

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

NADERE STUDIE CAVITATIE BIJ SPLETEN
TUSSEN SCHUIF- EN DORPELBALKEN VAN DE
STORMVLOEDKERING VAN DE OOSTERSCHELDE

Ir. J.C. Dusseldorp

Drs. D.M. Oldenziel

R 1309

april 1978

NADERE STUDIE CAVITATIE BIJ SPLETEN
TUSSEN SCHUIF- EN DORPELBALKEN VAN DE
STORMVLOEDKERING VAN DE OOSTERSCHELDE

Ir. J.C. Dusseldorp

Drs. D.M. Oldenziel

R 1309

april 1978

INHOUD

	blz.
<u>1</u> <u>Probleemstelling</u>	1
<u>2</u> <u>Overzicht van de omstandigheden</u>	2
<u>3</u> <u>Aanpak van het cavitatieprobleem</u>	8
<u>4</u> <u>Cavitatievormen</u>	10
<u>5</u> <u>Mate van cavitatie en zijn gevolgen</u>	13
5.1 Cavitatie in een straalstroom	13
5.2 Cavitatie nabij een hydraulisch ruwe wand	15
<u>6</u> <u>Konklusies</u>	19
6.1 De cavitatie-intensiteit	19
6.2 Cavitatie-erosie	21
<u>7</u> <u>Suggesties voor een modelstudie</u>	23
7.1 Oriëntatie bij andere laboratoria	23
7.2 Experimentele studies	23
<u>8</u> <u>Notatie</u>	25
<u>9</u> <u>Referenties</u>	26

APPENDIX 1

APPENDIX 2

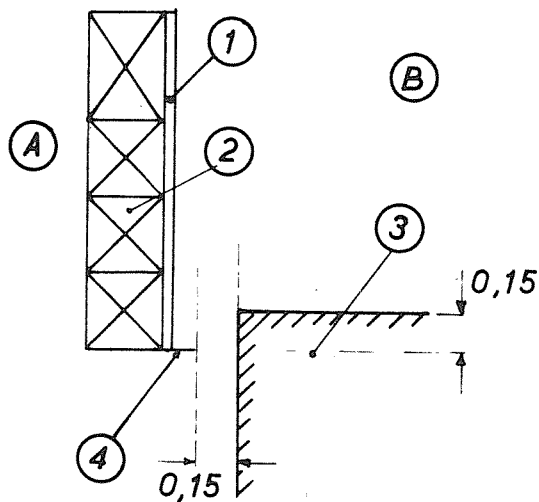
APPENDIX 3

1 Probleemstelling

Wanneer de toekomstige stormvloedkering in de Oosterschelde gesloten is, zijn spleten aanwezig tussen de dorpel en de schuif. Ten gevolge van een verschil tussen het zeeniveau en het niveau van het water in de Oosterschelde wordt een waterbeweging door de spleet in stand gehouden. Verwacht wordt dat de waarden van de watersnelheden en de heersende drukken dusdanig zijn dat cavitatie optreedt. De vraag is nu welke gevolgen de cavitatie met zich meebrengt. Cavitatie nabij de sponning van de schuif wordt wel in de beschouwing opgenomen, maar aan de eventuele cavitatie die optreedt wanneer een enkele schuif open blijft staan, wordt geen aandacht besteed in dit onderzoek.

2 Overzicht van de omstandigheden

In figuur 1 wordt schematisch weergegeven hoe de situatie zal worden gerealiseerd.

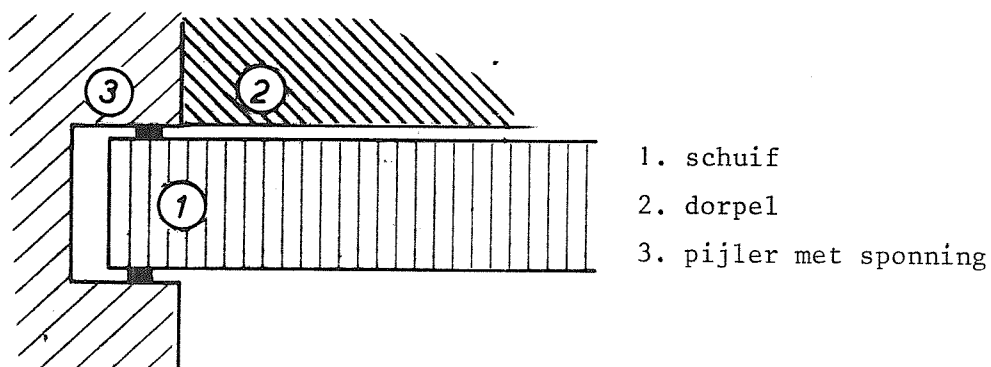


- A. zeezijde
- B. Oosterscheldezijde
- 1. schuif
- 2. vakwerk
- 3. dorpel van beton
- 4. uitstekende lip van de schuif

Figuur 1: Situatieschets bij gesloten toestand: Dwarsdoorsnede

We nemen aan dat bij cavitatiegevaar het zeeniveau hoger is dan het waterniveau van de Oosterschelde. Dit betekent dat water vanuit zee tussen de schuif en de dorpel door de Oosterschelde binnenstroomt. De afmetingen van de spleet die in figuur 1 genoemd zijn, zijn gemiddelde waarden. De schuif buigt door als functie van de horizontale belasting, zodat de breedte van de spleet een functie is van de plaats tussen de twee pijlers, waarin de schuif is gemonteerd. De minimale spleetbreedte kan zelfs enkele cm bedragen.

In figuur 2 is een schets gegeven van de sponning vanaf boven gezien.



Figuur 2: Situatieschets nabij de sponning: Bovenaanzicht

De druk aan de zeezijde van de spleet wordt gegeven door de hydrostatische druk van het zeeniveau; aan de Oosterscheldezijde wordt de druk bepaald door de hydrostatische druk aldaar.

Verder speelt de golfhoogte met de bijbehorende reflectie een rol. Zoals in de volgende paragraaf uiteengezet zal worden, kan de cavitatie-intensiteit gekoppeld worden aan het zogenaamde Thoma getal σ^* , die in het geval van nauwe doorgangen gedefinieerd kan worden door

$$\sigma^* = \frac{p_1}{p_o - p_1} = \frac{(H_{os} - D) 10^4 + p_a}{\Delta H \cdot 10^4} \quad (1)$$

Hierin is:

H_{os} = waterstand Oosterschelde in m ten opzichte van NAP

D = dorpelhoogte in m ten opzichte van NAP

p_a = atmosferische druk in Pa.

ΔH = $H_{os} - (H_z + H_g)$ - waterstandverschil over de schuif in m

H_z = waterstand van de zee in m ten opzichte van NAP

H_g = halve hoogte van de golf en zijn reflectie in m.

In tabel I zijn de σ -waarden vermeld onder de verschillende omstandigheden. In de laatste kolom is de verwachte watersnelheid in de spleet gegeven, waarbij is aangenomen dat bovenstrooms van de spleet geen drukopbouw plaatsvindt. Onder deze omstandigheden geldt dat:

$$v_k = \sqrt{2 \frac{p_o - p_1}{\rho}} \quad (2)$$

Wanneer drukopbouw plaatsvindt bij de plotselinge verwijding wordt de snelheid gegeven door:

$$v_k = \sqrt{2 \frac{p_o - p_1}{\rho} \left[2 \left(\frac{D_k}{D_1} \right)^2 + 1 - 2 \frac{D_k}{D_1} \right]^{-\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Zie voor de afleiding appendix I.

In figuur 3 zijn de σ -waarden uitgezet als functie van de dorpelhoogte en met de waterstanden als parameter. De laagste sigma-waarde bedraagt ongeveer $\sigma = 1$.

Tabel I

Dorpel- hoogte m t.o.v. NAP	H_{os} m t.o.v. NAP	$H_{os} - D$ m	H_z m t.o.v. NAP	H_g golf+refl. (gdf) m	$H_{os} - (H_z + H_g)$ m	σ^*	v_k m/s				
- 4	- 1,5	2,5	5,5	-	7	1,79	11,72				
				1,2 (1,5)	8,2	1,52	12,68				
				2,8 (3,5)	9,8	1,28	13,87				
				5,6 (7)	12,6	0,99	15,72				
				- 0,3	3,5	-	6	2,25	10,85		
						1,2	7,2	1,88	11,89		
						2,8	8,8	1,53	13,14		
						4,0 (5)	10,0	1,35	14,01		
	5,6 (7)	11,6	1,16			15,09					
	8,0 (10)	14,0	0,96			16,57					
	- 1,5	2,5	3,5			-	5	2,5	9,9		
						1,2 (1,5)	6,2	2,02	11,03		
				2,0 (2,5)	7,0	1,79	11,72				
				- 0,5	3,5	-	4,0	3,38	8,86		
						1,2	5,2	2,60	10,10		
						2,0	6,0	2,25	10,85		
						- 5	- 1,5	3,5	5,5	-	7
				1,2	8,2					1,52	12,68
	2,8	9,8	1,28	13,87							
	5,6	12,6	1,07	15,72							
	- 0,5	4,5	-	6	2,42					10,85	
			1,2	7,2	2,01					11,89	
			2,8	8,8	1,65					13,14	
			4,0	10,0	1,45					14,01	
5,6			11,6	1,25	15,09						
8,0			14,0	1,04	16,57						
- 1,5			3,5	3,5	-		5	2,7	9,9		
					1,2		6,2	2,18	11,03		
	2,0	7,0			1,93		11,72				
	- 0,5	4,5			-		4,0	3,63	8,86		
					1,2		5,2	2,79	10,10		
					2,0		6,0	2,42	10,85		

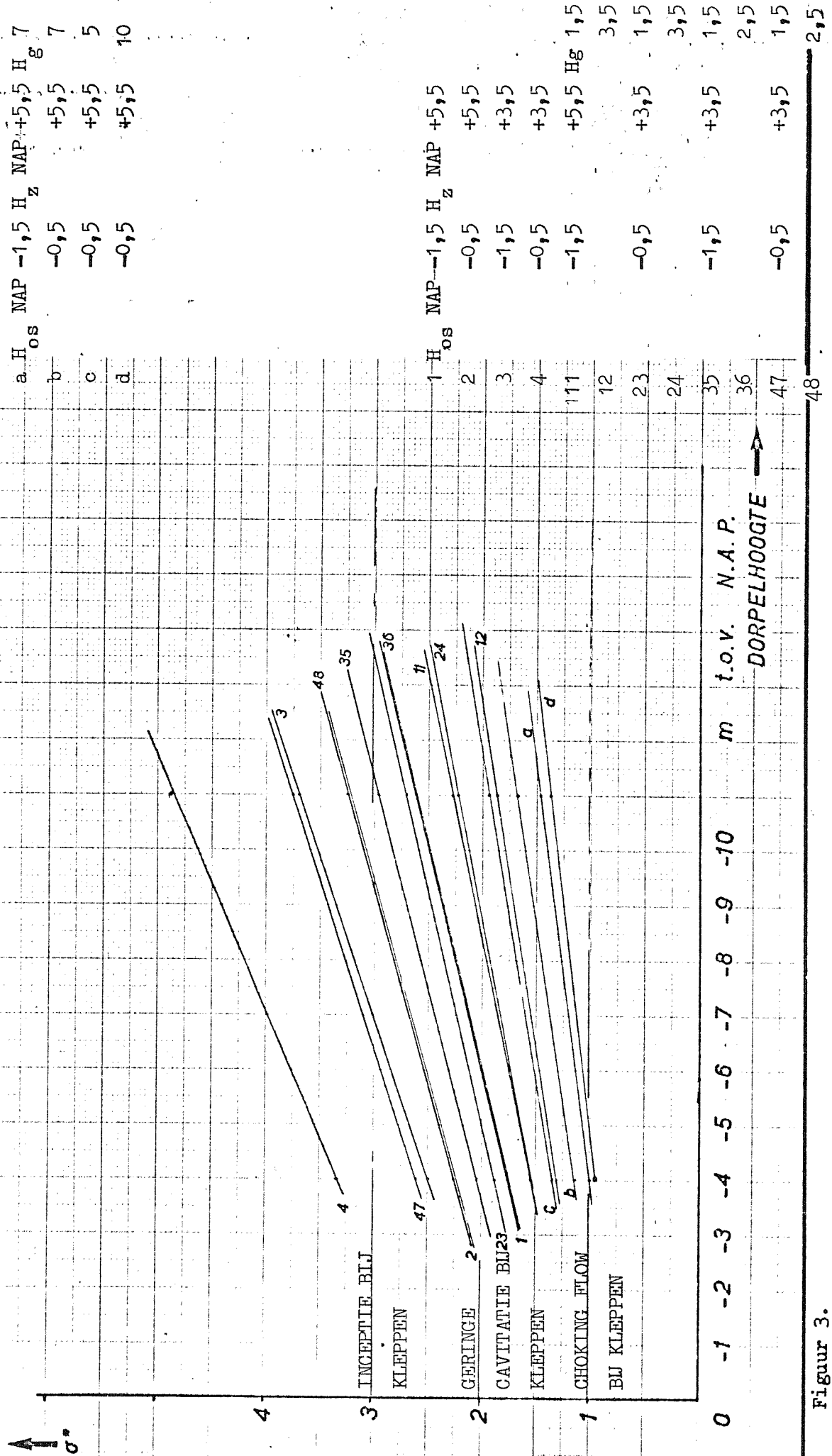
Tabel I : vervolg

Dorpel hoogte m t.o.v. NAP	H_{os} m t.o.v. NAP	$H_{os} - D$ m	H_z m t.o.v. NAP	H_g golf+refl. (gdf) m	$H_{os} - (H_z + H_g)$ m	σ^*	v_k m/s			
- 6	- 1,5	4,5	5,5	-	7	2,07	11,72			
				1,2	8,2	1,77	12,68			
				2,8	9,8	1,48	13,87			
				5,6	12,6	1,15	15,72			
				- 0,5	5,5	-	6	2,58	10,85	
						1,2	7,2	2,15	11,89	
						2,8	8,8	1,76	13,14	
						4,0	10,0	1,55	14,01	
	5,6	11,6	1,34			15,09				
	8,0	14,0	1,11			16,57				
	- 1,5	4,5	3,5			-	5	2,9	9,9	
						1,2	6,2	2,34	11,03	
				2,0	7,0	2,07	11,72			
				- 0,5	5,5	-	4,0	3,88	8,86	
						1,2	5,2	2,98	10,10	
						2,0	6,0	2,58	10,85	
						<hr/>				
				- 7,5	- 1,5	6	5,5	-	7	2,29
	1,2	8,2	1,95					12,68		
	2,8	9,8	1,63					13,87		
	5,6	12,6	1,27					15,72		
	- 0,5	7	-					6	2,83	10,85
			1,2					7,2	2,36	11,89
			2,8					8,8	1,93	13,14
4,0			10,0					1,70	14,01	
5,6			11,6		1,47	15,09				
8,0			14,0		1,21	16,57				
- 1,5			6		3,5	-	5	3,20	9,9	
						1,2	6,2	2,58	11,03	
	2,0	7,0				2,29	11,72			
	- 0,5	7				-	4,0	4,25	8,86	
						1,2	5,2	3,27	10,10	
						2,0	6,0	2,83	10,85	

Tabel I : vervolg

Dorpel- hoogte m t.o.v. NAP	H_{os} m t.o.v. NAP	$H_{os} - D$ m	H_z m t.o.v. NAP	H_g golf+refl. (gdf) m	$H_{os} - (H_z + H_g)$ m	σ^*	v_k m/s					
- 8,5	- 1,5	7	5,5	-	7	2,43	11,72					
				1,2	8,2	2,07	12,68					
				2,8	9,8	1,73	13,87					
				5,6	12,6	1,35	15,72					
	- 0,5	8			-	6	3,3	10,85				
					1,2	7,2	2,50	11,89				
					2,8	8,8	2,05	13,14				
					4,0	10,0	1,8	14,01				
					5,6	11,6	1,55	15,09				
					8,0	14,0	1,29	16,57				
					- 1,5	7		3,5	-	5	3,46	9,9
									1,2	6,2	2,74	11,03
	2,0	7,0	2,43	11,72								
	- 0,5	8							-	4,0	4,5	8,86
					1,2	5,2	3,46	10,10				
					2,0	6,0	3,00	10,85				
-10					- 1,5	8,5	5,5	-	7	2,64	11,72	
	1,2	8,2	2,26	12,68								
	2,8	9,8	1,89	13,87								
	5,6	12,6	1,47	15,72								
	- 0,5	9,5			-	6	3,25	10,85				
					1,2	7,2	2,71	11,89				
					2,8	8,8	2,22	13,14				
					4,0	10,0	1,95	14,01				
					5,6	11,6	1,68	15,09				
					8,0	14,0	1,39	10,57				
					- 1,5	8,5		3,5	-	5	3,7	9,9
									1,2	6,2	2,98	11,03
	2,0	7,0	2,64	11,72								
	- 0,5	9,5							-	4,0	4,88	8,86
					1,2	5,2	3,75	10,10				
					2,0	6,0	3,25	10,85				

σ^* als functie van dorpel-
hoogte en waterstanden.



Figuur 3.

Tijdens metingen van afvoercoëfficiënten bij het Waterloopkundig Laboratorium zijn enkele waarden bekend geworden omtrent de μ -faktor in gesloten toestand. Wanneer we de μ -faktor definiëren als

$$Q = \mu \cdot 0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

dan ligt deze waarde grofweg tussen $0,75 < \mu < 1,05$. Deze faktor is niet nauwkeurig gemeten omdat het model niet gebouwd was om afvoercoëfficiënten te meten in gesloten toestand. Wanneer aan deze waarden konklusies mogen worden verbonden, dan kan gesteld worden dat de drukopbouw benedenstrooms van de spleet gering is.

Naast de mogelijke σ -waarden voor de spleet is het ook nuttig aan te geven met welke frekwenties deze voorkomen ten aanzien van de cavitatie-erosie. In tabel II zijn enkele waarden opgenomen.

Tabel II

H_z	H_{os}	frekwentie	σ -gebied
3,5	-0,5	600 uur per 100 jaar	2,3 - 4,9
3,5	-1,5	600 uur per 100 jaar	1,8 - 3,7
4,5	-1,0	300 uur per 100 jaar	-
5,5	-0,5	150 uur per 100 jaar	1,0 - 3,3
6,5	-0,5	15 uur per 100 jaar	-

De getallen in deze tabel zijn gebaseerd op een eigen schatting om de gedachten te kunnen bepalen. Golfhoogtes zijn in de waarden van H_z verdiskonteerd.

3 Aanpak van het cavitatieprobleem

In het algemeen kan het volgende programma doorlopen worden.

- Plaats van de cavitatie.
- Vorm van de cavitatie.
- Cavitatie intensiteit.
- Nevenverschijnselen van de cavitatie.

Veelal is het zonder al te veel moeilijkheden na te gaan waar de cavitatie gelokaliseerd is. Uit de geometrie is de snelheidsverdeling en drukverdeling bekend en kan het gebied met de hoogste snelheid of laagste druk opgespoord worden. Vaak zijn direkt reeds geometriën herkenbaar waaraan of in de buurt waarvan cavitatie optreedt.

Een kental is hierbij het cavitatiegetal, in feite niet veel anders dan een drukkoëfficiënt

$$\sigma_x = \frac{p_x}{\frac{1}{2} \rho v_x^2} \quad (5)$$

Zie voor een algemene inleiding Knapp, Daily and Hammitt (1970). De plaats x waar de druk p_x en de snelheid v_x bekend zijn behoeft niet noodzakelijk met het cavitatiecentrum samen te vallen.

Wanneer de plaats van cavitatie gelokaliseerd is, is het mogelijk de vorm van cavitatie te analyseren. Hierbij kunnen analogieën gebruikt worden of geeft een analyse van het stroomgebied een aanwijzing. Voor bepaalde cavitatievormen speelt het Reynoldsgetal een grote rol.

Het valt niet altijd mee om zinvol over de cavitatie-intensiteit te oordelen. Ruwweg geldt dat hoe kleiner de waarde van σ_x is hoe groter de cavitatie-intensiteit. Echter dit verband hangt sterk af van de geometrie en wanneer niet exact dezelfde geometrieën uit de literatuur bekend zijn moet al gauw worden besloten om experimenten uit te voeren. Vooral in het geval van wandcavitatie is de vorm van het objekt en het Reynoldsgetal erg belangrijk en moeten experimenten worden gedaan. De cavitatie aan scheepsschroeven wordt daarom ook steeds experimenteel bepaald. Zie voor deze problematiek Arakeri (1974).

Vrije stroomcavitatie hangt af van de turbulentie-intensiteit of vaak is een soort van straalstroom te herkennen met de welbekende vortices in de mengzone. Bij deze soort van cavitatie is het vaak mogelijk om analogieën te vinden. Om de nevenverschijnselen van de cavitatie verder te bepalen moeten de analogieën gevonden in de literatuur in detail worden geanalyseerd. Het uitvoeren

van experimenten waarbij de resultaten vergeleken worden met die van andere, is zeker op z'n plaats. Het analyseren van een nevenverschijnsel als cavitatie-erosie is tot op heden erg lastig en over het algemeen komen we niet verder dan experimenteel aan te geven waar eventueel cavitatieschade op gaat treden.

Schaaleffekten geven hier vaak een verkeerd beeld van de gang van zaken. Het analyseren van door cavitatie geïnduceerde trillingen is eveneens een lastig vraagstuk, maar dat is vermoedelijk hier niet aan de orde.

4 Cavitatievormen

Cavitatie is het exploderen en het imploderen van belLEN in water. De beexplosie wordt veroorzaakt doordat een klein deeltje in een gebied komt waar de druk lager is dan de dampdruk. Dit kleine deeltje is meestal een klein luchtbelletje of een verontreiniging waaraan wat lucht gekoppeld is. Bij de explosie wordt de druk in het gas groter dan de druk in de omgeving van de bel vermeerderd met de oppervlaktespanning.

De radiële snelheid van de belstraal bedraagt over het algemeen enkele meters per seconde totdat de bel weer in een gebied komt, waar de druk hoger is dan de dampdruk. De bel implodeert met een radiële snelheid van enkele honderden meters per seconde en brengt een schokgolf door de vloeistof teweeg. De bel versplintert, en een aantal minuskuul kleine gasbelletjes blijven over. Het gas in deze kleine belletjes is naar de bel getransporteerd op grond van moleculaire diffusie.

Bij cavitatie in koud water kan de dampdruk konstant worden beschouwd. Wanneer het optreden van cavitatie moet worden geanalyseerd, waarbij de heersende drukken vele malen groter zijn dan de dampdruk, dan kan deze zonder meer worden verwaarloosd.

Cavitatie kan in eerste instantie worden verdeeld in twee hoofdvormen:

- cavitatie aan een gladde wand
- cavitatie in de vrije stroming.

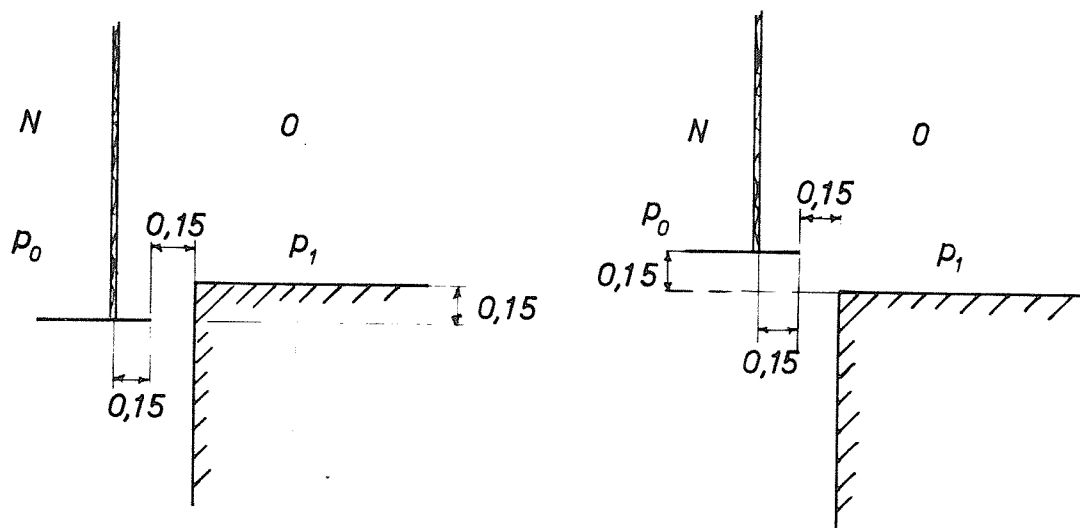
Het eerste type omvat het ontstaan van lucht en dampbellen aan een wand van een gestroomlijnd lichaam. Benedenstrooms van deze belLEN treedt vaak laminaire loslating op of wordt de grenslaag turbulent. Aan de benedenstroomse kant van de bel splitsen zich kleine belletjes af en treden implosies op. Vaak is deze bel de oorzaak van heftige drukfluctuaties.

Het tweede type van cavitatie komt voor nabij niet gestroomlijnde lichamen, alhoewel ook bij gestroomlijnde voorwerpen deze vorm zich kan voordoen in drukminima nabij een (gekromd) oppervlak. Onder dit type van cavitatie wordt ook verstaan belvorming in turbulente grenslagen van hydraulisch ruwe wanden. Bij de spleten van de stormvloedkering is duidelijk sprake van cavitatie in de vrije stroming. We kunnen hierbij hoofdzakelijk 3 geometrieën onderscheiden:

- gesloten toestand ver van de pijlers (2 dimensionaal)
- bijna gesloten toestand ver van de pijlers (2 dimensionaal)
- nabij de pijlers (3 dimensionaal).

In de figuren 4a en 4b zijn de tweedimensionale situaties geschetst.

Hier is sprake van exploderende en imploderende bellen in vortices. We moeten ons hierbij voorstellen een aantal ronddraaiende cilindertjes met op de as een aantal belletjes. Wanneer we de stochastiek van de drukfluctuaties en de snelheidsverdeling konstant veronderstellen kunnen we nagaan wat gebeurt wanneer de absolute druk langzaam verlaagd wordt. Nabij het punt, wat wij cavitatie-inceptie noemen, exploderen hier en daar enkele belletjes, zeg enkele per seconde en per volume-eenheid.



a. gesloten toestand

b. bijna gesloten toestand

Figuur 4a en 4b: Situaties van de spleet

De implosies zijn als duidelijke tikken detekterbaar met drukopnemers en vaak ook hoorbaar. Naarmate de druk daalt wordt het aantal tikken per tijdseenheid groter. De intensiteit van de tikken hoeft niet merkbaar groter te worden. Wanneer de bel explodeert neemt deze gas op, dat na de belimplosie waarneembaar is in de vorm van zeer kleine belletjes. Deze belletjes hebben een dempende werking op de drukstoten van imploderende bellen in de buurt. Wanneer we de som van de belimplosies per tijdseenheid meten als functie van de heersende statische druk dan is altijd een maximum aanwezig. Zie voor meer details Oldenziel en Teijema (1976).

Gaan we nog verder met de druk naar beneden dan wordt de beldynamika zo heftig en nemen zoveel bellen deel aan het cavitatieproces dat de bellen elkaar gaan beïnvloeden. Bij nog lagere druk is sprake van klustervorming. De bellen exploderen en imploderen in groepen. Over het algemeen kan worden gezegd dat de

amplitude van de drukstoot groter wordt en de drukstoot wat langer aanhoudt. Deze cavitatie-intensiteit is hoorbaar alsof er stenen door een leiding worden getransporteerd.

Daalt de druk nog verder dan neemt het gas- en dampvolume zo sterk toe dat het punt van "choking flow" wordt bereikt. Dit betekent dat een drukverlaging benedenstrooms van het caviterend obstakel geen invloed uitoefent op de snelheid en druk bovenstrooms. In dit geval wordt alleen het gas- en dampvolume groter en wordt wel "flashing flow" genoemd.

Opmerking:

Bedacht moet worden dat de cavitatie-inceptie principieel afhankelijk is van de cavitatiebereidheid van het water.

De cavitatiebereidheid wordt gedefinieerd als die druk waarbij de zwakste kern gaat exploderen (Oldenziel (1975)).

We nemen aan dat in het geval van de Oosterschelde stormvloedkering de cavitatiebereidheid ongeveer gelijk is aan de dampdruk. Ook is de cavitatie-intensiteit een functie van het luchtgehalte in water en van de concentratie aan kleine belletjes. We zullen aannemen dat het zeewater verzadigd is met opgeloste lucht bij atmosferische druk. Over de grootte van de bellenconcentratie in water ter plaatse van de dorpels is niets met enige zekerheid te zeggen.

Hierbij moeten we wel opmerken dat bij het cavitatieprobleem van de Oosterschelde in de eerste plaats moet worden vastgesteld wat de werkelijke watersnelheid en de spleet is. De kennis van het verband tussen de cavitatie-intensiteit en de waarde van de totale luchtkoncentratie en cavitatiebereidheid anderzijds is dan slechts een verfijning.

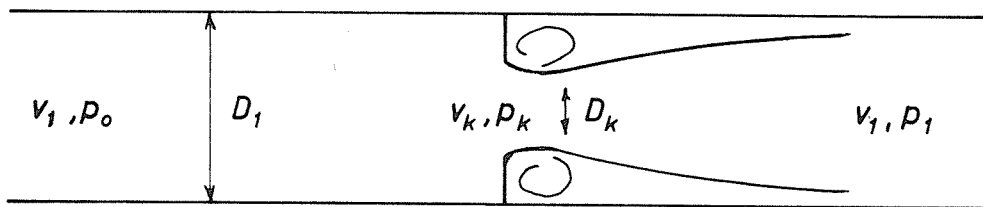
5 Mate van cavitatie en zijn gevolgen

Aan de hand van verschillende analogieën wordt getracht een beeld te geven van de cavitatie-intensiteit. De vrije stroomcavitatie wordt nu onderverdeeld in twee verschillende soorten, namelijk:

- cavitatie in een straalstroom
- cavitatie nabij een hydraulisch ruwe wand.

5.1 Cavitatie in een straalstroom

Rouse (1966) bekijkt de cavitatie in een cirkelvormige straalstroom. In figuur 5 is de situatie geschetst.



Figuur 5 : Cirkelvormige straalstroom

Het drukverval wordt gegeven door:

$$\Delta p = p_0 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (v_k - v_1)^2 \quad (6)$$

of dimensieloos geschreven in drukkoëfficiënten:

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_k^2} = \frac{(v_k - v_1)^2}{v_k^2} = C_L \quad (7)$$

Het cavitatiegetal wordt hier als volgt gedefinieerd:

$$\sigma = \frac{p_k}{\frac{1}{2} \rho v_k^2} \quad (8)$$

In figuur 6 wordt de Bordakoëfficiënt C_1 en het cavitatie-inceptiegetal als

funktie van D_k/D_1 gegeven.

Het cavitatiegetal bij kleppen in industriële circulaties wordt over het algemeen gedefinieerd als:

$$\sigma^* = \frac{p_1}{p_0 - p_1} = \frac{p_0(1 - C_L) - \frac{1}{2} \rho v_1^2 C_L}{\Delta p} + \sigma \quad (9)$$

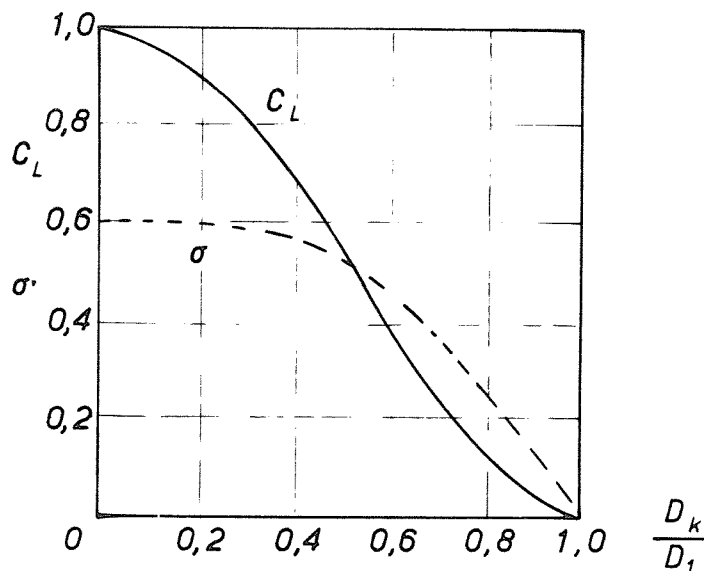
Voor $p_0 \gg \frac{1}{2} \rho v_1^2$ en $C_L \sim 1$ is: $\sigma^* \sim \sigma$.

Wanneer alleen de snelheidsdruk verwaarloosd wordt dan geldt de eenvoudige relatie

$$\sigma^* = \frac{1 - C_L + \sigma}{C_L} \quad (10)$$

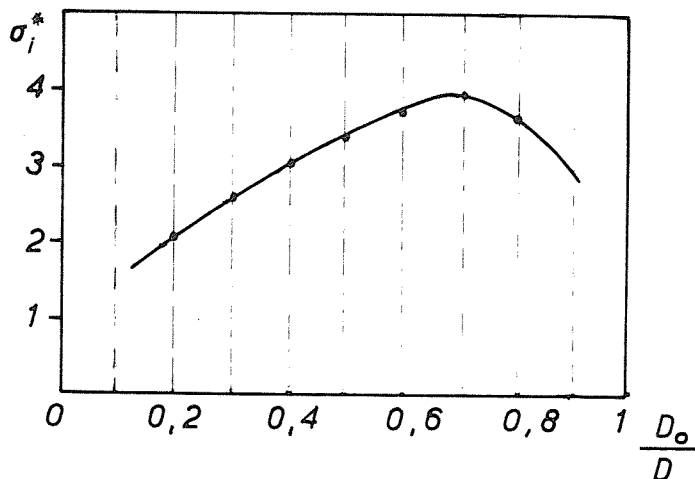
Wanneer we soortgelijke gevallen beschouwen waarbij niet bekend is hoe groot v_k en p_k zijn, is het mogelijk uit bovenstaande betrekking en figuur 6 de koëfficiënt C_L te interpoleren waarna v_k en p_k berekend kunnen worden.

Er kan in eerste instantie gekonkludeerd worden dat wanneer geen drukopbouw plaatsvindt cavitatie optreedt bij $\sigma = 0,6$. Dan zal de cavitatie bij de spleten van de stormvloedkering niet ernstig zijn.



Figuur 6 : σ en C_L als functie van relatieve straalstroomdiameter

Het cavitatie-inceptiegetal σ^* geeft aan hoe groot C_L is. Bij een schuif in een leiding is C_L dan ook afhankelijk van de schuifopening wat heel duidelijk te zien is aan de cavitatie-inceptiecurve als functie van de schuifopening. Zie figuur 7.



Figuur 7 : σ^* -waarden als functie van klepopening

Uit cavitatiemetingen aan vlinderkleppen blijkt dat het cavitatie-inceptiegetal ligt tussen 1,5 en 4. Ook hier is de σ^* -waarde afhankelijk van de klephoek. Zie Oldenziel en Teyema (1976).

Osterwalder (1976) geeft aan dat bij vlinderkleppen ontwikkelde cavitatie optreedt bij $\sigma^* = 2,5$.

Russell en Ball (1967) geven cavitatiegetallen voor een plotselinge verwijding. De σ^* -waarden zijn het grootst voor $0_k/0_1 = 0,45$. Inceptie treedt dan op bij $\sigma^* = 2,4$. Ontwikkelde cavitatie treedt op bij $\sigma^* = 1,6$ en ernstige cavitatie treedt op bij $\sigma^* = 1,1$.

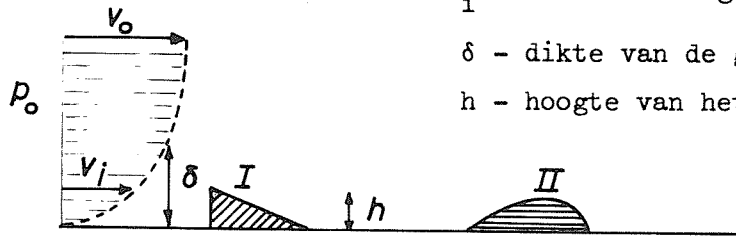
Wanneer de mate van aanliggen kan worden afgeschat of wanneer niet duidelijk is hoe door geometrieveranderingen de Bordakoëfficiënt verkleind kan worden is een modelproef noodzakelijk. We mogen aannemen dat bij dit soort vrije stroomcavitatie het Reynolds-getal een beperkte invloed uitoefent.

5.2 Cavitatie nabij een hydraulisch ruwe wand

Het optreden van cavitatie aan een ruwe wand wordt gerelateerd aan de vrije stroming boven de ruwe wand. Hierbij is het snelheidsveld en het drukveld belangrijk.

We kunnen uitgaan van het volgende model. Zie figuur 8.

- v_o - snelheid in ongestoorde stroming
- p_o - druk in de homogene stroming
- v_i - snelheid in grenslaag op hoogte h
- δ - dikte van de grenslaag
- h - hoogte van het obstakel



Figuur 8 : Situatieschets van wandcavitatie

Het cavitatiegetal wordt ook hier gedefinieerd als

$$\sigma_i = \frac{p_o}{\frac{1}{2} \rho v_o^2} \quad (11)$$

Gal'perik, R.S. e.a. (1971) hebben aangetoond dat voor de situaties I en II in figuur 8 geldt:

$$\text{situatie I : } \sigma_i' = \frac{\sigma_i v_o^2}{v_i^2} = 1,8$$

$$\text{situatie II: } \sigma_i' = \frac{\sigma_i v_o^2}{v_i^2} = 0,9$$

In het geval van een hydraulisch gladde wand wordt de grenslaagdikte δ gegeven als functie van de ongestoorde snelheid v_o . Voor een indruk van de dikte van de grenslaag langs een gladde wand met $dp/dh = 0$ kan gebruik gemaakt worden van de relatie:

$$\frac{\delta}{h} = 0,37 (Re_h)^{-0,2} \quad (12)$$

met $Re_h = \frac{v_o h}{\nu}$

Voor de praktische waarden $h = 5 \cdot 10^{-3}$ m en $v_o = 15$ m/s bedraagt $Re_h = 7.5 \times 10^4$.

De grenslaagdikte is dan $\delta \sim 10^{-4}$ m.

Bij de betonnen dorpelconstructie, zeker bij mosselcultuur, zal $h > \delta$ dus $v_i \sim v_o$, zodat volgens deze methode cavitatie zal optreden bij $1 < \sigma < 1,5$.

Holl (1972) laat zien dat geldt:

$$\sigma_i = \frac{p_o}{\frac{1}{2} \rho v_o^2} = C \left(\frac{h}{\delta} \right)^m \left(\frac{v_o \delta}{v} \right)^n \quad (13)$$

De koëfficiënten C, m en n moeten experimenteel worden bepaald.

Voor driehoekjes geïsoleerd op een hydraulisch gladde wand gemonteerd geldt in een driedimensionale situatie:

$$C = 0,0033$$

$$m = 0,63$$

$$n = 0,45.$$

Bij $v_o = 15 \text{ m/s}^{-1}$ en $\delta = 10^{-4}$ m geldt:

$$h = \delta \quad \sigma_i = 0,28$$

$$h = 4 \delta \quad \sigma_i = 0,67.$$

Voor de geometrie als situatie I in figuur 8 geldt:

$$C = 0,152$$

$$m = 0,361$$

$$n = 0,196$$

en geldt in de tweedimensionale situatie. Ook voor $v_o = 15 \text{ m/s}^{-1}$ en $\delta = 10^{-4}$ m geldt

$$h = \delta \quad \sigma_i = 1,04$$

$$h = 4 \delta \quad \sigma_i = 1,71.$$

Tenslotte geven we voor de situatie II in figuur 8, gemeten in een tweedimensionale geometrie

$$C = 0,041$$

$$m = 0,344$$

$$n = 0,267.$$

De sigma-waarden zijn dan onder dezelfde stroomcondities

$$h = \delta \quad \sigma_i = 0,56$$

$$h = 4 \delta \quad \sigma_i = 0,90.$$

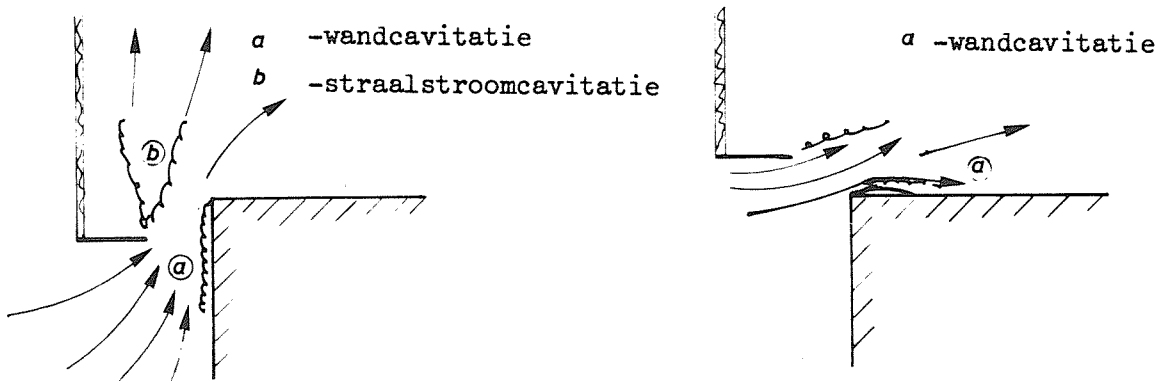
De waarden die in de tweedimensionale situaties zijn verkregen, komen goed overeen met de waarden van Gal'perik.

In het geval van een egale ruwe wand liggen de zaken enigszins anders. Om nu een indruk te krijgen over het cavitatie inceptiegetal moeten we iets weten van de schuifspanning. Dit is nogal ingewikkeld vanwege het korte traject. In werkelijkheid zal de homogeniteit niet erg groot zijn en bovengenoemde getallen wel redelijk toepasbaar. Ook Borden (1966) vindt dezelfde getallen.

6 Konklusies

6.1 De cavitatie-intensiteit

- In alle gevallen waarbij cavitatie optreedt nabij de dorpels en pijlers treedt straalstroomcavitatie op en cavitatie veroorzaakt door een ruwe wand (dorpelwand en pijlerwand).
- Over het algemeen is de kans op straalstroomcavitatie iets kleiner dan de kans op wandcavitatie.
- Ver van de pijlers is de geometrie tweedimensionaal. Aan de kant van de schuif treedt straalstroomcavitatie op en langs de betonnen wand van de dorpel treedt wandcavitatie op. Zie figuur 9.
Bij de pilaren is de geometrie van de situatie driedimensionaal en erg gecompliceerd. Er is een grote kans dat wandcavitatie op zal treden aan de pilaren.

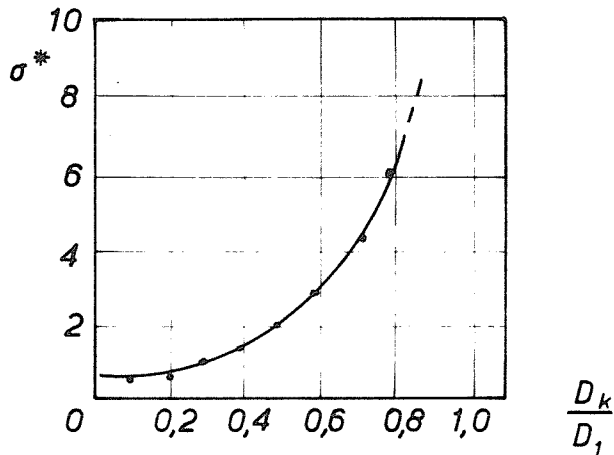


Figuur 9 : De twee cavitatiesoorten bij de tweedimensionale situatie

- Gebaseerd op het feit dat geen drukopbouw plaatsvindt is de σ -waarde $1 < \sigma^* < 3$ en $\sigma = \sigma^*$. Nu zal cavitatie optreden bij $\sigma = 0,6$ zodat in deze situatie de zaak veilig is.
Gebaseerd op het feit dat bij een plotselinge verwijding met maximale drukopbouw de snelheid een faktor $\sqrt{2}$ groter wordt is $\sigma^* = 2\sigma + 1$. Ook nu zal er cavitatie optreden bij $\sigma = 0,6$ dus bij $\sigma^* = 2,2$. Gezien het feit dat $1 < \sigma^* < 3$ zal er enige mate van cavitatie optreden.
- Wandcavitatie treedt op bij $0,6 < \sigma < 1,5$. Zonder aanliggen wil dit zeggen $0,6 < \sigma^* < 1,5$ en met aanliggen $2,2 < \sigma^* < 4$. Deze vorm van cavitatie zal

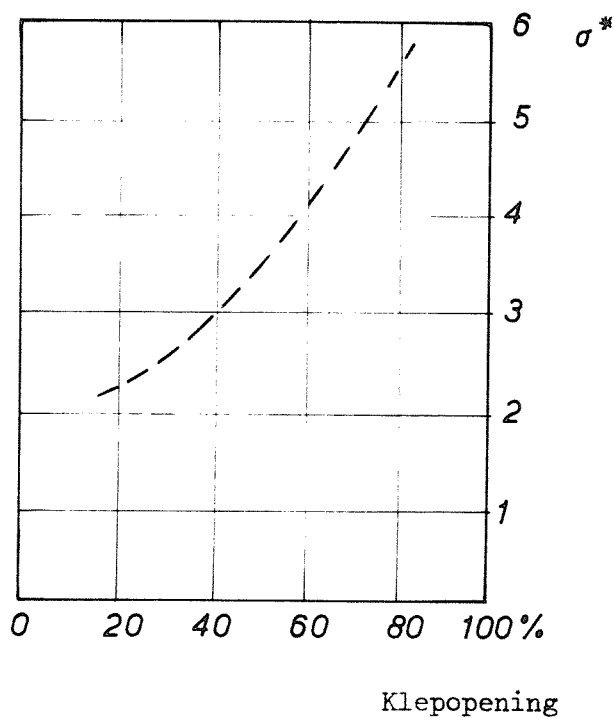
dan ook zeker optreden met mogelijke erosiegevolgen.

- De maximale waarden die genoemd zijn bij de straalstroomcavitatie kunnen optimistisch zijn omdat de analogie met de plotselingen verwijding niet goed behoeft te zijn. C_L kan kleiner zijn dan 0,5. Zie figuur 10.



Figuur 10 : σ^* als functie van de relatieve opening

Deze grafiek vertoont veel gelijkenis met de door ons gemeten cavitatie-inceptiegetallen gemeten aan een vlinderklep (diameter 200 mm). Zie figuur 11 uit Oldenziel en Teyema (1976).



Figuur 11 : Cavitatie-inceptiegetallen van een vlinderklep

6.2 Cavitatie-erosie

Vooral omdat verwacht mag worden dat de wandcavitatie zeker aanwezig zal zijn is er erosiegevaar aan de dorpels en pijlers, nabij de dorpels. Uit literatuurgegevens blijkt (Hammitt (1975)) dat de mate van cavitatie-erosie sterk van de snelheid afhangt. Het ziet ernaar uit dat de snelheid in de spleten van de stormvloedkering te gering is om ernstige cavitatie-erosie te veroorzaken. Snelheden boven 20 m/s^{-1} zijn hiervoor noodzakelijk. Zie ook Eisenberg (appendix II). Ook enkele cavitatie-erosie experimenten aan aluminium, uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium, tonen dit aan.

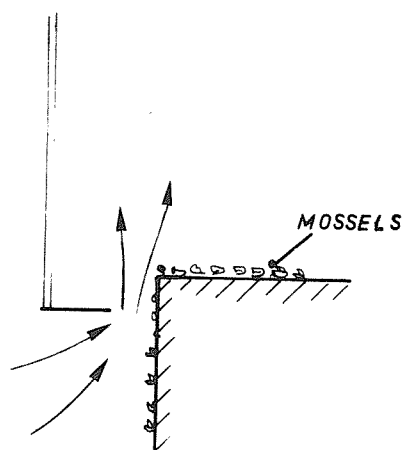
Bij snelheden in de orde van 20 m/s^{-1} kwam vrijwel geen erosie voor. Een stuk aluminium dat gedurende een 200 tal uren onder de cavitatie bloot stond vertoonde weinig erosie. Uit tabel 2 blijkt dat het aantal uren, gedurende welke cavitatie voorkomt, niet hoog is. Cavitatie-erosie is een kwestie van tijd. Gezien de beperkte tijd is ernstige erosie niet erg waarschijnlijk.

Wel is uit een reeds eerder verrichte literatuuronderzoek (R 1186) bij het Waterloopkundig Laboratorium (1977) gebleken dat de bestendigheid tegen erosie van metaal aanzienlijk beter is dan van beton. Weliswaar kan door middel van verschillende toeslagen en/of coating met epoxy hars de bestendigheid van beton sterk worden verbeterd, maar de resistentie van metaal zal toch niet gehaald worden.

Toch moeten we konkluderen dat over de te verwachten erosieschade in feite weinig te zeggen valt. In een modelstudie is het evenwel mogelijk de plaats van de eventuele cavitatieschade vast te liggen.

Aan de dorpel en de pijlers is aangroei van mossels mogelijk.

Zie figuur 12.



Figuur 12 : Plaats van mosselgroei

Hierdoor zal het oppervlak ruwer worden. Op grond van hetgeen in het voorgaande is vermeld kan dit zowel een ongunstig effect hebben, omdat grenslaagcavities eerder optreedt, als een gunstig effect, omdat de aangroeiing het betonoppervlak tegen erosie kan beschermen. Experimenteel onderzoek zal nodig zijn om hier meer duidelijkheid in te brengen.

Het injecteren van lucht nabij de cavitatiecentra heeft een gunstig effect op de cavitatie-erosie. Hoe deze luchtinjectie precies moet geschieden kan het best met een modelstudie worden bepaald.

7 Suggesties voor een modelstudie

Het resultaat van deze bureaustudie is dat de minimale waarde van C_L niet met zekerheid bekend is. Daarnaast staat niet vast waar mogelijk cavitatie zal optreden.

Aan de andere kant is het door gebrek aan praktische ervaring gevaarlijk om een schatting van de onbekende grootheden te geven.

7.1 Oriëntatie bij andere laboratoria

Aan Instellingen waarvan verwacht mag worden dat zij over een redelijke mate van praktische ervaring beschikken is een brief verstuurd (zie appendix III) waarin de cavitatieproblematiek van de stormvloedkering onder de aandacht wordt gebracht.

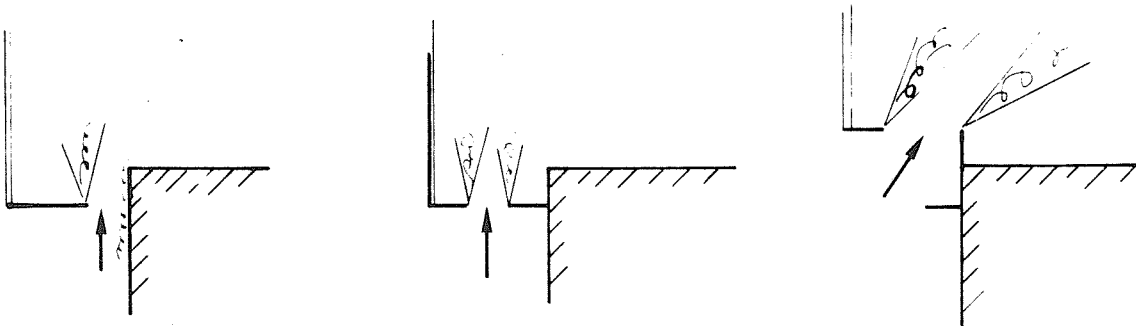
Tot op het ogenblik van deze verslaggeving hebben vier van de vijf aangeschreven Instellingen antwoord gegeven.

De toegezonden referenties zijn merendeels bekend, terwijl de gegeven antwoorden op het probleem nog al vrijblijvend zijn behalve de brief van Eisenberg.

7.2 Experimentele studies

Het Waterloopkundig Laboratorium beschikt momenteel over een gesloten leiding waarin cavitatiestudies kunnen worden verricht. In de laatste jaren is een aantal instrumenten ontwikkeld om de cavitatie zo eenduidig mogelijk te meten waarbij ervaring is opgedaan aan cavitatie in stromingsmachines, zoals kleppen en pompen. In het gesloten circuit is het goed mogelijk een cavitatie-onderzoek aan de stormvloedkering uit te voeren. Het gaat er hierbij om na te gaan wat de cavitatie-intensiteit is als functie van σ^* en is het mogelijk door geometrieveranderingen de plaats van de cavitatie zo ver mogelijk van de wand af te brengen.

In figuur 13 zijn enkele geometrievarianten gegeven.



Figuur 13 : Enkele varianten die in een modelstudie gebruikt kunnen worden

Gedacht wordt aan een modelschaal van 1:2 of 1:3 (Appendix 3).

8 Notatie

C	Konstante
C_L	Borda koëfficiënt
D	dorpelhoogte in m ten opzichte van NAP
D_k	diameter van de keel (2-dimensionaal)
D_i	diameter van de buis (2-dimensionaal)
H_g	halve hoogte van de golf en zijn reflectie in m
H_{os}	waterstand Oosterschelde in m ten opzichte van NAP
$\Delta H = H_{os} - (H_z + H_g)$	waterstandsverschil over de schuif
O	doorsnede
O_k	doorsnede van de keel
O_i	doorsnede van de buis
Q	debiet
Re	Reynoldsgetal
h	hoogte
m	exponent
n	exponent
p_a	atmosferische druk in Pa
p_x	druk op plaats x
p_o	bovenstroomse druk ongestoorde druk
p_1	benedenstroomse druk
p_n	keeldruk
Δp	drukverschil
v_x	snelheid op plaats x
v_o	ongestoorde snelheid
v_i	snelheid ter hoogte van de significante wanduitsteeksels
v_1	snelheid in de buis
v_k	snelheid in de keel
δ	grenslaagdikte
μ	afvoerkoëfficiënt
ν	kinematische viscositeit
ρ	dichtheid van water
σ_x	cavitatiegetal gedefinieerd als $\frac{p_x}{\frac{1}{2} \rho v_x^2}$
σ^*	cavitatiegetal gedefinieerd als $\frac{p_1}{p_o - p_1}$

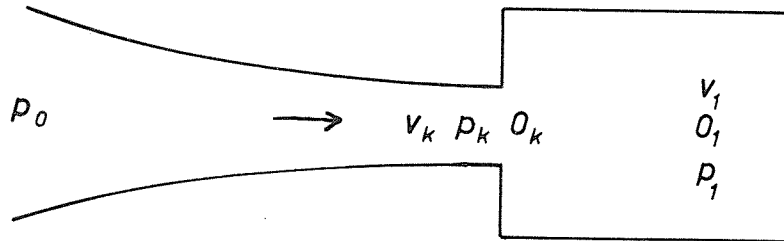
9 Referenties

- 1 ARAKERI, V.H., Viscous effects on the position of cavitation separation from smooth bodies
Journal of Fluid Mechanics, vol. 68, part 4, 1975
- 2 BORDEN, A., Prediction of Cavitation Inception Speeds on Rough Hydrodynamic Bodies
sixth symposium, naval hydrodynamics, office of naval research, Washington DC, september 1966
- 3 GAL'PERIN, R.S.; et al, Cavitation in Elements of Hydraulic Structures and Methods of Controlling it
Translated from Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stro, no. 8, August 1971
- 4 HAMMITT, F.G., Cavitation damage scale effects - state of art, summarization
Journal of Hydraulic Research, volume 13, no. 1, Januari 1975
- 5 HOLL, J.W., et al, Limited cavitation and related scale effects problem, Tokyo, Second Intern. JSME Symposium Fluid Machinery and Fluidics, September, 1972
- 6 KNAPP, R.T., et al, Cavitation
McGraw-Hill, New York, 1970
- 7 OLDENZIEL, D.M., Measurements on the cavitation susceptibility of water
Fifth conference on fluid machinery, Budapest, September 1975
- 8 OLDENZIEL, D.M. en TEYEMA, J, Cavitation on valves in correlation to liquid properties
IAHR Symposium, Problems of Hydraulic Machines - Hydraulic Structure Interaction, Leningrad, September 1976
- 9 OSTERWALDER, J. en PESCHGES, K.J., Kavitation Untersuchungen an Drossel Klappen, Konstruktion 28
Springer Verlag, 1976

- 10 RUSSELL, S.O. en BALL, J.W., Sudden enlargement energy dissipator for Mica dam
Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASME, July, 1967
- 11 ROUSE, H., Jet Diffusion and Cavitation
J. Boston Soc. Civil Engineers, Vol. 53, 1966
- 12 Waterloopkundig Laboratorium, Rapport R 1186, Erosie aan betonconstructies in verband met Stormvloedkering Oosterschelde

APPENDIX 1

Drukverlies in een plotselinge verwijding. Zie figuur A1.



Figuur A1 : Situatieschets van de plotselinge verwijding

De volgende vergelijkingen zijn hier van toepassing

$$\text{- continuïteitsvergelijking } v_k O_k = v_1 O_1 \quad (\text{A1})$$

$$\text{- impulsvergelijking } -\rho v_k^2 O_k + \rho v_1^2 O_1 = p_k O_1 - p_1 O_1 \quad (\text{A2})$$

Wanneer we nog de Bernoulli-vergelijking gebruiken

$$p_0 = p_k + \frac{1}{2} \rho v_k^2 \quad (\text{A3})$$

dan verkrijgen we:

$$-\rho v_k^2 O_k + \rho O_1 \frac{v_k^2 O_k^2}{O_1^2} = p_k O_1 - p_1 O_1 = (p_0 - \frac{1}{2} \rho v_k^2) O_1 - p_1 O_1$$

$$-\rho v_k^2 O_k + \rho v_k^2 \frac{O_k^2}{O_1} = p_0 O_1 - \frac{1}{2} \rho v_k^2 O_1 - p_1 O_1$$

$$-\rho v_k^2 \frac{O_k}{O_1} + \rho v_k^2 \frac{O_k^2}{O_1^2} = p_0 - \frac{1}{2} \rho v_k^2 - p_1$$

$$\rho v_k^2 \left[\frac{O_k^2}{O_1^2} - \frac{O_k}{O_1} + \frac{1}{2} \right] = p_0 - p_1$$

We krijgen als resultaat:

$$v_k^2 = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_1)}{\rho}} \left[2 \left(\frac{O_k}{O_1} \right)^2 - 2 \frac{O_k}{O_1} + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (A4)$$

Uit (A1) en (A2) volgt ook

$$-\rho v_k^2 \frac{v_1 O_1}{v_k} + \rho v_1^2 O_1 = (p_0 - \frac{1}{2} \rho v_k^2) O_1 - p_1 O_1$$

$$-\rho v_k v_1 + \rho v_1^2 = p_0 - \frac{1}{2} \rho v_k^2 - p_1$$

Schrijf $p'_0 = p_0 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$ (A5)

dan geldt:

$$-\rho v_k v_1 + \rho v_1^2 = p'_0 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \frac{1}{2} v_k^2 - p_1$$

$$\frac{1}{2} \rho v_k^2 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \rho v_k v_1 = p'_0 - p_1$$

Dus $p'_0 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (v_k - v_1)^2$

Opmerking: v_k is maximaal voor $\frac{O_1}{O_k} = 2$.

APPENDIX 2

Hier worden de brieven getoond die naar verschillende Instituten zijn gezonden, waarvan verwacht mag worden dat zij degelijk cavitatie-onderzoek verrichten.

Van de vijf aangeschreven Instituten hebben er vier tot op heden geantwoord (10 april 1978). Ook deze brieven zijn hierbij gevoegd.

Prof. J.W. Daily
Department of Engineering Mechanics
Fluid Mechanics Laboratory
201 West Engineering Building
The University of Michigan
Ann Arbor, Michigan 48104
U.S.A.

Measuring Methods Development
Cavitation at Surge Barrier
Drs. M. Oldenzienl

R 1309/331

January 26, 1978

Dear Prof. Daily,

The sea arms of the delta in the South-Western part of the Netherlands will be closed all but one. At the moment preparations are made for the closure of the last one; the Eastern-Scheldt (see Appendix 1). It is decided that it will be a partly closure with the possibility to close the remaining openings by way of slide-gates when necessary. When the slide-gates are closed it is very probable that cavitation will occur.

At our laboratory we do some research on cavitation. This research has mainly to do with instrumentation and the relation between inception and the water quality. Enclosed you find some recent publications, to give you an impression of the work we do. However, in the field of practical full scale cavitation and its effects we hardly have any experience.

As we learned from the IAHR-Directory, at your institute cavitation research is done. Therefore we address ourselves to you with some problems.

Before putting the problems, some detail are given. In Appendix 2 the main dimensions are mentioned. Besides a table has been added with the expected waterlevels referring to mean zero level.

The expected cavitation inception numbers σ_i have values between 4.8 and 1.3 and are defined as follows:

$$\sigma_i = \frac{H_z + H_d + H_g}{H_z - H_o} \quad \text{with}$$

H_z = mean sea level referring to mean zero level

H_d = height of the concrete treshold referring to mean zero level

H_g = height of the wave and the reflected wave

H_o = waterlevel of the Eastern-Scheldt referring to mean zero level.

The following problems are encountered by us:

- 1 To what extent is literature and/or knowledge available about vortex and separated flow cavitation, also in relation to the roughness of the walls.
- 2 At which places probably erosion will appear and what will be the intensity.

Perhaps you are willing to send us some references or give us any advise above solving the above stated problems.

You will oblige us greatly when you will be so kind to let us know your views.

Yours sincerely,

(J.E. Prins)

Director

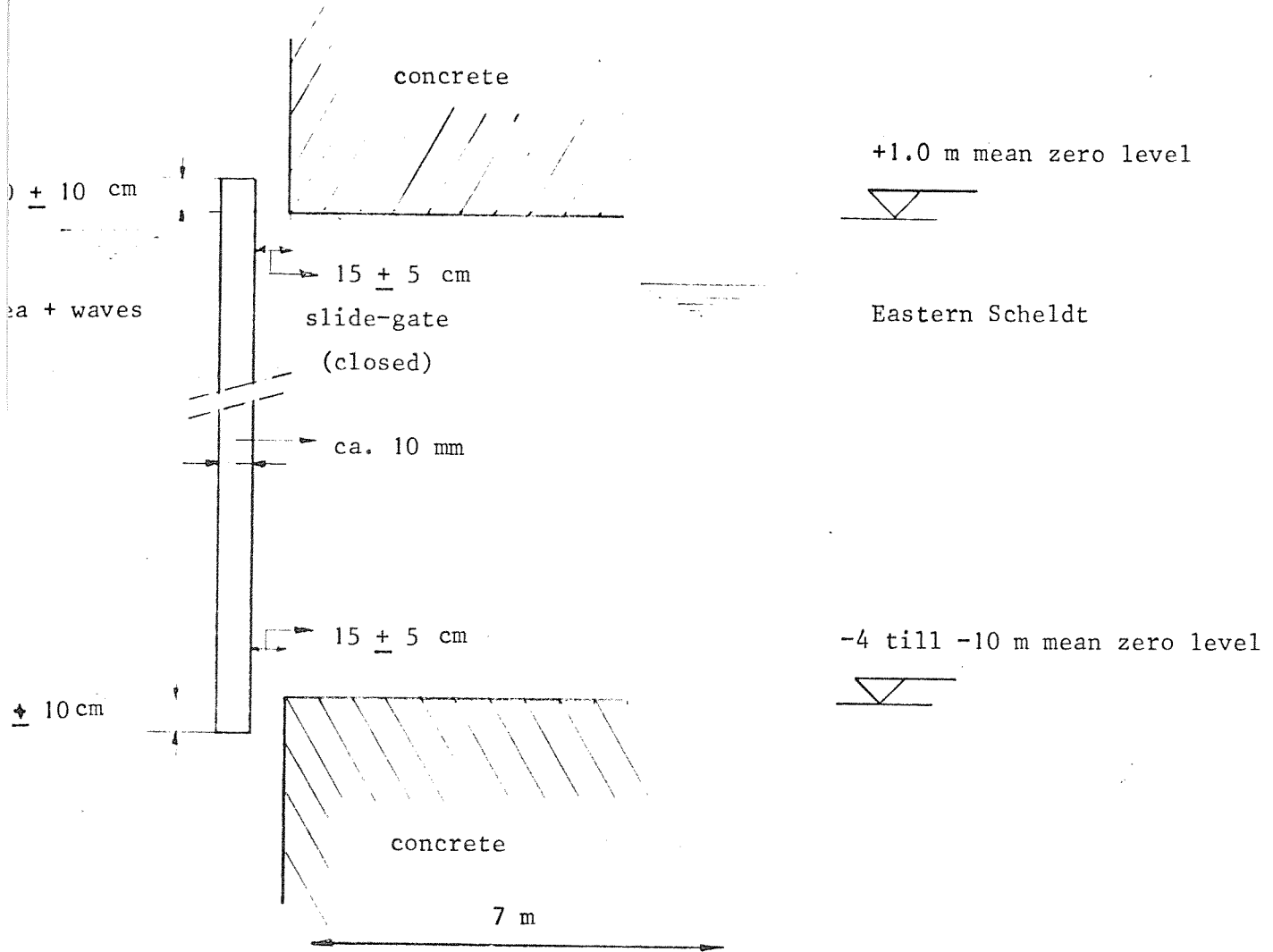


Table of possible combinations of waterlevels and wave heights.

	I		II	
	a	b	a	b
H_z	+5.5		+3.5	
H_o	-1.5		-1.5	
H_g	1.2	2.8	1.2	2.0

H_z and H_o in m referring to mean zero level.

H_g is half-height of the sum of the wave and its reflected wave above the sea level in m.

Deze brief is tevens verzonden aan:

1. Prof.Dr.Ing. H. Blind
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität
Berlin
1 Berlin 12
Strasse des 17 Juni 140-144, Duitsland

2. Prof.Dr.Ing. E. Naudascher
Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
75 Karlsruhe
Kaiserstrasse 12
Duitsland

3. Mr. J.P. Tullis
Colorado State University Engineering Research Centre
Foothills Campus, Fort Colling
Colorado 80521
U.S.A.

4. The Director of HYDRONAUTICS, inc. Mr. P. Eisenberg
Pindell School Road
Laurel, Maryland 20810
U.S.A.

Director IR.J.E. Prins
Delft Hydraulic Laboratory
Meermanstraat 146

D e l f t

The Netherlands

requisiten:
commercial.

Dear Mr. Prins,

331, R1309

In response to your letter of January 26, 1978, you will find enclosed your appendix No. 2 with a few remarks to your questions. It is very hard to give you an exhausting and thorough advise without having more information on your problem. In particular, it proves to be very essential with regard to cavitation damage in gate installations to consider the details of the highly three-dimensional flow through the gate slots and the various passages near seals. You will find some information in the General Lecture by Douma, contained in

"Flow-Induced Structural Vibrations" IUTAM-IAHR Symposium
Karlsruhe (1972), ed. by E. Naudascher, Springer-Verlag
Berlin/Heidelberg/New York: 1954,

and in the following German publications of which you might not be aware of:

Hartung, F.: Kavitationsprobleme im Stahlwasserbau und ihre Erforschung. Vortrag gehalten am 2. Juni 1966 in München bei der Tagung des Deutschen Stahlbau-Verbandes,

Keller, A.P.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Problem der modellmäßigen Behandlung von Strömungskavitation. Bericht Nr. 26 der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München, 1973.

Concerning the problem of cavitation within vortices and in separated flow, I still consider one of the best papers to be

Rouse, H.: Jet Diffusion and Cavitation. J. Boston Soc. Civil Engineers. Vol. 53 (1966) No. 3, p.529-544.

Besides, cavitation damage in separated flow is also treated in

Rao, N.S.G., Thiruvengadam, A.: Prediction of Cavitation Damage. J. Hydr. Div. Proc. ASCE, Vol. 87 (1961) No. HY, p. 37-62

Ball, J.W.: Cavitation Design Criteria, in: Control of Flow in Closed Conduits, ed. by J.P. Tullis, Fort Collins, Colorado, 1971.

Of course, you will find a lot more information in recent survey publications such as

Knapp, R.T., Daily, J.W., Hammitt, F.G.: Cavitation,
"Cavitation State of Knowledge", ed. by J.M. Robertson,
G.F. Wislicenus. Am. Soc. Mech. Engineers, New York, 1969,
Eisenberg, Ph., Tulin, M.P.: Cavitation, in: Handbook of
Fluid Dynamics, ed. by V.L. Streeter, McGraw-Hill, New York/
Toronto/London, 1961.

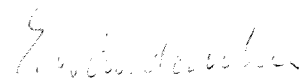
As far as wall roughness is concerned, I wish to recommend to you the following papers:

Ball, J.W.: Construction Finishes and High-Velocity Flow.
J. Constr. Div., Proc. ASCE, Vol. 89 (1963) No. CO 2,
p. 91-110,
Ball, J.W.: Cavitation from Surface Irregularities in High Velocity.
J. Hydr. Div., Proc. ASCE, Vol. 102 (1976) No. HY 9, p. 1283-1297,
Arndt, R.E.Y., Ippen, A.T.: Rough Surface Effects on Cavitation
Inception. J. Basic Eng. Trans. ASME, June 1968, p. 249-261.

Finally I might mention that I have just completed a distribution to a book on Hydraulic Models in German (Wasserbauliches Versuchswesen) related to Hydraulic Structures (Forces, Vibrations, Cavitation). I have asked Professor Kobus, who is the editor of this book, to forward a copy of my manuscript to you.

I hope these few remarks will be helpful to you. With my best personal regards, I remain

Sincerely yours,



Eduard Naudascher
Director

Encl.

cc.: Professor Kobus

1112/AC

HYDRONAUTICS, INCORPORATED
RESEARCH IN HYDRODYNAMICS

7210 PINDELL SCHOOL ROAD, HOWARD COUNTY, LAUREL, MARYLAND 20810 - TELEPHONE 776-7454

Please reply to: HYDRONAUTICS, Incorporated
1101 15th Street, N.W.
Suite 701
Washington, D.C. 20005

February 23, 1978

Ir. J. E. Prins, Director
Delft Hydraulics Laboratory
P.O. Box 177
Rotterdamseweg 185
Delft, The Netherlands

INGEKOMEN 3 FEB 1978

Dear Mr. Prins,

Thank you for your letter of January 26, 1978, asking our advice on cavitation at a surge barrier for the Eastern-Scheldt. My associate, Mr. Virgil E. Johnson, Jr., has been kind enough to examine your material in some detail and has furnished some opinions that we offer for your review in connection with this problem.

Although we are not sure we understand the complete details of your problem, we offer the following comments:

- 1) The maximum head available across the gate opening is 9.8 meters (the difference in sea level plus wave height and the level of the Eastern-Scheldt)
- 2) As the gate is closed the absolute pressure head at the level of the gate lip (neglecting contraction) will vary from about 10 to 20 meters of water. Thus the operating cavitation number $(P_0 - P_v) / \frac{1}{2} \rho U_0^2$ just below the level of the jet under the gate will vary from 1 to 2 (10/9.8 to 20/9.8). The speed of the jet will be about 14m/sec.
- 3) We do not know whether the gate operates in slots or not. If there are slots, they may cavitate on the downstream corners if not properly designed - good design procedures are available. (Contact U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Mr. Fred R. Brown, Director)

HYDRONAUTICS, INCORPORATED

Ir. J. E. Prins
February 23, 1978
Page two

- 4) Cavitation of adequately large roughnesses can occur along the concrete sides or bottom of the channel downstream of the gate. Such cavitation will, of course, occur first in the zones of lowest cavitation number (on the walls at the level of the jet surface). Some references on the cavitation characteristics of roughnesses are attached.
- 5) There will exist vortices in the corners of the exit jet plane near the intersection of the jet surface with the walls. These vortices may cavitate and impinge on the walls. Similar vortices will occur in gate slots if they exist and these vortices tend to combine with the corner vortices. (Again, the U.S. Waterways Experiment Station at Vicksburg has much experience with this problem, but we do not know specific references.)
- 6) If the gate is not sealed along its sides, it is possible that if the shapes of the leakage passages are poorly designed, there may be cavitation problems in this area.
- 7) Although, we can not be sure, we expect that if you are careful in the design to avoid cavitation, any cavitation that does occur will probably not cause extreme damage rates. That is, we are not familiar with cases of severe cavitation damage when the velocity is only $14^m/sec$.
- 8) The following references may be of assistance to you.
 - a. Johnson, V.E. Jr., "Cavitation Inception and Damage" Vorträge gehalten aus Anlab des 50 - jährigen Bestehens der Hamburgischen Schiffbau - Versuchsanstalt G.m.b.H. Hamburg, September 1964. Also published in Schiffbau Technique, 1965.
 - b. Johnson, V.E. Jr., "Mechanics of Cavitation" Journal of the Hydraulics Division, ASCE. May, 1963.
 - c. J.H. Nath and T. Yamamoto, "Forces From Fluid Flow Around Objects," Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, June 1974.

HYDRONAUTICS, INCORPORATED

Ir. J. E. Prins
February 23, 1978
Page three


- d. Eduard Naudascher, "Flow Induced Forces on Protruding Walls," Proceedings of ASCE Hydraulics Division, February 1974.
- e. James M. Robertson, "Cavitation in Hydraulic Structures: Scale Effects Involved in Cavitation Experiments," Proceedings of ASCE Hydraulics Division, May 1963.
- f. R.E.A. Arndt et al, "Limited Cavitation on Surface Irregularities," Proceedings of the 6th IAHR Symposium, 1972.
- g. J.W. Holl, "The Inception of Cavitation on Isolated Surface Irregularities," Transactions ASME Series D, Journal of Basic Engineering, Volume 82, 1960.
- h. B.W. Kermeen and B.R. Parkin, "Incipient Cavitation and Wake Flow Behind Sharp-Edged Disks," Report 85-4 Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, August 1957.
- i. B.W. McCormick, Jr., "On Cavitation Produced by a Vortex Trailing from a Lifting Surface," ASME Paper No. 61-WA-100, December 1961.

We hope that we have understood your problem correctly and that our comments are of some help.

It was good to hear from you. I remember our meeting in The Netherlands with pleasure and hope that we might have other occasions in the near future. In the meantime, if we may be of further service on a consulting basis, we would be pleased to discuss arrangements.

With kind personal regards.

Yours sincerely,
HYDRONAUTICS, Incorporated


PHILLIP EISENBERG
President

PE/jg

1300/50

UTAH STATE UNIVERSITY · LOGAN, UTAH 84322

UTAH WATER RESEARCH LABORATORY
UMC 82

COLLEGE OF ENGINEERING

March 6, 1978

J. E. Prins, Director
Delft Hydraulics Laboratory
P.O. Box 177
Delft, The Netherlands

Dear Mr. Prins,

Reference #R1309/330

I am writing in response to your letter dated January 26, 1978 in regard to the possibility of cavitation occurring at closure of the gates for the eastern scheldt. In regard to your first question about literature on cavitation, I have enclosed several papers that I have written on the subject. The most complete reference on the overall subject of cavitation is the book entitled "Cavitation" by Knapp, Daily and Hammitt. I have enclosed a Xerox copy of the title page for your information. There has been a great deal of work in the area of cavitation both with vortex type cavitation and surface roughness cavitation. Many of these are referenced in the cavitation book and in the papers that I have sent to you.

I am not sure I understand the definition of σ_1 as defined in your letter. I do not find the vapor pressure in the definition of the cavitation index which is necessary for proper definition of σ . I have returned a copy of Appendix 2 with some notes written on it. My usual definition of the cavitation index for a situation like this is defined on that page and a σ value of approximately 2.1 is calculated corresponding to the maximum mean sea level. The closest information I have to predicting whether or not such a system would cavitation is information obtained on submerged jets and orifices. The information is not directly applicable since the configuration is somewhat different with the slide gate and a circular concentric jet issuing into a large expansion. It is my conclusion, however, that some light cavitation will occur but it is almost certain that no erosion damage would occur. These conclusions have been based only on a cursory study of the problem and I would not want you to base your final decision on such a brief look at the problem.

I hope the enclosed information proves to be helpful to you in evaluating this problem. For me to give you more explicit information would

(2)

require several days of my time and additional information from you. If that were required, some financial arrangement would have to be made with the university to reimburse them for my time.

Yours sincerely,

J. Paul Tullis
Professor of Civil Engineering

JPT/mk

enclosures

INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

1490/78

Professoren: Dr.-Ing. H. Blind, Dr.-Ing. H. Bretschneider, Dipl.-Ing. P. Franke,
Dr.-Ing. H. Kaldenhoff, Dr.-Ing. C. Schreck

Institut für Wasserbau, 1 Berlin 10, Postfach 100 320

Datum: 28th March, 78

Telefon: (030) 314-3961
-3323

Director J.E. Prins
Delft Hydraulics Laboratory
P.O. Box 177
Delft
THE NETHERLANDS


Dear Director Prins,

Re: Your letters of January 26, 1978 -R1309/327 and
February 28, 1978 -R1309/792

I am answering both of your letters on behalf of Professor Blind who accepted a professorship in Munich.

Concerning the questions of your letters, I regret to be unable to help you in any way. Indeed, we know the problems, but not from experience of our own. During the last ten years there has been performed at our institute only one investigation on cavitations, a doctor's thesis, besides that not model test, not to mention any comparison between model tests and results in situ. You probably know Dr. Keller in Munich who is concerned with problems on cavitation; may be he could help you, at least with some references.

Yours sincerely,



(o. Prof. Dr.-Ing. C. Schreck)

Managing Director

APPENDIX 3

Kostenschatting van een experimentele modelstudie.

Het model kan worden uitgevoerd op schaal 1:2 of 1:3. De lengte van de spleet kan ongeveer 30 cm zijn. Aan één van de uiteinden kan de sponning worden nabootst.

Het model wordt dan gekoppeld aan een leiding met diameter $D = 0,5$ m.

Er wordt een maximaal debiet verwacht van $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$.

De metingen kunnen in ongeveer 3 dagen uitgevoerd worden.

De metingen worden uitgevoerd in een gesloten circuit. Het maximale debiet is ongeveer $Q = 1,6 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$. Het drukverval over een te testen voorwerp is maximaal 9 Bar. De maximale buisdiameter bedraagt 0,5 m.

De cavitatie-detectie zal optisch geschieden.

De mogelijke erosieplaatsen kunnen worden aangetoond door het weg laten slijten van een laagje verf.

Het resultaat van dit modelonderzoek is

- plaatsbepaling van de cavitatie (exploderende en imploderende bellen)
- de bepaling van σ^* -getallen
- lokalisatie van de mogelijke erosie
- verandering in cavitatiegedrag door geometrieveranderingen
- verandering in cavitatiegedrag door mosselgroei.

