

EVOLUTIE VAN DE VERSCHIJNINGSVORM VAN VASTE BRUGGEN VANAF 1940

Dr. ing. A. Romeijn

Dit artikel geeft een beschrijving van de evolutie van verschillende typen stalen bruggen zoals vakwerkliggerbrug, boogbrug, tuibrug, plaatliggerbrug en kokerliggerbrug. Het artikel is een vervolg op het in jaargang 10 nr 4 (december 2002) gepubliceerd artikel [1] waarin het algemeen historisch beeld, de invloedsfactoren op de verschijningsvorm en de materiaalkeuze van met name stalen bruggen staan beschreven. Beide artikelen geven grotendeels een samenvatting van het afstudeerwerk van Niels Menken, juni 2002, TU-Delft [2].

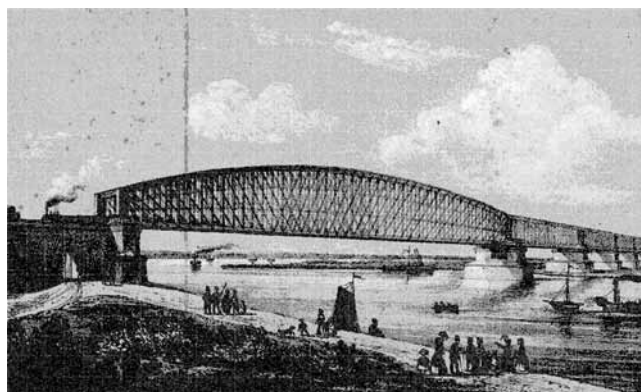
1. Algemeen chronologisch overzicht van brugtypen:

De Nederlandse bruggen in de periode 1940 tot heden laten een sterke ontwikkeling zien ten aanzien van de verschijningsvorm. De evolutie hiervan wordt aan de hand van de verschillende brugtypen die in Nederland voorkomen in dit artikel beschreven. Allereerst wordt schematisch in figuur 1 een chronologisch overzicht van de ontwikkeling van verkeersbruggen en in figuur 2 van spoorbruggen gegeven.

2. Vakwerkliggerbrug

In de evolutie van de verschijningsvorm van de vakwerkligger is de vereenvoudiging van het hoofddraagsysteem opvallend. De vakwerkliggers kunnen op verschillende manieren worden ingedeeld. Enerzijds kan worden gekeken naar het stavenpatroon, terwijl anderzijds onderscheid kan worden gemaakt naar de vorm van de onder- en bovenrand. Het stavenpatroon bestaat uit diagonalen met het onderscheid in "stijgende" en "vallende" diagonalen. In de beginperiode, omstreeks 1860, werd de verschijningsvorm van vakwerkbruggen gedomineerd door:

- Onvoldoende sterkte van de onder- en bovenrand van het vakwerk en maximaal haalbare overspanning van de langsliggers, die als geklonken I-liggers waren uitgevoerd, met als consequentie een onderlinge afstand van de verticalen kleiner dan 4 m.
- Beperkt inzicht ten aanzien van knik van gedrukte staven met als consequentie dat geen drukspanning in diagonalen werd toegelaten. Deze werden daarom altijd uitgevoerd als vallende diagonalen, die altijd op trek



Figuur 3. Spoorbrug over de Lek bij Kuilenburg (1868)

1940



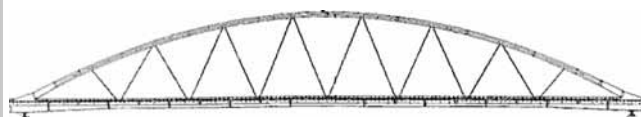
Boogbrug met trekband: $L < \text{ca. } 140\text{m}$.

1950



Plaatliggerbrug: $L < \text{ca. } 140\text{m}$.

1960



Verstijfde staafboog:
 $L < \text{ca. } 300\text{m}$.

Kokerligger: $L < \text{ca. } 100\text{ m}$.

1970



Tuibrug: $L < \text{ca. } 270\text{ m}$.

1980



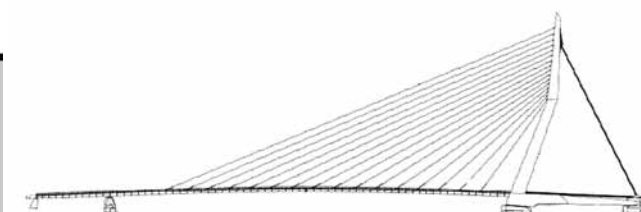
Kokerligger: $L < \text{ca. } 100\text{ m}$.

1990



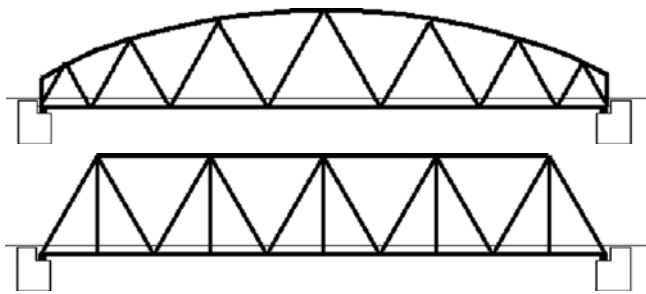
Tuibrug: $L < \text{ca. } 270\text{ m}$.

2000

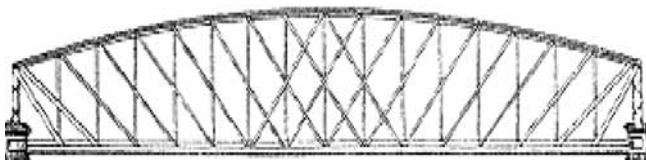


Tuibrug: $L < \text{ca. } 285\text{ m}$.

Figuur 1. Chronologisch overzicht ontwikkeling typen stalen verkeersbruggen.



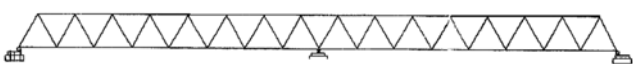
Figuur 4. Boven: Vakwerkligger: V-ligger systeem met gebogen bovenrand. Onder: Vakwerksysteem met evenwijdige randen en verticalen om kleinere overspanning van langsdragers te verkrijgen.



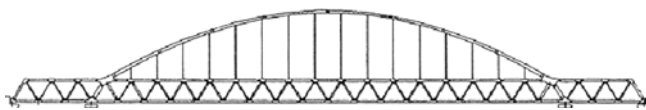
Meervoudig vakwerk



Enkelvoudig vakwerk



V-ligger vakwerk



Verstijfde staafboog met vakwerkligger als verstijvingsligger



Boogbrug met trekband



Verstijfde staafboog met vollewandligger als verstijvingsligger



Figuur 2. Chronologisch overzicht ontwikkeling typen stalenspoorbruggen.

werden belast. De verticalen werden wel op druk belast, maar hiervoor gold dat ze een veel kortere kniklengte hadden, omdat ze gesteund werden door de vele diagonalen die met de verticalen kruisten. In het midden van de overspanning zijn gekruiste diagonalen toegepast, omdat in deze diagonalen de kans bestond dat de vallende diagonalen toch op druk worden belast.

- Beperkt inzicht in de globale krachtwerving met als consequentie het gebruik van twee- en soms drievoudige vakwerksystemen.

Een sprekend voorbeeld als weergegeven in figuur 3 is de oude spoorwegbrug bij Kuilenburg.

Na 1945 is een afnemende belangstelling te constateren voor de toepassing van de vakwerkliggerbrug als verkeersbrug. Naast economische redenen, hoge kosten in verband met de vele verbindingen, spelen esthetische redenen een belangrijke rol hierin. De voorkeur gaat meer uit naar vollwandliggers omdat deze het landschap minder ontsieren.

Voor spoorbruggen wordt de vakwerkligger tot ongeveer 1980 nog veel toegepast. Gekeken naar het stavenpatroon (zie figuur 4) zien we steeds meer een vakwerksysteem waarbij de diagonalen ook op druk worden belast, zodat de verticalen en de gekruiste diagonalen komen te vervallen. Dit is het zogenaamde V-ligger systeem met enkel vallende en stijgende diagonalen. Door het ontbreken van de verticalen ontstaat een rustig beeld van de hoofdligger en zijn de fabricagekosten sterk gereduceerd.

De eerste bruggen waarbij het V-ligger systeem werd toegepast waren de nieuwe spoorbrug over het Hollands Diep bij Moerdijk uit 1955 (zie figuur 5) en de verkeersbrug over de Maas bij Gennepe, eveneens uit 1955. Doordat verticalen ontbraken gaf dit een grote dwarsdragerafstand, bij de Moerdijkbrug 13 m.

In de verkeersbrug over de Maas bij Gennepe zijn gelaste kokers in de boven- en onderrand toegepast. Bij de Moerdijk spoorbrug is overwogen om ook onderdelen met lassen samen te stellen. Hier heeft men echter van afgezien omdat uit proeven bleek dat ten gevolge van de door het lassen veroorzaakte ongelijkmatige spanningen, de platen eerder plooiden.

Een verdere vermindering van het aantal staven in de vakwerkliggerbrug is tevens bereikt met het weglaten van het boven(wind)verband.

1900

1940

1950

1960

1970

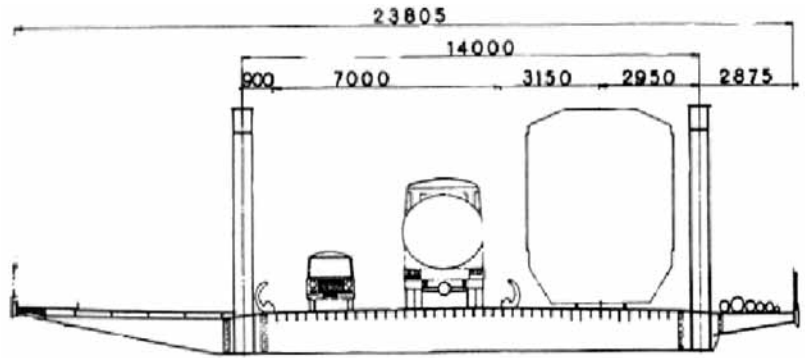
1980

1990

2000



Figuur 5. Spoorbrug over het Hollands Diep bij Moerdijk



Figuur 6. Doorsnede Dintelhavenspoorbrug: 1964



Figuur 7. Spoorbrug bij Oosterbeek, V-vormig vakwerkligger; buisprofielen met gegoten knooppunten; hooggelegen rijvloer uitgevoerd in beton



Een brug die op deze wijze is uitgevoerd is de Dintelhavenbrug uit 1964, die is ontworpen door Gemeentewerken Rotterdam. Het is een brug voor gemengd verkeer met twee middenoverspanningen van 58 meter en twee eindoverspanningen van 43 meter, doorgaand over vier velden. (figuur 6)

Het weglaten van het verband is mogelijk doordat de zijdelingse stabiliteit van de bovenrand wordt ontleend aan een stijve verbinding tussen de kokervormige onderrand en de dwarsdrager / rijvloer (zogenaamde U-vormige doorsnede).

De vakwerkliggers toegepast na 1945 betroffen bijna allemaal liggers met een laaggelegen rijvloer, zodat een minimale constructiehoogte werd verkregen. In afwijking hiervan zien we een recent voorbeeld van een vakwerkligger met een hooggelegen rijvloer, namelijk de aanbruggen van de spoorbrug bij Oosterbeek (2002). Gekeken naar de profielkeuze van de randstaven en de wandstaven (de diagonalen) worden steeds vaker buisprofielen toegepast. Een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerp is de vermoeiingssterkte voor de buisknooppunten. Dit omdat er een samenspel bestaat tussen:

- Spanningswisseling als gevolg van mobiele belasting.
- Spanningspieken ter plaatse van de buisverbinding als gevolg van de niet uniforme stijfheidsverdeling.
- Lasverbinding met bijkomstige nadelen als het gaat om de vermoeiingssterkte.

Met name in het buitenland zien we steeds vaker het gebruik van gegoten buisknooppunten in plaats van ge-

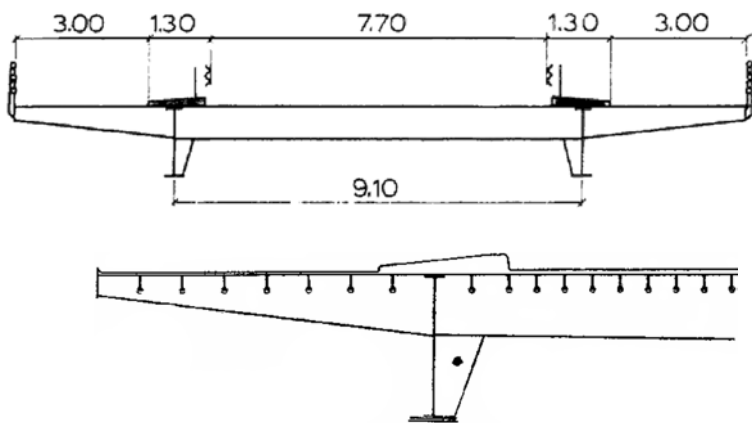
laste buisknooppunten. De redenen liggen zowel in het kostenvlak (zowel stichtingskosten als onderhoudskosten), esthetica als mede ontwerp-technische: de vermoeiingslevensduur. Een recente Nederlandse toepassing is gegeven in figuur 7.

3. Boogbrug

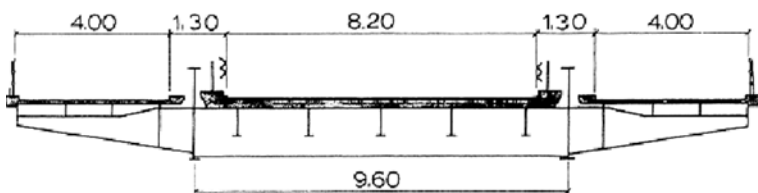
Stalen boogbruggen voor grote overspanningen (100 m en meer) voor spoor- en gewoon verkeer komen in Nederland voor sinds de jaren '30. De boogbrug is in deze jaren veelvuldig toegepast omdat voor het Rijkswegenplan in korte tijd veel bruggen met grote overspanning gereed moesten komen. Veel van de hoofdoverspanningen van deze overbruggingen waren te groot om met een vakwerkliggerbrug te overspannen en daarom werd gekozen voor boogbruggen. Na de oorlog komen andere brugtypen op, waardoor de boogbrug voor gewoon verkeer vanaf de jaren '70 terrein verliest aan bijv. de tuibrug. Voor spoorbruggen is de boogbrug juist een opkomend brugtype geworden. Enkele aspecten van de evolutie van boogbruggen na 1940 zijn:

- Overgang van geklonken naar gelaste verbindingen.
- Gebruik van kabels voor de hangers.
- Diagonale hangerplaatsing.
- Weglating boven(wind)verband en eindportaal.
- Toegenomen invloed architectuur op het ontwerp.

Door toepassing van de orthotrope rijvloer in boogbruggen werd een grote reductie in eigengewicht bereikt, waardoor overspanningen groter konden worden



Figuur 8. Doorsnede orthotrope rijvloer Schellingwoudebrug over het Buiten IJ.



Figuur 9. Doorsnede rijvloer brug over het Amsterdam-Rijnkanaal bij Zeeburg, met betonnen dek.

en bruggen slanker gedimensioneerd. De brug over het Buiten IJ bij Schellingwoude (1957) is in dit opzicht vernieuwend, omdat dit de eerste boogbrug is met een orthotrope rijvloer. Het eigengewicht van deze brug is hierdoor met ongeveer 50% afgenomen. De brug over het Amsterdam-Rijnkanaal te Zeeburg, met een overspanning van 89 meter, heeft een betonnen rijvloer en weegt 725 kg/m². De gelijktijdig gebouwde en nabijgelegen brug over het Buiten IJ bij Schellingwoude (105 m overspanning) heeft een orthotrope stalen rijvloer, met een bruggewicht van 400 kg/m². Het gewicht van de orthotrope rijvloer neemt in de loop der tijd verder af. De rijvloer van de brug over het Zwarte Water te Hasselt (105 m overspanning - 1972) weegt 310 kg/m².

Net als bij vakwerkliggerbruggen zien we bij boogbruggen ook steeds vaker dat het boven(wind)verband wordt weggelaten. Weglating van het verband heeft invloed op:

- **Kosten fabricage en montage**

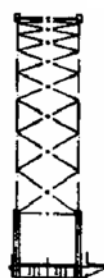
De kostprijs wordt in belangrijke mate bepaald door het aantal te monteren onderdelen. Ieder onderdeel moet worden bewerkt, opgeslagen, getransporteerd en gemonteerd, etc. met als consequentie hoge (loon)kosten.

- **Onderhoudskosten**

Behalve de besparing t.a.v. de kosten als gevolg van montage wordt met het weglaten van het boven(wind)verband het onderhoud ook sterk vereenvoudigd.

- **Esthetica**

Esthetica speelt in de overweging om het boven(wind)verband weg te laten eveneens een rol. Ook



veel verbindingen in boog en in bovenwindverband



weinig verbindingen in boog en in bovenwindverband

Figuur 10. (boven en onder) Schuine plaatsing van de bogen in de Dintelhavenspoorbrug (1998)

wordt het uitzicht van de weggebruiker over de weg met het wegvallen van het verband sterk verbeterd. Zo blijkt steeds vaker dat een boogbrug geschikt is om een bijzonder architectonisch ontwerp te realiseren.

In Nederland zijn verschillende boogbruggen op deze wijze gebouwd. De brug over het spoorwegemplacement nabij Beek in rijksweg A 75 (1969, overspanning ruim 117 m) en de brug over het spoorwegemplacement in Groningen (1964, overspanning circa 50 m) zijn hiervan een voorbeeld. Bij de brug over het spoorwegemplacement in Groningen (1964) zijn diagonale kabels voor de hangers gebruikt, waardoor de mogelijkheid om een momentstijve verbinding tussen de hangers en de hoofdlijger te maken is komen te vervallen. De boog is hier bij de geboorten ingeklemd. De boog moet hiervoor van zichzelf voldoende stijf zijn om de stabiliteit te kunnen leveren en dit vormt daarom ook een beperking van de overspanning. De brug over het spoorwegemplacement in Groningen heeft een overspanning van 50 meter. Weglating van het boven(wind)verband is alleen mogelijk bij bruggen met een beperkte overspanning. Om het bovenwindverband weg te kunnen laten in bruggen met een grotere overspanning dan ca. 100 m, past men vanaf de jaren '90 schuine plaatsing van de bogen of delen van de boog toe. De schuingeplaatse bogen (zie figuur 10) vormen een vormvaste driehoek waarmee de noodzaak van een boven(wind)verband (en eindportaal) komt te vervallen.

Ingegeven door ervaring opgedaan bij het gebruik



Figuur 11. Spoorbrug over het Schelde-Rijn kanaal (Kreekrak). Karakteristieken: verticale hangerconfiguratie; hangers uitgevoerd als samengesteld I-profiel; boven(wind)verband.



Figuur 12. Demka spoorbrug Amsterdam-Rijnkanaal Utrecht. Karakteristieken: diagonaal hangerconfiguratie; hangers uitgevoerd als buisprofiel; geen boven(wind)verband

van kabels bij de aanleg van de Grevelingendam en de Haringvlietdam in 1962-1963 ten behoeve van de Delta-werken, werd voor het plaatsen van de caissons gebruik gemaakt van een kabelbaan, voorzien van een hoge sterkte staal. We zien vanaf dat moment ook steeds vaker de toepassing van kabels uitgevoerd in hoge sterkte staal in plaats van profielen (samengesteld dan wel gewalst) uitgevoerd in constructiestaal. De eerste kabels die in Nederland werden toegepast voor de hangers bij boogbruggen (en de tuien bij tuibruggen) waren geslagen kabels. Dit type werd tot in de jaren '70 gebruikt. In later gebouwde boogbruggen, zoals de tweede Van Brienoordbrug en de Erasmusbrug, komen parallelle kabels voor. Met het gebruik van kabels is het aërodynamische verschijnsel van "flutter" verdwenen en "vortex" kritischer. Veel hangerconfiguraties zijn mogelijk. Voor Nederland zien we de toepassing van verticale en diagonale configuraties. Lange tijd zijn enkele verticale hangerconfiguraties toegepast. De eerste toepassing van diagonale hangerplaatsing is die bij de Van Brienoordbrug over de Nieuwe Maas te Rotterdam. De brug kwam in 1964 gereed en had toen de grootste overspanning in Nederland. Oorspronkelijk voorzag het ontwerp in verticale kabels, zoals bij de brug bij Schellingwoude en bij Gorinchem. Uit de overweging dat met diagonaal hangerconfiguratie een hogere brugstijfheid kon worden verkregen, zijn deze hier toegepast. Door de diagonale plaatsing wordt een samenwerking tussen de verstijvingsligger en de boog verkregen, zoals dat ook in een vakwerk plaatsvindt, wat in een hogere stijfheid resulteert.

4. Tuibrug

Als gevolg van verticale belasting draagt de tuibrug alleen verticale krachten over naar de fundering. Dit omdat de horizontale component van de kabelkracht door normaalkracht in de rijvloer wordt opgenomen en direct wordt kortgesloten. Om deze reden is dit voor de Nederlandse situatie een bruikbaar brugtype. De tuibrug vond in Nederland in de periode voor de oorlog geen toepassing. In het buitenland werden tuibruggen al in de 19^e eeuw gebouwd. De Franse ingenieur Navier (1785-1836) verdiepte zich omstreeks 1823 in het systeem en zag mogelijkheden om het in praktijk te brengen. Nadat er zich enige tijd later bij een aantal gebouwde bruggen

van dit type ernstige problemen hadden voorgedaan, publiceerde Navier hierover en stelde voor om voortaan hangbruggen in plaats van tuibruggen te bouwen. Dit standpunt van Navier had tot gevolg dat men zeer terughoudend werd in het toepassen van tuibruggen. Gekeken naar verkeersbruggen wordt met name vanaf ca. 1970 de tuibrug ten opzichte van de boogbrug als beter beoordeeld. De belangrijkste redenen hiervoor zijn:

- *De tuibrug is voordelig ten opzichte van de boogbrug omdat er aanzienlijk minder onderdelen hoeven te worden gemonteerd. In essentie is het verschil tussen de boogbrug en de tuibrug het systeem waarmee de hoofdligger wordt verstijfd. Bij de boogbrug wordt hier-voor de boog gebruikt, bestaande uit de bogen, de hangers en het boven(wind)verband. De tuibrug heeft hiervoor één of twee pylonen en de tui-kabels. Dit betekent een aanzienlijke vermindering van het aantal te monteren onderdelen. De pyloon kan in beton worden uitgevoerd en met een klimbekisting worden gebouwd, wat een verdere vereenvoudiging van fabricage en montage geeft.*
- *Tuibruggen worden gemonteerd volgens de methode van vrije uitbouw. Hierbij zijn geen hulpsteunpunten in de rivier nodig, wat bij de montage van boogbruggen vaak wel het geval is. De hinder voor de scheepvaart is hierdoor minimaal. Een ander voordeel van deze montagemethode is dat fabricage en montage goed op elkaar afgestemd kunnen worden, zodat een kortere bouwtijd mogelijk is. Er kan al met de montage worden begonnen als de eerste sectie gereed is, waarna vervolgens de montage en fabricage parallel verlopen.*
- *De tuibrug is een brugtype dat de architect interessante mogelijkheden biedt om een bijzonder ontwerp te maken. De pyloon en de tuiconfiguratie zijn elementen waar de architect in zijn ontwerp graag mee speelt.*

Voor tuibruggen is de ontwikkeling van de voorspan-techniek bij voorgespannen beton van groot belang geweest, omdat deze kabels in tuibruggen ook onder voorspanning moeten worden gebracht. De techniek van het spannen van de kabels, met gebruik van vijzels

en meetapparatuur, is door de voorspanttechniek sterk verbeterd. Daarnaast is de ontwikkeling van het gebruik van de computer een belangrijke factor geweest. Vanaf het begin van de jaren '70 is de computer een steeds meer gebruikt hulpmiddel bij de berekening van bruggen geworden. Ingewikkelde berekeningen van de vrij gecompliceerde constructie van de tuibrug konden hierdoor worden uitgevoerd. De berekening is gecompliceerd omdat de tuien, vanwege de rek die in de kabels optreedt, als verende steunpunten moeten worden beschouwd. Het aantal onbekenden in de berekening neemt hierdoor toe. Hierbij geldt dat hoe meer tuien worden toegepast, hoe ingewikkelder de berekening wordt. De eerst gebouwde tuibruggen waren mede om deze reden uitgevoerd met één tui per tuivlak. De Galecopperbrug is hiervan een goed voorbeeld. Na de bouw van deze brug is te zien dat het aantal tuien toeneemt. De brug bij Ewijk heeft twee tuien, de Willemsbrug een nog groter aantal en de Erasmusbrug kent een zeer groot aantal tuien. In verband met strengere stijfheidseisen gesteld aan een spoorbrug zien we de tuibrug hier niet toegepast. In het hiernavolgende wordt de evolutie van de tuibrug in Nederland beschreven aan de hand van enkele gebouwde tuibruggen.



Figuur 13. Aanzicht Harmsenbrug

Harmsenbrug te Rotterdam (1968)

De eerste tuibrug in Nederland is de Harmsenbrug in het Europoortgebied. Het vaste gedeelte van de brug is een afgetuide kokerligger, doorgaand over twee velden, met een zijoverspanning van 47 m en een hoofdoverspanning van 109 m.

Een tuibrug bleek voor deze overbrugging zeer geschikt. Het ontwerp van deze tuibrug, dat vanwege de asymmetrische vorm en tuivlak in het midden niet de meest eenvoudige is, is voortgekomen uit de lokale eisen. Het

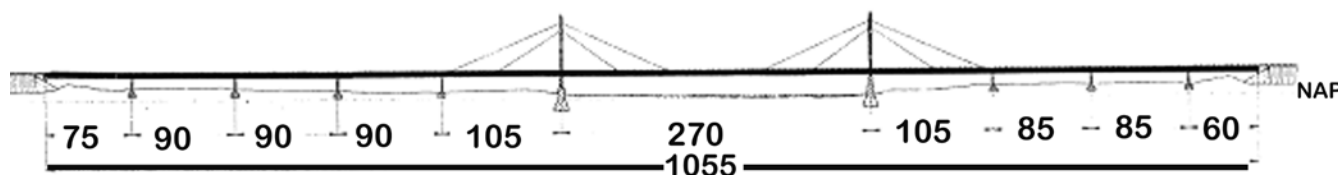


Figuur 14. Zijaanzicht Galecopperbrug
foto: Ciska Klooster

tuivlak is in het midden van de brug geplaatst omdat het, om aansluiting te kunnen maken met de aangrenzende verkeersweg, noodzakelijk was de 17 m brede brug te verbreden tot 27,4 m aan de noordzijde. Alleen bij een tuibrug met het tuivlak in het midden is het mogelijk het brugdek in breedte te laten variëren. Er bevindt zich een beweegbaar deel in de overbrugging. Voor de afvoer van de normaaldrukkracht in de rijvloer vormt dit een onderbreking, zodat aan de zijde van de basculebrug geen pyloon kan worden geplaatst. Om voldoende doorvaartwijdte voor de scheepvaart te behouden was het niet mogelijk de pyloon in het midden van de brug te plaatsen en moest worden gekozen voor een asymmetrische plaatsing van de pyloon. De pyloon is om esthetische redenen twintig meter verlengd.

Galecopperbrug (1971)

De Galecopperbrug is de eerste door Rijkswaterstaat gebouwde tuibrug. De Harmsenbrug was immers gelegen in Rotterdam en gebouwd door Gemeentewerken Rotterdam. De nieuwe tuibrug verving een oude boogbrug omdat de capaciteit van de autosnelweg moest worden verdubbeld. Om het verkeer gedurende de bouw van de nieuwe brug te kunnen laten doorrijden was het noodzakelijk twee afzonderlijke bruggen te bouwen, zodat de eerste brug het verkeer kon opvangen in de periode dat



Figuur 15. Zijaanzicht brug over de Waal bij Ewijk

de oude brug werd afgebroken en op die plaats de tweede brug werd gebouwd, die in 1975 gereed kwam.

De rijvloer is opgebouwd uit zes evenwijdige plaatliggers met daartussen een orthotrope stalen rijvloer. De kruisingshoek tussen de as van de brug en het kanaal bedraagt 51° , zodat minimale overspanningslengten van 70-180-70 m noodzakelijk waren. De keuze voor een tuibrug is in dit geval gemaakt omdat een lage constructiehoogte van maximaal 4 m werd gevraagd. Deze eis beperkte de keuze tot een brug met een boven het rijdek gelegen hoofddragconstructie. Vanuit esthetisch oogpunt is gekozen voor twee tuibruggen in plaats van twee scheve, ten opzichte van elkaar verschoven boogbruggen of vakwerkliggerbruggen.

Ook is om esthetische reden een tuiconfiguratie bestaande uit een enkele tui gekozen, waardoor het eveneens gemakkelijk was om ervaring op te doen met het ontwerpen en bouwen van tuibruggen. Het aantal statisch onbepaalden bleef hierdoor beperkt. Het ontwerp was al moeilijk omdat de brug een zeer schuine kruising van ongeveer 60° met het kanaal maakt.

Het ontwerp van de brug werd handmatig, weliswaar met behulp van de rekenmachine, doorgerekend, waarna ook berekeningen werden gemaakt door een computer in Duitsland op het 'Rechenstelle Rhein-Ruhr'. Het gebruikte rekenprogramma rekende tweedimensionaal, zodat op ingenieuze wijze een transformatie moest worden gemaakt naar de driedimensionale krachtwerving in de werkelijke constructie.

Brug over de Waal bij Ewijk (1975)

Deze tuibrug is, evenals de Galecopperbrug een symmetrische tuibrug met pylonen aan weerszijden van de overspanning en enkel tuivlak. Het aantal tuien is uitgebreid tot twee tuien per vlak.

Het gebruik van de computer voor de berekening van de brug heeft belangrijke invloed gehad op de verschijningsvorm van de brug. Berekening van de krachtwerving in de tuibrug (met twee tuien per tuivlak!) zou zonder gebruik van de computer praktisch onmogelijk

zijn geweest. Ook is hier veel aandacht besteed aan de inleiding van de tuikrachten in de koker, welke met een eindige elementen programma zijn berekend.

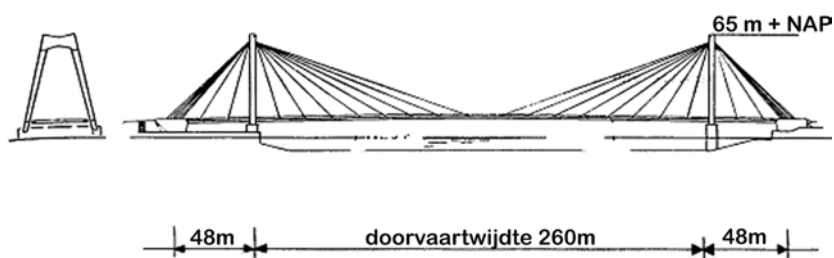
Willemsbrug (1980)

Voor de vervanging van de oude overbrugging over de Nieuwe Maas in Rotterdam zijn al vanaf 1920 in verschillende ronden plannen gemaakt. Een vergelijking van de plannen die in 1955 en die in 1975 werden gemaakt laten duidelijk de opkomst van de tuibrug zien. Bij de plannenronde in 1955 werden vier alternatieve ontwerpen voor stalen bruggen voorgesteld. Dit waren een plaatliggerbrug (zoals de brug bij Rhenen), een verstijfde staafboogbrug, een hangbrug met uitwendige verankering en een hangbrug met inwendige verankering. Aan een tuibrug werd in deze tijd nog niet gedacht. In 1975 werden bij de plannen voor de nieuwe brug zes alternatieven opgesteld, waarvan vijf tuibruggen en een boogbrug. Als unicum in de vaderlandse bruggen-historie werden de ontwerpen in de hal van het stadhuis tentoongesteld, waarbij het publiek zijn voorkeur door het invullen van een stembiljet kenbaar kon maken. De gekozen brug is een symmetrische tuibrug, waarbij de tuien parapluvormig vanaf de A-vormige pylonen lopen.

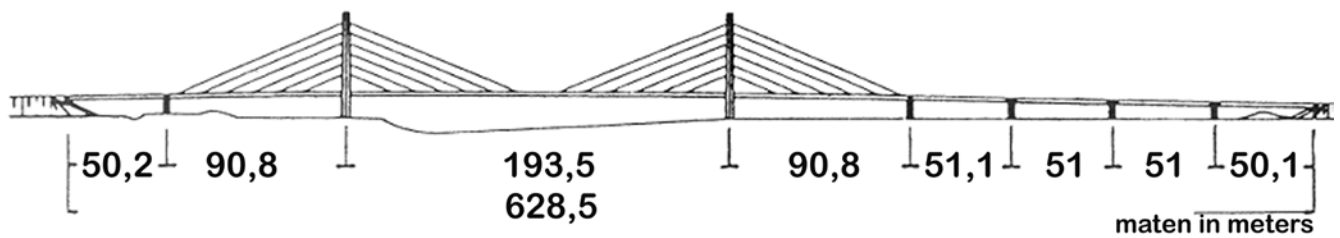
De brug is gelegen in een stedelijke omgeving, wat een belangrijke invloed heeft gehad op de verschijningsvorm, namelijk als tuibrug met een groot aantal tuien. Met de beperkte ruimte in het stadsgebied voor het oplossen van dit soort wegenplannen bestond een grote behoefte om de constructiehoogte zo laag mogelijk te maken. Dit leidde tot de keuze van de fijn verdeelde tuiconfiguratie met een groot aantal tuien, zodat de hoofdligger slapper kon worden uitgevoerd, en dus minder hoog hoefde te zijn. De constructiehoogte van de brug is met 1,50 m zeer laag te noemen.

Tweede brug o.d. IJssel bij Kampen (1983)

De ontwikkeling naar de toepassing van meer tuien om een lagere constructiehoogte mogelijk te maken is in deze brug waar te nemen. Het tuivlak is symmetrisch



Figuur 16. Doorsnede en aanzicht Willemsbrug Rotterdam Foto: Ciska Klooster



Figuur 17. Aanzicht brug over de IJssel bij Kampen

met pylonen aan weerszijden van de overspanning en een dubbel tuivlak, zes tuien per tuivlak. Dit is de eerste tuibrug in Nederland met een betonnen pyloon. Deze is met een klimbekisting gestort. Ten aanzien van de berekening van deze brug kan in zijn algemeenheid gesteld worden dat deze zeer veel omvattend was vanwege de hoge graad van statische onbepaaldheid. Met de beschikbare computerprogramma's vormde de berekening geen onoverkomelijke problemen.

Erasmusbrug (1996)

De brug toont twee belangrijke invloeden in de evolutie van de verschijningsvorm van stalen bruggen. Dit zijn de toegenomen rol van de architect en het gebruik van

de computer in het ontwerp, fabricage en montage van bruggen.

Rol architect

De verschijningsvorm van de Erasmusbrug geeft de ontwikkeling van de groeiende betrokkenheid van de architect in het ontwerp van bruggen zeer goed weer. Nog nooit is de naam van een architect zo aan ene brug verbonden geweest als bij de Erasmusbrug, die bij velen bekend staat als de 'brug van Van Berkel'.

Bij eerder gebouwde bruggen maakte de architect ook deel uit van het ontwerpteam, maar deze deed zijn werk pas nadat de brug door constructeurs al grotendeels was ontworpen. De taak van de architect was om het ontwerp nog eens vanuit esthetisch oogpunt te bekijken en de constructeur hierin van advies te dienen.

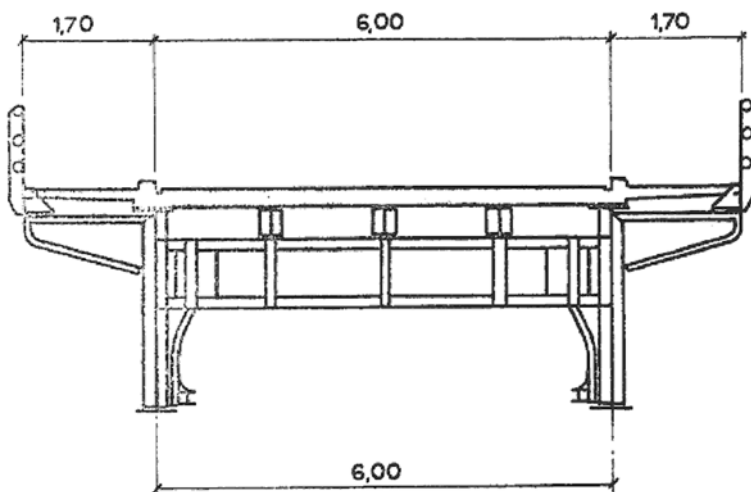


Figuur 18. Erasmusbrug Rotterdam Foto: Ciska Klooster

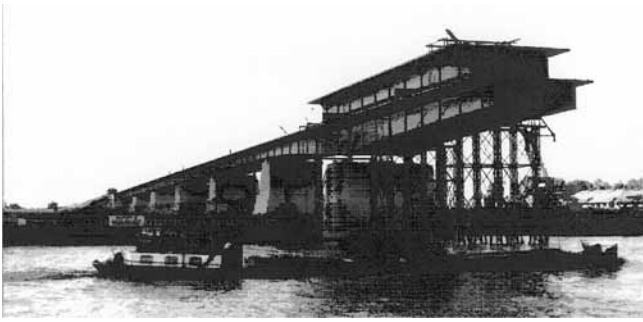
In het ontwerpproces van de Erasmusbrug is sprake geweest van een omgekeerde volgorde, waarbij eerst is gekeken wat vanuit architectonisch oogpunt wenselijk was, om hier vervolgens een constructieve oplossing voor te vinden. Dit blijkt duidelijk uit de verschijningsvorm van deze tuibrug, die enkele kenmerken heeft die constructief gezien zeer lastig zijn. De 'ideale' tuibrug bestaat voor de constructeur uit een rechtop staande pyloon met tuien aan beide zijden, zoals de eerder gebouwde Galecopperbrug, de brug bij Ewijk en de brug over de IJssel bij Kampen. Ben van Berkel heeft, als architect, de Erasmusbrug ontworpen met een naar achter hellende pyloon, verspreid in de pyloon aangrijpende tuien en een hoge achterligger, niet gesteund door tuien. Deze afwijkingen ten opzichte van een traditionele tuibrug hebben aanzienlijke gevolgen gehad voor de constructieve opzet en het materiaalgebruik. Intensief overleg tussen constructeurs en de architect, alsmede een grote creativiteit, heeft deze brug uiteindelijk mogelijk gemaakt.

Gebruik computer

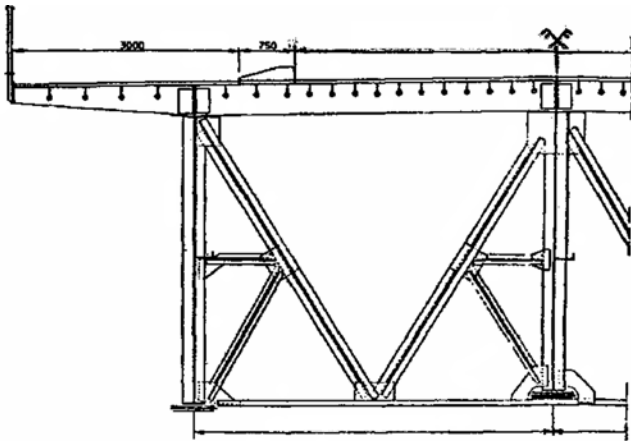
De invloed van het gebruik van de computer is in deze brug zeer groot, en niet alleen voor het maken van de berekeningen, maar ook van de tekeningen. Door de bijzondere vormgeving staat vrijwel niets haaks op elkaar en sluiten de meeste vlakken schuin op elkaar aan. Het was hierdoor niet mogelijk de vormgeving handmatig uit te werken tot constructieve tekeningen. Vanaf de start is een driedimensionaal tekenpakket gebruikt. Ook voor de fabricage van de pyloon heeft de aannemer een dergelijk tekenpakket gebruikt, waarmee direct de snijmachines in de constructiewerkplaats konden worden aangestuurd.



Figuur 19. Voorbeeld van gestapelde rijvloerconstructie (dwarsdrager - langsdrager - rijdek): Ramspolbrug over de Ramsegeul 1949



Figuur 20. Brug over de Rijn bij Rhenen in aanbouw



Figuur 21. Doorsnede brug over de Rijn bij Rhenen

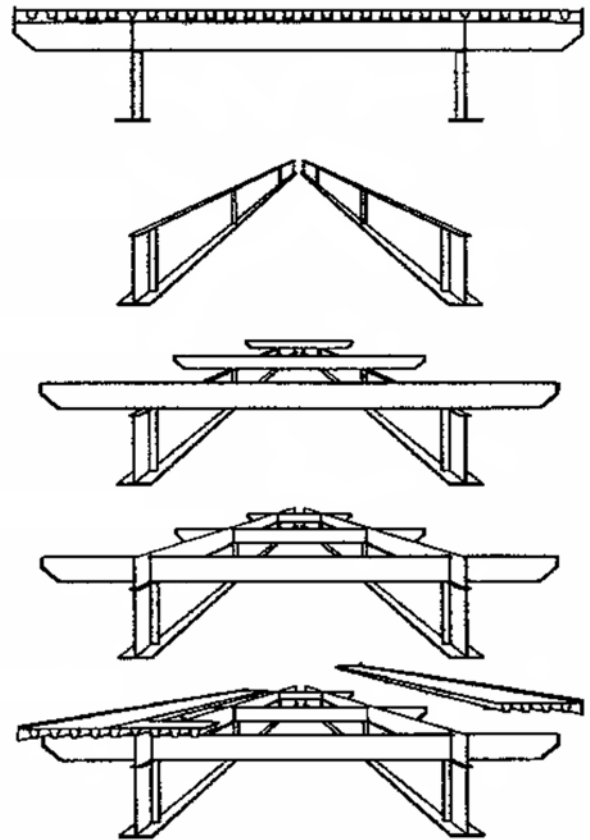
5. Plaatliggerbrug

Van alle brugtypen is de plaatliggerbrug de meest eenvoudige. De constructie bestaat uit twee of meer hoofdliggers (plaatliggers) en een rijvloerconstructie. Het aantal te monteren onderdelen is, in tegenstelling tot vakwerkliggerbruggen en boogbruggen, klein. De ongunstige eigenschap van de plaatliggerbrug was tot ca. 1955 de grote constructiehoogte (gestapelde rijvloerconstructie) van bruggen met een overspanning van meer dan ca. 40 m, wat er de reden voor was dat plaatliggerbruggen voor de oorlog niet konden worden toegepast voor grote overspanningen. Vanaf ca. 1955 neemt de overspanning van plaatliggerbruggen sterk toe door:

- De ontwikkeling van orthotrope rijvloer die tevens fungeert als bovenflens van de hoofdligger.
- De overgang naar serieproductie in de fabricage (standaardisatie) van plaatliggerbruggen.
- Ontwikkelingen in de lastechnologie.

In Nederland vormde de bouw van de brug over de Rijn bij Rhenen in 1957 de aanleiding voor toepassing van deze rijvloerconstructie in een plaatliggerbrug. De situatie bij deze brug was als volgt:

- De brug werd gebouwd over de oude pijlers van de in de oorlog vernielde spoorbrug. Een pijler in het midden van de rivier moest worden weggenomen omdat deze de scheepvaart te veel hinderde, zodat de verkeersbrug een hoofdoverspanning kreeg van 143 m.
- De oude pijlers van de spoorbrug waren smaller dan de nieuwe verkeersbrug van drie rijstroken (7 m) met



Figuur 22. Opbouw van de brug over het Schelde-Rijkanaal bij de Kreekrakdam

aan weerszijden fietspaden (2 x 3 m). Bij een boogbrug of vakwerkliggerbrug, opgelegd op de smalle steunpunten, zouden de bogen of de vakwerken een zeer hinderlijke positie op het wegdek innemen.

Deze omstandigheden zijn, samen met de invloedsfactoren die hieronder staan genoemd, bepalend geweest voor de keuze voor dit voor Nederland nieuwe brugtype.

De invloedsfactoren zijn:

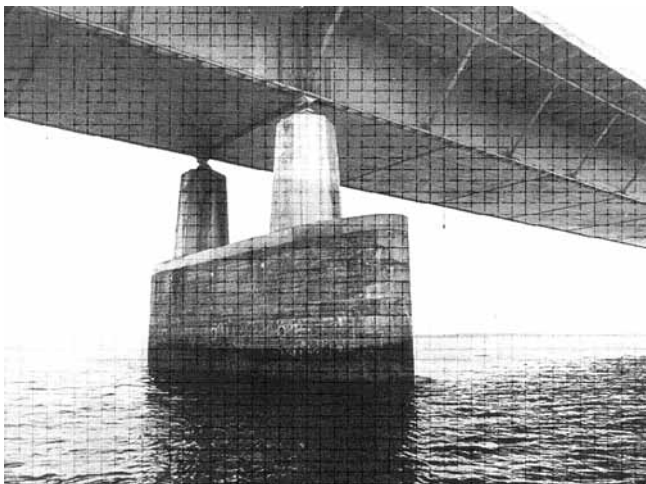
- Ten aanzien van het lassen zijn in de jaren na de oorlog grote vorderingen gemaakt.
- Verbeterde techniek van het snijden van stalen plaat d.m.v. autogeen snijden. Door het materiaal voor te warmen kon staalplaat worden gesneden met een snijbrander zonder dat een te grote hardheid van het materiaal aan de randen optrad.
- Vereenvoudigde berekeningsmethoden om de vierdegraads differentiaalvergelijking op te lossen, opgesteld door Pellikan en Esslinger in Duitsland.
- In Duitsland was dit brugtype al met succes toegepast.

Toepassing van een staalbeton rijvloerconstructie, waar in het begin van het ontwerp aan werd gedacht, was in dit geval niet mogelijk omdat dit een constructie met een te hoog eigengewicht zou opleveren, dat door de oude pijlers niet gedragen zou kunnen worden. Bovendien was de techniek van staalbeton nog niet ver genoeg gevorderd om een brug met een dergelijke overspanning te kunnen bouwen, zonder een extreem hoge constructiehoogte. In vergelijking met de oude constructie, met losse betonnen rijvloer, laat het volgende voorbeeld

goed zien wat de winst is die hiermee is behaald. Bij een vergelijkbare brug, bestaande uit hoofdliggers, dwarsdragers en langliggers met losse betonnen rijvloer, is van de toelaatbare spanning 1/3 benodigd voor het staalgewicht, 1/3 voor het betongewicht en 1/3 voor de mobiele belasting, bij overspanningen als die bij de brug bij Rhenen. Voor de brug met orthotrope rijvloer is dit 1/3 voor het eigen gewicht van de staalconstructie en 2/3 voor de mobiele belasting. De verhouding tussen de permanente spanningen uit eigen gewicht en de wisselende spanning t.g.v. mobiele belasting wordt hierdoor wel minder gunstig, waardoor het gevaar voor vermoeiing kan ontstaan. Ten tijde van de bouw van deze brug werd aangenomen dat bij verkeersbruggen de factor vermoeiing geen rol zou spelen. Na de introductie van de orthotrope rijvloer heeft de plaatliggerbrug zich ontwikkeld tot een 'standaard' brug, waarin veel gelijkvormige onderdelen voorkomen, vooral in de rijvloer. Deze ontwikkeling wordt aangeduid met de term standaardisatie en is o.a. voortgekomen uit de verdergaande normering op vele fronten, zowel in de bruggenbouw als daarbuiten. Enkele standaardmaten in de moderne plaatliggerbrug zijn:

- *Standaard h.o.h. afstand langsligger*
- *Standaard plaatbreedte dekplaat*

De standaardisering van deze maten vindt zijn oorsprong in standaardisatie van andere, industriële producten. Zo is de standaard h.o.h. afstand van de langliggers afgeleid van de bandenmaat voor vrachtauto's (standaard 25 cm breed) en de veel voorkomende tussenafstand van twee banden (ook 25 cm). Op deze maten is de as van een voertuig in de VOSB geschematiseerd. Ervan uitgaande dat de belasting zich spreidt onder een helling van 1:2, betekent dit bij een asfaldikte van 5 cm dat een breedte van 30 cm wordt belast. Hierom is de maat van 30 cm aangehouden voor de hart op hart plaatsing van de langliggers. De stalen dekplaat is opgebouwd uit platen met een breedte van 2,40 m omdat dit de grootste standaard plaatbreedte is waarin de walserijen leverden. Een grotere breedte is mogelijk, maar tegen hogere kosten, wat het niet aantrekkelijk maakte hiervoor te kiezen. Bovendien is 2,40 m een goed over de weg te



Figuur 23. Brug over het Haringvliet bij Numansdorp

vervoeren maat en is een veelvoud van de 30 cm h.o.h. langsliggerafstand.

Het grote voordeel van de stalen rijvloer was, behalve de lage constructiehoogte, het lage eigengewicht. Dit heeft het zeer lage staalverbruik voor deze brugconstructie mogelijk gemaakt van 375 kg/m². Het totale gewicht van de brug inclusief asfaltdek bedraagt 475 kg/m².

Door het lage gewicht en de werking van de rijvloer als bovenflens is het mogelijk geworden de hoofdoverspanning van 143 meter te realiseren met een constructiehoogte van 3,15 m in het midden van de overspanning en 5,85 m ter plaatse van de steunpunten, wat 1/45 resp. 1/25 van de overspanning van de brug is. Een voorbeeld van standaardisatie is de brug bij de Kreekrakdam over het Schelde-Rijnkanaal 1974.

6. Kokerliggerbrug

In de jaren zestig ontstond een beeld waarbij de kokerliggerbrug als een verbetering t.o.v. de plaatliggerbrug werd gezien. De belangrijkste drie redenen zijn :

- *Efficiënt materiaalgebruik van de kokervormige doorsnede. Doordat de koker torsiestijf is wordt de belasting beter verspreid, waardoor met minder materiaal kan worden volstaan.*
- *Besparing op onderhoudskosten. Doordat de binnenzijde van de koker gesloten is, blijft het materiaal aan deze zijde beschermd tegen atmosferische invloeden, zodat met een eenvoudige, of geen, conservering kan worden volstaan. Dit betekent een besparing van ca. 50 % op het totaal te conserveren oppervlak van de brug.*
- *Verbeterde fabricage/montage mogelijkheden. Hierbij valt te denken aan verbeterde lastechniek, standaardisering productieproceslijn, beschikbare hijs- en transportfaciliteiten, etc.*

In het hiernavolgende wordt de evolutie van de kokerliggerbrug in Nederland beschreven aan de hand van de gebouwde kokerliggerbruggen.

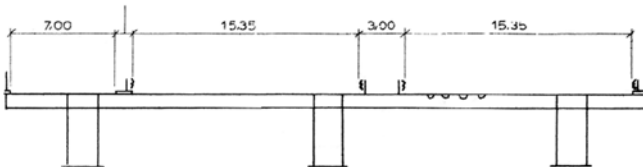
Brug over het Haringvliet bij Numansdorp (1965)

De eerste Nederlandse toepassing van de kokerliggerbrug was bij de brug over het Haringvliet bij Numansdorp uit 1965. De brug heeft een totale lengte van 1024 meter in 10 overspanningen van 106 m, een beweegbare brug van 65 m en nog een overspanning van 80 m.

Brug over het Amsterdam-Rijnkanaal bij Muiden (1971)

De brug maakt een schuine kruising met het Amsterdam Rijnkanaal en is opgebouwd uit drie kokervormige hoofdliggers, met daartussen een orthotrope rijvloer.

Met name het oplegsysteem van de kokervormige hoofdliggers maakte een snelle en betrouwbare berekening noodzakelijk. De kokerliggers zijn zodanig opgelegd dat het wringende moment in de koker wordt overgedragen naar de fundering. Dit oplegsysteem vraagt een nauwkeurige bepaling van de oplegkracht, die zowel uit wringing als uit een verticale oplegreactie bestaat. Een geringe afwijking van de positionering van één van de



Figuur 24. Doorsnede verkeersbrug over het Amsterdam-Rijnkanaal bij Muiden. Foto Ciska Klooster

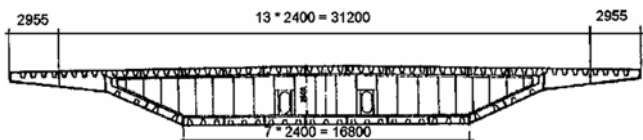
hoofdliggers in verticale richting heeft invloed op de krachtsverdeling over alle drie de hoofdliggers. Bij de montage moest daarom de positionering nauwkeurig worden gemeten, waarop de gevolgen van eventuele corrigerende maatregelen snel moesten worden doorgekeurd.

Brug over de Waal bij Ewijk (1975)

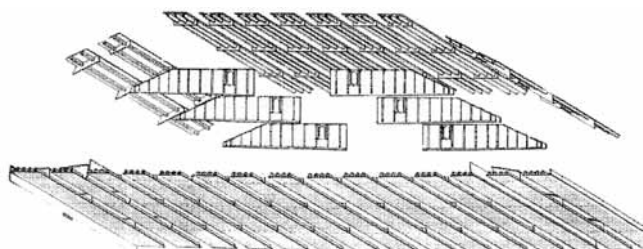
De brug over de Waal is een tuibrug met een kokerligger als hoofdligger. De koker heeft een doorsnede zoals is aangegeven in figuur 25.

De vormgeving van de koker van deze brug is bepaald door meerdere invloedsfactoren. Het feit dat in deze brug enkele belangrijke ontwikkelingen samenkomen maakt de brug voor de evolutie van de verschijningsvorm van stalen bruggen van groot belang. De ontwikkelingen zijn de volgende:

- *Berekening m.b.v. computer.*
- *Standaardisering.*
- *Fabricage en assemblage.*
- *Transportmiddelen en montagemiddelen.*



Figuur 25. Doorsnede koker van brug over de Waal bij Ewijk



Figuur 26. Opbouw van een sectie van de brug bij Ewijk

Berekening m.b.v. computer

De computer is als hulpmiddel ter berekening van de spanningen in de onderdelen van de kokervormige doorsnede van deze kokerligger te bepalen zeer belangrijk geweest. Hierbij is veel gebruik gemaakt van computerprogramma's, zoals een programma voor vlakke staafconstructies, een programma voor vlakke elementenberekening en een programma voor ruimtelijke elementenberekening. De berekeningswijze van dit laatste programma maakt gebruik van de elementenmethode, waarmee een nauwkeurig beeld van de spanningen ten gevolge van meerdere belastinggevallen kan worden verkregen. Vooral de snelheid waarmee de berekeningen konden worden uitgevoerd was belangrijk. Na de vele ongelukken die er hadden plaatsgevonden met de montage van kokerliggerbruggen in het buitenland heeft men bij de bouw van deze brug extra aandacht geschonken aan een goede samenwerking tussen ontwerpers en afdeling montage. Hierdoor was een rekenkundige begeleiding gedurende de gehele bouwtijd noodzakelijk.

Standaardisering

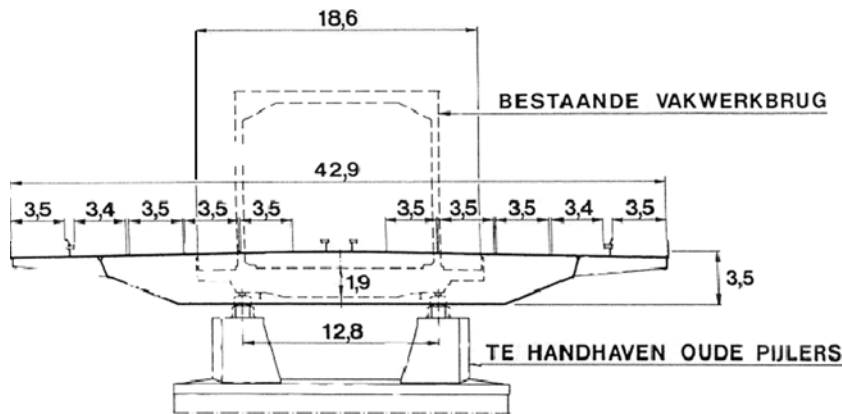
Voortgekomen uit de ontwikkeling die bij de plaatliggerbruggen waargenomen is, is deze brug opgebouwd uit standaardelementen, zoals in figuur 26 is aangegeven.

Als basiselement is gekozen voor een verstijfd paneel (orthotrope plaat) met een breedte van 2.40 m en een lengte van 15 m. Elk paneel wordt samengesteld uit een stalen plaat met een dikte variërend tussen de 10 en 25 mm, die in de lengterichting wordt verstijfd door 4, resp. 3 of 2 trogvormige opgelaste profielen. Voor de gehele brug, met een lengte van 1.500 m, bestaande uit 71 secties, zijn 1562 panelen vervaardigd in een voor de productie van de elementen ingerichte constructiewerkplaats.

Er is gekozen voor een zo groot mogelijk aantal gelijke elementen, zodat de kosten van lasmatten en andere met serieproductie gemoeide investeringen konden worden terugverdiend. Voor de assemblagemethode van de brug heeft deze 'bouwpakketsgwijze' opbouw een grote invloed gehad.

De keuze voor de bijzondere fabricage-, assemblage en montagemethode van deze brug is om de volgende redenen gemaakt:

- *Vanwege het vele laswerk dat in deze brug voorkwam was het economisch om hiervoor een speciale loods op de bouwlocatie te bouwen waar onder ideale omstandigheden kon worden gelast. Dit illustreert hoezeer het lassen het klinken heeft verdrongen.*
- *Om een concurrerende aanbidding te kunnen maken tegen een betonnen brug werd men genoodzaakt een nieuwe montagemethode te kiezen. Het traditionele proces, met de stappen van fabricage in de constructiewerkplaats – transport over water – montage op de bouwplaats, zou bij deze zeer lange overbrugging (ca. 1500 m) veel overlast voor de scheepvaart opleveren. Het transport van alle onderdelen, met grote afmetingen, van de constructiewerkplaats naar de bruglocatie zou het overige scheepvaartverkeer ernstig hinderen. Ook voor het bruggedeelte boven de uiterwaarden zou een ingewikkelde en dus kostbare montage plaats moeten vinden.*



Figuur 27. Plaatsing nieuwe brug op oude pijlers

Er is gekozen voor een bouwwijze die te vergelijken is met de wijze waarop de betonnen vrije-uitbouw bruggen worden gebouwd, namelijk door de assemblage van de brug plaats te laten vinden op de bouwlocatie, net zoals dat bij de betonnen bruggen gebeurt. Het idee hiervoor is afkomstig uit Schotland, waar in 1968 een stalen kokerliggerbrug over de Clyde, de Erskine brug, werd gebouwd volgens een ontwerp van ingenieursbureau Freeman, Fox & Partners. De assemblage van de brugsecties vond hier plaats op de opritten van de brug, in de open lucht. De Nederlandse ingenieurs van Rijkswaterstaat vertaalden dit idee naar een plan voor de bouw van de brug over de Waal bij Ewijk, waarbij nadrukkelijk aandacht werd geschonken aan een optimalisatie van het fabricageproces, waarin veel laswerk voorkwam. Om dit optimaal uit te voeren, met een minimum aan verliesuren en kwaliteitsverlies door slecht weer, heeft men een overdekte assemblagehal (120 m lang en 22 m breed) op de opritten van de brug gebouwd, waarin de assemblage van de brugsecties onder geconditioneerde omstandigheden plaatsvond. Deze bouwmethode, met assemblage in een fabriekshal op de bouwlocatie, was eveneens zeer goed in te passen in de methode van bouwen met gestandaardiseerde elementen van geringe afmeting. De panelen konden als halfproduct in de constructiewerkplaatsen worden gefabriceerd en over de weg naar de bouwlocatie worden vervoerd. Een verder optimalisatie van het uitvoeren van het laswerk werd behaald met de introductie van de kantelbare lasmal. Het meest geschikte lasproces om de panelen aan elkaar te verbinden was een stompe lasnaad die onder poederdek door een automatisch systeem kon worden gelegd. Omdat met dit systeem alleen onder de hand kan worden gelast en de stomplas tweezijdig moet worden gelegd, moest het werkstuk (de uit panelen opgebouwde plaat) gedraaid kunnen worden. Om dit gedaan te krijgen werden de panelen tijdens het kantelen aan een ondersteunend raamwerk gekoppeld. Hiermee was het principe van de kantelmal geboren. Wanneer een sectie gereed kwam, werd deze met behulp van rolwagens uit de loods gereden en op een transportwagen geplaatst, welke de sectie naar het bouwfront verplaatste. Hier aangekomen werd de sectie overgenomen op twee kantelwagens en op uitbouwliggers gereden, die de sectie t.o.v. van de vorige plaatst, waarna deze met lassen werd vastgezet. Met de assemblage en montage is begonnen op de zuidelijke

oprit, waarna de gehele fabriek is afgebroken en op de noordelijke oprit opnieuw opgebouwd.

Om inzicht te krijgen in het aërodynamische gedrag van de brug tijdens de montage en in definitieve toestand, is hiernaar onderzoek gedaan door het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium.

Moerdijkbrug (1976)

De overbrugging van het Hollands Diep bij Moerdijk vormt een van de belangrijkste landverbindingen in Nederland. Met de toename van het wegverkeer was dit een van de eerste bruggen waar de ontoereikende capaciteit van de oude, smalle bruggen zich openbaarde.

De oude brug, die overigens nog in goede staat verkeerde, werd daarom in 1976 vervangen door een nieuwe die ruim tweemaal zo breed was als de oude. Voor de vervanging van de oude brug zijn meerdere alternatieven bestudeerd. Hierbij speelde de mogelijkheid om de nieuwe brug op de pijlers van de oude te kunnen leggen een doorslaggevende rol. Dit gaf uiteraard een grote kostenbesparing.

De keuze viel op een kokerliggerbrug om de volgende redenen.

- **Torsiestijve doorsnede**

Omdat een kokervormige doorsnede torsiestijf is en daardoor de krachten in dwarsrichting goed spreidt, kunnen de steunpunten dicht bij elkaar worden geplaatst, zodat plaatsing op de bestaande pijlers mogelijk was.

- **Laag eigengewicht**

De nieuwe brug met een oppervlak van ruim tweemaal die van de oude en hierdoor een evenredig zwaardere verkeersbelasting, moest ten opzichte van de oude brug een lager eigen gewicht hebben om op de oude pijlers te kunnen worden opgelegd. De materiaaleconomische kokerligger voldeed aan deze eis.

- **Lage constructiehoogte**

De ligging van het rijdek van de kokerligger diende niet veel hoger te zijn dan die van de oude vakwerkliggerbrug, om de brug aan te kunnen sluiten op de weggedeelten achter de landhoofden. De kokerligger voldeed aan deze eis en kon worden gebouwd met een constructiehoogte van 3,50 m.

- **Seriematige fabricage**

Voor een lange brug als deze (meer dan 1000 m) was een groot kostenvoordeel te behalen door seriematige fabricage. Met de bouw van de brug bij Ewijk was hiermee ervaring opgedaan en hier werd bij de bouw van de nieuwe Moerdijkbruggen gebruik van gemaakt.

Referenties

- [1] NBS, jaargang 10, nummer 3 november 2002
- [2] C.T.L. Menken, Afstudeerwerk "Bruggen in Beweging: De evolutie van vaste stalen bruggen in Nederland 1940 – 2000". Juni 2002, TU-Delft.
- [3] Fotografisch materiaal beschikbaar gesteld door Ing. H.P. Herman van der Horst, Holland Railconsult, tenzij anders vermeld.