

DE ONTWIKKELING VAN SCHAALCONSTRUCTIES

Na de Tweede Wereldoorlog zagen de Nederlandse technici in de utiliteitsbouw een grote taak voor zich liggen. Voor de wederopbouw en voor nieuwe vestigingen van industrieën en dienstverlenende bedrijven moesten op grote schaal gebouwen worden gerealiseerd.

Bij de hiermede verbonden hernieuwde oriëntatie ten aanzien van de constructieve mogelijkheden, trok er één, die reeds in buitenlandse voorbeelden bestond, in het bijzonder de aandacht, namelijk het schaaldak. Aanvankelijk zag men voor de toepassingsmogelijkheden hiervan diverse beperkende bezwaren, deels terecht, deels ten onrechte. Zo werd de cirkelcilindrische tonschaal toen beschouwd als het schaaldak bij uitstek, en kregen andere vormen voorlopig minder aandacht. Ook werkte de moeilijkheid van het berekenen van schaaldaken en de betrekkelijke ontoegankelijkheid van de literatuur daarover vertragend op de vorenbedoelde ontwikkelingsgang.

Professor VREEDENBURGH als docent en als stimulator van speurwerk en constructiepraktijk was zeker de laatste die zich bij een dergelijke situatie zou neerleggen. Overtuigd enerzijds van het grote nut van de mechanica als onderwerp van studie voor het verkrijgen van een hecht fundamenteel inzicht, wist hij anderzijds ook maar al te goed dat een magisch geloof aan de uitkomsten van berekeningen door de werkelijkheid vaak wordt weerlegd. Ook het beperkte opvatten van het cirkelcilindrische tondak als „de schaal” werd door hem niet gedeeld.

Zijn colleges gaven van deze opvattingen blijk. Onder meer plaatste hij de prismatische *voetwalschalen* in de belangstelling. Hij legde er daarbij de nadruk op, dat de berekening hiervan terug is te voeren op eenvoudige mechanische inzichten, waarbij de afzonderlijke panelen als samenwerkende liggers worden opgevat en berekend. Ook de benodigde wiskundige kennis, zoals die voor het werken met Fourierreeksen, werd door hem op de meest begrijpelijke wijze uitgelegd.

Bij de berekening van *cirkelcilindrische schalen* werden door VREEDENBURGH ook weer de eenvoudige methoden op de voorgrond gesteld, waarbij aanvankelijk de membraantheorie voorrang kreeg. Destijds stonden velen nog huiverig tegenover buigende momenten in dunne schaalconstructies. Voor de cilindrische buisleidingen behorend bij waterkrachtwerken had VREEDENBURGH echter vele jaren eerder reeds gebruik gemaakt van het feit, dat bij een bepaalde opleggingswijze, nl. die volgens KARLSSON, een krachtsverdeling met uitsluitend membraanspanningen mogelijk is. In de naoorlogse jaren heeft hij de bereke-

ning van de membraanspanningen in over de steunpunten doorgaande cilindrische schalen geëntameerd; voor cilinders met andere dan cirkelvormige doorsnede werd door anderen, in het door hem bereide voetspoor, de methodische oplossing gevonden.

Voor het uitwerken van de membraantheorie gebruikte VREEDENBURGH een notatie, die steeds duidelijk deed uitkomen dat men bij de tonschaal in feite met een *ligger* te maken heeft; het mysterieuze van de krachtswerking van een schaal wist hij aldus weg te nemen. Dit liggeraspect was door VREEDENBURGH reeds vroeger als alternatieve grondslag voor de berekening van buisleidingen aangegeven. Toen LUNDGREN over de liggertheorie een boek deed verschijnen, werden de talrijke praktische aanwijzingen daaruit door VREEDENBURGH in zijn schalencollege met enthousiasme ingelast.

Waar in die tijd de constructiewereld zich via de Betonvereniging en de Commissie voor Uitvoering van Research (CUR) metterdaad en doelbewust ging interesseren voor speurwerk werd ook het schaaldak niet vergeten. Een van de eerste commissies die het leven zag was die voor schaaldaken (code-nummer A 1). VREEDENBURGH's voorliefde om in het scheppend denken de visualisering voorop te stellen van hetgeen door berekening eigenlijk dient te worden nagegaan, was ongetwijfeld mede aanleiding voor de aandacht die in de eerste werkfase van deze commissie werd gewijd aan de door VAN DER EB aangegeven methode, waarbij de schaal wordt opgevat als een met dwarsbogen verstijfd membraan. In de latere ontwikkeling, waarbij de DKJ-methode als eenvoudige en toch voor een ruim gebied van afmetingen van schalen voldoende exacte rekenwijze naar voren kwam, bleef evenzeer de aandacht gericht op een voor de praktijk aanvaardbare, overzichtelijke wijze van presenteren.

Hoewel *axiaalsymmetrische schalen* reeds op verscheidene gebieden toegepast en ook in hun theoretische ontwikkelingen ver gevorderd waren, wist ook over deze schalenfamilie VREEDENBURGH door zijn visie en behandeling op college veel verteerbaar te maken wat anders ongeproefd zou zijn gebleven. Bij het bespreken van het bepalen van de buigende momenten in zulke schalen volgens de theorie van GECKELER wees VREEDENBURGH er b.v. steeds op, dat de momenten in een ligger op verende ondersteuning eenzelfde verloop vertonen; aldus bijdragend tot verdieping van het mechanisch inzicht, dat meehelpt in verwante gevallen de weg te banen.

Ook voor *dubbelgekromde schalen* in het algemeen werd door hem de beschouwingwijze als ligger op verende ondersteuning aanbevolen zolang meer exacte theorieën hier ontbreken. Ook was dit het geval bij het bepalen van de plooi-sterkte van vorenbedoelde schalen.

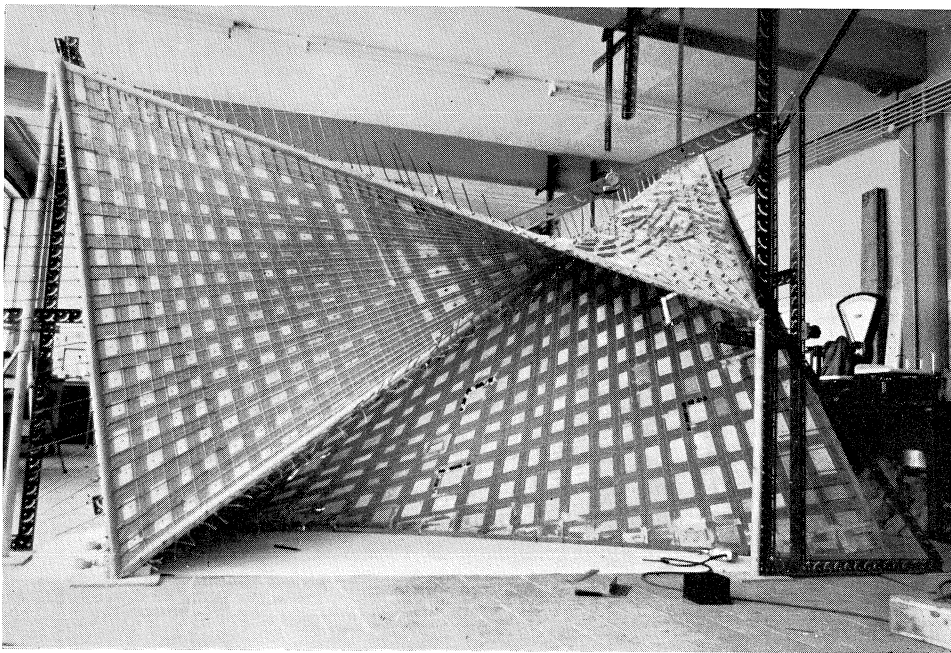
Uitgaande van de berekening van de *hoogdoorslag* volgens TIMOSHENKO leidde VREEDENBURGH een eenvoudige formule af, die een uitkomst oplevert die zich nauwelijks onderscheidt van de resultaten van veel omvangrijker onderzoeken. Als „Heronfontein” is deze benaderingsmethode in dit nummer afgedrukt.

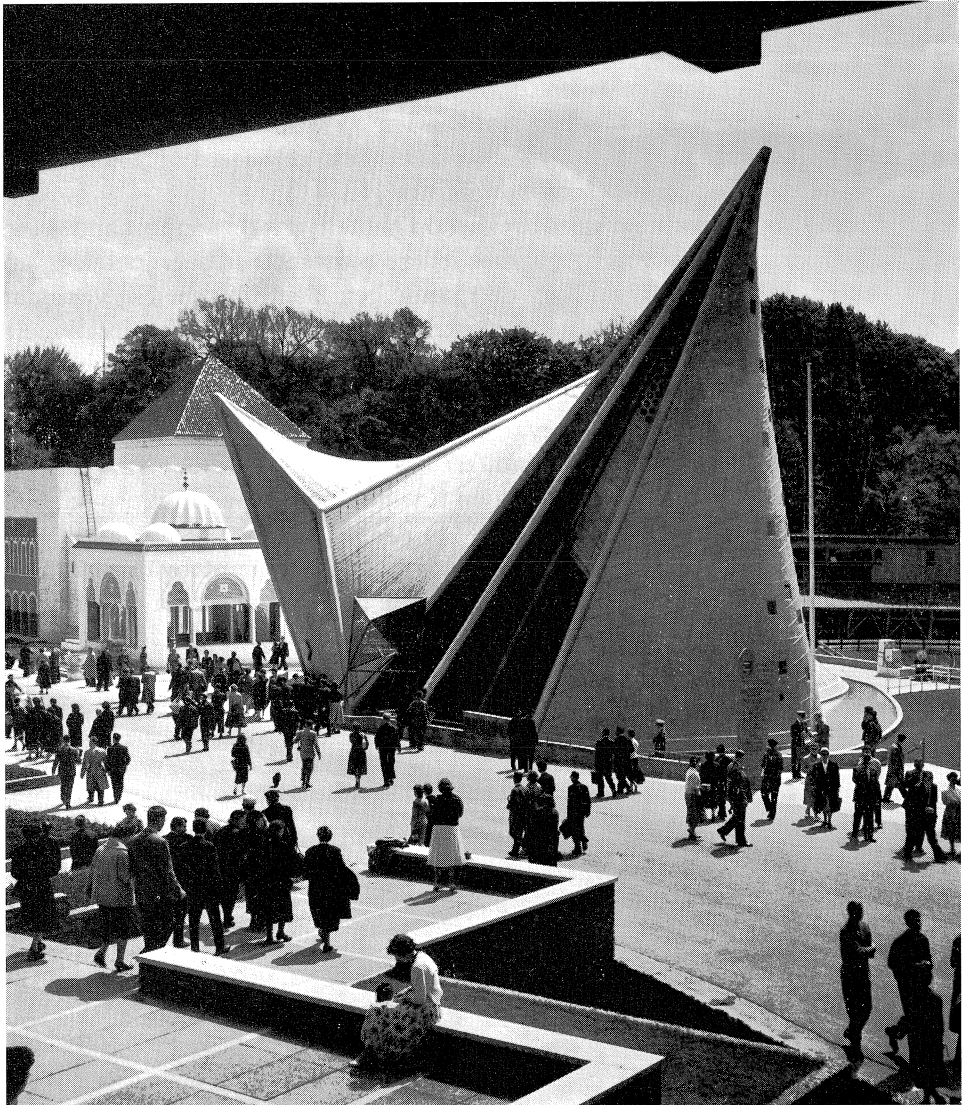
Van alle dubbelgekromde schalen had vooral de schaal in de vorm van een *hyperbolische parabolöide* („hypparschaal”) zijn aandacht en voorliefde. De moeilijkheden, die zich bij sommige oplossingen van de membraantheorie voordoen als men moet werken met spanningstoestanden op scheve assen, werden door hem ondervangen door speciale grafische methoden, gebaseerd op een uitbreiding van de theorie van de cirkel van MOHR [1958²].

De nadruk werd door hem steeds gelegd op het feit, dat de membraantheorie van de hypparschaal eenvoudig en voor iedere constructeur begrijpelijk is, en dat dank zij de dubbele kromming de spanningen klein blijven. Hij verzocht zijn leerlingen de mogelijkheden tot constructie te onderzoeken en irrationele bezwaren tegen de bouw van hypparschalen door voorbeelden (desnoods voorlopig van bescheiden afmetingen) te weerleggen.

Het bleek echter, dat in dit geval VREEDENBURGH zelf nog actief aan het pionierswerk zou deelnemen. Eind januari 1957 verzocht de N.V. Strabed zijn advies omtrent het door LE CORBUSIER en XENAKIS ontworpen Philipspaviljoen voor de wereldtentoonstelling „Expo '58” in Brussel. Het ontwerp hield in, dat het grondvlak van het paviljoen door een ingewikkeld samenstel van ribben en regelvlakken overkapt zou worden. Voor exacte berekening waren deze opvallend ongewone constructievormen ten enenmale ontoegankelijk. In algemene zin kon echter positief geadviseerd worden omtrent de realiseerbaarheid van het ontwerp met toepassing van hypparschalen als dakvlak.

Modelonderzoek van de uitvoeringswijze van het Philipspaviljoen met voorgespannen panelen





Het Philipspaviljoen op de „Expo '58” te Brussel

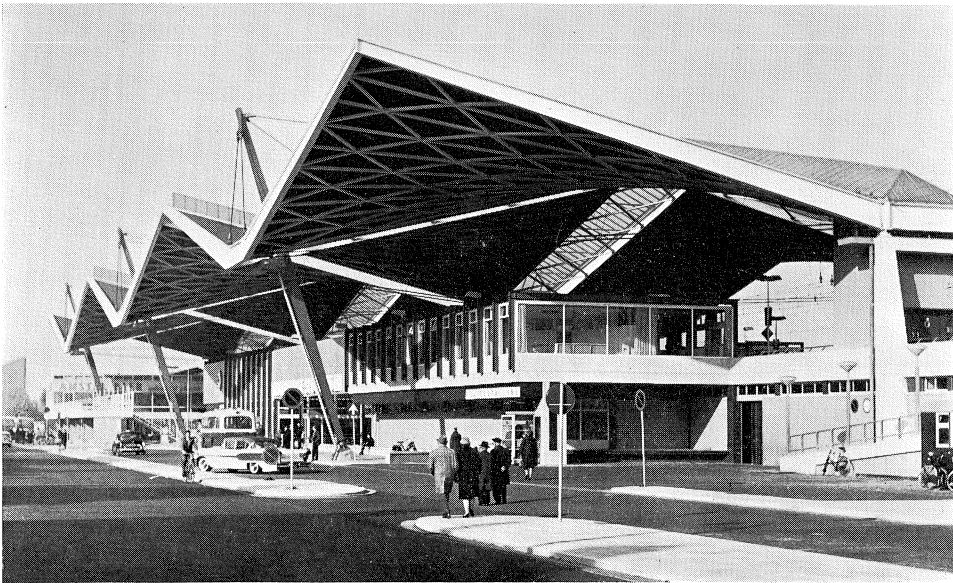
Om de vragen betreffende krachtsverdeling en vervorming met voldoende zekerheid te kunnen beantwoorden was in verband met de korte beschikbare tijd modelonderzoek het aangewezen middel. VREEDENBURGH bewerkte dat de opdrachtgevers hiertoe de Nederlandse laboratoria IBBC (TNO) en Stevin (T.H.) inschakelden. Op grond van de uitkomsten der modelmetingen kon de bouw van deze drievoudig unieke constructie – qua schaalvorm, qua ongewone configuratie en qua uitvoeringswijze – met vertrouwen worden ter hand genomen.

Een van de op het college besproken problemen was de membraantheorie van de schaal op hoofdparabolen, die door AIMOND zeer vernuftig was berekend door een mechanische opvatting van de schaal als samenstel van trekparabolen en drukstangen volgens beschrijvenden. VREEDENBURGH wees er met nadruk op dat het overbrengen van een geconcentreerde normaalkracht door een beschrijvende natuurlijk slechts een idealisatie was van de werkelijkheid en dat er in feite spreiding zal optreden. Dit was aanleiding tot bij hem verricht afstudeerwerk, waarin het genoemde verschijnsel nader werd onderzocht, zowel experimenteel als onder toepassing van de buigingstheorie van hypparschalen.

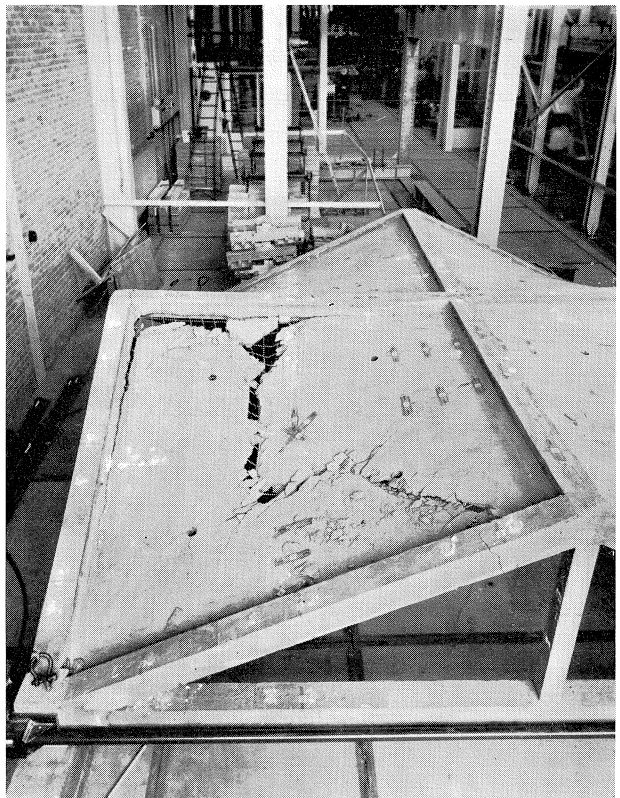
In een verder verband bleek, dat uitwerking van de buigingstheorie ook van nut zou zijn voor de andere mogelijke vormgevingswijze van hypparschalen, waarbij begrenzing volgens rechte beschrijvenden wordt toegepast. In dat geval wordt de ontwerper echter geconfronteerd met problemen als de overdracht van het eigen gewicht van randbalken, de gevolgen van een excentrische aansluiting randbalk-schaal en van horizontale verplaatsing van de ondersteuning.

Hiertoe zou een theorie analoog aan die, zoals door VREEDENBURGH aangegeven voor de plaat op verende ondersteuning uitkomst kunnen bieden. Speciaal de presentatievorm van „vergeetmij nietjes” voor de gevallen met ingeklemde of scharnierende rand bleek voor praktijkberekeningen van nut. Daarom werd nadien in het Stevin-laboratorium een uit de zgn. technische schalentheorie afgeleide benaderingsmethode in dezelfde vorm gegoten en kon met de diverse vervormingsinvloeden op eenvoudige wijze rekening worden gehouden.

Vakwerk-hypparschalen als overkapping van het stationsgebouw en de perrons te Tilburg



Naast deze in hoofdzaken theoretische ontwikkeling bleef het *experimenteel onderzoek* van groot belang en voor sommige problemen zelfs de enig bruikbare weg. In de eerste jaren van het Stevin-laboratorium werd aldaar een betonnen model van een hypparschaal vervaardigd van een bekend type, waarbij de begrenzing door rechte randen wordt gevormd. De vormgeving was zodanig, dat de sterkte van het schaalvlak zélf onderzocht zou kunnen worden (meestal zijn de randbalken maatgevend). De onderzoek-resultaten van het elastische stadium gaven belangrijke aanwijzingen voor de berekening met de elasticiteitstheorie; met name bleek hoezeer de verplaatsingen van de randbalken de grootte van de storing kunnen beïnvloeden. Dat deze schaal bij 3 cm dikte en een wapening van \varnothing 6–9 ten slotte een belasting van 6000 kgf/m² kon dragen, alvorens te breken, gold echter voor leerlingen van VREEDENBURGH niet meer als een bijzondere verrassing.



Tot breuk belast model van een hypparschaal

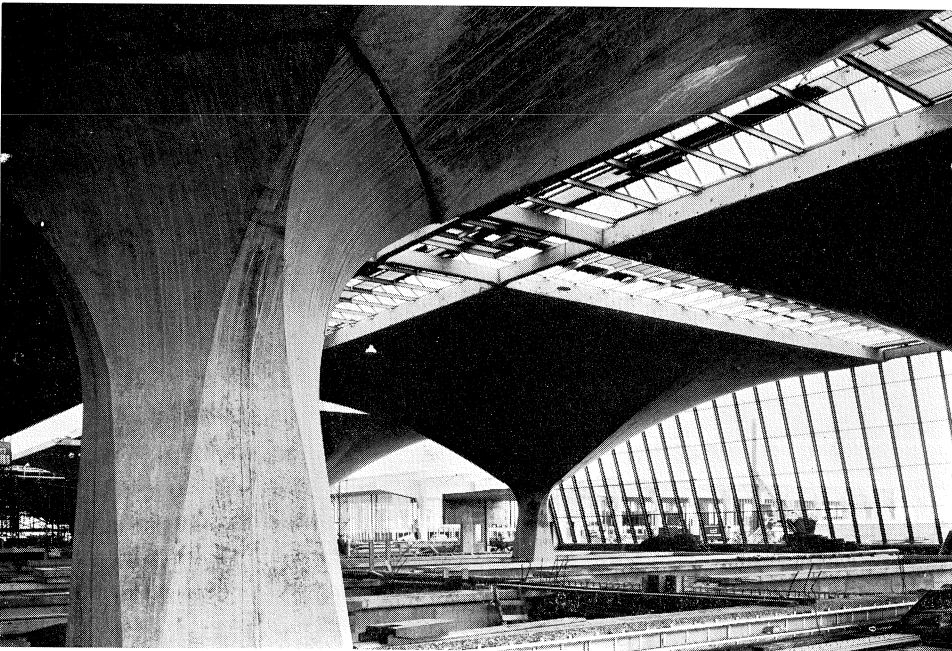
Het theoretisch en experimenteel onderzoek gaat tot op heden voort en zal door publikaties uiteraard van zich doen blijken.

Niet alleen het speurwerk aan hypparschalen, maar ook de toepassing ervan in de praktijk van het bouwen verdient hier onze aandacht. De geleidelijke invoering van deze constructie, dank zij het werk van VREEDENBURGH en zijn



Enkelvoudig hyparschaal-dak op de Paaskerk te Amstelveen

Parapludaken uit hyparschalen overkappen het filtergebouw van het drinkwaterleidingbedrijf op de Berenplaat bij Rotterdam



leerlingen doordringend tot in de ontwerp- en bouwpraktijk, is, naar het zich laat aanzien uitgegroeid tot een wezenlijk bestanddeel van de utilitaire en aanverwante bouwtechniek hier te lande. Hierbij willen wij slechts constateren, dat de opgang zich heeft voltrokken volgens de verwachtingen van VREEDENBURGH. Was het aanvankelijk nog maar experimenteren met de toepassing van hypparschalen van kleine afmetingen op pompstations en fietsenstallingen, vrij spoedig hebben de constructeurs meer vrijheid gekregen en thans vindt men deze schaaldaken op bedrijfsruimten, opslagplaatsen, kerken en stationsgebouwen. Het „buitengewone” is meer en meer bezig „gewoon” te worden, een ontwikkelingsgang waarvan de instigator bij zijn afscheid van de T.H. Delft ook door deze bijdrage in *Heron* zij geëerd.

H. W. L.

Beproeving van een prototype van een houten hypparschaal

