

HET STEVIN-LABORATORIUM

1957

11 JANUARI

1962

U.D.C. 061.6:624 Stevin

Ten geleide

Op 11 januari 1962 is het vijf jaar geleden, dat het Stevin-laboratorium officieel werd geopend.¹⁾ Vijf jaar is geen lange periode in een mensenleeftijd noch in die van een laboratorium. En toch is er alle reden dit eerste lustrum niet ongemerkt te laten voorbijgaan.

Immers een mijlpaal in een ontwikkelingsweg, ook al is die eerste, is altijd een welkome aanleiding om even stil te staan, een terugblik te werpen in het verleden, de balans op te maken van het heden en zich te bezinnen over de toekomst.

Research van bouwconstructies in ons land bestaat eigenlijk nog niet zo heel lang.²⁾ Hij dateert pas van de donkere bezettingsjaren gedurende de laatste wereldoorlog, toen in 1942 door de Nijverheidsorganisatie T.N.O. een „Commissie Onderzoek Constructies” in het leven werd geroepen, bestaande uit twee werkgroepen nl. een (civiele) voor Gewapend Beton- en Staalconstructies en een (werktuigbouwkundige) voor Spannings- en Trillingsonderzoek.

Beschouwen wij de ontwikkeling van de civiele werkgroep, dan kan worden gezegd dat die slechts langzaam en moeizaam was. Enerzijds was dit een gevolg van het gemis aan de noodzakelijke apparatuur, zowel bij T.N.O. als bij de Afdeling der Wegen Waterbouwkunde der T.H., hetgeen voortduurde tot vele jaren na de bevrijding, anderzijds bestond er in de civiel-technische wereld, op enige gunstige uitzonderingen na, in den beginne een totaal gemis aan belangstelling voor research.

¹⁾ Zie: T.H.-mededelingen No. 4, maart 1957, pp. 81–112 en De Ingenieur, 25 januari 1957, A. 37–39.

²⁾ Onderzoek op het gebied van hydraulica en grondmechanica (Laboratoria voor Waterlooppkunde resp. Grondmechanica) is hier buiten beschouwing gelaten.

Toch bleek het mogelijk gedurende en na de bezettingstijd in het bijzonder de volgende drie grote onderzoeken te entameren:

1. Over de sterkte van hoeklassen, als voortzetting van de proeven van N. C. Kist;
2. Over de veiligheid van de toren van de St. Jacobs-kerk te 's-Gravenhage, hetgeen tot een ingrijpende restauratie heeft geleid;
3. Over de krachtsverdeling in een groot stalen model van een paddestoelvloer.

Weliswaar hadden deze onderzoeken in zoverre de aandacht getrokken in de bouwtechnische wereld, dat men inzag dat research ook wel eens nuttig kon zijn, doch de onverschilligheid in gezaghebbende kringen bleef grotendeels ongewijzigd. Voor research had men slechts weinig geld over.

Intussen werd bij de Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde in 1947 een begin gemaakt met de inrichting van een bescheiden laboratorium voor experimenteel spanningsonderzoek. Na enige jaren was de apparatuur zodanig uitgebreid, dat zelfs een aantal praktijkopdrachten konden worden uitgevoerd, waarbij in het bijzonder de spanningsoptiek en de moiré-methode goede diensten bewezen. Bij de verkrijging van enkele van deze opdrachten was reeds een duidelijke invloed te bespeuren van de jonge generatie van ingenieurs na de oorlog. Langzaamaan begon het getij te keren.

Een gebeurtenis die de bouwtechnische research in ons land belangrijk heeft gestimuleerd was de oprichting in 1951 van het Fonds voor Experimenteel Beton-Onderzoek (F.E.B.O.) dat vnl. door de cementindustrie wordt gefinancierd. Voorts werd in 1953 door de Werkgroep Gewapend Beton- en Staalconstructies een aanvang gemaakt met de uitgave van een goed verzorgd tijdschrift, de *W.G.S.-mededelingen*,¹⁾ waarin de belangrijkste resultaten van verrichte onderzoeken werden gepubliceerd. Het tijdschrift werd op ruime schaal verspreid in kringen van de overheid en het bedrijfsleven. Allengs nam het aantal researchopdrachten voor derden beduidend toe en mede om organisatorische redenen werd het wenselijk geacht de werkgroep te combineren met het Bouwmaterialeninstituut T.N.O. tot één Instituut voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, hetgeen in 1954 geschiedde.

Sindsdien is het met de research van civiele constructies steeds crescendo gegaan. De constructeurs in hout en staal volgden het voorbeeld van die in beton. Uit het bovenstaande kan wel de conclusie worden getrokken, dat in tegenstelling met de ontwikkeling in vele andere landen, de research van bouwconstructies in Nederland feitelijk zijn oorsprong vond in, althans sterk gestimuleerd werd door organisaties buiten de T.H. En zo heeft de opening van het Stevin-laboratorium, nu vijf jaar geleden, vooral deze betekenis, dat de Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde van toen af ook in staat werd gesteld op volwaardige wijze aan de verdere ontwikkeling van de civiel-technische research deel te nemen. De laboratoriumcapaciteit in ons land werd hierdoor niet onbelangrijk vergroot, hetgeen van grote betekenis was in verband met de toenemende vraag naar research als gevolg van de uitvoering van nieuwe bouwconstructies en grote overheidsobjecten.

Wanneer wij de balans opmaken van hetgeen in het Stevin-laboratorium gedurende de vijfjarige periode van zijn bestaan werd bereikt, dan is er alle reden voor tevredenheid,

¹⁾ Sinds 1955 IBC-mededelingen genaamd, thans als gezamenlijk orgaan van het I.B.B.C. en het Stevin-laboratorium als dit tijdschrift verschijnend.

zoals uit de volgende bijdragen van verschillende medewerkers moge blijken. Reeds thans is gebleken, dat het Stevin-laboratorium noodzakelijk moet worden uitgebreid, waartoe de nodige plannen reeds werden ingediend. Enige zorg baart ons wel de daarmede gepaard gaande personeelsvoorziening. In deze tijd heerst personeelstekort in alle sectoren van onze samenleving. In het bijzonder geldt dit echter voor researchwerkers, vanwege de bijzondere eisen die aan hen moeten worden gesteld. Weliswaar kan aan deze moeilijkheid enigszins worden tegemoetgekomen door de tewerkstelling gedurende enige jaren van stipendiaten van het Delfts Hogeschoolfonds, maar een afdoende oplossing is dit niet. Wellicht dat door de grotere toevloed van studenten in de komende jaren ook het aantal zal toenemen van diegenen, die geschikt en bereid zijn de research als levenstaak te kiezen.

Zo gaan wij de eerste mijlpaal van het Stevin-laboratorium voorbij, om met vertrouwen in de toekomst de tweede lustrale periode in te gaan, wetende dat research één van de hoekstenen is waarop de bloei van het bedrijfsleven is gebaseerd en daarmede ook de welvaart in ons land.

Prof. Ir. C. G. J. VREEDENBURGH

Houtconstructies

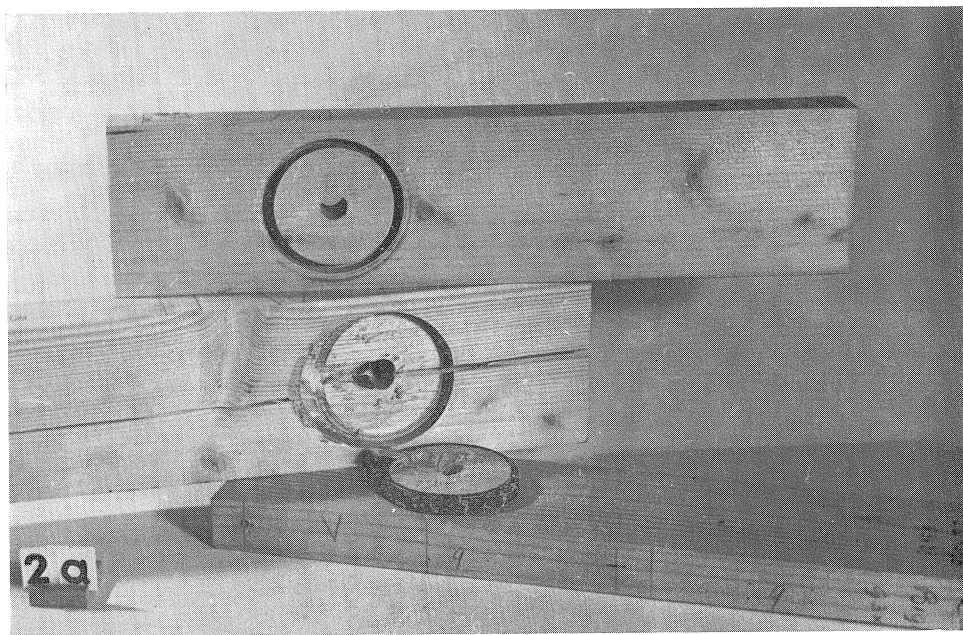
De opgave in een bijdrage voor „Heron” een overzicht te geven van de belangrijkste resultaten van het onderzoek dat in de afgelopen vijf jaren op het gebied van de houtconstructies in het Stevin-laboratorium is verricht, is in feite een opdracht tot bezinning. Bezinning op de taak die op dit gebied is te vervullen en op de doeleinden die daarbij voor ogen staan. Zó opgevat zou dit tevens inhouden, dat een antwoord moet worden gegeven op de vraag in hoeverre deze doeleinden worden gediend door de wijze waarop het onderzoek wordt uitgevoerd.

Het doel dat hierbij voor ogen staat kan zeer algemeen worden omschreven als: „bestudering van het natuurprodukt hout, in het bijzonder van de fysische en mechanische eigenschappen, die van belang kunnen zijn bij de toepassing van dit materiaal in dragende constructies”. Daarbij wordt er dus van uitgegaan dat hout inderdaad in aanmerking komt om in dragende constructies gebruikt te worden. Dat dit uitgangspunt juist is wordt bevestigd door de vele constructies uit vroegere jaren, zowel als door talrijke moderne constructies, waaronder verschillende van indrukwekkend formaat. Wel is in ons land, evenals in andere Europese landen, een achteruitgang in het gebruik van hout opgetreden, vooral toen na de tweede wereldoorlog importmoeilijkheden leidden tot het zoeken naar vervangingsmaterialen voor hout. Bovendien is door de snelle ontwikkeling van de constructiematerialen staal en beton de positie van het hout teruggedrongen.

Pas nadat deze achteruitgang duidelijk merkbaar werd hebben houthandel en -industrie de gevaren onderkend. Als gevolg daarvan heeft het Houtvoorlichtingsinstituut (H.V.I.) te Amsterdam het initiatief genomen tot samenwerking met speurwerkinstituten, uit welke samenwerking in 1956 het Centrum voor Houtresearch (C.H.R.) ontstond. Dit centrum wordt gevormd door drie partijen: het bovengenoemde H.V.I., het Houtinstituut-T.N.O. en het Stevin-laboratorium. Een groot deel van het werk dat door de groep Hout van het Stevin-laboratorium in de verstreken periode is verricht past dan ook in het kader van de werkzaamheden van het C.H.R.

In aansluiting op het werk dat door de andere speurwerkpartner in het C.H.R. – het Houtinstituut T.N.O. – werd verricht met betrekking tot de sterkte-sortering van naaldhout, wordt door het Stevin-laboratorium een onderzoek verricht naar de sterkte van met dat hout vervaardigde verbindingen. Deze aansluiting ligt wel voor de hand: wil men het volgens vastgelegde normen gesorteerde hout doeltreffend gebruiken, dan zullen de verschillende constructiedelen onderling zodanig verbonden moeten worden dat de tussen die onderdelen optredende krachten goed overgebracht worden. Deze verbindingen kunnen op velerlei wijze tot stand komen, b.v. met draadnagels, bouten, kramplaten, deuvels of lijm. Voor geen van deze verbindingmiddelen zijn in de huidige Nederlandse normen gegevens opgenomen over toelaatbare belastingen e.d. In vele andere landen is dit wel het geval. Alleen al het geven

Fig 1. Eenassige gedrukte ringdeuvelverbinding, na bezwijken uiteengehaald.



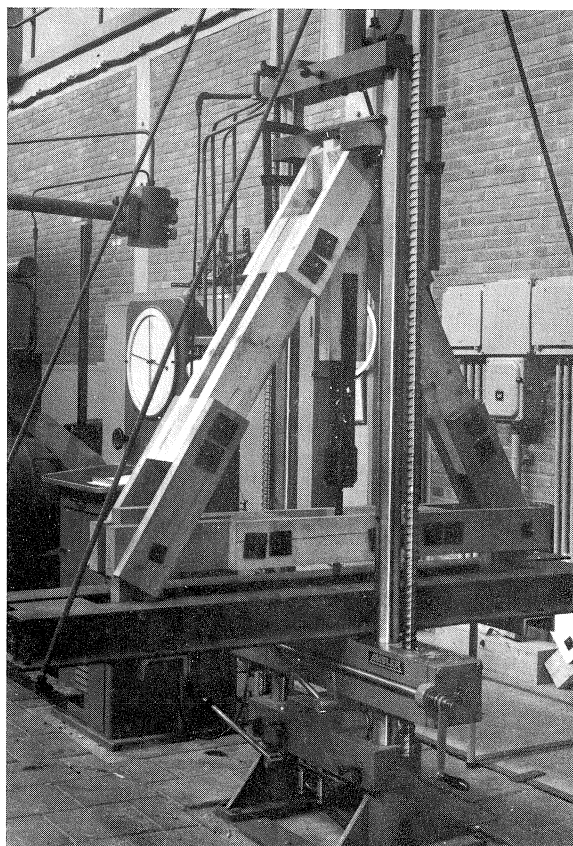
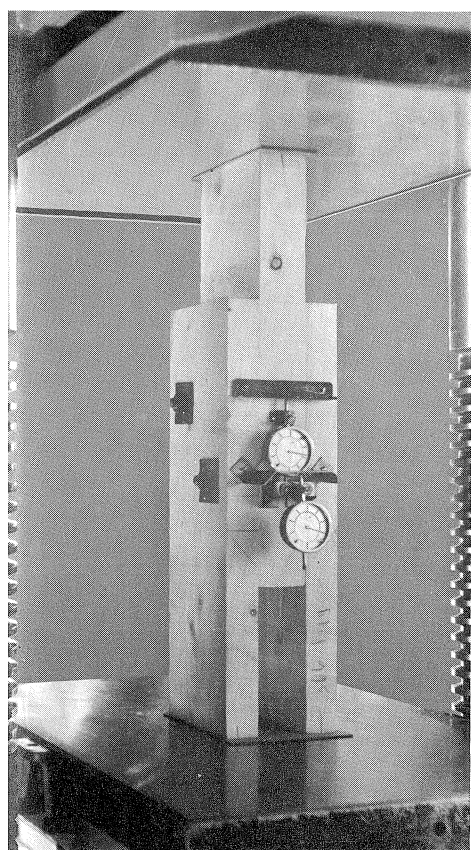


Fig. 2. Drukproef op ringdeuvelverbinding.

Fig. 3. Ringdeuvelverbindingen onder belasting.

van toelaatbare belastingen op enkele verbindingsmiddelen in een normblad zou het aanzien van het hout als bruikbaar constructiemateriaal in belangrijke mate verhogen en de toepassing daarvan zeker stimuleren.

Met dit oogmerk werd in 1956 begonnen met een onderzoek van verbindingen met ringdeuvels. De opdracht was na te gaan in hoeverre een Amerikaans voorschrift betreffende dit verbindingsmiddel in ons land bruikbaar zou zijn. De gedachte daarbij is geweest, dat aan de hand van enkele proeven zou blijken dat dit voorschrift gehandhaafd zou kunnen worden en niemand zal vermoed hebben, dat bij de viering van het eerste lustrum van het Stevin-laboratorium dit onderzoek nog slechts voor een deel – zij het voor het grootste deel – zou zijn afgerond. Dit thans wel afgeronde gedeelte heeft betrekking op de ringdeuvel $\varnothing 73$ mm. Reeds bij de eerste series proeven op met deze deuvels gemaakte verbindingen bleek dat andere sterktecijfers werden gevonden dan op grond van het Amerikaanse voorschrift konden worden ver-

wacht; ook bij voortgezet onderzoek bleken duidelijke verschillen te bestaan in de mate waarin bepaalde factoren zoals houtafmetingen, aantal deuvels e.d. de sterkte van deze verbindingen beïnvloeden.

Vooraf bij een natuurprodukt als hout, waarbij de materiaaleigenschappen vrij sterk kunnen variëren, is het niet altijd even eenvoudig om vast te stellen of geconstateerde verschillen in sterktecijfers het gevolg zijn van bewust aangebrachte verschillen tussen de proefstukken of dat deze evengoed veroorzaakt zouden kunnen zijn door bovengenoemde variaties in materiaaleigenschappen. De statistiek is bij het trekken van conclusies ten deze een belangrijk hulpmiddel. Uitgaande van een statistisch opgezet proevenprogramma is het mogelijk om onderscheid te maken tussen de systematische en de toevallige verschillen.

Dat het, ondanks de zorgvuldigheid waarmee wordt nagegaan welke proeven uitgevoerd moeten worden, mogelijk is toch nog zeer verrassende resultaten te verkrijgen bewijzen proeven op kramplaatverbindingen. Hier waren de resultaten van een eerste serie proeven zodanig in tegenspraak met de verwachting, dat pas na het uitvoeren van twee series aanvullende proeven een duidelijker beeld ontstond. Het zal duidelijk zijn dat de interpretatie van dergelijke waarnemingen niet eenvoudig is en de nodige tijd in beslag neemt.

Bij de ringdeuvels bleken de in het voorgaande gemelde verschillen tussen de beproevingsresultaten en het Amerikaanse voorschrift ook uit statistisch oogpunt aantoonbaar te zijn. Dit betekent dat handhaving van dit voorschrift zonder meer een te sterk beroep zou zijn op de veiligheidscoëfficiënt, die reeds zo veel onwetendheid moet overbruggen. Om deze reden is dan ook besloten voor toepassing hier te lande van het Amerikaanse voorschrift af te wijken en de toelaatbare belastingen zodanig vast te stellen, dat een betere overeenstemming met de proefresultaten wordt bereikt. Het eerste concept van dit Nederlandse ringdeuvelvoorschrift kwam gereed in september 1960. Na een reeks van verdere wijzigingen is dit voorschrift thans in de serie documentatiebladen van het Houtvoorlichtingsinstituut verschenen.

De beproevingsresultaten en de toelaatbare belastingen volgens het documentatieblad zijn gekoppeld door de „veiligheidscoëfficiënt”. Over deze veiligheidscoëfficiënt en de daarmee bereikte mate van zekerheid betreffende het ontstaan van een ongewenste situatie is een studie gemaakt. Ook daarbij is gebruik gemaakt van statistische beschouwingen, die ook in internationale publikaties over dit onderwerp in de laatste jaren meer en meer worden gehanteerd. Bij dergelijke beschouwingen wordt aandacht besteed aan de variatie in de sterkte enerzijds en aan die in de belasting anderzijds. De kans op overschrijding van de sterkte neemt niet alleen af wanneer het verschil tussen de gemiddelde sterkte en de gemiddelde optredende spanning groot is, maar ook wanneer de spreiding in deze grootheden kleiner wordt.

Het onbevredigende van dergelijke beschouwingen is echter dat over de materialen en de daarmee te bereiken sterkte in constructies belangrijk meer

bekend is dan over de belastingen die in werkelijkheid op de constructie te verwachten zijn.

Het bleek evenwel mogelijk om, uitgaande van bepaalde veronderstellingen over de grootte van en de spreiding in deze belastingen, een vergelijkingsbasis te scheppen, die als uitgangspunt kan dienen voor de bepaling van toelaatbare spanningen in en toelaatbare belastingen op materialen en constructies wanneer van de sterkte daarvan de gemiddelde waarde en de spreiding bekend zijn. Deze beschouwingwijze heeft, samen met de kennis van de gebruikelijke grootte van de veiligheidscoëfficiënt in andere landen, bij de ringdeuvels geleid tot aanvaarding van een factor 3,5 als verhoudingscijfer tussen de gevonden breukbelasting en de toelaatbare belasting.

Een geheel andere vraag die bij beschouwingen over de veiligheid van constructies opkomt is, of niet meer aandacht besteed zou moeten worden aan grove fouten die in het ontwerp of bij de uitvoering kunnen worden gemaakt. Deze fouten toch zijn meestal de primaire bronnen van mislukking, eerder dan de overschrijding van de sterkte als gevolg van overbelasting.

Dergelijke fouten, die bij niet deskundige behandeling ook bij houtconstructies gemaakt kunnen worden, zoveel mogelijk te vermijden is een van de oogmerken geweest van een commissie die een serie standaardontwerpen voor houten spanten heeft samengesteld. Een andere, belangrijker, overweging is daarbij geweest om naast de algemene voordelen die standaardisatie biedt,

Fig. 4. Houten vakwerkspanten met genagelde verbindingen onder belasting.

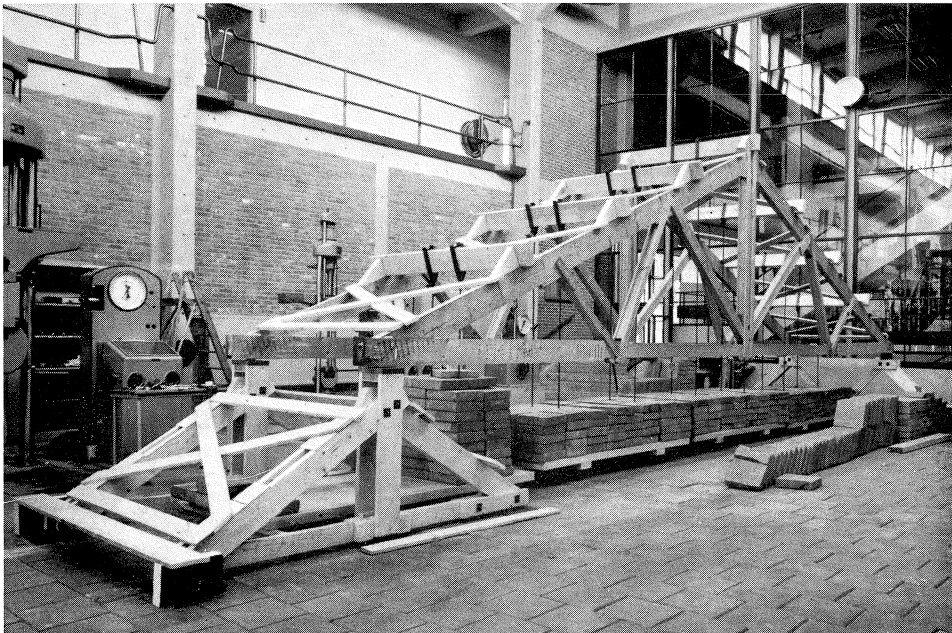




Fig. 5. Genageld vakwerkspant tijdens beproeving.

Fig. 6. Genagelde verbinding op het punt te bezwijken.

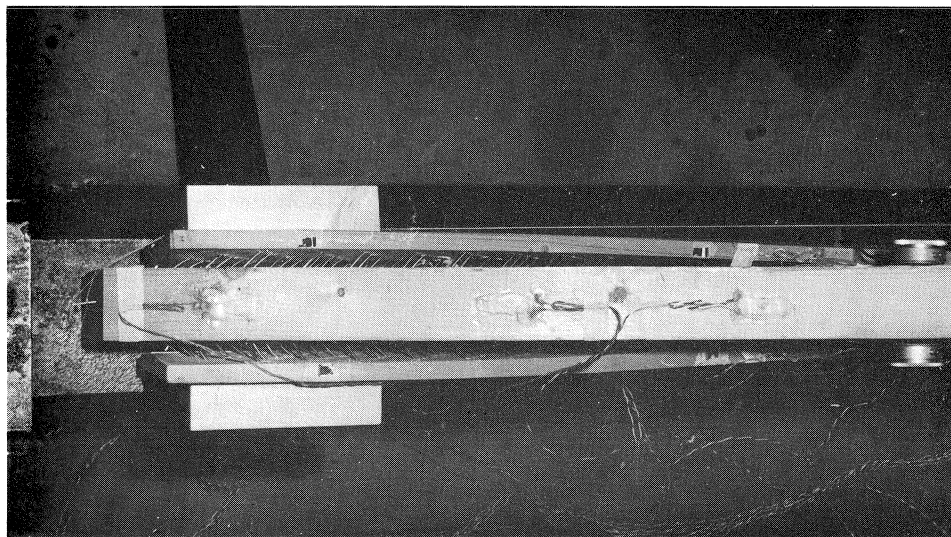


te bereiken dat voor dikwijls voorkomende overspanningsconstructies op een gemakkelijke wijze ontwerpen ter beschikking komen. Een veelvuldig gebruik daarvan zal architecten en constructeurs de ogen heropenen voor de mogelijkheden die de toepassing van hout biedt. Voorts zullen wellicht enkele bedrijven zich gaan toeleggen op het vervaardigen van deze standaardspanten en daardoor in een later stadium gemakkelijker ook overgaan tot het toepassen van andere houtconstructies, b.v. met ringdeuvels. Op deze wijze kan het thans bestaande tekort aan ervaren houtconstructie-bedrijven in de toekomst misschien worden opgeheven.

De vervaardiging van standaardspanten vereist geen bijzondere inrichting van de bedrijven, vooral ook omdat in die spanten alleen maar genagelde verbindingen voorkomen, die bij de gekozen overspanningen tussen 5 en 15 m zeer goed de krachtoverdracht kunnen bewerkstelligen. Er zijn werktekeningen van de standaardspanten gemaakt voor verschillende dakhellingen en toelaatbare belastingen.

Een aantal spanten volgens deze ontwerpen wordt thans in het Stevin-laboratorium beproefd om hun gedrag onder belasting te bestuderen en tevens om nadere gegevens over de genagelde verbindingen zelf te verkrijgen. Voor dit onderzoek werd een bestaande proefopstelling zodanig gewijzigd dat met behulp daarvan constructies tot een lengte van 25 m op willekeurige punten in verticale zin belast kunnen worden. De resultaten van dit onderzoek zijn tot dusverre zeer bevredigend. Enkele spanten worden onderworpen aan langduriger belastingen, om ook kruip- en andere tijdeffecten te bestuderen.

Fig. 7. Bezweken genagelde verbinding.



Bij de korte bespreking van de werkzaamheden op het gebied van de verbindingsmiddelen is het onderwerp lijm niet aan de orde geweest. Hoewel enig oriënterend werk op dit terrein is verricht, is tot nu toe geen uitgebreider onderzoek ter hand genomen. Ten dele is dit te verklaren uit tijdgebrek van de medewerkers van de groep, die zich allen meer bezig houden met research gericht op meer algemeen voorkomende constructiewijzen. Het lijmen van constructies daarentegen is tot nu toe toch nog steeds een zaak van enkele speciaal geoutilleerde bedrijven. Een andere reden om het onderzoek van gelijmde constructies voorlopig uit te stellen is gelegen in het feit dat sinds kort een commissie is ingesteld die het uiterst ingewikkelde onderwerp „lijmen van hout” bestudeert, waaruit wellicht enkele aanbevelingen voor nader onderzoek naar voren zullen komen. De taak, wat betreft het Stevin-laboratorium, zal hierbij vooral liggen op het gebied van het onderzoek van constructies, waarin door anderen goed bevonden lijmsoorten zijn toegepast.

De in het voorgaande beschreven onderzoekingen hebben alle betrekking op de thans reeds meer klassieke houtconstructies, die in de statisch doorzichtige vorm van vakwerken hun ontwikkeling begonnen in en na de eerste wereldoorlog. De hierbij gevolgde gedachte is dat bij overspannende constructies die de belasting in dwarsrichting moeten afvoeren, het materiaal het meest effectief werkt wanneer het ver van de neutrale lijn is verwijderd.

De nieuwere gedachte, nl. om de belastingen af te voeren via een dun gekromd oppervlak, heeft ook bij houtconstructies geleid tot een aantal meer of minder grote toepassingen. Vooral in Engeland worden houten schaaldaken reeds veelvuldig toegepast, terwijl in ons land een begin daarmee is gemaakt, waarbij ook door het Stevin-laboratorium een aandeel is geleverd. Bij deze houten schaaldaken wordt de dakhuid opgebouwd uit kruiselings over elkaar gelegde planken, die op doeltreffende wijze aan elkaar verbonden moeten worden. In Engeland worden daartoe veelal nagels gebruikt, langs de randen van de schaal gecombineerd met lijm. Er bestaat evenwel een tendentie de lagen over het geheel schaaloppervlak op elkaar te lijmen om zo meer stijfheid te verkrijgen. Vooral bij grotere schalen leidt dit tot de vraag of op de bouwplaats met voldoende zorg gelijmd kan worden. Ontwikkeling van montagelassen kan hierbij de mogelijkheid openen voor de prefabricage van kleinere schaalementen.

Uit dit overzicht moge duidelijk zijn geworden, dat de werkzaamheden thans vooral gericht zijn op het opheffen van het tekort aan gemakkelijk toegankelijke gegevens op het gebied van houtconstructies. Daarbij staat op de voorgrond het verschaffen van gegevens over verbindingsmiddelen, die in hun toepassing het eenvoudigst zijn. Dat in dit opzicht grote waarde wordt toegekend aan normen is reeds vermeld. Behalve eventuele nieuwe normen inzake toelaatbare belastingen voor verbindingsmiddelen verdient de in voorbereiding zijnde wijziging van één van de belangrijkste norm-

bladen, de T.G.B. 1955, aandacht. De ingevoerde sterktesortering voor naaldhout, opgenomen in de K.V.H. 1958, maakt herziening van de toelaatbare spanningen voor hout noodzakelijk. Daarnaast vragen zich wijzigende inzichten op het gebied van knikberekeningen de aandacht. In dit overzicht zijn deze en andere onderwerpen niet aan de orde gekomen; volledigheid is trouwens op geen enkel punt nagestreefd.

IR. J. KUIPERS

Staalconstructies

De staalconstructieresearch van de afgelopen vijf jaren in het Stevin-laboratorium geeft een beeld te zien van grote verscheidenheid van onderwerpen, gevolg van een aftasten van het vrijwel onafzienbare gebied. De aard der omstandigheden bracht dit echter mede. Overheid en industrie kregen in toenemende mate belangstelling voor de staalconstructie-research en koppelde daaraan vragen over zeer verschillende onderwerpen, waarop in zo kort mogelijke tijd een praktisch bruikbaar antwoord moest worden gegeven. Zo groeide het aantal onderzoeken tot een totaal, waarvan de diepgang niet altijd even groot was en dat ook niet kon zijn, maar die desondanks niet alleen voor de vragenstellers, maar ook voor de onderzoekers nuttig waren. De grote verscheidenheid van onderwerpen maakte het werken misschien niet gemakkelijker, maar gaf de onderzoekers de kans zich de problematiek van het speurwerk in ruimere zin eigen te maken. Bovendien ontstonden vele waardevolle contacten met de industrie, overheids- en semi-overheidsinstanties.

Ondanks de verscheidenheid zijn er enige hoofdlijnen in dit speurwerk aan te wijzen, zoals het vermoeiingsonderzoek, het onderzoek betreffende lasnaden (zie o.a. fig. 1) en het onderzoek van voorspanbouten.

Wat het vermoeiingsonderzoek betreft, kwam de stimulans van buiten. De eerste aanvrager, een scheepswerf,

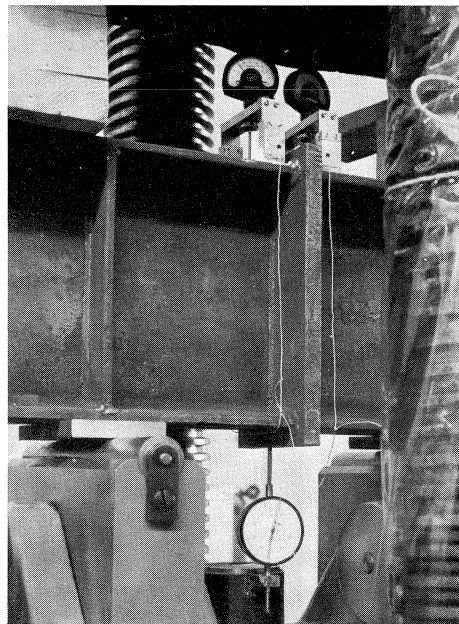


Fig. 1. Hoeklassen (balkverbindingen)
INP tijdens belasting (detail).

wilde weten: „Hoe moet ik de constructie van twee kruisende balken maken, nu blijkt dat de tot nu toe gebruikelijke laspoortjes moeilijkheden geven?” Dit leidde tot een vergelijkend onderzoek tussen balken met laspoortjes en balken waarbij deze poortjes geheel waren weggelaten en waarbij derhalve de samenkomst van een aantal lassen werd geaccepteerd. Het resultaat van de proeven gaf duidelijk aan, dat de laatste oplossing, zeker in dit geval waarbij de constructies na het lassen waren uitgegloeid, verre de voorkeur verdient boven het aanbrengen van laspoortjes. Hoe gevaarlijk bij dynamische belasting beëindigingen van lasnaden op zwaar belaste plaatsen zijn, blijkt duidelijk uit de fig. 2 en 3. Metingen bewezen, dat de spanning aan de bovenzijde van de onderflens zelfs in het midden van het laspoortje aanmerkelijk groter was dan uit de berekening volgde. Hoe de aanbevolen constructie zonder laspoortjes zich in de praktijk heeft gedragen is ons nog niet medegedeeld, maar wij vertrouwen er op, dat zich geen moeilijkheden hebben voorgedaan.

Een ander en zeer langdurig onderzoek was het corrosie-vermoeiingsonderzoek voor de Rijkswaterstaat. Voor de Deltawerken en meer speciaal voor de stalen stuwkleppen in het Haringvliet wilde men een indruk krijgen over de invloed van de corrosie op de vermoeiingssterkte van gelaste orthotrope plaatconstructies. Omdat in dit geval de corrosie gelegenheid moest krijgen haar werk te doen en dus de beproeving per eenheid extra lang zou moeten duren, was het niet eenvoudig om binnen een redelijke tijd zonder al te grote kosten voldoende informatie te krijgen. In het algemeen gesproken gelden deze bezwaren bij beproeving van constructies op vermoeiing altijd. De gehele constructie op ware grootte beproeven is als regel niet mogelijk. Modelproeven op kleine schaal geven een uiterst weinig betrouwbare informatie, omdat de kleine onvolkomenheden, de inwendige en lasspanningen, die juist een grote rol spelen, zich niet op schaal laten verkleinen. De enige mogelijkheid

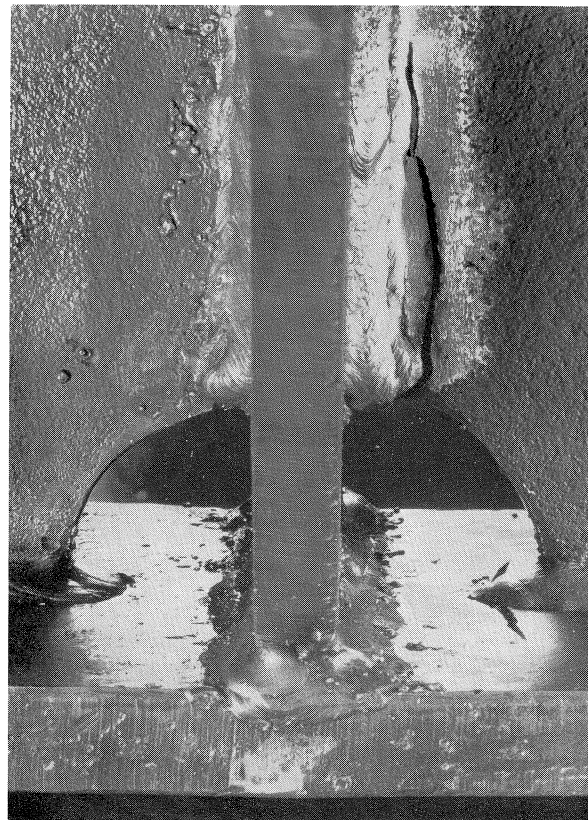


Fig. 2. Scheur na vermoeiingsonderzoek, met laspoortjes.

is dus het beproeven van een deel van de constructie of van een belangrijk constructiedetail op ware grootte. Maar ook dan zijn de moeilijkheden nog niet opgelost. De spreiding in de resultaten is groot, ook al weer onder invloed van kleine onvolkomenheden (lasfouten), van een min of meer gunstige vorm van de las en van lasspanningen. Het aantal benodigde proefuitkomsten is dus groot. Verder is het resultaat nog afhankelijk van de frequentieverdeling van de aan te brengen belasting, waarover in de praktijk nagenoeg niets bekend is. Houdt men de belasting bij de proef constant, zoals gebruikelijk is, dan bestaat de mogelijkheid dat òf de constructie al zeer snel bezwijkt en dus de belasting te hoog gekozen was, òf de constructie in het geheel niet bezwijkt, wat duidt op een te laag gekozen belasting. In beide gevallen is de waarde van de verkregen informatie slechts gering, en om een betrouwbaar resultaat te bereiken zou het benodigde aantal proefresultaten nog groter moeten worden. Omdat de beproeving van constructies tijdrovend en duur is, zal men zich echter zoveel mogelijk moeten beperken en moeten streven naar het verkrijgen van maximale informatie uit een minimaal aantal proefstukken. Dit gold in het bijzonder voor de corrosie-vermoeiingsproeven. Zo werd besloten om de be-

Fig. 3. Scheur na 3-puntsbuigproef, geen laspoortjes.



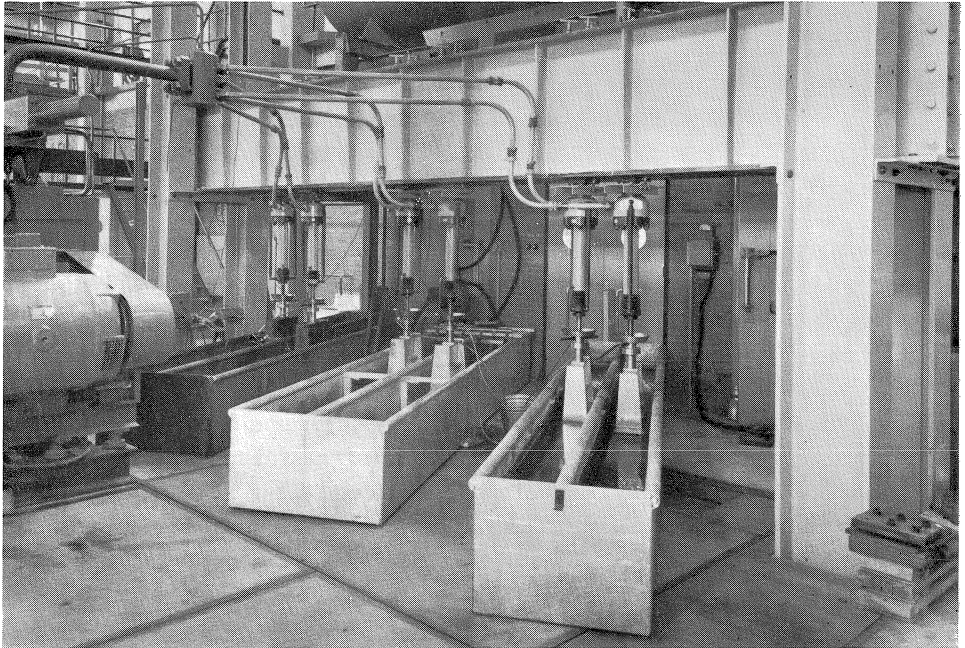


Fig. 4. Vermoeiingsonderzoek. Opstelling van 6 liggers (Haringvlietsluizen); 2 liggers droog, 2 besproeid met zeewater, 2 in zeewater ondergedompeld.

Fig. 5. Breuk van een ligger na 34 dagen ($6,3 \times 10^6$ wisselingen), besproeid.



lasting niet constant te houden, maar te beginnen met een lage belasting gedurende 7 weken, om de corrosie de kans te geven haar werk te doen, en daarna elke week de belasting met 15% te verhogen, zo lang tot elke ligger zou zijn bezweken. Het bleek bovendien mogelijk om zes liggers tegelijkertijd dynamisch op buiging te belasten (te „pulseren”), zie fig. 4.

Begonnen werd met onbeschermdes liggers, besproeid met resp. ondergedompeld in zeewater, terwijl ter vergelijking ook liggers droog werden belast. Hierbij bleek dat de corrosie een onverwacht grote invloed uitoefende. De besproeide zowel als de ondergedompelde liggers bezweken reeds bij de lage belasting, dus voor het einde van de eerste 7 weken. Er kon geen kenmerkend verschil bij de besproeide of de ondergedompelde liggers worden aangetoond. De besproeide liggers vertoonden enige corrosie aan het oppervlak; aan de ondergedompelde liggers was nauwelijks iets te zien. Hieruit moet geconcludeerd worden, dat de breuk werd ingeleid door inter- of transkristallijne corrosie. In deze richting wees ook de plaats van de breuk. Bij de droog gepulseerde liggers, die bij een ongeveer tweemaal zo grote belasting braken, begon de breuk vanuit de spleet tussen de hoeklassen, die het lijf met de op trek

laste onderflens verbonden. Bij de nat gepulseerde liggers werd de breuk ingeleid op de rand van in dwarsrichting in de onderrand aangebrachte stompe lassen aan de onderzijde van de onderflens, dus op een punt waar hoge materiaalspanningen en contact met zeewater samenvielen (zie fig. 5 en 6). Het feit dat bij de droog gepulseerde liggers de breuk vanuit de hoeklassen begon, terwijl bovendien werd aangetoond dat hoeklassen de spleet ertussen niet luchtdicht afsluiten en dus het binnendringen van water (spleetcorrosie!) niet bleken te verhin-

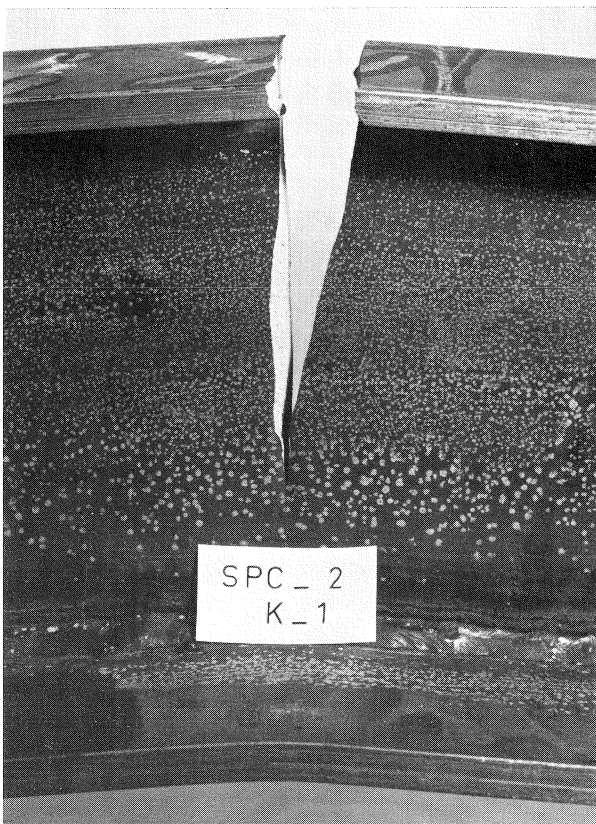


Fig. 6. Breuk van een ligger na totaal 17×10^6 wisselingen in opklimmende belasting (droog).

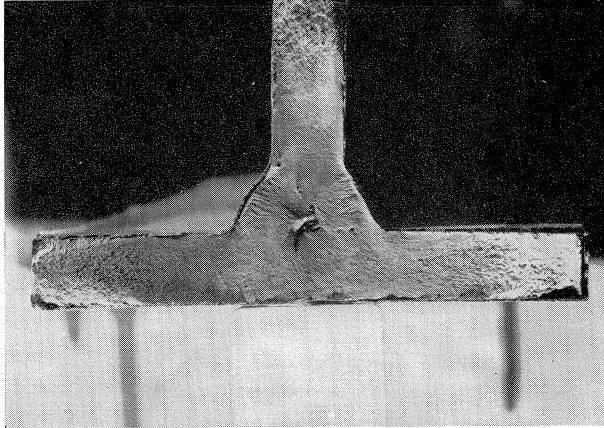


Fig. 7. Breukdoorsnede hoeklasverbinding liggervoet met holte.

deren (zie fig. 7), deed de Rijkswaterstaat ertoe besluiten alle ontworpen hoeklassen door stompe lassen te vervangen.

Na de onbeschermden liggers werden een aantal verzinkte liggers beproefd. Hierbij was geen invloed van de corrosie meer merkbaar. Alle liggers braken bij waarden, die ook bij de droog gepulseerde liggers werden bereikt. Opmerkelijk was dat ook nu de breuk begon bij lasfouten in de K-naden tussen lijf en onderflens en niet bij de stompe lassen in de onderflens zelf. In de proevenseries werden verder nog de materiaal soort en de gebruikte elektrode gevarieerd.

Nu de grote invloed van de corrosie was aangetoond en tevens het nut van een goede bescherming, werd besloten, zij het ditmaal niet voor de Deltawerken, enige proeven met kathodisch beschermde liggers te doen. Het resultaat was ook hier duidelijk. Een onbeschermd ligger brak reeds bij een lage belasting, een gedeeltelijk kathodisch beschermde ligger bij een anderhalfmaal zo hoge belasting en de volledig kathodisch beschermde ligger bij een bijna tweemaal zo grote belasting.

Het vermoeiingsonderzoek heeft zich o.a. ook nog uitgestrekt over het bevestigen van railstoelen door middel van een ongeveer 5 cm dikke lijmlaag op een orthotrope stalen plaatvloer. De lijmlaag bleek wel bestand te zijn tegen de vereiste dynamische belasting. De combinatie van temperaturen van $+60^{\circ}\text{C}$ resp. -20°C en de dynamische belasting echter waren in alle gevallen voor de lijmlagen funest, zodat deze verbinding van railstoel op plaat, althans met de lijmsorten die wij ter beschikking hadden, niet voldoet.

Stappen we nu over van de dynamische sterkte van deze lijmverbinding naar de statische sterkte van meer traditionele verbindingen, dan denken we in de eerste plaats aan de verbindingwijze, die in de laatste decennia een enorme vlucht heeft genomen, het elektrisch lassen. Het behoeft nauwelijks te verwonderen, dat er zowel nationaal in het Centrum voor Lastechniek N.V.L.-

T.N.O., als internationaal in het International Institute of Welding (I.I.W.) organen zijn ontstaan, die zich op uitgebreide schaal bezig houden met alle aspecten van het elektrisch lassen. Waar het de sterkte van lasverbindingen betreft heeft ook het Stevin-laboratorium daaraan deelgenomen. Er werden in de afgelopen jaren, steeds in samenwerking met het I.B.B.C., een aantal proeven gedaan, waarvan in de eerste plaats de proeven op de balk/kolomverbindingen genoemd dienen te worden. Uit de resultaten konden rekenformules worden afgeleid voor zulke op moment en dwarskracht belaste verbindingen. Deze formules werden ook opgenomen in het door commissie XVa van het International Institute of Welding samengestelde document „Calculating formulas for welded connections submitted to static loads”. Verder zijn proeven gedaan ter bepaling van de invloed van de lasser en de elektrodediameter, alsmede van de schaal en het elektrodetype, op de sterkte van hoeklassen. Ook lasverbindingen belast door afschuiving en een buigend moment werden beproefd.

Zeker mag niet ongenoemd blijven de internationale lasproevenserie. Veertien landen hebben zich verbonden gezamenlijk als leden van het I.I.W. een serie proeven uit te voeren op dubbele met hoeknaden gelaste overlapverbindingen. De voorbereiding voor en de opzet van deze proevenserie was in handen van Nederland en wel voornamelijk van het I.B.B.C., onder medewerking van onze groep. De uitwerking van de resultaten van de totale beproeving zal ook in Nederland geschieden. Het Nederlandse aandeel in de serie werd in ons laboratorium beproefd.

Het belang van deze serie proeven is naast het verdiepen van het inzicht in de sterkte van dergelijke verbindingen, in nog overwegender mate gelegen in het bundelen van de research van zoveel verschillende landen, waardoor de gelegenheid wordt verkregen om de resultaten te vergelijken en naar hun bron te beoordelen, resultaten die uiteen kunnen lopen door andere werkwijzen, materialen en elektroden. Het kennen hiervan maakt het voor de toekomst mogelijk over en weer een beter gebruik te maken van de resultaten van onderzoeken op lasgebied in andere landen.

Een veel jongere verbindingwijze is de in de laatste tien jaren in de staalconstructiewereld ontwikkelde toepassing van voorspanbouten. Dit zijn hoogwaardig stalen bouten die in ruime gaten (speling ongeveer 2 mm) worden gestoken, waarna de moer zodanig wordt aangedraaid, dat bekende trekkrachten (voorspankrachten) in de bout worden bereikt. Door deze krachten worden de verbonden platen op elkaar gedrukt. De belasting van de constructie in de richting van de platen wordt dan door de wrijvingskrachten tussen de platen opgenomen. De grootte van de toe te laten belasting is zodoende afhankelijk van de voorspankrachten en van de wrijvingscoëfficiënt der contactvlakken. De voorspankrachten worden – zoals vermeld – verkregen door het aandraaien van de moer van de bout tot een bepaald moment door middel van een moment-sleutel of door de moer, na een eerste aandraaien, nog over een bepaalde

hoek verder vast te draaien. Van beide methoden werd de bruikbaarheid door proeven bewezen (fig. 8 en 9). Meer moeilijkheden geeft de wrijvingscoëfficiënt. Deze is in sterke mate afhankelijk van de hoedanigheid van de eventuele walshuid op het oppervlak. Een gave walshuid vormt een glad oppervlak met een lage wrijvingscoëfficiënt. Om deze laatste zo groot mogelijk te maken dient de walshuid feitelijk te ontbreken en hiertoe worden de contactoppervlakken van de platen behandeld door „staalslinteren” of „vlamstralen”. Ter bepa-

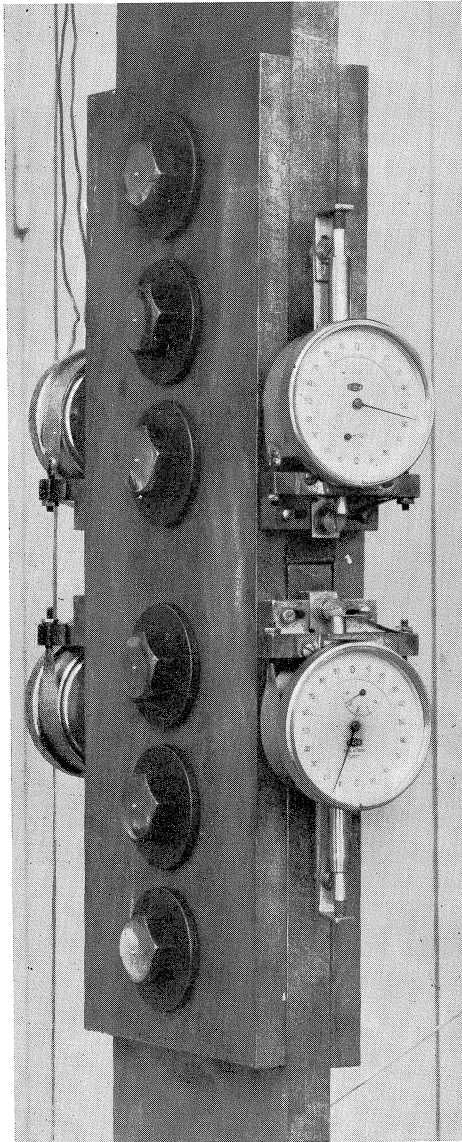


Fig. 8. Meetopstelling proefbelasting van een verbinding met voorspanbouts.

Fig. 9. Tot bezwijken belaste hoekverbinding met voorspanbouts.



ling van de grootte van de wrijvingscoëfficiënt bij gevlamstraalde oppervlakken en de juiste wijze van vlamstralen werd een vrij uitgebreid onderzoek uitgevoerd, met als variabelen o.a. de brandersnelheid, de zuurstofdruk en de duur van de opslag van de platen in de buitenlucht vóór het vlamstralen.

Bij dit onderzoek bleek, dat niet alleen bij onbehandelde maar ook bij gevlamstraalde vlakken de waarde van de wrijvingscoëfficiënt afhangt van de hoedanigheid van de walshuid. Bij nieuwe platen met een gave, sterk hechtende walshuid blijkt het verwijderen hiervan zeer moeilijk te zijn. Voor de verbindingwijze met voorspanbouten is stellig de voorkeur te geven aan platen, die reeds enige tijd buiten opgeslagen zijn geweest, waarbij door onderroest de hechting van de walshuid is afgenomen. Als regel zal dit wel gebeurd zijn, maar soms zijn nog wel moeilijkheden te verwachten. Op het ogenblik bestaan er plannen om een dergelijk onderzoek ook voor gestaalslingerde oppervlakken te verrichten.

Van de overige onderzoekingen op verbindingen kan nog worden genoemd de in rekening te brengen gatverzwakking bij verbindingen met klinknagels c.q. zwarte bouten. Eén van de bestaande formules kon voor symmetrische gatpatronen als juist worden aangewezen. Het nadeel dat deze formule bij berekeningen minder goed hanteerbaar was dan andere bestaande formules werd opgeheven door het samenstellen van een eenvoudig diagram, waarin de bepalende gataftrek snel is af te lezen.

Uiteraard is het in dit korte bestek onmogelijk om diep in te gaan op het hoe en waarom van de proeven van de afgelopen jaren. Het is zelfs niet doenlijk om een volledig overzicht te geven van de zeer grote verscheidenheid van verrichte proeven. Een verscheidenheid, die zoals reeds werd vermeld, ontstond door de talrijke grotere en kleinere problemen, die de aandacht kwamen vragen en die soms tot de randgebieden van het staalconstructievak leidden. Is hiervan de vorenbeschreven beproeving van de gelijkde verbinding tussen railstoel en orthotrope plaat reeds een voorbeeld, ook de proeven voor de bepaling van de vorm van de rubber aanslaglijst voor de stalen deur van een kernreactor, zodanig dat de vereiste afdichting werd verkregen, vallen daaronder.

Een min of meer werktuigbouwkundig probleem wordt gevormd door het „kruipen” van assen. Het verschijnsel heeft niets te maken met het kruipen van een materiaal (het onder constante belasting verder vervormen van dit materiaal met de tijd). Met het kruipen van assen wordt bedoeld het zich in lengterichting verplaatsen van een draaiende as, die statisch gezien alleen loodrecht op die richting is belast. Dit verschijnsel openbaart zich in opvallende mate bij assen, die vrij zijn opgelegd op twee schotten, welke door wrijvingskrachten meedraaien, terwijl voorts de as uitkragend loodrecht op de asrichting en niet meedraaiend (dus bijv. door middel van een kogellager) wordt belast. Deze assen verplaatsen zich, onafhankelijk van hun draairichting, in de richting van het uitkragende gedeelte. Aldus opgelegde belaste assen

komen o.a. voor bij de opleggingen van de balans van een ophaalbrug op de hameistijlen. Belet men de horizontale verplaatsing door het aanbrengen van een borg, dan kunnen er grote krachten volgens de asrichting ontstaan. Metingen aan een bestaande ophaalbrug wezen uit dat de as, die de verbinding tussen balans en hameistijl vormde, vóór de demontage een axiale kracht van ongeveer 85 t moest hebben uitgeoefend. Dit kruipverschijnsel treedt niet alleen op in deze gevallen, ook bij kabelwielen op symmetrisch belaste assen en bij afstandsbussen werd zulk kruipen geconstateerd. Door theoretische beschouwingen en proeven kon de aard van het verschijnsel worden opgespoord en ten dele verklaard. Alle problemen zijn nog niet opgelost en het betreffende onderzoek wordt dan ook nog voortgezet.

IR. J. DE BACK

Betonconstructies

De aard van de onderzoeken bij de groep Beton is in de afgelopen jaren van een gevarieerd karakter geweest, omdat de onderzochte problemen over vele terreinen verdeeld lagen.

De eerste objecten van onderzoek waren verkleinde modellen van schalen. Bij een bolschaal (diameter 5,40 m) ging het er om een inzicht te verkrijgen in de spanningstoestand, die ontstaat als de koepel onder de rand niet continu ondersteund is, maar door kolommen een ondersteuning heeft die een periodieke storing geeft aan de schaal (fig. 1). Hierbij speelt vooral een rol de verhouding der stijfheden van de schaal en de randbalk. Behalve voor de gebruikelijke functie, het opnemen van de horizontale spatkracht van de schaal, dient de randbalk om de reacties over te brengen naar de kolommen. De daarbij optredende vervormingen hebben uiteraard tot gevolg een variatie van de momenten die van de rand uit in de schaal worden opgewekt. Dit is ook door de metingen bevestigd. Deze verschillen tussen het spanningsverloop in verschillende meridianen vervlakken echter naarmate men een parallel verder van de rand af beschouwt. Door de snelle demping en de geringe absolute waarde van de momentenstoringen dicht bij de top valt de grens van het storingsgebied niet goed te bepalen. De metingen werden ook beïnvloed door de onvermijdelijke storingen t.g.v. de wijze van belasten. Daarom is ook theoretisch aan dit probleem gewerkt en werd een programma voor de ZEBRA ontwikkeld. Met dit programma is het nu ook mogelijk sneller voor meerdere gevallen het storingsverloop na te gaan met andere randbalkafmetingen en een andere openingshoek van de bolschaal. De afmetingen van de randbalk waren in dit model kleiner gemaakt dan uit een praktische dimensioneringsberekening

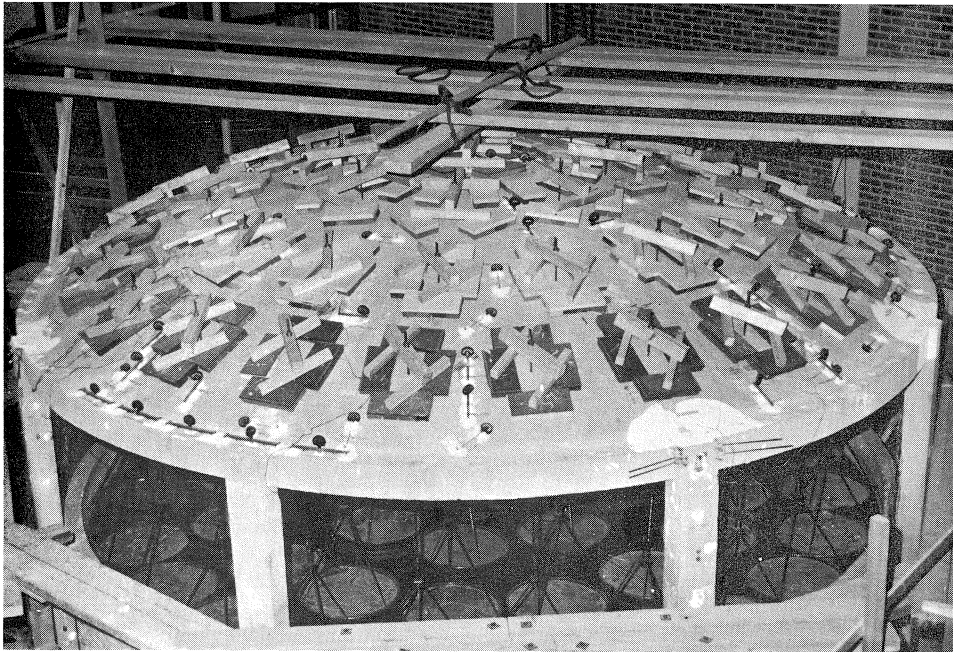


Fig. 1. Model van de bolschaal. De belasting werd aangebracht door middel van 48 met grind gevulde stalen vaten, die in een naar behoefte met water te vullen bassin waren opgehangen. Door onderverdeling van deze puntlasten werd een gelijkmatig verdeelde belasting benaderd. Op de schaal werden mechanische rek- en krommingsmeters alsmede rekstrookjes aangebracht.

volgde, omdat uiteraard te verwachten was dat de randbalkbelasting tussen de kolommen minder zou zijn dan die bij de axiaal-symmetrisch ondersteunde koepel. De krachtsverdeling tussen randbalk en schaal bleek echter nog gunstiger te zijn.

Een ander onderzoek werd op een hyparschaal ($5 \times 5 \text{ m}^2$) verricht. Hierbij konden zowel de elastische spanningsverdeling nagegaan worden als de verschijnselen bij het scheuren en bezwijken. De metingen leverden belangrijke gegevens over de samenwerking van schaal en randbalken. De draagkracht van deze schaalconstructie bleek onvermoed hoog.

Voorts werden modelonderzoekingen uitgevoerd op een hogewand-ligger op vier steunpunten, waarover nog weinig onderzoek verricht was (en dan veelal met behulp van foto-elastische methoden). Dit onderzoek heeft vooral aan het licht gebracht welke invloed er uitgaat van de invoering van de steunpuntsreactie in de ligger (fig. 2 en 3).

Zolang het gaat om een elastische spanningsverdeling in een (nog) voldoende homogeen materiaal – waarop feitelijk de toegepaste mechanica volgens de elasticiteitsleer berust – is beton c.q. microbeton niet altijd het meest geschikte proefmateriaal. Vandaar dat in de afgelopen jaren enkele onderzoekingen,

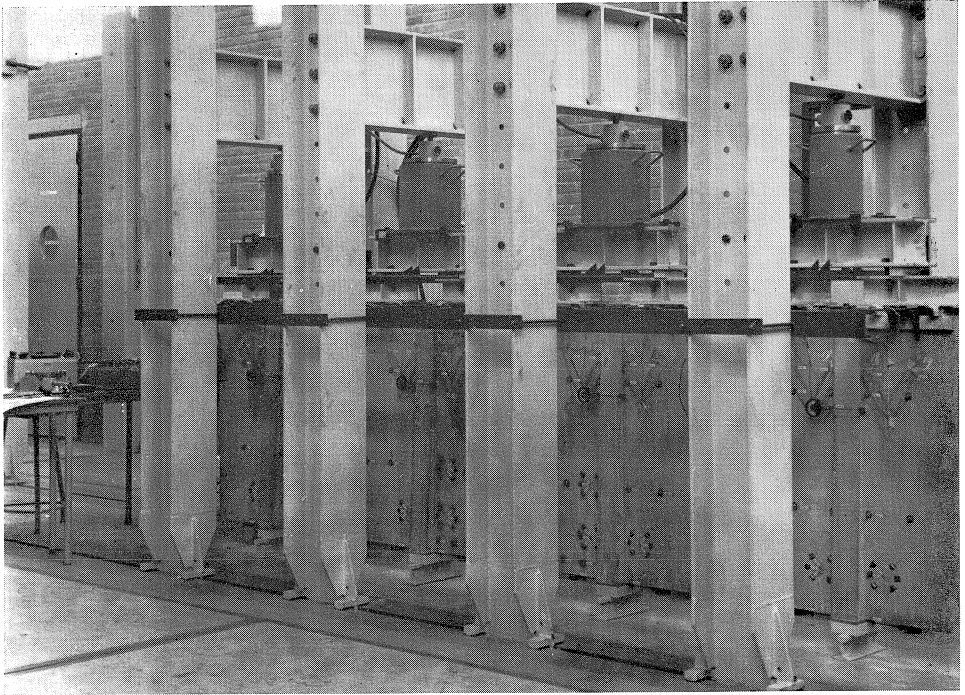


Fig. 2. Opstelling van de modelproef op een hoge-wand-ligger op vier steunpunten. De belasting werd uitgeoefend door vier vijzels, waarvan de krachten via een statisch bepaald hulpsysteem op vele punten van de bovenrand werden overgedragen. De steunpuntsreacties werden door taps toelopende kolommen in de wand gevoerd.

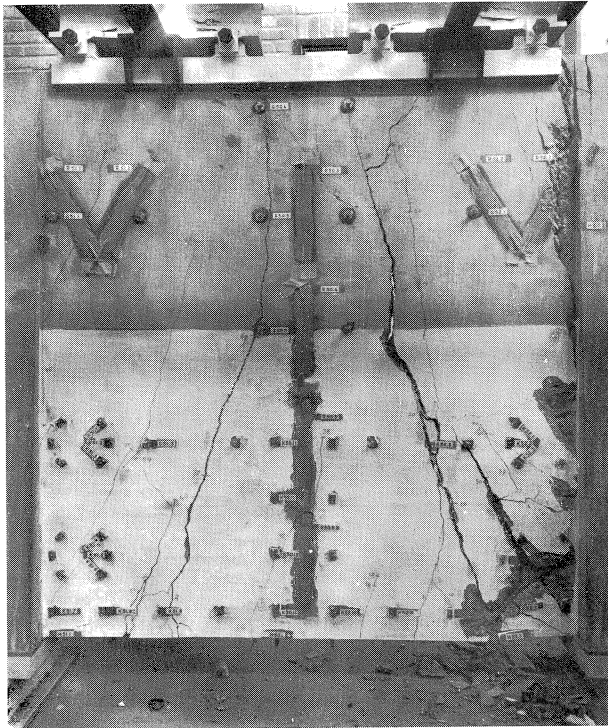


Fig. 3. Detail van het voorgaande model na belasting tot breuk. Scheuren en verbrijzeling tengevolge van dwarskrachten en schuifkrachten langs de „kolommen” deden het model bezwijken.

hoewel voortgekomen uit de betonpraktijk, op modellen uit een ander materiaal werden verricht; als voorbeeld kan worden genoemd de voortzetting van het onderzoek van continue hoge liggers, dat met de foto-elastische methode werd verricht. Het object leende zich hiervoor bij uitstek. Weliswaar vormen in de wand de kolomachtige verdikkingen, dienende voor het invoeren van de steunpuntsreacties in de ligger, een onregelmatigheid, doch in de ligger zelf heerst een tweedimensionale spanningstoestand. In aansluiting bij de uitkomsten van het betonmodel werd nu onderzocht hoe de vormgeving van de „kolom” dit spanningsbeeld in de wandligger beïnvloedde. De door DISCHINGER gegeven theorie blijkt niet geheel op te gaan.

Andere objecten, die van kunstharsen werden gemaakt, waren modellen van een stuwdam en van een spiraaltrap. In dit geval werd lamellon resp. perspex gekozen. Hoewel men met deze materialen geen last heeft van een onzekerheid in de elasticiteitsmodulus en van storingen t.g.v. krimp of stort-heterogeniteiten, vereist de gevoeligheid t.a.v. kruip speciale voorzorgen.

Wil men het gedrag bij breuk- of bezwijktoestanden onderzoeken dan is het gebruik van (micro)beton noodzakelijk, daar het hier gaat om de reserve-draagkracht tot het vloeien van het staal is ingetreden. In zulke gevallen wordt uiteraard wel over het gehele belastingstraject gemeten om de overgang van elastische naar de zgn. plastische krachtsverdeling te kunnen waarnemen. Op dit gebied zijn series proeven verricht op balken van verschillende soorten lichtgewichtbeton (fig. 4). De draagkracht bij constructies van dit materiaal wordt sterk bepaald door de aanhechting aan het wapeningsstaal. Men moet dus zorgen, dat het criterium voor bezwijken niet bepaald wordt door deze aanhechting. Bij toepassing van een grotere staaldoorsnede – en dus groter omhullingsoppervlak – door lagere toelaatbare staalspanningen te gebruiken, kan bereikt worden dat het bezwijken van de balk in de betondrukzone of door het vloeien van het staal optreedt en de verhouding tussen toelaatbare en breukbelasting voldoende veilig is. Het is duidelijk dat ook op andere wijzen

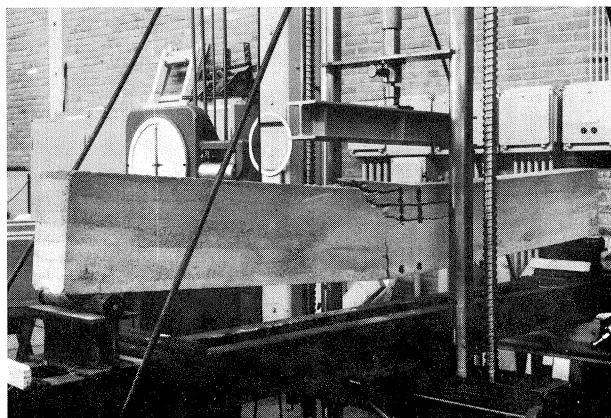


Fig. 4. Bezwijktoestand van een lichtgewicht betonbalk. In het middendeel van de ligger, waar een constant moment heerste, werden over de hoogte rekmetingen verricht.

de samenwerking van wapening en lichtgewichtbeton verbeterd kan worden. Daarbij zijn echter meer grootheden betrokken, hetgeen een beoordeling van verkregen resultaten en het trekken van praktische conclusies belemmert.

Steeds meer wint het inzicht veld, dat de in een constructie toelaatbare spanningen bepaald worden door eisen van verschillende aard. Scheurvorming en bruikbaarheid van de constructie na grote belasting bepalen andere grenzen dan die, resulterende uit de sterkte-eis, nl. deling van de bezwijklast door een veiligheidscoëfficiënt. Bij een vergelijkend onderzoek van verschillende typen paddestoelkopvormen werden de verschijnselen rondom de kop van de gereduceerde modellen nagegaan tot het bezwijken (fig. 5). In die gevallen waar door wapening en vorm de weerstand tegen dwarskracht c.q. pons kleiner was dan tegen buigende momenten, trad het bezwijken plotseling op, in tegenstelling tot de gevallen, waarin door vloeien van het staal een geleidelijk ontstaan van grote vervormingen was op te merken.

Een onderzoek van spanbetonbalken had ook tot doel om de sterkte tegen

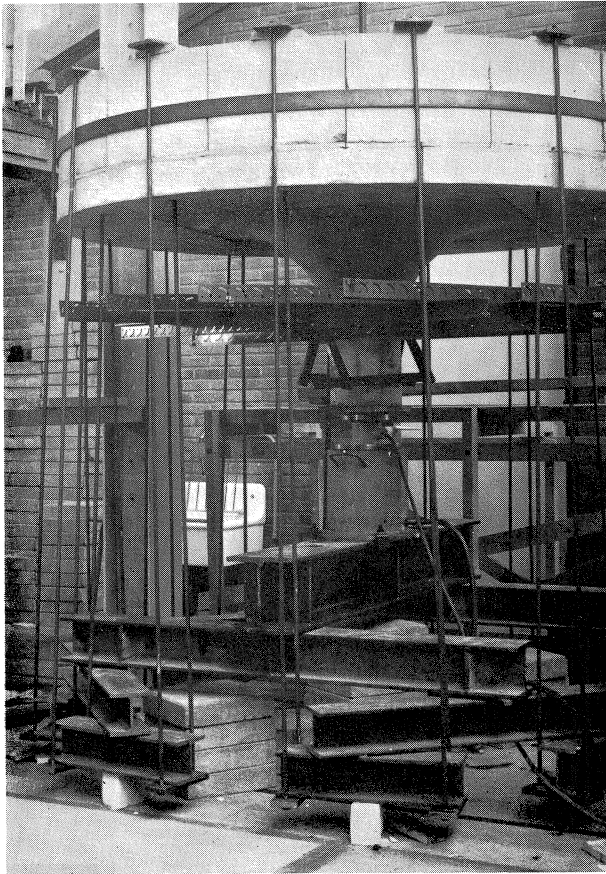


Fig. 5. Proefopstelling van een model van een cirkelvormig deel van de paddestoelvloer met een hyperbolische kolomkop. De profielbalken en hangstaven dienden om de kolomreactie (vijzeldruk) statisch bepaald als een gelijkmatig verdeelde randbelasting van het vloerelement te doen werken. De straal van het plaatdeel was zo gekozen, dat langs deze rand theoretisch alleen dwarskracht en geen moment heerste.

dwarskracht te bepalen. Door verschillende verhoudingen tussen moment en dwarskracht met de belastingsvijzels op te wekken werd een oriënterend onderzoek verricht aan twee profieltypen. Bij deze voorgespannen balken bleek dat de marge tussen de belasting, waarbij dwarskrachtscheuren zich openbaarden, en de bezwijklast in verschillende gevallen nog groot was. Dit onderzoek zal nog voortgezet worden om in bepaalde factoren een nader inzicht te verkrijgen.

Een andere groep van onderzoekingen betrof de kwaliteitsbeoordeling van materiaal. Het gaat hierbij om nieuwe werkwijzen, waartoe te rekenen zijn de toepassing van niet-destructieve methoden, zoals die met ultrasonore trillingen of met de Schmidthamer. De betrouwbaarheid van deze methoden is van verschillende voorwaarden afhankelijk en zij vereisen daarom deskundige toepassing. In de afgelopen jaren werden deze methoden steeds meer gebruikt.

Op het gebied van keuring is in de laatste jaren een nieuwe methode ontwikkeld voor de bepaling van de treksterkte van beton: de zgn. Braziliaanse splijtproef. Deze proef is echter nog niet gestandaardiseerd. In het Stevin-laboratorium zijn daarom verscheidene series beproefd om de invloed van verschillende proefomstandigheden na te gaan: de grootte van het proefstuk, de belastingssnelheid en vooral de breedtemaat van de belastingsstrip bij toepassing van kuben i.p.v. cilinders. Dit laatste vormt in zekere zin een vervolg op het indertijd bij het I.B.B.C. verrichte onderzoek, waarbij aangetoond werd dat de oorspronkelijke proef op cilinders ook op kuben kan worden toegepast. Voor de bepaling van de splijtsterkte van beton zal dan echter rekening gehouden moeten worden met de wijze van beproeven.

Een onderzoek waarbij de beoordeling van het materiaal niet kan gebeuren volgens een gestandaardiseerde proef is bij spuitbeton voorgekomen. De kubusproef van $20 \times 20 \times 20$ cm³ blijkt daarvoor niet geschikt, omdat in deze vorm geen homogeen en dus representatief monster verkregen kan worden. Voor een sterktebeoordeling werd daarom een vergelijkend onderzoek verricht tussen kleine gespoten kuben (ribbe 7 cm) en een plaat van deze dikte die na verharding verzaagd werd tot kuben. Hierbij bleek dat ook de kleine kuben niet een juiste waarde voor de sterkte kunnen geven, daar de sterkte van de gezaagde kuben ruim 70% hoger lag. Het wordt echter moeilijk een vergelijkingsmaatstaf te vinden t.a.v. gewoon gestort beton, omdat hierbij de druksterktecijfers bepaald worden met de voorgeschreven kuben van $20 \times 20 \times 20$ cm³, en de omrekeningsfactoren niet voetstoots gebruikt mogen worden. Men zal dus spuitbeton t.a.v. de sterkte als een aparte bouwstof moeten beoordelen.

Een andere categorie van proeven is gericht op gegevens voor praktijkdoeleinden. Bij de bouw van een kernreactor kwam de vraag aan de orde hoe groot de druk op de bekisting aangenomen zou dienen te worden en welke doorbuiging van de afzonderlijke platen tussen de steunende baddings te verwachten zou zijn. Over de horizontale druk van de verhardende specie werden onderzoekingen verricht met de triaxiaalpers, die interessante gegevens op-

leverden omtrent het verloop van deze druk met de tijd. In dit geval was een bindingsvertragende toevoeging bijgemengd.

Voor de bepaling van de doorbuiging van de bekistingsplaten werd een proefopzet gemaakt met een platte waterdichte kist, waarin water onder een zelfde druk werd gezet als in de werkelijkheid door de specie zou worden uitgeoefend.

Enkele keren is aan werkelijke objecten gemeten. Daarbij werd dezelfde ervaring opgedaan, die ook elders in binnen- en buitenland is gemaakt, nl. dat de omstandigheden voor uitgebreidere buitenmetingen voor de bepaling van de krachtsoverdracht in constructies niet altijd geschikt zijn. Tenzij voldoende voorzorgen worden genomen kunnen de stijfheid van de bekisting, zakkingen daarvan, temperatuursvariaties, onregelmatigheden in de constructie e.d. de metingen zo beïnvloeden, dat een interpretatie moeilijk of onmogelijk wordt. Dergelijke metingen kunnen als controle hun nut hebben, voor het verschaffen van een wezenlijk beeld is echter aan een proefmodel in het laboratorium de voorkeur te geven.

Voor onderzoek op het gebied van de betontechnologie werd in geconditioneerde ruimten een kruip- en vrieslaboratorium ingericht. Eerst werd in het

Fig. 6. Opstelling in het kruiplaboratorium van een serie prisma's, die onafhankelijk van elkaar tot verschillend percentage van de breukbelasting onder druk gehouden worden. Met afneembare rekmeters wordt periodiek de verkorting tussen de meetpunten bepaald.



kader van een met buitenlandse instituten gecoördineerd programma een uitgebreid kruiponderzoek op betonprisma's verricht. De eerste serie kruipproeven nam enkele jaren in beslag, waarin o.a. de apparatuur ontwikkeld en opgesteld moest worden (fig. 6). Deze eerste serie leverde gegevens op over het kruipgedrag bij verschillende betonsamenstellingen en onderscheiden belastingspercentages t.a.v. de breukbelasting. Dit onderzoek werd met een tweede serie voortgezet.

Een programma van onderzoek naar het gedrag bij vriestemperaturen van geprefabriceerde betonelementen met ingestorte natuurstenen bekleding is in voorbereiding.

Terzake van het onderzoek naar weerbestendigheid zijn proefmonsters gemaakt, die aan de buitenlucht worden blootgesteld. Voor de beoordeling wordt gewerkt aan het ontwikkelen van een methode om microfoto's te kunnen maken van het betonoppervlak.

IR. P. WARMENHOVEN

Toegepaste wiskunde

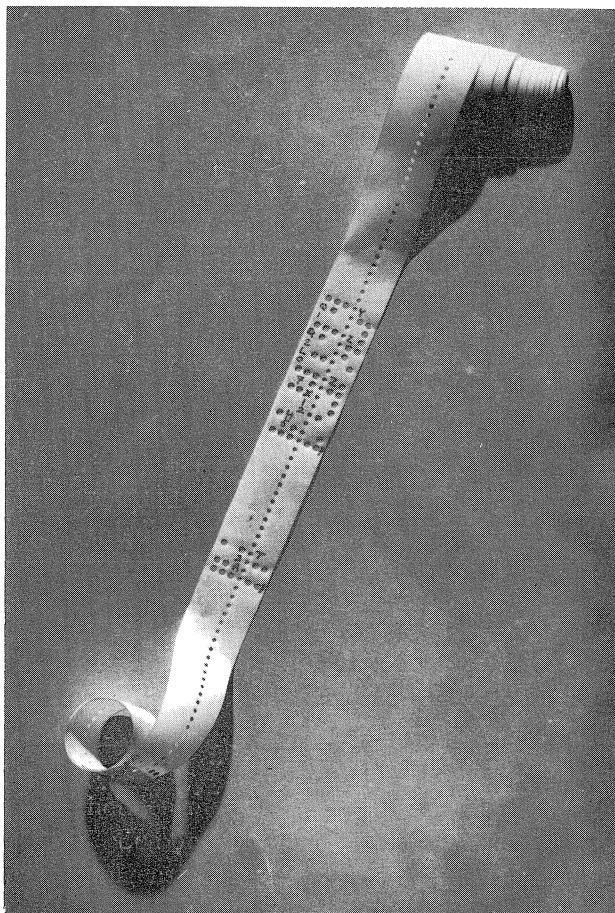
Bij het verrichten van experimenteel spuurwerk is het gewenst, de resultaten te vergelijken met theoretische uitkomsten voor hetzelfde geval. Bij een berekening vooraf is aan te geven op welke punten bij de meting gelet moet worden, en ook welke dimensionering van het model of proefstuk de meeste informatie zal opleveren. Na de meting wordt door vergelijking met een berekening het trekken van conclusies vergemakkelijkt. Tenslotte brengt het opzetten en uitwerken van metingen een hoeveelheid rekenwerk mede, die – in tegenstelling met wat hierover in het algemeen gedacht wordt – dikwijls even omvangrijk is als bij theoretische behandeling van problemen.

Op den duur is het aantal van dergelijke werkzaamheden in het Stevin-laboratorium zo gegroeid, dat (nu ongeveer een jaar geleden) een hierop gespecialiseerde groep is opgericht. Deze groep heeft met het Mathematisch Instituut van de Technische Hogeschool en met een overeenkomstige groep bij het I.B.B.C. veel contact; deze samenwerking is zeer nuttig gebleken.

Wat het uitwerken van meetresultaten betreft, is de groep enige malen geraadpleegd over vrij kleine statistische problemen. Intussen wordt de bekwaamheid op dit gebied opgevoerd, want in het verleden is wel gebleken, dat metingen aanleiding kunnen geven tot uitgebreid statistisch werk. Ook tijdens de opzet van experimenten kunnen statistische beschouwingen nodig zijn.

De berekening van de krachtsverdeling in gehele constructies of hun elementen is tot nu toe de meest voorkomende opgave van de wiskundegroep geweest. Zo zijn beschouwd de spanningsverdeling rond ringdeuvels, in door-

Fig. 1. Bepaald fotogeniek zijn de wiskundige werkzaamheden niet. Intussen is de opgave die met de ponsband wordt gegeven, zo moeilijk dat de „ZEBRA” een half uur moet rekenen voor hij aan het uitvoeren van de resultaten toe is.



| | | |
|--------------|---|----|
| -0.808479777 | - | 2 |
| +0.306605853 | - | 3 |
| -0.127570913 | - | 4 |
| +0.383614865 | - | 6 |
| -0.635008397 | - | 8 |
| +0.136720017 | - | 10 |
| +0.312654157 | + | 2 |
| -0.884704941 | + | 2 |
| +0.103309781 | + | 3 |
| -0.573260405 | + | 2 |
| +0.121775898 | + | 2 |
| -0.713768087 | + | 0 |
| -0.123179287 | - | 1 |
| -0.193428921 | + | 0 |
| +0.359818845 | - | 1 |
| -0.516271398 | - | 2 |
| +0.474760784 | - | 3 |
| -0.202686396 | - | 4 |
| -0.154680547 | + | 1 |
| +0.595880158 | - | 1 |
| +0.606945765 | - | 2 |
| -0.197857247 | - | 2 |
| +0.216791411 | - | 3 |
| -0.843685230 | - | 5 |

*Randtoering in een
gelijkzijdige hyperbol*

| <i>dwaarsmoment</i> m_y | <i>schuifkracht</i> n_{xy} | <i>bijkomende</i> <i>verplaatsing</i> w_b | | |
|------------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|---------------|
| -0.271859141 | - | 6 | +0.941838093 - 2 +0.120439279 + 0 | <i>midden</i> |
| -0.191559942 | - | 4 | +0.282329089 - 2 +0.101584627 + 0 | |
| -0.192975172 | - | 4 | -0.856412143 - 2 -0.889684724 - 1 | |
| +0.821589324 | - | 4 | +0.930867244 - 2 -0.371323779 + 0 | |
| +0.948615929 | - | 4 | +0.560745780 - 1 +0.794816077 - 1 | |
| -0.420910581 | - | 3 | +0.723631008 - 1 +0.999990351 + 0 | <i>rand</i> |

+0.200000000 + 3 *verhouding pijl: dikte*
(0.2 10^{+3} = 200)

gaande bovenranden van vakwerkspanten, in kuben bij de Braziliaanse splijtproef. Het instabiliteitsgevaar bij verstijvingsliggers en ook bij gewone staven onder druk met buiging is onderzocht.

Het merendeel van de uitgevoerde berekeningen heeft echter betrekking op bijzondere bouwconstructies, platen, schijven en vooral schalen. Om bij de berekening van schalen voldoende snel tot resultaten te kunnen komen, is het nodig deze berekening te systematiseren. We moeten immers bij voorkeur al vóór zijn op het experiment, en om de proef op een bepaalde schaal zo vruchtbaar mogelijk te laten zijn, is het soms wenselijk een serie schalen door te rekenen.

In de dertiger jaren werd als rekentijd voor een schaaldak ongeveer een maand opgegeven. In het laatste decennium is door het I.B.B.C. aan reken-schema's gewerkt die de rekentijd tot enkele dagen hebben bekort. Om verdere versnelling te bereiken is inschakeling van de elektronische rekenmachine noodzakelijk.

Er wordt al geruime tijd gebruik gemaakt van de hulp van de ZEBRA¹⁾; zo zijn al berekend: gelijkzijdige hypparschalen met rechte ingeklemde randen, cilindrische tanks onder windbelasting, bolschalen met ringbalken al of niet axiaal-symmetrisch ondersteund. Hoewel de machine over een schaalberekening nu maar 5 tot 30 min. doet (afhankelijk van het probleem), kunnen het programmeren en de controle van het programma nog ettelijke dagen vergen. Nu zijn voornoemde programma's wel voor tientallen schalen gebruikt, maar ze zijn toch niet algemeen genoeg: er wordt een bepaalde opleggingswijze aangenomen, en bij een bepaalde belastingstoestand worden bepaalde spanningsgrootheden in bepaalde punten uitgerekend. Om het programmeren te vereenvoudigen en herhaaldelijk controleren te vermijden is het gewenst om voor b.v. een cilinderschaal altijd dezelfde programma-kern te gebruiken, onafhankelijk van de verdere situatie.

Nu kent de mechanica inderdaad methoden om een constructie-element bij de berekening tamelijk onafhankelijk van de verdere constructie te behandelen. Een eenvoudig voorbeeld biedt de hier getekende doorgaande ligger (fig. 2). Als we op het vrij opgelegd gedachte middenveld behalve de belasting q ook nog bij de steunpunten buigende (vasthoud-)momenten $-1/12 q l^2$ aanbrengen is de hoekverdraaiing aan de einden nul, zodat de staaf hier zonder meer aansluit bij de rest van de (onbelaste) constructie. De vasthoudmomenten moeten nu worden vereffend;

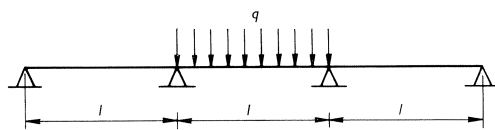


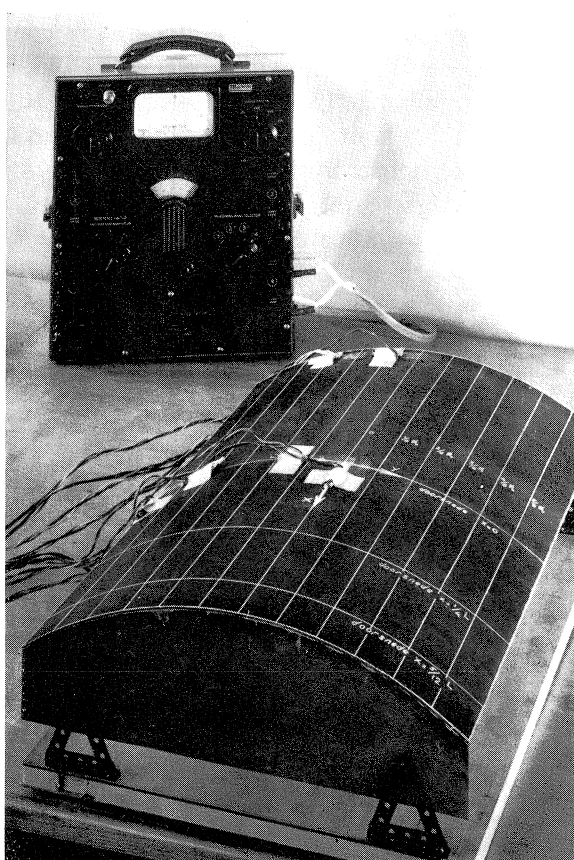
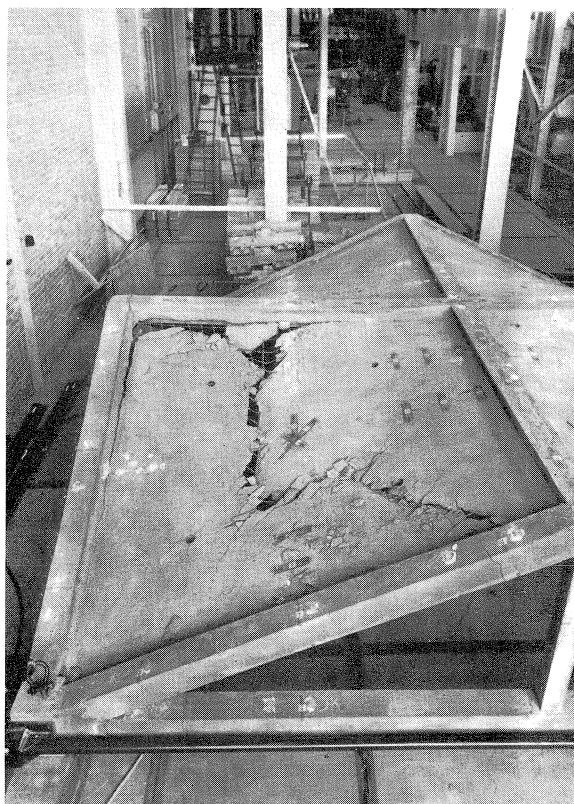
Fig. 2. Ligger op vier steunpunten, middenveld belast.

¹⁾ Afkorting gevormd door de beginletters van de woorden: **z**eer **e**envoudige **b**inaire **r**eken-**a**utomaat.

Fig. 3. Twee onderzoeken die ook aanleiding waren voor veel theoretisch speurwerk.
 Boven: een hypparschaal die pas bezweek bij een gelijkmatige volbelasting van 6000 kgf/m^2 .
 Onder: een cilinderschaal, waarbij de spreiding van een voorspankracht is nagegaan.
 Deze onderzoeken zijn uitgevoerd door de hogeschoolfonds-assistenten C. van der Schenk en W. R. de Sitter.

als men nu bedenkt dat de verdraaiingsstijfheid van het middenveld $2EI/l$ en van het randveld $3EI/l$ is, kan men de verdraaiingshoek φ en tenslotte de definitieve momentenverdeling vinden. Deze bekende methode (die immers een belangrijk element bij Crossberekeningen vormt) heeft voor ons doel het volgende gunstige aspect: waarden als $^{-1/12} ql^2$ en $2EI/l$ hebben alleen met de middenligger van het voorbeeld iets te maken; ze zijn onafhankelijk van de verdere constructie.

Bij schalen kan in principe dezelfde methode worden gevolgd. Wel wordt de zaak gecompliceerder: in plaats van één graad van vrijheid heeft de schaalrand er vier. Dit houdt in dat φ wordt vervangen door een vectormatrix met vier elementen (= vier vervormingsgrootheden). De stijfheidseigenschappen van de schaal worden weergegeven door de elementen van een matrix 4×4 . De matrixnotatie is gemakkelijk te leren en maakt de berekening overzichtelijk; nog belangrijker is echter dat bij moderne rekenauto-



maten vaak subprogramma's voor het rekenen met matrices aanwezig zijn. Zo heeft b.v. het Mathematisch Instituut ZEBRA-programma's ter beschikking voor het vermenigvuldigen, inverteren enz. van matrices, die zonder meer in de schalenprogramma's kunnen worden opgenomen.

Er zijn tot nu toe twee soorten standaardprogramma's voor schalen gemaakt. Het eerste geeft de aansluitgrootheden, uitgedrukt in de onbepaalde coëfficiënten, die bij het oplossen van de fundamentele differentiaalvergelijking optreden. Het „loslaten” is tot nu toe als een ad hoc probleem behandeld, maar zijn de onbepaalde coëfficiënten eenmaal gevonden, dan zorgt een tweede standaardprogramma voor het berekenen van iedere verlangde spannings- of vervormingsgrootte in elk gewenst punt.

Uitgaande van de bestaande rekenschema's is de beschreven formele opzet gemakkelijk te realiseren. Zo zijn voor cilinderschalen standaardprogramma's gemaakt, gebaseerd op T.N.O.-rapport BI-58-23 en voor hyppar- en elparschalen ¹⁾ met gebogen randen met behulp van T.N.O.-rapport BI-59-26, en tenslotte voor bolschalen met Stevin-rapport bs. 10. De bibliotheek wordt verder uitgebreid, ook met steun van het I.B.B.C.

Het grote nut van dergelijke programma's is gebleken bij de proeven op hypparschalen, die door de groep Meettechniek zijn verricht. Bij één van de beproefde schalen was de overeenkomst met de theorie minder goed dan bij de andere. Om de oorzaak hiervan op te sporen is de theorie nog eens grondig doorgewerkt en het vermoeden rees, dat één van de aansluitvoorwaarden moest worden veranderd. Inderdaad werd zo betere overeenkomst met het experiment verkregen (fig. 4). Om de betekenis van dit verschijnsel nader te bezien is een serie schalen berekend; het bleek toen, dat voor een bepaald kritiek gebied van één der parameters het verschil tussen de uitkomsten bij de oude of de nieuwe randvoorwaarden zeer groot wordt. Intussen staat nog niet vast, of de nieuwe randvoorwaarde werkelijk beter is; daarom is een aanvullend experiment met een schaal van kritieke afmetingen voorgesteld. Bij het gehele onderzoek zijn 52 schalen berekend. Als men zich voorstelt, hoeveel tijd dit enige jaren geleden gevegd zou hebben, dan is de vooruitgang door het beschikbaar zijn van de elektronische rekenautomaat wel duidelijk. Maar tevredenheid is nooit volkomen: om aan de beurt te komen bij de ZEBRA moet men enige dagen wachten; voorts passen niet alle standaardprogramma's samen in het instructiegeheugen van de machine, wat de organisatie bemoeilijkt. De T.H. gaat echter een snellere machine met grotere capaciteit aanschaffen, zodat de bedoelde moeilijkheden in de toekomst ook zullen verdwijnen.

Het blijft altijd nodig om voor de praktijk naar vereenvoudigde rekenmethoden te zoeken, die het mogelijk maken om ook zonder „elektronisch brein”

¹⁾ „Hyppar” is een afkorting voor hyperbolische paraboloiden, „elpar” voor elliptische paraboloiden.

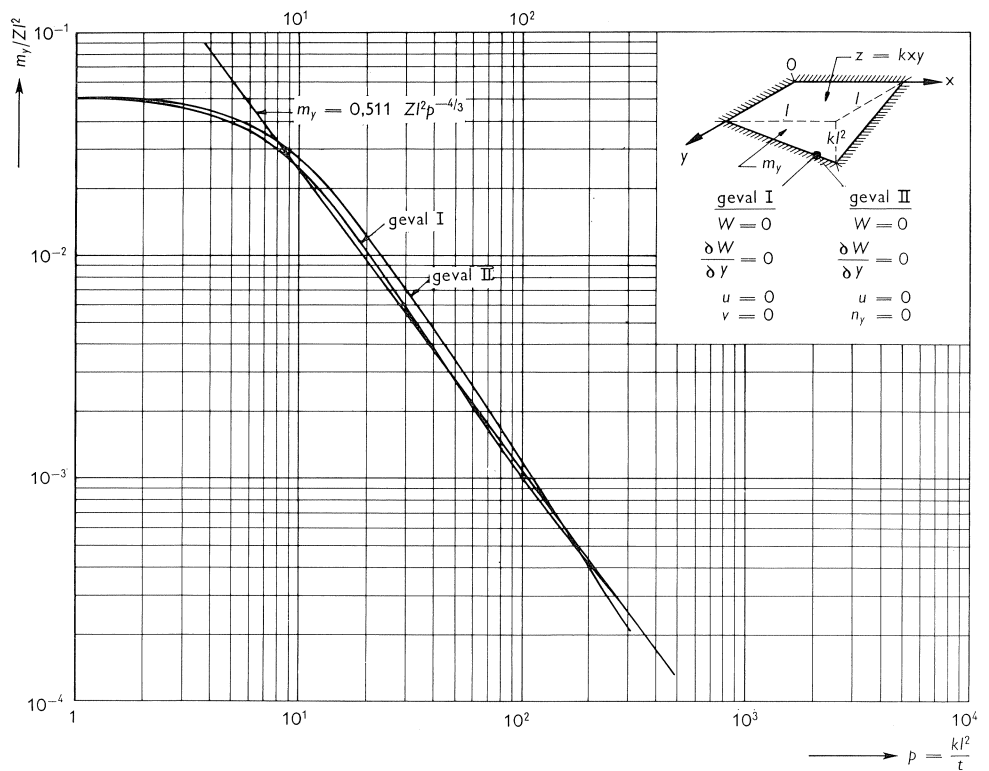


Fig. 4. Het inklemmingsmoment bij een gelijkzijdige hypparschaal, uitgezet als functie van de verhouding pijl - dikte.

in korte tijd een voorontwerp van bijzondere bouwconstructies te maken.

Weliswaar kan ook het kleinste ingenieursbureau zich de hulp van zo'n brein verschaffen door rekentijd te huren bij de grote rekenmachinefirma's, dus bereikbaarheid is niet het probleem. Men moet zich evenwel inzicht verschaffen in de krachtswerking van een constructie - inzicht dat belangrijker is dan numerieke uitkomsten - en daarvoor is zèlf rekenen nuttig. Bovendien is nog lang niet voor alle gevallen een exacte rekenmethode beschikbaar.

Om deze reden is onder meer het resultaat van het grote onderzoek op hypparschalen omgewerkt tot een eenvoudige methode, die het mogelijk maakt de consequenties van constructieve beslissingen snel na te gaan. Omgekeerd wordt nu een bij het I.B.B.C. ontwikkelde eenvoudige methode voor axiaalsymmetrisch belaste bolschalen, gepubliceerd in IBC-mededelingen januari 1958, vergeleken met ZEBRA-uitkomsten.

Een ander voorbeeld van op de praktijk gerichte berekeningen leveren de eerder vermelde berekeningen van staven op druk en buiging. In samenwerking met de groep Houtconstructies is getracht om, uitgaande van voor de materialen staal en hout redelijk geachte gegevens, toelaatbare belastingen voor zulke staven te bepalen. Men kan langs deze weg ook tot een knikvoor-

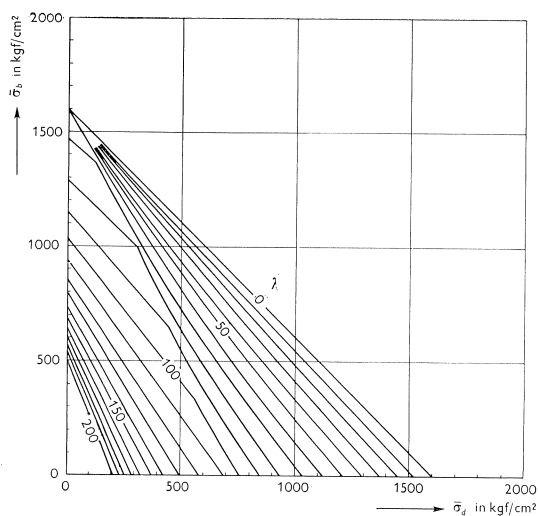


Fig. 5. Toelaatbare spanningscombinaties voor op druk en buiging belaste stalen staven (Qm 37), gebaseerd op $a_0/k = \lambda/200$.
 a_0 = aanvangsexcentriciteit;
 k = kernstraal;
 λ = slankheid.

schrift komen, waarbij dan in de gedrukte staaf buiging wordt veroorzaakt door een toevallige aanvangsexcentriciteit (zie fig. 5). In deze zin uitgewerkte berekeningen

zijn aan de T.G.B.-commissie aangeboden als basis voor bouwvoorschriften op dit gebied.

IR. H. W. LOOF

Methoden van modelonderzoek en meettechniek

Over de afgelopen vijf jaar kan deze werkgroep binnen het Stevin-laboratorium als een voortzetting worden beschouwd van het Laboratorium voor experimenteel spanningsonderzoek, waarvan de ontwikkeling parallel liep met de opkomst van de bouwresearch in Nederland. Haar doel is het verschaffen van zo nauwkeurig mogelijke inlichtingen over het gedrag van een constructie ten aanzien van spannings- en krachtsverdelingen, vervormingen en stabiliteit.

Het behoeft dan ook geen betoog dat een model op dezelfde, mathematisch beschreven wetmatigheid gebaseerd moet zijn als de werkelijke uitvoering. Het visuele beeld echter, dat bij verschillende modelmethoden mede door optische effecten wordt gesteund en vastgelegd, heeft het bijbehorende voordeel dat het van nature beter aan het inzicht appelleert dan de meer abstracte wiskundige vorm. Beide benaderingswijzen hebben hun mogelijkheden en beperkingen, doch zij voeren tezamen tot een oplossing die ten slotte in cijfers wordt vastgelegd.

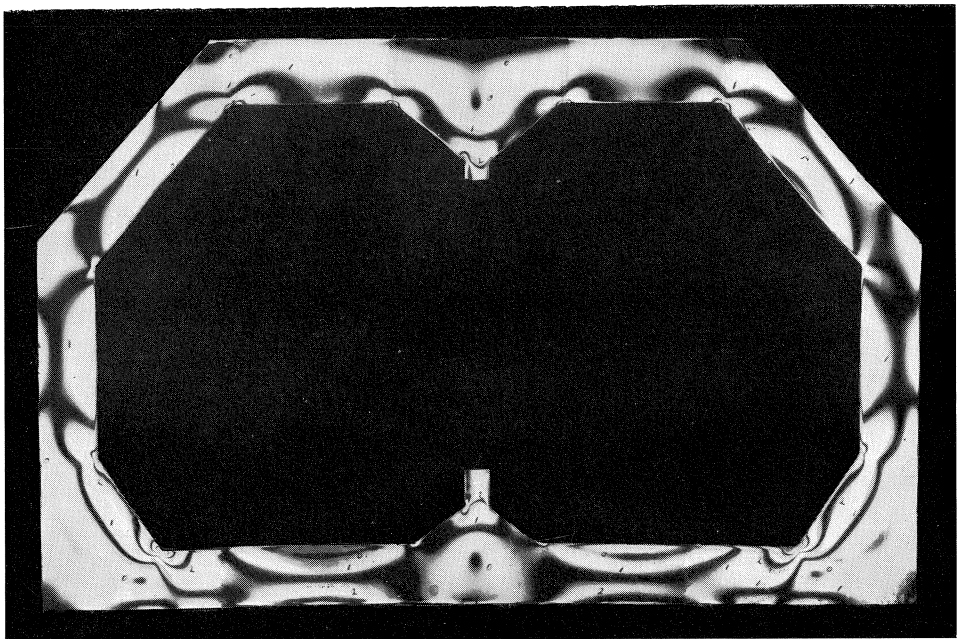
Een interessante methode van spanningsonderzoek is die, waarbij gebruik wordt gemaakt van het optisch effect van dubbele breking, dat zich voordoet onder invloed van optredende spanningen in bepaalde transparante materialen. Vroeger stond voor dit foto-elastisch onderzoek alleen glas ter beschikking, dat door zijn geringe treksterkte en moeilijke bewerkbaarheid als modelmateriaal minder geschikt was. Eerst door de ontwikkeling op het gebied der kunstharsen, met hun gunstiger verhouding tussen de breuksterkte van het materiaal en de mate van dubbele breking, is het toepassingsgebied voor het meten aan modellen van constructies sterk verruimd.

In een dergelijk transparent model, geplaatst in een bundel gepolariseerd licht, verschijnen onder belasting twee stelsels lijnen, namelijk de isochromen en de isoclinen. De isochromen geven informatie over het verschil van de hoofdspanningen in ieder punt, terwijl de isoclinen de richting van de hoofdspanningen aangeven.

Fig. 1 geeft het isochromenpatroon weer in een tunneldoorsnede, die overeenkomstig de werkelijkheid is belast. De kleurenopname (fig. 2a) van het model van een bewegingsarm (fig. 2b) voor de sluizen in het Haringvliet geeft beter weer, dat de isochromen gekleurde lijnen zijn, in tegenstelling tot de isoclinen, die als zwarte lijnen worden waargenomen.

Wanneer wij een soortgelijke opname (fig. 3) beschouwen van een model van het belaste eindschot van de nabla-ligger, die op het ogenblik als onderdeel van de sluizenbouw in het Haringvliet (Deltawerken) uitgevoerd wordt (fig. 4),

Fig. 1. Isochromen-patroon in model van tunneldoorsnede.



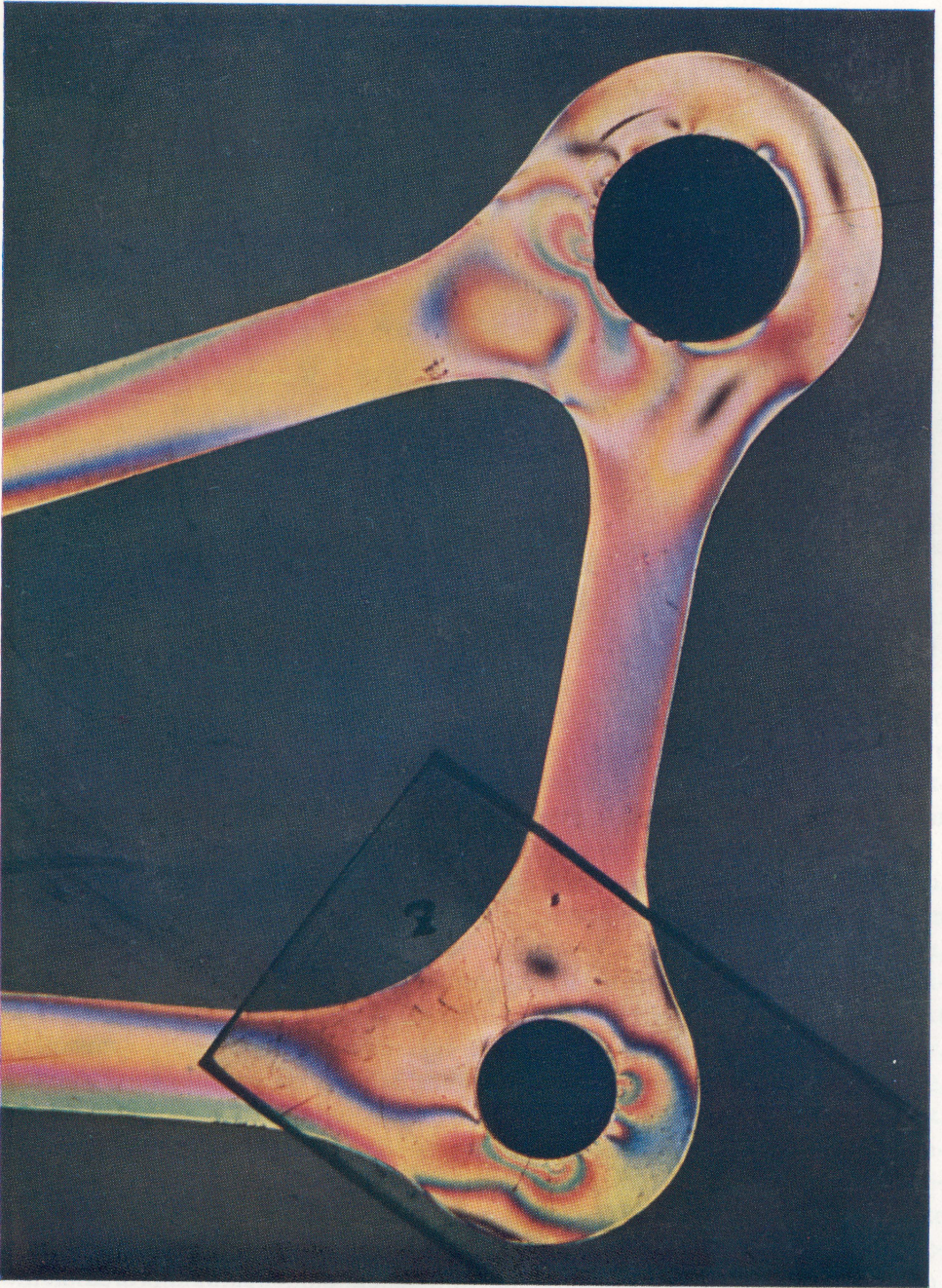


Fig. 2a. Foto-elastisch onderzoek model van bewegingsarm voor Haringvlietsluizen (isochromen-beeld).

kan het onderzoek worden genoemd naar de spanningsverdeling rond een trekpaal. Fig. 6 (zie blz. 42) toont aan, dat de grootste krachtsoverdracht zich nabij de voet van de paal ontwikkelt.

Een andere methode, waarbij van optische hulpmiddelen gebruik wordt gemaakt, is de moiré-methode voor het bepalen van de buigende en wringende momenten in vlakke platen. Naast het onderzoek van verschillende vrijdragende plaatconstructies, waaronder een platform voor de pier in Scheveningen, werd een nieuwe richting ingeslagen naar de modeltechniek voor elastisch ondersteunde platen. Dit bleek van belang voor het ontwerp en de berekening van wegen en van start- en rolbanen. Bij dit vraagstuk staat de plaat als zodanig niet meer in het middelpunt van de belangstelling, doch de samen- en wisselwerking tussen plaat en dragende ondergrond. Ongeacht de spanningsverdeling in de fundering onder de plaat als gevolg van de belasting op de plaat, is een modeltechniek ontwikkeld voor de berekening van de krachtsverdeling in de plaat, onder invloed van beide krachtswerkingen.

Om het gestelde vraagstuk ten aanzien van de krachtsverdeling in een startbaanplaat te kunnen benaderen, dient eerst het gedrag van de funderingsgrondslag ter plaatse bekend te zijn. Dit gedrag wordt in de literatuur samengevat door een bepaalde constante, „beddingsconstante” genaamd. Het blijkt echter dat deze constante geen werkelijke constante is, doch een factor die sterk afhankelijk is van de wijze waarop hij wordt bepaald. Omdat bij de overgang van de werkelijkheid naar het model en omgekeerd alleen echte constanten met elkaar kunnen worden vergeleken, werd een nieuwe procedure uitgewerkt waarbij twee constanten voor de fundering worden vastgesteld.¹⁾ Een analoog geval wordt gevonden in de grootheden E en ν voor de gangbare bouwmaterialen.

Door deze procedure in situ en ook op de modelfundering toe te passen, kon, met inachtneming van de schaalwet, een plaatmodel van perspex op een schuimrubber „ondergrond” worden vervaardigd. Dergelijke modellen, waarvan de figuren 7 en 8 een beeld geven, werden ten behoeve van het ontwerp en de bouw van nieuwe startbanen op Nederlandse vliegvelden gebruikt met zeer bevredigend resultaat. Fig. 9 geeft een aantal moiré-opnamen weer, zoals deze werden verkregen bij verschillende posities van de plaatbelasting, welke o.a. ter controle eveneens op de werkelijke baan werden aangebracht. Het eigen gewicht is hier in rekening gebracht door middel van „gewichtskammen”, omdat een spiegeland oppervlak voor het gebruik van de moiré-methode moest overblijven. Het moiré-patroon blijkt door een geschikte keuze van de onderlinge afstanden der „gewichtskammen” niet te worden beïnvloed, zodat van een gelijkmatig verdeelde belasting kan worden gesproken. Anderzijds blijft er voldoende vrij oppervlak over om het moiré-patroon te kunnen waarnemen.

¹⁾ In een volgende aflevering van Heron zal dit probleem nader worden beschouwd.

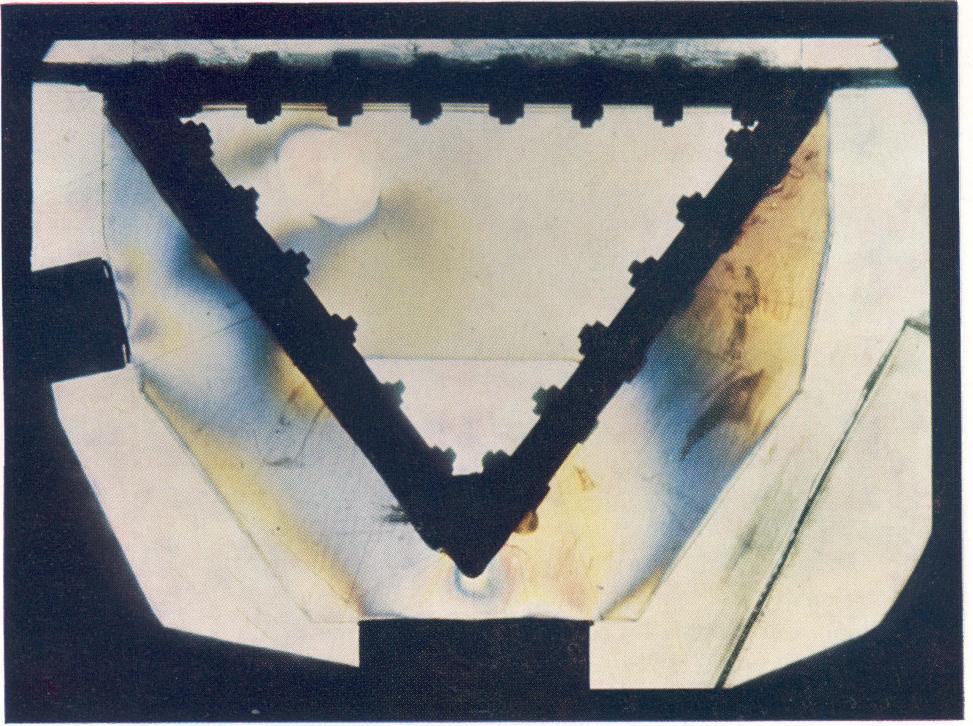


Fig. 3. Foto-elastisch onderzoek eindschot van de Nabla-ligger (brug over spuisluizen Haringvliet).

Fig. 4. Eindschot Nabla-liggerbrug in werkelijkheid.

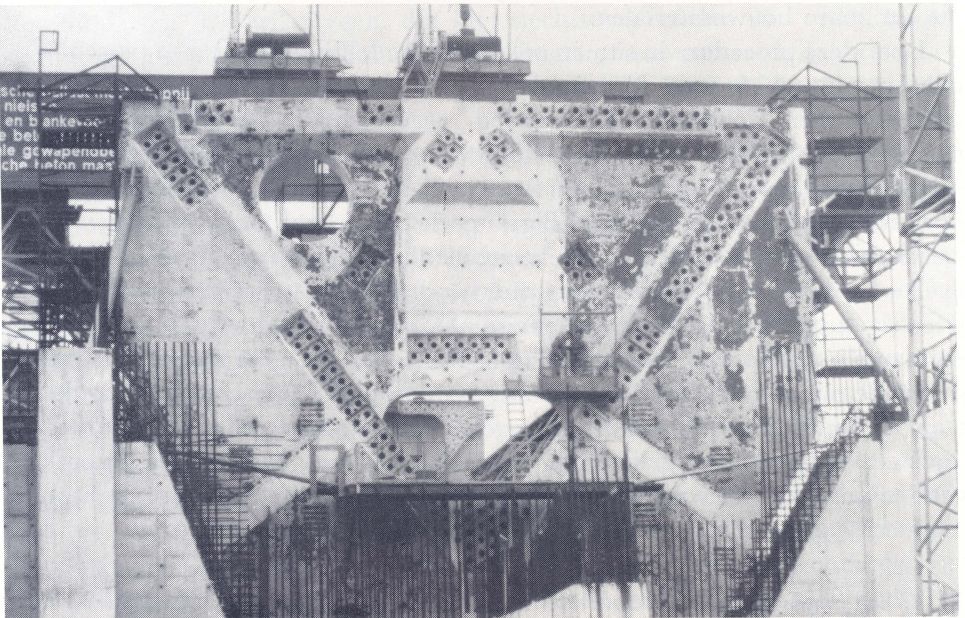
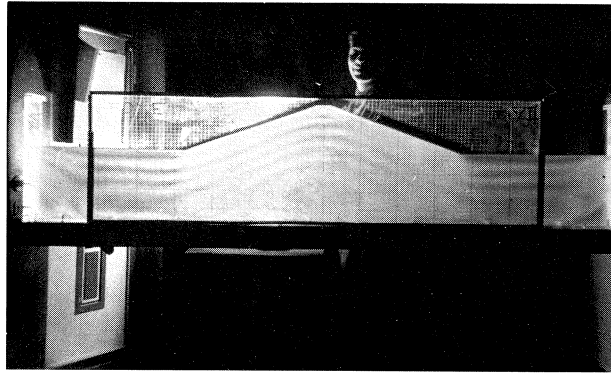


Fig. 5. Isochromen-beeld van de spanningstoestand in een dijk.



Nog een belangrijk vraagstuk betrof het bepalen van invloedsvlakken voor een startbaan, teneinde het effect van een rollende belasting te kunnen nagaan. Hierbij werd gebruik gemaakt van een nieuw ontwikkelde elektrische krommingsmeter, waarbij automatisch rekening wordt gehouden met de dwarscontractie. Bij dit metertje, met zeer kleine meetlengte, is gebruik gemaakt van de driepunts-differentieformule om de kromming uit de verticale verplaatsing van de middentaster te berekenen. Wordt uitgegaan van de vierpunts-differentieformule, dan kunnen we door geschikte plaatsing van meet- en steunpunten de kromming meten aan de rand van een plaat. Op deze wijze kunnen daar nu gegevens worden verkregen, die zich anders aan onze waarneming onttrekken (4-punts krommingsmetertje, zie fig. 10).

Wanneer wij onder „diverse” modelmethoden verstaan alle andere methoden waarbij niet van spanningsoptiek of van moiré-effect wordt gebruik gemaakt, zoals bijv. aligneerspiegeltjes of rekstrookjes, dan kunnen hieronder weer verschillende onderzoeken over de afgelopen vijf jaar worden gegroepeerd.

Het Philips paviljoen op de Expo-1958 (Brussel), opgebouwd uit een aantal hyperbolische paraboloideschalen, zal voldoende algemeen bekend zijn. Dat deze schalen zijn opgebouwd uit geprefabriceerde platen van normaal 5 cm dikte en door voorspanning hun onderlinge samenwerking kregen, is misschien minder bekend. Interessant is dat *vooraf* de zekerheid aangaande sterkte en stabiliteit werd verkregen door een uitgebreid modelonderzoek bij het I.B.B.C. en het Stevin-laboratorium (fig. 11).

Ook andere vormen van hyparschalen waren het onderwerp van diepgaande studie. Het vervaardigen van de hiervoor nodige modellen vormde een vraagstuk apart. Een gietprocédé met koudhardende plastic werd gevolgd, waarbij de mallen-fabricage enigszins te vergelijken is met die in een metaalgieterij. Allereerst werd een basismal vervaardigd van lichte vulmaterialen en lijm, en afgewerkt tot een zo glad mogelijk oppervlak. Hierop werd beton gestort, dat na verharding in spiegelbeeld de juiste vorm bezat. Op deze vorm werd weer beton gestort, zodat het laatstverkregen oppervlak de juiste vorm

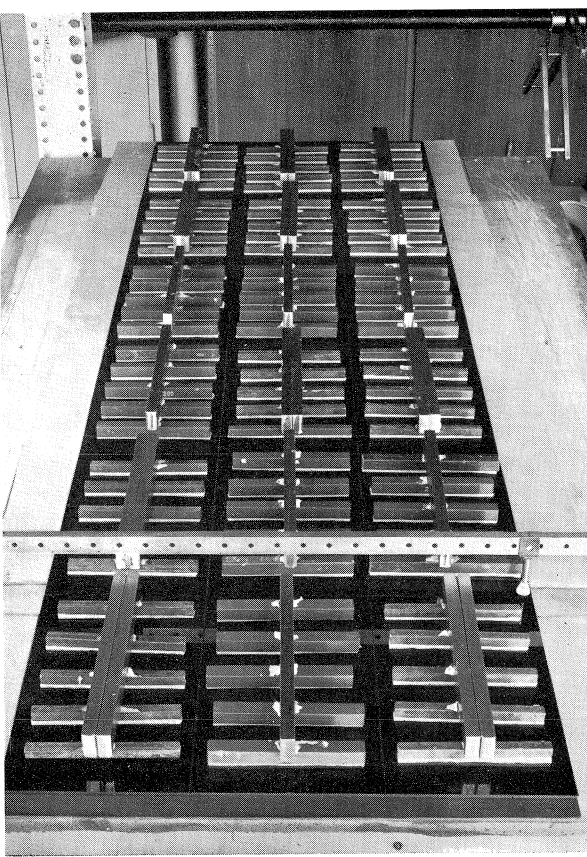


Fig. 7.

Fig. 8.

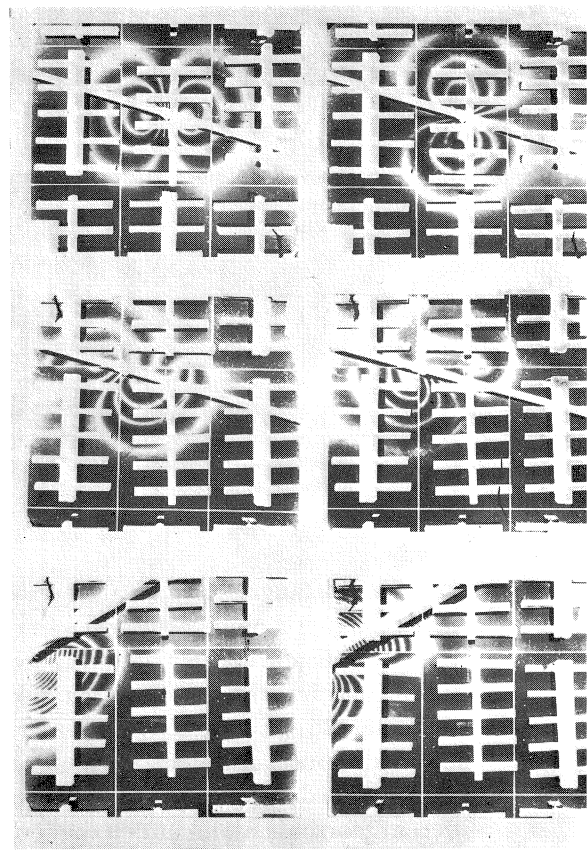
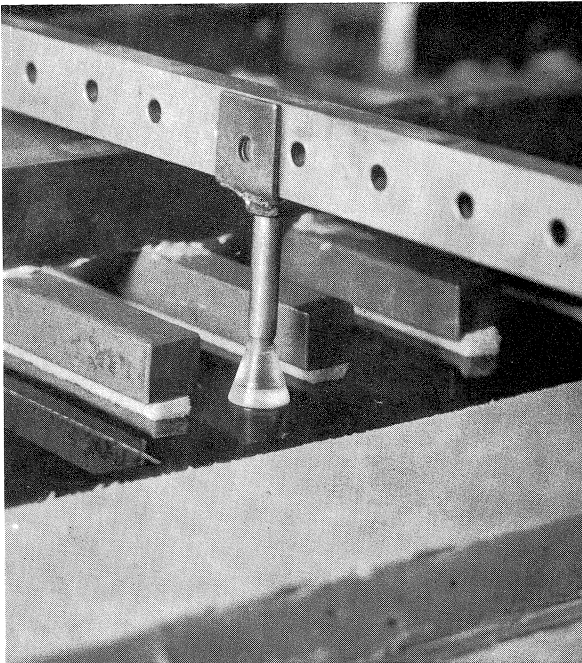


Fig. 9.

van de eerste mal had. Tussen beide betonmallen kan nu kunstharz worden gegoten tot een nauwkeurig hyppar-model met bijv. een dikte van 2 mm (figuren 12 en 13). De met behulp van deze modellen voor verschillende belastingsgevallen en wijzen van ondersteuning verkregen meetresultaten dienden ter controle van langs de weg van berekening verkregen spanningsverdelingen. In het bijzonder werd aan deze modellen ook onderzocht of de theoretische overwegingen, op grond waarvan bepaalde randvoorwaarden noodzakelijk zijn om de zgn. rekloze verbuigingen in het schaaloppervlak te voorkomen, juist zijn.

De bewegingsarm voor de sluisen in het Haringvliet, waarvan de construc-

Fig. 7. Modelonderzoek van startbanen: belastingsysteem.

Fig. 8. Detailopname model van startbaan in opstelling voor moiré-onderzoek.

Fig. 9. Moiré-opnamen van startbaan bij verschillende posities van de plaatbelasting.

Fig. 10. Het 4-punts krommingsmetertje.

Fig. 11. Triplexmodel van het Philipspaviljoen op de Wereldtentoonstelling 1958 te Brussel, onder belasting overeenkomend met het eigen gewicht van de constructie. („Philips Technisch Tijdschrift”, no. 5, jrg. 20, 1958, pp. 125–160.)

Fig. 10.

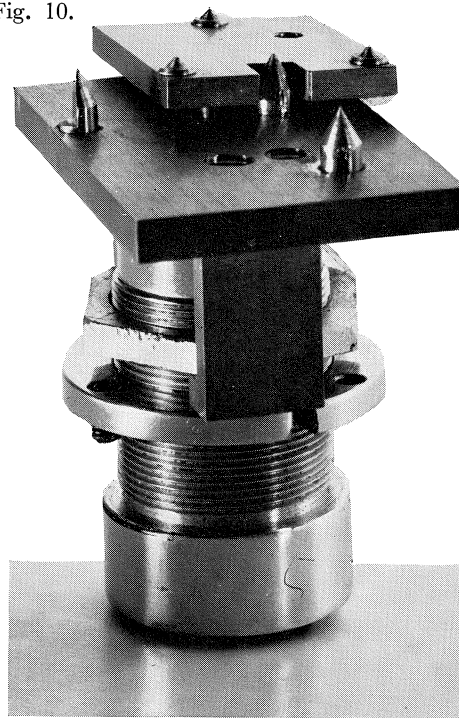
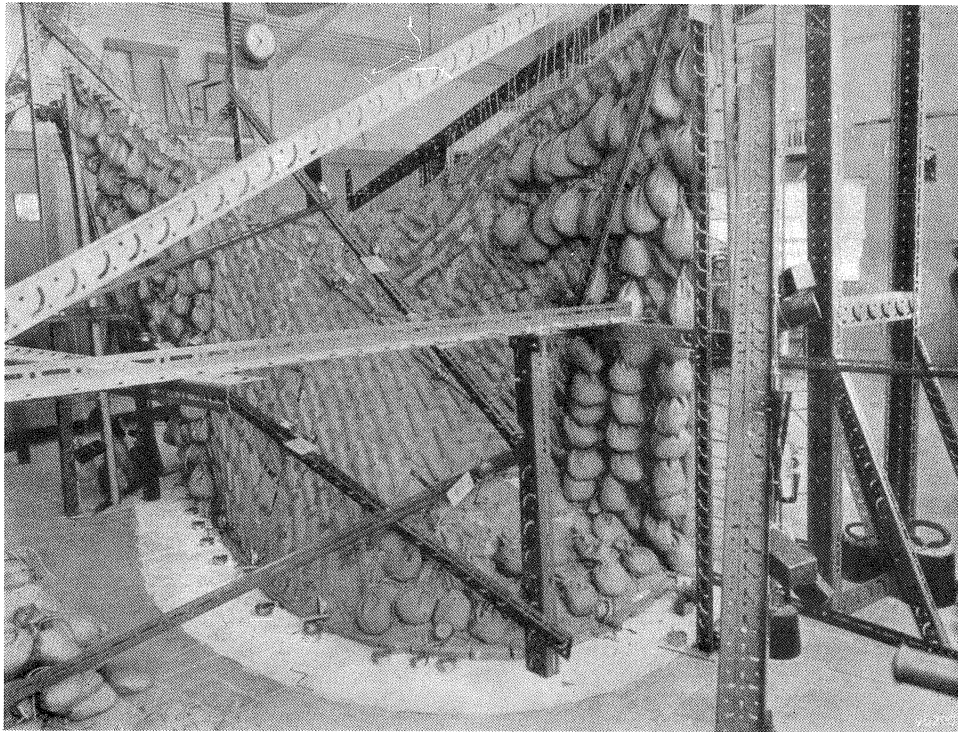


Fig. 11.



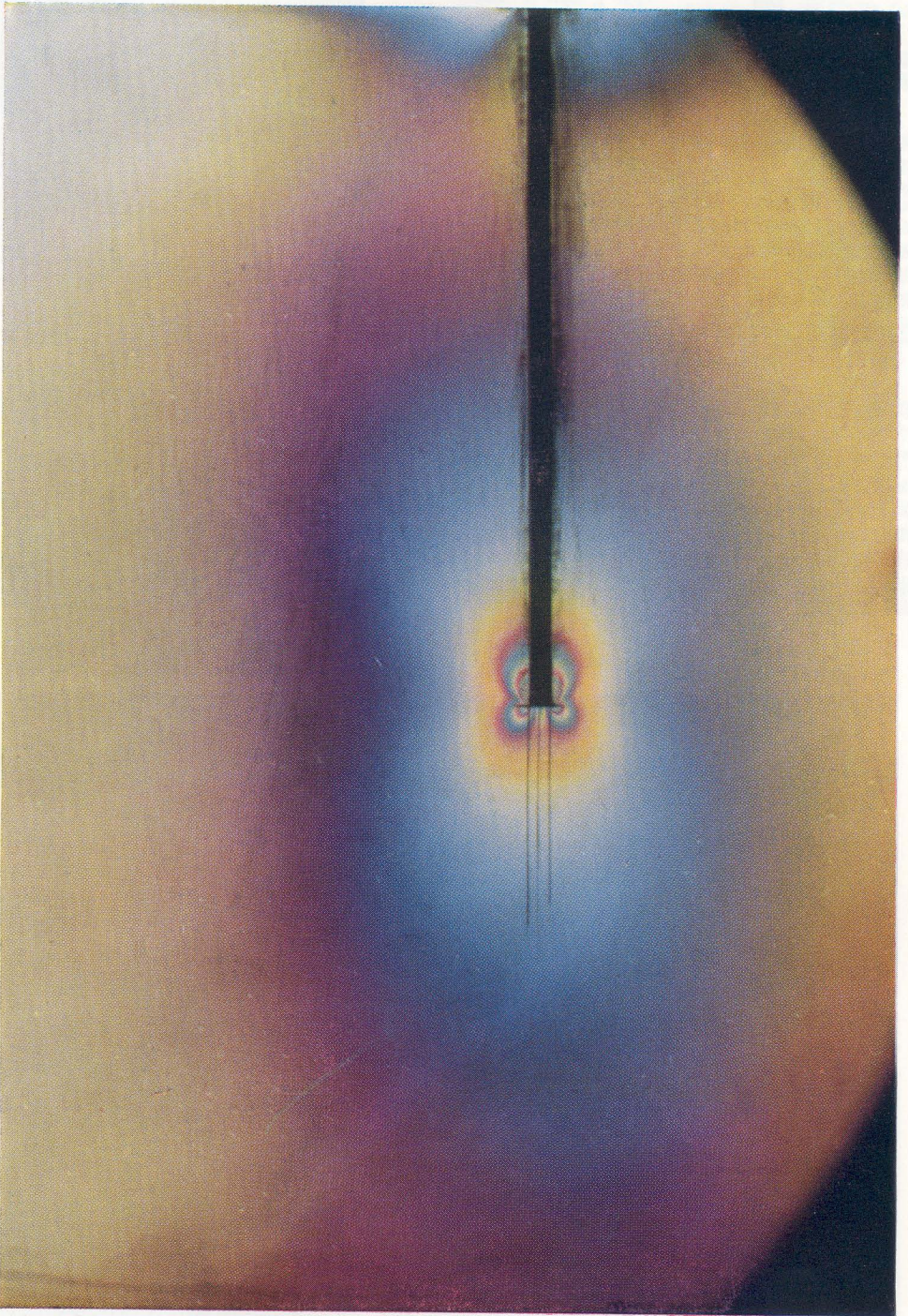


Fig. 6. Isochromen-beeld van de spanningstoestand om een trekpaal.

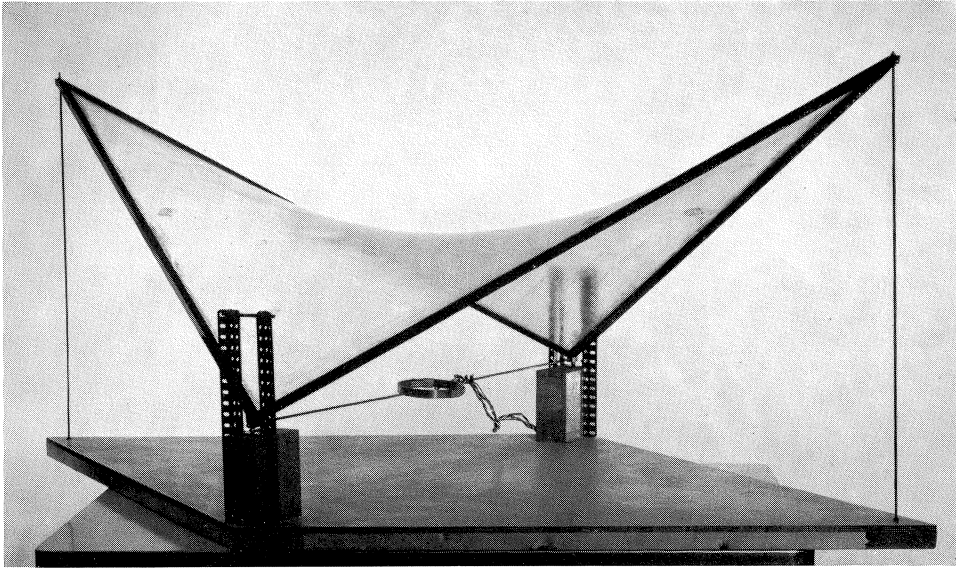
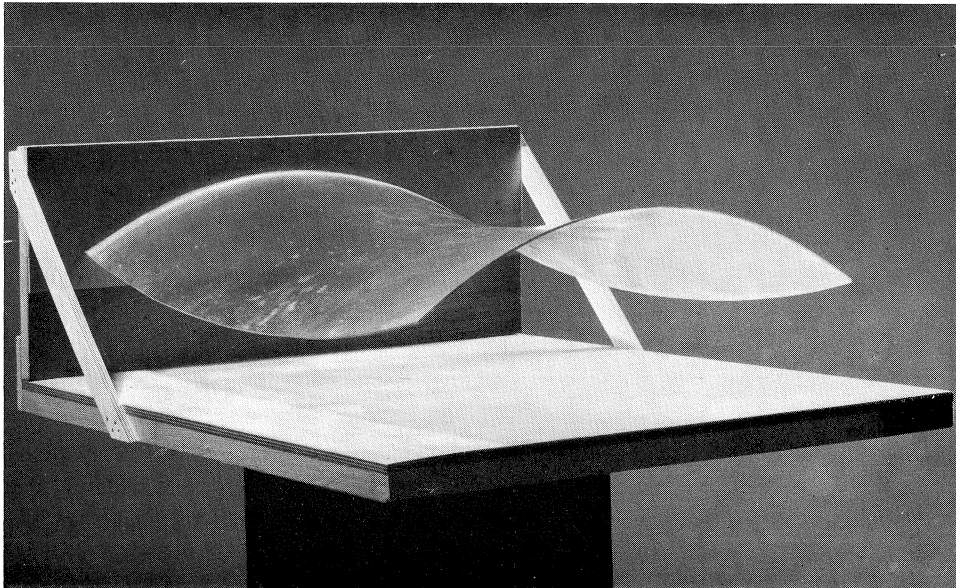


Fig. 12. Met mal en contramal vervaardigd model van een hypparschaal, uitgesneden langs beschrijvende.

Fig. 13. Met mal en contramal vervaardigd hypparschaal-model, uitgesneden langs hoofdparabolen. Eenzijdig ingeklemd.



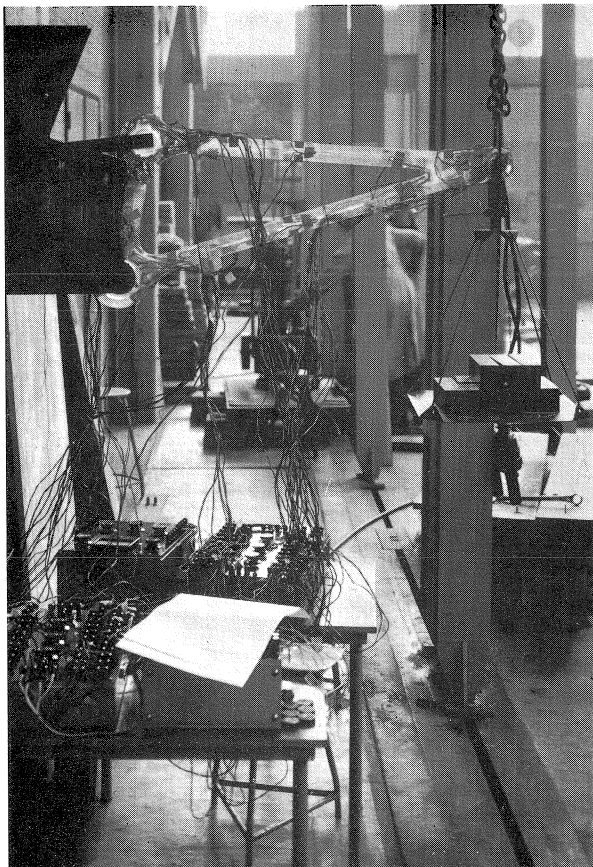


Fig. 14. Perspex model bewegingsarm (met verstijvingen), zie fig. 2b, in meetopstelling.

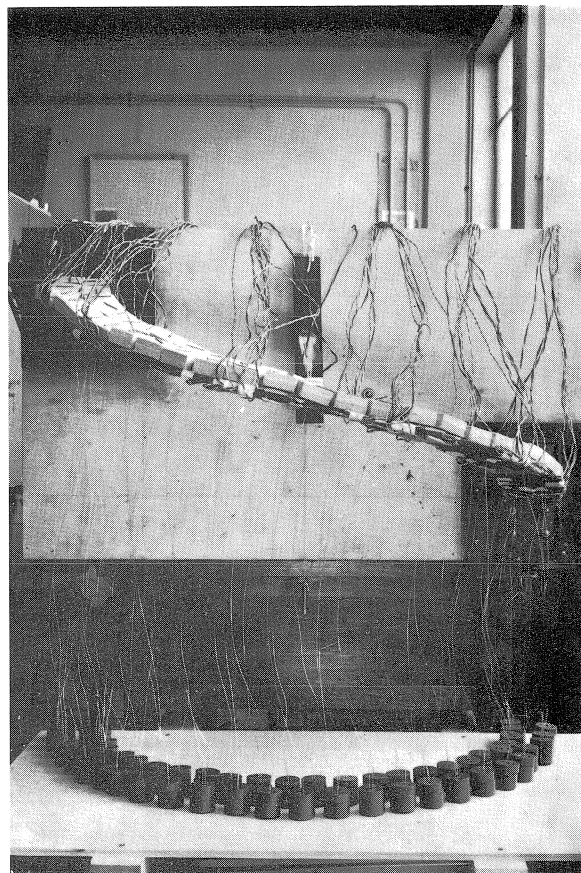


Fig. 15. Perspex model spiraaltrap in meetopstelling.

tienvorm langs foto-elastische weg werd nagegaan (fig. 2a), ontkwam met het oog op de spanningsverdeling rond de asgaten niet aan een meting met rekstrookjes (fig. 14). Voor het beantwoorden van de verschillende vragen ten aanzien van deze constructie werden dus twee verschillende wijzen van modelonderzoek naast elkaar gebruikt.

Het onderzoek voor de bouw van de kernreactor voor de Technische Hogeschool maakte zelfs drie model- en meetmethoden nodig, namelijk de moiré-methode op een perspexmodel, rekstrookjes op een gipsmodel en een model volgens de plaatanalgie voor de berekening van temperatuurspanningen.

Een zeer groot gebied van constructieproblemen kan dan ook met behulp van model- en meettechnieken tot klaarheid en oplossing worden gebracht, of het nu bijv. een spiraaltrap betreft, waarvan in fig. 15 de meting en in fig. 16 de daarvoor benodigde mallen te zien zijn, dan wel een stuwdam (fig. 17).

IR. G. A. F. VAN DE SANDE EN IR. H. M. DE HAAS

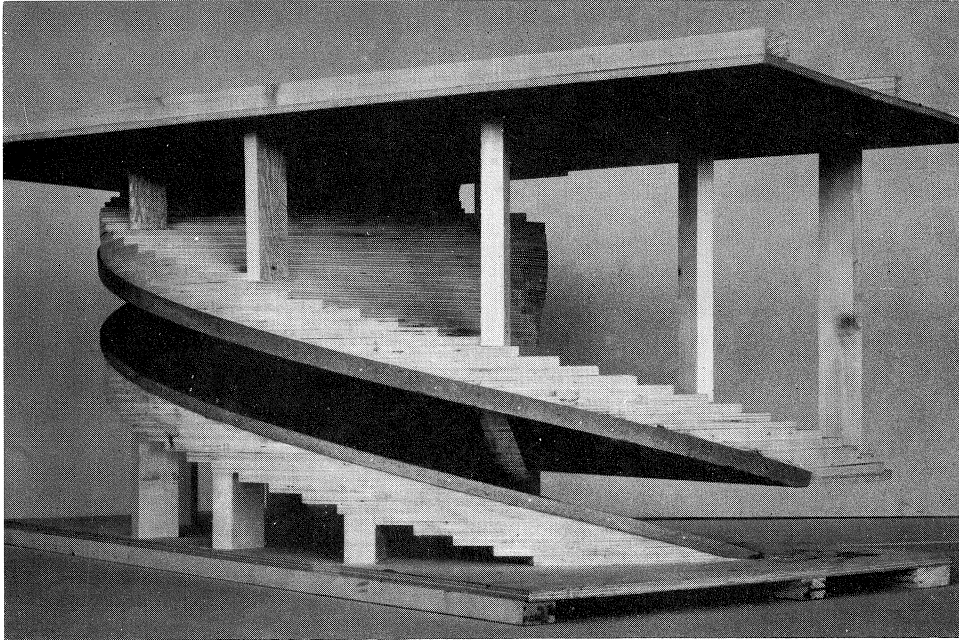


Fig. 16. Mal en contramal voor perspex model spiraaltrap, boven elkaar.

Fig. 17. Gegoten kunsthars model van boogvormige stuwdam in meetopstelling. Eigenschappen ondergrond nagebootst door stalen portalen.

