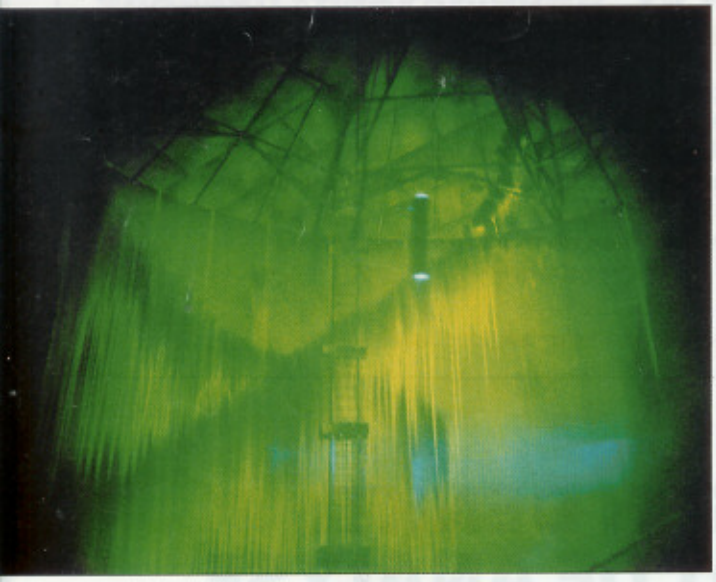
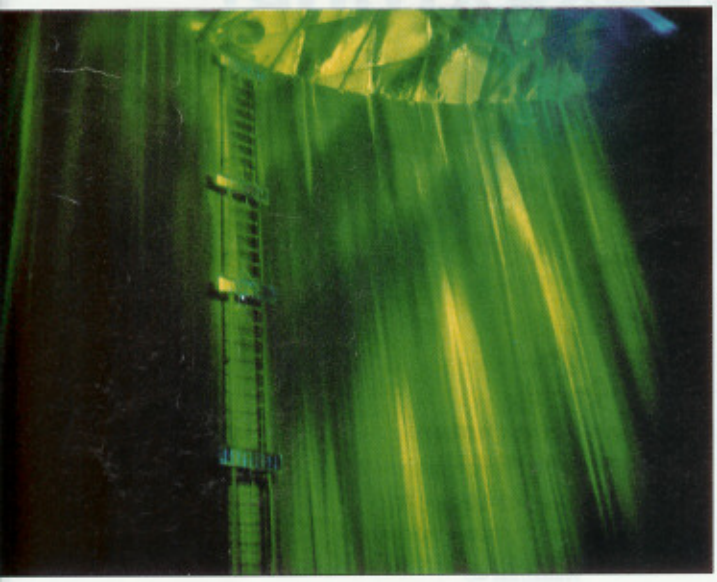


Spelregels voor tankreiniging op zee aan

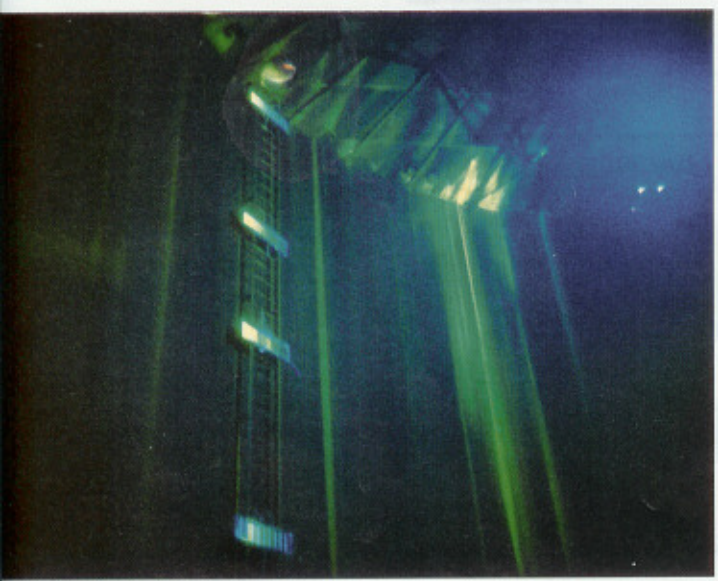
Nieuw uitspoelmodel



De zee is groot, maar toch mag niet al het vuile waswater zomaar overboord worden gezet. Inleveren bij een zuiveringsinstallatie aan de wal kost geld. Vandaar dat men vloeistoftanks aan boord van schepen liefst met zo weinig mogelijk water wast. Onderzoekers aan de TU Delft hebben een nieuwe theorie ontwikkeld om het wasproces beter te beschrijven. Een onderzoek dat niet alleen in scheepvaartkringen aandacht verdient.

Prof.dr.ir. H.E.A. van den Akker
Ir. D.G.F. Verbeek

Professor Van den Akker en de heer Verbeek zijn werkzaam bij Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie, Technische Universiteit Delft.



1. Schoonspuiten van een cilindervormige tank, die voor de gelegenheid is 'bevuild' met fluoresceïne.

Tankreiniging en tanktransport zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden. Vaak mogen restanten van een vorig transport de volgende lading niet verontreinigen, en moet de tank grondig worden gereinigd. Veelal gebeurt dit op volle zee, enerzijds omdat zeewater een goedkoop wasmedium is, anderzijds omdat de zee (ten onrechte) als een oneindig grote stortbak wordt gezien.

In de jarenlange praktijk van het tankertransport zijn apparatuur en procedures voor het reinigen ontwikkeld. Meestal gebruikt men speciale tankwasmachines, die roteren om twee assen en beschikken over één, twee of meer spuitmonden (nozzles). Door de roterende beweging beschrijven de waterstralen uit de nozzles banen over de wanden; het patroon wordt bepaald door tandwielcombinaties in de machine. In figuur 1 is zo'n patroon zichtbaar gemaakt: de met fluoresceïne ingesmeerde wand wordt langzamerhand in banen schoongespoten. Zo'n tankwas is een zuiver commerciële aangelegenheid die wordt beheerst door specificaties, gesteld aan de af te leveren lading. De kosten van het reinigen zijn bij die van het transport inbegrepen. Zolang de klant betaalt voor de zekerheid van het 'on-spec' afleveren, is er geen prikkel voor het optimaliseren van het tankwassen qua wastijd of waterverbruik.

Om het maritieme milieu tegen de meest schadelijke stoffen te beschermen is internationaal overeengekomen (Marpol-conventie 73/78) lozingen van vóórwaswater in een aantal gevallen te verbieden. Achtergrond hiervan is het idee, dat met het eerste waswater het leeuwendeel van het residu uit de tank

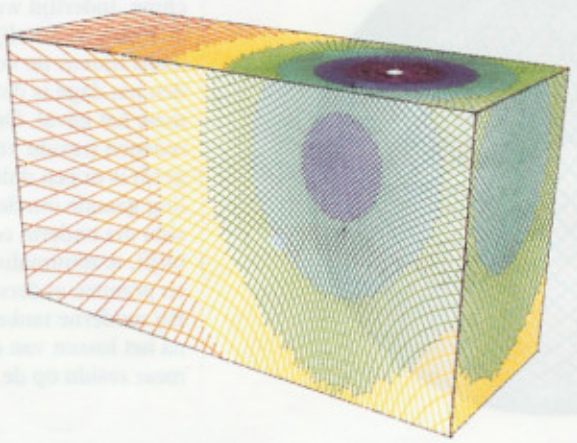
herziening toe

helpt reinigen van tanks optimaliseren

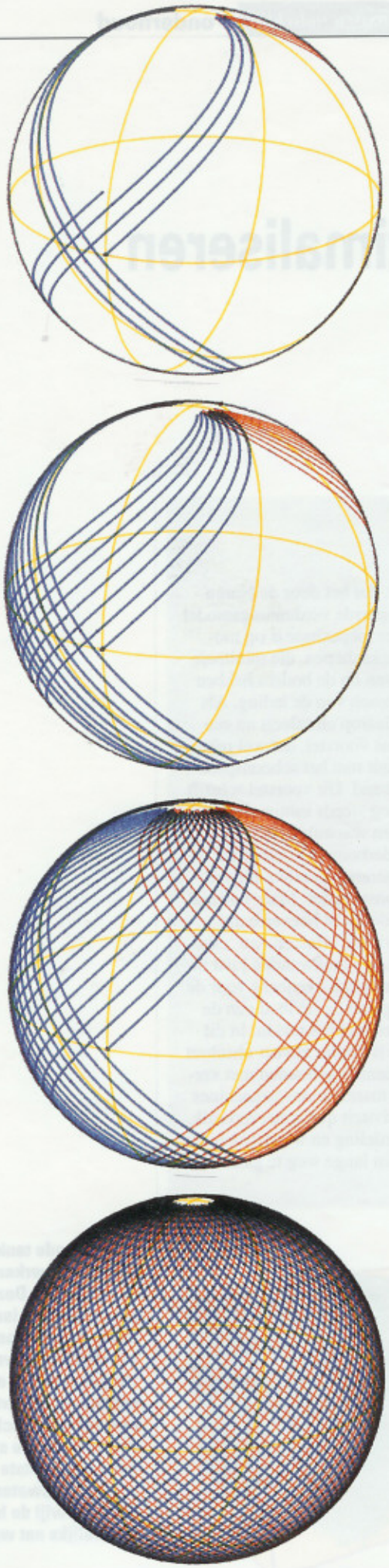
Reinigingsvoorschriften veel te conservatief

Buitengaats spoelen van tanks leidt nog steeds tot een aanzienlijke milieubelasting. Weliswaar heeft de Marpol-conventie verwerking aan de wal van het meest vervuilde deel van het spoelwater verplicht gesteld, maar in de praktijk is die regel gemakkelijk te ontduiken. Binnen de International Maritime Organization (IMO) zijn derhalve discussies gaande het verdrag te amenderen.
Een recent Noors voorstel om – afhankelijk van onder meer de tankgrootte – een minimumhoeveelheid waswater voor te schrijven, lijkt op het eerste gezicht een verbetering. Helaas kleven aan dit voorstel bij nadere beschouwing ook nadelen.
Allereerst is het gebaseerd op het tankwasmodel van Schuurmans en Schilder [1], dat maar zeer beperkt geldig is. Verder moet men, gezien de verschillen tussen tanks, behoorlijk conservatief te werk gaan. Om in alle gevallen aan de doeleinden van de voorwas te voldoen, neemt men de minimale hoeveelheden hoog. Dit resulteert in grote hoeveelheden in te leveren waswater, en het is de vraag of de capaciteit van bestaande havenontvangstinstallaties toereikend is. In veel gevallen zal het residu in sterk verdunde vorm worden aangeboden; of dit gunstig of handig is hangt af van de verwerkingstechniek. En tenslotte houdt het Noorse voorstel geen rekening met verschillen in effectiviteit van tankwasmachines.
Van meet af aan heeft het Delftse onderzoek zich sterk geconcentreerd op de verwijderbaarheid van residu vanaf tankwanden. Veel nadruk is daarbij gelegd op een zo effectief mogelijk gebruik van waswater, juist om het waterverbruik te minimaliseren. In dat opzicht staat het door het ministerie van VROM gesubsidieerde onderzoek haaks op het Noorse idee om de hoeveelheden waswater te fixeren.
Inmiddels heeft het onderzoek aangetoond, dat het door de Noren gepropageerde verdunningsmodel niet meer toepasbaar is op moderne tankschepen, die minimale restplassen op de bodem hebben na het lossen van de lading. Als reactie daarop circuleert nu een aangepast voorstel, dat wel rekening houdt met het schoonspuiten van de wand. Dit voorstel schrijft echter nog steeds minimale hoeveelheden waswater voor. Fysische onderbouwing ontbreekt, en de resulterende getallen blijven nogal conservatief. Maar bovenal is onduidelijk in hoeverre dit voorschrift de effecten van 'clingage' aan de tankwanden juist inschat. Dat geldt eveneens voor de schatting van de invloed van de viscositeit van het residu. In dit voorstel is verder alweer absoluut geen rekening gehouden met verschillen tussen tankwasmachines in effectiviteit qua waterverbruik, waterverdeling en waspatroon. Er is nog een lange weg te gaan.

wordt verwijderd. Dit water moet men derhalve ter verwerking aanbieden aan een installatie aan de wal. De rest van het waswater verdwijnt nog steeds in zee.
Waar de voorwas ophoudt en de 'hoofdwas' begint is lastig te definiëren. Afhankelijk van de aard (viscositeit, milieubelasting) van de lading is overeengekomen de overgang te vertalen in de keren, die de gebezigde tankwasmachine zijn waspatroon moet afwerken. Met de



2. Bestaande tankwasmachines werken verre van optimaal. Deze computersimulatie laat de totale waterbelasting van de wanden van een vloeistoftank na een schoonmaakbeurt van een uur zien. Recht boven en onder de sproeier komt het grootste deel van het waswater terecht, terwijl de hoeken nauwelijks nat worden.



3. Klassieke wascyclus, in dit geval van een tweekoppige sproeier in een bolvormige tank. De waterbanen (rode en blauwe lijnen) komen naast elkaar te liggen, en pas na afloop van de totale cyclus is de sproeier overal geweest. Onderbreekt men de wasbeurt halverwege, dan is de halve tank schoon.

verwijderbaarheid van het residu houdt dit systeem echter weinig rekening, evenmin als met de plaats waar het is achtergebleven: in de afvoer, op de wanden en de bodem. Bovendien is weinig anders voorgeschreven over capaciteit of aard van de tankwasmachine dan dat hij moet ronddraaien en de wanden van de tank moet raken. Eén en ander betekent dat de in te leveren hoeveelheid water sterk afhangt van het type wasmachine. En over het in een voorwas bereikte wasresultaat is weinig te voorspellen.

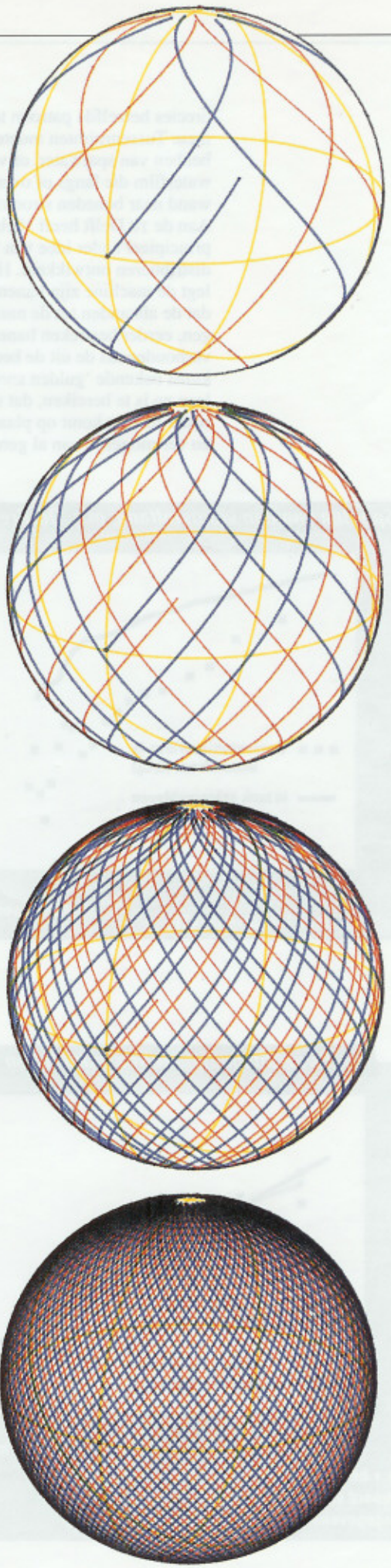
Bodem minder vuil dan wand

Bij het Kramers Laboratorium van de TU Delft wordt al jaren onderzoek verricht naar tankreiniging. Uit de resultaten volgt dat de meest gebruikelijke benadering van de reinigingstechniek aan herziening toe is. Deze benadering is sterk bepaald door het verdunningsmodel van Schuurmans en Schilder, dat stamt uit de jaren zeventig [1]. Op basis van experimenten aan boord van schepen gingen zij er van uit dat er zich bij aanvang van het wasproces een hoeveelheid residu in een plas op de bodem van de tank bevindt, die moet worden verdund en weggespoeld. Als men aanneemt dat het waswater zich perfect met dit residu mengt, volgt dat de produktconcentratie gemeten in de afvoer steeds gelijk is aan de residuconcentratie in de plas in de tank en exponentieel afneemt in de tijd.
Bij deze opvatting van tankwassen speelt residu dat zich aan de tankwanden heeft gehecht, geen rol, evenmin als het type tankwasmachine. Indertijd was dit nog wel conform de feitelijke situatie, althans tijdens de voorwas, maar heden ten dage is dat in veel mindere mate het geval. Om puur financiële redenen (residu vertegenwoordigt geld) is er een duidelijke ontwikkeling gaande om de hoeveelheid residu die onderin een tank achterblijft, te minimaliseren door tanks en pompen anders te construeren. Bij moderne tankers bevindt zich na het lossen van de lading dan ook meer residu op de tankwanden dan in de plas bij de afvoer. Uiteraard verliest dan het verdunningsmodel van Schuurmans en Schilder zijn geldigheid. Juist de verwijderbaarheid vanaf de tankwanden moet daarom centraal komen te staan.

Waswater vaak verkwist

De Delftse aanpak gaat er van uit dat de verwijdering van residu van de tankwanden staat of valt met de kwaliteit van de gebruikte tankwasmachine. Uiteraard moeten de stralen de wanden overal met voldoende kracht treffen om ze in hun geheel te reinigen. Voor een goede beschrijving van tankwandreiniging is het derhalve essentieel een goed begrip op te bouwen over:
- de reiniging die per baan kan worden verwezenlijkt (onder meer afhankelijk van residu-eigenschappen);
- de vereiste afstand tussen naast elkaar gelegde banen;
- de volgorde waarin de banen worden 'neergelegd';
- de ruimtelijke verdeling van het waswater over alle wanden (en hoeken!) van een tank.

Om met het laatste te beginnen: nagenoeg alle bestaande twee-assige tankwasmachines kennen een waspatroon waarbij per baan (per omwenteling om de horizontale as) het middelpunt van het tankplafond (de 'noordpool') en dat van de tankbodem ('zuidpool') elke keer wordt gepasseerd. In figuur 3 is te zien wat dit voor een bolvormige tank betekent: bij de polen liggen de banen zeer dicht bij elkaar, terwijl op de 'equator' van de bol de afstand tussen de banen veel groter is. Bij de polen verloopt het reinigingsproces dus veel sneller dan ter hoogte van de equator. Toch blijft men continu water spuiten naar de polen, ook als die al lang schoon zijn. Dit is pure verkwisting van waswater. Voor rechthoekige tanks geldt iets soortgelijks; bovendien is in dat geval de afstand van machine tot de hoeken van de tank doorgaans groter is dan de afstand tot het midden van de wanden.
Bij een constante hoeksnelheid van



4. Het principe van de gulden snede verwerkt in de tandwieloverbrenging van een tankwasmachine. Reeds aan het begin van de wascyclus wordt de gehele tank globaal bestreken. Hoe langer men wast, des te meer gaan de nieuwe banen de eerder gelegde overlappen en des te beter wordt de reiniging.

Schoonheidsideaal wordt schoonspuitideaal

Ooit werd in de beeldende kunst een rechthoek met zijden die zich volgens de gulden snede verhouden als esthetisch volmaakt beschouwd. Wiskundig gaat het om de verdeling van een lijn met lengte a in twee ongelijke delen, zó dat het kleinste stuk (a - b) zich qua lengte net zo verhoudt tot het grootste (b), als het grootste stuk zich verhoudt tot de oorspronkelijke lijn. In formulevorm:

$(a - b) / b = b / a$

Waaruit is af te leiden dat:

$b = a\,(-0{,}5 + 0{,}5\sqrt{5})$

Als men stuk b op zijn beurt volgens de gulden snede in tweeën knipt, houdt men als grootste deel een lengte a - b over: het oorspronkelijke kleinste stuk. Bij een tankwasmachine, die om twee assen draait, kan men a verschillende tussenruimte direct naast elkaar neergelegd. Op die manier wordt steeds water gestuurd naar plaatsen waar in de buurt vlak tevoren al is gewassen; in figuur 3 is dit duidelijk te zien. Wordt het waspatroon om enigerlei reden onderbroken, dan zal een deel van de wanden al één of meer keren zijn bestreken, terwijl de rest dat nog niet is. Daarom zijn sommige machines zo geconstrueerd dat in een eerste ronde (één omwenteling om een vertikale as) de banen met een betrekkelijk grote tussenruimte worden neergelegd, waarna in een aantal rondes deze tussenruimten steeds kleiner worden. Kenmerk van alle machines tot nu toe is dat ze na één of meer rondes weer op talen als de hoek die de machine om de verticale as moet draaien, wil hij na een volledige omwenteling om de horizontale as op een reeds bestreken baan terecht komen. Wanneer hij daarentegen in die tijd een hoek b (of: a-b) om de verticale as draait, is meetkundig te bewijzen dat hij nooit op een eerder bestreken baan uitkomt. Als men de tandwieloverbrenging van de machine volgens dit principe ontwerpt, kan hij eindeloos doordraaien zonder ooit tweemaal dezelfde baan te beschrijven. Aangezien de gulden-snedeverhouding een oneindig aantal cijfers achter de komma omvat, en tandwielen een eindig aantal tanden hebben, kan men het gulden snede-principe nooit perfect nabootsen. Men kan het echter voldoende nauwkeurig benaderen om het niet-overspuiten van een reeds bestreken baan vol te houden gedurende een normale, niet-oneindige reinigingsbeurt.

de roterende machine passeert een waterstraal de hoeken van de tank derhalve sneller dan de middengedeelten. In de hoeken is derhalve de waterbelasting geringer. In figuur 2 is te zien (met een in Delft ontwikkeld computerprogramma) hoe de waterbelasting in liters per m^2 varieert over de wanden van een rechthoekige tank als een volledig waspatroon is afgewerkt. Er is slechts één conclusie mogelijk: tankwassen geschiedt zeer inhomogeen.

Gulden snede

Een ander belangrijk aspect is de volgorde waarin de banen van een patroon worden bestreken. In de meeste gevallen worden ze met

precies hetzelfde patroon terechtkomen. Tussenruimten moeten het hebben van spatwater, of van een waterfilm die langs of over de wand naar beneden stroomt.
Aan de TU Delft heeft Verbeek een principieel ander idee van water distribueren ontwikkeld. Hierbij legt de machine zijn banen zo neer, dat de afstanden tot de naastgelegen, eerder bestreken banen zich verhouden als de uit de beeldende kunst bekende 'gulden snede'. Alleen zo is te bereiken, dat steeds water terecht komt op plaatsen, die zo ver mogelijk van al gereinigde plaatsen af liggen. In figuur 4 is voor een aantal tijdstippen weergegeven wat het resultaat van dit principe is. Het verschilt duidelijk van het geijkte patroon van figuur 3. Naarmate door de keuze van de tandwielcombinatie het gulden-snedeprincipe beter wordt benaderd, duurt het ook langer vóórdat de machine qua waspatroon in herhaling valt. Vanzelfsprekend is op dit idee octrooi aangevraagd [2].
Men kan er van uitgaan dat de reiniging vooral geschiedt in (en langs) de banen die de waterstralen over de wanden trekken. Daarbij is de rol van spatwater en van filmstroming beperkt, zeker in een voorwas. De residu-verwijdering is dus net zo te modelleren als het waspatroon. Elke neergelegde baan verwijdert residu, waarbij de hoeveelheid die ter plaatse achterblijft afhangt van de afstand van de betrokken positie tot de as van de baan. Af te leiden is dat deze hoeveelheid evenredig is met de grootte van de tussenruimte (de onderlinge afstand van naastgelegen banen) tot een bepaalde macht. Uiteindelijk volgt dan dat tijdens het wasproces de totale hoeveelheid residu in de tank (M) volgens een machtswet afneemt in de tijd:

$$M = M_0 * \left[\frac{t}{t_0}\right]^{-\alpha} \qquad (\alpha > 0)$$

Deze formule impliceert dat uitzetten van de hoeveelheid residu als functie van de tijd op dubbellogaritmisch papier een rechte oplevert. Bovendien moet dan ook de effluentconcentratie volgens een machtswet afnemen met de tijd, en dus net zo'n rechte lijn geven. Op basis van een massabalans is immers voor de effluentconcentratie c af te leiden:

$$c = \frac{-1}{\Phi_v} * \frac{dM}{dt} = c_0 * \left[\frac{t}{t_0}\right]^{-\alpha-1}$$

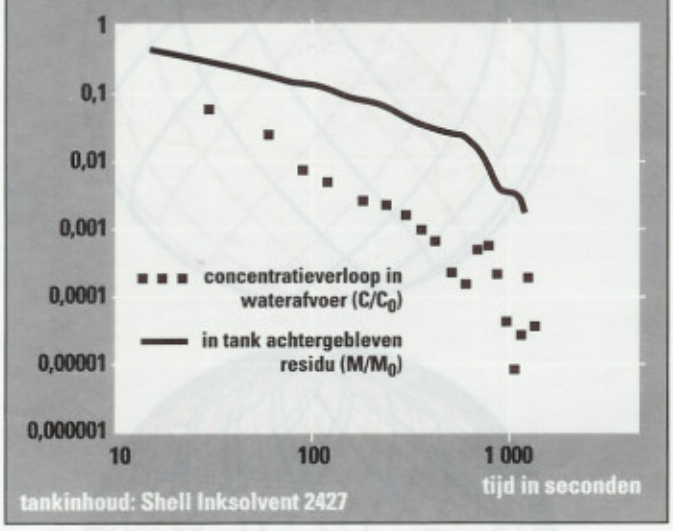
waarin Φ_v het waswaterafvoerdebiet voorstelt en t_0 een experimenteel te bepalen tijdstip.

Experimenten aan boord van schepen (figuur 5) hebben de juistheid van dit model bevestigd. Zelfs voor een aantal experimenten van Schuurmans en Schilder geldt dat de effluentconcentratie achteraf beter beschreven wordt door het machtswetmodel dan door het oude verdunningsmodel, zelfs gedurende de voorwas. Figuur 6 geeft hiervan een voorbeeld.

Onderzoek gaat door

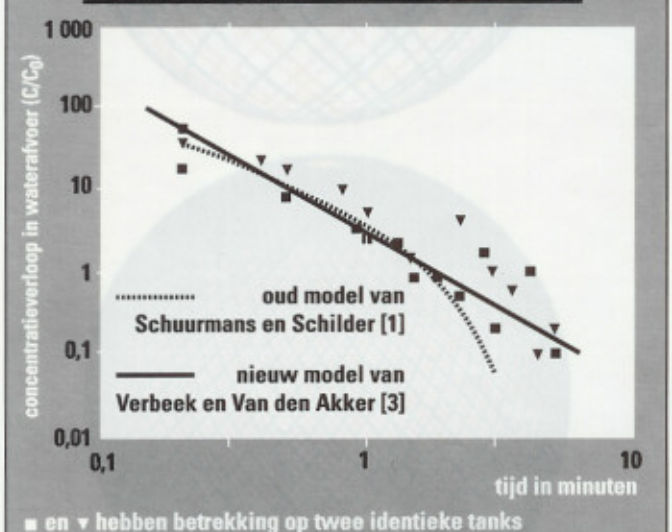
Het machtswetmodel [3] geeft een fysisch verantwoorde en realistische modelbeschrijving van het wasproces. In principe kan men nu voor elke combinatie van wasmachine en tank berekenen hoe de hoeveelheid residu in de tank in de tijd afneemt. Op deze manier zijn prestatieverschillen te verklaren. Feitelijke, kwantitatieve voorspellingen zijn echter nog niet mogelijk. Wat op dit moment ontbreekt, is een kwantitatieve beschrijving van de effectieve reiniging per baan in termen van waterstraalkarakteristieken en residu-eigenschappen: de term α in de machtswet. Het bepalen van deze relaties vereist een nadere studie naar de fysisch-chemische aspecten van hechting en verwijdering, en naar het exacte mechanisme van de inwerking van de waterstraal op het residu aan de wand. Dit moet één van de hoofdthema's van een vervolgonderzoek aan de TU Delft worden.
Met het oog op een effectieve en efficiënte regelgeving is het verder wenselijk, aan de hand van het machtswetmodel en op basis van het waspatroon van de tankwasmachine, simpele criteria af te leiden die zowel het milieu dienen, als het optimaliseren van tankwasapparatuur en tankwasprocedures stimuleren. ■

5. Spoelen van een vloeistoftank, m.s. Dordrecht 35



tankinhoud: Shell Inksolvent 2427

6. Twee uitspoelmodellen vergeleken



■ en ▼ hebben betrekking op twee identieke tanks aan boord van m.s. 'La Quinta'
Meetgegevens van Schuurmans en Schilder [1]

Literatuur
1. H.J.A. Schuurmans, J.G.M. Schilder: 'Prewash Procedures for Chemical Tankers', The Netherlands Maritime Institute, monograph 35, juni 1979.
2. D.G.F. Verbeek: 'A Method of, and Apparatus for, Cleaning a Tank', TU Delft, internationale octrooiaanvrage PCT/NL90/00150, 12 oktober 1990.
3. D.G.F. Verbeek, H.E.A. van den Akker: 'A New Model for Describing Tank Washing', proceedings MariChem Conference, Keulen, 1991.
Een proefschrift van de hand van D.G.F. Verbeek over het in dit artikel behandelde onderwerp zal volgend jaar verschijnen.