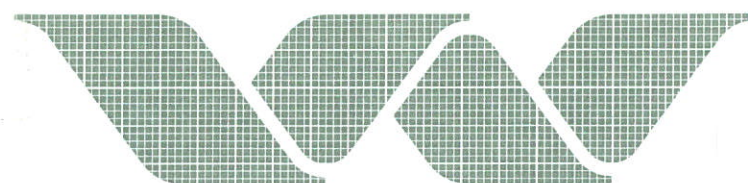


R 775-XII/W 252-VI



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

schepen in dwarsstroom

wiskundig gevoeligheidsonderzoek

AFGEHANDELD

samenvatting

R 775 deel XII
W 252 deel VI

januari 1986

F 27

tow

toegepast onderzoek
waterstaat

18.MRT1987

BIBLIOTHEEK
Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT

schepen in dwarsstroom

wiskundig gevoeligheidsonderzoek

samenvatting

R 775 deel XII
W 252 deel VI

januari 1986



INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Opzet van het gevoeligheidsonderzoek</u>	2
2.1 Probleemsituatie en de systeembeschrijving.....	2
2.2 Gevoeligheidsonderzoek.....	5
2.3 Wiskundig gevoeligheidsonderzoek.....	7
3. <u>Beschrijving van het wiskundig model</u>	8
3.1 Algemeen.....	8
3.2 Beschrijving van de manoeuvreervergelijkingen.....	8
3.3 Bepaling van de krachten ten gevolge van een dwarsstroom.....	9
3.4 Beschrijving van de stuurautomaat.....	11
3.5 Beschrijving van de toerenautomaat.....	12
4. <u>Beschrijving van de proefcondities</u>	14
5. <u>Analyse van de resultaten verkregen met het wiskundig model</u>	18
5.1 Globale analyse.....	18
5.2 Bepaling van de rangorde der factoren.....	19
5.3 Analyse van optredende verschillen.....	20
6. <u>Vergelijking van de resultaten van het wiskundig model, het schaalmodel en de manoeuvreersimulator</u>	22
6.1 Globale vergelijking.....	22
6.2 Vergelijking van de rangorden der factoren.....	23
6.3 Verschillen van de resultaten van het wiskundig model en de manoeu vreersimulator.....	24
6.4 Verschillen van de resultaten van het wiskundig model en het schaalmodel.....	25
7. <u>Konklusies</u>	27

LITERATUUR

TABELLEN

- 1 Eigenschappen van een tanker
- 2 Proevenschema
- 3 Vaarbaan- en roerhoekbereik van manoeuvres bepaald met het wiskundig model voor proefcondities afgeleid van de schaalmodelproeven
- 4 Vaarbaan- en roerhoekbereik van manoeuvres bepaald met het wiskundig model voor proefcondities afgeleid van de proeven op de manoeuvreer simulator
- 5 Rangorden der factoren volgens de onderzoekmethoden: manoeuvreersimulator, wiskundig model, fysisch schaalmodel
- 6 Vaarbaan- en roerhoekbereik van manoeuvres uitgevoerd in het fysisch schaalmodel
- 7 Vaarbaan- en roerhoekbereik van manoeuvres uitgevoerd op de manoeuvreer-simulator
- 8 Vaarbaan- en roerhoek bereiken volgens diverse onderzoekmethoden.
- 9 Resultaten van draaicirkelproeven met het wiskundig model en het fysisch schaalmodel.
- 10 Resultaten van zigzagproeven met het wiskundig model en het fysisch schaalmodel

FIGUREN

- 1 Havenconfiguratie
- 2 Karakteristieke vaarbaan
- 3 Vaarbaan, roerhoek en toerental voor de condities: SIM, STRM = 1, EKSP = 1, DEVS = 4
- 4 Definitieschets
- 5 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom SIM, STRM = 1, EKSP = 1
- 6 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom SIM, STRM = 1, EKSP = 2
- 7 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom FYS, STRM = 1, EKSP = 1
- 8 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom FYS, STRM = 1, EKSP = 2

SYMBOLLEN

B	breedte van het schip
BAAN	baanbereik tijdens een manoeuvre
C_1, \dots, C_6	coëfficiënten uit de stuurautomaat
DEVS	vaardevies
EKSP	snelheidsverdeling van de dwarsstroom
FYS	aanduiding van met het wiskundig model verkregen resultaten voor proefcondities die van de schaalmodelproeven zijn afgeleid
I_z	polair traagheidsmoment
L	lengte van het schip
L_a	anticipatielengte
M	massa van het schip
n	schroeftoerental
n_{gew}	gewenst toerental
n_{max}	maximum toerental
N_T	moment werkend op het schip
N_r, N_v	toegevoegd traagheidsmoment van het schip
PLTS	plaatsvoorschrift
ROER	roerhoekbereik optredend tijdens een manoeuvre
r	koershoeksnelheid
r_c	rotatiesnelheid van de dwarsstroom
r_r	relatieve koershoeksnelheid
SIM	aanduiding van met het wiskundig model verkregen resultaten voor proefcondities afgeleid van de simulatorproeven
SNELH	snelheidsvoorschrift
STRM	stroomsterkte
T	diepgang van het schip
t	tijd
u, v	vaarsnelheid van het schip
u_c, v_c	stroomsnelheidscomponenten
u_r, v_r	relatieve snelheid van het schip
V_d	dwarsstroomsnelheid
\bar{V}_d	geschatte dwarsstroomsnelheid
V_{max}	maximale snelheid van het schip
x, y	coördinaten in een ruimtevast assenstelsel
x_G	afstand van het zwaartepunt tot het midden van het schip

SYMBOLLEN (vervolg)

X_T, Y_T	langschrachtcomponenten werkend op het schip
$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}$	toegevoegde massacomponenten van het schip
Y_g	afstand van midden schip tot de gewenste baan
Y_{gew}	de gewenste vaarbaan
β	drifthoek van het schip
δ	roerhoek
δ_{max}	kritische roerhoek voor toerenautomaat
δ_{max}	maximale roerhoek
δ_{max}	maximale roerhoeksnelheid
∇	deplacement
ψ	koershoek
ψ_D	richting van de dwarsstroom

SCHEPEN IN DWARSSTROOM

Wiskundig gevoeligheidsonderzoek

1. Inleiding

Het onderzoek "Schepen in dwarsstroom" is opgezet om:

- de verschijnselen, die bij het varen in dwarsstroom een rol spelen, te onderkennen;
- een onderzoeksmethode te ontwikkelen, zodanig dat bij het voorbereiden van projecten, waarbij de dwarsstroom een rol speelt, de kwaliteit van het ontwerp onderzoek kan worden vergroot en de omvang van dat onderzoek kan worden beperkt.

Teneinde een indruk te kunnen krijgen van de aspecten van de problematiek waarop bij het ontwikkelen van een onderzoeksmethode vooral de aandacht gericht moet worden, zal in de huidige, derde, fase van het onderzoek een gevoeligheidsonderzoek worden uitgevoerd. Dit gevoeligheidsonderzoek heeft tot doel:

- de factoren te onderkennen die een belangrijke invloed op het vaargedrag van schepen in gekompliseerde stroomsituaties hebben;
- deze factoren in een rangorde te plaatsen;
- een indruk te verkrijgen van de invloed die de, aan de bestaande onderzoeksmethoden inherente, schematisaties hebben op de uitkomsten van deze onderzoeksmethoden.

In het navolgende wordt een opzet voor een dergelijk onderzoek beschreven. Hiertoe worden eerst de probleemsituatie en de systeembeschrijving geschetst. Vervolgens wordt nader ingegaan op de bij het gevoeligheidsonderzoek te verzamelen informatie. Daarna wordt aangegeven op welke wijze deze informatie met behulp van een wiskundig model kan worden verkregen.

De daarmee verkregen resultaten worden vervolgens samengevat, voornamelijk gebaseerd op de onderzoeken [1] en [2]. Tenslotte worden deze resultaten vergeleken met de uitkomsten van het fysisch gevoeligheidsonderzoek met een schaalmodel [3] en een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd op een manoeuvreersimulator [4].

2. Opzet van het gevoeligheidsonderzoek

2.1 Probleemsituatie en de systeembeschrijving

Uit de vele mogelijke situaties waarin een gecompliceerd stroombeeld het gedrag van schepen beïnvloedt, is door de Dienst Verkeerskunde van de Rijkswaterstaat in deze onderzoeksfase het invaren van een haven met voorlangstrekende stroom gekozen als maatgevende situatie.

De afmetingen van de haven worden mede door de afmetingen van de te onderzoeken schepen bepaald. In principe zijn bij de keuze van de havenafmetingen de volgende uitgangspunten mogelijk:

- de afmetingen van de haven zijn voor alle te onderzoeken schepen gelijk;
- de verhouding tussen de scheepsafmetingen en de havenafmetingen is voor alle te onderzoek schepen gelijk.

In het eerste geval wordt de haven in feite gedimensioneerd op het grootste te onderzoeken schip. Men onderzoekt dan de haven voor een klein en een groot schip, terwijl men vooraf weet dat het grote schip maatgevend is. Voorgesteld wordt dan ook de havenafmetingen te bepalen aan de hand van het tweede uitgangspunt. De moeilijkheid bij het hanteren van dit uitgangspunt is dat, wanneer de te onderzoeken schepen niet geometrisch gelijkvormig zijn de scheepsafmetingen als rekeneenheid, niet duidelijk gedefiniëerd zijn (moet voor alle schepen de verhouding tussen waterdiepte en diepgang, of tussen scheeps lengte en horizontale havenafmetingen gelijk zijn?). Voorgesteld wordt de verhouding tussen de derdemachtswortel uit het produkt van scheeps lengte, breedte en -diepgang en de horizontale én verticale havenafmetingen voor alle schepen gelijk te houden.

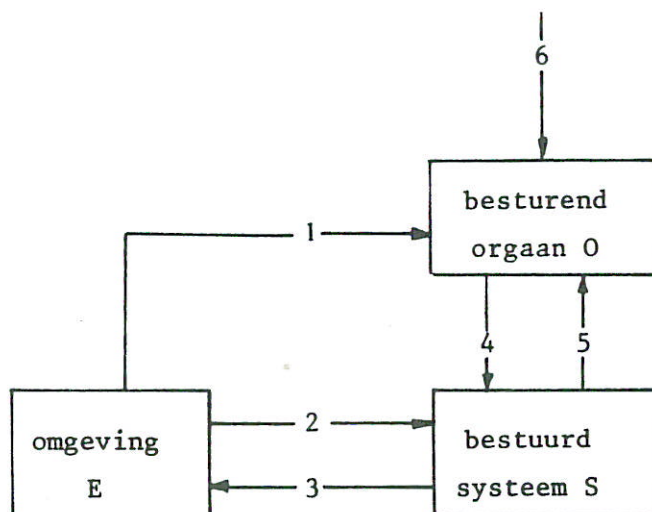
De te onderzoeken, sterk geschematiseerde, haven is in figuur 1 weergegeven. De waterdiepte is buiten en binnengaats constant. De overige afmetingen volgen uit de in het voorgaande beschreven schaalbeschouwingen voor een 43,200 en een 160,000 D.W.T. tanker.

Om enigszins een ordening te kunnen maken van de in deze situatie een rol spelende factoren die het scheepsgedrag kunnen beïnvloeden, is het zinvol een denkmodel te hanteren van het besturingsparadigma. Hiermee is het mogelijk om de opsomming van de factoren die in het rapport 08522-2-MS "Schepen in

dwarsstroom, een systeem analytische benadering" naar voren komen, in een kader te plaatsen. In eerste instantie zal het denkmodel worden beschreven en verklaard. Daarna zullen de onderdelen uit dit model worden benoemd met behulp van de begrippen uit de systeemanalyse.

Het besturingsparadigma is omschreven als: een klasse van abstracte systemen elk bestaande uit een te besturen systeem, een omgeving en een besturend orgaan.

Schematisch zijn de genoemde elementen en hun onderlinge relaties gegeven in onderstaande figuur:



relaties:

- 1 = informatie over E
- 2 = input uit E
- 3 = beïnvloeding van E door S
- 4 = stuursignaal van O aan S
- 5 = informatie over S
- 6 = normstellende informatie

Informatie, die het besturend orgaan van de omgeving krijgt is bijvoorbeeld het zicht wat de roerganger/loods/schipper heeft van de vaarweg, kennis van de situatie zoals navigatiekaarten, getijtafels en stroomgegevens, vaarweg aanduidingen zoals betonning en bebaking enz.

Dat zulke informatie aanwezig is hoeft nog geen zins te betekenen dat die informatie ook ontvangen en verwerkt zal worden. Deze eigenschappen hangen af van de eigenschappen van het besturend orgaan.

Het bestuurd systeem krijgt input uit de omgeving. Deze input kan zijn een kracht uitgeoefend door een heersende wind, een heersende stroom, een golfverschijnsel enz. Kenmerkend is dat deze verschijnselen mede opgewekt worden door een of andere energiebron uit de omgeving.

De stuursignalen die het sturend orgaan geeft aan het bestuurd systeem zijn bijvoorbeeld de roerhoek en het voortstuwingsvermogen. Dat zijn de middelen waarover het besturingsorgaan kan beschikken, en die het zal gebruiken om een manoeuvre met goede afloop te realiseren.

Daarvoor heeft het besturend orgaan ook informatie nodig over het bestuurd systeem. In veel gevallen krijgt het die informatie door naar de omgeving te kijken. De roerganger (en/of andere bestuurders) bekijken de omgeving immers vanaf het bestuurd object zodat naast de informatie over de omgeving ook informatie wordt verkregen over het bestuurd systeem zelf.

Tevens zal het besturend orgaan deze informatie kunnen verkrijgen van een aantal navigatie hulpmiddelen zoals kompas, decca, radar, koershoeksnelheidsmeters etc.

De laatste categorie wordt gevormd door vaardeviezen en reglementen die van toepassing (kunnen) zijn. Deze worden doorgaans als normstellende informatie in de besluitvorming van de navigator betrokken (b.v. het kiezen van een aangepaste vaarsnelheid met het oog op een te passeren, maar nog niet in gereedheid gebrachte zeesluis in de haven). Bedoelde informatie is afkomstig van een ander systeem dat vaak niet direkt door het beschouwde systeem te beïnvloeden is. De drie gegeven elementen te weten de omgeving, het bestuurd systeem en het bestuurd orgaan worden min of meer bepaald door de probleemsituatie. Deze elementen moeten zo gekozen dat ze tenminste binnen de grenzen liggen van mogelijke voorkomende gevallen.

De in het denkmodel genoemde relaties tussen de elementen bestaan gedeeltelijk uit een informatieoverdracht (1, 4, 5 en 6) en gedeeltelijk uit een energieoverdracht (2 en 3).

Onder een relatie wordt verstaan de samenhangen tussen de diverse eigenschappen van de verschillende elementen.

In een rapport, waarin de systeemanalyse is beschreven, zijn een aantal elementen en hun eigenschappen genoemd die van belang worden geacht voor het dwarsstroomprobleem.

Deze elementen zijn als volgt te plaatsen:

- vaarweg behoort tot omgeving E
- schip behoort tot besturend systeem S
- schipper behoort tot besturend orgaan O
- de navigatiemiddelen hebben een functie in relatie 5
- vaarinstructies kunnen dienst doen als representant van de verkeersbegeleidende informatie.

2.2 Gevoeligheidsonderzoek

Aan de hand van de in de vorige paragraaf geschetste probleemstelling en de systeembeschrijving wordt nu nagegaan op welke wijze het gevoeligheidsonderzoek kan worden opgezet: Welke grootheden worden onderzocht?

In de inleiding is gesteld dat het gevoeligheidsonderzoek die factoren dient op te sporen die het vaargedrag van schepen in gekompliseerde stroomsituaties bepalen. Vaargedrag is echter een weinig vastomlijnd begrip. Voor een vaarwegbeheerder (de voornaamste opdrachtgever van onderzoeken met gekompliseerde stroomsituaties) is het van belang te weten welk risico schepen in een dergelijke situatie lopen om te stranden of in aanvaring te komen met andere schepen. Wanneer de grenzen zijn vastgesteld waarbinnen een schip moet blijven om de mogelijkheid van stranding of aanvaring te vermijden, is het risico alleen nog afhankelijk van de marges die het schip ten opzichte van deze grenzen kan handhaven.

Bij het wiskundig gevoeligheidsonderzoek wordt ervan uitgegaan dat binnen deze marges een gewenste vaarbaan is aan te geven. Er moet dan bepaald worden hoe goed het gestuurde schip de gewenste baan kan volgen. De maximale afwijking van de werkelijke baan tot de gewenste baan is dan een maat voor het vaargedrag. Om de inspanning te bepalen waarmee de gewenste baan zo goed mogelijk gevolgd kan worden, wordt ook het roer- en vermogengebruik beschouwd. De optredende extreme waarden voor de roerhoek en het schroeftoerental worden als maat voor de inspanning gebruikt en zijn daarmee eveneens een maat voor het vaargedrag.

Nu het vaargedrag is vastgelegd dient te worden vastgesteld voor welke gevoeligheden het wordt onderzocht. Een groot aantal grootheden komt daarvoor in

aanmerking:

stroomsnelheid
scheepssnelheid
stroomverdeling
vaarwegbegrenzing
vaardevis
observatiemiddelen
wind
andere schepen.

Om tot algemeen geldende uitspraken te komen, zullen de gevoeligheden bepaald moeten worden voor een aantal scheepstypen en beladingsgraden. Dit leidt tot een vrij uitgebreid onderzoeksprogramma. Rekeninghoudend met de beperkte doelstelling van het huidige onderzoek kan het aantal te onderzoeken gevoeligheden verkleind worden. De invloed van wind, andere schepen en vaarwegbegrenzingsen worden daarom buiten beschouwing gelaten.

Hoe de gevoeligheden onderzocht kunnen worden hangt af van de schematisaties in de beschikbare onderzoeksmethoden. Globaal gesproken zijn in de systeembeschrijving twee groepen verschijnselen te onderkennen:

- deterministische verschijnselen die samenhangen met de interactie tussen het bestuurd systeem (schip) en de omgeving (vaarweg). De relaties worden door de pijlen 2 en 3 aangegeven.
- stochastische verschijnselen die samenhangen met de akties van het bestuurend orgaan (roerganger/loods/schipper). De relevante relaties worden door de pijpen 1, 4, 5 en 6 aangegeven.

De ter beschikking staande onderzoeksmethoden geven geen van alle een complete weergave van het systeem. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een manoeuvreersimulator, dan worden de stochastische verschijnselen relatief goed weergegeven en de deterministische geschematiseerd. Wordt een fysisch schaalmodel gebruikt dan worden de deterministische verschijnselen relatief goed weergegeven en de stochastische mogelijk verstoord door schaalearkten (bij gebruik van een roerganger) of geschematiseerd (bij gebruik van een stuurautomaat). In een wiskundig model worden alle verschijnselen geschematiseerd weergegeven.

Gezien het bovenstaande, ligt het voor de hand het onderzoek naar de invloed van variaties in de deterministische verschijnselen uit te voeren met behulp

van een fysisch schaalmodel en dat naar de invloed van variaties in de stochastische verschijnselen met behulp van een manoeuvreersimulator. Om een koppeling tussen beide onderzoeken mogelijk te maken en om een indruk te kunnen krijgen van de invloed van de geschematiseerd weergegeven relaties op het vaargedrag, wordt daarnaast nog een onderzoek uitgevoerd met behulp van een wiskundig model.

2.3 Wiskundig gevoeligheidsonderzoek

De opzet van het wiskundig gevoeligheidsonderzoek is afgestemd op de eerder uitgevoerde onderzoeken op een manoeuvreersimulator, beschreven in [4] en met een schaalmodel beschreven in [3]. Het onderzoek betreft slechts de gemeenschappelijke daar onderzochte situaties.

Evenals bij het schaalmodelonderzoek wordt geen onderscheid gemaakt tussen een groot en een klein schip omdat deze geometrisch gelijkvormig zijn. Op de manoeuvreersimulator is wel onderscheid gemaakt, daar de bestuurder niet "geschaald" kan worden. Verschil in uitkomsten kan bij het wiskundig model alleen verkregen worden door een niet gelijkvormig reagerende stuurautomaat. Een dergelijke stuurautomaat vormt nog een studieobject. Dit geldt eveneens voor de invloed van de individuele loods en het beschikbare informatieniveau (buitenbeeld, radar, log) op het vaargedrag.

Het wiskundig gevoeligheidsonderzoek blijft daarom beperkt tot één vaarwegconfiguratie, één schip en één manoeuvre. De factoren die wel gevarieerd worden, zijn

- de stroomverdeling (EKSP)
- de stroomsterkte (STRM)
- het vaardevis (DEVS)

Bij de keuze van actuele waarden voor deze factoren wordt zo nauw mogelijk aangesloten bij de bovengenoemde onderzoeken.

De voor elke proefconditie uit te voeren manoeuvre bestaat uit het binnenvaren van een haven via een toegangseul bij een voorlangstreckende dwarsstroom. In figuur 2 is een met het wiskundig model gesimuleerde manoeuvre weergegeven. In figuur 3 staan tijdregistraties weergegeven van de uitwijking uit de gewenste baan, roerhoek en toerental gedurende de manoeuvre. Uit deze registraties worden de maten voor het vaargedrag bepaald.

3. Beschrijving van het wiskundig model

3.1 Algemeen

Het in deze studie toegepaste wiskundig model van een gestuurd schip in een dwarsstroomveld bevat de volgende onderdelen:

- manoeuvreervergelijkingen voor manoeuvres op stil water;
- een relatieve bewegingshypothese voor de bepaling van de stroomkrachten;
- een automaat voor het roergebruik;
- een automaat voor het schroeftoerental.

Bij de gevoeligheidsonderzoeken met de manoeuvreersimulator [4] en met het schaalmodel [3] zijn al modellen gekozen voor deze onderdelen. Om de resultaten van het wiskundig gevoeligheidsonderzoek zo goed mogelijk vergelijkbaar te maken met deze onderzoeken, worden de daargebruikte wiskundige modellen overgenomen. In de volgende paragrafen worden de onderdelen nader beschreven.

3.2 Beschrijving van de manoeuvreervergelijkingen

De gebruikte manoeuvreervergelijkingen zijn overgenomen van de simulatorstudie. In figuur 4 zijn de gebruikte symbolen en tekenafspraken weergegeven. De niet-lineaire vergelijkingen hebben de volgende algemene vorm:

$$(M - X_u) \dot{u} = X_T(u, v, r, n, \delta) + Mvr \quad (1)$$

$$(N - Y_v) \dot{v} + (Mx_G - Y_r) \dot{r} = Y_T(u, v, r, n, \delta) + Mur \quad (2)$$

$$(Mx_G - N_v) \dot{v} + (I_z - N_r) \dot{r} = N_T(u, v, r, n, \delta) - Mx_Gur \quad (3)$$

waarin

M, X_u, Y_v, N_v, N_r	massa en toegevoegde massa's
I_z	traagheidsmoment
u, v	snelheidscomponenten
x_G	afstand zwaartepunt tot midden van het schip
r	rotatiesnelheid
X_T, Y_T, N_T	krachten en moment op het schip uitgeoefend
n	schroeftoerental
δ	roerhoek.

De krachten X_T , Y_T en het moment N_r zijn experimenteel bepaalde uitdrukkingen, analoog aan door Abkowitz [6] gegeven uitdrukkingen. De uitdrukkingen bevatten een aantal coëfficiënten waarvan de hier gebruikte waarden gelijk zijn aan die gebruikt bij de simulatorstudie.

3.3 Bepaling van de krachten ten gevolge van een dwarsstroom

Een schip dat door een dwarsstroomveld vaart ondervindt daarvan een kracht en een moment. In het onderstaande wordt aangegeven hoe de grootte van de kracht en het moment worden bepaald.

Bij het bepalen van de stroomkracht en het moment wordt uitgegaan van het relatieve bewegingsprincipe. Bij de toepassing van dit principe wordt verondersteld dat de krachten werkend op een vastgehouden schip in een stroomveld gelijk zijn aan de krachten werkend op een schip dat met een zekere snelheid en rotatiesnelheid door stilstaand water bewogen wordt. Bij de onderstaande formules wordt de relatieve snelheid (u_r , v_r , r_r) bepaald ten opzichte van de ongestoorde stroomsnelheid midscheeps.

De relatieve snelheden zijn dan te schrijven als:

$$u_r = u - u_c \quad (4)$$

$$v_r = v - v_c \quad (5)$$

$$r_r = r - r_c, \text{ maar } |r_r| < .18 u_r \quad (6)$$

waarbij (u_c , v_c) de dwarsstroomsnelheid midscheeps is en r_c de rotatiesnelheid. Uit een opgegeven aardvast snelheidsveld (V_D , ψ_D) zijn de grootheden u_c , v_c , r_c , gedefiniëerd in een scheepsvast assenstelsel, als volgt af te leiden:

$$u_c = V_D \cos (\psi_D - \psi) \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 v_c &= V_D \sin (\psi_D - \psi) \\
 r_c &= \sin (\psi_D - \psi) \left\{ \frac{\partial V_D}{\partial x} \cos \psi + \frac{\partial V_D}{\partial y} \sin \psi \right\} + \\
 &\quad + V_D \cos (\psi_D - \psi) \left\{ \frac{\partial \psi_D}{\partial x} \cos \psi + \frac{\partial \psi_D}{\partial y} \sin \psi \right\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Ter bepaling van de stroomkrachten die evenredig zijn met de toegevoegde massa van het schip moeten ook de relatieve versnellingen worden bepaald:

$$\dot{u}_r = \dot{u} - \dot{u}_c \tag{9}$$

$$\dot{v}_r = \dot{v} - \dot{v}_c$$

Voorts wordt verondersteld:

$$\dot{r}_c = 0 \tag{10}$$

De versnellingen \dot{u}_c en \dot{v}_c van het dwarsstroomveld worden bepaald volgens de formules:

$$\begin{aligned}
 \dot{u}_c &= \cos (\psi_D - \psi) \frac{dV_D}{dt} - V_D \sin (\psi_D - \psi) \left(\frac{d\psi_D}{dt} - r \right) \\
 \dot{v}_c &= \sin (\psi_D - \psi) \frac{dV_D}{dt} + V_D \cos (\psi_D - \psi) \left(\frac{d\psi_D}{dt} - r \right)
 \end{aligned} \tag{11}$$

waarin:

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_D}{dt} &= \frac{\partial V_D}{\partial x} (u \cos \psi - v \sin \psi) + \frac{\partial V_D}{\partial y} (u \sin \psi + v \cos \psi) \\
 \frac{d\psi_D}{dt} &= \frac{\partial \psi_D}{\partial x} (u \cos \psi - v \sin \psi) + \frac{\partial \psi_D}{\partial y} (u \sin \psi + v \cos \psi)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Om de dwarsstroomkrachten in rekening te brengen moeten in de uitdrukkingen voor X_T , Y_T , N_T de variabelen u , v , r vervangen worden door de relatieve grootheden u_r , v_r , r_r als bovenstaand gedefinieerd. Behalve deze aanpassingen moeten nog toegevoegde massakrachten in rekening gebracht worden zodat de manoeuvreervergelijkingen uiteindelijk te schrijven zijn als:

$$(M - X) \dot{u} = X_T (u_r, v_r, r_r, \delta, n) + Mv_r - X \dot{u}_c \quad (13)$$

$$(M - Y) \dot{v} + (Mx_G - Y) \dot{r} = Y_T (u_T, v_r, r_r, \delta, n) + Mur + Y \dot{v}_c \quad (14)$$

$$(Mx_G - N) \dot{v} + (I_z - N) \dot{r} = N_T (u_r, v_r, r_r, \delta, n) - Mx_G u_r + N \dot{v}_c \quad (15)$$

Om de invloed van de dwarsstroom op het schip te bepalen moeten dus uit het opgegeven dwarsstroomveld de grootte en de richting van de snelheid en de gradiënten daarvan lokaal bepaald worden. Daar het snelheidsveld in discrete punten wordt opgegeven, moeten deze waarden in een willekeurig punt door interpolatie uit de opgegeven waarden worden afgeleid. Het gehele veld wordt daartoe in driehoeken verdeeld, zodanig dat elk willekeurig punt in één van deze driehoeken ligt, waarbij in elk hoekpunt van zo'n driehoek de dwarsstroomsnelheid gegeven is. De snelheid in een willekeurig punt wordt dan bepaald door lineaire interpolatie van de snelheden op de hoekpunten van de driehoeken. De gradiënten van de snelheid binnen een driehoek worden constant verondersteld.

De bovenstaande procedure stemt overeen met de methode zoals op de MARIN manoeuvreersimulator werd toegepast bij de ten behoeve van het gevoeligheidsonderzoek uitgevoerde serie proeven [4].

De bovenstaande schematisatie van het snelheidsveld vereist de nodige zorgvuldigheid bij het discretiseren van het snelheidsveld, daar gemakkelijk discontinuïteiten in het geïnterpoleerde veld kunnen ontstaan.

Bij de bepaling van de relatieve beweging is uitgegaan van de lokale stroomsnelheid bij het midscheeps. Indien in de stroom een steile gradiënt aanwezig is, mag verwacht worden dat deze wijze van schematiseren stroomeffekten overschat vergeleken met het gebruik van de fysisch meer reële over de scheepslengte gemiddelde stroomsnelheid.

3.4 Beschrijving van de stuurautomaat

De stuurautomaat die bij de berekeningen wordt toegepast, stemt overeen met de automaat die gebruikt is bij de proevenserie met een fysisch model. Deze proevenserie wordt beschreven in verslag [3]. De automaat wordt beschreven door

$$\ddot{\delta} = c_1 \dot{\psi} + c_2 \psi + c_3 \dot{y}_g + c_4 y_g + c_5 \bar{V}_D (x+L_a) + c_6 \dot{\delta} \quad (16)$$

De bewegingen van het roer worden begrensd door de maximale roeruitslag:

$$|\delta| < \delta_{\max} \quad (17)$$

en door de maximale snelheid waarmee de roerstand mag veranderen:

$$|\dot{\delta}| < \dot{\delta}_{\max}$$

De bovenomschreven roerautomaat is koers en plaatshoudend. y_g geeft de afstand van het scheepszwaartepunt tot de gewenste baan weer en ψ is de koershoek. Voorts wordt in de automaat kennis omtrent het stroombeeld in rekening gebracht uitgedrukt door de term:

$$c_5 \bar{V}_D (x+L_a) \quad (18)$$

waarin x de positie van het schip is, \bar{V}_D de door een stuurman geschatte snelheidsverdeling van de dwarsstroom en L_a de afstand waarover de te verwachten dwarsstroomsnelheid wordt geschat. Voor deze anticipatielengte, L_A , wordt tweemaal de scheepslengte gekozen. De coëfficiënten in de automaat zijn afhankelijk van de gemiddelde scheepssnelheid.

3.5 Beschrijving van de toerenautomaat

In het algemeen kan door toerenvariatie de manoeuvreerbaarheid van het schip veranderen en zal deze mogelijkheid door de stuurman in de besluitvorming worden betrokken. Bij de uitgevoerde proeven met een fysisch model is op zeer schematische manier deze variatie van het toerental gesimuleerd. De simulatie is gebaseerd op de aanname dat een besluit tot aanpassing van het toerental dan pas zal plaats hebben als door het alleen geven van roer een gewenste manoeuvre niet uitgevoerd kan worden. Dit leidt tot de volgende schematisatie:

$$\begin{aligned} n &= n_{\text{gew}} \quad \text{voor } |\delta| < \delta_m \\ n &= n_{\text{max}} \quad \text{voor } |\delta| > \delta_m \end{aligned} \quad (19)$$

waarbij

n_{gew} het gewenste toerental dat overeenstemt met de te varen sloopssnelheid

n_{max} het maximale toerental

δ_m een kritische uitslag van het roer waarboven toeren wordt gegeven om het effect van het roer te verhogen. Bij de proeven is deze uitslag steeds gelijk gekozen aan de maximale uitslag.

De snelheid waarmee het toerental kan veranderen is begrensd:

$$|\dot{n}| < \dot{n}_{\text{max}} \quad (20)$$

4. Beschrijving van de proefcondities

Het in hoofdstuk 3 beschreven wiskundig model zal nu toegepast worden om de gevoeligheid van het vaargedrag voor de in paragraaf 2.3 genoemde factoren te bepalen. Om de uitkomsten van het wiskundig gevoeligheidsonderzoek zo goed mogelijk te kunnen vergelijken met de uitkomsten van het fysisch gevoeligheids-onderzoek en het onderzoek met de manoeuvreersimulator, blijkt het vanwege de onderlinge verschillen in proefopzet gewenst te zijn twee analoge series vaarbanen met het wiskundig model te bepalen. De serie afgeleid van de schaalmodelproeven wordt in het onderstaande aangeduid met FYS en die van de simulatorproeven met SIM. In het onderstaande wordt aangegeven welke proefcondities zijn gebruikt en indien de SIM en FYS-serie verschillen, wat deze verschillen zijn.

De belangrijkste kenmerken van het gebruikte schip worden in tabel 1 gegeven. De coëfficiënten uit de manoeuvreervergelijkingen zijn identiek aan de coëfficiënten gebruikt bij de simulatorproeven. De relatieve beweging wordt bepaald ten opzichte van de lokale stroomsnelheid bij het scheepsmidden. De lokale stroomsnelheid wordt bepaald door een lineaire interpolatie van stroomsnelheidscomponenten die in discrete punten gespecificeerd zijn.

De coëfficiënten in de stuurautomaat zijn analoog gekozen aan de coëfficiënten die bij de schaalmodelproeven zijn gebruikt, uitgezonderd coëfficiënt c_5 (formule (16)). Bij gebruik van de waarde uit het schaalmodel voor c_5 blijkt het wiskundig model bij een uniform stroomveld een baan te volgen die verschoven ligt ten opzichte van de baan die in het schaalmodel wordt gevolgd. In het schaalmodel was een roerhoek ($\neq 0$) nodig om het schip een evenwichtsbaan te laten volgen. Bij het wiskundig model is de evenwichtsroerhoek 0° . Bij gebruik van dezelfde waarden voor c_5 ontstaat dus een verschuiving van de baan. Daarom is c_5 zo gecorrigeerd dat de gewenste evenwichtsbaan wordt gevolgd door het wiskundig model. Deze aanpassing kan een significant effect hebben op de baan zoals blijkt uit [1]. De coëfficiënten van de automaat zijn snelheidsafhankelijk. Daar de vaarsnelheden niet identiek zijn voor de simulator- en de schaalmodelproeven zijn deze coëfficiënten dus enigszins verschillend voor de FYS- en de SIM-serie.

In de toerentalautomaat wordt het maximum toerental gesteld op

$$n_{\max} = 85.0 \text{ rpm} \quad (21)$$

welk toerental wordt ingesteld als geldt:

$$|\delta| > 34^\circ \quad (22)$$

De roerhoek bedraagt maximaal 35° .

Een manoeuvre wordt in het wiskundig model gestart op een afstand van 2500 m voor de haveningang onder evenwichtscondities. De dwarsstroomverdeling is daar nagenoeg uniform. Bij de simulatorproeven wordt 4500 m voor de haveningang gestart. Door de nagenoeg uniforme stroom in het gedeelte $-4500 < x < -2500$ zal het verschil in startpunt slechts een gering effect hebben op de baan ter plaatse van de grootste stroomgradiënten. De startprocedure in het schaalmodel is dusdanig dat op $x = -2500$ m evenwicht is bereikt.

De manoeuvre wordt beëindigd bij het passeren van de $x = 1500$ m lijn, binnen de havenhoofden

Voor de gevoeligheidsanalyse zijn vier stroombeelden gebruikt om de invloed van de vorm van de stroomverdeling en de sterkte van de stroom vast te stellen. Er zijn een tweetal vormen gekozen voor de stroomverdeling: een nagenoeg uniforme stroomverdeling buiten de haven, aangeduid als EKSP = 2 en een stroomverdeling met een piek voor de haveningang, aangeduid als EKSP = 1. Bij elke stroomverdeling zijn twee stroomsterktes toegepast, ongeveer 1.5 m/s en 0.75 m/s, aangeduid met respectievelijk STRM = 1 en STRM = 2.

De gebruikte stroombeelden zijn zowel bij de proeven met de manoeuvreersimulator als met het schaalmodel afgeleid van stroombeeldmetingen aan een schaalmodel van de betreffende havenconfiguratie [5]. De overeenkomstige stroomverdelingen blijken echter enigszins te verschillen bij de schaalmodelproeven en de proeven met de manoeuvreersimulator. In de figuren 5 t/m 8 zijn deze verdelingen weergegeven. Vanwege de verschillen worden de berekeningen met het wiskundig model uitgevoerd voor alle stroombeelden.

Van de vijf bij de simulatorproeven gebruikte vaarvoorschriften zijn in het fysisch schaalmodel vier toegepast. Deze vier vaarvoorschriften, aangeduid als

DEVS 2, DEVS 3, DEVS 4 en DEVS 5 worden ook bij het wiskundig gevoeligheids-
onderzoek toegepast. Zij bevatten elk een plaatsvoorschrift, PLTS = 1 of PLTS
= 2 en een snelheidsvoorschrift, SNELH = 1 of SNELH = 2.

De plaatsvoorschriften luiden bij de simulatorproeven:

- uw taak is zo nauwkeurig mogelijk de geulas te volgen. (PLTS = 1)
- uw taak is het schip gedurende de gehele manoeuvre binnen de bovenstroomse
helft van de geul te houden. (PLTS = 2)

De snelheidsvoorschriften luiden bij de simulatorproeven:

- uw taak is het schip met de hoogst mogelijke snelheid de haven binnen te
brengen en met deze snelheid de stoplijn te passeren. Let er op dat uw
snelheid niet beneden de 10.0 kn. komt. (SNELH = 1)
- uw taak is het schip met een snelheid niet hoger dan 6.0 kn. de haven
binnen te brengen. Deze maximale snelheid geldt voor de gehele manoeuvre
tot aan de stoplijn. De startsnelheid bedraagt 5.0 kn. (SNELH = 2)

De vaarvoorschriften DEVS 2 t/m DEVS 5 zijn samengesteld als:

DEVS = 2 : PLTS = 1, SNELH = 1

DEVS = 3 : PLTS = 2, SNELH = 1

DEVS = 4 : PLTS = 1, SNELH = 2

DEVS = 5 : PLTS = 2, SNELH = 2

De in het wiskundig model gebruikte interpretatie van de vaarvoorschriften is
overgenomen uit de proeven met het schaalmodel en luiden voor SIM serie bere-
keningen

PLTS = 1 : $y_{\text{gew}} = 0.0 \text{ m}$ (geulas)

2 : $y_{\text{gew}} = 100.0 \text{ m}$ (midden van bovenstroomse helft van de geul)

SNELH = 1 : $n = 81.6 \text{ rpm}$

= 2 : $n = 40.5 \text{ rpm}$

Bij de schaalmodelproeven zijn afwijkende toerentallen gebruikt voor het snel-
heidsvoorschrift. De voor de FYS-serie gebruikte interpretatie van de voor-
schriften zijn:

SNELH = 1 : n = 85.0 rpm
= 2 : n = 40.0 rpm

In tabel 2 wordt het volledige proevenschema weergegeven dat zowel voor de FYS- als de SIM-serie is uitgevoerd.

5. Analyse van de resultaten verkregen met het wiskundig model

5.1 Globale analyse

Het vaargedrag van een gestuurd schip gedurende de uitvoering van een opgedragen manoeuvre wordt bij dit onderzoek gekarakteriseerd door extreme waarden van de gevaren baan, het roerhoek- en schroeftoerentalverloop. Als extreme waarde van de vaarbaan wordt het baanbereik gebruikt, aangeduid als BAAN. Het baanbereik wordt hier definiëerd als het verschil tussen de maximale en de minimale waarde van de positie van het zwaartepunt van het schip t.o.v. de gewenste baan (zie figuur 3).

Daar het verloop van het schroeftoerental bij de gekozen toerenautomaat nauw samenhangt met het verloop van de roerhoek, worden beide verlopen door één kental gekarakteriseerd. Daarvoor wordt het roerhoekbereik gekozen, aangeduid als ROER. Het roerhoekbereik wordt gedefiniëerd als het verschil tussen de maximale en minimale roerhoek die tijdens de manoeuvre optreedt. Deze grootte is een maat voor de inspanning waarmee gevaren wordt (zie figuur 2).

In de tabellen 3 en 4 worden de waarden voor BAAN en ROER weergegeven voor de met het wiskundig model berekende en in het vorige hoofdstuk besproken serie manoeuvres. Uit deze tabellen blijkt:

- Het plaatsvoorschrift heeft weinig effect op de kenmerken BAAN en ROER. Dit kan verwacht worden daar de snelheidsverdeling van de dwarsstroom nauwelijks afhangt van de dwarscoördinaat y .
- Het snelheidsvoorschrift heeft een duidelijke invloed op BAAN en ROER. Het halveren van het referentietoerental leidt tot een 1.5 à 2 maal zo groot baanbereik, terwijl het roerhoekbereik 20 à 40% toeneemt.
- Een verdubbeling van de stroomsterkte leidt tot een 2 à 3 maal zo groot baanbereik. Het roerhoekbereik neemt 0 tot 40% toe.
- Bij stroombeelden met een piek blijkt het baanbereik 20 à 40% groter te zijn dan bij stroombeelden zonder piek. De invloed van de piek wordt relatief daarbij groter als de stroomsterkte toeneemt. Het roerhoekbereik wordt 0 tot 20% vergroot door de piek.

De bovenstaande tendenzen gelden zowel voor de SIM- als FYS-serie berekeningen. In het algemeen blijkt het baanbereik bij de SIM-serie voor gelijke

proefcondities groter te zijn dan voor de FYS-serie, vooral bij de stroombeelden zonder piek. Hierbij treden verschillen tot 25% op. Bij de roerhoeken treden analoge verschillen op.

5.2 Bepaling van de rangorde der factoren

In de vorige paragraaf is aangegeven hoe de diverse factoren het vaargedrag globaal beïnvloeden, zonder de invloed van deze factoren onderling te vergelijken. Met behulp van variantieanalyse kan de invloed van deze factoren gemeten worden en kan een rangorde worden bepaald voor het belang van de diverse factoren.

Bij toepassing van een variantieanalyse wordt een F-waarde per factor of interactie van factoren bepaald die een maat is voor de door die factor of interactie verklaarde hoeveelheid variantie. Hoe groter de F-waarde, hoe meer de factor het vaargedrag, ofwel de variatie in BAAN en ROER beïnvloedt. Met behulp van de SPSS procedures ANOVA en MANOVA kunnen de F-waarden worden bepaald.

In tabel 5 worden de rangorden van de factoren weergegeven die uit de berekende F-waarden kunnen worden afgeleid. Daarbij worden drie rangorden aangegeven:

- een rangorde als het vaargedrag alleen door BAAN wordt gekarakteriseerd
- een rangorde als het vaargedrag alleen door ROER wordt gekarakteriseerd
- een rangorde als het vaargedrag door BAAN en ROER wordt gekarakteriseerd.

De drie gedefiniëerde rangorden blijken voor dezelfde serie manoeuvres tot verschillende rangorden te leiden. Het belang om een goede definitie van het vaargedrag aan te geven voordat zinnig over een rangorde van de factoren kan worden gesproken wordt hiermee nog eens onderstreept.

Rangorden gebaseerd op de berekende manoeuvres voor de proefcondities afgeleid van het simulatoronderzoek (SIM-serie) en afgeleid van het schaalmodelonderzoek (FYS-serie) blijken van elkaar te verschillen. Als het vaargedrag door BAAN en ROER wordt gekarakteriseerd is de rangorde voor de SIM-serie:

$$1. \text{ STRM} \quad 2. \text{ SNELH} \quad 3. \text{ EKSP} \quad 4. \text{ SNELH} * \text{ STRM} \quad (23)$$

en voor de FYS-serie:

$$1. \text{ STRM} \quad 2,3 \text{ EKSP, SNELH} \quad 4. \text{ EKSP} * \text{ STRM} \quad (24)$$

De rangorden gebaseerd op alleen het kenmerk BAAN of alleen het kenmerk ROER geven eveneens verschillende rangorden voor de FYS- en SIM-serie.

Naast de verschillen in de rangorden (23) en (24) zijn ook enige overeenkomsten waar te nemen. De faktor STRM, dat wil zeggen de sterkte van de dwarsstroom, wordt als belangrijkste faktor aangegeven. Voorts worden de minder belangrijke factoren gelijk beoordeeld. De geringe invloed van het PLTS-voorschrift op het vaargedrag is daarvan een voorbeeld. De hoofdfactoren SNELH en EKSP zijn alle van belang. Van de interacties blijken SNELH * STRM en EKSP * STRM van belang te kunnen zijn.

5.3 Analyse van optredende verschillen

Hoewel een globale analyse weinig verschil laat zien tussen de SIM- en FYS-resultaten blijkt bij toepassingen van de variantieanalyse dat een aantal verschillen aanwezig zijn. De oorzaken van deze verschillen worden nu nagegaan.

Hoewel bij de proefopzet van de simulatorproeven en van de proeven met het schaalmodel gestreefd is naar een identieke opzet, is toch nog een aantal verschillen in proefcondities vast te stellen. Deze verschillen hebben geleid tot het uitvoeren van twee series berekeningen (FYS en SIM). De verschillen in proefcondities zijn:

- De stroombeelden zijn niet identiek.
- De ingestelde referentietoerentalen voor de verschillende snelheidsdeviezen zijn niet identiek.

Het verschil in referentietoerental is bij de FYS- proevenserie groter dan bij de SIM-proevenserie. Daardoor zal het effect van het snelheidsvoorschrift (SNELH) op het vaargedrag bij de FYS-serie als belangrijker door de variantie analyse worden aangemerkt dan wanneer het referentietoerental van de SIM-serie was gebruikt. De gedeelde plaats met EKSP (zie (24)) zal dus neigen naar: 2. EKSP en 3. SNELH en daardoor meer van rangorde (23) gaan verschillen. Blijkbaar wordt het verschil in rangorde bepaald door het verschil in stroombeeld.

De verschillen in stroombeeld bij de simulatorproeven en schaalmodelproeven zijn reproductiefouten. Een tevoren bepaald snelheidsprofiel werd bij de

schaalmodelproeven zo goed mogelijk gereproduceerd. Bij het stroombeeld zonder piek (EKSP = 2) blijken daarbij vooral reproductieverschillen op te treden. Bij het schaalmodel is over het traject $x = -2500$ tot $x = -800$ een langsgradiënt in de stroomsnelheid aanwezig die bij de simulatorproeven ontbreekt. Daardoor treedt ook een verschil op in de door de stuurautomaat gebruikte globale stroomverdelingen en de waarden voor de coëfficiënt c_5 (zie formule (16)). De coëfficiënt c_5 wordt bepaald met de veronderstelling dat in de omgeving van $x = -2500$ een uniforme snelheidsverdeling heers die karakteristiek is voor het hele stroombeeld. De stroomsterkte van het globaal snelheidsveld daar wordt gebruikt voor c_5 . Deze combinatie van verschillen leidt tot het verschil in de rangorden. In het bijzonder blijkt uit tabel 5, het roergedrag beïnvloed te worden door de verschillen (zie ANOVA (ROER)).

Om de definitieve plaats voor EKSP in de rangorden van factoren vast te stellen moet blijkbaar een grotere variatie van stroomverdelingen worden beschouwd dan nu is aangenomen.

Bij het uitgevoerde gevoeligheidsonderzoek dienen enige kanttekeningen te worden geplaatst om een foutieve interpretatie van de resultaten te voorkomen. In principe hebben de gevonden rangorden geen algemene geldigheid. Zij hebben betrekking op de hier gebruikte factoren en variatie van de factoren. Wanneer deze variatie representatief is voor de in werkelijkheid optredende variatie wordt een algemene geldigheid verkregen. Uit het bovenstaande blijkt dat vermoedelijk EKSP niet uitputtend is behandeld, daar reproductie onnauwkeurigheden voldoende zijn om de rangorde te beïnvloeden.

Bij de bovenvermelde rangorden is aan de faktor plaatsvoorschrift (PLTS) een laag rangnummer toegekend. Dit wordt als al is vermeld, veroorzaakt door de gekozen snelheidsverdelingen. Daarnaast ook door de gekozen definitie voor BAAN. Indien bijvoorbeeld BAAN gedefiniëerd was als de maximale afstand van het zwaartepunt tot het midden van de vaargeul zal PLTS wel als belangrijk worden aangemerkt.

6. Vergelijking van de resultaten van het wiskundig model, het schaalmodel en de manoeuvreersimulator

6.1 Globale vergelijking

In dit hoofdstuk worden de resultaten verkregen met het wiskundig model vergeleken met de resultaten van de studie met het schaalmodel en de manoeuvreersimulator. Door de verschillende wijze van schematisatie ontstaan verschillen tussen de resultaten die afhankelijk van de toepassing al of niet acceptabel kunnen zijn. Voor het vergelijken komen in principe de vaarbaan, het roerhoeken en het schroeftoerentalverloop in aanmerking. Van deze signalen kunnen kentallen afgeleid worden die zich voor onderlinge vergelijking lenen. In [1] wordt de vergelijking uitgevoerd voor een groot aantal kentallen. Hier worden alleen het al eerder gedefiniëerd baan- en roerhoekbereik als karakteristieke kentallen beschouwd.

De experimenten met het schaalmodel en de manoeuvreersimulator zijn voor de in tabel 2 aangegeven proefomstandigheden respectievelijk 5 en 12 maal herhaald. De 12 vaarten bij de simulatorresultaten worden hoewel niet gelijkwaardig (3 informatieniveaus x 2 actieve loodsen x 2 FLO-ers) wel als zodanig beschouwd. In [1] zijn een tweetal manieren beschouwd om in geval van een n-maal herhaald experiment de kenmerken BAAN en ROER te bepalen:

- a. per experiment wordt het vaarbaanbereik bepaald. Het kenmerk BAAN wordt dan bepaald als het gemiddelde van de n aldus gevonden waarden per proefomstandigheid.
- b. uit de n vaarbanen per proefomstandigheid, $y_i(x)$, $i = 1 \dots n$, wordt de gemiddelde vaarbaan $\bar{y}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i(x)$ afgeleid. Het kenmerk BAAN wordt vervolgens bepaald als het vaarbaanbereik van de gemiddelde vaarbaan.

De onder a. en b. beschreven methoden om BAAN te bepalen leiden tot verschillende waarden. In tabel 7 zijn deze waarden weergegeven voor de proeven op de simulator en eveneens voor het kenmerk ROER. Het verschil in definitie blijkt tot vrij grote verschillen te leiden (tot 50%). Een gemiddelde vaarbaan geeft blijkbaar niet een goed beeld van een manoeuvre weer. Voor de bepaling van BAAN en ROER voor de schaalmodelproeven is dan ook alleen definitie a. toegepast (zie tabel 6). De analyse in het onderstaande betreft alleen de waarden van BAAN en ROER volgens definitie a.

In tabel 8 zijn de vaarbaanbereiken verzameld die met de diverse methoden zijn verkregen. Er blijkt een nogal grote variatie te bestaan in de uitkomsten. De verschillen tussen de SIM- en FYS-serie, verkregen met het wiskundige model zijn veelal kleiner dan de verschillen tussen de resultaten van een andere onderzoeksmethode en de resultaten van het overeenkomstige wiskundig model. Dit suggereert dat bij het wiskundige gevoeligheidsonderzoek met één serie (SIM of FYS) berekeningen had kunnen worden volstaan, in ieder geval wat het baanbereik betreft en in iets mindere mate wat het roerhoekbereik betreft (zie tabel 6 en 7). Uit de variantie analyse bleken de verschillen tussen SIM- en FYS-serie echter nog groot genoeg om tot verschillende rangorden te leiden.

Het schaalmodel laat behalve voor de toestand EKSP1 * STRM1 steeds een overschatting van het baanbereik zien ten opzichte van het wiskundige model tot 80%. Voor STRM2 geeft de manoeuvreersimulator een overschatting tot 50% van de baanbereiken bepaald met het wiskundig model. Voor STRM1 is er veelal een onderschatting tot 25%. Een vergelijking van het baanbereik bepaald met het schaalmodel en de manoeuvreersimulator geeft een overschatting aan door de manoeuvreersimulator voor EKSP1 tot 70% en voor EKSP2 een onderschatting tot 50%.

Uit tabel 8 blijkt dat door de loods veelal een groter roerhoekbereik wordt gebruikt dan door de stuurautomaat (tot 20% meer). Tussen het wiskundig model en het schaalmodel varieert het verschil in roerhoekbereik van -24° tot 9° , absoluut gemiddeld 6° . Tussen het wiskundig model en de manoeuvreersimulator varieert het verschil in roerhoekbereik van -1° tot 28° , absoluut gemiddeld 13° . In het laatste geval treden bij EKSP2 vooral grote verschillen op.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de invloed van bovenvermelde significante verschillen op de rangorden van de factoren.

6.2 Vergelijking van de rangorden der factoren

In tabel 5 worden de rangorden van de factoren die het vaargedrag beïnvloeden weergegeven, gebaseerd op de resultaten verkregen met de verschillende onderzoeksmethoden. Hierbij zijn de rangorden afgeleid van resultaten van de proeven op de manoeuvreersimulator en van de resultaten van de schaalmodelproeven op dezelfde manier bepaald als bij de resultaten van het wiskundig model. Daarbij zijn ook de in paragraaf 5.1 gegeven definities voor BAAN en ROER gebruikt en zijn de rangorden met variantieanalyse bepaald (tabel 5).

Voor de resultaten van de proeven op de manoeuvreersimulator wordt de volgende rangorde verkregen voor kenmerk (BAAN, ROER):

1. STRM
 2. EKSP
 3. SNELH
 4. EKSP * STRM
- (25)

De overeenkomstige rangorde voor de resultaten van de schaalmodelproeven:

1. STRM
 2. SNELH
 3. EKSP
 4. SNELH * STRM
- (26)

Deze rangorden verschillen onderling, maar ook met de overeenkomstige rangorden verkregen met het wiskundig model. Deze verschillen moeten verklaard worden uit de inherent aan het modelonderzoek verbonden schematisaties en aan verschillen in proefcondities. In de volgende paragrafen wordt daar nader op ingegaan.

De beschouwde onderzoeksmethoden (simulator, schaalmodel, wiskundig model) geven unaniem aan dat van de beschouwde factoren de stroomsterkte (STRM) de grootste invloed heeft op het vaargedrag. Voorts wordt ook vrij eenduidig weergegeven welke de belangrijkste factoren zijn. Onduidelijk is de rangorde van EKSP en SNELH en daarmee samenhangend van EKSP * STRM en SNELH * STRM.

6.3 Versillen van de resultaten van het wiskundig model en de manoeuvreer-simulator

Bij de proeven met het wiskundig model voor de proefcondities afgeleid uit de simulatorproeven (SIM-serie) en de proeven op de manoeuvreersimulator zelf verschilt alleen de wijze van besturing. Het verschil in rangorde kan wijzen op een vrijere interpretatie van het vaarvoorschrift door een loods dan door de stuurautomaat. Het zich niet houden aan de snelheidsvoorschriften, b.v. het steeds handhaven van een hoge snelheid bij het varen door de grootste snelheidsgradiënt, leidt tot een geringe invloed van het snelheidsvoorschrift op het vaargedrag (rangnummer 4). De analyse van de resultaten voor het gelijkvormige kleine schip [7] geeft een omkering in rangorde van EKSP en SNELH, wat nogmaals wijst op de invloed van het stuurgedrag.

Het rangnummer voor het plaatsvoorschrift PLTS is ook duidelijk verschillend. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het steeds aanhouden van het midden

van de vaargeul door de loods, bij het naderen van de haven, ook als het plaatsvoorschrift anders aangeeft. De automaat houdt steeds of het midden van de geul, of het midden van de bovenstroomse helft van de geul aan afhankelijk van het ingestelde vaardevies.

6.4 Verschillen van de resultaten van het wiskundig model en het schaalmodel

De enige exakte overeenkomst tussen het wiskundig model en het fysisch schaalmodel is de stuurautomaat en de toerentalautomaat. Voor het overige zijn de volgende verschillen aan te geven:

- De in het manoeuvreermodel gebruikte coëfficiënten leiden tot andere waarden voor de karakteristieke kentallen bij draaicirkel- en zigzagproeven dan met het schaalmodel worden verkregen (zie tabel 9 en 10). Dus verschillen de modellen al op stil water.
- Het stroombeeld is bij de schaalmodelproeven niet stationair door de aanwezighe neren, terwijl dit bij het wiskundig model wel wordt aangenomen. Uit het herhaald uitvoeren van proeven bij het fysisch onderzoek blijkt echter dat een zeer geringe spreiding in de uitkomsten optreedt. Daaruit kan afgeleid worden dat het niet stationair zijn van het stroombeeld het resultaat weinig of niet heeft beïnvloed.
- De relatie tussen de stroomkrachten werkend op het schip en het stroomveld wordt in het wiskundig model gesimuleerd door een lokale relatieve beweging te gebruiken. In het schaalmodel zal eerder een scheepsgemiddelde relatieve beweging optreden dan een lokale relatieve beweging.

Bij het huidige onderzoek is niet nagegaan in hoeverre door aanpassing van de manoeuvreercoëfficiënten op basis van de draaicirkel en zigzagproeven de overeenkomst tussen de fysische proeven en de proeven met het wiskundig model te vergroten is. Wel is nagegaan in hoeverre het gebruik van een scheepsgemiddelde relatieve beweging tot verbetering leidt. De rangorden van schaalmodel en wiskundig model kunnen daarmee met elkaar in overeenstemming worden gebracht. De numerieke overeenkomst neemt echter wel af. Zoals verwacht wordt de uitwijking uit de baan verkleind door het middelen van de stroomsnelheid. Wat de rangorden betreft is het opmerkelijk dat door gebruik te maken van de scheepsgemiddelde relatieve beweging een zesde plaats verkregen wordt voor EKSP als het vaargedrag alleen door BAAN bepaald wordt. Dit suggereert dat toepassing van een scheepsgemiddelde relatieve beweging in plaats van een

lokale relatieve beweging meer overeenstemt met de werkelijkheid: De verschillen tussen de scheepsgemiddelde stroomsnelheden bij EKSP1 en EKSP2 zullen kleiner zijn dan de verschillen tussen de lokale snelheden bij EKSP1 en EKSP2 en overeenkomstig de stroomkrachten en daardoor de uitwijkingen uit de gewenste baan.

7. Konklusies

Op grond van berekeningen met het wiskundig model kan gekonkludeerd worden dat binnen de onderzochte, voor de praktisch relevant geachte variaties de faktor stroomsnelheid het meest bepalend is voor het scheepsgedrag.

Na de faktor stroomsnelheid vormen de factoren stroomsnelheidsverdeling en scheepssnelheid de belangrijkste factoren. Hun onderlinge rangorde blijkt nog af te hangen van schijnbaar geringe verschillen tussen de gekozen snelheidsverdelingen.

Verschuiving van de gewenste baan ten opzichte van de lichtenlijn blijkt een te verwaarlozen invloed te hebben op het vaargedrag ten gevolge van de nagenoeg uniforme snelheidsverdeling in dwarsrichting.

Alleen de invloed van de interacties tussen de stroomsterkte en de vorm van de dwarsstroom en tussen de stroomsterkte en de scheepssnelheid zijn volgens de berekeningen nog van belang voor het vaargedrag.

Bovenstaande konklusies worden ook bevestigd door de resultaten verkregen met het schaalmodel en met de manoeuvreersimulator. Numeriek kunnen nog grote verschillen optreden in het gevonden vaarbaanbereik en roerhoekbereik door de beschouwde onderzoeksmethoden (schaalmodel, manoeuvreersimulator en wiskundig model). De onderlinge verschillen in baanbereik bedragen ongeveer 25-80%. De verschillen in roerhoek bedragen gemiddeld 6° - 13° .

Het wiskundig model is gebleken een zinvol en eenvoudig toe te passen hulpmiddel te zijn bij het gevoeligheidsonderzoek.

De keuze van een definitie voor het vaargedrag beïnvloedt de gevonden rangorde.

LITERATUUR

- 1 Schepen in dwarsstroom - Wiskundig gevoeligheidsonderzoek,
Waterloopkundig Laboratorium,
R775/W252.
- 2 Schepen in dwarsstroom - Enige aspecten van het wiskundig
gevoeligheidsonderzoek,
Waterloopkundig Laboratorium,
R775/W252-V
- 3 Schepen in dwarsstroom - Fysisch gevoeligheidsonderzoek,
Waterloopkundig Laboratorium,
R775 deel IX/M1670, oktober 1983.
- 4 Schepen in dwarsstroom - Gevoeligheidsonderzoek,
MARIN rapport no. 03010-1-ms, 1981.
- 5 Schepen in dwarsstroom - Stroombeeld voor een havenmond,
Waterloopkundig Laboratorium,
R775/M1587 deel II, april 1979.
- 6 Abkowitz, M.A.,
Lectures on ship hydrodynamics, steering and manoeuvrability,
HyA Report Hy-5, december 1964.
- 7 Schepen in dwarsstroom-Analyse simulatoronderzoek
Waterloopkundig Laboratorium,
R 775 deel XIII/R1954, december 1985

	Tanker			
	groot		klein	
L	289.8	m	173	m
B	44.0	m	26	m
T	17.5	m	10.5	m
DWT	160,000		43,200	
V _{max}	12.0	kn	9.3	kn
n _{max}	85	rpm	85	rpm

Tabel 1 Eigenschappen van een tanker

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	X	X	X	X
	PLTS 2	X	X	X	X
SNELH 2	PLTS 1	X	X	X	X
	PLTS 2	X	X	X	X

Tabel 2 Proevenschema

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	167.47	58.49	84.95	43.27
	PLTS 2	183.84	58.39	84.53	40.28
SNELH 2	PLTS 1	253.30	92.82	162.01	82.73
	PLTS 2	294.28	96.74	161.3	77.22

Tabel 3a Vaarbaan bereik (BAAN) in m voor de manoeuvres bepaald met het wiskundig model voor proefkondities afgeleid van de schaalmodelproeven (FYS-serie)

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	52.6	49.0	43.8	30.5
	PLTS 2	52.7	45.4	42.1	33.1
SNELH 2	PLTS 1	70.0	69.4	47.6	44.0
	PLTS 2	70.0	63.5	54.0	48.0

Tabel 3b Roerhoekbereik (ROER) in ° voor manoeuvres bepaald met het wiskundig model voor proefkondities afgeleid van de schaalmodelproeven (FYS-serie)

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	173.12	64.7	111.76	49.07
	PLTS 2	170.78	63.12	127.85	51.74
SNELH 2	PLTS 1	282.63	101.44	201.52	85.91
	PLTS 2	286.03	102.44	199.34	85.54

Tabel 4a Vaarbaanbereik (BAAN) in m voor de manoeuvres bepaald met het wiskundig model voor proefkondities afgeleid van de proeven op de manoeuvreersimulator (SIM-serie)

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	54.1	45.2	55.1	37.9
	PLTS 2	53.1	44.8	46.5	39.5
SNELH 2	PLTS 1	62.3	63.2	65.4	49.6
	PLTS 2	62.3	63.7	66.4	48.3

Tabel 4b Roerhoekbereik (ROER) in ° voor de manoeuvres bepaald met het wiskundig model voor proefkondities afgeleid van de proeven op de manoeuvreersimulator (SIM-serie)

FAKTOR	SIMULATOR	WISKUNDIG MODEL		FY S I S C H MODEL
		SIM	FYS	
SNELH	3, 4, 1*	2, 2, 1	3, 2, 2	2, 2, 2
PLTS	6, 6, 6	10, 8, 8	9, 8, 10	7, 5, 8
EKSP	2, 2, 7	3, 3, 4	2, 3, 1	3, 6, 1
STRM	1, 1, 2	1, 1, 2	1, 1, 3	1, 1, 4
SNELH * PLTS	8, 7, 5	8, 10, 7	10, 10, 9	8, 7, 9
SNELH * EKSP	7, 5, 8	6, 6, 10	7, 9, 4	9, 8, 7
SNELH * STRM	5, 8, 4	4, 4, 5	5, 5, 5	4, 3, 3
PLTS * EKSP	10, 9, 10	9, 7, 9	6, 6, 6	10, 10, 6
PLTS * STRM	9, 10, 9	7, 9, 6	8, 7, 8	6, 9, 5
EKSP * STRM	4, 3, 3	5, 5, 3	4, 4, 7	5, 4, 10

* n, p, q : n volgorde MANOVA (BAAN, ROER),
p volgorde ANOVA (BAAN),
q volgorde ANOVA (ROER)

Tabel 5 Rangorde der factoren volgens de onderzoekmethoden: manoeuvreersimulator, wiskundig model, fysisch schaalmodel

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNE LH 1	PLTS 1	143	78	158	76
	PLTS 2	155	69	155	67
SNE LH 2	PLTS 1	230	116	267	112
	PLTS 2	204	115	230	111

Tabel 6a Vaarbaanbereik (BAAN) in m voor de manoeuvres, uitgevoerd in het fysisch schaalmodel

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNE LH 1	PLTS 1	48	58	42	39
	PLTS 2	55	51	38	39
SNE LH 2	PLTS 1	63	45	45	43
	PLTS 2	64	50	52	51

Tabel 6b Roerhoekbereik (ROER) in ° voor de manoeuvres uitgevoerd in het fysisch schaalmodel

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	238/227*	76.7/52	79/58	72/42
	PLTS 2	215/219	94/45	104/56	58/20
SNELH 2	PLTS 1	217/153	123/98	146/81	87/50
	PLTS 2	240/166	141/99	168/90	107/54

* a/b a: gemiddelde vaarbaanbereik
b: vaarbaanbereik van de gemiddelde vaarbaan

Tabel 7a Vaarbaanbereik (BAAN) in m voor de manoeuvres uitgevoerd op de manoeuvreersimulator

		EKSP 1		EKSP 2	
		STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 1					
SNELH 1	PLTS 1	59/45*	57/44	63/58	53/35
	PLTS 2	62/46	57/43	66/62	54/42
SNELH 2	PLTS 1	66/50	66/48	68/58	64/53
	PLTS 2	67/50	67/47	67/48	62/47

* a/b a: gemiddeld roerhoekbereik
b: roerhoekbereik van het gemiddeld roerhoek verloop

Tabel 7b Roerhoekbereik (ROER) in ° voor de manoeuvres uitgevoerd op de manoeuvreersimulator

		EKSP 1				EKSP 2			
		STRM 1		STRM 2		STRM 1		STRM 2	
DEVS 1									
SNELH 1	PLTS 1	238	143	76	78	79	158	72	76
		173 *	167	64	58	111	84	49	43
SNELH 1	PLTS 2	215	155	94	69	104	155	58	67
		170	183	63	58	127	84	51	40
SNELH 2	PLTS 1	217	230	123	116	146	267	87	112
		282	253	101	92	201	164	85	82
SNELH 2	PLTS 2	240	204	141	115	168	230	107	111
		286	294	102	96	199	161	85	77

- a_{*}b a. BAAN volgens simulatorproeven
c d b. BAAN volgens schaalmodelproeven
 c. BAAN volgens wiskundig model (SIM-serie)
 d. BAAN volgens wiskundig model (FYS-serie)

Tabel 8a Vaarbaanbereiken volgens diverse onderzoekmethoden

		EKSP 1				EKSP 2			
		STRM 1		STRM 2		STRM 1		STRM 2	
DEVS 1									
SNELH 1	PLTS 1	59	48	57	58	63	42	53	39
		54 *	52	45	49	55	43	37	30
SNELH 1	PLTS 2	62	55	57	51	66	38	54	39
		53	52	44	45	46	42	39	33
SNELH 2	PLTS 1	66	63	66	45	68	45	64	43
		62	70	63	69	65	47	49	44
SNELH 2	PLTS 2	67	64	67	50	67	52	62	51
		62	70	63	63	66	54	48	48

- a_{*}b a. ROER volgens simulatorproeven
c d b. ROER volgens schaalmodelproeven
 c. ROER volgens wiskundig model (SIM-serie)
 d. ROER volgens wiskundig model (FYS-serie)

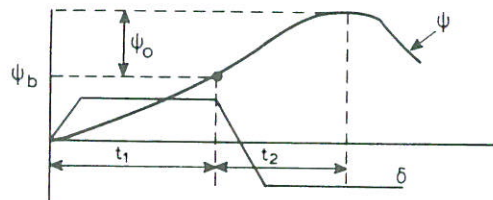
Tabel 8b Roerhoekbereiken volgens diverse onderzoekmethoden

n r.p.m.	40.5		85.0	
δ	r(MM)	r(FM)	r(MM)	r(FM)
-35.0	.1767	0.19	.3745	0.437
-25.0	.1766	0.17	.3558	0.41
-15.0	.1663	0.13	.3222	0.29
-10.0	.1563	0.10	.2957	0.18
- 5.0	.1394	0.065	.2506	0.07
- 2.0	.1179		.1705	-0.05
0.0	.0329	-0.01	.0356	-0.09
2.0	-.0125		-.0591	-0.14
5.0	-.1115	-0.06	-.2112	-0.22
10.0	-.1453	-0.11	-.2785	-0.26
15.0	-.1596	-0.13	-.3109	-0.245
25.0	-.1742	-0.15	-.3501	-0.33
35.0	-.1768	-0.185	-.3722	-0.36

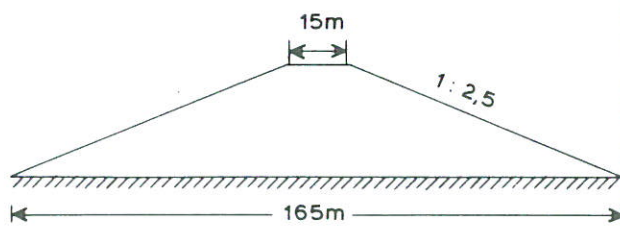
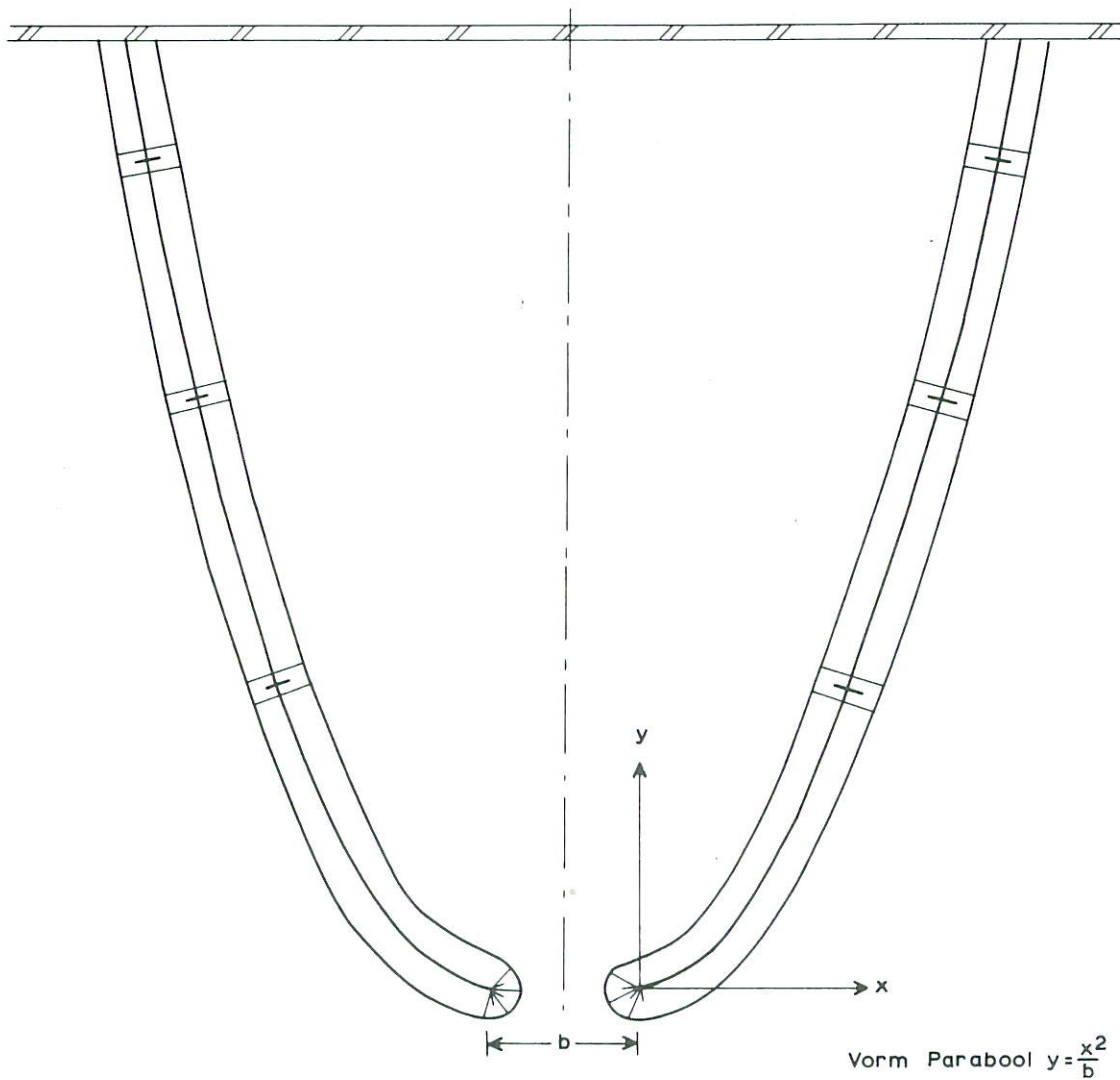
Tabel 9 Resultaten van draaicirkelproeven met het wiskundig model en het fysisch schaalmodel

n r.p.m.	Ψ_b ($^{\circ}$)	δ ($^{\circ}$)	t'_1 (s)		t_2 (s)		Ψ_o ($^{\circ}$)	
			Wis	Fys	Wis	Fys	Wis	Fys
40.5	5	10	147		99	107	3.95	6.2
40.5	10	10	207	165	120	90	6.34	5.5
40.5	30	10	378	400	165	65	12.01	5.0
40.5	5	20	102	91	90	72	5.77	5.0
40.5	10	20	144	114	108	60	8.88	4.6
40.5	30	20	264	251	126	60	12.01	5.0
40.5	5	35	78	83	81	41	7.74	4.5
40.5	10	35	108	101	90	48	9.99	5.6
40.5	30	35	204	193	96	57	11.10	7.0
85.0	5	10	69	68	51	31	5.03	2.8
85.0	10	10	96	105	60	38	7.21	4.4
85.0	30	10	180	183	75	27	11.44	4.0
85.0	5	20	51	44	48	33	7.77	10.5
85.0	10	20	69	70	54	40	9.58	8.5
85.0	30	20	132	124	57	42	12.14	8.1
85.0	5	35	42	35	48	38	11.30	9.4
85.0	10	35	54	60	48	41	11.69	12.5
85.0	30	35	105	109	48	34	12.97	9.7

t_1 time to reach execute
 t_2 doorzwaaitijd
 Ψ_o doorzwaaihoek
 Ψ_b execute hoek



Tabel 10 Resultaten van zigzagproeven met het wiskundig model en het fysisch model



DWARSDOORSNEDE HAVENHOOFD
SCHAAL 1:2000

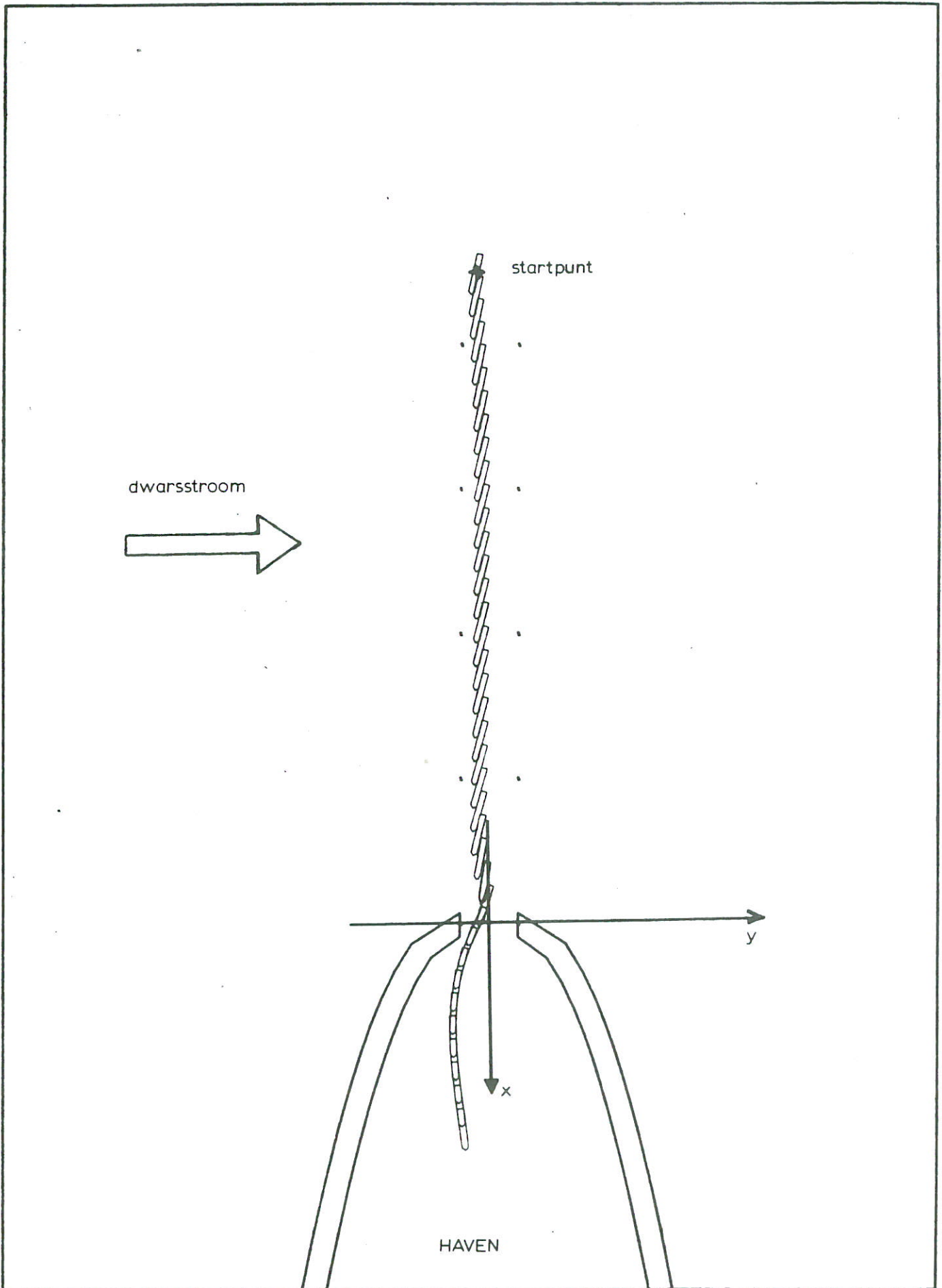
SCHIP	VAARWEG	
	h (m)	b (m)
200.000 TDW TANKER	22,7	400
43.000 TDW TANKER	13,6	240

HAVENCONFIGURATIE

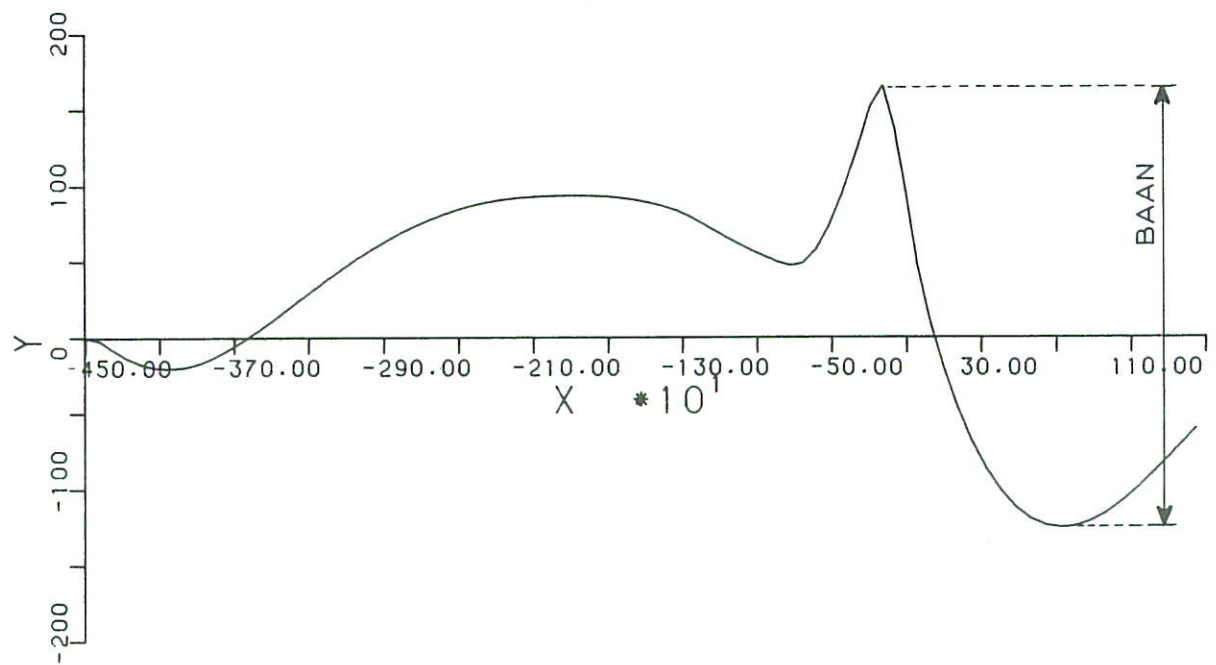
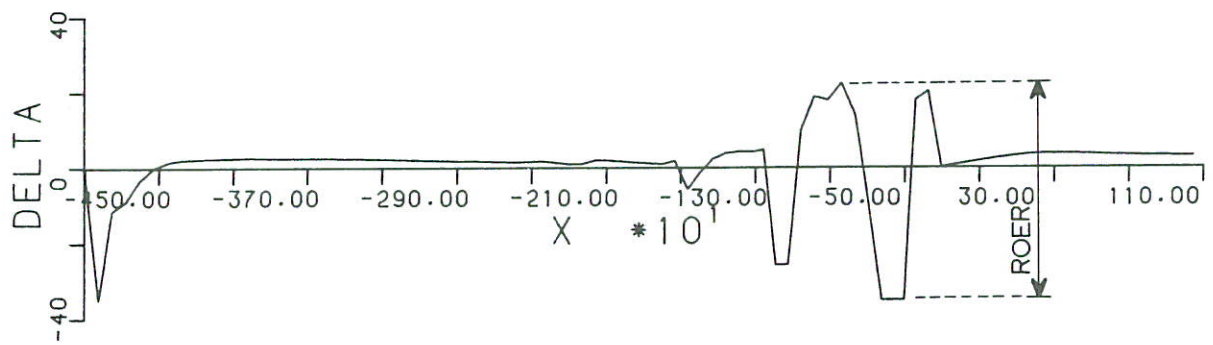
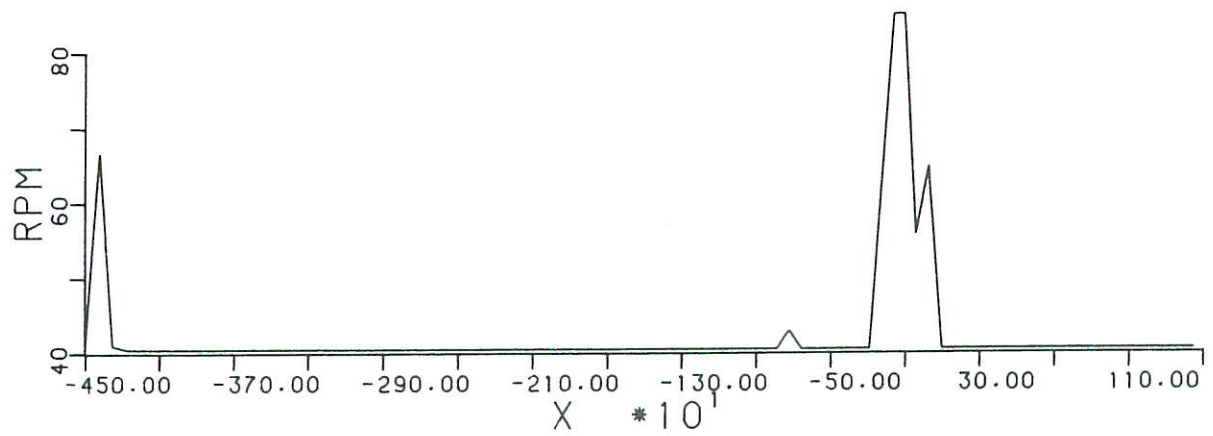
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W 252

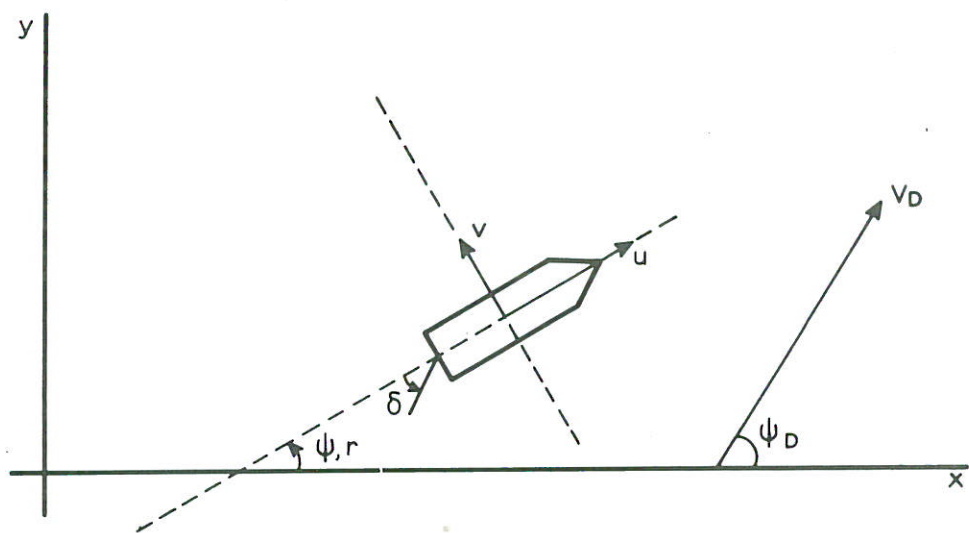
FIG. 1



KARAKTERISTIEKE VAARBAAN



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 SIM., STRM=1, EKSP=1, DEVS=4.

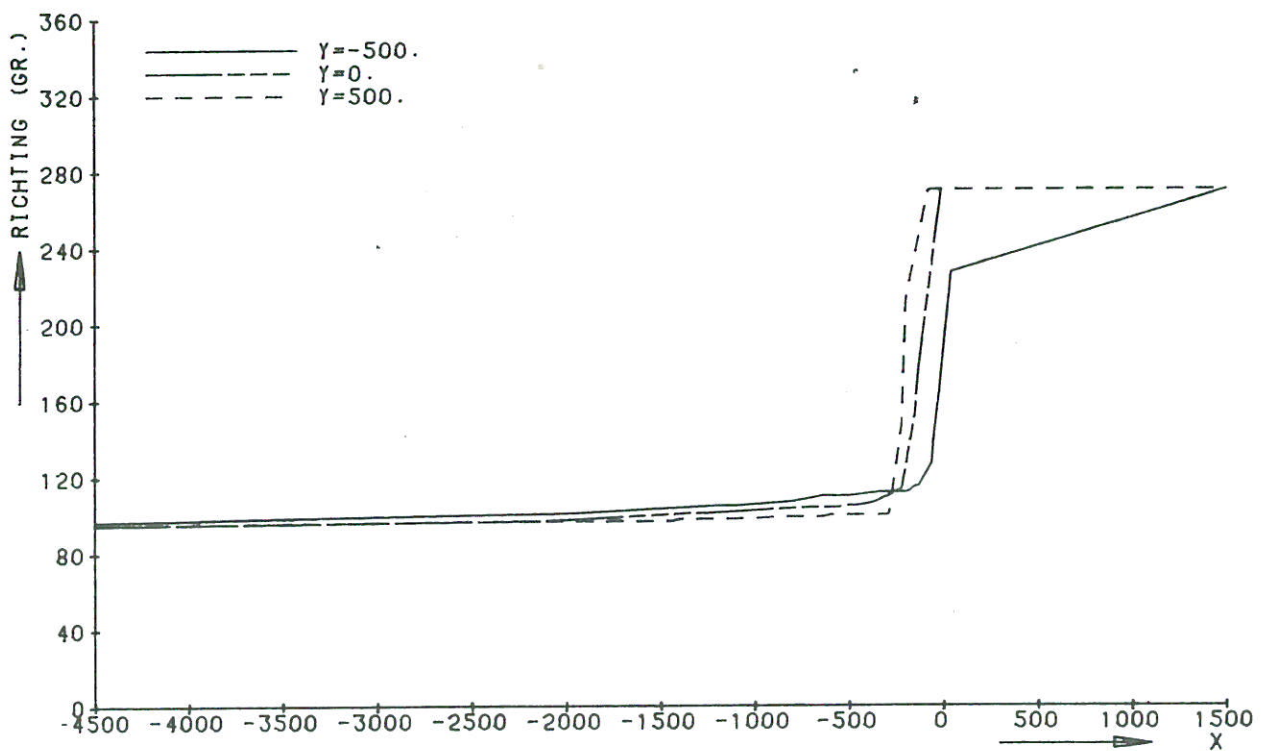
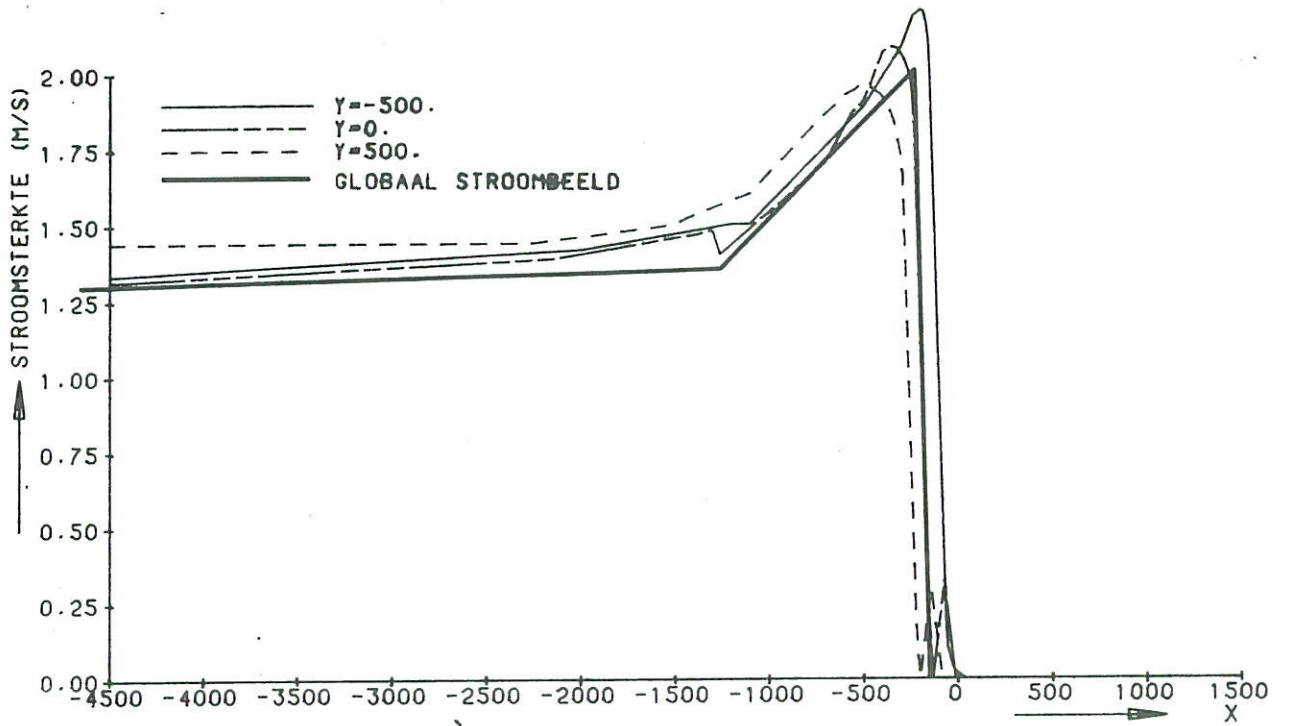


DEFINITIESCHETS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W 252

FIG. 4

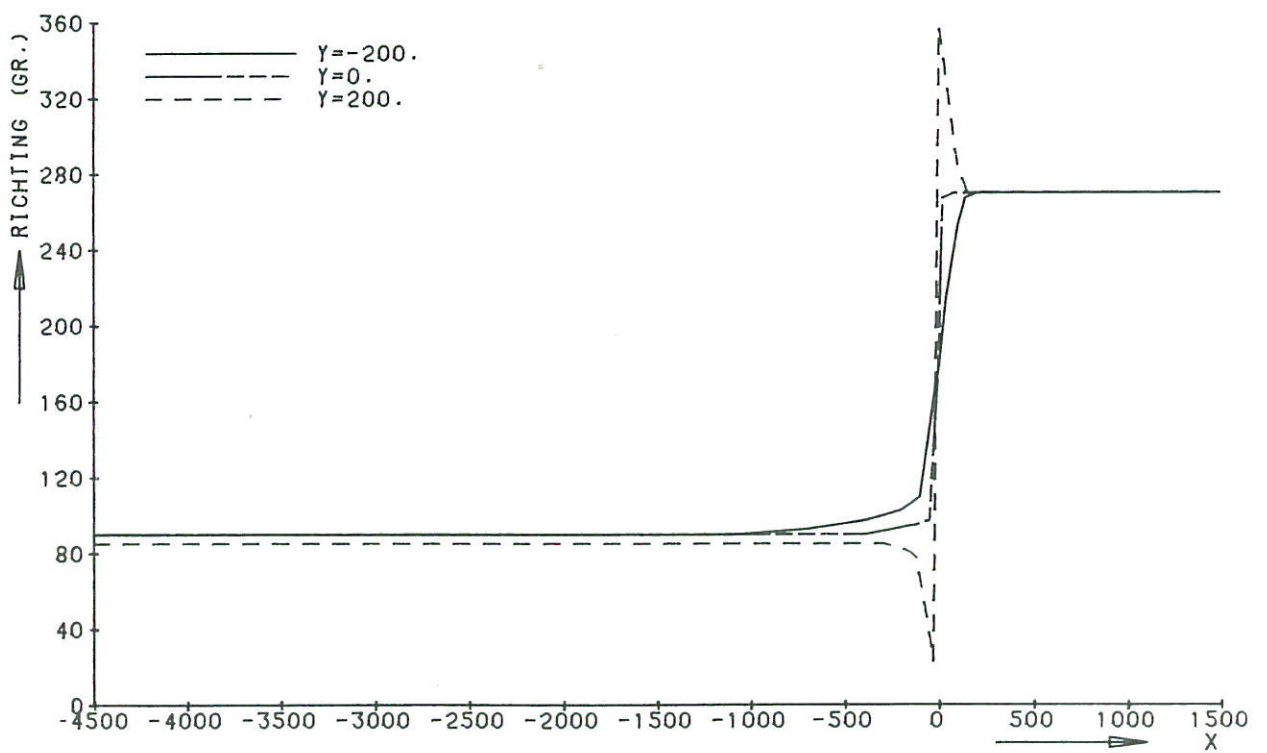
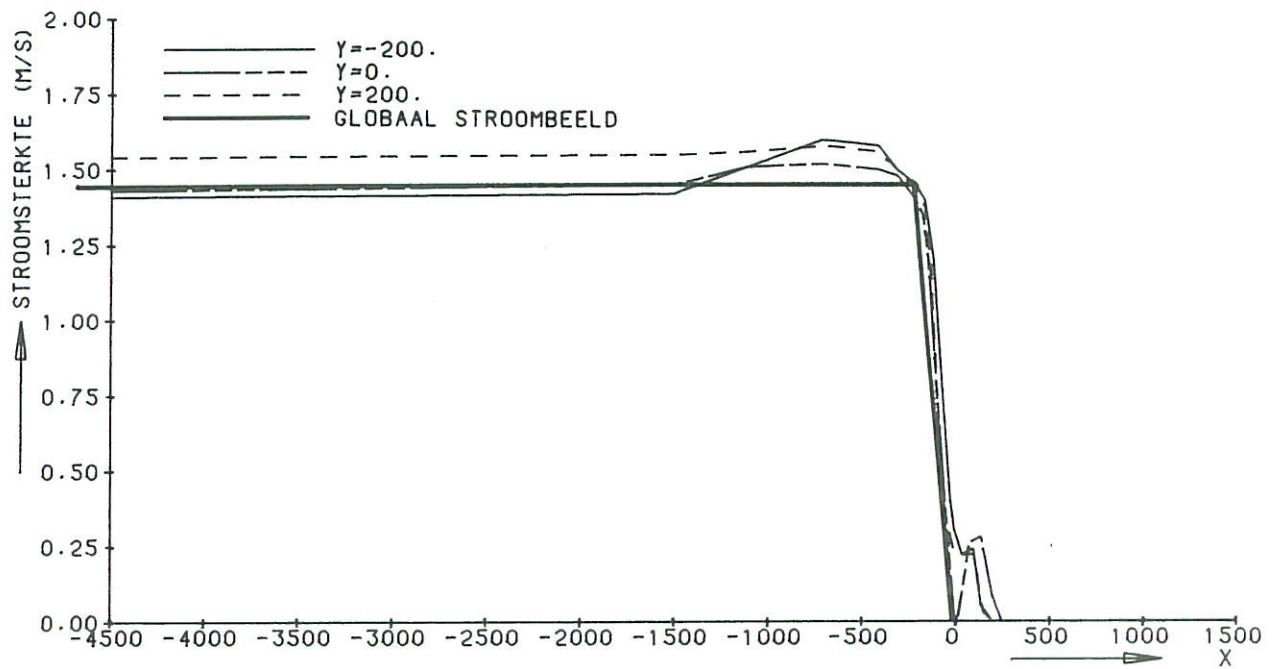


SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM
SIM., STRM=1, EKSP=1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 5

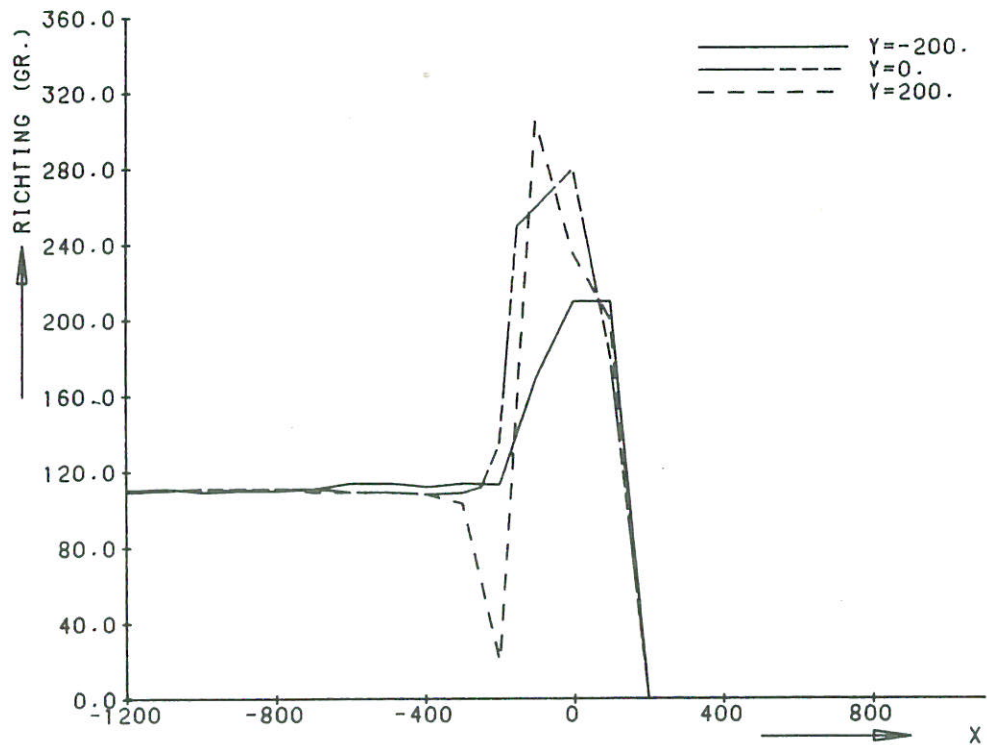
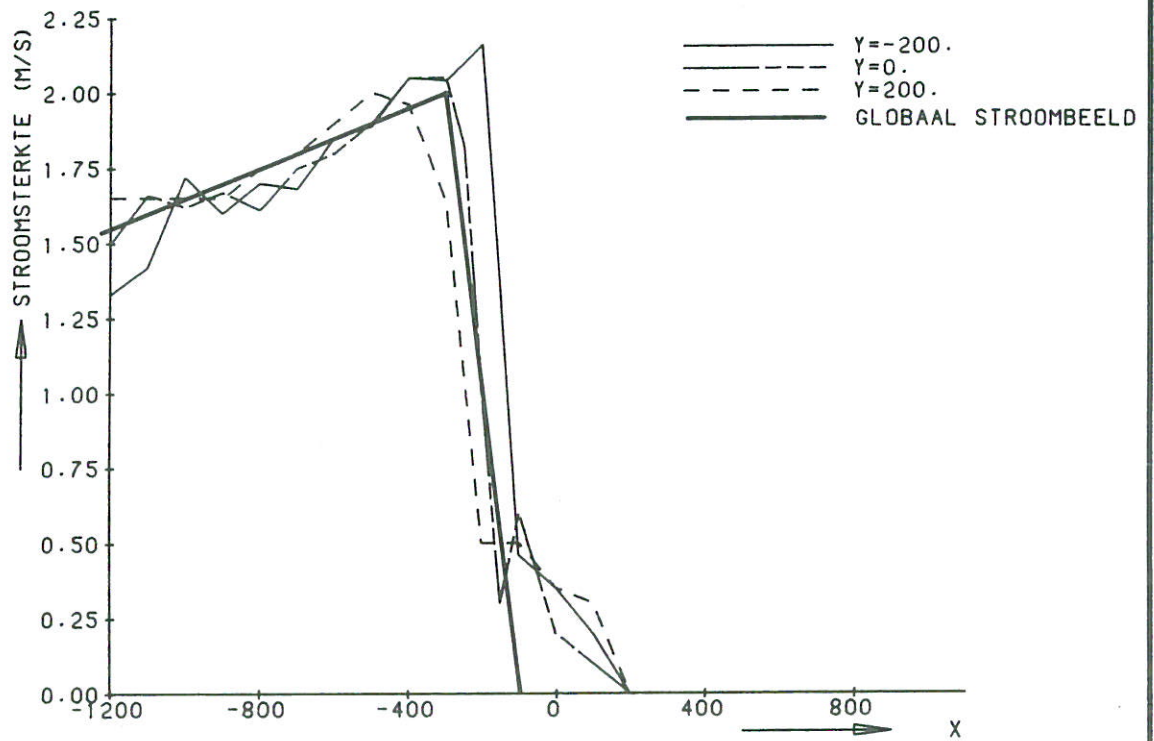


SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM
SIM., STRM=1, EKSP=2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 6

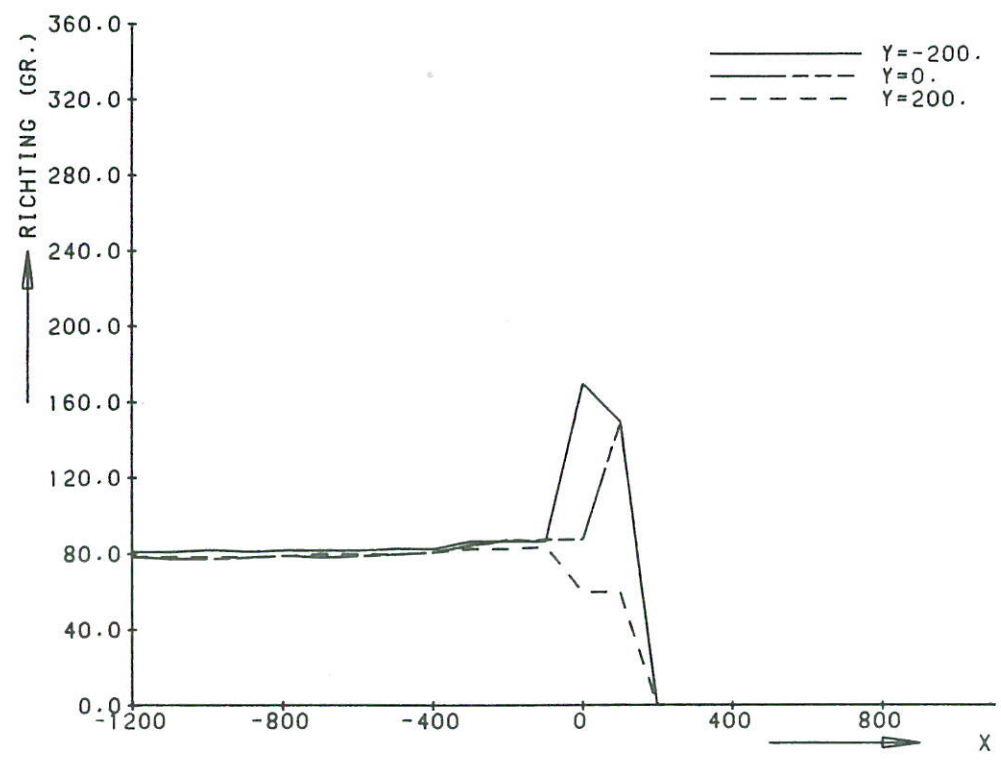
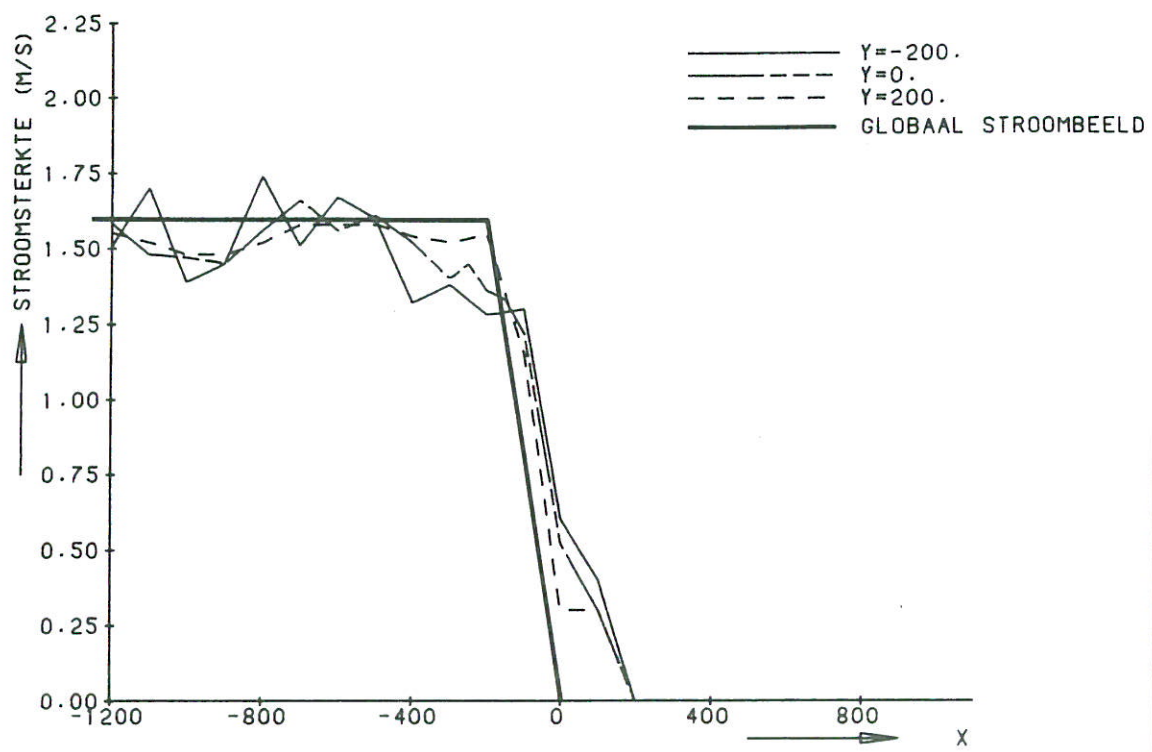


SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM
FYS., STRM=1, EKSP=1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 7



SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM FYS., STRM=1, EKSP=2		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	W252	FIG. 8

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands