

CEMENT

maandblad gewijd aan cement en beton
tevens
officieel orgaan van de Betonvereniging

jaargang XVIII
nr. 8
augustus 1966

hoofdredacteur:
dr. ir. G. F. Janssonius

redacteuren:
A. A. van der Vlist
M. G. P. Nelissen
B. W. F. Kral

redactiesecretaris:
J. M. L. Trouw, ing.

redactie-adres:
Herengracht 507, Amsterdam-C.
tel. (020)-238531

administratie-adres:
Nw. Achtergracht 104
Postbus 1198, Amsterdam-C.
tel. (020)-946621, Postgiro 28767 t.n.v.
N.V. 't Koggeschip, drukkers- en uitgevers-
bedrijf (afd. Met Couragie)
Amsterdam

abonnementsprijzen:

1. Nederland, Overzeese Rijksdelen,
België en Luxemburg: f 15,— per jaar
2. Voor leden van de Betonvereniging:
f 12,50 per jaar
3. Studie-abonnementen voor
T.H.-studenten, H.T.S.-leerlingen
en militairen: f 9,— per jaar
4. Buitenland: f 18,50 per jaar

overname van artikelen en illustraties al-
leen na schriftelijke toestemming

uitgave:

Verkoopassociatie NEDERLANDS CEMENT
Enci-Cemij-Robur N.V. - AMSTERDAM

Inhoudsopgave

De constructie van het Evoluon	433-438
door dr. ir. H. C. Duyster	
International symposium on shell structures	439
door Dipl.-Ing. L. Kellermann	
Proeven en praktijkervaring betreffende cement, klasse C (III)	440-448
door ir. A. J. Chr. Dekker	
Het Jan Swammerdam Instituut te Amsterdam	457-460
door ir. J. W. Kamerling	
Cursussen Betontechnologie CB 1 en CB 2	460
Toronto City Hall	461-464
Beton in het buitenland	465-467
Hochhaus 'Zur Palme', Zürich	468-469
Boekbespreking	470-473
Litteratuuroverzicht	474-475
Contents - Index - Inhalt	475

REDACTIERAAD: voorzitter: ; secretaris: J. M. L. Trouw, ing.;
leden: ir. J. Aernoudse*, ir. P. J. Allaart, ir. A. S. G. Bruggeling*, ir. A. J. P.
van der Burgh, ir. D. Dicke*, ir. H. van Dueschoten*, ir. H. J. J. Engel, ir. C. W.
J. Groothoff, prof. dr. ir. A. M. Hees, ir. P. H. van Hellemond*, ir. G. Huyghe
(België), ir. A. Cr. Krijn*, ir. K. L. A. van der Leeuw, ir. F. K. Ligtenberg*, ir. C. J.
Louw, ir. J. C. N. Ringeling, drs. E. Roelofs*, Dr.-Ing. F. Schönnenberger, ir.
W. van der Schrier, ir. W. de Steur*, prof. drs. E. M. Theising*, ir. W. J. H.
Thunnissen, P. J. van Tussenbroek, ing., prof. ir. D. Vandepitte (België), ir. B.
W. van der Vlugt*, ir. A. J. van Walraven, ir. J. Weyer*, A. M. Witte, ing.*.

*) lid van de redactie-commissie

MEDEWERKERS: Dipl.-Ing. G. A. M. Baar, ir. C. F. van Bergen, ir. J. F. Blich, ir. J. J.
B. J. J. Bouvy, ir. H. A. Dicke, ir. W. A. Elms, ir. J. A. H. Hartmann, ir. H. W. F. C.
Héman, ir. G. W. P. van der Heiden, Dipl.-Ing. E. A. F. Huber, ir. J. W. Kamerling,
ir. P. C. Kreljger, ir. J. C. Meischke, F. J. Noz, ing., L. Stevast, ing., ir. P. Wer-
menhoven.



gewelf boven-
schaal
Evoluon

foto: Fred
Meijer/Eindhoven

De constructie van het Evoluon*

U.D.C. 624.074.4.001.24:624.012.46 + 691.328
 berekening schalen; voorgespannen
 en geprefabriceerd

Inleiding

Beeldt u zich eens in dat u thuis komt en lust heeft een spannend boek te lezen. U vindt in uw kast een boek dat u nog niet gelezen hebt. De titel trekt u wel aan: u slaat het open en kijkt de eerste bladzijde in. Direct pakt het u, goed geschreven en een begin dat inderdaad een spannend verhaal belooft. Maar bij het neerleggen valt het boek open op de laatste bladzijde en zo leest u ongewild de laatste frasen van de ontknoping. En juist op dat ogenblik komt er iemand binnen, ziet dat u de laatste bladzijde leest en denkt daardoor dat u het boek uit hebt. En vóór u iets kunt zeggen maakt hij een paar opmerkingen over de inhoud. U zult dat boek nog wel lezen, maar het zal voor u veel van de spanning verloren hebben.

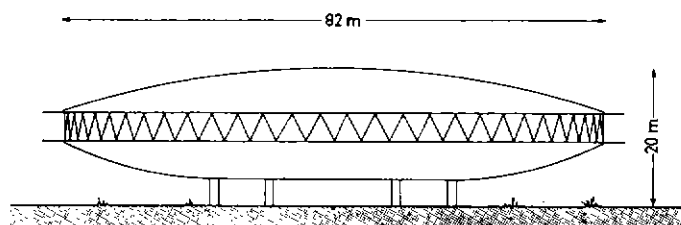
Mocht u ooit opgebeld worden en dan een stem horen, die zegt: 'Kalff hier, ik heb een probleem, kom eens praten', wees dan verzekerd dat u aan het begin staat van een héél spannend verhaal. Maar in ons geval kent u de laatste bladzijde, u weet dat de bouw van het Evoluon tot stand is gekomen. En u zult waarschijnlijk reeds allerhande bijzonderheden over het ontwerp vernomen hebben.

Tot mijn spijt kan ik u dus maar een héél flauwe indruk geven van de boeiende problemen die wij gezamenlijk als constructeurs hebben kunnen oplossen. Toch wil ik trachten in grote lijnen te schetsen hoe wij tot deze constructie gekomen zijn.

Schetsonwerp

Een van de eerste schetsen van ir. L. Ch. Kalff zag er ongeveer uit als weergegeven in fig. 1. Het ontwerp bestaat uit een koepel, een lichtstrook en een kom op een aantal kolommen.

fig. 1. een van de eerste schetsonwerpen



Al eeuwen lang worden er koepels gemaakt, het moet dus kinderlijk eenvoudig zijn in deze tijd, nu wij bovendien nog voorspanning tot onze beschikking hebben, de koepel te maken. Maar als draagconstructie is de kom niet gebruikelijk. En met reden, want omdat de kom naar de ondersteunende kolommen toe steeds vlakker wordt, leent hij zich er niet toe de belastingen alleen door membraankrachten over te brengen.

Belast men bij voorbeeld de rand met een gelijkmatige belasting, dan ziet men dat in de kom tangentiële trekkrachten worden opgewekt, terwijl radiaal een per eenheid van breedte snel toenemende drukkracht optreedt (fig. 2). De tangentiële trekkrachten zullen de punten van de kom naar buiten doen verplaatsen, waarbij de horizontaal gemeten onderlinge afstand niet veel verandert. Ten gevolge van de radiale drukkracht moeten de punten zich, radiaal langs de kom gemeten, naar elkaar toe bewegen. Het een met het ander gecombineerd, maakt dat de vervormingen van zo'n vlakke kom groot worden en een buigingslappe kom al heel gauw doorslaat.

Hiertegen kunnen wij de volgende maatregelen nemen:

1. de binnenring B zich naar buiten laten verplaatsen, dus deze een voortrekspanning geven;
2. de buitenwaartse verplaatsing van de punten van de kom beperken en hiervan de onderlinge waarde gunstig wijzigen door een ringvormige voorspanning toe te passen;
3. door het aanbrengen van radiaal gerichte ribben, vooral nabij B, de doorsnede voor de opname van de radiale krachten groter maken dan de doorsnede voor de opname van de tangentiële krachten.

* Lazing gehouden bij een excursie van de Betonvereniging naar het Evoluon, op 2 juni 1966.

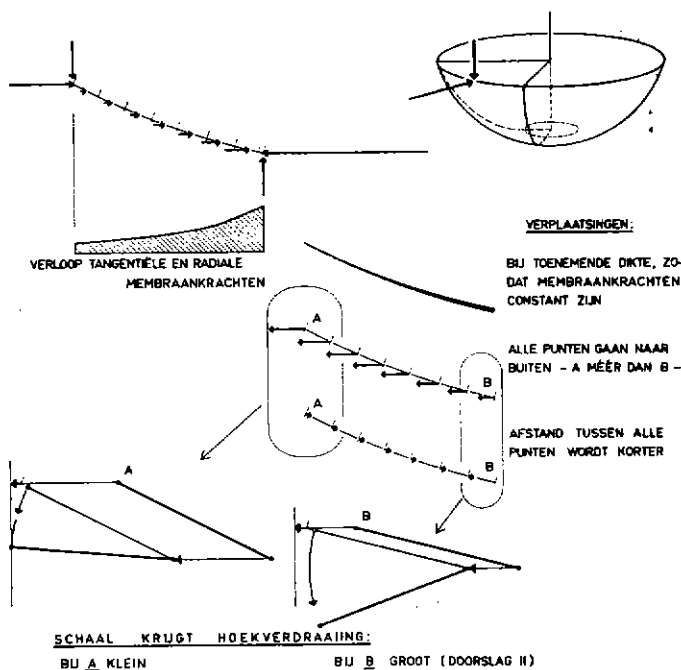


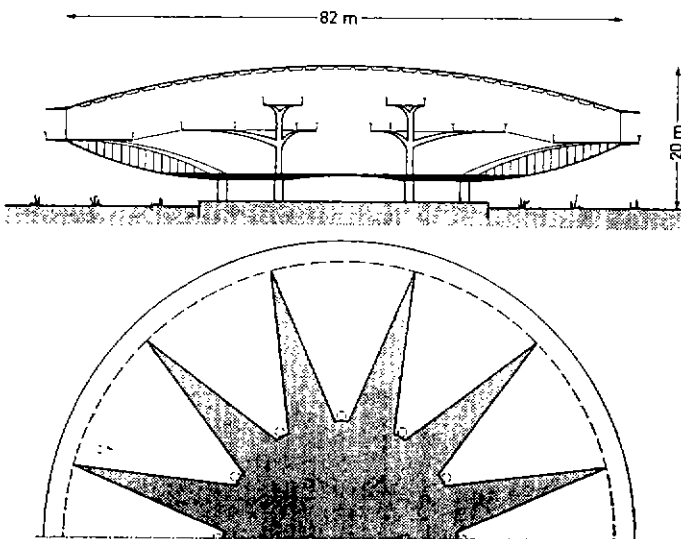
fig. 2. krachtenschema in de kom bij gelijkmatig verdeelde randbelasting

ten. Dit is echter een bedenkelijke maatregel, want door deze ribben wordt het hartvlak van de kom nog verder afgevlakt; 4. niet vast houden aan de eis dat de constructie uitsluitend aan membraankrachten onderworpen zal zijn, doch het drukvlak, nabij de opleggingen, buiten de constructie laten treden, wat met zich mee brengt dat de constructie buigende momenten en dwarskracht moet kunnen opnemen.

Gaan wij nu volgens deze richtlijnen construeren, dan blijkt dat wij een eierdars tussen sterkte en stijfheid uitvoeren. Het is nu eenmaal niet logisch een verticale belasting door middel van een naar de opleggingen toe vlakker wordende constructie over te brengen naar deze opleggingen.

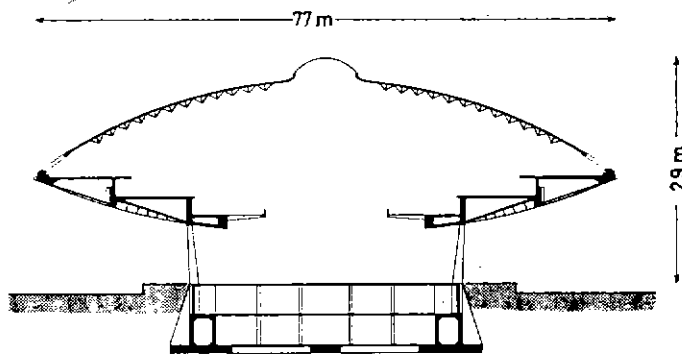
De logische vorm is de kelk en niet de kom. En zo kwamen wij tot de volgende constructie (fig. 3), die wij poëtisch 'de bloem' genoemd hebben.

fig. 3. 'de logische vorm is de kelk'



De boogvormige kelkbladen, die hun steun vinden tegen een ringvormige vloer, geleiden alle verticale belastingen naar de koppen van de buitenste ring kolommen. De van de koepel afkomstige randbelasting zou door de in de rand horizontaal liggende kelk bezwaarlijk kunnen worden opgenomen, daarom wordt deze in de kom geleid, om vervolgens, door middel van hangstaven, geleidelijk aan de kelk te worden afgegeven. In tegenstelling tot de vorige constructie neemt in een sector van de kom de radiale kracht, van de rand naar het midden gaand, iets af, in plaats van sterk toe. Constructief en misschien ook esthetisch was dit een fraaie oplossing, doch hij voldeed niet aan diverse eisen, die aan de tentoonstellingsruimte werden gesteld.

fig. 4. doorsnede uitgevoerd ontwerp



Uitgevoerde constructie

Wij komen nu tot de uitgevoerde constructie (fig. 4). Deze is (zie fig. 5) opgebouwd uit twee ringen met driehoekige doorsnede (0-1-3 en 2-4-6) en een ring met doosvormige doorsnede (5-6-7). Van de ringen met driehoekige doorsnede zijn de delen 0-3 en 2-6 geprefabriceerd, omdat dit van belang was voor het werkprogramma, het goede aspect van het in het zicht blijvende beton en de zeer goede kwaliteit van het beton, die in deze hoogbelaste delen werd vereist. Omdat wij in de voorgaande beschouwingen al geconstateerd hebben dat de ringspanningen ons maar matig van nut zijn, hebben wij ervan afgezien deze geprefabriceerde delen zijdelings te verbinden. U moet deze dus zien als naast elkaar geplaatste schoren of spaken met rechte assen 0-3 en 2-6.

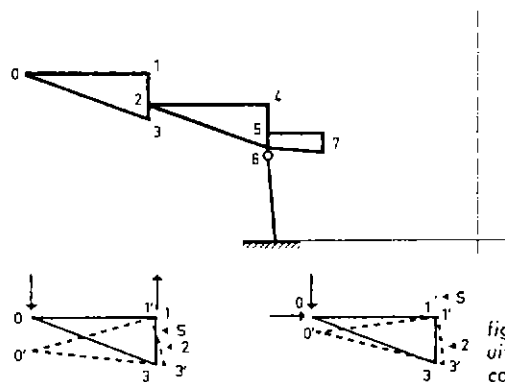


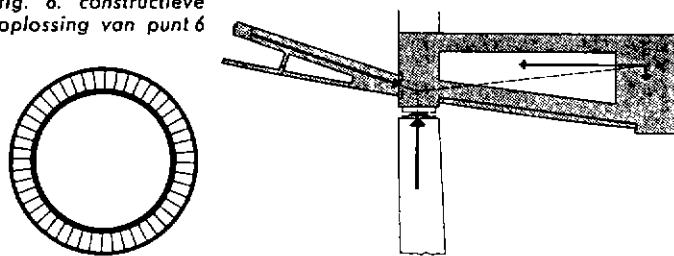
fig. 5 opbouwschema uitgevoerde komconstructie

Beschouwen wij eerst de ring 0-1-3, die wij belast denken door een verticale kracht in punt 0 en vrij opgehangen in punt 1. De driehoek draait om een punt S, waardoor in vlak 0-1 ring-trekspanningen ontstaan, en in punt 3 ring-drukspanning optreedt. Brengen wij nu in punt 0 een voorspankracht aan, dan blijft punt 3' ongeveer op dezelfde plaats, maar punt 1' gaat naar binnen en S gaat omhoog. Zonder voorspanning lagen de punten 2 en S dicht bij elkaar, zodat punt 2 zich weinig verplaatste. Door het aanbrengen van de voorspanning wordt punt 2 veel sterker verplaatst. Hiermee hebben wij het in de hand punt 3 te ontlasten en een deel van de ring-drukkracht in dat punt over te nemen in punt 2.

Ring 2-4-6 gedraagt zich op overeenkomstige wijze, de krachten zijn, hierin echter veel groter dan in ring 0-1-3. De ring-trekkkracht in vlak 2-4 kan wederom met voorspanning in punt 2 bestreden worden, maar voor de opname van de ring-drukkracht in punt 6 is een grote doorsnede nodig. Omdat wand 4-6 niet noemenswaard onder de huid van de kom zichtbaar mag worden, ontbreekt in punt 6 de plaats voor deze benodigde betonddoorsnede. Wij losten deze moeilijkheid als volgt op:

U weet dat bij een gegeven materiaalspanning evenveel materiaal gebruikt wordt in een rondom gedrukte, enkelvoudige ring, als in een door spaken verbonden dubbele ring (fig. 6). Of wij dus het materiaal in punt 6 verwerken of in wand 7, blijft qua materiaalverbruik hetzelfde. Maar door het materiaal naar wand 7 te verleggen, kan de hierin opgewekte ringkracht samengesteld worden met het gewicht van de wand tot een kracht die door punt 6 loopt en daar zorgt voor het krachtenevenwicht. Zodaende hebben wij met een boven de huid van de kom gelegen constructie tóch evenwicht in punt 6 weten te verkrijgen.

fig. 6. constructieve oplossing van punt 6



Het in fig. 7 gegeven beeld van de constructie, zoals deze vervormd wordt onder volbelasting, zal u nu duidelijk zijn. U voelt hoe de constructie onder de belasting omlaag wordt gedrukt, maar tevens hoe de ringen en de voorspankrachten nabij punt 0 en punt 2 dit tegenwerken. Duidelijk ziet u ook het effect van de uitgekraagde binnenring. Ten slotte ziet u hoe de koppen van de kolommen zich naar binnen verplaatsen, wat met zich mee brengt dat zij ook iets naar elkaar toe bewegen. Om voor deze beweging de noodzakelijke flexibiliteit te verkrijgen, werden de kolommen scharnierend met de kom verbonden.

Dat de ringen de constructie niet alleen voor symmetrische, maar ook voor asymmetrische belasting stijfheid geven, moge uit fig. 8 blijken.

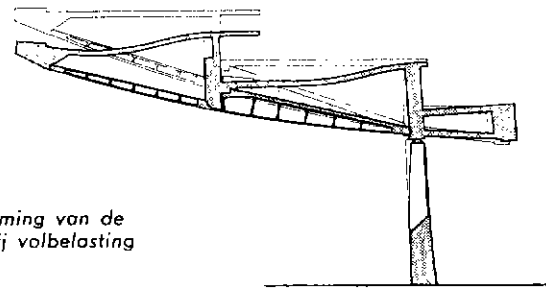


fig. 7. vervorming van de constructie bij volbelasting

Op drie detail-punten willen wij nog de aandacht vestigen, en wel allereerst op punt 0.

constructie punt 0.

Het zou logisch zijn geweest vlak 0-1 en schoor 0-3 in punt 0, gelegen onder de oplegreactie van de koepel, samen te doen komen en in dit punt 0 de voorspankracht te laten aangrijpen (fig. 9). Maar in punt 0 ontbreekt te enen male de plaats om de benodigde spankabels aan te brengen. Wij konden nu twee kanten uit:

- of wij legden spankabels in radiale richting, met een verankering buiten punt 0 en ringvormige spankabels ergens in vloer 0-1 of boven in wand 1-3;

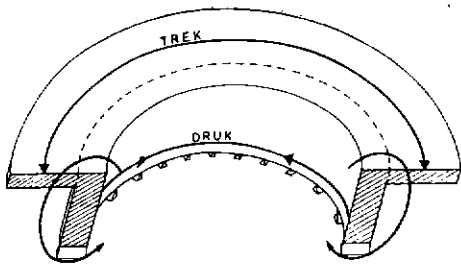
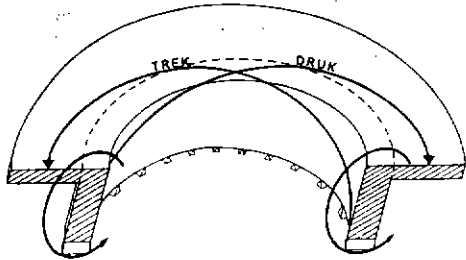


fig. 8. de ringen geven ook stijfheid voor asymmetrische belasting



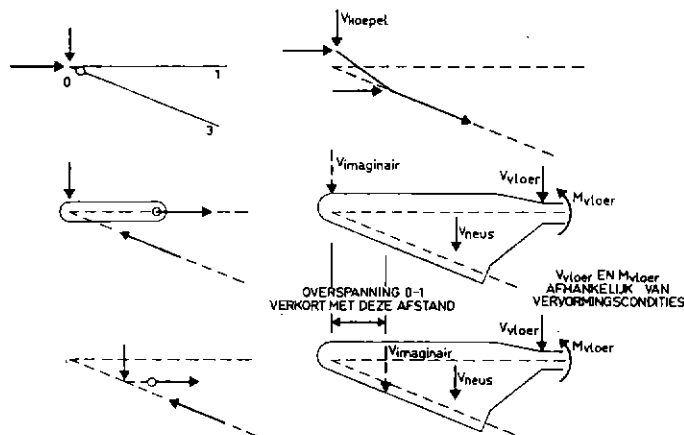
- of wij verlieten het 'rechte pad' en zagen af van de voorwaarde alle krachten door één punt 0 te voeren.

Het bleek al gauw dat door de eerste oplossing de moeilijkheden alleen maar verplaatst werden. Ook dan was het moeilijk de benodigde kabels onder te brengen. Wij verkozen de avonturen van het 'niet-rechte pad' en maakten een neusconstructie, groot genoeg om het vereiste aantal kabels te bergen. De schoren 0-3 werden met een betonscharnier op de neus aangesloten.

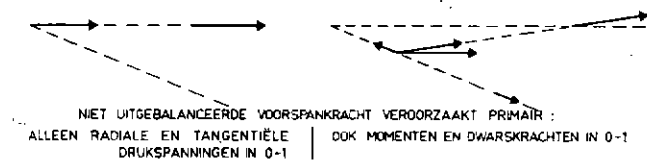
De oplegreactie van de koepel werd iets naar binnen verplaatst, waardoor in de punt van de neus net voldoende kabels geborgen en naar de verankeringspunten gevoerd konden worden, om deze reactie goed naar binnen te leiden. Met behulp van de reactie van lager geplaatste kabels wordt de kracht verder naar schoor 0-3 geleid.

Overigens zou de spankracht in het vlak 0-1 gelegd kunnen worden, doch dan zijn wij verplicht een zware wapening aan te brengen tussen punt 0 en het aangrijpingspunt van deze spankracht. De in punt 0 opgewekte reactiekracht veroorzaakt daarbij een relatief groot moment in vloer 0-1. Om nu deze zware wapening te vermijden en om tevens het moment in vloer 0-1 te beperken, is het noodzakelijk de kabels zoveel mogelijk in of buiten lijn 0-3 te leggen. Daarmede komt de door de kabels ontwikkelde kracht lager te liggen, waardoor de verticale reactiekracht naar binnen wordt verplaatst, wat weer ten ge-

fig. 9



- CONCLUSIE
- VOLDOEND AANTAL KABELS IN NEUS OM OPLEGREACTIE KOEPEL GOED IN NEUSSTUK TE GELEIDEN.
 - KABELS ZOVEEL MOGELIJK IN OF BUITEN KRACHTLIJN 0-1 TENEINDE ZWARE WAPENING IN NEUSSTUK TE VERMIJDEN.
 - KABELS LAAG LEGGEN TENEINDE OVERSPANNING VLOER 0-1 TE BEPERKEN.



volge heeft dat het moment in de vloer beperkt wordt. De overspanning van vloer 0-3 wordt als het ware korter. Het spreekt vanzelf dat de grootte van de, uit de vloer afkomstige, verticale reactie afhankelijk is van de vervormingen, waardoor de opgave om voor de ligging van de spankabels de beste plaats te zoeken, bijzonder boeiend wordt.

Overzien wij het resultaat, dan lijkt het of wij niets dan winst hebben in vergelijking met de logische, maar niet realiseerbare oplossing. Dat kan natuurlijk niet, wij kunnen niet straffeloos gaan avonturieren. U kunt dan ook duidelijk zien dat onze constructie wat nerveus is. Geef u bij voorbeeld de 'recht-door-zee' constructie een overmaat aan voorspanning, dan wordt deze met wat drukspanningen en dus met een minimum aan vervorming, glad opgenomen. Onze minder solide in de schoenen staande constructie kan zo'n extra voorspankracht alleen met momenten en dwarskrachten weerstaan en is dus wat gevoelig-bewegelijk.

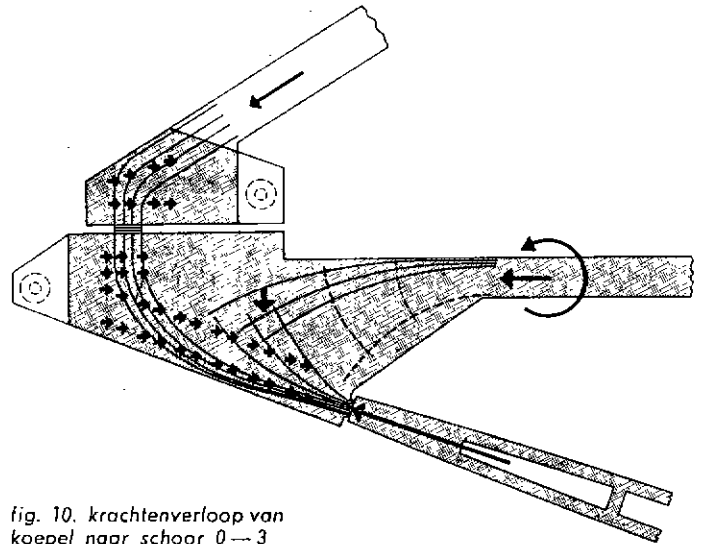


fig. 10. krachtenverloop van koepel naar schoor 0-3

In fig. 10 ziet u nog eens hoe de kracht van koepel naar schoor loopt en hoe de belasting vanuit het neusstuk, met behulp van de voorspankracht en het uit de vloer afkomstige moment, naar de schoor wordt geleid. Daarbij blijkt tevens waar trekspanningen optreden en waar dus wapening gelegd moet worden.

constructie punt 3

Punt 3 heeft ook iets bijzonders. Hier staat namelijk schoor 0-3 onder een hoek op wand 1-3. Om het nog moeilijker te maken loopt deze wand bovendien niet tot beneden toe door, omdat het, zowel voor het uiterlijk, als voor het vermijden van te grote temperatuurspanningen, nodig was de geprefabriceerde elementen door te laten lopen (fig. 11). Hierdoor komt schoor 0-1 op de slechtst denkbare wijze op het randje van de wand te staan. In een dergelijk geval overwegen wij natuurlijk direct de schoor met behulp van voorspanning als het ware tegen de wand te kleven. Het was echter zeer bezwaarlijk om hier voorspanstaven aan te brengen en vooral om deze staven aan te spannen.

Omdat het moeilijk was te voorkomen dat de hoek van de wand of-boerde, hebben wij de scheur zelf maar aangebracht onder een ons passende hoek. In de scheur hadden wij ons oorspronkelijk een plaatje neopreen gedacht, wat tot gevolg zou hebben dat de kracht nauwkeurig gericht van de schoor in de wand geleid zou worden. Het evenwicht wordt verkregen door uit de schoorelementen omhoog stekende staven, die door de schoorkracht en de reactiekracht in het schuine, gladde vlak, onder trek worden gezet. Hoe gunstig het krachtenverloop in de punten 3 en 2 nu is, volgt uit figuur 11.

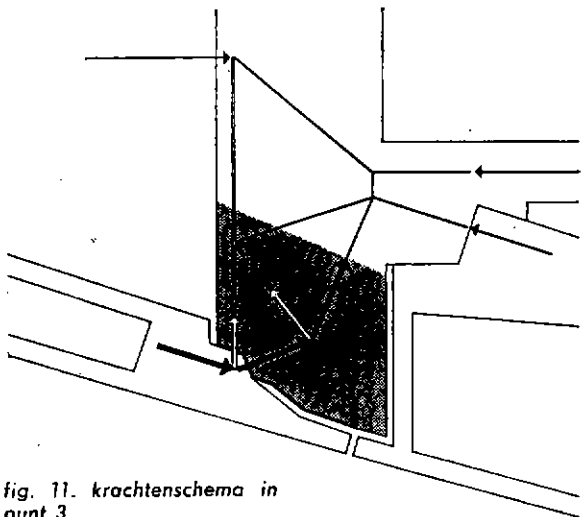


fig. 11. krachtschema in punt 3

Zekerheidshalve werd door het Instituut T.N.O.-I.B.B.C. deze verbinding op schaal 1:2 beproefd in een opstelling als geschetst in fig. 12. Daarbij werd ook de geringe hoekverdraaiing van schoor 0-3 ten opzichte van wand 1-3 nagebootst. De verbinding bleek uitstekend te werken, doch er bleek tevens dat, indien het neopreen-plaatje weggelaten werd — en er dus direct contact was van beton op beton — de breuklast dezelfde was, doch de vervorming aanzienlijk geringer. Wij kozen dus de eenvoudige en ook stijvere uitvoeringswijze.

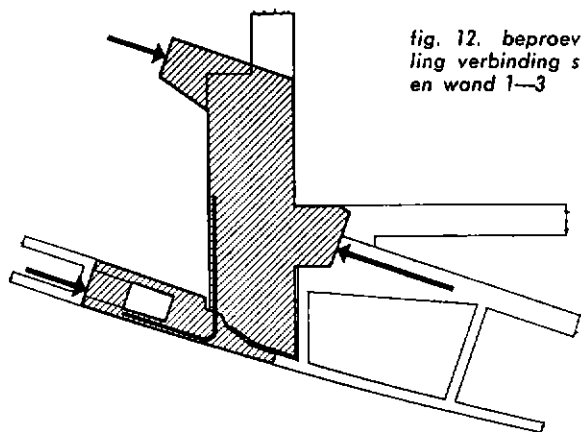


fig. 12. beproevingsopstelling verbinding schoor 0-3 en wand 1-3

constructie schoor 2-6

Ten slotte vestigen wij nog de aandacht op schoor 2-6 (fig. 13). Deze wordt natuurlijk zeer zwaar belast en moet op knik worden onderzocht. Hierbij hebben wij de komhuid met de dwarsverbindingen, die overigens weinig dienst doen, mede in beschouwing genomen.

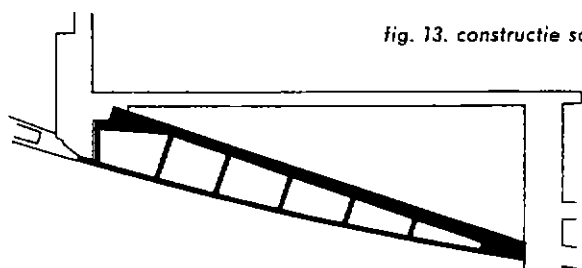
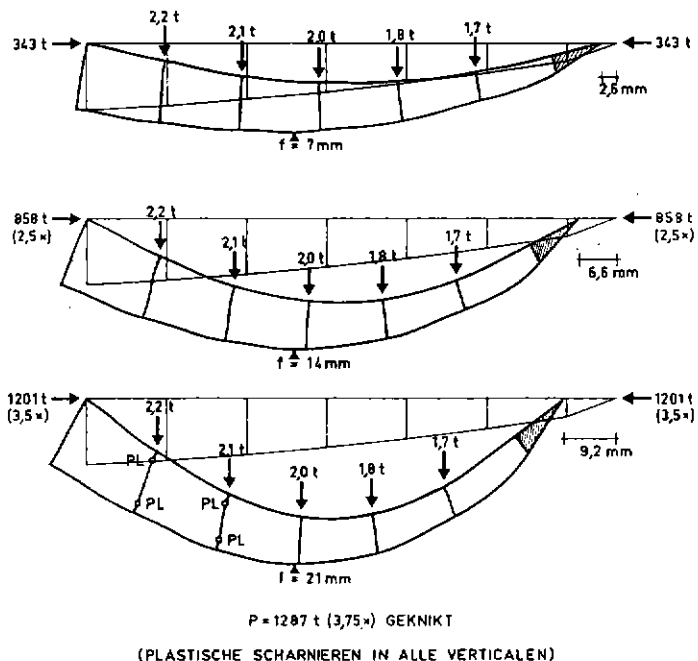


fig. 13. constructie schoor 2-6

Een kracht, die de schoor doorloopt, drukt deze samen. Hierdoor worden de dwarsverbindingen vervormd en daardoor ook de komhuid. Door deze vervorming van de dwarsverbindingen en de komhuid, wordt ook het hoofdelement op buiging belast (fig. 14). Wij hebben hier dus van meet af aan een geval van samengestelde buiging, dat met een iteratie-berekening opgelost kan worden. Naarmate de over te brengen kracht de knikkraft nadert, zal deze itera-

tie-berekening langer duren. Nu een dergelijke berekening dankzij de computer uitgevoerd kan worden zonder ons hoofdpijn te bezorgen, kunnen wij zonder veel bezwaar een stap verder gaan en ook rekening houden met niet-lineaire vervormingen, die bij voorbeeld optreden wanneer er scheuren ontstaan, waardoor als het ware plastische scharnieren worden gevormd. En zo kon het gebeugen dat ir. Voitus van Hamme vertelde dat juist de computer de proefbelasting opgevoerd had tot de kniklast was bereikt, eraan toevoegend dat vóórdien eerst in één punt en later ook in andere punten scheurtjes ontstaan waren, die echter niet gevaarlijk geacht moesten worden.

fig. 14. veiligheid tegen knik bepaald door 'proefbelasting' in de computer



Koepel

Wij willen toch nog iets van de koepel vertellen, want een koepel blijft een fascinerende constructie.

Voor het opnemen van meer of minder gelijkmatig verdeelde belastingen, is een koepel altijd sterk genoeg. Maar vooral wanneer wij te doen hebben met een vlakke koepel, moeten wij erop bedacht zijn, dat de koepel niet doorslaat (fig. 15).

Bij het doorslaan wordt het oorspronkelijk naar boven gekromde oppervlak plat gedrukt, waarbij naast buigende momenten, grote drukspanningen en ring-trekspanningen opgewekt worden, waarna het vlak doorschiet naar zijn 'opgehangen', andere evenwichtspositie. Het is duidelijk dat het dus van belang is dat de koepel zowel een voldoende rek-, als een voldoende buigstijfheid bezit om dit doorslaan te voorkomen. Maar het is natuurlijk ook duidelijk dat het van belang is, dat het krachtenvlak zoveel mogelijk samenvalt met het koepelvlak, want afwijkingen tussen deze twee betekent de aanwezigheid van buigende momenten en dus van nadelige vervormingen.

Vooral vlakke koepels moeten dus nauwkeurig, met minimale afwijkingen, uitgevoerd worden. De constructie moet voorts zodanig gemaakt worden dat het koepel- en het krachtenvlak zo min mogelijk gelegenheid krijgen zich te verplaatsen. Voorts zijn de randvoorwaarden of opleggingsvoorwaarden van belang: ook nabij de opleggingen moet de koepel zich als koepel kunnen gedragen, dat wil zeggen de belastingen zowel door radiale- als door tangentiële spanningen kunnen opnemen. De ideale toestand kan benaderd worden door de oplegging van de koepel verschuifbaar te maken en de koepel-

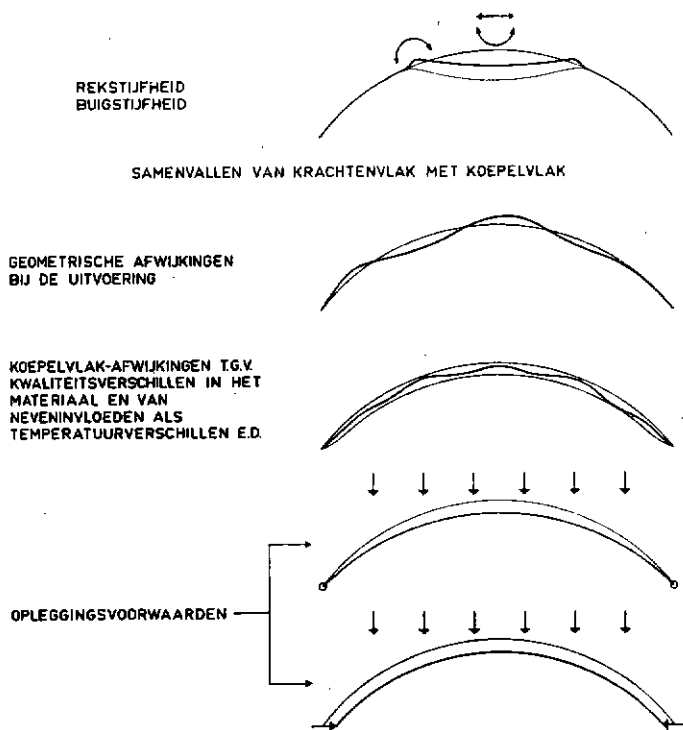


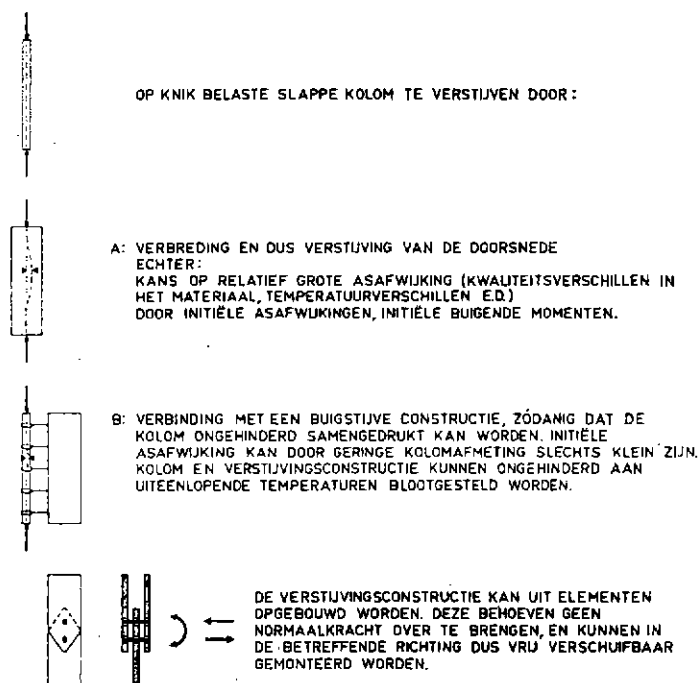
fig. 15

pelrand een dusdanige voorspanning te geven dat de koepelvorm gehandhaafd blijft. Dit is de voornaamste reden waarom wij de koepel op rubberopleggingen hebben geplaatst en de koepelrand hebben voorgespannen.

Om de werking van de door ons gekozen koepel-constructie duidelijk te maken, geven wij hier ter vergelijking het geval van een op knik belaste kolom (fig. 16).

Gesteld dat wij een zeer slanke kolom hebben, die met de gegeven kleine dwarsafmeting onherroepelijk uitknikt. Wij kunnen deze kolom dan verbreden tot een maat waarbij geen knikgevaar bestaat. Maar de as van zo'n brede kolom kan in niet geringe mate afwijken van de rechte lijn, bijv. door verschil in kwaliteit van het beton of door temperatuurverschillen. Door het effect van de samengestelde buiging wordt de afstand van de kracht tot de as nog vergroot.

fig. 16

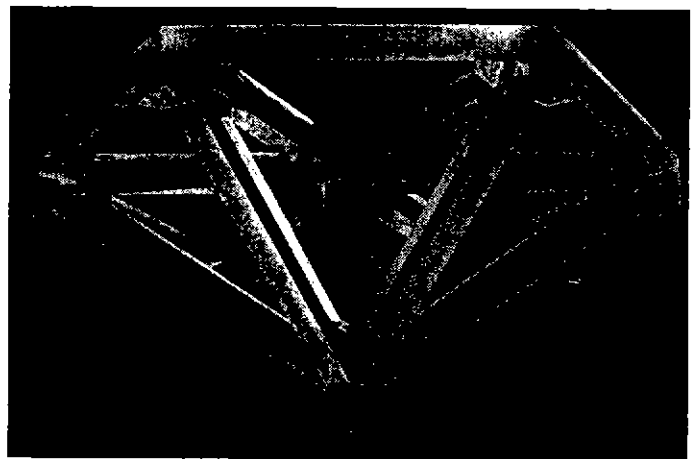


Wij kunnen de kolom echter ook ongewijzigd laten, maar hem verbinden met een buigstijflichaam, op zodanige wijze dat de kolom vrij kan verkorten, maar ogenblikkelijk gesteund wordt wanneer hij zijdelings wil uitbuigen. Tussen de lijn van de kracht en de as van de kolom kan nauwelijks enige afstand bestaan, omdat de as van de kolom door de kleine dwarsafmeting heel nauw aan de plaats is gebonden. Een afwijking, bijv. een materiaalfout in de verstijvingsligger, heeft primair geen invloed op de vervorming, omdat de verstijvingsligger niet door normaalkracht wordt belast. Voorts kan er ongestraft een temperatuurverschil bestaan tussen de kolom en de verstijvingsligger.

De verstijvingsligger kan uit delen opgebouwd worden, die aan elkaar verbonden zijn op zodanige wijze dat momenten en dwarskrachten overgebracht kunnen worden, echter geen normaalkrachten. Dit is in figuur 16 voorgesteld door een verbinding met behulp van twee pennen in slobgaten.

Wij stoppen nu weer over naar de koepel. Deze is opgebouwd uit geprefabriceerde elementen, waarvan foto 17 een model in lamelon toont. Tussen de spaken van het bovénvlak moet u zich een dun vlak denken, dat met deze spaken de bolhuid vormt. De zes pyramide-ribben met de koningsstijl hangen onder de bolhuid.

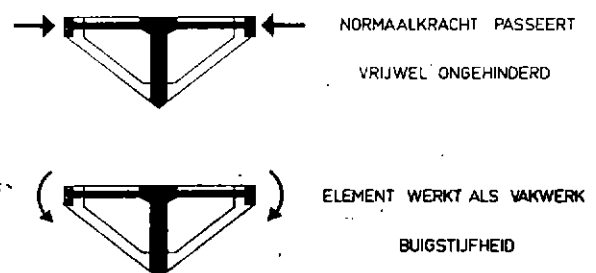
fig. 17. model van een koepel-element



Zo'n element gedraagt zich als een slanke kolom met separate verstijvingsligger. Wordt namelijk de huid door een normaalkracht belast, dan nemen de ribben vrijwel geen deel aan de krachtoverbrenging (fig. 18). De kracht loopt dus vrijwel recht door de huid. Worden de ribben op een andere temperatuur gebracht dan de huid, dan wordt de huid daarbij praktisch niet vervormd. Zou de huid echter willen uitknikken, dan blijkt dat de ribben met de koningsstijl een grote buigstijfheid bezitten.

In figuur 19 zijn enkele belastinggevallen gegeven waaruit blijkt hoe zo'n element zich onder buiging gedraagt. Ook tegen torsie is het element stijf.

fig. 18



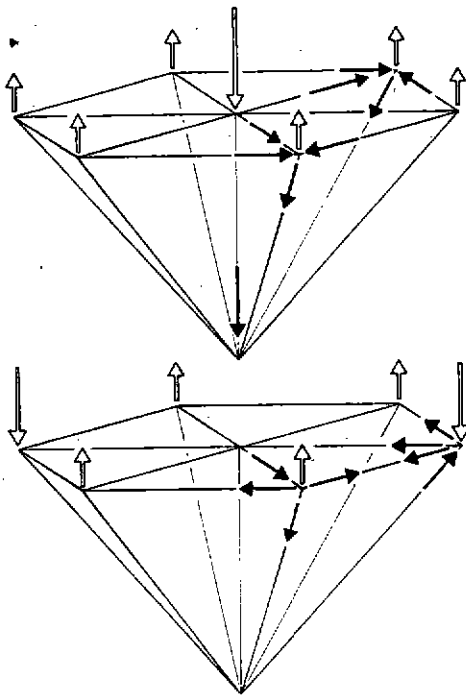


fig. 19

De elementen zijn met enige tussenruimte in het werk geplaatst. Deze tussenruimten werden met beton volgestort. In figuur 20 kunt u zien dat, ofschoon tussen de pyramiden geen direct verband is aangebracht, door het in elkaar grijpen van de zeshoeken toch een buigvast geheel ontstaan is, enigszins te vergelijken met de verstijgingslijger, die opgebouwd was uit delen die met pennen in slobgaten verbonden waren.

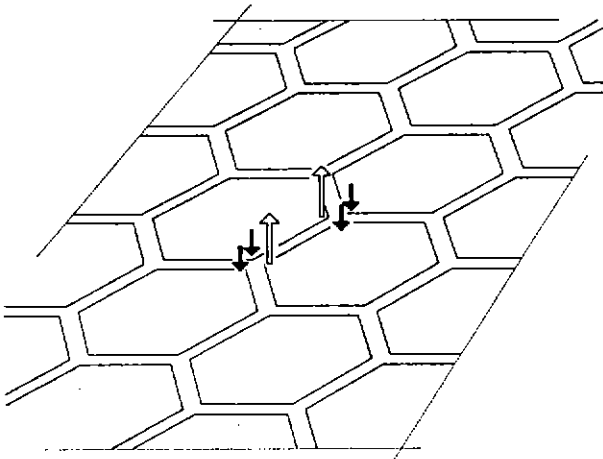


fig. 20

U zult begrijpen dat een en ander met uitvoerige proeven bij T.N.O.-I.B.B.C. geverifieerd is. Van de koepel werden modellen gemaakt uit trovidur, die door middel van een onder de bol getrokken vacuüm belast werden. Op schaal 1 : 50 werden niet alleen de hoofdafmetingen gereproduceerd, doch ook de afwijkingen die bij de uitvoering van de koepel maximaal in de maatvoering getolereerd werden. In sommige modellen werden ook de vorm nabij de lichtkoepel en de

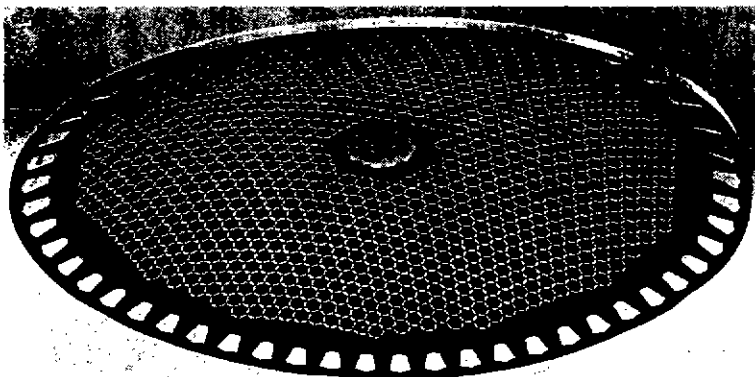


foto 21. nabootsen van vrije oplegging met randvoorspanning



foto's:
T.N.O.-I.B.B.C.

lichtopeningen met versterking nabij de geboorte van de koepel nagebootst.

Heel belangrijk was ook het nabootsen van de vrije oplegging met randvoorspanning. Hoe listig de genieën van T.N.O. dit oplosten, ziet u in foto 21: met behulp van scharen die door hetzelfde vacuüm, waarmee de proefbelasting werd uitgevoerd, bekrachtigd werden, werd de rand van deze koepel onder voorspanning gehouden.

Bleef nog de opgave de voegen tussen de geprefabriceerde elementen na te bootsen, voegen waarin het beton van mindere kwaliteit zou kunnen zijn en misschien krimp-scheurtjes zou vertonen. Daartoe werden in een koepel volgens het elementen-stramien gleuven gefreesd. Foto 22 toont zo'n model van anderen gezien, waarin ook de lichtopeningen nabij de geboorte van de koepel te zien zijn. Tussen de elementen is maar heel weinig materiaal gelaten, waarmee een gebrekkige kwaliteit van het beton in de tussenruimte ruimschoots werd nagebootst. Over de koepel werd een zeer dunne plastic-afdekfolie gelegd, waarna de koepel wederom met behulp van vacuüm kon worden belast. Het bleek nu dat de door sleuven verzwakte koepel precies dezelfde doorslagwaarden gaf als een onverzwakte koepel, vervaardigd uit een materiaal met 60% van de rek- en buigstijfheid. Dit komt overeen met het verschil in materiaalhoeveelheid verwerkt in de koepel met sleuven, vergeleken met de normale koepel. Men kan stellen dat de koepel zich van het sleuvenpatroon niets aantrekt.

De doorslag getoond in foto 23 bewees dat onze patiënt levenskrachtig en gezond is.

foto 22. beproevingsmodel van de koepel

foto 23. opgetreden doorslag na beproeving van het model

