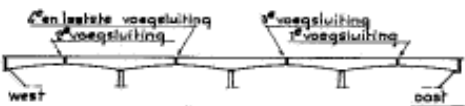
Figuur 17



Figuur 18



Figuur 19



Figuur 20

Slotopmerking

Het monteren van deze brug vraagt qua maatvoering een grote nauwkeurigheid. Het dode gewicht van de vleugelbalken (ca. 62 ton) vereist een zware kraan. Bovendien is een bouwterrein van enige omvang nodig rondom de pijlers. Boven water behoeft niet te worden gebouwd. Het resultaat is echter een brug met grote overspanning, die er esthetisch goed uitziet.

	het midden van veld I (maten in mm)	het midden van veld II (maten in mm)
+ betekent opbuiging van: — betekent doorbuiging van:		
te verwachten vervormingen in de tijd		
(oneindig) door:		
aanbrengen voorspanning in vleugelbalken	+ 22	+ 22
eigen gewicht vleugelbalken	-37	-37
continuïteitskabels eerste fase (65%)	+ 25,6	+ 14,9
verwijderen hulpsteigers	-20,2	+ 6,3
storten van de druklaag	- 16	-5,2
continuïteitskabels tweede fase (35%)	+ 5,8	+ 4,6
afwerklaag en brugranden	-5	-3,4
verkeersbelasting 100%	-19,5 +8,6	-20,1 + 9,7
temperatuurgadiënt 15 °C	- 3,8 + 3,8	- 7,2 + 7,2
temperatuurgadiënt 25 °C	- 6,3 + 6,3	-12 +12
kruipeffecten minimaal bij $\phi = 0,75$	+ 3,2	- 7,4
kruipeffecten maximaal bij $\phi = 1,5$	+ 5	- 11,6

Uit dit overzicht blijkt duidelijk dat de kruipeffecten in veld I een vergroting van de opbuiging veroorzaken, maar in veld II een vergroting van de doorbuiging.

De kruipfactor ϕ bedraagt 0,75. Er is ook nagerekend wat de invloed zou zijn van een $\phi = 1,5$. Voor veld I wordt gerekend met $\phi = 0,75$ en voor veld II met $\phi = 1,5$, omdat bij veld II een grotere ϕ een grotere doorbuiging veroorzaakt.

Voor de berekening van de grootte van de voorinstelling voor veld I wordt de volgende opstelling verkregen:

50% door nuttige belasting + F_{TC} + eigen gewicht + voorinstelling = nog geen doorzakking.

$$22 - 37 + 25,6 - 20,2 - 16 + 5,8 - 5 + \text{voorinstelling} > 0.$$

Voorinstelling bedraagt dus 35 mm omhoog.

Door de eerder genoemde kruipeffecten wordt de opbuiging nog vergroot met ten minste $\phi = 0,75 = 3,2$ mm omhoog. Aan de eis van de bouwdirectie is dus ruimschoots voldaan.

Een theoretische controle op de vervormingen in veld II laat zien:

$$-20,1 - 16 + 22 - 37 + 14,9 + 6,3 - 5,2 + 4,6 - 3,4 + \text{voorinstelling} > 0.$$

Voorinstelling bedraagt dus 7,8 mm omhoog.

Daar de eerder genoemde kruipeffecten de doorbuiging vergroten, wordt de voorinstelling van 7,8 mm vergroot met de grootste te verwachten doorbuiging bij $\phi = 1,5$ van 11,6 mm. Totaal dus $11,6 + 7,8 = 20$ mm omhoog. Omdat $\phi = 1,5$ niet optreedt, is de doorbuiging van 11,6 mm niet reëel en wordt ook hier volledig aan de eisen van de directie voldaan. Figuur 17 geeft een beeld van de vast opgelegde verticale krommingen en de variabele krommingen met voorinstelling.

Lasto-neopreen oplegblokken

De vaste hoekverdraaiingen werden door een kunsthars (Bolidt) opstort van tevoren aangebracht, zodat het grondvlak van de opleggingen horizontaal bleef (fig. 18).

De vervormingen door elastische verkorting en door krimp- en kruipverkortingen alsmede de lengteveranderingen door de temperatuurverschillen (van + 35 naar - 10 °C) worden geheel door het blok opgevangen.

Temperatuurinvloeden

Augustus van dit jaar was een mooie zomerse maand met weinig wind en veel zon. De afwezigheid van wind werkte voor de montage in gunstige zin, maar de zonnewarmte baarde ons veel zorgen.

Uit de grafiek van figuur 19 kan worden afgeleid dat de uitragende halve paraboolliggers aan het einde bij een luchttemperatuur van 31 °C 21 mm zakken. Om deze zakking te ontlopen is de laatste (en/of sluit)voeg aan het eind van de namiddag gestort. De mortel kon dus verharden bij een temperatuurgadiënt die praktisch nihil was. De drie andere voegen (Jig. 20) waren, onafhankelijk van de temperatuurgadiënt, al eerder aangebracht. De brug was in die situatie nog steeds statisch bepaald.

Montageduur

In vier weken werden de 64 halve paraboolliggers gemonteerd en gekoppeld tot acht naast elkaar liggende trogvormige liggers ter lengte van 146 m, lopend van landhoofd tot landhoofd. Nog eens vier weken zijn nodig voor het aanbrengen van de druklaag, waarop twee weken later de continuïteitskabels tot 100% worden aangespannen.