PROVINCIALE WATERSTAAT
IN ZUID-HOLLAND

RAPPORT inzake het bezwijken van de met glasvezel versterkte polyester pijpleiding, deel uitmakend van de proefopstelling van een mobiel pompaggregaat in het kader van de Wet Bescherming Waterstaatswerken in Oorlogstijd.

Ingevolge de Wet Bescherming Waterstaatswerken in Oorlogstijd, heeft de Dienst der Zuiderzeewerken aan de Provinciale Waterstaat in Zuid-Holland een tweetal mobiele pompaggregaten tijdelijk ter beschikking gesteld, teneinde door middel van diverse beproevingen na te kunnen gaan of genoemde werktuigen in een eventuele noodsituatie snel en doelmatig in werking zouden kunnen worden gesteld. Deze experimenten beogen aldus een tweeledig doel, namelijk enerzijds een mechanische beproeving van het aggregaat als zodanig, anderzijds een operationele oefening.
In het kader van het laatstgenoemde aspect is de gedachte naar voren gekomen van toepassing van buisleidingelementen van licht materiaal, met name met glasvezel versterkt polyester. Hiertoe werd een viertal leveranciers uitgenodigd een offerte te maken voor levering van ca 25 m plastic pijp met een inwendige diameter van 60 cm. De laagste inschrijver was de N.V. Handelmaatschappij v/h H.A. Bürmann te Halfweg, welke de buizen betrok van de in Oedt (Rheinland) gevestigde fabriek "Niederrhein Plastik G.m.b.H.". De verkoopleider, de heer J. Bürmann, alsmede een functionaris van de Duitse fabriek, Herr von Langenheim, hebben zich zowel ter plaatse van de proefopstelling als in een tweetal gesprekken met ambtenaren van Zuiderzeewerken en Provinciale Waterstaat, volledig op de hoogte kunnen stellen van de wijze, waarop de te leveren buizen zouden worden beproefd. Een en ander resulteerde in een voorstel hunnerzijds de buizen een wanddikte te geven van 6 mm. De definitieve opdracht tot levering van respectievelijk 2 buizen van 5 m lengte met flenzen en 4 buizen van 3 m lengte met eindverzwaringen, geschiedde zowel mondeling als schriftelijk, waarbij in de betreffende brief van de Provinciale Waterstaat met nadruk de eis werd gesteld, dat de pijpen bestand dienden te zijn tegen een onderdruk van 5 à 6 m W.K. Volledigheidshalve worde hierbij opgemerkt, dat de leverancier noch de fabrikant enige schriftelijke garantie aangaande de vereiste kwaliteit hebben verstrekt.

EK.

Bij de beproeving, waarbij stalen hulpstukken werden gebezigd (voor de opstelling wordt verwezen naar de bijgaande tekening), werd door middel van de aangebouwde vacuüminstallatie de zuigleiding alsmede het pomphuis met water gevuld, waarna de vulling van de hevelpersleiding door de pomp zelf geschiedde. Tijdens het malen werd geconstateerd, dat bepaalde rubbermanchetverbindingen afschoven, waardoor het experiment diende te worden onderbroken, teneinde deze verbindingen te versterken. Bij het stopzetten van de pomp werd door het dienstdoend machinepersoneel een licht kraken van de plastic leiding geconstateerd, zonder verdere gevolgen. Nadat de afgeschoven verbindingen waren hersteld en verzwaard met extra stalen manchetten, werd, thans in het bijzijn van ondergetekende, de reeds beschreven experimentele procedure herhaald. Wederom trad, nadat het gashandle van de dieselmotor was teruggenomen, een licht gekraak op, dat echter plotseling sterk in geluidsvolume toenam, waarbij het hoogstgelegen polyester buis-element van 5 m in het midden in verticale richting werd ingedrukt. Vervolgens boog het element op deze plaats sterk door, waarna de buis zich in een onderdeel van een seconde over de volle omtrek losscheurde van de bovenflens. Het met water gevulde, voorheen vrijdragende, leidingstuk van 2 x 5 m stortte hierop omlaag, waarbij de val enigszins werd afgeremd door de wrijving van het vernielde element langs de aanwezige schildmuur. Door de neerstortende met water verzwaarde leiding werd het mobiele pompaggregaat omgetrokken tot de dieselmotorkap tegen het kopeinde van de aanwezige leimuur stootte. Tevens werd het opstelplatform van de pomp, dat werd gevormd door enige zware houten binten (25/25), uiteengerukt, terwijl de rubbermanchet, welke de verbinding tussen pomp en zuigleiding vormde, over de volle omtrek doorscheurde. De schade, welke door een en ander aan pomp en motor is toegebracht, is op dit moment nog niet vastgesteld; voorzover thans kan worden nagegaan, hebben de resterende plastic-pijpen geen schade ondervonden.

Omtrent de conclusies, welke uit het bezwijken van deze buisleiding zijn te trekken, kan het volgende worden opgemerkt. Door de verkoopleider voornoemd, is bij besprekingen meermalen een elasticiteitsmodulus van 300.000 kg/cm2 opgegeven, als zijnde de E-waarde, waaraan de door hem te leveren buizen zouden voldoen. Deze waarde zou zijn voortgekomen uit proefnemingen, uitgevoerd door Grondmechanica Delft en T.N.O. Kunststoffen. Uit inside-information is het ondergetekende bekend, dat deze experimenten betrekking hadden op een pijp van Amerikaans fabrikaat, opgebouwd uit met glasvezel versterkt epoxyhars (zogenaamde poxyglass), en niet op een polyesterbuis van de N.V. Bürmann. Overigens zijn beide materialen in mechanisch opzicht als gelijkwaardig te beschouwen; slechts de chemische bestendigheid van epoxyhars is beter dan die van polyester. Ondergetekende heeft tevens van deskundige zijde vernomen, dat een E-waarde van 300.000 kg/cm2 in principe slechts haalbaar is voor constructies met gewikkelde fiberglass-wapening (buizen, tanks, etc.) en dan nog slechts in de transversale hoofdrichting.

Met andere, zogenaamde "geplakte" (niet geperste) constructies, is maximaal slechts een elasticiteitsmodulus van ca 200.000 kg/cm2 te bereiken (eveneens alleen in de hoofdrichting). Bovendien blijkt de E-waarde dikwijls te variëren met het veerkrachtsgeval: $E_{druk} < E_{trek} < E_{buiging}$.

De <u>breukspanning</u> (buigtrek) levert over het algemeen minder moeilijkheden op: 3000 à 4000 kg/cm2 en hoger blijkt normaliter te realiseren (in de hoofdrichting). Men kan stellen, dat een deskundig fabrikant van deze zaken op de hoogte dient te zijn, zodat de opdrachtgever kan volstaan met het opgeven van de op te nemen belastingen en zich niet noodzakelijkerwijze behoeft te verdiepen in E-waarden, toelaatbare spanningen en wat dies meer zij. Gezien de in het voorgaande beschreven ervaringen, waarbij een buis, welke volgens opgave bestand had moeten zijn tegen 5 à 6 m W.K. onderdruk, reeds bij een onderdruk van <u>4 à 4,5 m</u> bezwijkt, kan dit standpunt als door de feiten achterhaald worden beschouwd. Ondergetekende is dan ook van oordeel, dat het zinvol zal zijn de geleverde buizen door het Kunststoffeninstituut T.N.O. te laten onderzoeken, ook al is in de schriftelijke opdracht aan de N.V. Bürmann geen bepaalde E-waarde geëist. Het had namelijk op de weg van de fabrikant gelegen, de toe te passen wanddikte zodanig aan de door hem te realiseren E-waarde aan te passen, dat de vereiste onderdruk <u>"toelaatbaar"</u> zou zijn geweest. Het woord <u>"toelaatbaar"</u> houdt tevens in, dat bij de constructie ook nog een bepaalde veiligheidscoëfficiënt ten aanzien van het knikstadium had moeten worden ingecalculeerd. Bij navraag aan T.N.O. is gebleken, dat bedoeld onderzoek op twee wijzen zal kunnen plaatsvinden, namelijk:

a) <u>destructief</u> onderzoek door middel van een soort <u>klemband</u> op een uit de beschadigde pijp te zagen moot,

b) <u>niet-destructief</u> onderzoek door middel van <u>overdruk</u> op het onbeschadigde flenzenelement, dat wordt afgedicht.

Op korte termijn zal T.N.O. hieromtrent een schriftelijke offerte bij de Provinciale Waterstaat indienen, met een kostenraming voor beide methoden.

Aan de hand van enige eenvoudige berekeningen, zal tenslotte nog worden nagegaan, hoe de wijze van bezwijken kan worden verklaard. Zoals reeds is opgemerkt, kan normaliter worden uitgegaan van een <u>breukspanning</u> (buigtrek) van 3000 à 4000 kg/cm2 (in de hoofdrichting). In de secundaire axiale richting ca 2000 kg/cm2.

De wijze van ondersteuning houdt het midden tussen een vrij opgelegde en een tweezijdig ingeklemde balk, met andere woorden een verend ingeklemde balk. Vóór het moment, dat de pomp werd stopgezet, was de buisleiding gevuld met stromend water en heerste in het hoogste punt van de hevelpersleiding een <u>onderdruk</u> van: hoogteverschil tussen het beschouwde punt en de boven-waterstand = <u>2 m W.K.</u>, waarbij is geabstraheerd van leidingverliezen en snelheidshoogte, daar deze waarden in een lagere orde van grootte liggen ($\frac{v^2}{2g} \approx 0{,}15$ m).

In deze toestand trad geen knik op. De vrije overspanning was 2 x 5 = 10 m.
Het gewicht van de met water gevulde buis is te stellen op:

$$\frac{1}{4}.\pi.0,6^2.1.1 = 0,283 \text{ t/m' (water)}$$

$$0,006.2.1.1,4 = \underline{0,017 \text{ "}} \text{ (e.g.)}$$

$$\underline{0,3} \text{ t/m'}$$

Het grootste moment treedt op in het midden en bedraagt:

$$\text{ca } \frac{1}{10} ql^2 = \frac{1}{10}.0,3.10^2 = \underline{3} \text{ tm}$$

De maatgevende doorsnede is iets uit het midden (naast de flensverbinding).
Het weerstandsmoment van de pijpdoorsnede is:

$$W = \frac{r_u^4 - r_i^4}{r_u} . \frac{\pi}{4} = \frac{(30,6)^4 - (30)^4}{30,6} . \frac{\pi}{4} = \underline{1665} \text{ cm3}$$

De optredende buigtrekspanning bedraagt dan:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{300000}{1665} = \underline{180} \text{ kg/cm2} \quad < \sigma_{br} \text{ 2000 kg/cm2.}$$

Uitgaande van een σ_{optr} = 1500 kg/cm2 zou de buisleiding bij vrije opplegging een lengte van ca 25 m moeten kunnen overspannen, namelijk:

$$\frac{1}{8}.0,3.l_{max.}^2 = \frac{1665.1500}{10^5} \longrightarrow \therefore l_{max.} = \sqrt{\frac{1665.1500.8}{0,3.10^5}} = \sqrt{665} = 25,8 \text{ m}$$

De technisch adviseur van N.V. Bürmann, de heer Heideman, achtte desgevraagd, een overspanning van ca 20 m in principe mogelijk.

De alzijdige kritieke knikdruk op een ring volgt uit de formule:

$$\boxed{q_{knik} = \frac{3\,EI}{R^3}}$$

Deze door Boussinesq afgeleide formule heeft betrekking op de kritieke waarde voor een alzijdige knikdruk op een ring. Bij alzijdige drukken kleiner dan deze kritieke, is er sprake van een <u>stabiel evenwicht</u>: dat wil zeggen dat een door een of andere oorzaak ontstane, niet te grote, afwijking van de zuivere cirkelvorm geen inleiding tot knik vormt, doch dat bij wegneming van deze oorzaak de buis wederom de cirkelvorm zal aannemen. Bij alzijdige drukken groter dan deze kritieke, heerst een <u>labiel evenwicht</u>, dat wil zeggen dat een gegeven afwijking van de cirkelvorm zal toenemen en tot knik zal leiden. Een en ander impliceert, dat de initiële ellipticiteit ten gevolge van de doorbuiging van de overspannende buisleiding, van geen invloed is op de evenwichtstoestand als zodanig, doch slechts de knik kan inleiden ingeval van een labiel evenwicht ($q < \frac{3\,EI}{R^3}$). Bij een stabiel evenwicht ($q > \frac{3\,EI}{R^3}$) kan dus geen knik ontstaan, ook niet in geval van een initiële door buiging ontstane afwijking van een cirkelvormige doorsnede.

Voorgaande geeft voedsel aan de veronderstelling dat, indien de onderdruk van 4 à 4,5 m W.K. niet gecombineerd was opgetreden met de door buiging veroorzaakte ellipticiteit, mogelijkerwijze geen knik zou zijn opgetreden, terwijl toch een labiele evenwichtstoestand zou hebben geheerst, zodat een stoot of andere kleine verstoring reeds knik zou hebben kunnen veroorzaken. Bij een eventuele herhaling van het knikexperiment in bijvoorbeeld een laboratorium zal dus eveneens de te creëren onderdruk gepaard dienen te gaan aan een op een of andere wijze te realiseren initiële afwijking van de cirkelvorm, teneinde met voldoende nauwkeurigheid de kritieke alzijdige knikdruk empirisch te kunnen bepalen.

Het traagheidsmoment van de buiswand (1 m in axiale richting):

$I = \frac{1}{12}.100.0{,}6^3 = \underline{1{,}8}\ cm^4$

Bij een E_b= 300.000 kg/cm2 : $q_{knik} = \frac{3.300000.1{,}8}{30^3} = \underline{60\ kg/cm'}$

per cm2: $\frac{60}{100} = 0{,}6$ kg/cm2 = 6 t/m2 = <u>6 m W.K.</u>

Nadat de pomp was stopgezet, was de buisleiding gevuld met stilstaand water en heerste in het hoogste punt van de hevelpersleiding een <u>onderdruk</u> van: hoogteverschil tussen het beschouwde punt en de benedenwaterstand = <u>4,5 m W.K</u>. Het bezweken buiselement was, zoals gezegd, voorzien van flenzen, welke een verstijvende, knikbelemmerende invloed op de tussenliggende buis uitoefenen. Het punt, waar deze gunstige invloed minimaal is, is het midden van deze buis. Zoals reeds eerder is opgemerkt, is in dit punt knik opgetreden. Uit het feit, dat bij de eerste proef de gevolgen tot gekraak beperkt bleven, en bij de tweede knik plaatsvond, kan worden geconcludeerd, dat de optredende onderdruk juist de kritieke waarde moet hebben bezeten.

Terugrekenend kan men thans bepalen, welke E_b-waarde de betreffende pijp moet hebben gehad: <u>onderdruk</u> ter plaatse van het midden van de bezweken buis: ca <u>4 m W.K.</u> = 4 t/m2 = 0,4 kg/cm2 = 40 kg/cm'

$40 = \frac{3.E_b.1{,}8}{30^3} \longrightarrow \therefore \boxed{E_b = 200.000\ kg/cm2.}$

Men kan nu ook nagaan, welke wanddikte bij deze gegeven elasticiteitsmodulus noodzakelijk was geweest om de vereiste onderdruk van 6 m W.K. te kunnen weerstaan.

$\frac{3.200000.I_{wand}}{30^3} = 60 \longrightarrow \therefore I_{wand} = \frac{60.30^3}{3.200000} = \underline{2{,}7}\ cm^4$

$\frac{1}{12}.\ 100.d^3 = 2{,}7 \longrightarrow d^3 = \frac{2{,}7.12}{100} = 0{,}324 \longrightarrow \boxed{d = 0{,}69\ cm \approx 7\ mm}$

Afgezien van de veiligheidscoëfficiënt, welke vanzelfsprekend ook voor de knik dient te worden ingevoerd, zou dus 1 mm extra wanddikte knik hebben kunnen voorkomen. Toen de buis in het midden werd platgedrukt, daalde in de betreffende doorsnede zowel het weerstands- als het traagheidsmoment. Hoewel in deze doorsnede, voorzover mogelijk, geen breuk op buigtrek is geconstateerd, boog de buis daar ter plaatse wel sterk door (scharnier). Hierdoor wijzigde zich de krachtsverdeling als volgt: het grootste moment treedt nu op ter plaatse van de bovenflens en bedraagt:

$$\frac{1}{4}\,l.q.\frac{1}{8}\,l + \frac{1}{2}\,q.\frac{3}{4}\,l.\frac{1}{4}\,l = \frac{1}{32}\,ql^2 + \frac{3}{32}\,ql^2 = \frac{1}{8}\,ql^2 = \frac{1}{8}.\ 0{,}3.10^2 = \underline{3{,}75}\ \text{tm}$$

De maatgevende doorsnede is iets naar het midden (naast de flensverbinding). De optredende buigtrekspanning bedraagt dan:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{375000}{1665} = \underline{225}\ \text{kg/cm2} \ll \sigma_{br} = 2000\ \text{kg/cm2}$$

Uit het feit, dat de buis tijdens het draaien van de pomp niet en bij het stopzetten (na knik) wel op buigtrek is gebroken, kan de conclusie worden getrokken, dat de werkelijke breukspanning van het materiaal ter plaatse van de overgang van buis naar flens ligt tussen de grenzen 180 en 225 kg/cm2, stel ca 200 kg/cm2, zodat de overspannende leiding (ter plaatse van de middenflenzen) ook voor het stoppen van de pomp niet ver van de buigingsbreuktoestand verwijderd moet zijn geweest. Het breukvlak geeft aan dat de breuk is ontstaan door delaminatie tussen de glasvezelwapening van de buis (bestaande uit een gevlochten strengenmat gecombineerd met een gewikkelde draadwapening) enerzijds, en de identiek opgebouwde fiberwapening van de flensbinnenrand annex keelverzwaring anderzijds. De fabrikant is blijkbaar niet in staat geweest voor de vereiste geleidelijke krachtsoverdracht via een continue materiaalovergang zorg te dragen. Dit blijkt ook uit inspectie van deze breuk: de fabrikant heeft in plaats van de axiale wapeningsstrengen van de buiswand in de flens door te laten lopen, de buis met flensbinnenrand en keelverzwaring gewikkeld, en hieraan de flenzen bevestigd, welke zijn opgebouwd uit een mengsel van polyester en losse korte glashaartjes. Omtrent de breukspanning van het materiaal van de pijp zelf, zijn geen conclusies te trekken, aangezien deze naar alle waarschijnlijkheid in geen enkele doorsnede is bereikt.

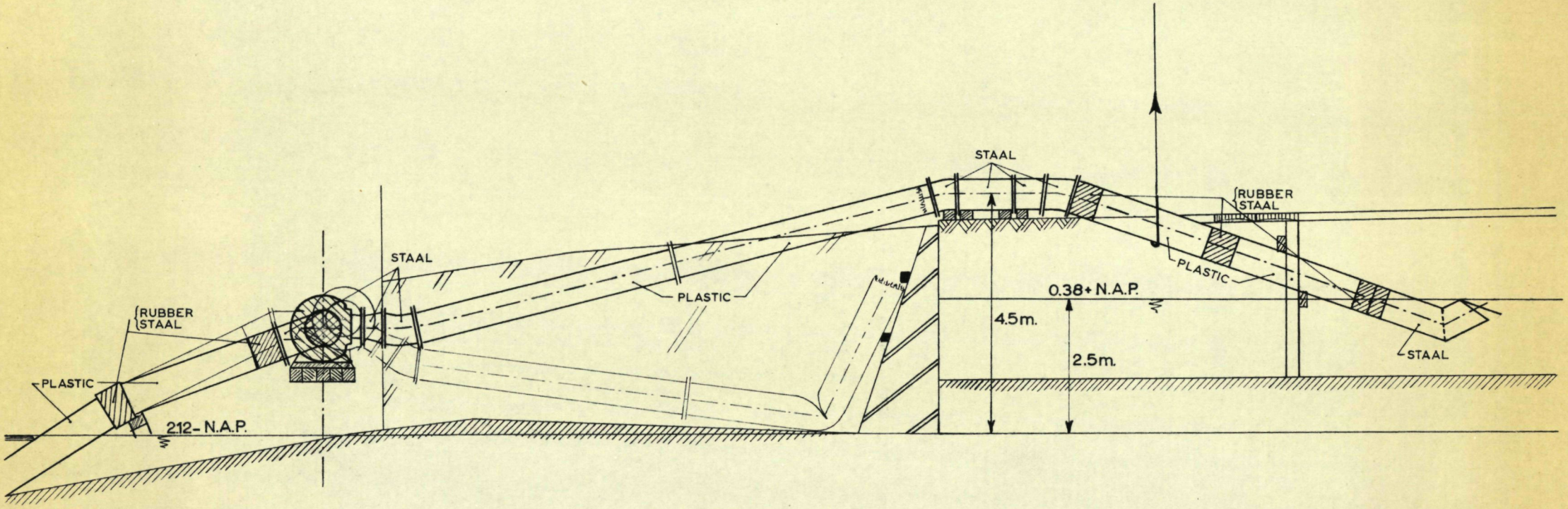
Resumerend kan men stellen, dat de beproefde buizen van gewapend polyester geleverd door de N.V. Bürmann, ondeugdelijk zijn gebleken voor het gestelde doel: de pijpen zijn niet in staat de vereiste onderdruk van 5 à 6 m W.K. te doorstaan, terwijl de verbinding van de flenzen aan de buizen te zwak is uitgevoerd. Tenslotte wordt nog opgemerkt, dat de beproeving van de plastic buizen in eerste aanleg zuiver operationeel was opgezet, doch tijdens het verdere verloop van het experiment in een mechanische is ontaard, door het onvoorzien te kort schieten van de gebruikte elementen.

's-Gravenhage, 21-12-1964

Gezien voor Zuiderzeewerken:
w.g. (ir C. Veen)

(ir. R.A.J. de Kock)

Situatie voor en na het bezwijken van de met glasvezel versterkte polyester pijpleiding, deeluitmakend van de proefopstelling van een mobiel pompaggregaat in het kader van de wet B.W.O.

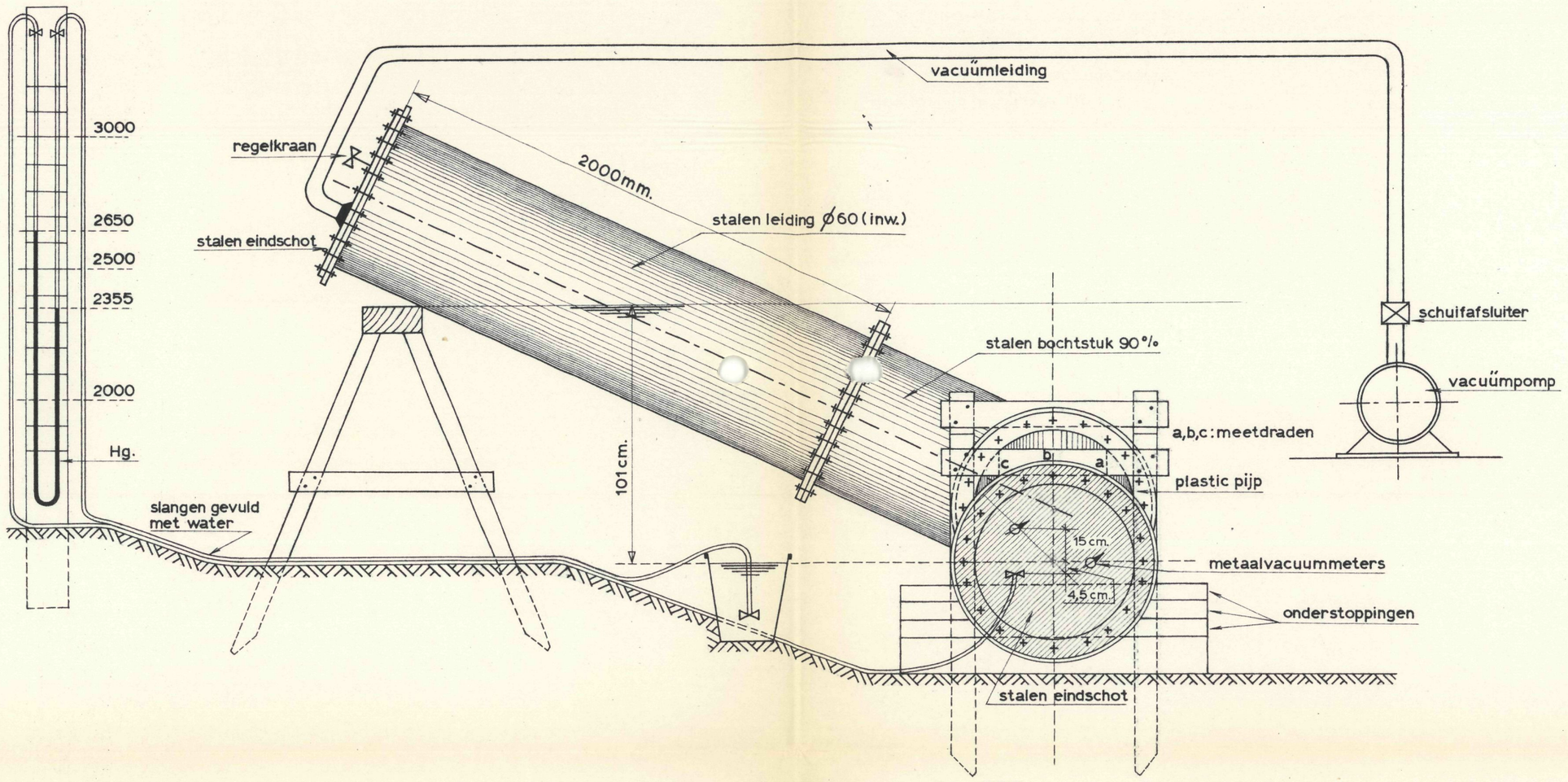


AANGEVULD d.d. 24-12-1964

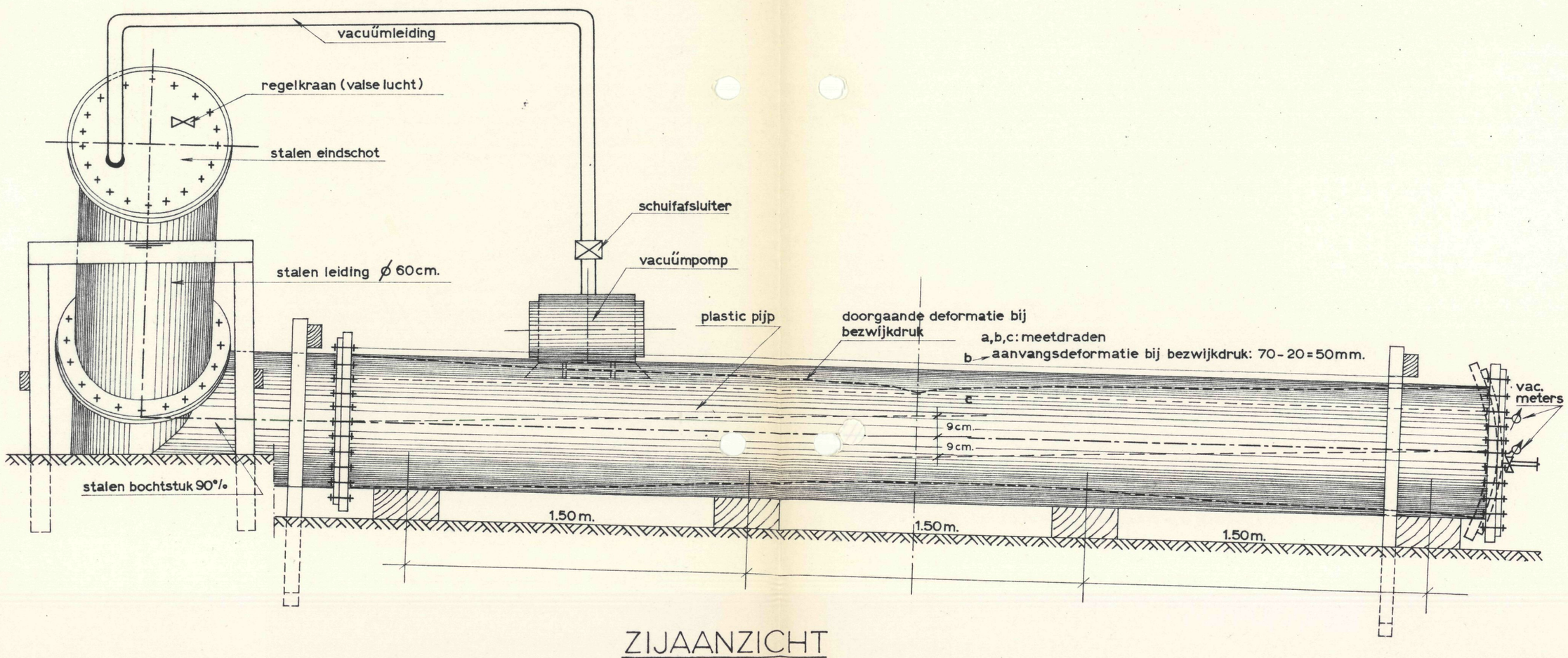
SCHAAL 1:100

PROEFOPSTELLING TE NIEUWERKERK a/d IJSSEL

Opstelling ter beproeving op onderdruk tot een maximum van 5m. W.K. van een buisleidingelement met flenzen.
Vervaardigd van met glasvezel gewapend polyester met een diameter van ø 60cm. inwendig, een
wanddikte van 6mm., een lengte van 5m. en glasgehalte van 60%. SCHAAL ± 1:20.
Gemeten bezwijkdruk: (265,0 – 235,5)(13,6-1) + 4,5 + 9 = 29,5. 12,6+13,5 = 372 +13 = 385cm. = 3,85m.W.K. (onderdruk) < 5 (eis)
Metaalvacuümmeter: 30x13,6 = 408cm. = 4,08m.W.K. (minder nauwkeurig)



VOORAANZICHT



ZIJAANZICHT

WET B.W.O. SCHAAL ± 1:20

PROVINCIALE WATERSTAAT IN ZUID-HOLLAND

'65 B.W.O. 9