

J. BOON EN A. C. VAN RIEL

MODELONDERZOEK VAN DE NABLA-LIGGER

U.D.C. 624.012.46.001.57

Een beschrijving wordt gegeven van de vervaardiging en de wijze van beproeven van een model (schaal 1 : 15) van een kokervormige ligger met een driehoekige dwarsdoorsnede. Op de ligger werken, behalve het eigen gewicht, hoofdzakelijk geconcentreerde lasten. Ter illustratie worden enige resultaten vermeld.

De voorgespannen betonnen ligger is uit elementen samengesteld. Daar het gedrag van de constructie niet alleen in de elastische toestand maar ook in het gescheurde stadium en bij breuk diende te worden bestudeerd, moest een zgn. realistisch model worden vervaardigd, d.w.z. een model waarvan zowel de opbouw als de materiaaleigenschappen zoveel mogelijk gelijk waren aan die in de werkelijkheid.

0 Inleiding

In het kader van het zgn. Deltaplan wordt door de Directie Sluizen en Stuwen van de Rijkswaterstaat in de afsluitdam door het Haringvliet nabij Hellevoetsluis een uitlaatsluis gebouwd met een lengte van ca. 1.000 meter. De sluis bezit 17 openingen, zodat de pijlers zich op een onderlinge afstand van ongeveer 60 m bevinden. Elke opening wordt overspannen door een kokervormige voorgespannen betonnen ligger met een driehoekige dwarsdoorsnede. De openingen kunnen elk worden afgesloten door twee segmentvormige schuiven die elkaars reserve zijn (zie fig. 1). De beide schuiven zijn ieder door middel van 4 stalen „armen” met de ligger verbonden. De verbindingen van de armen met de schuiven zijn stijf en die met de ligger scharnierend uitgevoerd. Door middel van hydraulische installaties, aangebracht op de pijlers, kunnen de schuiven worden geheven.

Met het oog op de richting van de op te nemen krachten en om het effect van golfklappen te verminderen, is voor de betonnen ligger de driehoekige dwarsdoorsnede gekozen met de top naar beneden gericht. Deze vorm heeft aanleiding gegeven tot de naam Nabla-ligger. Bovendien kon door deze vorm de bovenzijde (de basis) van de ligger worden benut voor een verkeersweg.

De waterdruk op de beide schuiven veroorzaakt via de armen op de ligger geconcentreerde druk- of trekkrachten met werklijnen, die een hoek van ongeveer 30° met de horizontaal maken. Voorts dient rekening te worden gehouden met een hoofdzakelijk gelijkmatig verdeelde verticale belasting ten gevolge van het eigen gewicht en het verkeer. Het zal duidelijk zijn dat een groot

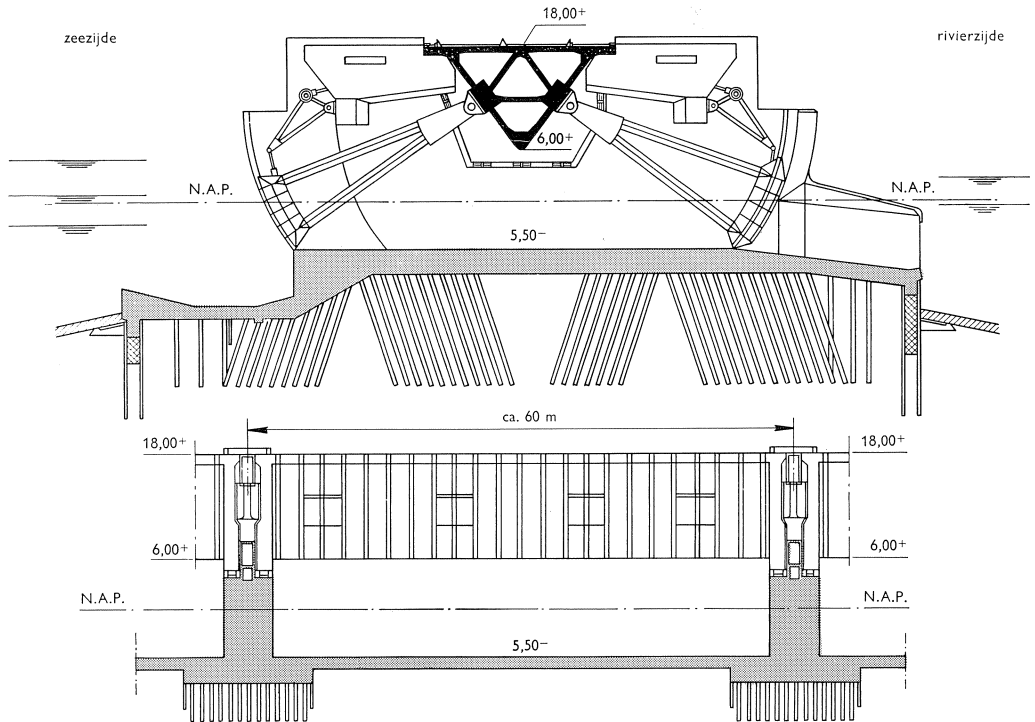


Fig. 1. Schematisch overzicht van één opening van de uitlaatsluis.

aantal belastingscombinaties mogelijk is. De eis werd gesteld, dat bij de ontwerpbelastingen geen enkele belastingscombinatie aanleiding zou geven tot trekspanningen in de ligger. Voorts zouden bij 1,3 maal deze ontwerpbelastingen in geen enkel geval trekspanningen groter dan 10 kgf/cm^2 mogen optreden. Bovendien zou de constructie in het ongunstigste belastingsgeval eerst mogen bezwijken bij 2,2 maal de ontwerpbelasting.

Uiteraard is het niet eenvoudig om de krachtsverdeling in een dergelijke ligger te bepalen. Toen tenslotte het ontwerp, na het doorlopen van verschillende stadia, zijn definitieve vorm en afmetingen had bereikt, gevoelde men dan ook de behoefte om met een model het gedrag van de ligger onder invloed van verschillende belastingscombinaties te verifiëren. Het vervaardigen en de wijze van beproeven van dit model zal in het volgende worden beschreven. Voorts zullen ter illustratie enkele resultaten worden vermeld.

1 Omschrijving van de ligger

Zoals fig. 1 toont bestaat de dwarsdoorsnede uit enkele driehoeken. De grootste breedte is 22,40 m en de hoogte 12 m. De dikte van de buitenwanden is 60 cm en die van de binnenwanden 50 cm. De ligger is opgebouwd uit 22

„moten” en twee eindschotten. Elke moot heeft een lengte van ongeveer 2 m en weegt 250 tf. Tussen de moten worden „voegen” gestort die een breedte hebben van 50 cm. Teneinde een goede weerstand tegen afschuiving van de moten ten opzichte van elkaar te verkrijgen zijn de vlakken van de moten, die met het voegenbeton in aanraking komen, van een profilering voorzien. Bovendien wordt de in de moten aangebrachte zachtstalen wapening (geprofileerd staal) in de voegen doorgezet.

De ligger wordt zowel in de lengte- als in de dwarsrichting voorgespannen. In de lengterichting worden 193 kabels, systeem B.B.R.V., aangebracht. Elke kabel bestaat uit 54 draden \varnothing 6 mm met een uiteindelijke voorspankracht van ongeveer 137 ton (QP 160). Er worden zowel kabels met een recht als met een parabolisch verloop toegepast. In dwarsrichting wordt de voorspanning aangebracht volgens het systeem FREYSSINET. Elke kabel bestaat uit 12 draden \varnothing 7 mm met een totale voorspankracht van ongeveer 43 ton (QP 150). In totaal worden in één ligger (exclusief de eindschotten) ongeveer 1.100 kabels in dwarsrichting aangebracht. De eindschotten worden elk met ongeveer 150 kabels (gedeeltelijk B.B.R.V. en gedeeltelijk FREYSSINET) voorgespannen. In de fig. 2 en 3 is een overzicht gegeven van de ligging van de voorspankabels.

De orde van grootte van de belangrijkste krachten, die op de ligger werken,

is:	druk zeezijde:	220 tf/m ¹
	trek zeezijde:	44 tf/m ¹
	druk rivierzijde:	30 tf/m ¹
	trek rivierzijde:	100 tf/m ¹

Het eigen gewicht van een ligger is ongeveer 125 tf/m¹ en de gelijkmatig verdeelde verkeersbelasting 1 tf/m². In fig. 4 zijn enkele belangrijke belastingscombinaties aangegeven.

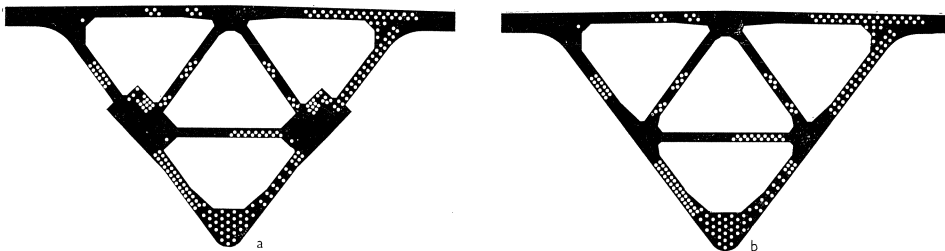


Fig. 2. Ligging van de voorspankabels in lengterichting.

- a. ter plaatse van de moten die, met het oog op de aangrijpende geconcentreerde lasten, van verzwaren zijn voorzien (scharniermoten);
- b. ter plaatse van de overige moten.

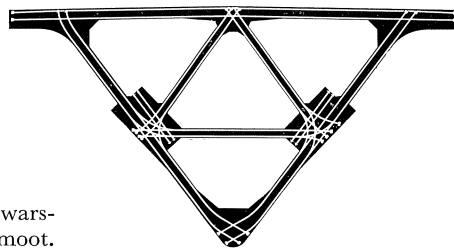


Fig. 3. Ligging van de voorspankabels in dwarsrichting ter plaatse van een scharnierzoot.

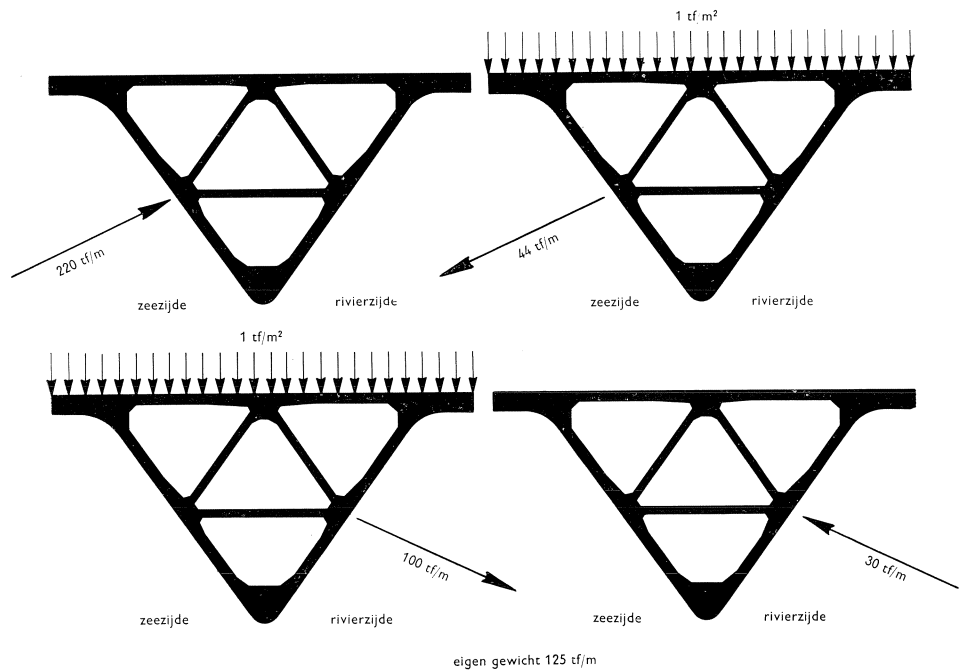


Fig. 4. Enkele belangrijke belastingscombinaties.

2 Modelregels en schaalfactor

Om het gedrag van een constructie onder invloed van een belasting te onderzoeken, kan men veelal gebruik maken van een model¹⁾. Indien dit gedrag niet alleen in de elastische toestand maar ook in het gescheurde stadium en bij breuk dient te worden geobserveerd, dan is het noodzakelijk gebruik te maken van een zgn. realistisch model, d.w.z. dat het model een geometrische verkleining moet zijn van de werkelijke constructie, terwijl bovendien de materiaaleigenschappen zo goed mogelijk gelijk dienen te zijn aan die in de werkelijkheid. Als aan deze voorwaarden is voldaan dan zullen bij betonconstructies verschijnselen als scheurvorming, vloeien van de wapening, breuk enz., in het model op overeenkomstige plaatsen en bij dezelfde spanningen optreden als in de werkelijkheid.

Wanneer het model een verkleining is van de werkelijkheid op een schaal $1 : \lambda$ dan gelden, bij spanningen die gelijk zijn aan die in de constructie op ware grootte, ten aanzien van de belangrijkste grootheden de volgende verhoudingen tussen model en werkelijkheid:

specifieke lengteveranderingen:	$1/\lambda$
krachten, momenten per eenheid van lengte:	$1/\lambda^2$
verplaatsingen, afstand en scheurwijdte:	$1/\lambda$

¹⁾ Zie IBC-mededelingen 3 (1955) no. 4.

Het eigen gewicht van het model is $1/\lambda^3$ maal dat van de werkelijke constructie. Uit de modelregels volgt, dat de spanningen ten gevolge van het eigen gewicht in het model eerst dan de juiste waarde zullen hebben als de totale belasting op het model $1/\lambda^2$ van het gewicht van de constructie op ware grootte is. Dit houdt in dat op het model nog een extra belasting aangebracht moet worden gelijk aan $(\lambda-1)$ maal het gewicht van het model. Enerzijds betekent het aanbrengen van deze belasting een complicatie, anderzijds wordt het hierdoor mogelijk om het gedrag van de constructie ten gevolge van het eigen gewicht te bestuderen.

De grootte van het model, dus de waarde van λ , wordt bepaald door twee overwegingen. Enerzijds mag het model niet te klein zijn om de vervaardiging nog goed mogelijk te maken, maar anderzijds mag het model niet te groot zijn met het oog op de grootte van de aan te brengen krachten. Aan deze twee voorwaarden bleek voor het onderhavige model op redelijke wijze te worden voldaan voor een waarde van $\lambda = 15$.

3 Vervaardiging van het model

Teneinde een vlotte productie van de moten te bevorderen werden 11 bekistingen vervaardigd. Elke bekisting werd dus twee maal gebruikt. Als bekistingmateriaal werd betonmultiplex toegepast met een dikte van 2 cm. Voor een dwarsdoorsnede over de bekisting van één der buitenwanden wordt verwezen naar fig. 5. Om een goede maatvoering te verkrijgen werd op een 2 cm

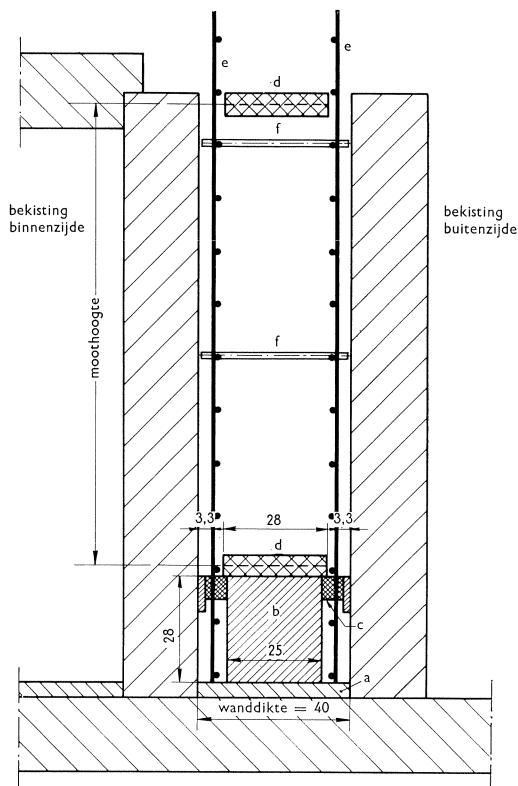


Fig. 5. Dwarsdoorsnede over de bekisting van een buitenwand (maten in mm).

- 4 mm dik multiplex in de vorm van de dwarsdoorsnede van de ligger;
- een klos voor het verkrijgen van voldoende lengte voor de stekeinden van de zachtstalen wapening;
- rubber afdichtingsstrippen;
- perspex, voorzien van profilering om de gewenste profielvorm ter plaatse van de aansluiting met de voeg te verkrijgen;
- zachtstalen wapening;
- afstandhouders van de zachtstalen wapening.

dikke bodemplaat een mal gespijkerd, die de vorm had van de dwarsdoorsnede van de ligger en waartegen de bekisting aansloot (zie fig. 6). De „aansluiting” van de buitenbekisting werd verkregen door klossen op de bodemplaat te bevestigen. De binnenbekisting werd ter plaatse van de bodemplaat tegen de mal gedrukt door het aanbrengen van een passend stuk betontriplex. Aan de bovenzijde werd de bekisting gevat in een sponning van een „deksel”, dat met behulp van bouten aan de bodemplaat was bevestigd.

De sparingen in het beton voor het doorvoeren van de voorspankabels werden zowel in de lengte- als in de dwarsrichting gevormd door het instorten van plastic slangen die elk ter verkrijging van de nodige buigingsstijfheid waren voorzien van een kern van staaldraad. In fig. 7 is te zien op welke wijze de plaats van de sparingen voor de langskabels, die over een moothoogte recht zijn, werd vastgelegd nl. ter plaatse van de bodemplaat door gaatjes in het geprofileerde perspex en op ca. 35 cm daarboven door een stalen mal. De plaats voor de sparingen van de kabels in de dwarsrichting werd gefixeerd door gepuntlaste afstandhoudertjes, welke in gaatjes in het perspex werden geplaatst (zie fig. 8). In fig. 9 is een overzicht gegeven van één der eindschotten waarin zowel de zachtstalen wapening als de in te storten hulpmiddelen voor het sparen van kanalen voor de langs- en de dwarskabels zijn aangebracht.

Het aardvochtige beton had de volgende samenstelling:

- 1 gewichtsdeel hoogovencement klasse A (winterkwaliteit)
- 4 gewichtsdelen toeslagmateriaal ($F_m = 2,9$)
- 0,46 gewichtsdelen water

De gemiddelde kubussterkte na 28 dagen, bepaald aan kuben met een riblengte van 7 cm, bedroeg 439 kgf/cm^2 (gewenste sterkte na 28 dagen 400 à 500 kgf/cm^2). Op het moment van de beproeving (ouderdom beton 100 – 200 dagen) was de kubussterkte gemiddeld 502 kgf/cm^2 . De buigtreksterkte bedroeg toen 59 kgf/cm^2 en de elasticiteitsmodulus ongeveer 350.000 kgf/cm^2 .

■ Het verdichten van het beton vond plaats met behulp van een trilnaald welke onder tegen de bodemplaat was bevestigd. Na 2 dagen werden de elementen ontkist en de stalen kernen met de plastic slangen verwijderd. In fig. 10 zijn enige vervaardigde moten afgebeeld, terwijl fig. 11 een aanzicht geeft van één der eindschotten, gezien vanaf het midden van de ligger. Ter vergelijking zijn tevens overeenkomstige foto's van de werkelijkheid opgenomen (zie fig. 12 en 13).

Nadat in de moten in dwarsrichting een zgn. montagevoorspanning (in de werkelijkheid nodig voor het opstellen van de moten) was aangebracht werden de voegen tussen de moten gestort. Het op de bouwplaats toe te passen procedé, nl. het achter elkaar opstellen van alle moten en het vrijwel gelijktijdig storten van de voegen, was bij het model, in verband met het onbereikbaar zijn van de voegen in de binnendriehoek, niet mogelijk. Om deze

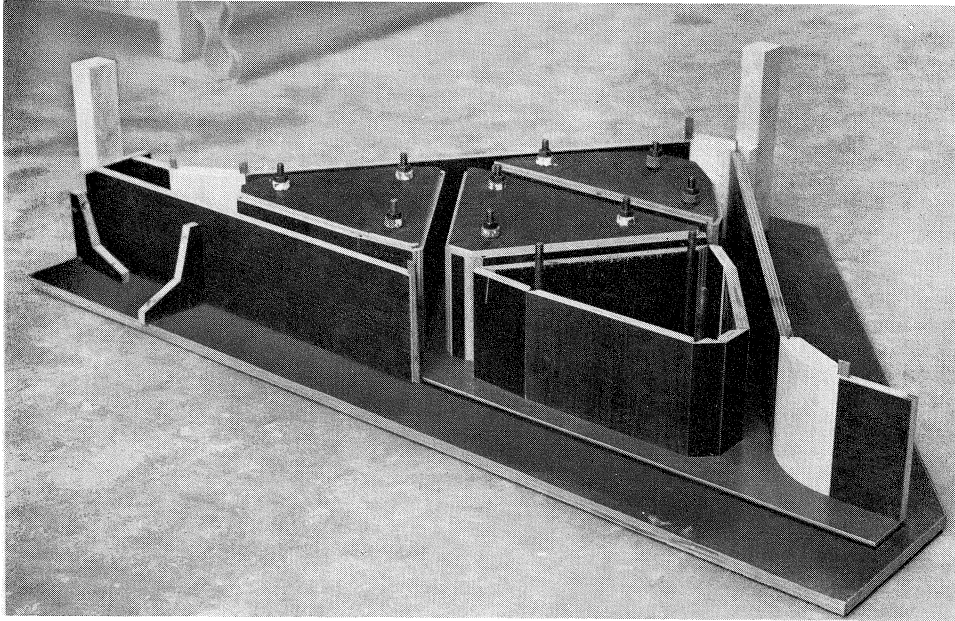
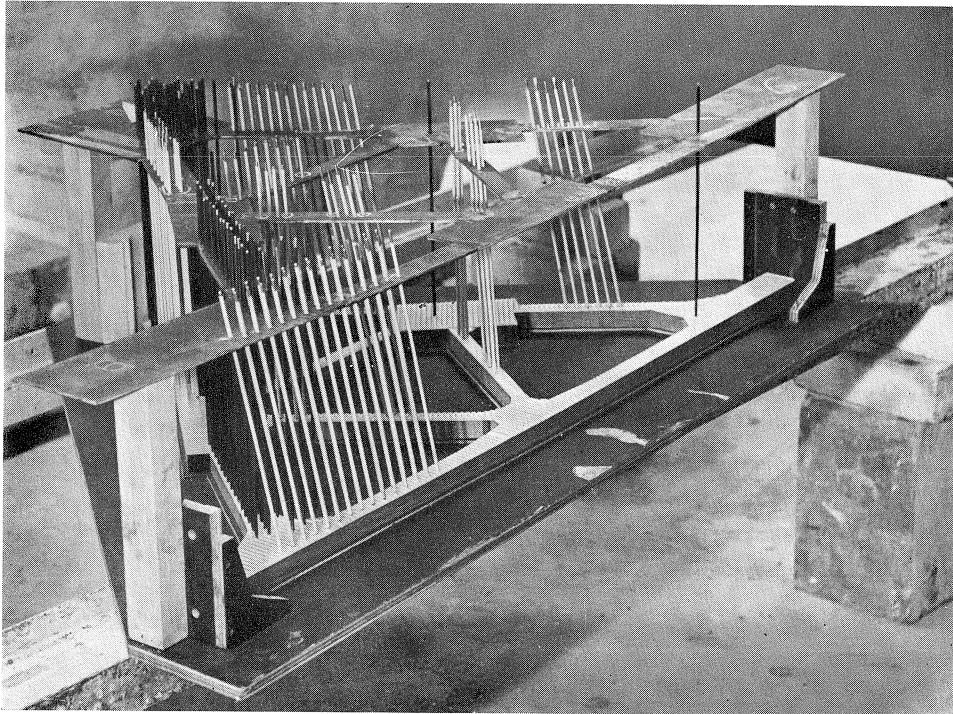


Fig. 6. Overzicht van de bekisting.

Fig. 7. Overzicht van de wijze, waarop de spelingen voor de kabels in lengterichting werden verkregen en gefixeerd.



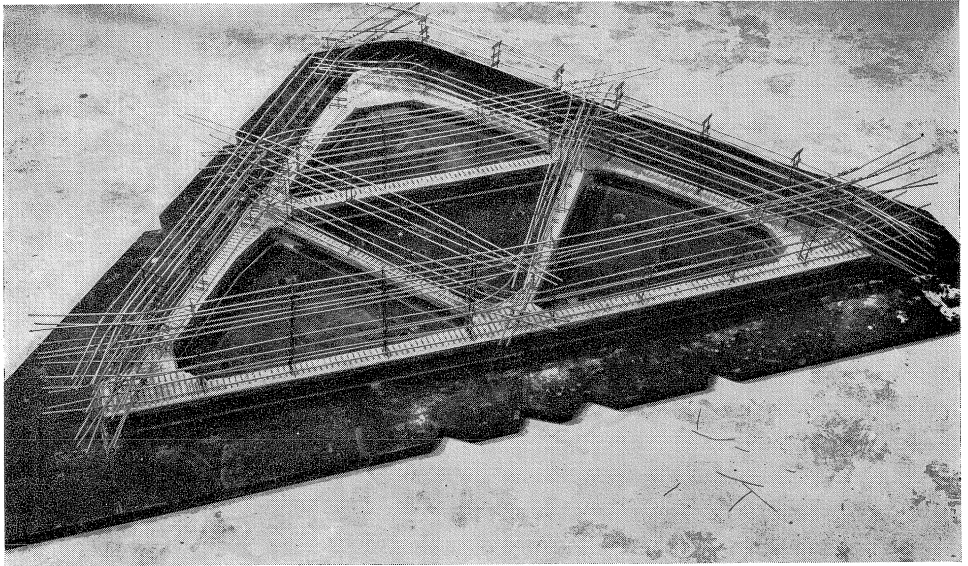


Fig. 8. Overzicht van de wijze, waarop de sparingen voor de kabels in dwarsrichting werden verkregen en gefixeerd.

reden werd het volgende systeem toegepast. Nadat een eindschot en het daaropvolgende element ten opzichte van elkaar op de juiste plaats waren gesteld, werd de tussengelegen voeg gestort. Elke twee dagen werd op deze wijze een nieuwe moot aan het reeds vervaardigde gedeelte van de ligger toegevoegd. De sparingen voor de langskabels in de voegen werden verkregen door rubber-slangen door de gaten van de elementen te trekken. De slangen werden ter plaatse van de voeg weer voorzien van stalen kernen (zie fig. 14). Ten behoeve van het storten van de voegen werd slechts aan één kant, nl. aan de buiten- of de onderzijde, een bekisting toegepast. Het verdichten van het beton vond weer plaats met behulp van een trilnaald.

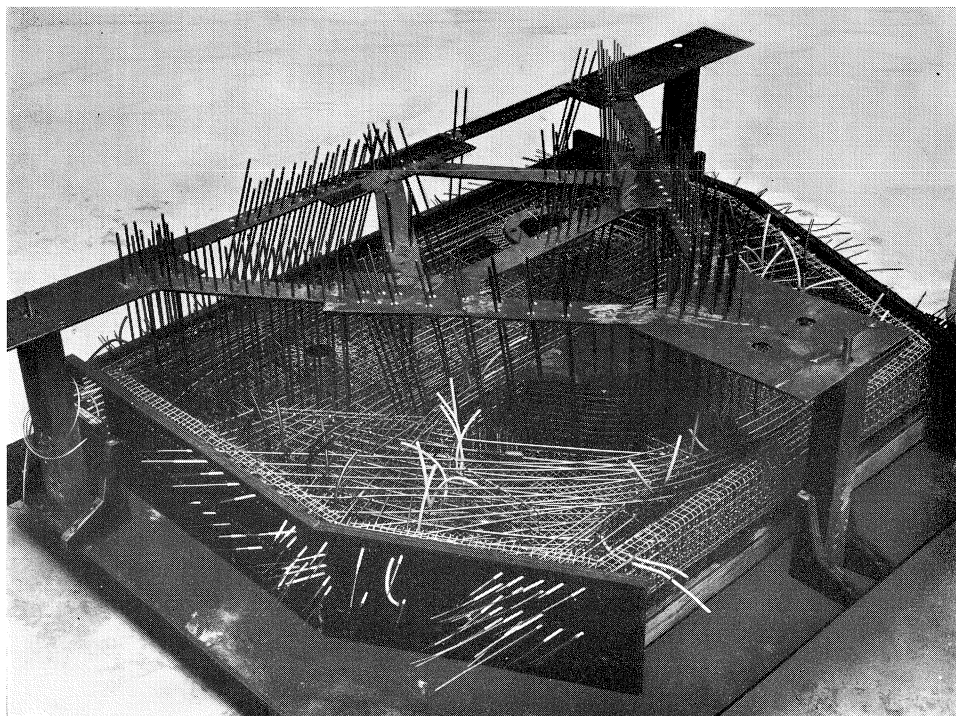
Een in de werkelijkheid in dwarsrichting aan te brengen voorspankabel volgens het systeem FREYSSINET (12 draden \varnothing 7 mm) werd in het model vervangen door één draad, die praktisch dezelfde materiaaleigenschappen bezat als de draden \varnothing 7 mm. Voor de wijze waarop de draad werd verankerd en na het spannen werd geblokkeerd wordt verwezen naar fig. 15. Het op spanning brengen van de draad werd uitgevoerd met behulp van een mechanisch spanapparaat, dat afgebeeld is in fig. 16. De draad is weergegeven in de gespannen maar nog niet geblokkeerde toestand. Nadat de draden waren voorgespannen werden de kabelkanalen onder een druk van 6 atm geïnjecteerd met een gebruikelijke tras-cementspecie.

De voorspanning in de lengterichting werd op overeenkomstige wijze aan-

gebracht. De 54 draden \varnothing 6 mm werden vervangen door 3 draden, welke weer op bovenvermelde wijze werden verankerd en geblokkeerd. Het spannen geschiedde, in verband met de grotere krachten, in dit geval met behulp van een omgebouwde 1-draads Freyssinetvijzel waarvan een doorsnede is gegeven in fig. 17.

De dwarsvoorspanning werd volledig en de langsvoorspanning gedeeltelijk (ongeveer de helft) aangebracht terwijl de ligger over de volle lengte was ondersteund, zoals ook in de werkelijkheid het geval zal zijn. In dit stadium zijn dus geen spanningen ten gevolge van het eigen gewicht aanwezig. De ligger werd vervolgens op de „pijlers” geplaatst. De rest van de langskabels mocht, ter vermindering van ontoelaatbare trekspanningen in het beton, eerst dan worden gespannen nadat de compensatiekrachten voor het verkrijgen van de spanningen ten gevolge van het eigen gewicht waren aangebracht. Deze fase komt overeen met die in de werkelijkheid, waarbij de ligger ter plaatse van de pijlers wordt opgevoerd, zodoende los komt van de ondersteuningsconstructie (zie fig. 13), waarna de rest van de langskabels wordt gespannen.

Fig. 9. Overzicht van een eindschot, dat vrijwel stortklaar is.



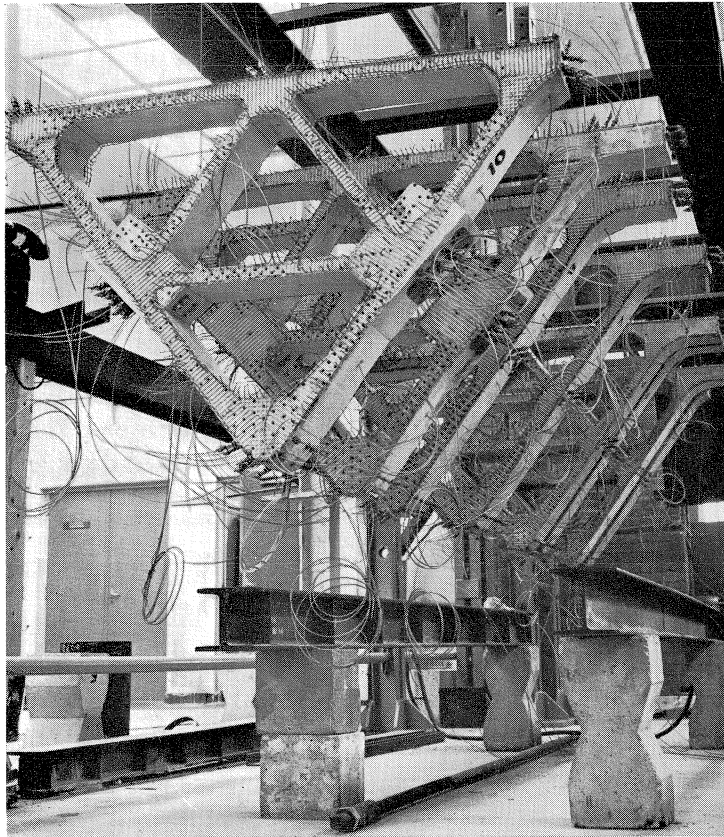


Fig. 10.
Vervaardigde moten van het model.

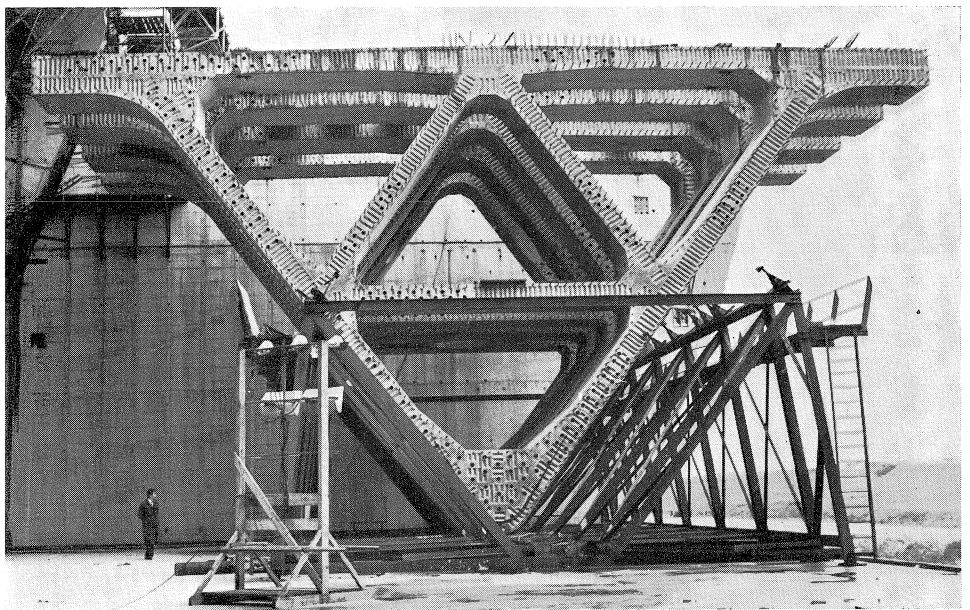


Fig. 12.
Vervaardigde moten in werkelijkheid.

Fig. 11.
Een eindschot
van het model.

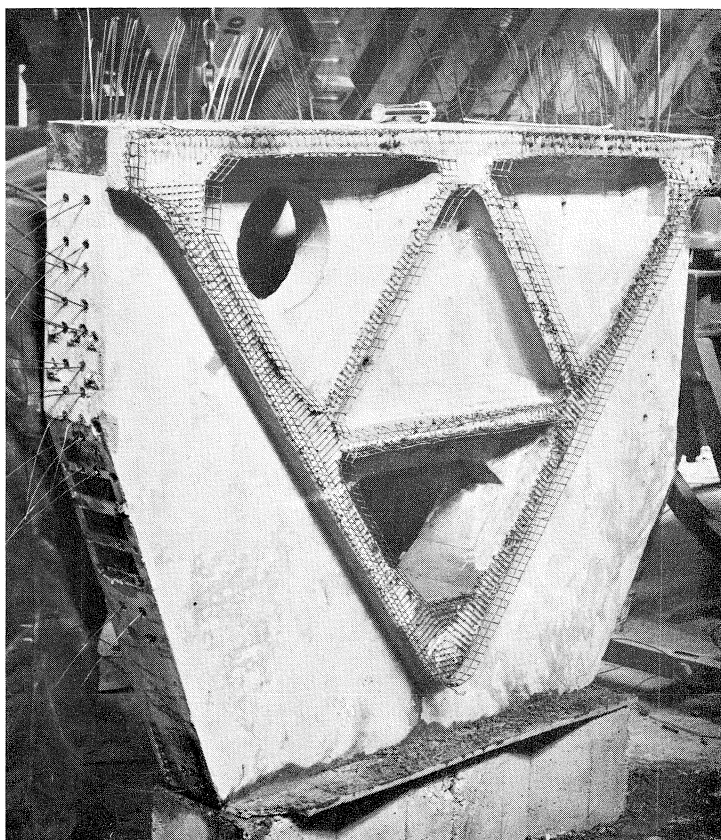
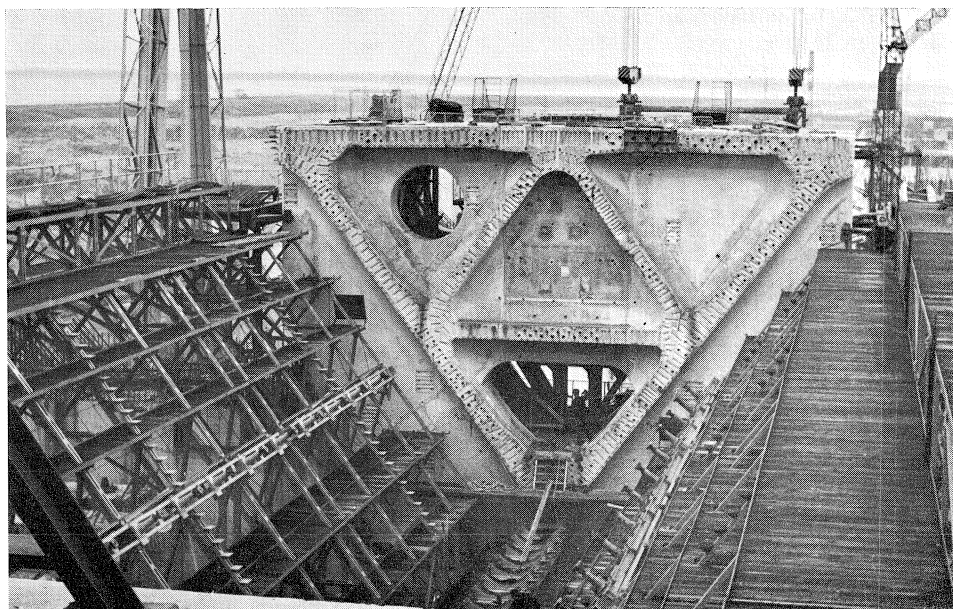


Fig. 13.
Een eindschot
in werkelijkheid.



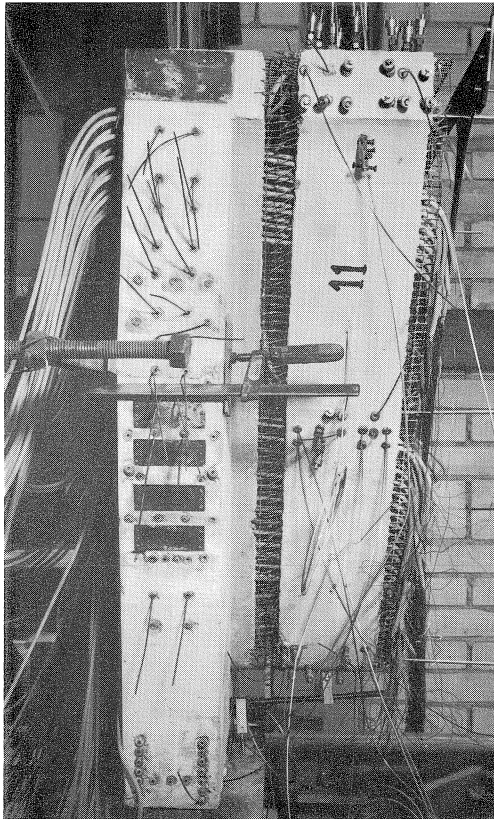


Fig. 14. Overzicht van de wijze, waarop de spelingen voor de kabels in lengterichting ter plaatse van de voegen werden verkregen. Tevens zijn enkele verankeringen van de kabels in dwarsrichting te zien.

Fig. 17. Het spanapparaat voor de kabels in lengterichting.

Het gedeelte (a) van de vijzel werd door middel van een hulpconstructie (b) afgestempeld op het betonoppervlak. Deel (c) van de vijzel, dat door het toevoeren van olie verplaatsbaar was ten opzichte van deze stempelconstructie, was via staaf (d) met de voerspandraden verbonden. Staaf (d) was daartoe voorzien van een voet met een gleuf, die om het dunne gedeelte van de prop (e) paste. Aan de bovenzijde van de vijzel liep staaf (d) door een buisje (f), waarop rekstrookjes (g) waren geplakt, waarmee de grootte van de voerspankracht kon worden gemeten. Door het toevoeren van olie werden dus de staaf (d) en de voerspandraden op trek en het meetelement op druk belast.

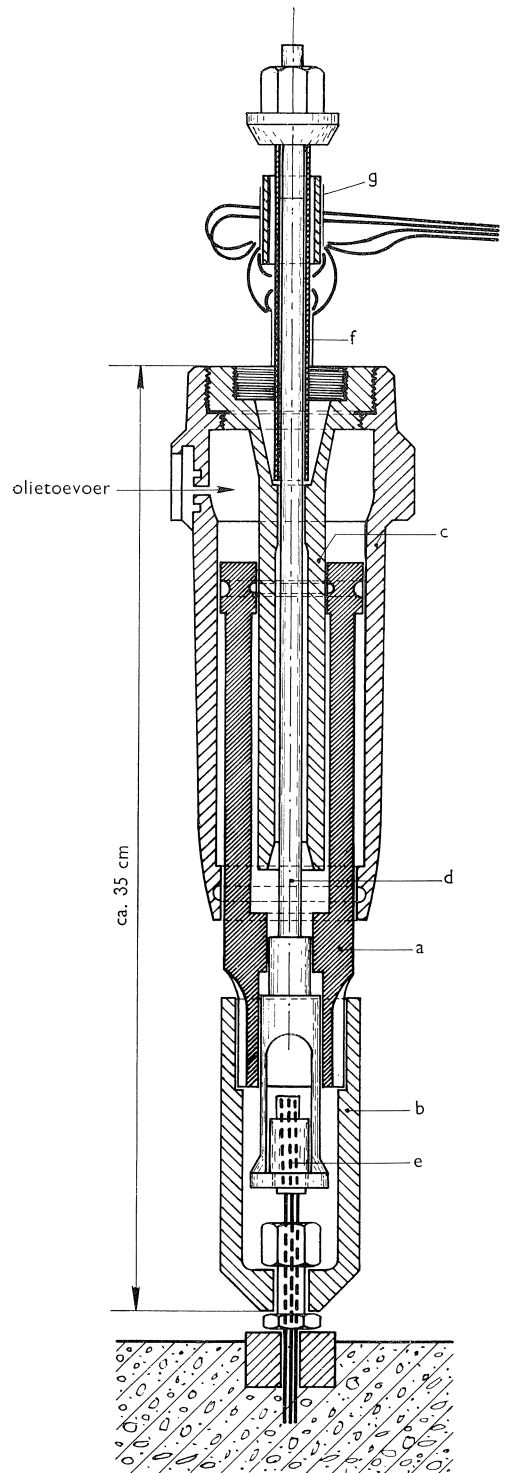
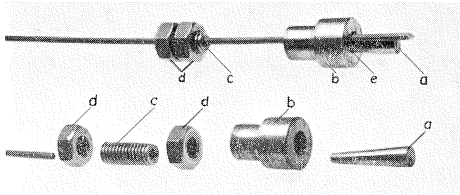
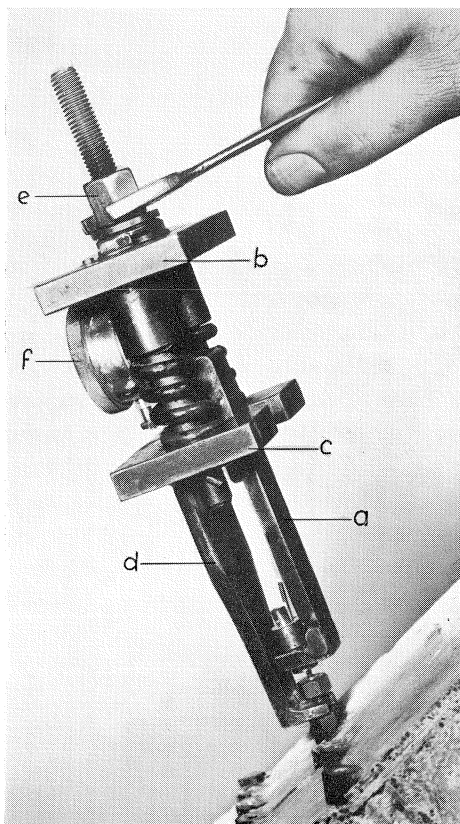


Fig. 15. Verankerings- en blokkeerconstructie voor de kabels in dwarsrichting.



Nadat de draad door de sparing in het beton was gestoken werd deze door middel van een wig (a) verankerd in een van een conisch gat voorzien cilindrisch blokje (b). Het blokkeren van de op spanning gebrachte draad geschiedde met behulp van een stukje schroefstang (c). De moeren (d) werden zover van elkaar gedraaid, dat de kracht van het spanapparaat door de blokkeerconstructie was overgenomen. Het injecteren geschiedde door de opening (e).

Fig. 16. Het spanapparaat voor de kabels in dwarsrichting.



Van staaf (a) paste de van een gleuf voorziene voet om het dunne gedeelte van het cilindrisch blokje. Het bovenste, van een schroefdraad voorziene, uiteinde stak door een gat in plaat (b), die door middel van twee drukveren op plaat (c) rustte. Deze was vast verbonden met de van een voet voorziene staaf (d). Door moer (e) aan te draaien werd de voorspanndraad op trek en de veren op druk belast, waardoor de platen (b) en (c) dichter bij elkaar kwamen. Uit deze afstandsverkleining, die gemeten werd met een meethorloge (f), kon de vereiste voorspankracht worden bepaald.

4 Belastingapparatuur

In fig. 18 is de bij het model toegepaste pijlerconstructie weergegeven. De vorm week, in verband met de te bevestigen hulpconstructies nodig voor het aanbrengen van de diverse belastingen, sterk van de werkelijkheid af. Aan de hand van de in de fig. 19 en 20 gegeven overzichten van de ligger en van de hulpconstructies, zal nader worden beschreven op welke wijze de belastingen konden worden aangebracht. De opstelling vanaf de zeezijde is fotografisch geïllustreerd in fig. 21.

4.1 *Compensatiekrachten voor het eigen gewicht*

De vereiste compensatiekrachten voor het dek werden verkregen door middel van in de lengterichting boven de ligger aangebrachte hefbomen (a). Door deze buiten de pijlers met gewichten te belasten, werd op het dek via de pendels (b) en de verdeelconstructies (bestaande uit liggertjes op 2 steunpunten en plankjes voorzien van schuimrubber) een gelijkmatig verdeelde belasting aangebracht. De compensatiekrachten voor het overige deel van de ligger werden als volgt verkregen: in elke moot werden op 13 plaatsen staaldraden (c) ingestort, die met trekveren met verschillend grote veerconstanten verbonden waren met een stalen balk (DIN 100) die in de lengte richting onder de ligger was geplaatst. Deze balk werd met behulp van trekstangen (d), die waren bevestigd aan een aan de betonvloer vastgemaakt frame, zover naar beneden geschroefd dat de juiste grootte van de compensatiekrachten was verkregen.

4.2 *Waterbelasting vanaf de zeezijde*

De drukbelasting vanaf de zeezijde werd aangebracht met behulp van twee vijzels (e). De reactiekrachten voor de vijzels werden geleverd door een stalen ligger (f), welke met 8 voorspanstaven tegen de „pijlers” was bevestigd. De grootte van de krachten werd gemeten met dynamometers (g). De trekbelasting kon worden aangebracht door de moeren (h) van vier trekstangen aan te draaien. De kracht werd gemeten met dynamometers (j). Behalve de grootte moest ook de richting van de druk- en trekbelasting kunnen worden gevarieerd. De richtingsverandering werd bij het model verkregen door ter plaatse van elk scharnier een verticale kracht aan te brengen door middel van een staaf (k). Deze staaf was verbonden met een hefboom (l) die om het punt (m) kon scharnieren. Op het andere uiteinde van de hefboom kon door middel van twee kleine vijzels zowel een trek- als een drukkracht worden aangebracht.

4.3 *Waterbelasting vanaf de rivierzijde*

Deze krachten werden op dezelfde wijze aangebracht als aan de zeezijde, echter met dit verschil dat zowel voor de druk- als voor de trekkrachten vijzels

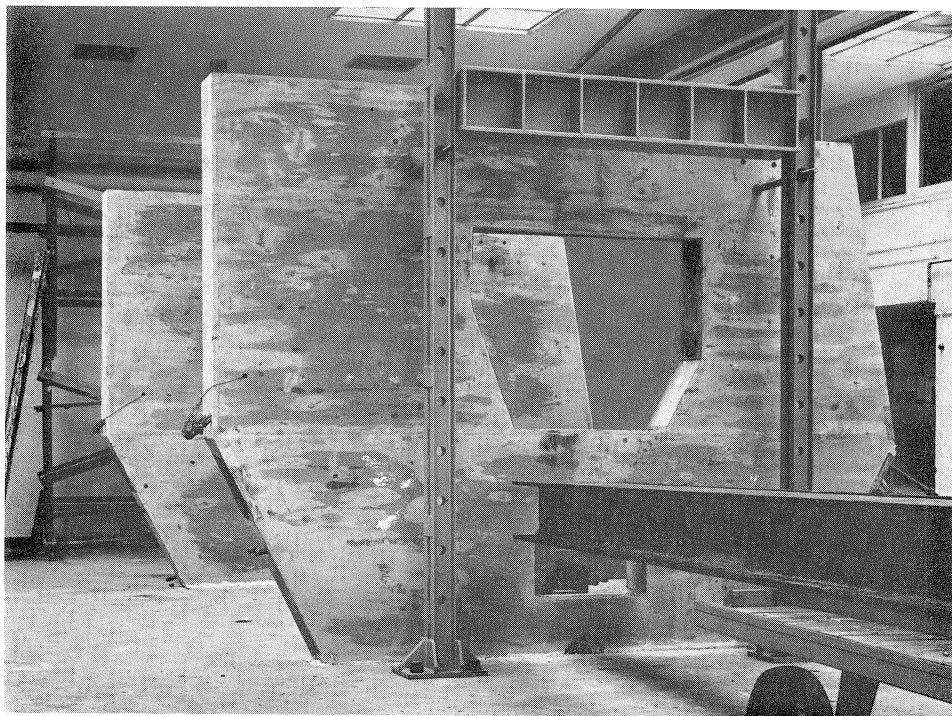


Fig. 18. De bij het model toegepaste pijlerconstructie.

werden toegepast. De verticale krachten ter plaatse van de scharnieren werden op dezelfde wijze verkregen als aan de zeezijde. Hiertoe werd de in fig. 20 getekende apparatuur gedemonteerd en op overeenkomstige wijze aan de andere zijde van de ligger gemonteerd.

4.4 Verkeersbelasting

De gelijkmatig verdeelde verkeersbelasting kon worden verwezenlijkt door gebruik te maken van dezelfde constructie die nodig was voor de compensatiekrachten voor het eigen gewicht van het dek. Met deze constructie kon het dekoppervlak in zijn geheel dan wel gedeeltelijk worden belast.

4.5 Pijlervedraaiing

Bij het ontwerp was rekening gehouden met in de ligger optredende wringende momenten ten gevolge van een mogelijke pijlervedraaiing. Teneinde dit belastingsgeval te kunnen nabootsen was één der pijlers in zijn vlak draaibaar om een in de lengterichting van de ligger aangebrachte as. Hiertoe werd gebruik gemaakt van het onderste gat in één der pijlers (zie fig. 18).

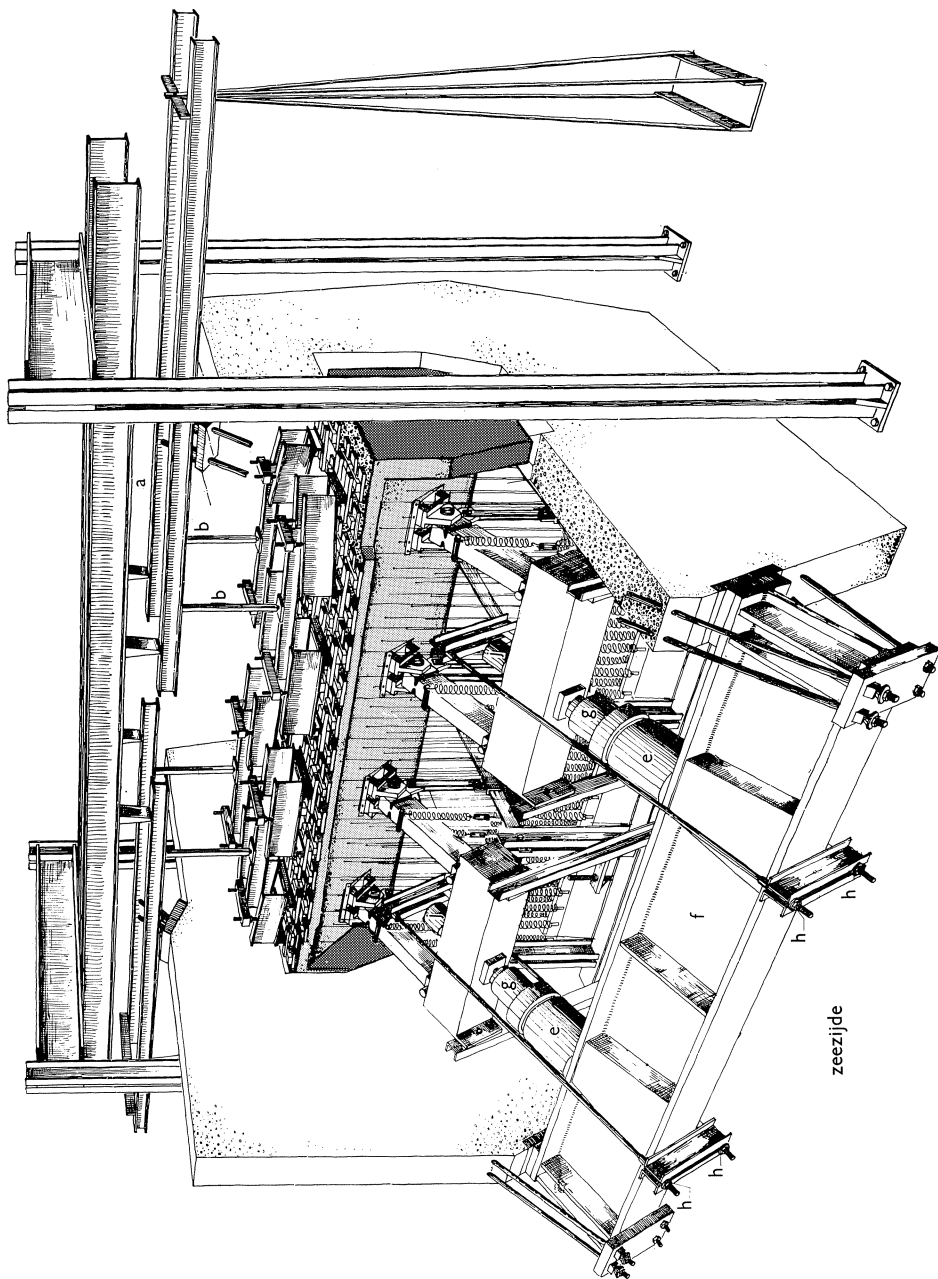


Fig. 19. Perspectief van de proefopstelling, gezien vanaf de „zeezijde”.

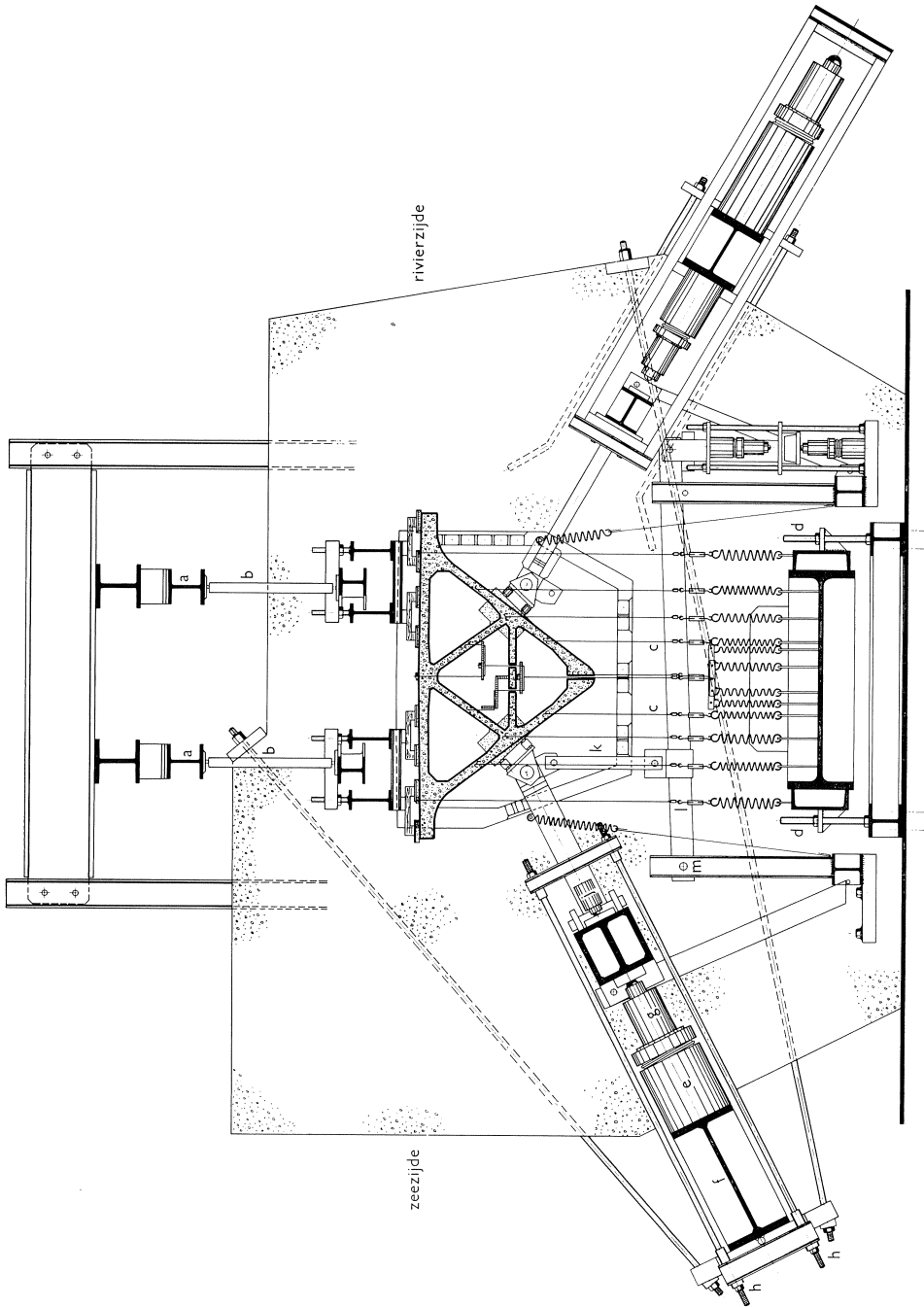


Fig. 20. Dwarsdoorsnede van de proefopstelling.

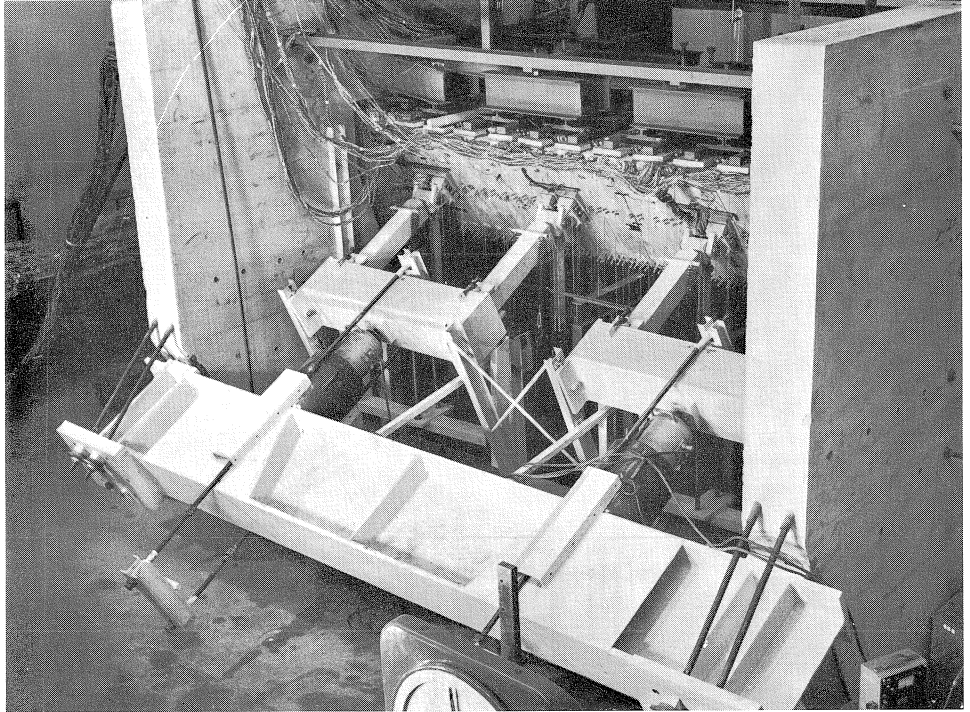


Fig. 21. Overzicht van de proefopstelling, gezien vanaf de „zeezijde”.

5 Beproeving

Het gedrag van het model werd allereerst geobserveerd bij belastingen overeenkomend met de ontwerpbelastingen. Onderzocht werden zes belastingscombinaties. Vervolgens werd voor vier gevallen (zie fig. 4) de belasting opgevoerd met 20 à 30%. Hierbij werd de toestand verkregen waarbij de eerste scheurtjes konden worden verwacht. Na achtereenvolgens voor deze gevallen de ligger aan ongeveer het drievoudige van de ontwerpbelasting te hebben onderworpen, werd tenslotte alleen de drukkracht vanaf de zeezijde opgevoerd tot het 3,9-voudige. In verband met de sterkte van de belastingsapparatuur, die was ontworpen op een 3-voudige belasting ($\bar{\sigma}_y = 2.000 \text{ kgf/cm}^2$), moest de proef worden gestaakt. De breukbelasting van de ligger kon niet worden bereikt.

6 Verrichte metingen en observaties

Teneinde een inzicht te verkrijgen in het gedrag van de constructie werden tijdens het aanbrengen van de langsvorspanning, het compenseren van het eigen gewicht en het uitvoeren van de belastingsproeven op ca. 600 plaatsen de vervormingen van de constructie gemeten. Hoofdzakelijk werden hiertoe rekstrookjes gebruikt, die zowel in het inwendige als op het buitenoppervlak waren aangebracht. Gemeten werden de vervormingen:

- in de lengterichting ter plaatse van het midden van de overspanning (gebied van maximum-moment);
- in de uiterste vezels ter plaatse van de voegen, teneinde het begin van scheurvorming te kunnen vaststellen;
- in 3 richtingen ter plaatse van de einddoorsneden (gebied van maximum-dwarskracht);
- van de constructiedelen direct achter de scharnieren teneinde de spreiding van de geconcentreerde lasten te kunnen nagaan.

Op de gemakkelijk bereikbare plaatsen van het model werden bovendien metingen verricht met mechanische rekmeters. Met behulp van meethorloges werden verder nog gemeten de horizontale en verticale verplaatsingen van de middendoorsnede. Teneinde ook het inwendige van de ligger tijdens de proef te kunnen inspecteren werden drie periscopen vervaardigd, die door sparingen in de eindschotten naar binnen konden worden gebracht.

7 Resultaten

In het algemeen kan worden gezegd dat in het elastische stadium de uit de rekmetingen bepaalde langsspanningen en de berekende waarden goed met elkaar in overeenstemming waren. Ter illustratie zijn voor een belastingsgeval de spanningen in de middendoorsnede gegeven in fig. 22.

De eerste scheur trad op ter plaatse van het midden van de overspanning

- spanningen bepaald uit de metingen in kgf/cm^2 .
- spanningsverloop volgens de liggetheorie ($\sigma = M/W$).

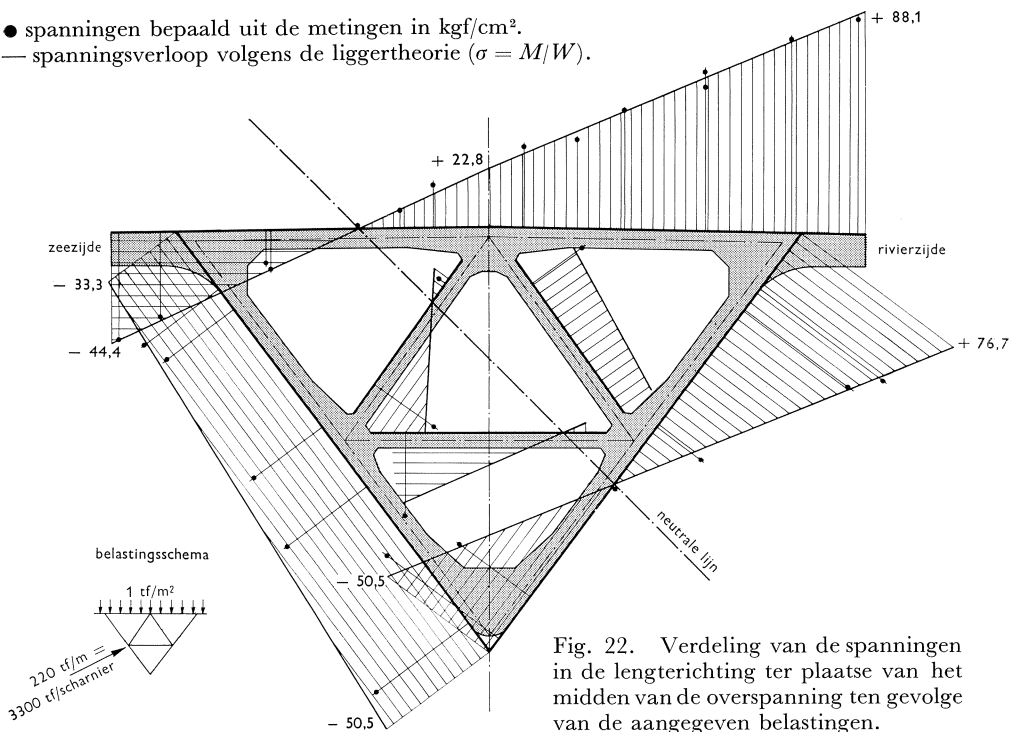


Fig. 22. Verdeling van de spanningen in de lengterichting ter plaatse van het midden van de overspanning ten gevolge van de aangegeven belastingen.

op het scheidingsvlak tussen een moot en een voeg in het aan de rivierzijde gelegen overstek bij ca. 1,2 maal de ontwerp(druk)belasting vanaf de zeezijde.

Zoals reeds vermeld werd bij 3,9 maal de ontwerp(druk)belasting vanaf de zeezijde de proef gestaakt. In dit stadium waren in het middelste gedeelte van de ligger op meerdere scheidingsvlakken tussen moten en voegen scheuren aanwezig. Bovendien werd in het midden van de overspanning aan het overstek van het dek aan de zeezijde ter plaatse van een voeg begin van verbrijzeling van het beton geconstateerd. In de overige delen van de ligger werden met het blote oog noch aan de buitenkant noch in het inwendige scheuren waargenomen. In fig. 23 zijn voor de belastingscombinatie, bestaande uit de genoemde belasting, het eigen gewicht en de voorspanning, de vervormingen gegeven van de middendoorsnede, uitgaand van de rekmetingen in de drukzone en aannemend dat vlakke doorsneden vlak blijven. Voor deze vervormingstoestand is bij de gegeven materiaaleigenschappen van het staal en het beton het moment berekend dat door de doorsnede werd overgebracht. Dit moment bleek ongeveer 0,93 maal het moment te zijn, bepaald uit de aangebrachte belastingen. Het verschil is wellicht veroorzaakt door het optreden van enige inklemming van de ligger in de pijlers.

Resumerend kan worden gesteld dat met behulp van het modelonderzoek is aangetoond dat de constructie volledig aan de gestelde eisen voldoet.

Een bijkomend aspect van dit modelonderzoek was dat naar aanleiding van de ondervonden moeilijkheden bij de vervaardiging van het model nuttige adviezen konden worden verstrekt voor de uitvoering in de werkelijkheid.

- gemeten specifieke verkortingen in ‰.
- T plaats van de resultante van de trekspanningen.
- D plaats van de resultante van de drukspanningen.

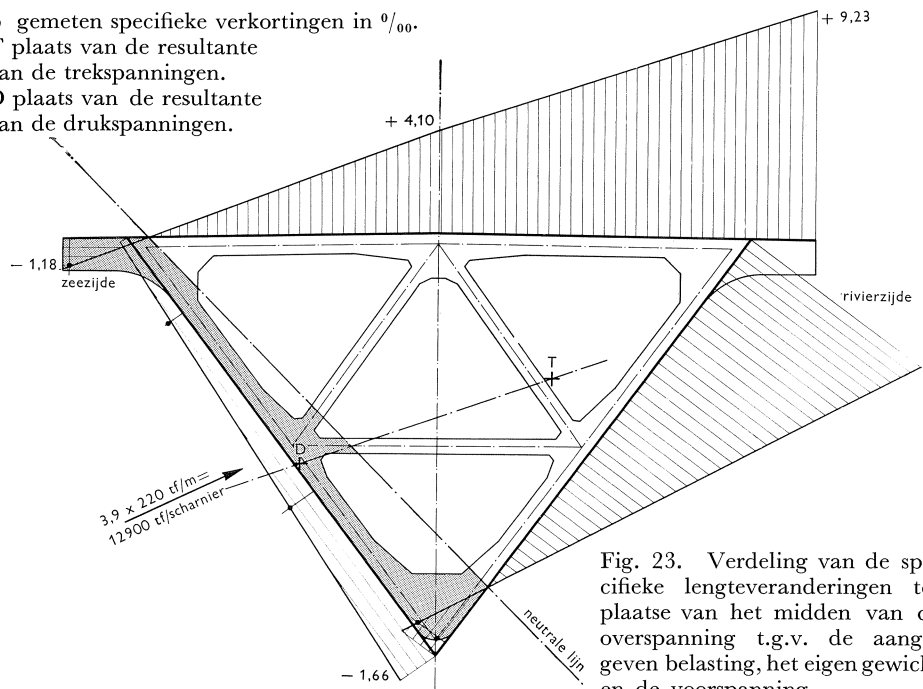


Fig. 23. Verdeling van de specifieke lengteveranderingen ter plaatse van het midden van de overspanning t.g.v. de aangegeven belasting, het eigen gewicht en de voorspanning.