

072

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

**RAPPORT No:**R 195

Nota betreffende het binnendringen van zout in  
het N.Hollandskanaal vanuit den Helder.

AUTEUR: Ir. P.A. Kolkman

DATUM: januari 1966.

CODE No:

372

NOTA BETREFFENDE HET BINNENDRINGEN VAN  
ZOUT IN HET N.HOLLANDSKANAAL VANUIT DEN HELDER

Theoretische beschouwing over permanent en pulserend  
spuien en discussie van maatregelen tot  
verlaging van het zoutbezwaar

I N H O U D

	<u>blz.</u>
I. Inleiding	1
II. Beschrijving van het verschijnsel	2
III. Berekening van de evenwichtslengte van de tong bij permanent spuien	6
IV. Berekening dynamisch evenwicht bij pulserend spuien	8
V. Menging onder- en bovenlaag	13
VI. Contrôle met prototypegegevens	15
VII. Maatregelen om de toestand te verbeteren	17
VIII. Conclusies	20

R 195

januari 1966

## I. INLEIDING.

In verband met de te verwachten wijzigingen van het spuirégime in den Helder, t.g.v. de plaatsing van gemalen in den Helder en in Zaandam, is door het Technisch Bureau van de Unie van Waterschapsbonden aan het Laboratorium gevraagd een studie te maken van het binnendringen van zout in het Noord-Hollands Kanaal.

Betreffende het gemaal in den Helder zijn reeds studies verricht waarvan verslag is gedaan in de nota's R 195 d.d. juli 1962 en maart 1963. Hierin wordt geadviseerd zoveel mogelijk via de koopvaarders Schutsluis te schutten, en bij deze sluis maatregelen te nemen om, met een deel van de gemaalcapaciteit, constant vanuit een verdiept bodemgedeelte voor de sluis te zuigen, om zodoende zoveel mogelijk direct het binnengedrongen zout water te spuien. Tevens blijkt uit deze nota het grote belang om het marine dok van een tweede stel deuren aan de kanaalzijde te voorzien om de zoutuitwisseling te beperken.

In de volgende studie wordt een berekeningsmethode opgezet om na te gaan hoe de zouttoestand op het kanaal beïnvloed wordt door het spuidebiet, door de binnengekomen hoeveelheid zout water en het zoutgehalte hiervan. Tevens wordt nagegaan in hoeverre het huidige systeem van pulserend spuien, afhankelijk van het getij, vervangen dient te worden door een constant spuidebiet.

De basisgegevens voor de berekening, nl. de wrijving op het grensvlak van ten opzichte van elkaar bewegende lagen, en de uitwisseling van zout tussen de lagen (menging) zijn verkregen uit extrapolatie van modelresultaten. Ofschoon hierin nog grote onzekerheden zijn geeft deze studie toch aan welke veranderingen t.o.v. de huidige toestand zijn te verwachten. De berekeningsmethode voor pulserend spuien is een eerste poging om dit ingewikkelde verschijnsel toegankelijk te maken; om het inzicht te vergroten zullen zowel modelonderzoek als metingen in de natuur onontbeerlijk zijn.

Het Laboratorium heeft tevens medegewerkt aan de metingen in november 1965 op het Noord-Hollands Kanaal uitgevoerd door de RWS, dir. N. Holland, meetdienst Hoorn. Deze metingen worden in deze nota niet nader besproken. Wel is in Hoofdstuk II en VI hieruit geput voor de beschrijving van het verschijnsel en zijn enige meetresultaten gebruikt.

De resultaten van de studie zijn samengevat in hoofdstuk VIII.  
De nota is samengesteld door ir. P.A. Kolkman.

## II. BESCHRIJVING VAN HET VERSCHIJNSEL.

### Oorzaken van binnendringen van zout.

Er zijn twee oorzaken voor het binnendringen van zout in een kanaal nl. de zwaartekracht en diffusie.

Door de zwaartekracht zal het zwaardere zoute water onder het zoete water dringen, waarbij een compenserende zoetwaterstroom aan de oppervlakte ontstaat. De toestand bereikt pas een evenwicht als er een horizontale gelaagdheid is ontstaan, met een van beneden naar boven afnemende dichtheid, waarbij in horizontale richting geen dichtheidsverschillen meer aanwezig zijn. Diffusie ontstaat door willekeurige beweging van deeltjes. Zouttransport t.g.v. diffusie tussen twee punten treedt op indien zoetere deeltjes afkomstig uit het ene punt worden uitgewisseld tegen zoutere deeltjes uit het andere punt. De beweging van de deeltjes ontstaat door turbulentie of door moleculaire beweging. De laatste is zo klein dat bij bewegend water (spuien, golven e.d.) de turbulente diffusie overheerst. In een gelaagd systeem met boven- en onderstroom is de zoutgradiënt in verticale richting veel groter dan die in horizontale richting, en speelt de diffusie zich voornamelijk vertikaal af. Daarnaast treedt zouttransport op ten gevolge van de onderstroom. Hoewel sommige auteurs bestaande situaties of proeven van dit type met een quasi horizontale diffusie hebben beschreven, mogen de gevonden coëfficiënten niet worden toegepast op situaties die sterk afwijken van de door hen onderzochte situaties. Opgemerkt wordt slechts dat deze quasi horizontale diffusiecoëfficiënt vele malen (10 à 1000x) groter is dan uit de mate van turbulentie zou volgen. Dit komt doordat de stroomsnelheid van de zouttong een overheersende rol speelt.

Aangezien bij de metingen nov. 1965 in het Noord-Hollands Kanaal steeds een duidelijke gelaagdheid was waar te nemen met een tegengestelde boven- en onderstroom indien niet werd gespuid, en met ongelijke snelheden in boven- en onderlaag als wel werd gespuid, is bij het volgende uitgegaan van een gelaagd systeem.

Loopsnelheid en vorm van een zouttong.

Indien een zouttong ontstaat nadat bv. de sluisdeuren van een zoute kolk worden geopend ontstaat een onderstroom het kanaal in en een zoete bovenstroom de sluis in. Uit symmetrie overwegingen kan worden afgeleid dat de boven- en onderstroom even snel gaat, en de tong  $1/2 h$  ( $h =$  waterdiepte) hoog is. De loopsnelheid van deze tong is theoretisch

$$\frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho h}{\rho}} \quad (1)$$

$\Delta \rho$  is het dichtheidsverschil zout-zoet water,  $\rho$  is de dichtheid van het zoute of het zoete water. Aangezien  $\Delta \rho$  maakt het geen verschil of voor  $\rho$  de  $\rho$  (zoet) of  $\rho$  (zout) wordt genomen.

In de praktijk wordt gevonden  $V_{tong} = 0,45 \sqrt{g' h}$  ( $g'$  is een verkorte notatie voor  $g \Delta \rho / \rho$ ).

Heeft de tong een andere dikte ( $h_1$ ), doordat bv. het profiel van het kanaal groter is dan dat van de sluis, dan kan worden afgeleid:

$$V_{tong} = \frac{(h - h_1)}{h} \sqrt{g' h} \quad (2)$$

Een dunnere tong loopt sneller. Bij de afleiding is de wrijving verwaarloosd; door de wrijving zal de tong een hellend gresnvlak verkrijgen, waarbij de verlopende dikte de drijvende kracht vormt om de wrijving te overwinnen. Omdat voorin de tong dunner is zal de doorstroomcapaciteit

$$q = \frac{h_1 (h - h_1)}{h} \sqrt{g' h} \text{ afnemen. Dit is van invloed op de snelheid van de}$$

gehele tong; door menging kan evenwel het debiet achterin de tong groter zijn dan voorin. Er zijn proeven bekend waaruit blijkt dat de locale snelheid van het water in de onderlaag tot 45% groter is dan de loopsnelheid van het front. Dit is gedeeltelijk te verklaren door interne circulatie in de tong, maar ook door de grote menging aan het front. Deze laatste is in een model visueel waarneembaar, maar er zijn geen concrete gegevens over bekend.

Het is met de huidige kennis slechts mogelijk een tweelagen systeem met enige exactheid te berekenen. Dit komt niet geheel overeen met de werkelijke toestand; bij de metingen in het N.Holl. kanaal in nov. 1965 is gevonden dat er een grote menglaag aanwezig is.

Soms is zelfs geconstateerd dat in de onderlaag het zoutgehalte lineair toeneemt tot de bodem: feitelijk is dan de gehele onderlaag als menglaag te beschouwen.

Indien bij een gelaagd systeem een spuiroom aanwezig is, zal zich een evenwicht van de tong instellen waarbij de hydrostatische drukkrachten evenwicht maken met de schuifspanning op het grensvlak.

In de appendix wordt voor de helling van het grensvlak de volgende formule afgeleid

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{\tau_1/\rho gh_1 + \tau_2/\rho gh_2}{1 - Fr_2'} \quad (3)$$

$\tau_1/\rho gh_1$  zijn de schuifkrachten op de bodemlaag (t.g.v. wand- en grenslaagwrijving) per massa eenheid, en  $\tau_2/\rho gh_2$  hetzelfde voor de oppervlakte-laag.

$$Fr_2' = V_2 / \sqrt{g \frac{\Delta \rho h_2}{\rho}} = Q_{spui}/F_2 \sqrt{g' h_2}$$

( $F_2$  is het oppervlak van de drsn. van de bovenlaag,  $V_2$  is de gemiddelde snelheid in de bovenlaag).

Voor een bewegende tong kan bij benadering dezelfde bewerking worden toegepast t.o.v. een assenkruis dat met de tong meebeweegt; alleen de wrijving aan wand en bodem zijn dan totaal verschillend.

Met formule (3) kan voor één bepaald spuidebiet en  $\Delta\rho/\rho$  verhouding de  $dh_1/dx$  voor elke waarde van  $h_1$  worden berekend (in een prismatisch kanaal is  $h_2 = h - h_1$  omdat de waterspiegel nagenoeg horizontaal blijft) en is door een stapjes methode voor elk interval  $\Delta h_1$  het lengteinterval  $\Delta L$  te berekenen, afhankelijk van de randvoorwaarden. Zodoende is de vorm en lengte van de tong te bepalen. Uit formule (3) is te zien dat voor kleine  $h_1$  de teller groot wordt, zodat een verticaal front ontstaat. Als  $Fr' = 1$ , dan staat het grensvlak weer oneindig steil, zodat de bijbehorende  $h_1$  in elk geval een extreme hoogte is die de tong bereiken kan.

Wordt de tong terug gedrukt door een krachtige spuiroom dan wordt  $\tau_1$  bepaald door de grenslaagwrijving en de bodemwrijving die tegengesteld gericht zijn. Hierdoor zal het front lager zijn. De vorm van een terugtrekkende tong is dus verschillend van die van een oprukkende tong. De meest volledige gegevens die tot op heden over de grenslaagwrijving bekend zijn zijn de proeven van Lofquist<sup>x)</sup> die in het informatieblad V-149 van het Waterloopkundig Laboratorium nader zijn uitgewerkt (fig 2).

x) K. Lofquist "Flow and stress near an interface between stratified liquids" Phys. of fluids 3 1960 no. 2 March-April pp 158-175.

Ook in W.L. zijn bij enige proeven met lopende zouttong in het gebied  $R_e \sim 10^4$  en  $Fr$  ca. 0,9 wrijvingscoëff. van het grensvlak bepaald. De waarden komen lager uit dan die van fig 2, maar het karakter is volledig hetzelfde.

De toepassing voor het N. Hollands kanaal introduceert vele onzekerheden doordat de proeven van L. op kleine schaal gebeurd zijn met alleen de onderlaag stromend. De toestand was vrij scherp gelaagd met een menglaagzône van  $1/35$  van de onderlaag. Aangezien in het N. Hollands kanaal de onderlaagdikte 5 à 10 x groter is, de bovenlaag ook stroomt en de menglaagdikte, die ook de wrijving beïnvloedt, vaak  $1/2$  à  $1$  x de onderlaagdikte is, mag aan de volgende berekeningen slechts een geringe nauwkeurigheid worden toegeschreven. Echter zullen de uitkomsten kwalitatief inzicht geven in de gevolgen die wijzigingen in de condities ( $\Delta\rho$  in den Helder, spuidebiet, gelijkmatig of pulserend spuien) op het zoutbezwaar in het N. Hollands kanaal zullen hebben.

#### Menging en stabiliteit grenslaag.

Evenals bij windgolven het geval is zullen op het grensvlak golven ontstaan met toenemende golflengte en loopsnelheid. Feitelijk ontstaan in elkaar grijpende golven in de boven en onderlaag. Indien de verschillensnelheid tussen de lagen groter is dan de som van de twee loopsnelheden zullen de golven breken en zal dus menging optreden.

Dit zou een verklaring kunnen zijn van de grote menging nabij het front: de golven beginnen te ontstaan, zijn kort, hebben lage loopsnelheid, en zullen breken. Verderop zal de lengte, en dus de loopsnelheid voldoende zijn toegenomen.

Een grens aan de loopsnelheid ontstaat als de golven de bodem voelen. Er treedt a.h.w. een translatiegolf op. In de appendix wordt als loopsnelheid voor deze golf berekend als beide lagen stilstaan:

$$c = \sqrt{\frac{g' h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \quad (4)$$

Het blijkt dat de kleinste laagdikte maatgevend is voor de snelheid van de translatiegolf. In het reeds genoemde WL informatieblad V-149 wordt gevonden dat de menging toeneemt met toenemende  $Fr'$  nl.

$$U_{\text{meng}} = v \cdot 10^{-3} (Fr')^{3,5} \quad (5)$$

(Zie fig. 5)

$Fr'$  is hierbij gedefinieerd op de snelheid en dikte van de onderlaag =  $V_1 / \sqrt{g' h_1}$ .  $v$  moet worden geïnterpreteerd als de verschillensnelheid  $V_v$ .

Voor de algemene toepassing moet de  $Fr'$  gelezen worden als  $V_v / \sqrt{g' h_k}$ ; hierin is  $V_v$  de relatieve snelheid van de lagen t.o.v. elkaar, en  $h_k$  de kleinste van  $h_1$  of  $h_2$ .

De menging is bij de berekeningen niet in de vergelijkingen opgenomen, aangezien dit zeer grote complicaties geeft. Wel kan de berekening van de evenwichtszouttong kwalitatief worden beschouwd: In vergelijking (3) wordt  $\tau_1$  alleen door de grenslaagwrijving bepaald. Indien de menging echter door een tegenstroom in de onderlaag wordt gecompenseerd, wordt de totale wrijving groter, en dus  $dh_1/dx$  groter en dus de tong korter. Bovendien wordt door de menging de bovenlaag enigszins zout: het dichtheidsverschil neemt af, dus  $dh_1/dx$  neemt nog meer toe. Door de grootte van de menging te berekenen is een globale schatting gemaakt van de invloed op de berekende tonglengte.

### III. BEREKENING VAN DE EVENWICHTSLENGTE VAN DE TONG BIJ PERMANENT SPUIEN

De berekeningen zelf worden in de appendix uitgevoerd. Uitgegaan is van een prismatisch kanaal, spiegelbreedte 40 m, diepte 4,5 m, bodembreedte 20 m, taluds  $1:2\frac{1}{2}$ , met een verticale wand van 0,5 m direct onder de waterspiegel.  $F = 140 \text{ m}^2$  (fig. 1).

Om de invloed van de wandwrijving op de bovenlaag in rekening te brengen is het aanrakingsoppervlak per lengteeenheid kanaal op  $4 h_2$  gesteld (de combinatie talud  $1 : 2\frac{1}{2}$  en de verticale wand is vervangen gedacht door talud  $1 : 2$ ).

$$\text{Wandwrijving } \tau_w = \frac{1}{8} \lambda_w V_2^2 \cdot \rho,$$

dit is per massa eenheid

$$\frac{1}{8} \lambda_w \cdot V_2^2 \rho \cdot \frac{4h_2}{F_2}.$$

De invloed van de grenslaagwrijving per massa eenheid van de bovenlaag is:

$$\frac{1}{8} \lambda_i V_2^2 \cdot \rho \cdot \frac{b}{F_2} \quad (7)$$

( $b$  = breedte kanaal ter hoogte van het grensvlak) Totaal vinden we dus voor  $\tau_2/h_2$  uit vergelijking (3)



$$\tau_2/h_2 = \frac{1}{8} \lambda_w \cdot V_2^2 \rho \cdot \frac{4h_2}{F_2} + \frac{1}{8} \lambda_i V_2^2 \rho \frac{b}{F_2} \quad (8)$$

$$\tau_1/h_1 = \frac{1}{8} \lambda_i \cdot \rho V_2^2 b/F_1 \approx \frac{1}{8} \lambda_i \cdot \rho V_2^2/h_1 \quad (9)$$

De vorm van de doorsnede van de onderlaag wordt verwaarloosd, omdat (9) en (8) elkaar versterken is de fout in (9) klein ten opzichte het totaal.

$\lambda_w$  wordt constant gehouden op 0,02, berekend met een k waarde van 4 cm en een hydraulische straal van 16 m (gemiddelde van  $h_2$  en de halve breedte van de bovenlaag).

$\lambda_i$  volgt uit fig. 3.  $\lambda_i$  is een functie van  $V_2/\sqrt{g' h_1}$  en van  $V_2 \cdot h_2/v$ . Voor alle waarden van  $h_1$  (en dus  $h_2$ ) kan de  $dh_1/dx$  met (3) worden berekend als  $Fr' = Q/F \sqrt{g' \cdot h}$  en  $Re = Q \cdot h/F \cdot v$  betrokken op het gehele kanaal, gegeven zijn ( $F$  en  $h$  zijn het oppervlak van de doorsnede resp. de waterdiepte van het kanaal).

De locale waarden zijn hieraan éénduidig gekoppeld. De tonglengte is bepaald door stapjes  $\Delta h_1$  te nemen en te berekenen  $\Delta L = \Delta h_1 : (dh_1/dx)$ .

Als randvoorwaarde in den Helder is ingevoerd dat de onderlaag maximaal 3 m dik zal zijn: aangezien de drempel van de spuisluis dan ca. 0,5 m lager ligt dan de grenslaag mag verwacht worden dat bij een nog dikkere tong het zoutwater direct wordt afgezogen zodat dan geen evenwichtsituatie wordt beschreven. Bij grote waarde van  $Fr'$  wordt deze dikte niet bereikt omdat de  $Fr'$  betrokken op de bovenlaag nooit groter dan 1 kan zijn (zie vergel. 3).

De resultaten van de berekening zijn weergegeven in fig. 3: gestippeld is hierin ook de tonglengte weergegeven als de maximale tongdikte in den Helder 2 m zou zijn. Tabel I geeft de berekende punten.

Voor grote waarden van  $Fr'$  blijkt  $Re$  geen rol te spelen.

Tabel I.

$Fr' = Q/F \sqrt{g' h}$	$Re = Q \cdot h/Fv$	$L(h_1 = 3 \text{ m})$	$L(h_1 = 2 \text{ m})$
0,48	$4,3 \cdot 10^5$	60 m	60 m
0,34	$4,3 \cdot 10^5$	660 m	564 m
0,17	$1,1 \cdot 10^5$	$15,4 \cdot 10^3$ m	$12,2 \cdot 10^3$ m
0,17	$4,3 \cdot 10^5$	$17,8 \cdot 10^3$ m	$14 \cdot 10^3$ m
0,12	$1,1 \cdot 10^5$	$42,6 \cdot 10^3$ m	$33 \cdot 10^3$ m
0,12	$4,3 \cdot 10^5$	$49,5 \cdot 10^3$ m	$39 \cdot 10^3$ m

IV. BEREKENING DYNAMISCH EVENWICHT BIJ PULSEREND SPUIEN.

Onder dynamisch evenwicht wordt verstaan dat tussen de spuiperiodes door de tong even ver oprukt als deze tijdens het spuien wordt teruggedrukt. Aangezien de berekeningen voor de evenwichtslengte bij pulserend spuien zeer gecompliceerd zijn en er nogal veel onzekere factoren zijn, is zoveel mogelijk vereenvoudigd bij de berekening. Er wordt alleen bepaald met welke orde van grootte de tonglengte wordt gereduceerd t.o.v. de berekening met permanent spuidebiet. Een redelijke aanname lijkt de schematisatie dat 1/3 van de tijd wordt gespuid (ca. 4 uur tegenover 8 uur niet spuien). Bij  $Q_{\text{spui}} = 28 \text{ m}^3/\text{sec}$  is de spuisnelheid  $28/140 = 0,2 \text{ m/sec}$ . Uit de volgende berekeningen blijkt dat de tong met de helft op een derde van deze snelheid wordt teruggedrukt, dus b.v.  $0,1 \text{ m/sec}$ . In 4 uur tijd is dit een afstand van 1450 m. Is de tong in evenwicht dan rukt hij tussen de spuiperiodes dezelfde afstand op. Aangezien speciaal van belang zijn de tonglengten tussen 5000 en 15000 m blijft globaal gesproken de tonglengte steeds constant (fluctuatie  $\pm 5$  à  $15\%$ ).

Er is gerekend dat de tongvorm gelijk blijft, en in den Helder een dikte heeft van 2 m, terwijl de gemiddelde dikte 1 m is. Door nu deze tong op te laten rukken met snelheid  $V_t$  ontstaat een bovenstroom met een gemiddelde waarde behorend bij de tongdikte van 1 m. Alle wrijvingsfactoren zijn bepaald en hiermede zijn  $dh_1/dx$  en dus de tonglengte te bepalen met verg. (3). Om werk te besparen is in de appendix een vereenvoudigde formule voor de tonglengte afgeleid:

$$2 L \left( \frac{\tau_2}{\rho \bar{h}_2} + \frac{\tau_1}{\rho \bar{h}_1} \right) = g' h_1 - (\bar{V}_v^2 - V_t^2) \quad (10)$$

$\bar{h}_1$  en  $\bar{h}_2$  betekent dat deze betrokken moeten worden op de gemiddelde tonghoogte (1 resp. 3,5 m).  $\bar{V}_v$  = verschilnelheid van bovenlaag t.o.v. onderlaag.  $v_t$  = tongnelheid. Feitelijk is een assenkruis bewegend met de tong ingevoerd en is voor de bovenlaag de afzinking m.b.v. de wet van Bernoulli bepaald. Het aankomende water heeft t.o.v. het assenkruis een snelheid  $v_t$ , boven de tong is dit  $v_v$ .

$\tau_2$  wordt bepaald door alle schuifspanningen op de bovenlaag,  $\tau_1$  idem op de onderlaag.

$$\tau_2 = \frac{1}{8} \rho \bar{V}_v^2 \cdot \frac{b}{F_2} \cdot \lambda_i + \frac{1}{8} \rho \bar{V}_v^2 \frac{4\bar{h}_2}{F_2} \lambda_w \quad (11)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{8} \rho \bar{V}_v^2 \cdot \lambda_i + \frac{1}{8} \rho \bar{V}_v^2 \lambda_b \quad (12)$$

Hoewel (12) enigszins is vereenvoudigd is dit zeker verantwoord aangezien dit zowel bij de geschematiseerde berekening van pulserend als permanent spuien wordt toegepast.

Voor  $\lambda_b$  is, met een  $k$  waarde van 4 cm en een hydraulische straal van 0,5 m, gevonden  $\lambda_b = 0,05$ .

Met formule (10) en de  $\lambda_1$  waarden van fig. 2 is eerst de tonglengte berekend voor permanentie, om ten opzichte hiervan het effect van pulserend spuien te bekijken en om de vereenvoudigde berekening te toetsen.  $\tau_2$  en  $\tau_1$  zijn berekend volgens (8) en (9). In Tabel II zijn de resultaten gegeven:

Tabel II.

Fr'	Re	L volgens tabel I ( $h_1 = 2$ m)	L vereenv. meth.
0,48	$4,3 \cdot 10^5$	60 m	190 m
0,34	$4,3 \cdot 10^5$	564 m	850 m
0,17	$1,1 \cdot 10^5$	$12,2 \cdot 10^3$ m	$10,8 \cdot 10^3$ m
0,17	$4,3 \cdot 10^5$	$14 \cdot 10^3$ m	$11,7 \cdot 10^3$ m
0,12	$1,1 \cdot 10^5$	$33 \cdot 10^3$ m	$26,5 \cdot 10^3$ m
0,12	$4,3 \cdot 10^5$	$39 \cdot 10^3$ m	$30 \cdot 10^3$ m
0,08	$4,1 \cdot 10^5$		$63 \cdot 10^3$ m
0,08	$4,3 \cdot 10^5$		$72 \cdot 10^3$ m

De vereenvoudigde methode is voor de vergelijking pulserend of permanent spuien voldoende bruikbaar, gezien korte lengten voor dit probleem niet van belang zijn.

Om het effect van pulserend spuien na te gaan wordt eerst de momentane tonglengte berekend voor een oprukkende tong als functie van  $Fr'_t = V_t / \sqrt{g' h}$  en  $Re_t = V_t h / \nu$ . Tabel III geeft de resultaten.

Tabel III.

Fr' <sub>t</sub>	Re <sub>t</sub>	L in m	
0,0165	0,3.10 <sup>3</sup>	216000	Uit deze tabel is af te lezen hoe de snelheid van een tong afneemt naarmate hij langer wordt.
0,025	0,45.10 <sup>3</sup>	43200	
0,033	0,6.10	62000	Vervolgens wordt de <u>snelheid</u> berekend waarmee een tong tijdens de spuigang wordt <u>teruggedrongen</u> . Gegeven een bepaalde evenwichtslengte, moet de tong tijdens het spuien 2x zo snel worden teruggedrongen. D.w.z. als de terugdringsnelheid weer wordt uitgedrukt in: Fr' <sub>sp</sub> = v <sub>1</sub> / √(g' h <sub>1</sub> ) moet voor elke tonglengte gelden Fr' <sub>sp</sub> = 2 Fr' <sub>t</sub> , en Re <sub>sp</sub> = 2 Re <sub>t</sub> .
0,047	0,6.10 <sup>5</sup>	29000	
0,066	0,6.10 <sup>5</sup>	14600	
0,0833	1,5.10 <sup>5</sup>	9600	
0,094	0,6.10 <sup>5</sup>	6900	
0,118	1,5.10 <sup>5</sup>	4650	
0,166	1,5.10 <sup>5</sup>	2250	
0,166	3.10 <sup>5</sup>	2260	
0,235	1,5.10 <sup>5</sup>	980	
0,235	3.10 <sup>5</sup>	1020	
0,25	4,5.10 <sup>5</sup>	890	
0,333	3.10 <sup>5</sup>	320	
0,353	4,5.10 <sup>5</sup>	280	
0,47	3.10 <sup>5</sup>	116	

Voor elke terugdringsnelheid V<sub>t</sub> van de tong is de evenwichtslengte te berekenen als een waarde voor α wordt aangenomen:

$$\alpha = Q \text{ spui} / F \cdot v_t \quad (13)$$

Bij terugdringen gaat (10) over in:

$$2 L \left( \frac{\tau_2}{\rho h_2} + \frac{\tau_1}{\rho h_1} \right) = g' h_1 - (\bar{V}_v^2 - (\alpha-1)^2 v_1^2) \quad (14)$$

$$\frac{\tau_2}{h_2} = \frac{1}{8} \rho \cdot \bar{V}_v^2 \frac{b}{F_2} \cdot \lambda_i + \frac{1}{8} \rho \bar{V}_2^2 \cdot \frac{4 \bar{h}_2}{F_2} \lambda_w \quad (15)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{8} \rho \bar{V}_v^2 \cdot \lambda_i - \frac{1}{8} \rho \bar{V}_1^2 \cdot \lambda_b \quad (16)$$

In tabel IV zijn de resultaten vermeld. Fr'<sub>sp</sub> = V<sub>1</sub> / √(g' h).  
Re<sub>sp</sub> = v<sub>1</sub> h / ν, hierin is v<sub>1</sub> de snelheid waarmee de tong wordt teruggedrongen en h de diepte van het kanaal.

Tabel IV.

$\alpha = 2,3$			$\alpha = 2,5$			$\alpha = 3$		
$Fr_{sp}$	$Re_{sp}$	L (m)	$Fr_{sp}$	$Re_{sp}$	L (m)	$Fr_{sp}$	$Re_{sp}$	L (m)
0,2	$0,6 \cdot 10^5$	12600	0,3		negatief	0,0475	$0,6 \cdot 10^5$	137000
	$3 \cdot 10^5$	15300					$0,6 \cdot 10^5$	35000
	$6 \cdot 10^5$	17300					$1,5 \cdot 10^5$	26500
0,3	$> 0,6 \cdot 10^5$	405	0,38	$0,6 \cdot 10^5$	16100	0,083	$1,5 \cdot 10^5$	26500
				$3 \cdot 10^5$	73000	0,094	$0,6 \cdot 10^5$	14700
				$6 \cdot 10^5$		0,118	$1,5 \cdot 10^5$	5400
0,4	$> 0,6 \cdot 10^5$	200	0,76	$0,6 \cdot 10^5$	1930	0,166	$1,5 \cdot 10^5$	815
				$3 \cdot 10^5$	1930	0,166	$3 \cdot 10^5$	815
				$6 \cdot 10^5$	1930	0,235	$1,5 \cdot 10^5$	206
						0,235	$3 \cdot 10^5$	206
						0,333	$3 \cdot 10^5$	75
						0,333	$6 \cdot 10^5$	75
						0,353	$4,5 \cdot 10^5$	61
		0,47	$3 \cdot 10^5$	10				
			1,52	$> 0,6 \cdot 10^5$	114			
			2,26	$> 0,6 \cdot 10^5$	18			

In tabel IV is af te lezen welke  $\alpha$  zich instelt als, gegeven een bepaalde tong met  $\Delta p$  en L, een debiet wordt ingesteld. Bij een groter debiet wordt de tong relatief sterker meegenomen. Uiteraard is de invloed van  $Re$  een complicerende factor bij het aflezen. In de appendix is grafisch bepaald welke tonglengte en  $\alpha$  behoort bij  $Fr'_{sp} = 2 Fr'_t$  en  $Re_{sp} = 2 Re_t$ .

Aangezien de resultaten van pulserend spuien moeten worden vergeleken met die van permanentie moet worden ingevoerd een  $Fr'_{puls}$  die betrokken is op de gemiddelde spuisnelheid.

$$\bar{V} = \frac{1}{3} v_{spui} = \frac{\alpha}{3} V_1, \text{ dus } Fr'_{puls} = \frac{\alpha}{3} Fr'_{sp}.$$

$$\text{Tevens } Re_{puls} = \frac{\alpha}{3} Re_{sp}.$$

In tabel V zijn de uiteindelijke resultaten vermeld. Deze zijn direkt met die van tabel II te vergelijken. In fig. 4 is dit grafisch uitgezet.

Tabel V.

$Fr_{\text{puls}}$	$Re_{\text{puls}}$	L
0,17	$> 0,4 \cdot 10^5$	5600 m
0,1	$1,0 \cdot 10^5$	14000 m
0,115	$2,5 \cdot 10^5$	14000 m
0,075	$1,2 \cdot 10^5$	48000 m
0,08	$> 1,5 \cdot 10^5$	44000 m
0,056	$0,6 \cdot 10^5$	76000 m

Beschouwingen betreffende de tonglengte.

Uit de vergelijking tabel II met tabel V (fig. 4) volgt dat pulserend spuien een kortere tonglengte geeft, in het voor dit probleem interessante gebied ongeveer 1,75x. Bij pulserend spuien komen momentaan veel grotere waarden voor van het Froudegetal betrokken op de onderlaag dan bij permanent spuien. Daardoor is een veel grotere grenslaagmenging te verwachten (zie fig. 5 en volgend hoofdstuk) hetgeen bij evenwicht van de tong gecompenseerd moet worden door aanvoer in de onderstroom. Uit de hiermede veroorzaakte extra wrijving volgt een kortere tonglengte. Ook is het mogelijk de invloed van de menging als volgt te zien: de watersnelheden in de onderlaag blijven gelijk, maar de tong krijgt t.g.v. menging een extra verkorting. Hiernaar is verder niet gerekend maar het is waarschijnlijk dat bij pulserend spuien (1/3 van de tijd) de tonglengte minstens 2 à 3x zo kort wordt vergeleken bij permanent spuien. Er wordt verder gerekend met een factor 2,5x. Ook bij permanent spuien wordt de tonglengte korter t.g.v. menging, echter veel minder. Het heeft, gezien de vele aannamen in de berekening geen zin om hiermede rekening te houden.

Er is nog een andere reden waarom menging de tonglengte verkort: het dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag neemt af. Speciaal bij pulserend spuien gaat dit een rol spelen. Bij een gegeven mengdebiet is de afname in dichtheidsverschil te berekenen. Stel het dichtheidsverschil blijft over de tong constant met  $\Delta\rho$ , dan heeft het kanaalwater in den Helder een concentratie  $\Delta\rho \cdot Q_m/Q$  gekregen, terwijl de zouttong  $\Delta\rho_0$  heeft. Het verschil in dichtheid is nu  $(\Delta\rho_0 - \Delta\rho \cdot Q_m/Q)$  hetgeen gelijk aan  $\Delta\rho$  is verondersteld. Dus  $\Delta\rho = \Delta\rho_0 / (1 + Q_m/Q)$ . Is  $Q_m/Q$  dus 1/5 (zie volgende par.), dan  $\Delta\rho = 5/6 \Delta\rho_0$ . De waarde van  $Fr'$  wordt hiermee 10%

vergroot. Er is aangenomen dat  $\Delta\rho$  over de tonglengte constant blijft omdat het mechanisme van de tong dan niet wijzigt.

Samenvatting van de berekeningen over de tonglengte.

- a. Uit de berekeningen blijkt dat het getal van Froude  $Q_{\text{spui}}/F \sqrt{g' h}$  de belangrijkste parameter is. Dat wil zeggen dat, uitgaande van een bestaande situatie, het verschijnsel gelijk blijft als het spui-debiet en  $\sqrt{\Delta\rho/\rho}$  evenredig toe- of afnemen.
- b. Voor permanent spuien kan de tonglengte worden berekend met tabel I of fig. 3.
- c. Voor pulserend spuien kan de tonglengte ook met fig. 3 worden bepaald, maar  $Fr'$  moet dan 10% groter worden aangenomen en de tonglengte moet nog een factor 2,5 worden verkleind.

Het zal duidelijk zijn dat de berekening speciaal voor pulserend spuien niet erg nauwkeurig is. Er zal in hoofdstuk VI geprobeerd worden enige contrôle-berekeningen uit te voeren voor zover prototype gegevens bekend zijn.

Opm.: Bij het W.L. zijn proeven gedaan in het getijmodel van het delta-gebied M 600 waar bij de Nieuwe Waterweg de zee zout is geweest. Met constant rivierdebiet kwam met getij de tong (realistisch) tot omgeving Krimpen, en zonder getij kwam deze tientallen km verder het land in. Dit is illustratief voor extra werking van pulserend spuien.

V. MENGING ONDER- EN BOVENLAAG.

Er wordt gebruik gemaakt van de betrekking (zie fig. 5)

$$u_m = V_v \cdot Fr'_{\text{onder}}{}^{3,5} \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Hierin  $Fr'_{\text{onder}} = V_v / \sqrt{g' h_1}$  en  $V_v$  is de verschilsnelheid tussen de lagen. Bij pulserend spuien wordt  $Fr'$  gebruikt die tijdens het spuien optreedt. De berekeningen sluiten aan op de uitkomsten van de vereenvoudigde tongberekening, dus met

$\bar{h}_1 = 1 \text{ m}$ ,  $F_o = 140 \text{ m}^2$ ,  $\bar{F}_1 = 22,5 \text{ m}^2$ ,  $\bar{F}_2 = 117,5 \text{ m}^2$ ,  $L$  volgend uit tabel II. (Opm.: indien de waarden van tabel I worden genomen, dan zou  $L$  groter zijn en wordt een grotere menging gevonden).

Permanent spuien.

$$V_v = 140/117,5 \cdot V_o$$

$$Fr'_{\text{onder}} = Fr' \cdot \frac{140}{117,5} \cdot \sqrt{4,5} = 2,54 Fr'$$

(  $\sqrt{4,5}$  omdat in  $Fr'$  de  $h$  staat en in  $Fr'_{\text{onder}}$  de  $h_1$  ).

$$Fr_{\text{onder}}^{3,5} = 26 Fr^{3,5}$$

$$Q_m = b \cdot L \cdot u_m \quad (b = \text{breedte grenslaag} = 24 \text{ m gemiddeld}).$$

$$Q_m = b \cdot L \cdot V_v \cdot 10^{-3} Fr_{\text{onder}}^{3,5} = L \cdot 24 \cdot \frac{140}{117,5} \cdot 10^{-3} \cdot 26 Fr^{3,5} \cdot Q_o/140 \quad (17)$$

$$Q_m/Q_o = 0,0053 Fr^{3,5}$$

Aansluitend op tabel II wordt dit:

Fr	Re	L(m)	$Fr^{3,5}$	$Q_m/Q_o$
0,48	$4,3 \cdot 10^5$	190	0,075	0,076
0,34	$4,3 \cdot 10^5$	850	0,0254	0,112
0,17	$1,1 \cdot 10^5$	10800	0,00206	0,118
0,17	$4,3 \cdot 10^5$	11700	0,00206	0,126
0,12	$1,1 \cdot 10^5$	26500	0,0006	0,084
0,12	$4,3 \cdot 10^5$	30000	0,0006	0,095
0,08	$1,1 \cdot 10^5$	63000	0,00015	0,05
0,08	$4,3 \cdot 10^5$	72000	0,00015	0,06

Het mengdebiet is in den Helder ca. 1/10 van het spuidebiet en halverwege de tong 1/20 van het spuidebiet. Dit wordt over  $22,5/140 = 1/6$  van de drsn. aangevoerd. Ten opzichte van de bovenlaagsnelheid is deze compensatiesnelheid in de onderlaag nog vrij gering, en er wordt bij de berekening van de tonglengte geen rekening mee gehouden. Mogelijk is ook dat geen compensatiestroom in de onderlaag optreedt maar de tong a.h.w. wordt afgeschaafd. Het mengdebiet per eenheid van doorsnede is dan de snelheid waarmede de tong verkort.

Pulserend spuien.

Er wordt gerekend dat alleen tijdens het spuien menging optreedt: tijdens oprukken van de tong is deze nl. zeer gering. Als het verhoudingsgetal  $Q_m/Q_{sp}$  wordt berekend tijdens de spuiperiode, dan is dit ook



geldig voor de gemiddelde  $Q_m$  en het gemiddelde spuidebiet. Tijdens het spuien geldt  $V_{sp} = \alpha V_1$  (snelheid in de tong).

$$V_v = (\alpha - 1) \frac{140}{117,5} \cdot V_1 = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{140}{117,5} V_{sp}$$

$$V_{sp} = 3 \cdot \bar{V}_{sp} \text{ (aangezien 1/3 van de tijd gespuid wordt).}$$

$$Fr_{\text{onder}} = \frac{V_v}{\sqrt{g'h_1}} = \frac{V_v}{\sqrt{g'h_0}} \sqrt{\frac{h_0}{h_1}} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{140}{117,5} 3 \cdot \frac{\bar{V}_{sp}}{\sqrt{g'h_1}} \sqrt{4,5}$$

voor  $\alpha$  wordt 2,5 ingevoerd en  $v_{sp} / \sqrt{g'h_0} = Fr_{\text{puls}}$ .

$$Fr_{\text{onder}} = 4,55 Fr_{\text{puls}}$$

$$\frac{Q_m}{Q_o} = \frac{L \cdot b \cdot u_m}{F_o V_{sp}} = \frac{L \cdot b}{F_o} \frac{V_v Fr_{\text{onder}}^{3,5} 10^{-3}}{V_{sp}}$$

Aangezien  $V_v = V_{sp} \frac{\alpha - 1}{\alpha} \frac{140}{117,5}$  en  $Fr_{\text{onder}}^{3,5} = 201 Fr_{\text{puls}}^{3,5}$ ,  $b = 24$  m,

$F_o = 140 \text{ m}^2$ , vinden we

$$Q_m/Q_o = 0,0246 \cdot L \cdot Fr_{\text{puls}}^{3,5} \quad (18)$$

De vergelijking (18) geeft een 5x hogere uitkomst als (17), waarbij echter de tonglengte 2,5x korter is. Het mengdebiet geeft een 2x hogere waarde: dit wordt nu 1/5 van het spuidebiet.

Het compensatiedebiet halverwege de tong is 1/10 van het spuidebiet, hetgeen over 1/5 van de doorsnede moet worden afgevoerd. Deze snelheden zijn hoog vergeleken bij die in de berekening zijn aangehouden, nl.  $V_1 = \frac{1}{\alpha} V_{sp} \approx 0,4 V_{sp}$ .

Feitelijk is de snelheid waarmee de tong zich terugtrekt veel groter dan uit  $V_1$  volgt. Er is geen nieuwe berekeningsmethode hiervoor opgezet maar zoals in de vorige par. is gemeld is de berekende tong niet 1,75 maar 2 à 3x verkort aangenomen t.o.v. permanent spuien.

## VI. CONTROLE MET PROTOTYPEGEDEGENS.

a. Meting P.W.S. N. Holland, oct. '64.

Tonglengte 2 km,  $\bar{Q} = 16 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Hierbij was de tong in evenwicht d.w.z. de laag met  $\Delta\rho/\rho = 5\%$  werd teruggedrongen, de 8% laag rukte iets op.

Berekening:  $Fr'_{puls} = 16/140 \sqrt{\frac{7}{1000} \cdot g \cdot 4,5} = 0,202.$

Bij pulserend spuien mag  $Fr$  10% worden vergroot en de tonglengte 2,5x worden verkleind.  $Fr'_{1,1} = 0,22 \longrightarrow L = 8 \text{ km}$  (fig. 3).  $0,4 = 3,2 \text{ km}.$

b. Meting R.W.S., 15 nov. '65.

De tonglengte 12 km voor het spuien op 15 nov. begon, met  $\Delta\rho$  oplopend, aan de punt ca. 7‰, achterin 13‰ (op 4 km vanaf den Helder).  $\overline{Q}_{sp}$  over laatste 2 getijden voor de meting was  $6,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Een dag later (2 spuiingen  $\overline{Q} = 7 \text{ m}/\text{sec}$ ) was de tong nog maar bemerkbaar op 2,5 km vanaf de koopv. schutsluis.

Vlakbij koopvaardersschutsluis was  $\Delta\rho/\rho = 18‰$  t.o.v. het kanaalwater, zowel op 15 als 16 november. Er was veel menging in de bovenlaag (4,5‰) zodat de effectieve  $\Delta\rho/\rho$  ca. 13‰ was.

Berekening:  $Fr'_{puls} = 6,5/140 \sqrt{\frac{13}{1000} g \cdot 4,5} = 0,06.$

Bij pulserend spuien:  $1,1.Fr' = 0,066.$

$L$  is niet af te lezen in fig. 3 maar komt zeker op 200 km na extrapolatie. 2,5 verkorten  $\longrightarrow 80 \text{ km}.$

Voor de tong met 7‰ wordt  $Fr' = 0,085 \longrightarrow Fr'_{1,1} = 0,93.$  Volgens extrapolatie fig. 3 is  $L = 90 \text{ km} \longrightarrow L.0,4 = 36 \text{ km}.$

c. Op 16 nov., dus na het voorgaande is 's middags gespuid met een debiet overeenkomend met  $\overline{Q} = 13 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Toegepast op een  $\Delta\rho_{gem} = 10‰$   $Fr'_{puls} = 0,14 \longrightarrow 1,1 Fr' = 0,154 \longrightarrow L = 24 \text{ km} \longrightarrow 0,4 L = 9,6 \text{ km}.$  Het blijkt zeer moeilijk deze meting in de berekening in te passen, maar de meetresultaten lijken nogal af te wijken van de vroegere toestanden waarover incidenteel gegevens bekend zijn.

d. Meting 23 nov. '65.

Er is slechts 1x per dag gespuid, en hierover is geen berekening uitgevoerd. Het lijkt aannemelijk dat de resultaten het dichtst liggen bij 2x per dag spuien met hetzelfde debiet. Gerekend wordt met 2x per dag spuien met een  $Q$  die 0,9 is van het opgetreden debiet.  $\overline{Q}$  is dan  $5,3 \text{ m}^3/\text{sec}.$

Indien de situatie de evenwichtslengte weergeeft dan is  $L$  ca. 10 km.

$(\Delta\rho/\rho)_{gem} = 3,5‰.$

Berekend:

$Fr = 5,3/140 \frac{3,5}{1000} g \cdot 4,5 = 0,075.$

$1,1 Fr = 1,05 \longrightarrow L = 55 \text{ km} \longrightarrow 0,4 L = 22 \text{ km}.$

Bij het aanzetten van het spuidebiet leek de tong in stilstand te zijn bij  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$  (quasi permanentie)  $Fr = 10/140 \sqrt{\frac{3,5}{1000} g \cdot 4,5} = 0,18$ .  
 $L = 13 \text{ à } 14 \text{ km}$  (fig. 3).

e. De vroegere ervaring was dat er bij  $Q = 16 \text{ m}^3/\text{sec}$  geen moeilijkheden waren, d.w.z. dat in Westeinde ( $L = 8 \text{ km}$ ) het water goed was. Hiermede is de  $\Delta\rho$  in den Helder terug te rekenen.

$$0,4 L = 8 \text{ km} \longrightarrow L = 20 \text{ km} \longrightarrow 1,1 Fr' = 0,164 \longrightarrow Fr' = 0,145 = \\ = 16/140 \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g \cdot 4,5}. \quad \text{Dus } \frac{\Delta\rho}{\rho} = 14\%.$$

### Conclusie.

De meetduur van de metingen nov. '65 was te kort om hieruit redelijkerwijs een evenwichtslengte te bepalen. Desalniettemin is een schatting gemaakt. De tonglengte is steeds korter dan de berekende. Afwijkingen kunnen zijn ontstaan doordat de invloed van het mengdebiet bij pulserend spuien een grotere extra verkorting geeft dan is aangenomen. Ook zijn de  $\lambda$ -coëfficiënten uit fig. 2, zowel als de interpretatie van de prototype gegevens niet erg nauwkeurig geweest. Ook is het mogelijk dat de vaart met voor het kanaal grote zandschepen (900 t) zeer sterk de menging tussen de lagen bevordert, waardoor de tong korter wordt. Het aantal kolkomzettingen per dag (16x koopv.sl., 6x Nwe werk) is veel groter dan normaal wordt aangenomen (zie WL nota R 195 juli '62, met verwijzing naar RWS rapp. "Chloride bezwaar sluizen den Helder"), hierin wordt 41,5x per week koopv. en 43x per week Nwe werk aangehouden, zodat het de vraag is welke toestand als representatief moet worden gezien.

### VII. MAATREGELEN OM DE TOESTAND TE VERBETEREN.

- a. Debiet vergroten. Dit is i.v.m. inlaatcapaciteit slechts beperkt mogelijk, ook als het gemaal in den Helder gereed is.
- b. Zoutscherm. Dit is een scherm met zeer diep gelegen spleet waarmede het zoute water, dat in een verdiept kanaalgedeelte-opvangbekken-is opgevangen wordt afgezogen. Dit is uitvoerig in de WL nota R 195, maart '63 behandeld. Een zoutscherm is zeer effectief als er voldoende spui- of maaldebiet is om 2 à 3x de aangeboden hoeveelheid zeewater af te voeren. Verder is de werking extra gunstig, ook bij lagere debieten,

omdat het meest zoute water wordt afgevoerd, waardoor een eventuele tong een lagere  $\Delta p$  heeft. Het Froudegetal wordt dan veel groter en de tong korter (fig. 3).

Het zal van de grootte van het opvangbekken afhangen of er nog pulse-  
rend kan worden gespuid.

c. Luchtbellenscherm. Dit is vooral bij de grootste zoutbronnen van belang: de koopvaardersschutsluis en ook het marinedok zolang de tweede kering nog niet is geplaatst. Reductie zoutbezwaar tot ca. 50%; het doorgelaten water heeft een vrij geringe reductie in de concentratie. De schermen behoeven vooral te werken als het spuidebiet gering is, en de eisen hoog zijn (voorjaar, zomer).

d. Schotbalken in de koopvaardersschutsluis. Een drempeldiepte van 3,5 m t.o.v. de kanaalstand lijkt voldoende voor de scheepvaart (binnenvaart). Zoutreductie tot 50 à 60% van de huidige waarde.

e. Reeds genoemde tweede stel deuren aan de kanaalzijde van het marinedok. Zie nota juli '62; reductie tot 30%.

Gegevens nota juli 1962:

Huidig zoutbezwaar  $1,65(1,06 C_1 - C_2)$  Kg  $Cl^-$ /sec. Met  $C_1 = 18 \text{ kg/m}^3$  en  $C_2 = 0$  is dit  $31,5 \text{ kg/sec}$ . Uitgedrukt in onverdund zeewater  $1,75 \text{ m}^3/\text{sec}$ ., waarvan  $1 \text{ m}^3/\text{sec}$  door koopv. schutsl.,  $0,65 \text{ m}^3/\text{sec}$  door marinedok en  $0,1 \text{ m}^3/\text{sec}$  sluis Nwe werk en marineschutsluis samen.

Per schutting koopv. schutsl. komt gemiddeld  $6900 \text{ m}^3$  naar binnen en een opvangbekken moet voor de volgende schutting leeg zijn. Bij een schutfrekwentie van éénmaal per uur moet  $1,9 \text{ m}^3/\text{sec}$  onverdund zeewater worden uitgedrukt.

Berekeningen droge zomer (met gemaal) met zoutscherm, spui of maal-  
debiet  $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Zoutbezwaar marinedok + rest kan momentaan wellicht 3x zo groot zijn als de gemiddelde  $0,75 \text{ m}^3/\text{sec}$ , dus  $2,25 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Koopvaardersschutsluis  $1,9 \text{ m}^3/\text{sec} \rightarrow 4,15 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Rekenen met 2 à 3x verdunnen dan  $8,5$  à  $12,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Indien spuien wordt aangepast aan zoutaanbod, dan gemiddeld aanbod als norm. Koopv. schutsluis bij 15 schuttingen per dag  $1,9 \cdot 15/24 = 1,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Rest  $0,75 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Totaal  $1,95 \text{ m}^3/\text{sec}$ . 2 à 3x verdunnen dan is nodig 4 à  $6 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Met schotbalken, dan koopv. sl.  $0,6 \cdot 1,2 = 0,72 \text{ m}^3/\text{sec}$ .  
Totaal  $1,5 \text{ m}^3/\text{sec} \rightarrow 3$  à  $4,5 \text{ m}^3/\text{sec}$  spuidebiet.

Schotbalken + lucht in koopv. sl. + 2e kering marinedok Koopv. sl.  
 $0,72 \cdot 0,6 = 0,4 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Marinedok  $0,25 \text{ m}^3/\text{sec}$  rest  $0,1 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Totaal  $0,75 \text{ m}^3/\text{sec} \rightarrow$  spuidebiet  $1,5$  à  $2,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Het is van veel belang dat alle zout direct wordt afgezogen want om bij  $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ , met pulserend spuien, de tong 8 km of korter te houden is de maximale  $\Delta\rho$  waarbij de tong niet oprukt:

$$0,4 L = 8 \text{ km} \longrightarrow L = 20 \text{ km} \longrightarrow 1,1 \text{ Fr}' = 0,16$$

$$\text{Fr}'_{\text{puls}} = 0,145 = 5/140 \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g \cdot 4,5} \longrightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} = 1,4\%$$

Bij permanent spuien is dit nog lager, nl. 0,6‰. Dit is zo laag dat zonder zoutscherm zelfs de andere maatregelen samen niet voldoende zijn. Er is geen berekeningsmethode bekend om het evenwicht te bepalen van de tong, dat geheel bepaald wordt door de verhouding tussen zoutaanbod, partieel zout spuien en opmenging in de tong.

Berekening gemiddelde zomer, met zoutscherm,  $\bar{Q} = 10 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Hiermee kan een zouttong met pulserend spuien binnen 8 km lengte gehouden als  $\Delta\rho/\rho = 5,6\%$ . Bij permanent spuien is dit 2,4‰. Zoals bij de vorige berekening al bleek is er met een zoutscherm een behoorlijke reserve zelfs al worden geen andere maatregelen getroffen dan alleen maar te pompen of te spuien corresponderend met het zoutaanbod. Dan benodigde gemiddelde  $\bar{Q} = 4 \text{ à } 6 \text{ m}^3/\text{sec}$ , momentaan  $8,5 \text{ à } 12,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Indien het juist is dat bij de huidige situatie  $\bar{Q} = 16 \text{ m}^3/\text{sec}$  nodig is voor een goed kwaliteitsbeheer, dan is er enige kans dat bij toepassen van schotbalken + luchtbellenschermen + tweede kering marine-dok in de toekomst  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$  voldoende is (mits het debiet pulserend blijft), maar hierover is geen zekerheid te verkrijgen en berekeningen zijn niet mogelijk. Ter oriëntering:

$$\text{Loopsnelheid tong} = 0,45 \sqrt{g'h'} = 0,45 \sqrt{\frac{15}{1000} g \cdot 4,5} = 0,37 \text{ m/sec.}$$

Spuisnelheid  $Q/F = 10/140 = 0,07 \text{ m/sec}$ . Het moet uitgesloten worden geacht dat de tong niet enigszins het kanaal binnendringt.

De kosten van een zoutscherm moeten worden afgewogen tegen:

1. Een redelijke kans dat geen luchtbellenschermen nodig zijn (mits spuidebiet aangepast aan aanbod en  $\bar{Q} > 5 \text{ m}^3/\text{sec}$ ).
2. Een kleiner debiet in den Helder nodig is, hetgeen energiekosten bespaart.
3. Het beschikbaar komen van meer water voor Zaandam.

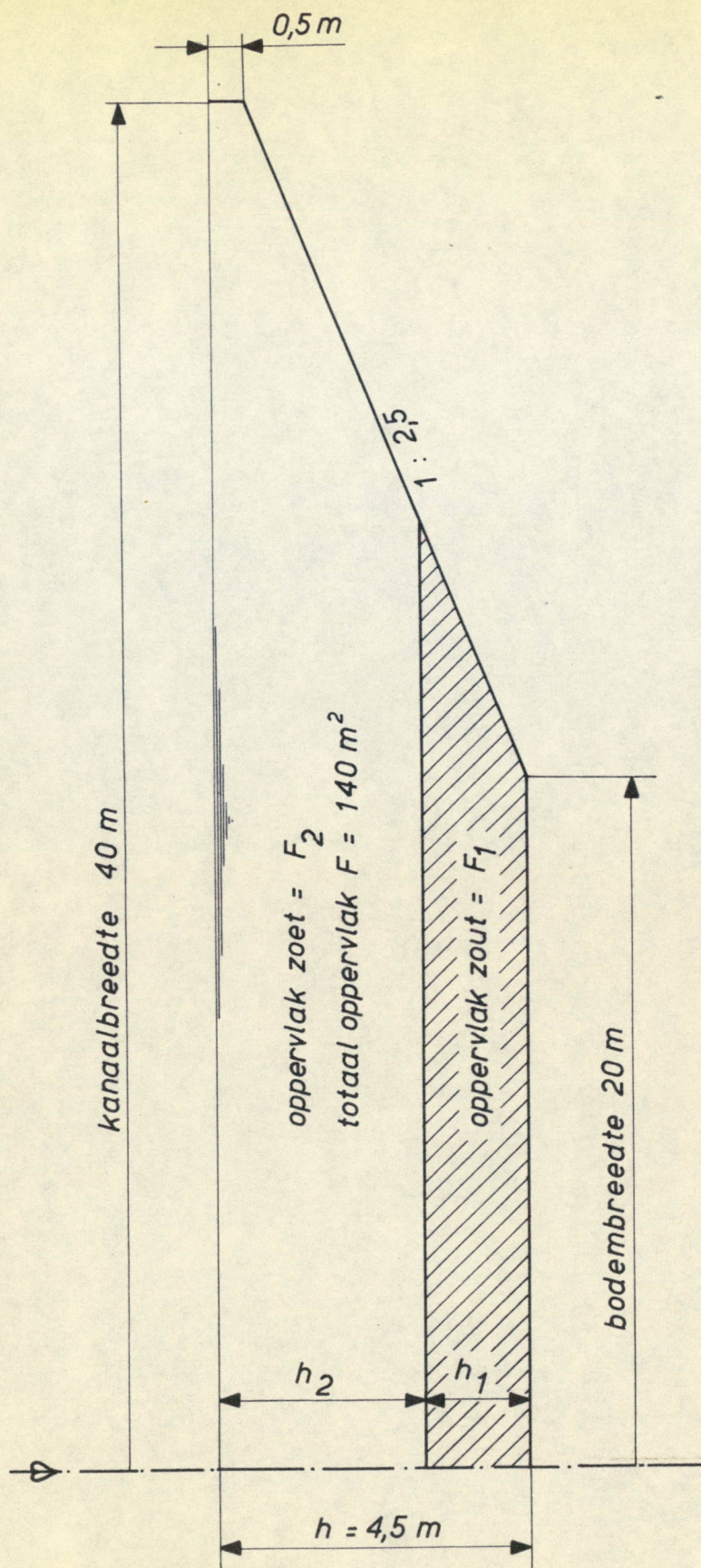
### VIII. CONCLUSIES.

1. De tonglengte bij permanent spuien of pompen is in fig. 3 gegeven. Een geringe toename in de dichtheid of afname van het debiet heeft een grote invloed op de mate van binnendringen van het zout.
2. Pulserend spuien geeft een 2 à 3x kortere tong, terwijl  $Fr'$  (ofwel het effect van het spuidebiet) nog 10% groter gerekend mag worden. Ook de menging wordt vergroot waardoor met het bovenwater meer zout wordt afgevoerd.
3. Een zoutscherm waarmede het spuiwater op een diepgelegen plaats het zoute water uit een verdiept kanaalgedeelte - een zgn. opvangbekken - afzuigt is zeer effectief omdat met een hoog rendement zoutwater wordt afgezogen en omdat het eventueel niet afgezogen zoute water een geringere concentratie heeft, zodat de tonglengte sterk wordt gereduceerd. Vermoedelijk is het zelfs bij een spuidebiet van  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$  niet mogelijk zonder zoutscherm aan hoge kwaliteitseisen te voldoen, zelfs al worden de maatregelen genoemd onder 4, 5 en 6 toegepast.

Om bij een beperkte capaciteit van het opvangbekken met zo groot mogelijk rendement af te zuigen zal tijdens het schutten continu moeten worden gespuid of gemalen. Hiermede vervalt voor een groot deel het effect van pulserend spuien (behoudens punt 7). Dit nadeel is klein t.o.v. de reeds genoemde voordelen.

4. Luchtbellenschermen kunnen het zoutbezwaar tot 50 à 60% verminderen.
5. Schotbalken in de koopvaardersschutsluis kunnen het zoutbezwaar van deze sluis met 40 à 50% doen afnemen.
6. Een tweede stel deuren in het Zeedok, toch al nodig i.v.m. het op delta hoogte brengen van de kering, kan het zoutbezwaar hiervan tot 30% terugbrengen.
7. Het pomp- of spuidebiet moet zoveel mogelijk corresponderen met het zoutaanbod, dus vooral overdag malen en bij openen van het zeedok het debiet vergroten. Hiermede wordt ook het voordeel van pulserend spuien verkregen. Door het plaatsen van zoutmeters kan het debiet zo effectief mogelijk worden benut.

Opm.: In het rapport wordt gewerkt met dichtheidsverschillen  $\Delta\rho/\rho$ , terwijl in de praktijk het zoutgehalte wordt uitgedrukt in mg chloorion per liter.  $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 1$  komt overeen met  $6.10^5$  mg/l. Zeewater: 19000 mg/l;  
 $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 31,5\%$ .



GESCHEMATISEERDE KANAALDOORSNEDE

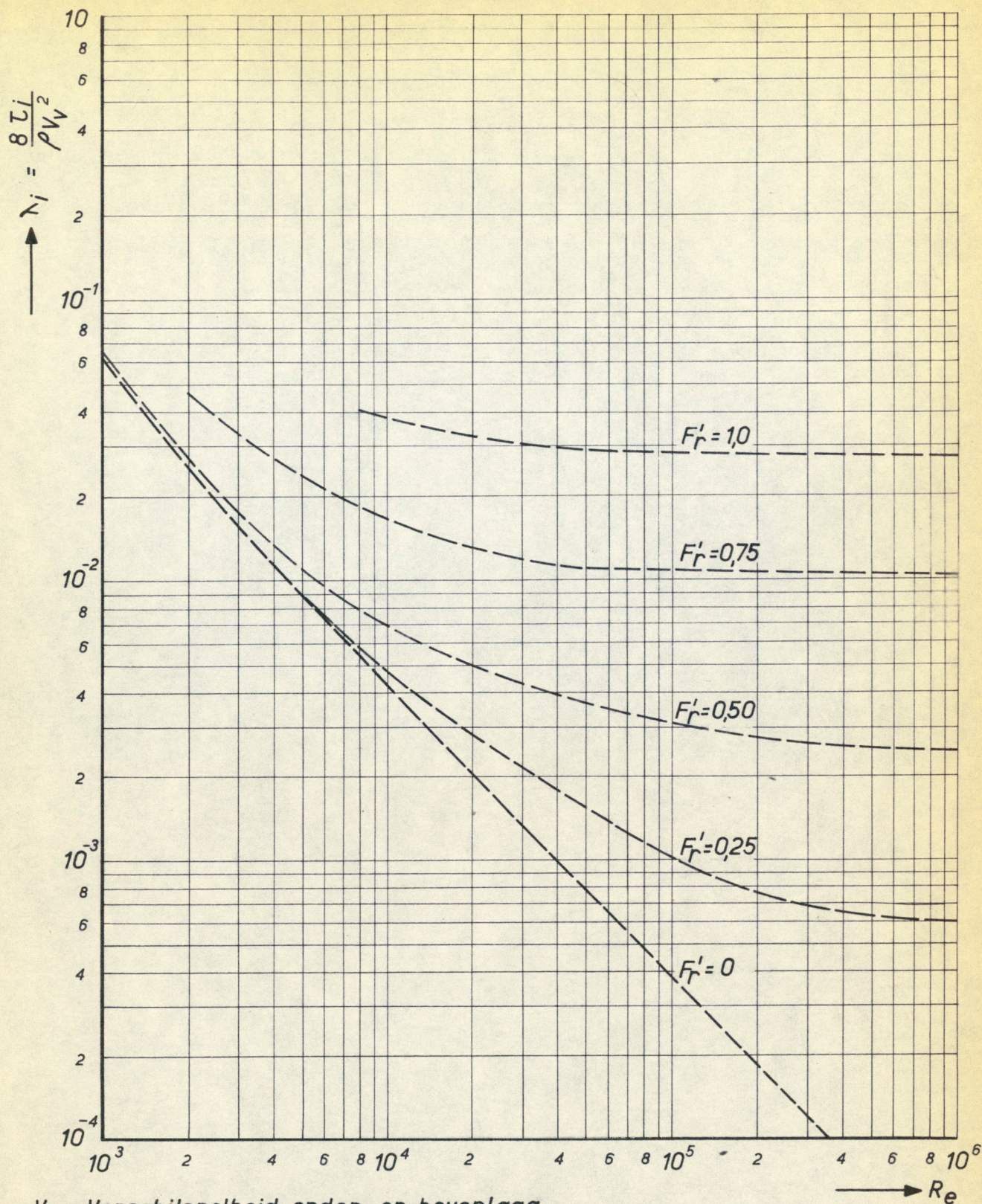
Nota jan. 1966

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.195

FIG. 1

L<sup>2</sup>



$V_v$  = Verschilsnelheid onder - en bovenlaag

Interpretatie voor den Helder:  $Fr' = V_v / \sqrt{g'h_1}$      $Re = V_v h_2 / \nu$

(In origineel  $v_2 = 0$      $Fr' = v_1 \sqrt{g'h_r}$      $Re = v_1 h_r / \nu$ , en  $h_r = bh_1 / (b+2h_1)$ )

GRENSLAAGWRUING ALS FUNCTIE VAN  $Fr$  EN  $Re$   
(W.L. INFORMATIE BLAD V.149)

Nota jan. 1966

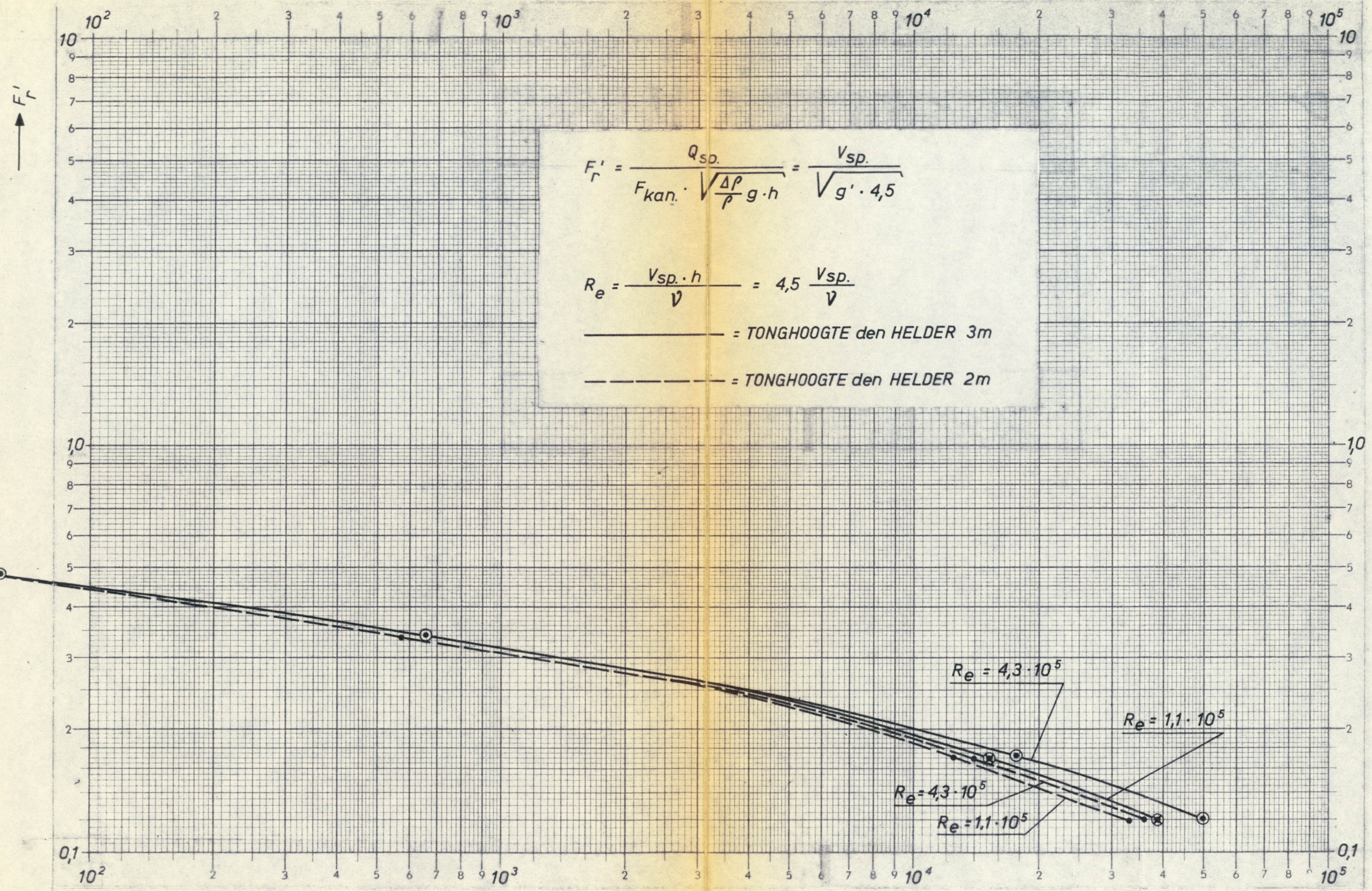
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.195

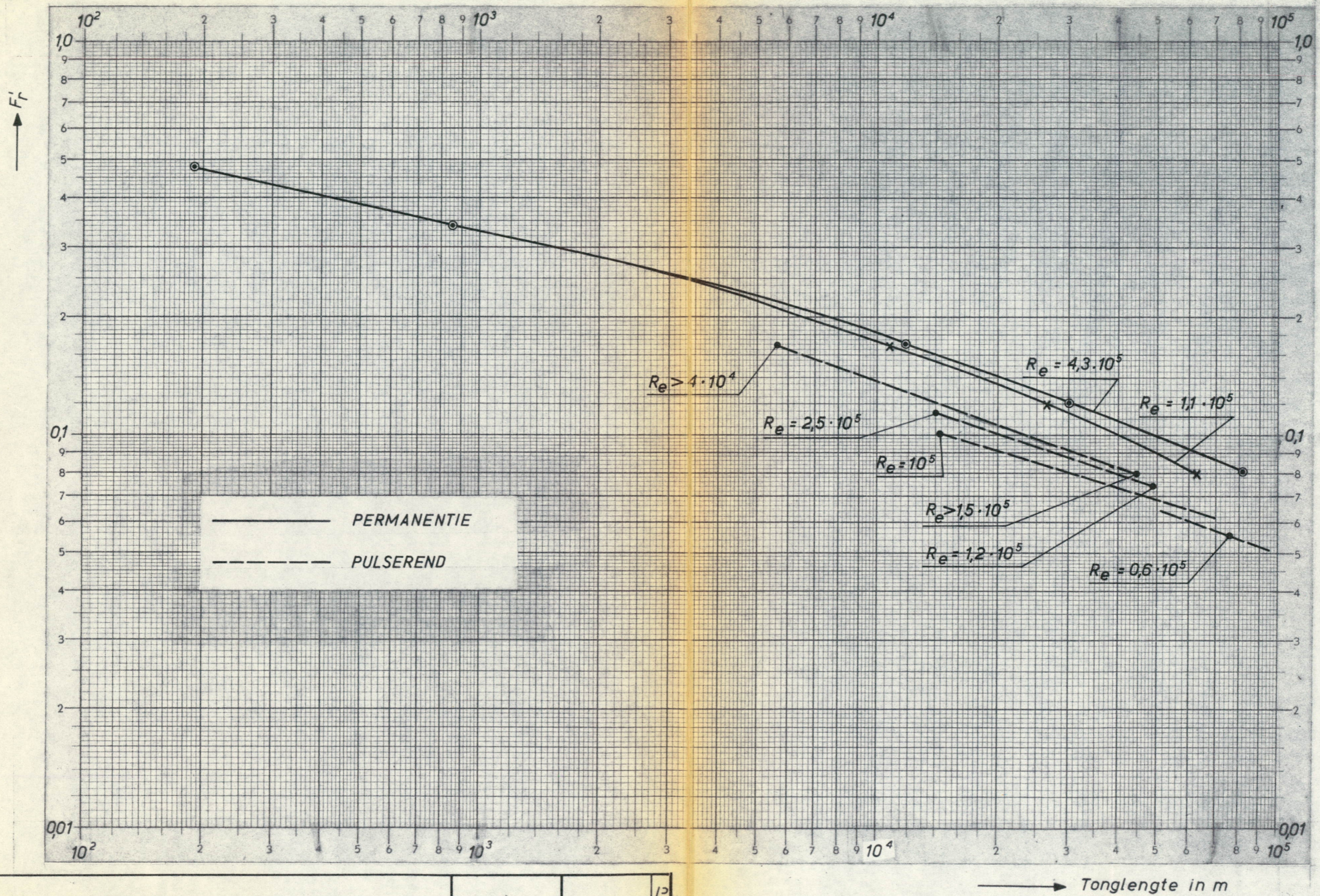
FIG. 2

L?





TONGLENGTE BIJ PERMANENT SPUIEN			L <sup>2</sup>
	Nota jan. 1966		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R. 195	FIG. 3	

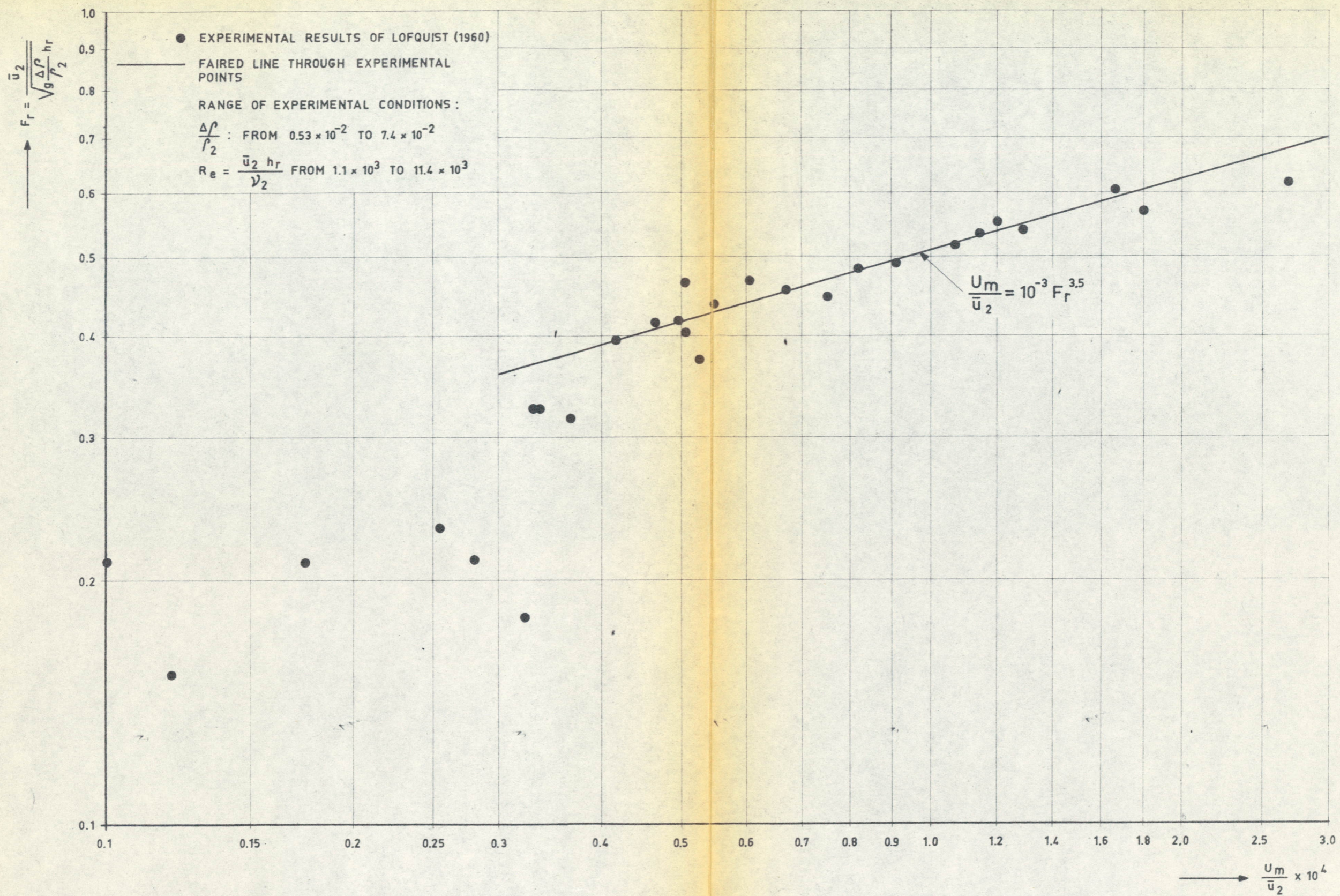


VEREENVOUDIGDE BEREKENING  
 BIJ PERMANENT EN PULSEREND SPUIEN

Nota jan. 1966

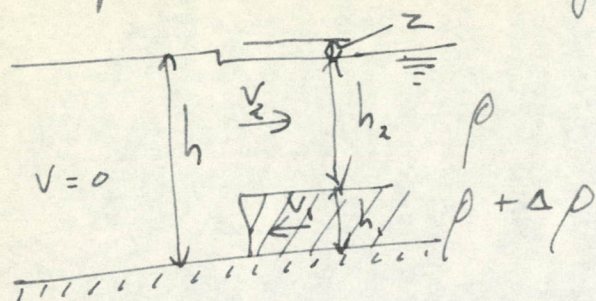
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 195 FIG. 4

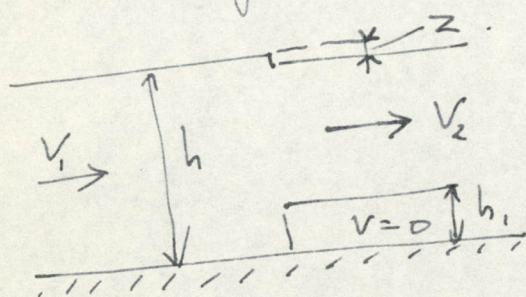


GRENSLAAGMING ALS FUNCTIE VAN $F_r$			L <sup>2</sup>
	Nota jan. 1966		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R. 195	FIG. 5	

I Loopsnelheid zouttoeg, afhankelijk van toengedikte.



Berekening tov. bewegend assenkruis met snelheid  $v_1$



Bernoulli bovenlaag:  $\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} = z$

Continuïteit bovenlaag  $v_1 h = v_2 (h - h_1)$

(in continuïteitsvergel. wordt  $z$  verwaarloosd)

Impuls wet:

$$k dt = z \cdot h \cdot \rho g - \frac{1}{2} \Delta \rho g h_1^2 = dm v = (v_2^2 (h - h_1) - v_1^2 h) \rho dt$$

afwel:

$$\frac{v_1^2 \left\{ \left( \frac{h^2}{(h-h_1)^2} - 1 \right) \right\}}{2g} h \rho g - \frac{1}{2} \Delta \rho g h_1^2 = v_1^2 \rho \left( \frac{h^2}{h-h_1} - h \right)$$

Uitwerken hiervan geeft

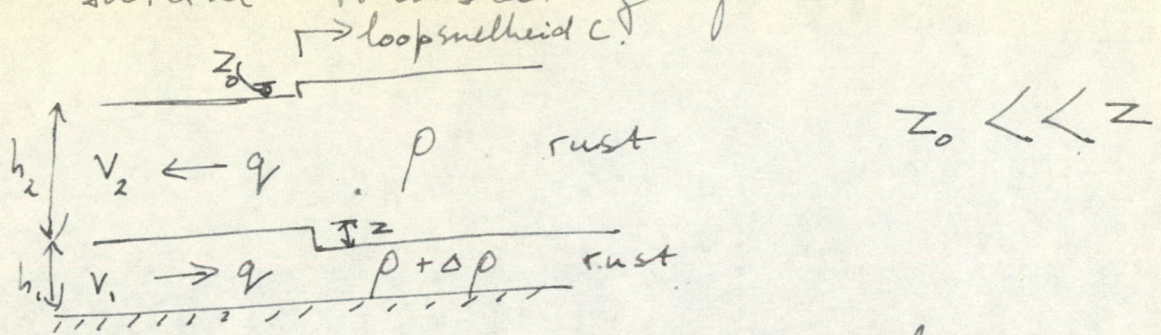
$$v_1 = \frac{h-h_1}{h} \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g h}$$

Bij stilstaand assenkruis is  $v_1$  de loopsnelheid

in de toengedikte

II

Interne translatiegolf



Continuïteit bovenlaag en onderlaag

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 = q = z \cdot c$$

De stoorgolf  $z$  wordt klein t.o.v.  $h_1$  en  $h_2$  genomen.

Bernoulli mag t.o.v. met golf meelopen afgeleiden worden toegepast.

$$\text{Bovenlaag: } z_0 = \frac{(v_2 + c)^2}{2g} - \frac{c^2}{2g} \approx \frac{v_2 c}{g} \quad \dots (1)$$

Opm: bij kleine stoorgolf ontstaat kleine  $v_2$ .

Onderlaag idem, en dus

$$z \frac{\Delta\rho}{\rho} = z_0 = \frac{v_1 c}{g} \quad \dots (2)$$

(1) invullen in (2) geeft

$$z \frac{\Delta\rho}{\rho} g = (v_1 + v_2) c$$

en met  $v_2 = v_1 h_1 / h_2$  en  $z = h_1 v_1 / c$

$$\frac{h_1 v_1}{c} \frac{\Delta\rho}{\rho} g = v_1 c \left(1 + \frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{ofwel}$$

$$c^2 = \frac{\Delta\rho}{\rho} g \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}$$

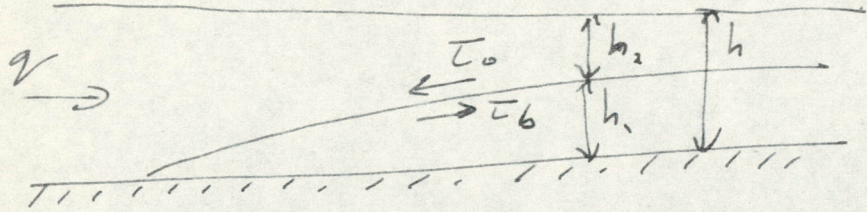
In het volgende is een enigszins afwijkende notatie voor de schuifspanningen gebruikt, vergeleken bij de Nota:

$$\begin{array}{l}
 T_2 \text{ in de nota is in de appendix } T_0 \\
 T_1 \text{ " " " " " " " " } T_b
 \end{array}$$

$F_r'$  is in de appendix omschreven met de waarden van  $(v)$  en  $(h)$  waarop deze is betrokken, terwijl in de nota hiernaan de indices 1 en 2 betrokken op resp. de onder- en bovenlaag zijn ingevoerd.

III. Berekening stilstaande zoutboog.

De berekening wordt uitgevoerd alsof alle wrijving op grenslaag plaats vindt. I.v.m. wandwrijving wordt wrijving op bovenlaag  $\neq$  wrijving op onderlaag genomen



$$q = h_2 v_2 \quad \text{--- (1)}$$

wrijvingsverg.  $-\rho g \frac{dh}{dx} - \frac{\tau_0}{h_2} = \rho v_2 \frac{dv_2}{dx} \quad \text{--- (2)}$

wicht onderlaag  $\frac{dh}{dx} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{dh_1}{dx} = \tau_b / \rho g h_1 \quad \text{--- (3)}$

uit (1) volgt  $v_2 = q/h_2 \rightarrow \frac{dv_2}{dx} = -\frac{q}{h_2^2} \frac{dh_2}{dx} = -\frac{q}{h_2^2} \left( \frac{dh}{dx} - \frac{dh_1}{dx} \right)$

Invoeren in (2) geeft

$$\frac{dh}{dx} = \frac{q^2}{g h_2^3} \left( \frac{dh}{dx} - \frac{dh_1}{dx} \right) - \tau_0 / \rho g h_2 \quad \text{ofwel:}$$

$$\frac{dh}{dx} = \left( -\frac{q^2}{g h_2^3} \frac{dh_1}{dx} - \frac{\tau_0}{\rho g h_2} \right) : \left( 1 - \frac{q^2}{g h_2^3} \right)$$

Combineren met (3)

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{\rho}{\Delta \rho} \frac{\tau_b / \rho g h_1 \left( 1 - \frac{q^2}{g h_2^3} \right) + \tau_0 / \rho g h_2}{1 - \frac{q^2}{\frac{\Delta \rho}{\rho} g h_2^3} \left( 1 + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)}$$

Aangenomen  $\Delta \rho \ll \rho$  en  $q^2 / g h_2^3 \ll 1$  wordt dit

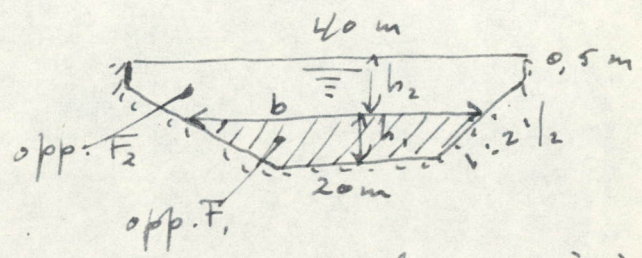
$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{\rho}{\Delta \rho} \frac{\tau_b / \rho g h_1 + \tau_0 / \rho g h_2}{1 - F_r'^2} \quad \text{--- (4)}$$

4.

Aangezien  $Fr' = v / \sqrt{\frac{\rho}{\rho'} gh}$  in vele gedaanten voorkomt wordt in de kolommen tussen haakjes de  $v$  en de  $h$  vermeld waarop deze betrekking hebben.

In vergelijking (4) komen  $\tau_0 / \rho h_2$  en  $\tau_b / \rho h_1$  voor; dit zijn schuisspanningen per massa eenheid.

Kanaalprofiel:



Op de bodem <sup>-laag</sup> werkt alleen grenslaagwrijving, dus  $\tau_b / h_1 = \frac{1}{8} \lambda_i \rho v_2^2 / h_1$ .

Op de oppervlaktelaag werkt op het oppervlak  $F_2$  de wrijving  $b \cdot \frac{1}{8} \lambda_i \rho v_2^2$  en (bij behoudring)  $4 h_2 \cdot \frac{1}{8} \lambda_w \rho v_2^2$ .

Bezien we formule (4) dan krijgen we

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{\rho}{\rho'} \frac{v_2^2 / 8g \left\{ \left( \frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2} \right) \lambda_i + \frac{4 h_2}{F_2} \lambda_w \right\}}{1 - Fr'^2}$$

$\lambda_w$  volgt uit  $\lambda_w = 8g / c^2$ .  $c = 18 \log \frac{12R}{k}$

$R = \text{hydr. straal} = 10 \text{ m}$  (gemiddelde van waterdiepte en  $\frac{1}{2} b$ )

$k = \text{ruwheid} = 4 \text{ cm}$ .

$\lambda_w = 0,02$



$\lambda$ : volgt uit fig 2 van het rapport,  
als functie van  $Fr. (v_2)$  en  $(h_2)$  en Reynolds =  
 $= \frac{v h}{\nu} (v_2)$  en  $(h_2)$ .

In het volgende worden enkele gevallen  
doorgerekend. Tonglengte berekend met  
stapjes  $\Delta h_1$  en dus  $\Delta L = \Delta h_1 / |dh_1/dx|$ .  
Max. tonghoogte 3m (zie rapport).

Voor  $\nu$  is aangenomen  $1,5 \cdot 10^{-6}$ , zijnde de  
waarde bij  $0^\circ C$  (buitenmeting den Helder 16 Nov '65).

Dit is verder van gln belang aanzien als  
maatgevende parameters voor het probleem  
gelden  $Fr$  met  $(\frac{Q_{sp}}{F_{kan}})$  en  $(h_{kanal})$

en  $Re$  met  $(\frac{Q_{sp}}{F_{kan}})$  en  $(h_{kan.})$ .

$Fr$  met  $v_2$  en  $h_2$  volgt uit  $Fr$  met  $v$  en  $h$ ,  
door in te voeren  $v_2 h_2 = v \cdot h$ . (evenzo te bepalen  $Fr$  met  $v_2$  en  $h_1$ )

$$\frac{v_2}{\sqrt{g h_2}} = \frac{v h / h_2}{\sqrt{g h \cdot h_2 : h}} = \frac{v}{\sqrt{g h}} \cdot \left(\frac{h}{h_2}\right)^{3/2}, \text{ evenzo getal van Reynolds.}$$

$$Q = 5 \text{ m}^3/\text{sec} \quad \frac{\Delta p}{\rho} = 2\%$$

$$F_r \text{ met } (v) \text{ en } (h) \text{ betrokken op kanaal} = \frac{5/140}{\sqrt{\frac{2}{1000} \cdot 9 \cdot 4,5}} = 0,119$$

$$R_e \text{ met } (v) \text{ en } (h) \text{ idem} = \frac{(5/140) \cdot 4,5}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 1,1 \cdot 10^5$$

$h_1$ m	$h_2$ m	$F_2$ $\text{m}^2$	$b$ m	$\frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2}$	$\frac{4h_2}{F_2}$	$F_r'^2$ $(h_2)(v_2)$	$F_r'$ $(h_1)(v_2)$	$R_e$ $(h_2)(v_2)$	$\lambda_i$	$\lambda_w$	$v_2$ m/sec	$v_2^2/8g$	$\frac{\rho}{\Delta p(1-F^2)}$	$dh_1/dx$	$\Delta L$
0,25	4,25	135	21	4,16	0,125	0,016	0,52	$10^5$	$3 \cdot 10^3$	0,02	0,037	$0,171 \cdot 10^4$	492	$1,32 \cdot 10^4$	2,7 km
0,5	4,00	129,5	22,5	2,17	0,124	0,0185	0,385	"	2 "	"	0,0385	0,186 "	490	0,65 "	4,2
0,8	3,70	122,5	24	1,45	0,120	0,0225	0,32	"	1,4 "	"	0,041	0,210 "	489	0,48 "	5,2
1,0	3,50	117,5	25	1,21	0,119	0,027	0,30	"	1,3 "	"	0,0425	0,226 "	487	0,48 "	5,2
1,3	3,20	109,5	26,5	1,01	0,117	0,0325	0,282	"	1,2 "	"	0,0457	0,263 "	484	0,48 "	7,3
1,7	2,80	98,5	28,5	0,88	0,113	0,046	0,275	"	1,2 "	"	0,0508	0,321 "	477	0,575 "	7,8
2,2	2,30	84	31	0,825	0,109	0,077	0,285	$9 \cdot 10^4$	1,2 "	"	0,0595	0,455 "	462	0,77 "	8,4
3	1,50	57,5	35	0,938	0,105	0,255	0,355	"	1,6 "	"	0,087	0,950 "	373	2,3 "	1,75
														+ 42,6 km	

+0,6 km tot  $h_1 = 2,4$   
33 km in den held

$Q = 20 \text{ m}^3/\text{sec.}$      $\Delta P/\rho = 2\%$

$Fr = \frac{20}{140} \sqrt{\frac{2}{1000}} \cdot 4.5 = 0,478$

$Re = \frac{4.5 \cdot 20 / 140}{1.5 \cdot 10^{-5}} = 4,3 \cdot 10^5$

$h_1$ m	$h_2$ m	$F_2$ $\text{m}^2$	$b$ m	$\frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2}$	$\frac{4h_2}{F_2}$	$Fr'^2$ $(h_2)(v_2)$	$Fr'$ $(h_1)(v_2)$	$Re$ $(h_2)(v_2)$	$\lambda_i$	$\lambda_w$	$v_2$ m/sec	$v_2^2/2g$	$\frac{\rho}{\Delta P(1-Fr'^2)}$	$dh_1/dx$	$\Delta L$
0,25	4,25	135	21	4,16	0,125	0,256	2,1	4,2 · 10 <sup>5</sup>	0,37	0,62	0,148	2,74 · 10 <sup>4</sup>	670	0,282	1,3 m
0,5	4,00	129,5	22,5	2,17	0,124	0,300	1,55	4,15 "	0,129	"	0,155	3,00 "	715	0,0602	4,6
0,8	3,70	122,5	24	1,45	0,120	0,355	1,29	4,04 "	0,068	"	0,163	3,30 "	775	0,025	10
1,0	3,50	117,5	25	1,21	0,119	0,415	1,20	3,96 "	0,0532	"	0,170	3,60 "	850	0,0206	12
1,3	3,20	109,5	26,5	1,01	0,117	0,525	1,13	3,92 "	0,0438	"	0,183	4,20 "	1050	0,0205	17
1,7	2,80	98,5	28,5	0,88	0,113	0,719	1,10	3,80 "	0,0392	"	0,203	5,15 "	1770	0,0338	13,5
2,2	2,30	84	31	0,825	0,109	1,30	1,19	3,75 "	0,0517	"	0,244	7,20 "	1670	neg.	
3	1,50	57,5	35	0,938	0,105	4,05									58,5 m.

$Q = 20 \text{ m}^3/\text{sec}$      $\Delta P/\rho = 32\%$      $Fr = 0,119$      $Re = 4,3 \cdot 10^5$

$h_1$	$h_2$	$F_2$	$b$	$\frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2}$	$\frac{4h_2}{F_2}$	$Fr'^2$ $(h_2)(v_2)$	$Fr'$ $(h_1)(v_2)$	$Re$ $(h_2)(v_2)$	$\lambda_i$	$\lambda_w$	$v_2$	$v_2^2/2g$	$\frac{\rho}{\Delta P(1-Fr'^2)}$	$dh_1/dx$	$\Delta L$
0,25						0,016	0,52	4,2 · 10 <sup>5</sup>	2,7 · 10 <sup>3</sup>	0,62	0,148	2,74 · 10 <sup>4</sup>	31,6	1,18 · 10 <sup>4</sup>	3,2 km
0,5						0,0185	0,385	4,15 "	1,7 "	"			31,8	0,59 "	4,7
0,8						0,0225	0,32	4,04 "	0,95 "	"			32,0	0,4 "	6,25
1,0						0,027	0,30	3,96 "	0,9 "	"			32,1	0,4 "	8,25
1,3						0,0325	0,282	3,92 "	0,78 "	"			32,4	0,403 "	8,7
1,7						0,046	0,275	3,80 "	0,73 "	"			32,8	0,49 "	9,2
2,2						0,077	0,285	3,75 "	0,79 "	"			33,9	0,702 "	9,25
3						0,255	0,355	3,6 "	1,2 "	"			42,0	2,07 "	1,95

+0,7 (voor  $h_1 = 2 \text{ m}$ )  
39 km

495 km

$Q = 20 \text{ m}^3/\text{sec}$      $\Delta p/\rho = 4\%$      $Fr = 20/140 \sqrt{\frac{4}{1000} \cdot 9,45} = 0,358$      $Re = 4,3 \cdot 10^5$

$h_1$ m	$h_2$ m	$F_2$ m	$b$ m	$\frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2}$	$\frac{4h_2}{F_2}$	$Fr'^2$ $(\frac{h_2}{h_1}) \cdot (\frac{V_2}{V_1})$	$Fr'$ $(\frac{h_2}{h_1}) \cdot (\frac{V_2}{V_1})$	$Re$ $(\frac{h_2}{h_1}) \cdot (\frac{V_2}{V_1})$	$\lambda_i$	$\lambda_w$	$V_2$ m/sec	$V_2^2/8g$	$\frac{\rho}{\rho(1-Fr'^2)}$	$dh_1/dx$	$\Delta L$ m
0,25	4,25	135	21	4,16	0,125	0,128	1,47	$4,2 \cdot 10^5$	$11,5 \cdot 10^{-2}$	0,02	0,148	$2,74 \cdot 10^4$	286	$37,7 \cdot 10^{-3}$	9,95
0,5	4,00	129,5	22,5	4,17	0,124	0,148	1,085	4,15 "	3,9 "	"	0,155	3,00 "	293	9,48 "	29,0
0,8	3,70	122,5	24	1,45	0,120	0,18	0,90	4,04 "	2 "	"	0,163	3,30 "	304	3,14 "	80
1,0	3,50	117,5	25	1,21	0,119	0,216	0,85	3,96 "	1,6 "	"	0,170	3,60 "	319	2,49 "	100
1,3	3,20	109,5	26,5	1,01	0,117	0,26	0,80	3,92 "	1,25 "	"	0,183	4,20 "	337	2,13 "	164
1,7	2,80	98,5	28,5	0,88	0,113	0,368	0,78	3,80 "	1,20 "	"	0,203	5,15 "	395	2,60 "	173
2,2	2,30	84	31	0,825	0,109	0,616	0,81	3,75 "	1,35 "	"	0,244	7,20 "	650	6,28 "	103
3,0	1,50	57,5	35	0,938	0,105	2,04	1,00	3,6 "	2,8 "	"	0,349	15,20 "	-240	-0,3	
															659 m

8 (tot 2 m)  
 + 564 m +

$Q = 5 \text{ m}^3/\text{sec}$      $\Delta p/\rho = 1\%$      $Fr = 5/140 \sqrt{\frac{1}{1000} \cdot 9,45} = 0,169$      $Re = 1,1 \cdot 10^5$

$h_1$	$h_2$	$F_2$	$b$	$\frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2}$	$\frac{4h_2}{F_2}$	$Fr'^2$ $(\frac{h_2}{h_1}) \cdot (\frac{V_2}{V_1})$	$Fr'$ $(\frac{h_2}{h_1}) \cdot (\frac{V_2}{V_1})$	$Re$ $(\frac{h_2}{h_1}) \cdot (\frac{V_2}{V_1})$	$\lambda_i$	$\lambda_w$	$V_2$ m/sec	$V_2^2/8g$	$\frac{\rho}{\rho(1-Fr'^2)}$	$dh_1/dx$	$\Delta L$
0,25	4,25					0,032	0,735	$10^5$	$10 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,037	$0,171 \cdot 10^4$	1030	$7,8 \cdot 10^4$	0,48 km
0,5	4,00					0,037	0,542	"	3,8 "	"	0,0385	0,186 "	1040	2,06 "	1,33
0,8	3,70					0,045	0,431	"	2,5 "	"	0,041	0,210 "	1050	1,34 "	1,86
1,0	3,50					0,054	0,424	"	2,3 "	"	0,0425	0,226 "	1055	1,215 "	2,04
1,3	3,20					0,065	0,398	"	1,95 "	"	0,0457	0,263 "	1070	1,22 "	2,87
1,7	2,80					0,092	0,388	"	1,90 "	"	0,0508	0,321 "	1100	1,39 "	3,23
2,2	2,30					0,154	0,403	$9 \cdot 10^4$	2,05 "	"	0,0595	0,445 "	1180	2,04 "	3,18
3	1,50					0,51	0,502	"	3,1 "	"	0,087	0,950 "	2030	9,7 "	0,41

0,25 tot  $h_1 = 2 \text{ m}$   
 12,06 km +

$$Q = 20 \text{ m}^3/\text{sec} \quad \frac{\Delta p}{\rho} = 16\%$$

$$Fr = 0,169$$

$$Re = 4,3 \cdot 10^5$$

$h_1$ m	$h_2$ m	$F_2$ $\text{m}^2$	$b$ m	$\frac{1}{h_1} + \frac{b}{F_2}$	$\frac{4h_2}{F_2}$	$F_r$ $(h_2) (V_2)$	$F_r^{1/2}$ $(h_2) (V_2)$	$Re$ $(h_2) (V_2)$	$\lambda_i$	$\lambda_w$	$V_2$ m/sec	$V_2^2/8g$	$\frac{\rho}{\Delta p(1-F_r^3)}$	$dh_1/dx$	$\Delta L$ km
0,25	4,25	135	21	4,16	0,125	0,735	0,032	$4,2 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,148	$2,74 \cdot 10^4$	64,2	$7,4 \cdot 10^4$	0,51
0,5	4,0	129,5	22,5	2,17	0,124	0,542	0,037	4,15	3,05	"	0,155	3,00	64,8	1,81 "	1,51
0,8	3,7	122,5	24	1,45	0,120	0,451	0,045	4,04	1,90	"	0,163	3,30	65,3	1,11 "	2,25
1,0	3,5	117,5	25	1,21	0,119	0,424	0,054	3,96	1,70	"	0,170	3,60	66,0	1,05 "	2,38
1,3	3,2	109,5	26,5	1,01	0,117	0,398	0,065	3,92	1,40	"	0,183	4,20	66,9	1,05 "	3,34
1,7	2,8	98,5	28,5	0,88	0,113	0,388	0,0920	3,80	1,30	"	0,203	5,15	69,0	1,22 "	3,70
2,2	2,3	84	31	0,825	0,109	0,403	0,154	3,75	1,45	"	0,244	7,20	74,0	1,79 "	3,65
3	1,5	57,5	35	0,938	0,105	0,502	0,51	3,6	2,65	"	0,349	15,20	128,0	8,92 "	0,45
															17,8 km

+0,28 tot  $h_1 = 2 \text{ m}$   
 $\frac{13,97}{+}$  km

# IV Berekening effect pulserend spuien.

Steek vereenvoudigde methode, toegepast op permanent en pulserend spuien, om a. b. w. een versterkingsfactor te bepalen.

Bovenlaag gaat onder verhang staan, te berekenen met Bernoulli bovenlaag met beweegend assenkruis op het front van de tong. Het totale verval over de lengte L is  $\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_0^2}{2g} + \frac{\bar{T}_0 L}{\rho g h_2}$

Hierin is  $v_2$  de snelheid op lengte L en  $v_0$  ~~voor~~ <sup>toev. beweegend assenkruis.</sup> de tong.  $v_0$  is feitelijke spuistroomsnelheid minus de snelheid waarmee de tong zich terugtrekt. Bij oprakken de tong  $v_0 = v_t$  (loopsnelheid tong) en  $v_2 =$  verschil-snelheid onder en bovenlaag. Staat zouttong stil dan is tegelverhang nodig dat  $\rho/\Delta\rho \times 20$  sterk is; extra tegelverhang is nodig om de schuifspanning te compenseren die direct op de onderlaag werkt.

Ofwel, als tong als geheel wordt gezien

$$\rho g h_1 \left( \frac{\bar{v}_2^2}{2g} - \frac{v_0^2}{2g} + \frac{\bar{T}_0 L}{\rho g h_2} \right) + \bar{T}_0 L = \frac{1}{2} \Delta \rho h_1^2 g$$

hierin is  $\rho g h_1 (\dots)$  het verhang van de waterspiegel maal de onderlaag (maal  $\rho g$ ) dus de horizontale kracht door het verhang op de gehele onderlaag uitgeoefend.  $\bar{v}_2$  en  $\bar{h}_2$  en  $\bar{T}$  geven aan dat de waarden gemiddelden zijn over de lengte van de tong.  $h_1 =$  hoogte

aan het eind (den Helder). Omdat het verval van de bovelaag geleidelijk ontstaat wordt voor  $v_2^2/2g$  ook maar met  $\bar{v}_2^2$  gerekend.\*)

$\bar{T}_b L$  spreekt voor zich zelf, en  $\frac{1}{2} \Delta \rho h_1^2 g$  is de tegendruk tgr. het dichtheidsverschil.

De aanname in de berekeningen is nu dat alle grootheden  $h_2$ ,  $\bar{T}_0$ ,  $\bar{T}_b$  en  $\bar{v}_2$  betrokken kunnen worden op de halve tonghoogte. De tong wordt a.h.w. door een rechthoek met  $\frac{1}{2} h_1$  den Helder vervangen, zodat  $\tau$ ,  $v_2$  en  $h_2$  over gehele lengte gelijk zijn.  $L$  is nu te berekenen.

$$L = \frac{\frac{1}{2} g' h_1 - \frac{1}{2} (\bar{v}_2^2 - v_0^2)}{\bar{T}_0 / \rho h_2 + \bar{T}_b / \rho h_1} \quad (g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho}) \quad (1)$$

De berekeningen worden uitgevoerd voor een tong met  $h_1 = 2$  m.

Dus  $h_1 = 1$  m en  $h_2 = 3,5$  m  $\bar{T}_2 = 117,5$   $b = 24$  m

Berekening stilstaande zoutvong:

$$v_0 = Q/F = Q/140 \text{ m}^2 \quad \bar{v}_2 = Q/117,5 = 1,19 \text{ v}$$

$$\bar{v}_2^2 - v_0^2 = 0,42 v_0^2$$

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{8} \rho \bar{v}_2^2 \frac{h_2 b}{F_2} \lambda_i + \frac{1}{8} \rho \bar{v}_2^2 \frac{4 h_2^2}{F_2} \lambda_w$$

$$\bar{T}_b = \frac{1}{8} \lambda_i \rho \bar{v}_2^2$$

\*) Achteraf gezien zou het de voorkeur verdienen om  $v_2^2/2g - v_0^2/2g$  op het eind te berekenen en dit te laten aansluiten op  $1/4$ . Dan zou de grote  $F_2$  kortere lengte worden

Indien we nu invullen.

$$g'h_1 = g'h_0 \cdot \frac{h_1}{h_0} = 0,444 g'h_0$$

dan krijgen we

$$L = \frac{0,222 g'h_0 - 0,21 v_0^2}{v_0^2 \left( \frac{0,127}{h_2} \lambda_i + \frac{0,0738}{h_2} \lambda_w + \frac{0,177}{h_1} \lambda_i \right)} = \frac{0,222 / Fr'^2 - 0,21}{0,125 \lambda_i + 0,021 \lambda_w} \quad (3)$$

$$Fr'^2 = v_0^2 / g'h_0, \text{ waarin } v_0 = Q_{spui} / F$$

$\lambda_w = 0,02$ .  $\lambda_i$  te bepalen uit fig 2 van de nota, m.b.v. gegevens betrekken op  $h_2$  en  $\bar{v}_2$  voor  $Re$  en  $\bar{v}_2$  en  $h_1$  voor  $Fr_{onder}$ .

$Fr'$ ( $v_0$ ) (h)	$Re$ ( $v_0$ ) (h)	$Re_{bunke}$ ( $\bar{v}_2$ ) ( $h_2$ )	$Fr_{onder}$ ( $\bar{v}_2$ ) ( $h_1$ )	$\lambda_i$	L m	Compleet methode $h_1 = 2 \text{ m.}$ L
0,08	1,1 · 10 <sup>5</sup> 4,3 · 10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> 4 · 10 <sup>5</sup>	0,20	0,8 · 10 <sup>-3</sup> 0,45 · 10 <sup>-3</sup>	63000 72000	— —
0,119	1,1 · 10 <sup>5</sup> 4,3 · 10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> 4 · 10 <sup>5</sup>	0,3	1,3 · 10 <sup>-3</sup> 0,8 · 10 <sup>-3</sup>	26500 30000	33000 39000
0,169	1,1 · 10 <sup>5</sup> 4,3 · 10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> 4 · 10 <sup>5</sup>	0,43	2,4 · 10 <sup>-3</sup> 2 · 10 <sup>-3</sup>	10800 11700	12200 14000
0,338	4,3 · 10 <sup>5</sup>	4 · 10 <sup>5</sup>	0,85	13 · 10 <sup>-3</sup>	850	564
0,478	4,3 · 10 <sup>5</sup>	4 · 10 <sup>5</sup>	1,21	29 · 10 <sup>-3</sup>	190	60

Opm. Aangezien niets bekend is over  $\lambda_i$  als  $Fr_{onder} > 1$ , worden de waarden voor  $Fr' = 1$  aangehouden. De tonglengte wordt hiermede te lang berekend.



# Berekening oprukkende tong.

Berekening met  $V_t = \bar{V}_1$  ( $V_t =$  tong snelheid)  
als parameter.  $F_r' = V_t / \sqrt{g'h}$ .

De benoulti termen worden  $V_{versch.}^2 - V_t^2$ .

$$V_2 \text{ volgt uit } V_t \frac{F_1}{F_2} = \bar{V}_2 \frac{F_2}{F_1} \quad \text{en } \bar{V}_V = V_t + \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_V = V_t + V_t \frac{F_1}{F_2} = 1,192 V_t$$

$$F_1 = 22,5 \text{ m}^2 \quad F_2 = 117,5 \text{ m}^2$$

$$h_1 = 2 \text{ m} \quad h_2 = 3,5 \text{ m}$$

$$\bar{V}_V^2 - V_t^2 = 0,42 V_t^2$$

$$V_2 = 0,192 V_t$$

$$L_0 = \frac{1}{8} \rho \bar{V}_V^2 \frac{h_2 b}{F_2} \lambda_i + \frac{1}{8} \frac{h_2^2}{F_2} \rho V_2^2 \lambda_w$$

$$L_b = \frac{1}{8} \lambda_i \rho \bar{V}_V^2 + \frac{1}{8} \lambda_b \rho \bar{V}_1^2$$

$\lambda_b$  volgt, met waarde 4 cm, hydr. straal 0,5 m,

$$\text{mit } \lambda_b = 8g/c^2 \quad c = 18 \log 12 R/k \rightarrow \lambda_b = 0,05$$

vergel. (1) wordt:

$$L = \frac{0,222 g h_0^2 - 0,21 V_t^2}{V_t^2 \left( \frac{0,127}{h_2} \lambda_i + \frac{0,00193}{h_2} \lambda_w + \frac{0,170}{h_1} \lambda_i + \frac{0,125}{h_1} \lambda_b \right)}$$

$\lambda_w$  heeft geen invloed.

$$L = \frac{0,222 / F_r'^2 - 0,21}{0,1253 \lambda_i + 0,0625 \lambda_b} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$V_t$ cm/sec	$\Delta p/p$	$F_r$ ( $V_t$ ) ( $h$ )	$Re$ ( $V_t$ ) ( $h$ )	$F_{rander}$ ( $\bar{V}_v$ ) ( $h_1$ )	$Re$ ( $V_v$ ) ( $h_2$ )	$\lambda_i$	$L$ m
2	1%	0,094	$0,6 \cdot 10^5$	0,238	$0,16 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	6900
5		0,235	$1,5 \cdot 10^5$	0,595	$0,4 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^{-3}$	980
10		0,47	$3 \cdot 10^5$	1,19	$0,8 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-2}$	116
2	2%	0,0666	$0,6 \cdot 10^5$	0,167	$0,16 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-3}$	14600
5		0,166	$1,5 \cdot 10^5$	0,42	$0,4 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	2220
10		0,333	$3 \cdot 10^5$	0,835	$0,8 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-2}$	320
2	4%	0,047	$0,6 \cdot 10^5$	0,119	$0,16 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	29000
5		0,118	$1,5 \cdot 10^5$	0,298	$0,4 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	4650
10		0,235	$3 \cdot 10^5$	0,595	$0,8 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3}$	1020
15		0,353	$4,5 \cdot 10^5$	0,895	$1,2 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	280
2	8%	0,033	$0,6 \cdot 10^5$	0,088	$0,16 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	62000
5		0,0833	$1,5 \cdot 10^5$	0,223	$0,4 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	9600
10		0,166	$3 \cdot 10^5$	0,441	$0,8 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	2260
15		0,25	$4,5 \cdot 10^5$	0,632	$1,2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3}$	890
1	8%	0,0165	$0,3 \cdot 10^5$	0,044	$0,08 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3}$	216000
1,5		0,0247	$0,45 \cdot 10^5$	0,064	$0,12 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-3}$	103000

De oprukkende tong moet evenwicht maken met de teruggedrongen tong bij spelen. Omdat  $1/3$  van de tijd gespeuld wordt is  $V_{tt} = 2 \cdot V_t$ . Ook  $Re$  en  $F_r$  betrekken op  $V_{tt}$  zijn dus  $2 \times$  die betrekken zijn op  $V_t$ .

Berekening teruggedrongen tong.

Om tong met  $V_{tt}$  terug te laten trekken is een gemiddelde speelsnelheid  $\alpha/F$  nodig van  $\alpha \cdot V_{tt}$ . Voor verschillende  $\alpha$  waarden kan  $L$  berekend worden als  $f(F_r \text{ en } Re)$ .

Na proberen blijkt dat  $\alpha$  tussen 2 en 3 ligt.

Aangezien bij  $\alpha = 2$  de Bernoulli term zo groot is dat deze overheerst over  $\frac{1}{2} h_1^2 \cdot \rho g$ , of dat  $\lambda_i$  zo klein is dat de bodemwrijving zodanig domineert dat de noemer in (1) negatief wordt, zijn de berekeningen uitgewoerd voor  $\alpha = 2, 3, 2,5$  en 3

De Bernoulli term wordt  $V_V^2 - (V_{sp} - V_{tt})^2$ .

$$V_{sp} = \alpha \cdot V_{tt}$$

$$\bar{V}_V = (V_{sp} - V_{tt}) \cdot \frac{\bar{F}_0}{\bar{F}_2}$$

$$\bar{h}_0 = 140 \text{ m}^2 \quad \bar{F}_2 = 117,5 \text{ m}^2$$

$$h_1 = 2 \text{ m} \quad h_2 = 3,5 \text{ m}$$

$$g'h_1 = 0,444 g'h$$

$$\bar{V}_V = (\alpha - 1) \cdot 1,192 \cdot V_{tt}$$

$$\bar{V}_2 = V_{tt} + V_V = (1,192 \alpha - 0,192) V_{tt}$$

$$\bar{V}_1 = V_{tt}$$

$$\begin{aligned} V_V^2 - (V_{sp} - V_{tt})^2 &= V_{tt}^2 \left( 1,192^2 (\alpha - 1)^2 - (\alpha - 1)^2 \right) = \\ &= V_{tt}^2 (\alpha - 1)^2 \cdot 0,42 \end{aligned}$$

$$E_0 = \frac{1}{8} \rho \bar{V}_V^2 \frac{h_2 \bar{b}}{\bar{F}_2} \lambda_i + \frac{1}{8} \rho \bar{V}_2^2 \cdot \frac{4 h_2^2}{\bar{F}_2} \lambda_w$$

$$T_b = \frac{1}{8} \rho \bar{V}_V^2 \cdot \lambda_i - \frac{1}{8} \rho V_{tt}^2 \cdot \lambda_b$$

$$Fr' = V_{tt} / \sqrt{g'h}$$

$\alpha = 2,3$

$V_v = 1,55 V_{tt}$

$V_2 = 2,55 V_{tt}$

$\bar{V}_v^2 - (V_{sp} - V_{tt})^2 = 0,71 V_{tt}^2$

Vergelyking (1) wordt:

$L = \frac{0,222 g' h \frac{1}{2} - 0,355 V_{tt}^2}{V_{tt}^2 \left( \frac{0,214}{h_2} \lambda_i + \frac{0,34}{h_2} \lambda_w + \frac{0,3}{h_1} \lambda_i - \frac{0,125}{h_1} \lambda_b \right)}$

$L = \frac{0,222 / Fr^2 - 0,355}{0,211 \lambda_i + 0,097 \lambda_w - 0,0625 \lambda_b} \dots (4)$

$Fr$ ( $V_{tt}$ ) (h)	$Re$ ( $V_{tt}$ ) (h)	$Fr_{onder}$ ( $V_v$ ) ( $h_1$ )	$Re$ ( $V_v$ ) ( $h_2$ )	$\lambda_i$	L
0,2	0,6 $\cdot 10^5$	0,66	0,73 $\cdot 10^5$	7,5 $\cdot 10^{-3}$	12600
	3 "		3,6 $\cdot 10^5$	7,2 "	15300
	6 "		7,3 $\cdot 10^5$	7,0 "	17300
0,3	0,6 "	0,99	0,73 $\cdot 10^5$	30 $\cdot 10^{-3}$	405
	3 "		3,6 $\cdot 10^5$	30 "	"
	6 "		7,3 $\cdot 10^5$	30 "	"
0,4	0,6 "	1,32	0,73 $\cdot 10^5$	30 "	200
	3 "		3,6 $\cdot 10^5$	30 "	"
	6 "		7,3 $\cdot 10^5$	30 "	"

$\alpha = 2,5$

$\bar{V}_v = 1,79 V_{tt}$

$V_2 = 2,79 V_{tt}$

$\bar{V}_v^2 - (V_{sp} - V_{tt})^2 = 0,95 V_{tt}^2$

$L = \frac{0,222 g' h - 0,475 V_{tt}^2}{V_{tt}^2 \left( 0,206 \lambda_i + \frac{0,466}{h_2} \lambda_w + 0,4 \lambda_i - \frac{0,125}{h_1} \lambda_b \right)}$

$L = \frac{0,222 / Fr^2 - 0,475}{0,206 \lambda_i + \frac{0,466}{h_2} \lambda_w + 0,4 \lambda_i - \frac{0,125}{h_1} \lambda_b}$

$$L = \frac{0,222 / Fr^2 - 0,475}{0,282 \lambda_i + 0,133 \lambda_w - 0,0625 \lambda_b} \quad \text{--- --- --- (5)}$$

$Fr'$ ( $V_{tt}$ ) (h)	$Re$ ( $V_{tt}$ ) (h)	$Re$ ( $V_v$ ) ( $h_2$ )	$Fr_{onder}$ ( $V_v$ ) ( $h_1$ )	$\lambda_i$	L m
0,08	0,6 · 10 <sup>5</sup> 3 · " 6 · "	0,85 · 10 <sup>5</sup> 4,2 · 10 <sup>5</sup> 8,4 · 10 <sup>5</sup>	0,3	1,3 · 10 <sup>-3</sup>	niet te berekenen
0,1	0,6 " 3 " 6 "	0,85 " 4,2 " 8,4 "	0,38	2,1 · 10 <sup>-3</sup> 1,75 · 10 <sup>-3</sup> 1,6 · 10 <sup>-3</sup>	16100 73000 ↳
0,2	0,6 " 3 " 6 "	0,85 " 4,2 " 8,4 "	0,76	11 · 10 <sup>-3</sup> 11 " 11 "	1930 " "
0,4	0,6 " 3 " 6 "	0,85 " 4,2 " 8,4 "	1,52	30 · 10 <sup>-3</sup> " "	114 " "
0,6	0,6 " 3 " 6 "	0,85 " 4,2 " 8,4 "	2,28	" " "	10 " "

$$\alpha = 3$$

$$V_v = 2,384 V_{tt}$$

$$V_2 = 3,384 V_{tt}$$

$$\bar{V}_v^2 - (V_{sp} - V_{tt})^2 = 1,7 V_{tt}^2$$

$$L = \frac{0,222 g' h - 0,85 V_{tt}^2}{V_{tt}^2 \left( \frac{0,51}{h_2} \lambda_i + \frac{0,6}{h_2} \lambda_w + \frac{0,71}{h_1} \lambda_i - \frac{0,125}{h_1} \lambda_b \right)}$$

$$V_{tt}^2 \left( \frac{0,51}{h_2} \lambda_i + \frac{0,6}{h_2} \lambda_w + \frac{0,71}{h_1} \lambda_i - \frac{0,125}{h_1} \lambda_b \right)$$

ofwel

$$L = \frac{0,222 / Fr^2 - 0,85}{0,5 \lambda_i + 0,171 \lambda_w - 0,0625 \lambda_b} \quad \text{--- --- --- (6)}$$

$$0,5 \lambda_i + 0,171 \lambda_w - 0,0625 \lambda_b$$

$V_{tt}$	$\Delta p/p$	$Fr$ ( $V_{tt}$ ) (h)	$Re$ ( $V_{tt}$ ) (h)	$Fr_{onder}$ ( $\bar{v}_v$ ) ( $h_1$ )	$Re$ ( $\bar{v}_v$ ) ( $h_2$ )	$\lambda_i$	$L$ m
2	1%	0,094	$0,6 \cdot 10^5$	0,475	$1,12 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	14700
5		0,235	1,5 "	1,19	2,8 "	$3 \cdot 10^{-2}$	206
10		0,47	3 "	2,38	5,6 "	$3 \cdot 10^{-2}$	9,8
2	2%	0,066	0,6 "	0,338	1,1 "	$2,2 \cdot 10^{-3}$	35000
5		0,166	1,5 "	0,84	2,8 "	$1,7 \cdot 10^{-2}$	815
10		0,333	3 "	1,69	5,6 "	$3 \cdot 10^{-2}$	75
2	4%	0,047	0,6 "	0,238	1,1 "	$0,85 \cdot 10^{-3}$	137000
5		0,118	1,5 "	0,597	2,8 "	$5 \cdot 10^{-3}$	5406
10		0,235	3 "	1,19	5,6 "	$3 \cdot 10^{-2}$	206
15		0,353	4,5 "	1,78	8,4 "	$3 \cdot 10^{-2}$	61
5	8%	0,0833	1,5 "	0,422	2,8 "	$1,75 \cdot 10^{-3}$	26500
10		0,166	3 "	0,84	5,6 "	$1,7 \cdot 10^{-2}$	815
20		0,333	6 "	1,69	11,2 "	$3 \cdot 10^{-2}$	75

In fig A zijn de snijpunten <sup>(of geschat)</sup> bepaald van de lijn met de oprukkende tong ( $Fr = 2 Fr_{tong}$ ) met de lijn voor de teruggedrongen tong.

De snijpunten geven voor bepaalde waarden van  $Fr$  en  $Re$  (betrokken op  $V_{tt}$ ) de lengte waarbij dynamisch evenwicht bestaat.

We betrekken  $Fr$  en  $Re$  op de gemiddelde spuisnelheid  $V_{sp} = \frac{1}{3} V_{sp} = \frac{\alpha}{3} V_{tt}$ . Dus

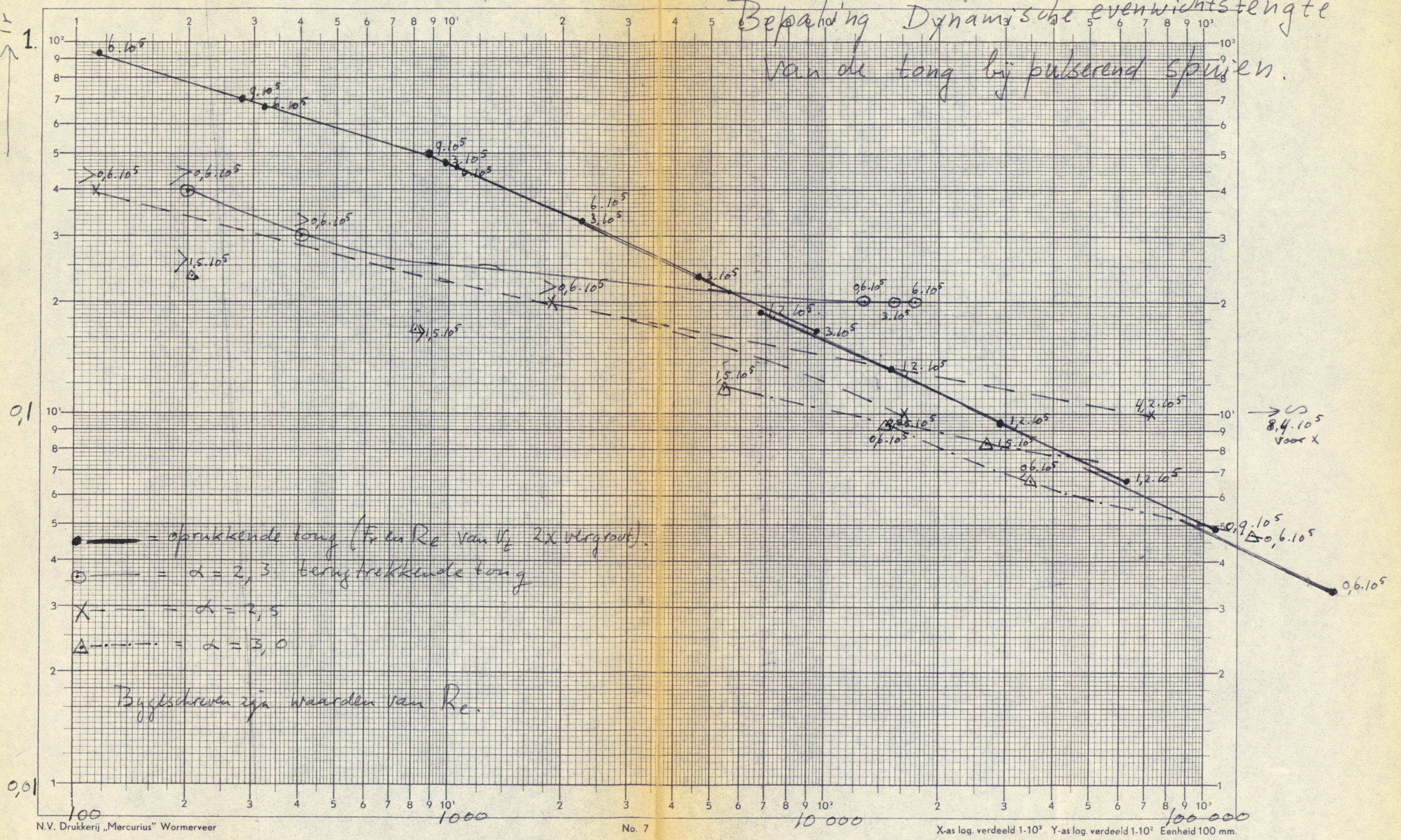
de  $F_r$  en de  $R_e$  voor pulserend spinnen  
 =  $F_{r\text{puls}}$  en  $R_{e\text{puls}}$  zijn de waarden betrekke  
 op  $V_{tt}$  maal  $\alpha/3$ .

	$F_{r_{tt}}$	$R_{e_{tt}}$	$L_m$	$F_{r\text{puls}}$	$R_{e\text{puls}}$
$\alpha = 2,3$	0,22	$> 0,6 \cdot 10^5$	5600	0,17	$> 0,45 \cdot 10^5$
$\alpha = 2,5$	0,14	$3 \cdot 10^5$	14000	0,115	$2,5 \cdot 10^5$
	0,125	$1,2 \cdot 10^5$	14000	0,1	$1,0 \cdot 10^5$
$\alpha = 3$	0,056	$0,6 \cdot 10^5$	76000	0,056	$0,6 \cdot 10^5$
	0,075	$1,2 \cdot 10^5$	48000	0,075	$1,2 \cdot 10^5$
	0,08	$1,5 \text{ en } 3 \cdot 10^5$	44000	0,08	$> 1,5 \cdot 10^5$

Fig A.

Bepaling Dynamische evenwichtstengte van de tong bij pulserend spuien.

$F_r = V_{et} / \sqrt{g \cdot h}$



Bygeschreven zijn waarden van  $Re$ .

→ L in m.