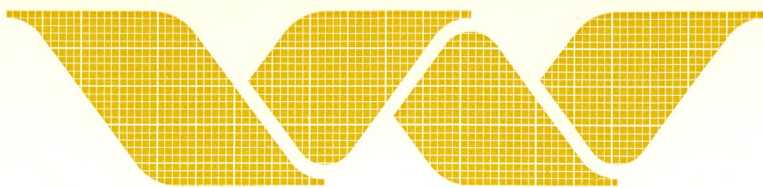


WI: 793500

R322

Nr. 050



waterloopkundig laboratorium

onderzoek naar zout - zoet
waterstromingen ten behoeve van
maatregelen voor de zoutwaterbestrijding
met behulp van stromingsmodellen

bijdrage hydrologische dag

P.A. Kolkman

mei 1974

onderzoek naar zout -zoet
waterstromingen ten behoeve van
maatregelen voor de zoutwaterbestrijding
met behulp van stromingsmodellen

bijdrage hydrologische dag

P.A. Kolkman

mei 1974

Inleiding

Physische modellen worden gebruikt wanneer de wetmatigheden die de toestand in de werkelijkheid bepalen bekend zijn en dan met bekende schaalomrekeningsfactoren in relatie staan met verschijnselen die zich in het model afspelen. Deze modellen komen vooral dan in aanmerking als de randcondities in een model relatief eenvoudig zijn te realiseren; voor stroming zijn deze condities bijvoorbeeld de configuratie van rivier-, kust- en kanaalprofielen, de getijbeweging, de rivierafvoer, etc. De grootheden binnen het modelgebied kunnen dan via meting bepaald worden. Het blijkt, dat voor het weergeven van stromingsverschijnselen de stromingsmodellen (hydraulische modellen) vaak het meest geëigend zijn, hoewel ook hier beperkingen liggen. Omdat in het model gestroomd wordt met water, moet men er zich altijd rekenschap van geven dat bijvoorbeeld de invloed van de viscositeit van het water in model te sterk kan gaan overheersen; voor sommige gevallen geeft de te grote oppervlakte-spanning een beperking.

Het blijkt dat de schaalomrekeningsfactoren die gehanteerd worden bij de reproductie van vrije oppervlactestroming ook hun geldigheid behouden als stroming van twee media met verschillende dichtheid gereproduceerd moet worden. Zowel de gelaagde stroming als de mengverschijnselen vallen hieronder; wel is het zo dat het snelheidsverschil tussen de lagen vaak een orde kleiner is dan de snelheid ten opzichte van de aarde, en daardoor is de invloed van de viscositeit eerder merkbaar.

In sommige gevallen, als het de reproductie van een groot gebied met traag variërende gelaagdheid of menging betreft, kan een model toegepast worden dat horizontaal is ingekrompen ten opzichte van de gekozen verticale schaal; hierin kan enige compensatie gevonden worden voor de te grote viscositeitsinvloed in het model.

Dat de modeltechniek een arsenaal van toepassingen heeft zal in het volgende getoond worden aan de hand van voorbeelden. Deze betreffen zowel studies met betrekking tot de voorspelling van stroombeelden en zoutbinnendringing in havengebieden en estuaria, als onderzoeken waarbij technische middelen

bekeken worden die dienen om de zoutpenetratie bij kunstwerken zoveel mogelijk tegen te gaan.

Zonder dat hierop verder wordt ingegaan zij vermeld dat dezelfde schaalregels gelden voor de dichtheidsverschillen tussen vloeistoffen die door zout en zoet water of door verontreiniging of temperatuurverschillen zijn ontstaan; ook luchtstromingen als tocht, of rookafvoer in lucht met thermische stratificatie kunnen niet alleen in luchtmodellen maar vaak zelfs nog beter in watermodellen worden onderzocht.

Een gebied waar we hier ook niet op in zullen gaan zijn de stromingen van zout en zoet water in poreuze media. De stromingsverschijnselen kunnen soms goed in modellen worden bekeken, echter omdat de tijdsduur bij deze processen veel langer is zal de moleculaire diffusie naar verhouding een belangrijker rol kunnen spelen. Dit kan niet direct in een model worden ingebracht, wel is het vaak voldoende de meetresultaten hierop rekenkundig te corrigeren.

De toe te passen schaalregels

De schaalregels zullen gedemonstreerd worden aan de hand van een aantal voorbeelden. Bij de afleiding van schaalregels wordt aangenomen dat het stroombeeld in model volledig conform wordt afgebeeld, en wordt nagegaan wat de voorwaarden voor de snelheidsschaal en de tijdschaal zijn waarbij ook alle drukken en schuifspanningen in de vloeistof een éénduidige afbeelding geven van de werkelijke waarden.

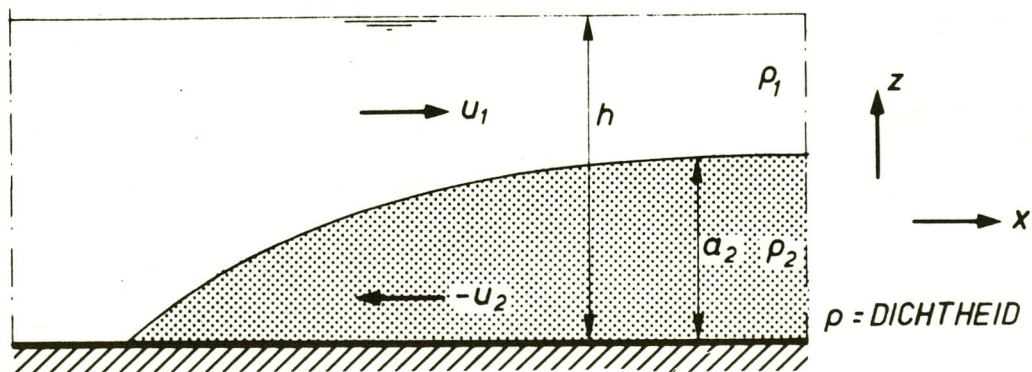


FIG.1 SCHEMA TWEELAGENSTROMING

A. Gelaagde stroming, met als kenmerk kleine verticale versnellingen en dus bij benadering een hydrostatische drukverdeling; ideaal geval zonder wrijving. De versnelling van een waterdeeltje in de bovenlaag is te schrijven als

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \quad (1)$$

Wil een soortgelijke toestand ook in model afgebeeld worden dan stellen we ons voor dat alle factoren u_1 , u_2 , t (tijd) die in model voorkomen in het model een waarde n_{u_1} , n_{u_2} , n_t maal zo groot zijn (het blijkt dat als $n_x = n_z =$ lengteschaal van bijvoorbeeld 1 : 10 of 1 : 100, n_u en n_t ook $\ll 1$ zijn). Aan de versnelling gekoppeld is een drukverloop in x -richting dat deze versnelling veroorzaakt.

$$- \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_1 = - \rho_1 g \frac{\partial h}{\partial x} = \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho_1 u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \quad (2)$$

Wil aan deze vergelijking (2) in model ook voldaan worden dan moet gelden (h wordt met dezelfde schaal als alle factoren in z -richting verkleind):

$$n_{\rho_1} n_g \frac{n_z}{n_x} = n_{\rho_1} \frac{n_{u_1}}{n_t} = n_{\rho_1} \frac{n_{u_1}^2}{n_x} \quad (3)$$

n_{ρ_1} doet er niet toe, maar verder geldt dus:

$$n_t = n_x / n_{u_1} \quad (4)$$

$$n_{u_1} = \sqrt{n_g \cdot n_z} \quad (5)$$

We kunnen (5) ook anders schrijven namelijk

$$n \left(\frac{u_1}{\sqrt{gh}} \right) = n_{F_r} = 1 \text{ ofwel}$$

het (extern) Froude-getal moet in model gelijk zijn aan dat in het prototype ($F_r = u/\sqrt{gh}$).

Nu gaan we de beschouwing voortzetten voor de onderlaag:

$$- \left(\frac{dp}{dx} \right)_2 = - \rho_1 g \frac{dh}{dx} - (\rho_2 - \rho_1) g \frac{da_2}{dx} = \rho_2 \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho_2 u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad (6)$$

Het blijkt nu dat alle drukgradiënten en de daaraan gekoppelde versnellings- termen ook in model dezelfde relatie tot elkaar behouden als:

$$n_{\rho_1} = n_{\rho_2} \quad (7)$$

$$n_{u_2} = \sqrt{n_g \cdot h_2} \quad (8)$$

(8) en (5) geven dus dezelfde snelheidsschaal voor de stroming in de boven- en in de onderlaag.

Ook de tijdschaal volgens (4) blijft gelden.

In wezen hebben we nog geen gebruik gemaakt van een lengteschaal van het model, maar zijn n_x en n_z onafhankelijk van elkaar te kiezen. De snelheids- schaal zit alleen gekoppeld aan de hoogteschaal, en de tijdschaal volgt uit de verhouding tussen de horizontale lengteschaal en de snelheidsschaal. Toch betekent dit niet dat we zomaar een samengetrokken model mogen maken, gezien de aanname dat er in de vloeistof een hydrostatische drukverdeling heerst. Dit betekent dat een samengetrokken model alleen mag worden toege- past onder voorwaarde dat de verticale versnellingen klein zijn, hetgeen in de praktijk ook betekent dat de verticale snelheden klein moeten zijn. Sprongen in de bodem mogen dan niet voorkomen, terwijl in een samengetrokken model alle neren met horizontale as (ook bv. de spiraalstroom die in bochten ontstaat) niet juist worden weergegeven.

- B. Gelaagde stroming met invloed van schuifspanningen langs de bodem en op het grensvlak.

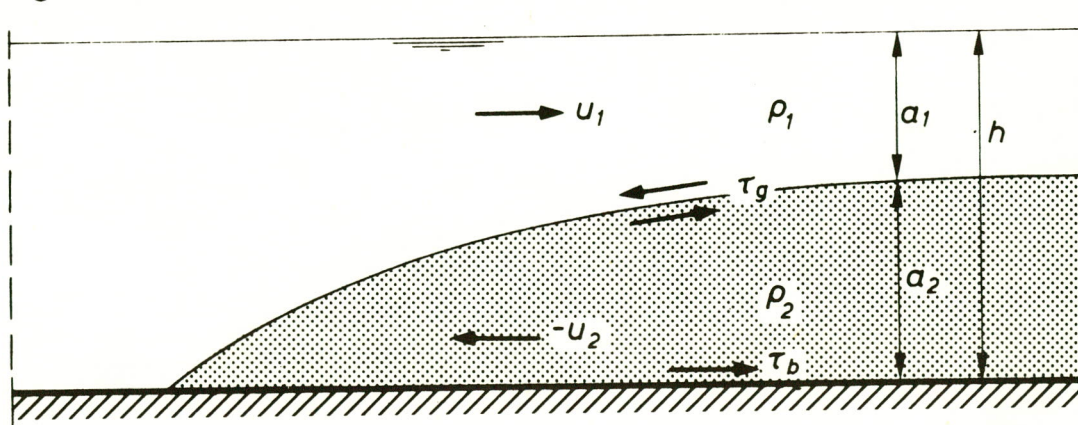


FIG. 2 SCHEMA TWEELAGENSTROMING MET WRJVING

Vergelijking (2) gaat nu over in:

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_1 - \frac{\tau}{a_1} = \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho_1 u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \quad (9)$$

Willen de krachtverhoudingen in model en prototype met elkaar overeenkomen dan moet weer gelden $n_p = n_{\tau g} \cdot \frac{n_z}{n_x}$ en dus

$$n_{\tau g} = n_p \cdot \frac{n_z}{n_x} = n_{\rho_1} n_{u_1}^2 \frac{n_z}{n_x} \quad (10)$$

Als ook de vergelijking voor de onderlaag wordt bekeken dan blijkt deze schaal ook voor de schuifspanning op de bodem te moeten gelden.

Bij stroming met verwaarloosbare viscositeit zijn de bodemruwheid en de golvingen en turbulentie bij het grensvlak bepalend voor τ ; de schuifspanningen zijn dan evenredig met het kwadraat van de snelheid (of verschilsnelheid).

$$\tau = \lambda \cdot \rho \cdot u^2 \text{ en dus } n_{\tau} = n_{\lambda} \cdot n_u^2 \cdot n_{\rho} \quad (11)$$

Is het model niet samengetrokken, dat wil zeggen $n_x = n_z$ en is de viscositeit te verwaarlozen, dan blijkt de λ in het model even groot als in prototype te zijn, en volgt uit (11) dat dan aan (10) wordt voldaan.

Is de viskeuze invloed in het model te groot, dan is in het algemeen n_{λ} groter dan één.

Bij een vertrokken model wordt als voorwaarde voor λ gevonden (vgl. (10) en (11)):

$$n_{\lambda} = \frac{n_z}{n_x} \quad (12)$$

Gebruikelijk is het om bij samengetrokken modellen extra bodemruwheid aan te brengen. Ook worden wel weerstandsstaafjes toegepast die zowel de onderlaag als de bovenlaagstroming beïnvloeden. De benodigde extra ruwheid is bovendien een middel tot empirische correctie van het model daar waar, door de samentrekking of door een bodemligging die tussentijds in prototype is gewijzigd, blijkt dat een in de natuur gemeten stromingstoestand zich in het model niet geheel reproduceert. Ook kan een λ die in het model door de

viscositeitsinvloed fout is enigszins gecorrigeerd worden; het voordeel van een samengetrokken model is dat de λ ook verkleind kan worden hetgeen bij een niet-samengetrokken model meestal niet meer mogelijk is.

C. Strooming met belangrijke verticale snelheden.

Indien een stroombeeld niet meer bij benadering gelaagd is dan is af te leiden uit de ruimtelijke bewegingsvergelijking dat, voorzover de viscositeit niet een belangrijke invloed heeft, dit stroombeeld in een model is af te beelden. De snelheidsschaal volgt weer uit de conditie aan het vrije oppervlak, namelijk

$$n_u = \sqrt{n_g n_z} = \sqrt{n_g n_x} \quad \text{en verder moet weer gelden}$$

$$n_{\rho_1} = n_{\rho_2} = 1$$

Dat bij strooming met belangrijke verticale snelheden de vertrekking een fout resultaat geeft blijkt uit de onderstaande figuur.

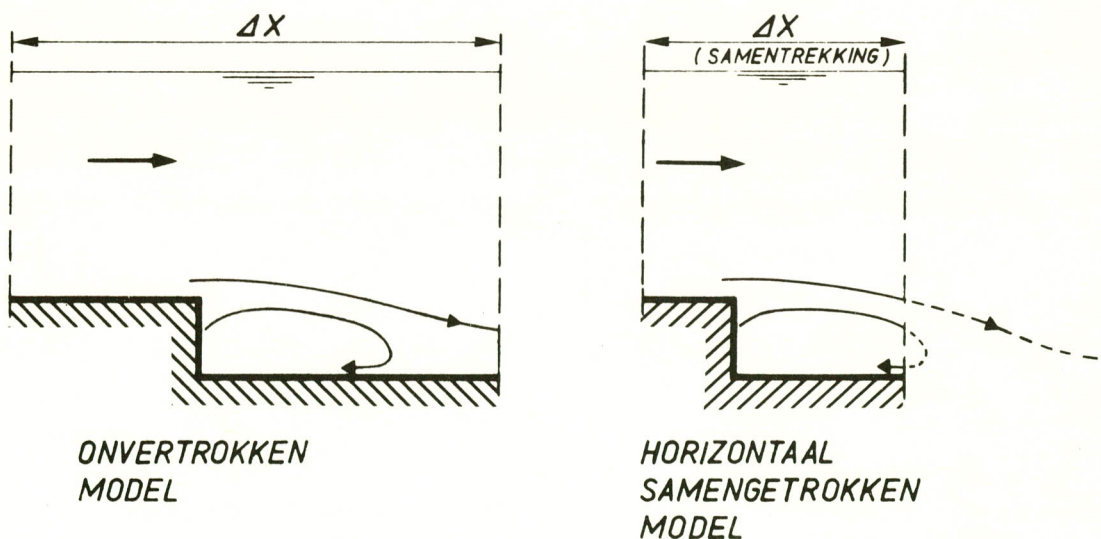


FIG. 3 STROMING BIJ SPRONG IN DE BODEM ; MODEL MET EN ZONDER SAMENTREKKING

Aangezien beide modellen identiek zijn zal het stroombeeld zich van de samentrekking niets aantrekken.

D. Stroming waarbij verstoring in het vrije wateroppervlak geen rol speelt.

In vrij veel gevallen blijken de verstoringen in het vrije wateroppervlak slechts een kleine invloed op het stroombeeld te hebben, in dat geval heeft niet voldaan te worden aan de bij (3) gebruikte voorwaarde dat deze verstoringen op de hoogteschaal van het model gereproduceerd behoeven te worden. Dit geldt ook voor stromingen in een gesloten riool.

Voor het reeds behandelde geval van de tweelagen stroming kunnen we dit illustreren aan vergelijking (2) en (6); deze kunnen nu geschreven worden als Bovenlaag:

$$- \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_1 = \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho_1 u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x}$$

Onderlaag:

$$- \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_2 = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_1 - (\rho_2 - \rho_1) g \frac{\partial a_2}{\partial x} = \rho_2 \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho_2 u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} .$$

Wordt nu verder verondersteld dat $\rho_2 - \rho_1 = \Delta\rho$ klein is ten opzichte van ρ_1 en ρ_2 dan volgt alleen de volgende voorwaarde voor de snelheidsschaal

$$n_{u_1}^2 = n_{u_2}^2 = \frac{n_{\Delta\rho}}{n_{\rho}} \cdot n_g \cdot n_z \quad (13)$$

terwijl niet meer voldaan hoeft te worden aan $n_u = \sqrt{n_g \cdot n_z}$ en $n_{\rho_1} = n_{\rho_2}$. Dit kunnen we ook anders schrijven

$$n \left(\frac{u}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}} \right) = n_{F_i} = 1 \quad \text{ofwel:} \quad (14)$$

het interne Froude-getal $F_i = u / \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}$ moet in model dezelfde waarde hebben als in prototype.

Dit interne Froude-getal is van erg groot belang omdat vele verschijnselen die te maken hebben met bijvoorbeeld selectieve wateronttrekking uit de boven- of de onderlaag of met mengingsverschijnselen, uitgedrukt kunnen worden in dimensieloze parameters waarbij het interne Froude-getal de enige hydrodynamische parameter blijkt te zijn (de andere zijn geometrisch).

Voorbeeld: snelheid en concentratie in het hart van een zoutwaterstraal die in zoet water spuit (concentratie zout bij de mond = c_0 , snelheid bij de mond v_0 , diameter van de mond D , afstand tot de mond x):

$$\frac{c}{c_0} = f_1\left(\frac{x}{D}, \frac{v_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot D}}\right) = f_1\left(\frac{x}{D}, F_{\text{intern}}\right)$$

$$\frac{v}{v_0} = f_2\left(\frac{x}{D}, \frac{v_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot D}}\right) = f_2\left(\frac{x}{D}, F_{\text{intern}}\right)$$

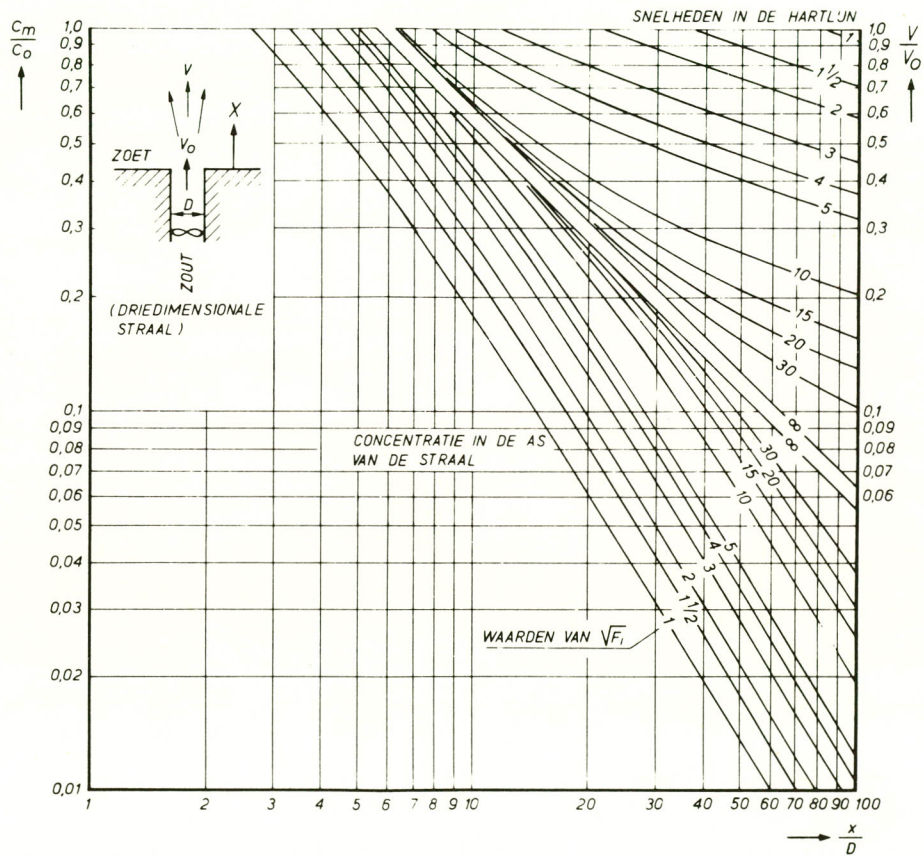


FIG. 4 SNELHEID EN CONCENTRATIE IN DE AS VAN EEN OMHOOGGERICHTE ZOUTWATERSTRAAL IN EEN ZOETWATEROMGEVING

E. Invloed van de viscositeit in een samengetrokken model.

Hoe klein een model gemaakt mag worden hangt af van de invloed van de viskeuze krachten die een vloeistofdeeltje ondervindt, in model mogen die bijvoorbeeld niet gaan domineren als dit in werkelijkheid niet ook het geval is. In de vloeistof ontstaan schuifspanningen die door de snelheidsgradiënten in de vloeistof veroorzaakt worden, bijvoorbeeld bij verlopende

Erratum blz. 8

In tegenstelling tot wat is vermeld in de tekst en bij de figuur, heeft fig. 4 betrekking op een straal zoet water die vertikaal omhoog spuit in een zoute omgeving. Gelijke resultaten worden verkregen met een straal zout water die omlaag spuit in een zoete omgeving.

snelheden evenwijdig aan de bodem

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (15)$$

In wezen moeten deze schuifspanningen éénduidig aan de drukken gerelateerd zijn, dus $n_\tau = n_p$. Nu hadden we reeds in (2) gevonden:

$$\frac{n_p}{n_x} = n_{\rho_1} \frac{n_u^2}{n_x} \quad \text{ofwel} \quad n_p = n_{\rho_1} \cdot n_u^2$$

Als we $n_p = n_\tau$ invoeren dan volgt uit (10):

$$n_\mu \cdot \frac{n_u}{n_z} = n_\rho \cdot n_u^2 \quad \text{ofwel} \quad \frac{n_\mu}{n_\rho} = n_u n_x \quad (16)$$

Deze voorwaarde wordt ook wel als volgt geformuleerd voor het geval

$$n_x = n_z = n_L$$

$$n_{Re} = n\left(\frac{u \cdot L}{\mu/\rho}\right) = 1 \quad (17)$$

Het Reynoldsgetal ($R_e = \frac{u \cdot L}{\mu/\rho}$) moet in model gelijk zijn aan prototype.

Hieraan hoeft niet voldaan te worden zolang de viskeuze krachten in het prototype als in model slechts een relatief kleine invloed op de versnelingen van een waterdeeltje hebben, ofwel als het Reynoldsgetal groot genoeg is. Hoe groot de limietwaarde is, is experimenteel voor veelsoortige toestanden beproefd.

De snelheidsschaal die uit (10) volgt is volledig in tegenspraak met wat in (5) is gevonden voor modellen met vrije oppervlaktestroming en wat via (8) nog eens is gevonden bij gelaagde vrije oppervlaktestroming; daarom zijn schaalregels voor stroming met vrij oppervlak of voor gelaagde stroming alleen geldig voor die gevallen waar de invloed van de viscositeit in prototype als in model te verwaarlozen is.

Toegepaste modellen voor rivier- en estuaria-problemen

De getijgoot *)

Deze goot, hoog 0,50 m, breed 0,67 m, en met een variabele lengte tot 100 m wordt bovenstrooms met een permanent zoetwaterdebiet gevoed en mondt uit in een zoutwaterbassin waarin een zuiver periodiek verticaal getij is ingesteld. Deze goot heeft een aantal functies en is te zien als:

- een model waarin door systematisch variëren van getijperiode, getij-amplitude, gootlengte, waterdiepte, bovenwaterafvoer en het dichtheidsverschil tussen zout en zoet water impliciet ook de samentrekking gevarieerd wordt. De invloed van de samentrekking op de mate van zoutbinnendringen, lokale menging etc. kan hiermee bestudeerd worden
- een model dat dient om coëfficiënten te bepalen als toelevering voor een wiskundig model
- een model om de modeltechniek ten aanzien van vertrokken modellen bij toepassing van bodemruwheid, staafjes die tot in de bovenlaag steken en luchtbellen nader te ontwikkelen. Deze middelen beïnvloeden gelijktijdig zowel de weerstand van de stroming als de menging tussen de vloeistoffen
- een zeer schematisch model van de Nieuwe Waterweg.

Uit figuur 6 blijkt dat een model dat in horizontale zin wordt samengetrokken nog nagenoeg gelijke resultaten geeft als een onvertrokken model. De samentrekking komt tot uiting in het verkorten van de goot en het versnellen van de getijperiode waardoor de golflengte van de getijgolf evenredig met de gootlengte wordt verkort.

*) ref.: B.P. Rigter "Minimum Length of Salt Intrusion in Estuaries"
Journ. of the Hydr. Div. A.S.C.E. HY 9 Sept. 1973.

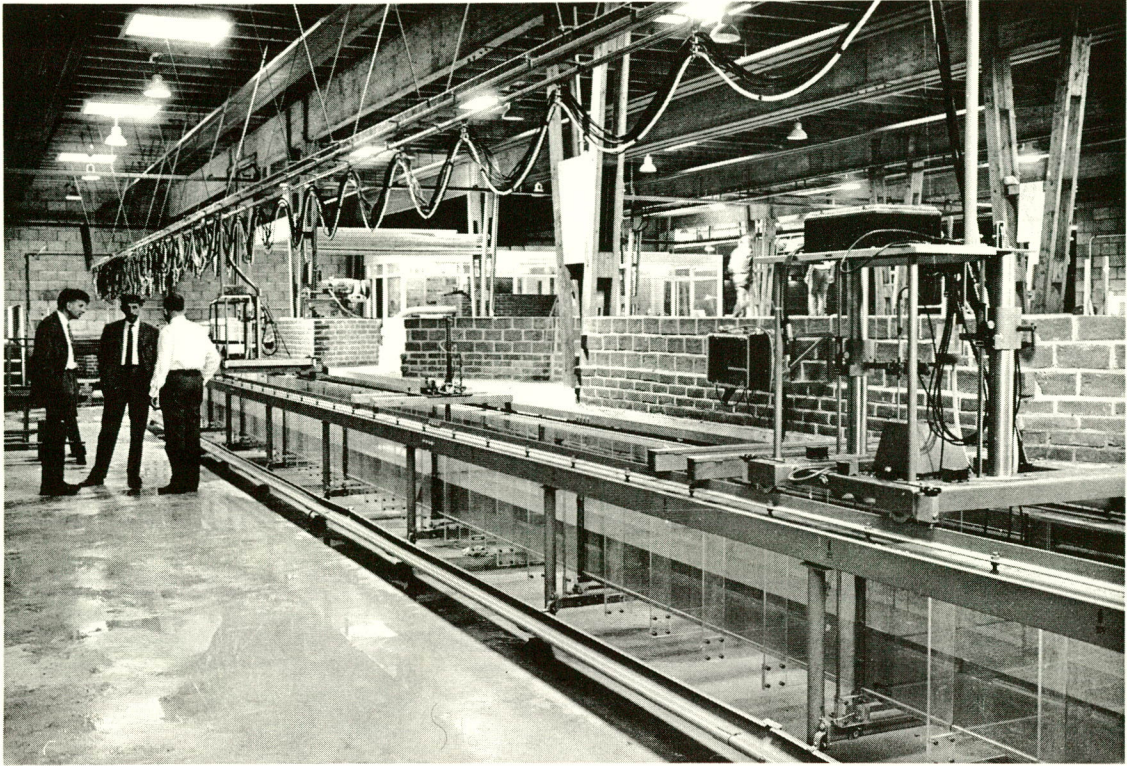


Fig. 5, Overzicht getijgoot

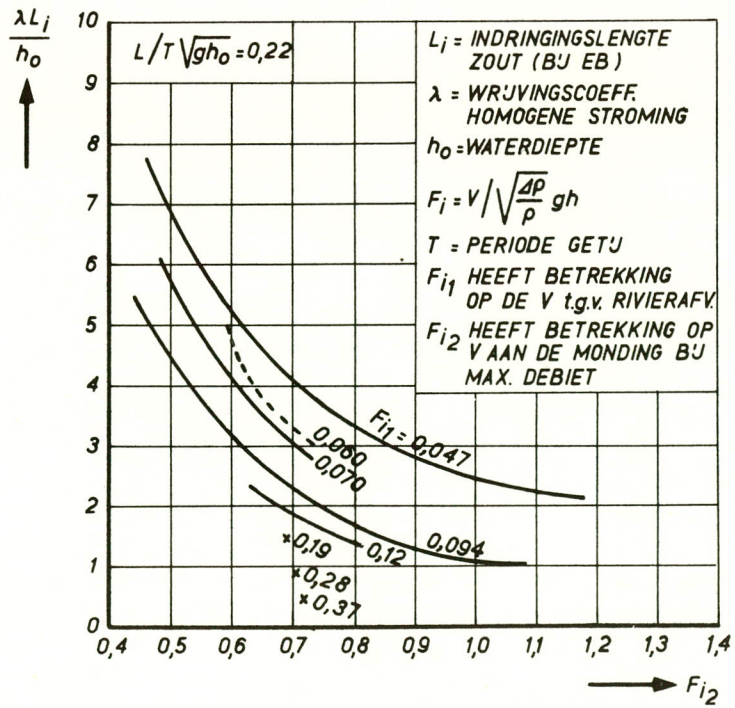


FIG. 6 INDRINGINGSLENGTE ZOUT BEPAALD BJ SYSTEMATISCHE VARIATIE VAN PARAMETERS

Het model benedenrivieren en Europoort *)

Het getijmodel, met reproductie van dichtheidsstromingen, is gebouwd ten behoeve van de scheepvaart in Europoort. Enerzijds moest de uiteindelijke vormgeving zodanig worden vastgesteld dat ook de grote diepstekende tankers en carriers zonder overmatige hinder van stroming en oeverzuiging kunnen binnenvaren, anderzijds moest ook het bouwprogramma zodanig worden opgesteld dat tijdens de bouwfasen de haven niet tijdelijk minder toegankelijk zou worden. Alleen al het te verwachten stroombeeld is een zeer complex verschijnsel: de Nieuwe Waterweg is lang (bijna oneindig), het Calandkanaal is beperkt van lengte waardoor de getijgolf in ongelijke tijd terugkaatst en met de tijd variërende dwarsstromingen ontstaan; bovendien speelt de zoete bovenafvoer van de Nieuwe Waterweg een belangrijke rol, de toestand bij de monding ligt tussen gelaagd en gemengd in, en het zoetere bovenwater zal voor een deel ook het Calandkanaal binnendringen.

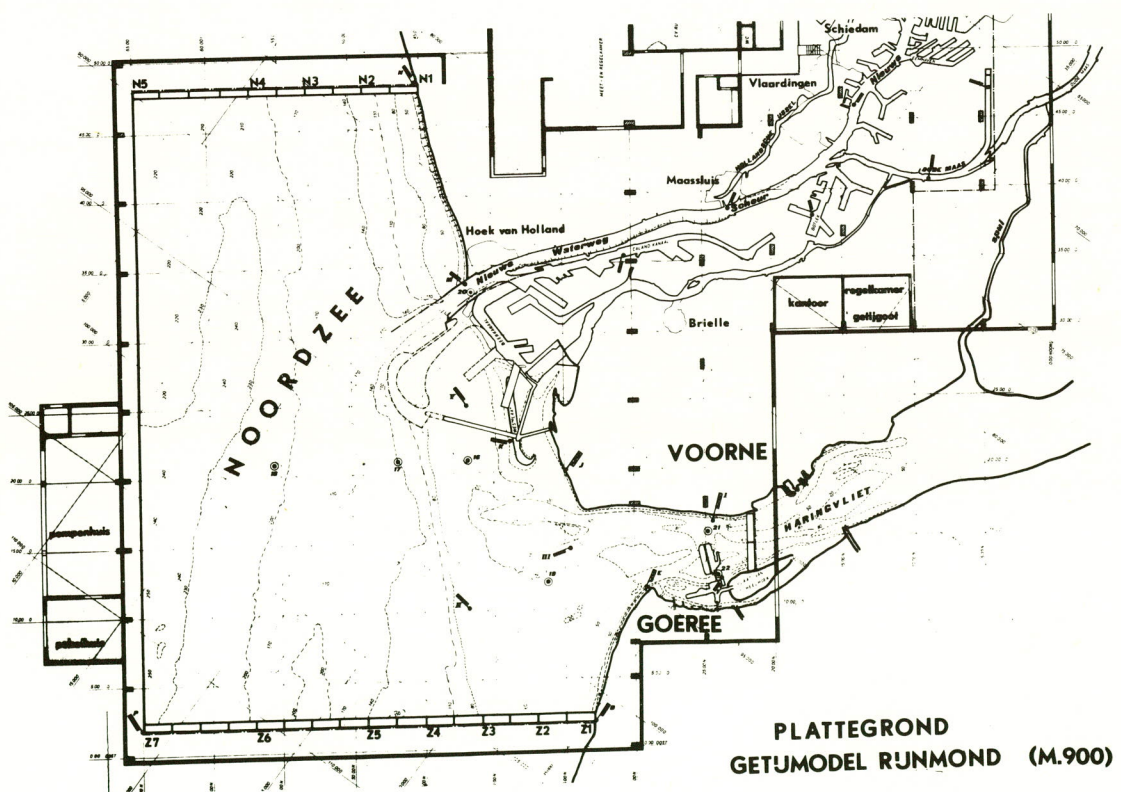


Fig. 7, Het gebied dat gereproduceerd is in model.

*) ref.: A.J. van Rees, P. v.d. Kuur, H.J. Stroband "Experiences with tidal salinity model Europoort", Proc. 13th Coastal Eng. Conf. Vancouver 1972 Vol. III chapter 135.

Figuur 7 geeft het gebied aan dat in een getijmodel met zout zee- en zoet rivierwater gereproduceerd is, met verticale schaal 64 (dus met snelheids-schaal $\sqrt{n_g \cdot n_z} = 8$) en met horizontale schaal 640 (dus met tijdschaal $n_t = n_x/n_v = 80$). Dit is nog niet genoemd, maar ook de sterk verkleinde tijdschaal is een voordeel van vertrokken modellen, hierdoor komt informatie relatief snel beschikbaar. Dit is belangrijk omdat sommige te meten grootheden op een bewerkelijke manier verkregen moeten worden; de lokale afvoer over het getij wordt verkregen door in een dwarsprofiel op vele punten de snelheid te meten, evenzo ligt het met de bepaling van de hoeveelheid zout die binnendringt. Door de gecomprimeerde tijdschaal kunnen op één dag meerdere zich herhalende getijden worden ingesteld zodat per keer slechts een deel van de lokale snelheden of zoutgehalten bepaald hoeven te worden.

De snelheden worden gemeten door foto's met zekere tijdsduur te nemen van drijverbanen; de drijverlengte wordt gevarieerd binnen de diepgangvariatie van de schepen.

Hoewel de opzet van het model zodanig is dat speciaal de problematiek van de havenmond Europoort hierin moest kunnen worden bekeken blijken ook meer land-inwaarts de zout- en stromingstoestand te kunnen worden weergegeven, eigenlijk zelfs beter dan was verwacht naar aanleiding van principe-onderzoek in de getijgoot. Vermoedelijk speelt een belangrijke rol dat door alle havengebieden, kribben, onregelmatig rivierprofiel etc. de stroming veel turbulenter is dan in de getijgoot, waardoor de viscositeit van het water zelfs in model een ondergeschikte rol speelt. Dit alles heeft tot gevolg dat, nu de werkzaamheden rond Europoort ten einde lopen, het model een rol kan blijven vervullen ten behoeve van onderzoek naar de zouttoestand in de rivieren, en de veranderingen die hierin optreden door havenaanleg, aanleg van drempels enz. Een onderzoek dat bijvoorbeeld heeft plaatsgevonden betref de vraag in hoeverre een open verbinding tussen Hartelkanaal en Oude Maas het getij en daarmee samenhangend het binnendringen van het zout beïnvloedt, dit in verband met de drinkwatervoorziening Berenplaat die iets ten zuiden van de aftakking naar het Hartelkanaal met Oude Maas wordt gevoed.

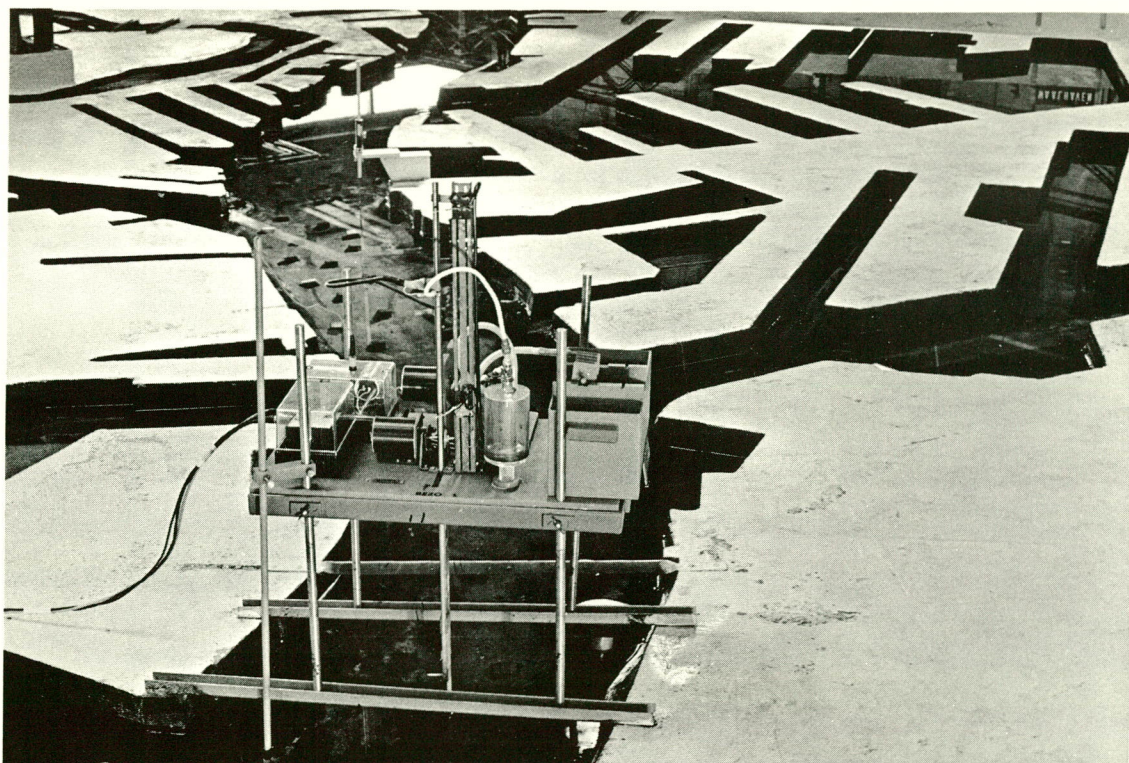


Fig. 8, Havengebied met bewegende zoutopnemer (bepaling zoutvertikaal).

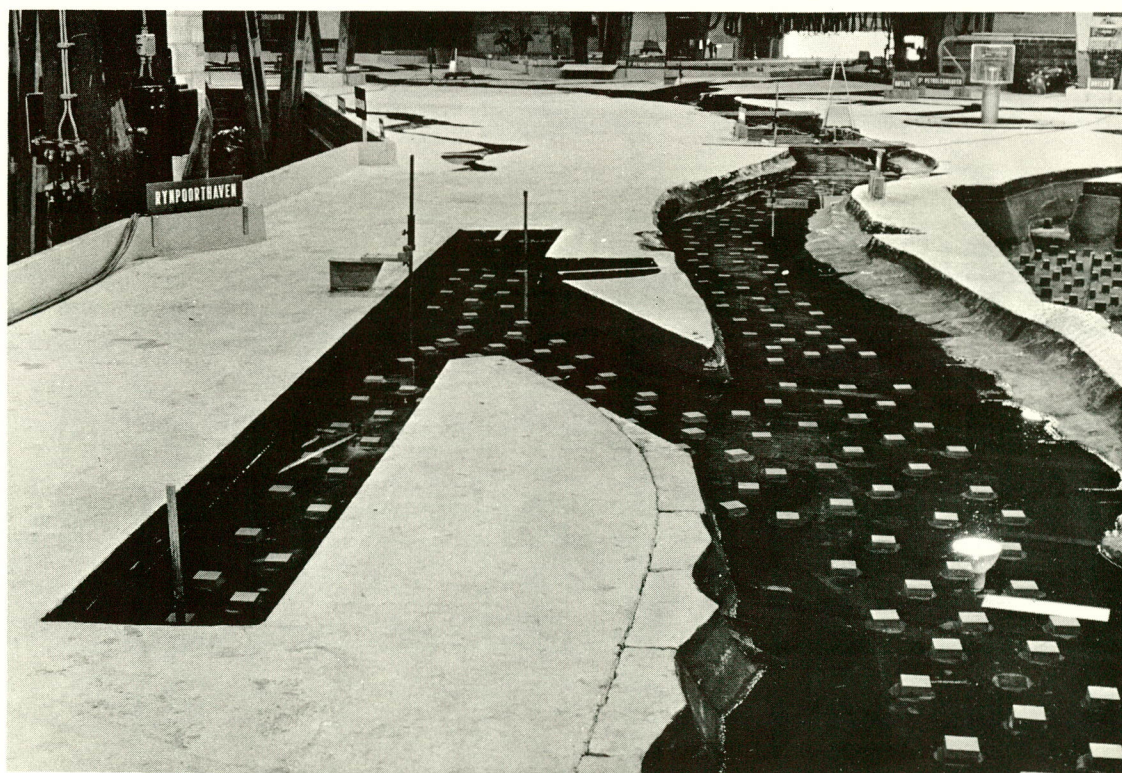


Fig. 9, Blokjes op de bodem voor kunstmatige ruwheid.

Toegepaste modellen ten behoeve van de ontwikkeling van schutsluizen met een laag lekkage van zout water

Een van de voornaamste bronnen voor zoutbelasting van ons zoete water in westelijk Nederland is, naast de kwel, het zoute water dat bij elke schutting binnenkomt via de schutsluizen.

Bij elke schutting wordt de kolk genivelleerd, en altijd als het zeewater hoger staat dan het kanaalwater wordt in de kolk een schijf zout water ingelaten; wordt daarna de schuttschijf weer afgelaten op het kanaal dan betreft het met zout vermengd kolkwater. Toch is het probleem van de schuttschijf nog niet het ergste en zeker oplosbaar, namelijk door de kolk nooit te ledigen op het kanaal maar door de schuttschijf naar zee terug te voeren (met behulp van pompen). Veel erger is het probleem van de zogenaamde uitwisselingsstromen. Is namelijk de zoete kolk op het peil van het zeewater en de zeedeur wordt geopend dan zakt het zoute water onder het zoete water en ontstaat een dichtheidsstroming waardoor op den duur het kolkwater geheel zout wordt; wordt na het schutten de deur aan de zoetwaterzijde geopend dan zakt dit zoute kolkwater geheel over de bodem van het kanaal terwijl door menging op den duur het zoete water besmet wordt (figuur 10).

Worden bij een sluis geen maatregelen genomen dan komt het volume zout dat tussen zeespiegel en kolkbodem in de kolk geborgen kan worden op het zoete pand. Er zijn verschillende systemen ontwikkeld om dit proces tegen te gaan, waarbij modelonderzoek een belangrijke rol gespeeld heeft bij de optimalisatie hiervan.

a. Luchtbellenschermen^{*)}. Ervan uitgaand dat bij het "uitzakken" van het zoute water een tweelagenstroming met snelheden in tegengestelde richting ontstaat, werkt uitwisseling van deeltjes met beweging in de ene richting met deeltjes die de andere kant op gaan als een rem. Deze uitwisseling wordt bereikt door vanuit de bodem een luchtbellenscherm aan te brengen. Belangrijk bij dit "vertragende" systeem is dat de sluisdeuren niet te lang openstaan, op den duur loopt toch alle zout er doorheen.

^{*)} ref.: G. Abraham en P. v.d. Burgh "Reduction of Salt Water Intrusion through Locks by Pneumatic Barriers" publicatie Waterloopkundig Laboratorium nr. 28 en Rijkswaterstaat Communication nr. 17.

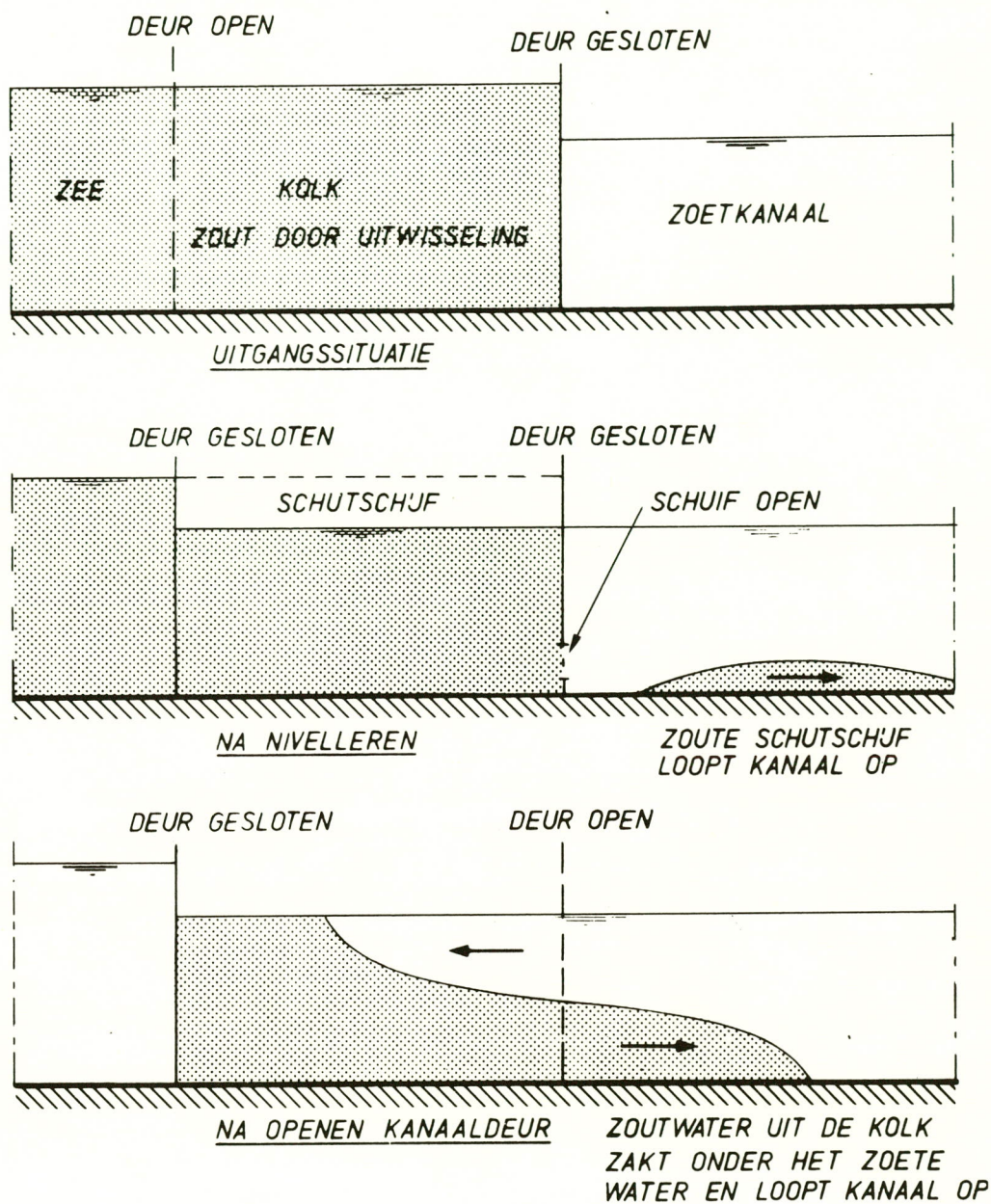


FIG. 10 ZOUTPENETRATIE BIJ EEN SCHUTSLUIS AAN DE KUST

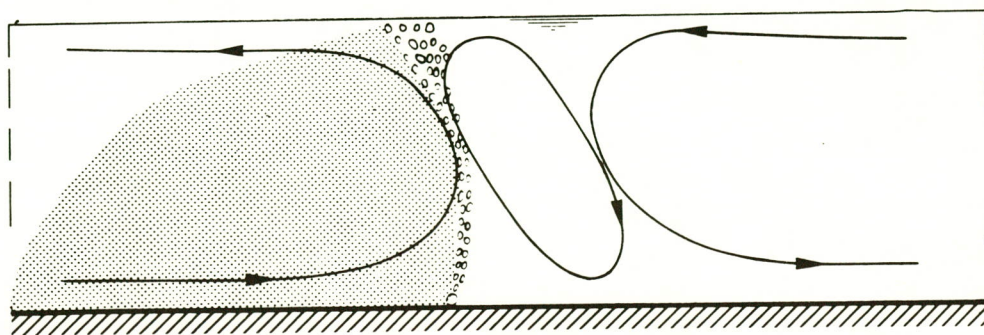


FIG. 11 PRINCIPE LUCHTBELLENSCHERM

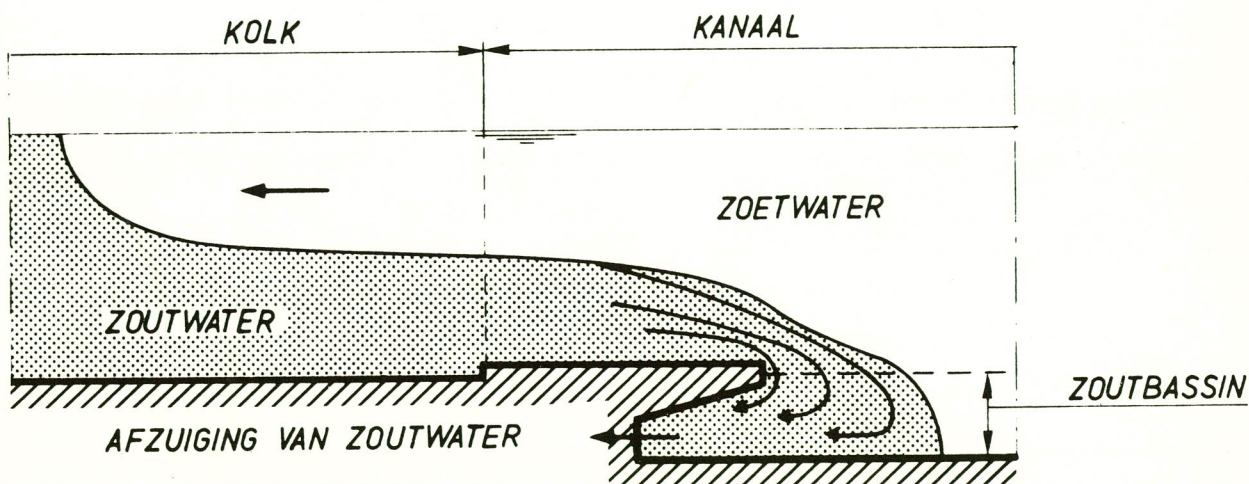


FIG.12 DIRECTE AFZUIGING VAN DE ZOUTTONG

b. Directe afzuiging van de zouttong die in het zoete pand loopt. Dit gebeurt door nabij de sluisdeur aan de zoete zijde een sleuf in de bodem te maken. Het afzuigdebiet waarbij geen zout water op het pand komt, de optimale vorm van de sleuf en de invloed van schepen zijn in modellen nauwkeurig vast te stellen.

Het modelonderzoek geeft de mogelijkheid simultaan de menging, loopsnelheid zouttong, rendement afzuigen etc. te onderzoeken waarbij tevens de problemen bekeken kunnen worden die de scheepvaart kan hebben tengevolge van het schutten, de gelaagde stroming en het afzuigen van het zoute water.

c. Het leegpompen van de zoute kolk via de bodem, bij gelijktijdig bovenaan aanvullen van het kolkwater; zodoende wordt voorkomen dat bij het openen van de deuren aan de kant van het zoete pand nog enig zout het kanaal opkomt. Dit systeem is zeer uitvoerig onderzocht in een laboratoriumonderzoek ten behoeve van de bescherming van het deltameer bij aanleg van sluizen bij de Kreekrakdam in de Antwerpen-Rijnverbinding.*⁾ Dit systeem staat of valt bij een goede vormgeving van bodem en wanden opdat het grensvlak tussen zout en zoet water niet schommelt en zo min mogelijk menging optreedt. Het systeem als zodanig is het eerst in Frankrijk toegepast voor de sluis te Duinkerke.**⁾

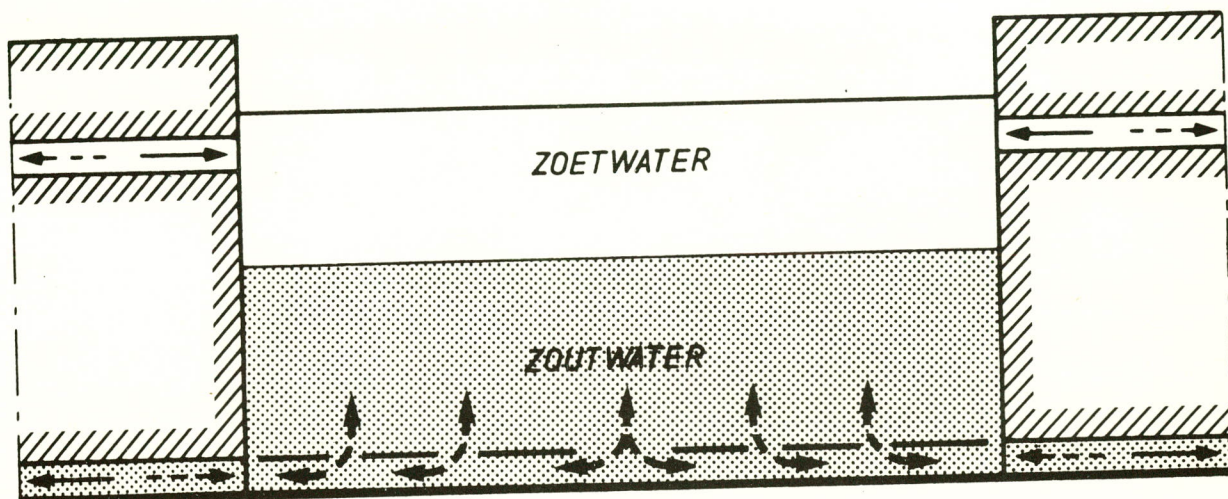


FIG.13, UITWISSELEN KOLK BIJ GESLOTEN DEUREN

Voorafgaand is in een apart onderzoek nagegaan tot welke schaal een dergelijk model verkleind kan worden. Bij de gekozen schaal van 1 : 30 blijken alle verschijnselen nog goed te reproduceren, hooguit wordt de besmetting van het zoete bovenwater met zout iets onderschat.

*⁾ ref.: P.A.A. Volker, F.J. de Vos, P. Blokland, contribution of the Netherlands at XXIInd Int. Navigation Congress of P.I.A.N.C., Paris 1969 Sect. I sub 3.

**⁾ ref.: G. Ribes en C. Blanchet: "Les courants de densité et le projet de l'écluse de Mardyck à Dunkerque" La Houille Blanche 1965 no. 1.

Zowel bij systeem b als c bestaat de mogelijkheid om bij schutten in omgekeerde richting het zoete water in de kolk bij gesloten deuren weer op het zoete kanaalpand te brengen door via de bodem zout water in te laten en het zoet over de wand te laten stromen. Het blijkt dat bij systeem b, waar gedurende lange tijd een tweelagenstroming ontstaat en gehandhaafd blijft, zoveel menging ontstaat dat het zoete kolkwater toch tamelijk besmet is met zout.

Bij beide systemen geldt dat om de menging beperkt te houden de afgemeerde schepen niet met draaiende schroef mogen blijven liggen.

In het voorafgaande is aangegeven hoe het verschil in zoutgehalte op de aansluitende panden bij een schutsluis tot extra maatregelen aanleiding kan geven. Ook is al gezegd dat als geen maatregelen genomen worden bij het openen van de deuren een uitwisselingsstroming ontstaat die hinder voor varende schepen geeft.

Deze uitwisselingsstroming die ontstaat bij geopende deuren kan ook aanleiding geven tot behoorlijke troskrachten. Echter zijn ook bij gesloten deuren de meeste vulsystemen van de schutkolk bijzonder gevoelig voor dichtheidsverschillen. Wordt bijvoorbeeld een zoete kolk gevuld met zout water dan zal het laatste over de bodem stromen waarbij het zoete water achter het schip opgedrukt wordt en het als het ware naar de deur wordt toegezogen. Het omgekeerde is het geval bij vullen met zoet water in een zoute kolk.

De invloed van dichtheidsverschillen op het stroombeeld dat ontstaat bij spuien

Het stroombeeld bij spuien is van belang voor ontgrondingen en, omdat dit vaak plaatsvindt op water waar ook scheepvaart is, voor de hinder die deze ondervindt. Ook voor de bestudering van deze verschijnselen is in vele gevallen en met veel profijt van een fysisch model gebruikt gemaakt. In alle onderzochte gevallen ging het om spuien van -relatief- zoet water in een havenbekken dat zout was; spuisluis IJmuiden, gemaal Den Helder, spuikokers bij de zeesluis Terneuzen, jachthaven Scheveningen en vele andere. Indien met grote snelheden gespuid wordt is het verschil met de homogene toestand niet zo groot, maar bij kleinere snelheden wordt het zoete weer naar de bovenlaag gedrukt waarbij het zoute water òf in rust blijft òf zelfs naar

de spuisluis toegezogen wordt. Er ontstaat in eerste instantie een "olievlek"-stroombeeld. Pas als de stroming lange tijd aanhoudt kunnen er ook neren ontstaan.

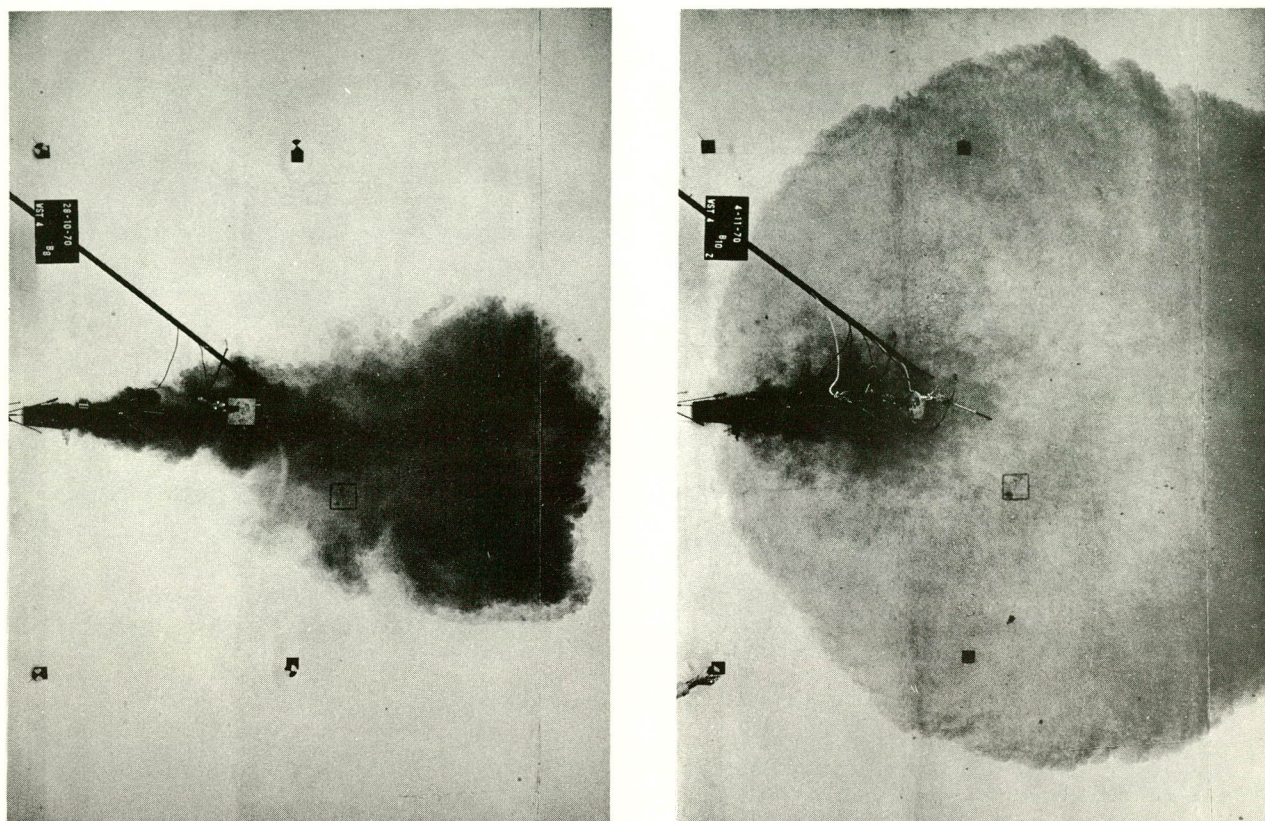


Fig. 14, Een olievlekstroombeeld versus een normaal stroombeeld bij een uitlaat (gelijksortige proef met en zonder dichtheidsverschillen).

Selectief afzuigen van een gelaagd systeem

Bij de bestrijding van binnengedrongen zout water kan men denken aan het principe van doorspoelen of selectief afzuigen.

Het eerste moet daar gebeuren waar het systeem "gemengd" is dat wil zeggen dat bijvoorbeeld in een kanaal het zoutgehalte in één bepaalde raai nagenoeg homogeen is, en alleen over de lengte van het kanaal varieert. Doorspoelen heeft effect daar waar de watersnelheid groter is dan het binnendringen door diffusie (bestaande uit moleculaire en turbulente diffusie).

In het algemeen worden bij het doorspoelen in de natuur slechts kleine watersnelheden bereikt waardoor reproductie van de bijbehorende turbulentie in modellen nauwelijks mogelijk is.

Selectief afzuigen vanuit een gelaagd systeem is mogelijk zolang de zuigmond

voldoende diep onder het grensvlak ligt en de afzuigsnelheden niet te groot zijn. Zelfs modellen op vrij kleine schaal bieden een zeer goede mogelijkheid om een optimale vormgeving te ontwikkelen, en om te bepalen hoeveel water uit de bovenlaag wordt meegezogen als de kritieke snelheden worden overschreden.

Figuur 15 laat zien hoe in een twee-dimensionaal geval van selectief afzuigen de relatie ligt tussen de omstandigheden en het percentage zoet water dat mede wordt afgezogen.

De dimensieloze presentatie laat reeds zien hoe de proeven die met verschillend dichtheidsverschil zijn gedaan met elkaar overeenkomen; dit is tevens een aanwijzing dat de modeltechniek nauwelijks aanleiding geeft tot schaalafwijkingen in de resultaten.

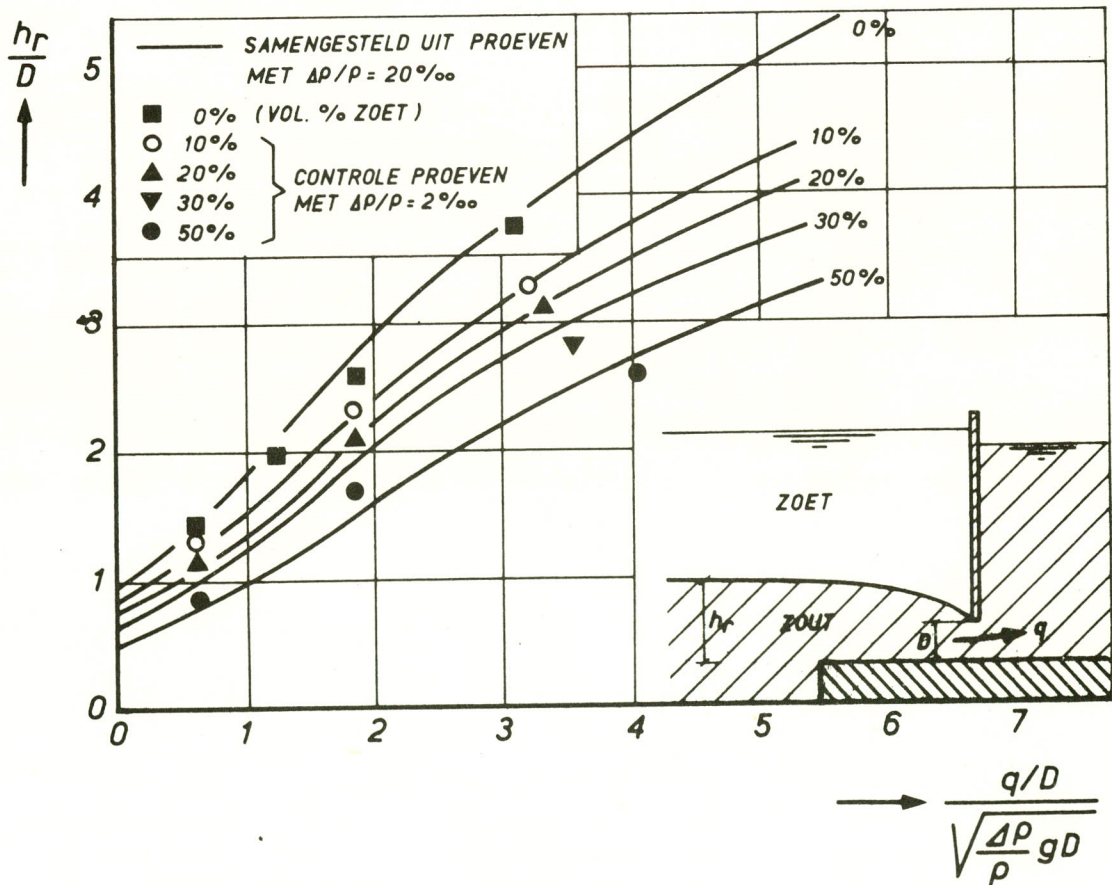
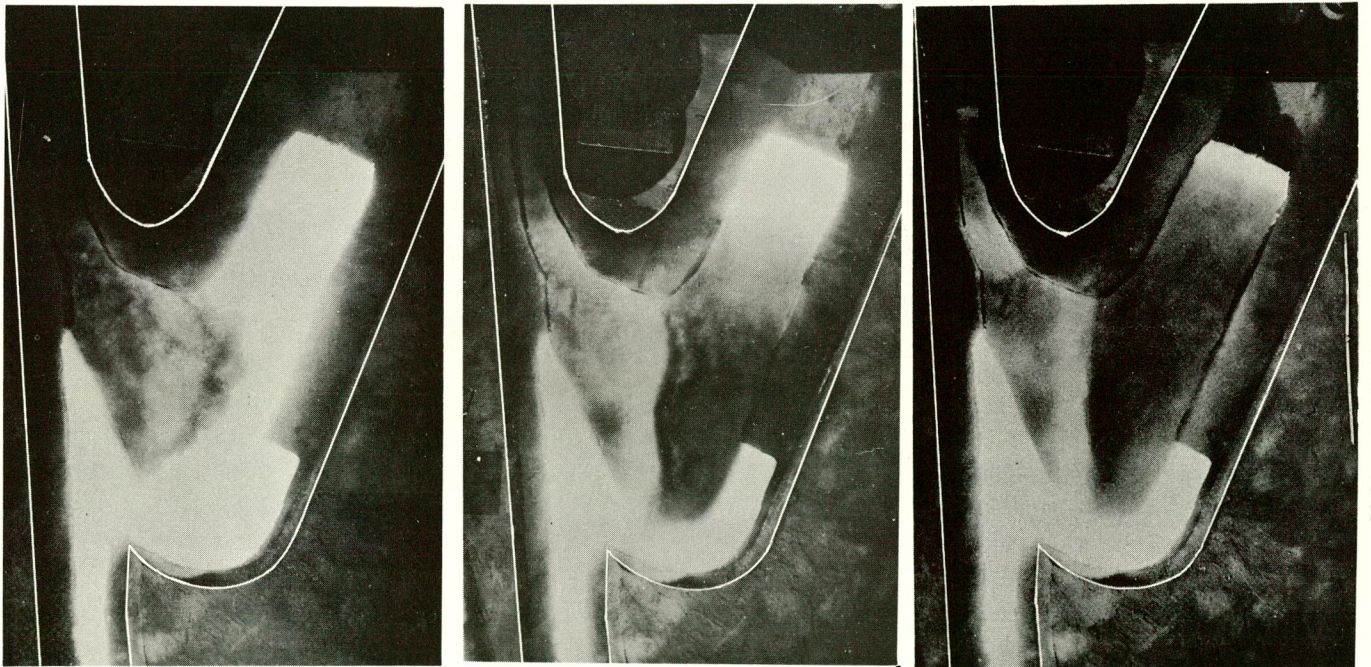
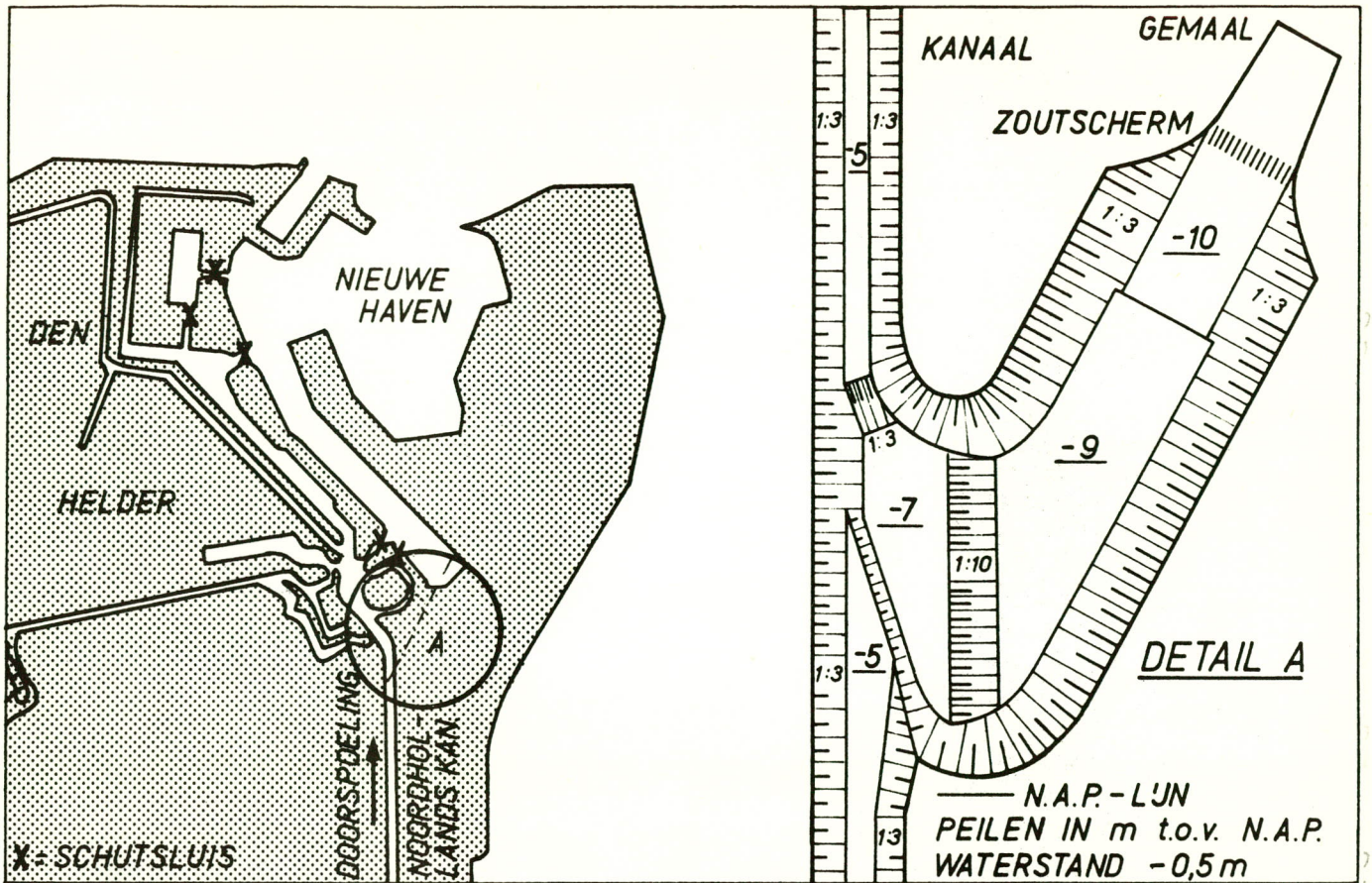


FIG. 15 PERCENTAGE ZOETWATER DAT BIJ SELECTIEF AFZUIGEN UIT DE BOVENLAAG MEEKOMT



①

②

③

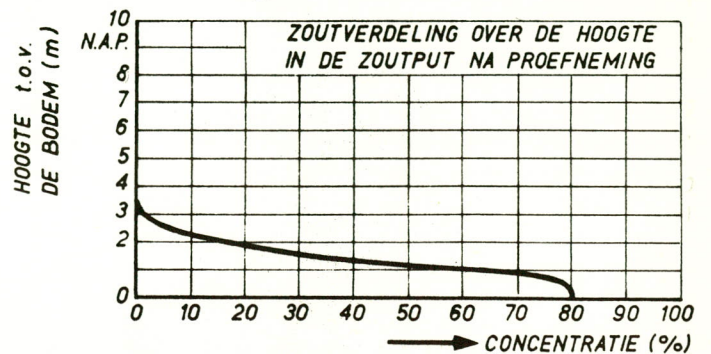


FIG. 16 , GEMAAL DEN HELDER ,MET ZOUTPUT EN ZOUTSCHEM ;
PROEF MET GEKLEURD ZOUT WATER.

Figuur 16 toont resultaten van een onderzoek naar de toestroming naar diepgelegen openingen ten behoeve van selectief spuien van binnengedrongen zout water. Het betreft hier het onlangs gereedgekomen gemaal in Den Helder, waarbij water uit het Noord-Hollandskanaal naar zee gepompt of geloosd wordt. Het was gewenst van dit gemaal gebruik te maken om alle zoutpenetratie via de noordelijk van het gemaal gelegen sluizen door dit gemaal af te voeren. In geschematiseerde vorm is dus het kanaal ten noorden van het gemaal zouter dan het kanaal ten zuiden ervan, waarbij het zoute water de neiging heeft als een onderstroom het zoete kanaal op te lopen, waarbij een noordelijk gerichte stroming van zoet water in de bovenlaag ontstaat. De zoute onderstroom wordt nu zijdelings in de aftakking geleid, waarna deze stroming de bocht om moet. Deze bocht heeft tot gevolg dat het grensvlak scheef komt te staan. Om te voorkomen dat bij dit scheef staande grensvlak het zout het kanaal op kan lopen is de bocht op enige afstand van de kanaaloever gelegd. De proeven zijn gedaan op schaal 1 : 20 door het noordelijke kanaalpand met een schot af te scheiden, en met zout water te vullen waarna het schot is weggetrokken. De proef is gedaan bij verschillende zoutgehalten waarbij bleek dat geen zout water het zuidelijk kanaalpand besmet, en waarbij bleek dat het zout in de verdieping wel enigszins met zoet water is gemengd. Deze menging bleek bij de gevarieerde zoutgehalten gelijk te liggen, hetgeen in overeenstemming is met de gehanteerde schaalregels. Bovendien is gebleken dat, nu het gemaal enige jaren in bedrijf is, de zoutpenetratie zuidelijk van het gemaal inderdaad niet meer merkbaar is.

Nabeschouwing

In het vorenstaande is getracht een overzicht te geven van de verschillendsoortige problemen die zich bij de zoutwaterbestrijding voordoen en de mogelijkheden die door de techniek van modelonderzoek geboden wordt om tot optimale oplossingen en goede voorspellingen te komen. Verwacht mag worden dat de mogelijkheden van deze techniek zich verder zullen ontwikkelen. Aangezien soortgelijke problemen zich ook voordoen bij andere stromingen waar dichtheidsverschillen een rol spelen als koelwaterstroming, warm-koudstromingen in lucht (rookverspreiding, tochtverschijnselen), stroming in warmtewisselaars etc. is de verwachting gewettigd dat ook het toepassingsgebied van deze modellen zich nog zal uitbreiden.

waterloopkundig laboratorium postbus 177 delft