

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

schepen in dwarsstroom

enige aspecten van het wiskundig gevoeligheids-
onderzoek

AFGEHANDELD

verslag wiskundige berekeningen

R 775 deel VIII
W 252 deel V

december 1983

F25

tow

toegepast onderzoek
waterstaat

16.MRT1987

BIBLIOTHEEK
Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT

schepen in dwarsstroom

enige aspecten van het wiskundig gevoeligheids-
onderzoek

verslag wiskundige berekeningen

R 775 deel VIII
W 252 deel V

december 1983

F25

tow

toegepast onderzoek
waterstaat

INHOUD

	blz.
1	<u>Inleiding</u> 1
2.	<u>Beschrijving van het wiskundig model</u> 3
2.1	Beschrijving van de manoeuvreervergelijkingen..... 3
2.2	Bepaling van de krachten tengevolge van een dwarsstroom..... 3
2.2.1	Algemeen..... 3
2.2.2	Een relatieve bewegingshypothese gebaseerd op een lokale snelheid... 5
2.2.3	Een relatieve bewegingshypothese gebaseerd op een gemiddelde stroomsnelheid..... 7
2.3	Beschrijving van de stuurautomaat..... 9
2.4	Beschrijving van de toerenautomaat..... 10
3.	<u>Beschrijving van de proefcondities van het gevoeligheidsonderzoek</u> ... 11
3.1	Algemeen..... 11
3.2	Proefvaarten op de manoeuvreersimulator..... 11
3.3	Proefvaarten in een fysisch schaalmodel..... 14
4.	<u>Beschrijving van de aanvullende berekeningen</u> 16
5	<u>Bespreking van de rekenresultaten</u> 20
5.1	Bespreking van de simulatorvaarten..... 20
5.2	Bespreking van de vaarten in het schaalmodel..... 21
5.2.1	Gevoeligheidsonderzoek..... 21
5.2.2	Bespreking van de vaarbanen..... 22
6	<u>Conclusies</u> 24

Literatuur

TABELLEN

- 1 Eigenschappen van de beproefde tanker
- 2 Proevenschema voor het volledig wiskundig model, afgeleid van de proeven met een schaalmodel (serie a)
- 3 Startwaarden voor diverse grootheden bij het berekenen van de vaarbanen voor het schaalmodel (serie a)
- 4 Resultaten van draaicirkelproeven met het wiskundig model en het fysisch schaalmodel
- 5 Resultaten van zigzagproeven met het wiskundig model en het fysisch model
- 6 Rangorde van de factoren volgens drie onderzoekmethoden
- 7 Het baanbereik volgens drie onderzoekmethoden
- 8 Maximale afwijking van de gewenste baan (in L) bij evenwichtsomstandigheden tengevolge van de automaatafstelling (simulatorvaarcondities)
- 9 Evenwichtsstartwaarden bij de berekening van de vaarbaan voor proefcondities afgeleid uit simulatorproeven.
- 10 Coëfficiënten van de gewijzigde stuurautomaat (AUTO 5) bij de proeven afgeleid uit simulatorvaarten
- 11 Maximale uitwijking uit de gewenste baan voor een aantal simulatorproefcondities.
- 12 Minimale uitwijking uit de gewenste baan voor een aantal simulatorproefcondities
- 13 Het baanbereik voor een aantal simulatorproefcondities
- 14 Evenwichtscondities voor proeven analoog aan de schaalmodelproeven
- 15 Een aantal baankenmerken van vaarbanen bepaald met een wiskundig model voor de schaalmodel proefconditie: EKSP1, STRM1, DEVS2
- 16 Een aantal baankenmerken van vaarbanen bepaald met een wiskundig model voor de schaalmodelproefcondities: EKSP2, STRM1, DEVS4
- 17 Automaatafstellingen (AUTO 5) gebruikt bij de berekening met het wiskundig model ter simulatie van schaalmodelproeven
- 18 Resultaten bepaald met het wiskundig model voor de schaalmodelproefcondities (AUTO5, scheepsgemiddelde relatieve beweging)
- 19 F-waarden bepaald met M(ANOVA) uit de resultaten verkregen met het wiskundige model voor de fysische proefcondities
- 20 F-waarden bepaald met (M)ANOVA uit de resultaten verkregen met het wiskundige model voor de fysische proefcondities

FIGUREN

- 1 Definitieschets
- 2 Karakteristieke vaarbaan
- 3 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom SIM, STRM = 1, EKSP = 1
- 4 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom SIM, STRM = 1, EKSP = 2
- 5...8 Vaarbaan, roerhoek en toerental voor de condities SIM, DEVS = 4, AUTO = 5
- 9 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom FYS, STRM = 1, EKSP = 1
- 10 Snelheidsverdeling van de dwarsstroom FYS, STRM = 1, EKSP = 2
- 11 Invloed van het startpunt, de stuurautomaat en het relatieve bewegingsprincipe op de vaarbaan FYS, EKSP = 1, STRM = 1, DEVS = 2
- 12 Invloed van de stuurautomaat en het relatieve bewegingsprincipe op de vaarbaan FYS, EKSP = 2, STRM = 1, DEVS = 4
- 13 Invloed van de stuurautomaat en het relatieve bewegingsprincipe op de vaarbaan (evenwichtsstartpunt). FYS, EKSP = 2, STRM = 1, DEVS = 4
- 14...29 Vaarbaan, roerhoek en toerental voor de condities: FYS, AUTO = 5

SYMBOLLEN

B	breedte van het schip
C_1, \dots, C_6	coëfficiënten in de stuurautomaat
DEVS	vaardevies
EKSP	snelheidsverdeling van de dwarsstroom
H_a, H_b	hulpgrootheden
l	variabele
L	lengte van het schip
L_a	anticipatielengte
M	massa van het schip
N_T	moment werkend op het schip
n	toerental
n_{gew}	gewenst toerental
n_{max}	maximum toerental
PLTS	plaatsvoorschrift
r	koershoeksnelheid
r_c	karacteristieke koershoeksnelheid afgeleid uit de snelheidsverdeling van de dwarsstroom
r_r	relatieve koershoeksnelheid
r_c^*	de lokale koershoeksnelheid afgeleid uit de snelheidsverdeling van de dwarsstroom
SNELH	snelheidsvoorschrift
STRM	sterkte van de dwarsstroom
T	diepgang van het schip
u, v	snelheidscomponenten van het schip
u_c, v_c	karacteristieke snelheidscomponenten van de dwarsstroom
u_r, v_r	relatieve snelheidscomponenten
$\bar{u}_{cx}, \bar{v}_{cx}, \bar{u}_{cy}, \bar{v}_{cy}$	over de scheepslengte gemiddelde dwarsstroomgradiënten
$\bar{u}_{cx1}, \text{etc.}$	over de scheepslengte gemiddelde momenten van de dwarsstroomgradiënten
$u_{cx}^*, v_{cx}^*, u_{cy}^*, v_{cy}^*$	lokale gradiënten van de dwarsstroom
V_D	grootte van stroomsnelheidsvector
\tilde{V}_d	globale verdeling van de dwarsstroom
V_{max}	maximum scheepssnelheid
X_T, Y_T	krachten werkend op het schip
$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}$	toegevoegde traagheidsmomenten en massa

SYMBOLLEN (vervolg)

x_G	afstand zwaartepunt tot het midden van het schip
y_o	afstand van schip tot de gewenste baan
y_{gew}	de gewenste vaarbaan
Δt	tijdstap van de numerieke oplosmethode
δ	roerhoek
δ_m	kritische roerhoek
δ_{max}	maximale roerhoek
ψ	koershoek
ψ_D	richting van de dwarsstroom
ψ_o	afwijking t.o.v. evenwichtskoershoek
ψ_{even}	evenwichtskoershoek
∇	waterverplaatsing van het schip

SCHEPEN IN DWARSSTROOM

Enige aspecten van het wiskundig gevoeligheidsonderzoek

1. Inleiding

In het kader van het T.O.W. onderzoek "Schepen in dwarsstroom" is een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd om vast te stellen in welke mate bepaalde factoren de hinder beïnvloeden die een schip in dwarsstroomomstandigheden ervaart. Dit onderzoek is uitgevoerd met een drietal onderzoeksmethoden een manoeuvreersimulator [3], een fysisch schaalmodel [1] en een volledig wiskundig model [2]. Met elke onderzoeksmethode afzonderlijk is een rangorde vastgesteld van de factoren naar de mate waarin zij de hinder beïnvloeden. Het blijkt dat de rangorde van de factoren beïnvloed wordt door de onderzoeksmethode zelf. Deze verschillen in rangorde moeten terug te voeren zijn op verschillen in schematisatie, inherent aan de onderzoeksmethoden en aan verschillen in gebruikte proefcondities. In dit verslag wordt van een aantal mogelijke verschillen in opzet nagegaan of zij de gevonden verschillen in rangorde kunnen verklaren. De volgende effecten worden nagegaan:

- de invloed van de stuurautomaat
- de invloed van de startcondities
- de invloed van de relatieve bewegingshypotheseën.

Bij de gevoeligheidsanalyse die met het wiskundig model is uitgevoerd is gestreefd naar het zo klein mogelijk houden van de verschillen in proefopzet met de andere onderzoeksmethoden. Dit heeft in [2] geleid tot het uitvoeren van twee series berekeningen, een serie die zo nauw mogelijk aansluit bij de simulatorproeven en één serie die zo nauw mogelijk aansluit bij de proeven in het schaalmodel. Deze aanpak is gevolgd om bij verschillen in rangorde bij de simulator en schaalmodelproeven het wiskundig model als intermediair te gebruiken. Bij de analyse van de rangorden verkregen met de simulator en met het wiskundig model of met het schaalmodel en met het wiskundig model, bleken echter de gevonden rangorden binnen deze combinaties niet identiek te zijn.

Bij beide series berekeningen is hetzelfde wiskundig model gebruikt. Het wiskundig model is zo samengesteld dat de verschillen met de andere methoden zo klein mogelijk zijn. Juist het zo klein mogelijk houden van deze verschillen zal op een aantal punten de bovengenoemde verschillen in rangorde juist veroorzaken.

Naast de rangorde bleken ook in de voorspelde waarden van het baanbereik (verschil tussen de maximale en minimale uitwijking van het schip tijdens een vaart) nog al grote verschillen te bestaan. In dit verslag zal worden nagegaan of door bovengenoemde wijzigingen van het in [2] gebruikte wiskundig model de gesignaleerde verschillen verklaard kunnen worden.

In hoofdstuk 2 zal ingegaan worden op het gebruikte wiskundig model. In hoofdstuk 3 worden de reeds eerder uitgevoerde berekeningen [2] en proefcondities beschreven. In hoofdstuk 4 wordt een motivatie gegeven van de aanvullende berekeningen en in hoofdstuk 5 worden de resultaten van deze berekeningen besproken. Tenslotte volgen in hoofdstuk 6 de conclusies.

Het onderzoek is uitgevoerd in het Laboratorium De Voorst van het Waterloorkundig Laboratorium door ir. C. Flokstra, die tevens dit verslag samenstelde.

2. Beschrijving van het wiskundig model

2.1 Beschrijving van de manoeuvreervergelijkingen

De manoeuvreervergelijkingen die bij de berekeningen worden gebruikt komen overeen met de vergelijkingen die in de MARIN manoeuvreersimulator zijn toegepast bij de uitvoering van het gevoeligheidsonderzoek [3]. Deze vergelijkingen zijn ook toegepast bij het wiskundig gevoeligheidsonderzoek [2]. De manoeuvreervergelijkingen hebben de volgende algemene vorm:

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

$$(M - Y_{\dot{v}}) \dot{v} + (Mx_G - Y_{\dot{r}}) \dot{r} = Y_T(u, v, r, \delta, n) - M v r \quad (2)$$

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

waarin:

$M, X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}$	massa en toegevoegde massa
$I_z, N_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}$	traagheidsmoment en toegevoegde momenten
u, v	snelheidscomponenten van het schip
x_G	afstand van middenschip tot zwaartepunt
r	rotatiesnelheid
X_T, Y_T, N_T	krachten en momenten op het schip uitgeoefend
n, δ	toerental, roerhoek

De uitdrukkingen van de krachten en momenten worden in [2] gegeven. In figuur 1 wordt de notatie en het assenstelsel gegeven.

2.2 Bepaling van de krachten tengevolge van een dwarsstroom

2.2.1 Algemeen

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 gerelateerd worden aan de stroomverdeling.

Uitgegaan wordt van het relatieve bewegingsprincipe. Dit principe houdt de veronderstelling in dat de kracht en het moment werkend op een vastgehouden schip tengevolge van een dwarsstroom gelijk zijn aan de kracht en het moment werkend op een schip dat met deze snelheid door stilstaand water wordt getrokken. Voor een uniforme dwarsstroom en oneindig diep water is deze veronderstelling juist. In geval van een variabele dwarsstroomverdeling zal een relevante stroomsnelheid gekozen moeten worden. De relatieve snelheden zijn dan te schrijven als:

$$u_r = u - u_c$$

$$v_r = v - v_c$$

(4)

$$r_r = r - r_c$$

De relatieve versnellingen worden gegeven door

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

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

(5)

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

Hierin zijn:

u, v, r de snelheidscomponenten en de koershoeknelheid van het schip
 u_c, v_c, r_c karakteristieke snelheidscomponenten en rotatie van het snelheidsveld
 u_r, v_r, r_r de relatieve snelheidscomponenten en rotatie

De krachten die door de stroom op het schip worden uitgeoefend (inclusief de stilwater - krachten), worden nu verkregen door in de uitdrukkingen voor de krachten en het moment X_T, Y_T, N_T , de argumenten u, v, r te vervangen door de relatieve snelheden: u_r, v_r, r_r en door de toegevoegde massa-krachten te betrekken op de relatieve versnellingen. De manoeuvreervergelijkingen geldig bij een dwarsstroom luiden dan:

$$(M-X_{\dot{u}})\dot{u} = X_T(u_r, v_r, r_r, \delta, n) + Mv_r - X_{\dot{u}} \dot{u}_c \quad (6)$$

$$(M-Y_{\dot{v}})\dot{v} = (Mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_T(u_r, v_r, r_r, \delta, n) - Mur + - Y_{\dot{v}} \dot{v}_c - Y_{\dot{r}} \dot{r}_c \quad (7)$$

$$(Mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_T(u_r, v_r, r_r, \delta, n) - Mx_G u_r + - N_{\dot{v}} \dot{v}_c - N_{\dot{r}} \dot{r}_c \quad (8)$$

De keuze van de representatieve dwarsstroomsnelheid bevat nog een grote mate van vrijheid. In het onderstaande worden twee mogelijke keuzen besproken, namelijk het model zoals gebruikt bij de MARIN simulatorstudie [3] en bij het wiskundig gevoeligheidsonderzoek [2] en het model beschreven in [5] waarmee ook voor deze studie berekeningen zijn uitgevoerd.

2.2.2 Een relatieve bewegingshypothese gebaseerd op een lokale snelheid

Bij het simulatormodel wordt bij de bepaling van de relatieve beweging uitgegaan van de lokale stroomsnelheid midscheeps. Indien het snelheidsveld van de dwarsstroom beschreven wordt door de grootte V_D en de richting ψ_D geldt voor de lokale stroomsnelheid in het scheepsvaste assenstelsel:

$$u_c = V_D \cos(\psi_D - \psi) \quad (9)$$

$$v_c = V_D \sin(\psi_D - \psi) \quad (10)$$

$$r_c = \sin(\psi_D - \psi) \left\{ \frac{\partial V_D}{\partial x} \cos \psi + \frac{\partial V_D}{\partial y} \sin \psi \right\} + V_D \cos(\psi_D - \psi) \left\{ \frac{\partial \psi_D}{\partial x} \cos \psi + \frac{\partial \psi_D}{\partial y} \sin \psi \right\} \quad (11)$$

waarin ψ de koershoek is.

De versnellingen afgeleid uit het dwarsstroomveld worden dan bepaald door de formules

$$\dot{u}_c = \cos(\psi_D - \psi) \frac{dV_D}{dt} - V_D \sin(\psi_D - \psi) \left(\frac{d\psi_D}{dt} - r \right) \quad (12)$$

$$\dot{v}_c = \sin(\psi_D - \psi) \frac{dV_D}{dt} - V_D \cos(\psi_D - \psi) \left(\frac{d\psi_D}{dt} - r \right) \quad (13)$$

waarin:

$$\frac{dV_D}{dt} = \frac{\partial V_D}{\partial x} (u \cos\psi - v \sin\psi) + \frac{\partial V_D}{\partial y} (u \sin\psi + v \cos\psi) \quad (14)$$

$$\frac{d\psi_D}{dt} = \frac{\partial \psi_D}{\partial x} (u \cos\psi - v \sin\psi) + \frac{\partial \psi_D}{\partial y} (u \sin\psi + v \cos\psi)$$

In het hier te beschrijven model wordt de invloed van de rotatieversnelling, afgeleid uit het stroomveld, verwaarloosd:

$$\dot{r}_c = 0 \quad (15)$$

Daarnaast wordt aan de relatieve rotatiesnelheid de volgende begrenzing opgelegd:

$$|r_r| \leq .18 u_r \quad (16)$$

In het algemeen zullen de waarden van V_D , ψ_D en hun afgeleiden bepaald moeten worden uit een in discrete punten gegeven snelheidsverdeling van de dwarsstroom. De interpolatieprocedure verloopt als volgt:

Het gehele veld wordt met driehoeken bedekt zodanig dat op de hoekpunten de stroomsnelheid en richting bekend is. Binnen een driehoek worden de lokale stroomsnelheid en -richting bepaald door lineaire interpolatie tussen de op de hoekpunten gespecificeerde waarden. De gradiënten van V_D en ψ_D binnen een driehoek zijn konstant en af te leiden uit de waarden van V_D en ψ_D op de hoekpunten. De procedure wordt afzonderlijk uitgevoerd voor de grootte en richting van de stroomsnelheid.

In [2] is ingegaan op moeilijkheden die kunnen ontstaan door de interpolatie uit te voeren op V_D en ψ_D . Door de interpolatie uit te voeren op de snelheidscomponenten, die dan op hoekpunten van de driehoeken gegeven worden, kunnen deze moeilijkheden worden voorkomen.

2.2.3 Een relatieve bewegingshypothese gebaseerd op een gemiddelde stroomsnelheid

De in de vorige paragraaf beschreven bewegingshypothese is gebaseerd op een lokale snelheid. Indien door een stroom met een grote gradiënt gevaren wordt zal een lokale snelheid de aanstroming van het schip slechts gebrekkig weer-
geven. Een over de scheepslengte gemiddelde stroomsnelheid is dan een meer
waarschijnlijke representatieve maat. De stroomsnelheden u_c , v_c worden dan ge-
definiëerd volgens de formules:

$$u_c = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} V_D(x+1 \cos\psi, y+1 \sin\psi) \cos\{\psi_D(x+1 \cos\psi, y+1 \sin\psi) - \psi\} dl \quad (17)$$

$$v_c = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} V_D(x+1 \cos\psi, y+1 \sin\psi) \sin\{\psi_D(x+1 \cos\psi, y+1 \sin\psi) - \psi\} dl \quad (18)$$

$$r_c = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r_c^*(x+1 \cos\psi, y+1 \sin\psi) dl \quad (19)$$

waarin (x,y) de coördinaten van het midden van het schip zijn in een ruimte
vast assenstelsel en r_c^* is de lokale rotatiesnelheid:

$$r_c^* = \left\{ \frac{\partial V_D}{\partial x} \cos\psi + \frac{\partial V_D}{\partial y} \sin\psi \right\} \sin(\psi_D - \psi) + \quad (20)$$

$$+ V_D \cos(\psi_D - \psi) \left\{ \frac{\partial \psi_D}{\partial x} \cos\psi + \frac{\partial \psi_D}{\partial y} \sin\psi \right\}$$

De versnellingen worden door de volgende uitdrukkingen gegeven:

$$\dot{u}_c = + v_c \cdot r + H_a \cos\psi + H_b \sin\psi \quad (21)$$

$$\dot{v}_c = - u_c \cdot r + H_b \cos\psi - H_a \sin\psi \quad (22)$$

waarin:

$$H_a = \bar{u}_{cx} \cdot \frac{dx}{dt} + \bar{u}_{cy} \frac{dy}{dt} + r(\bar{u}_{cyl} \cos\psi - \bar{u}_{cx1} \sin\psi) \quad (23)$$

$$H_b = \bar{v}_{cx} \cdot \frac{dx}{dt} + \bar{v}_{cy} \frac{dy}{dt} + r(\bar{v}_{cyl} \cos\psi - \bar{v}_{cx1} \sin\psi)$$

$$\bar{u}_{cx} = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u_{cx}^* dl \quad (24)$$

$$\bar{u}_{cx1} = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u_{cx}^* l dl$$

De uitdrukkingen voor \bar{u}_{cy} , \bar{v}_{cx} , \bar{v}_{cy} , \bar{u}_{cyl} , \bar{v}_{cx1} , \bar{v}_{cyl} zijn analoog.
Voorts geldt:

$$u_{cx}^* = \frac{\partial V_D}{\partial x} \cos\psi_D - V_D \frac{\partial \psi_D}{\partial x} \sin\psi_D$$

$$u_{cy}^* = \frac{\partial V_D}{\partial y} \cos\psi_D - V_D \frac{\partial \psi_D}{\partial y} \sin\psi_D \quad (25)$$

$$v_{cx}^* = \frac{\partial V_D}{\partial x} \sin\psi_D + V_D \frac{\partial \psi_D}{\partial x} \cos\psi_D$$

$$v_{cy}^* = \frac{\partial V_D}{\partial y} \sin\psi_D + V_D \frac{\partial \psi_D}{\partial y} \cos\psi_D$$

Voor \dot{r}_c kan een analoge uitdrukking worden afgeleid. Bij de berekeningen wordt echter gesteld:

$$\dot{r}_c = \frac{r_c(t) - r_c(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (26)$$

Ook bij deze interpretatie voor de relatieve bewegingshypothese wordt gesteld:

$$|r_r| \leq 0.18 u_r \quad (27)$$

De bovenstaande integralen worden numeriek met de trapeziumregel bepaald.

2.3 Beschrijving van de stuurautomaat

De stuurautomaat die bij de huidige berekeningen wordt toegepast stemt wat de algemene structuur betreft overeen met het model dat bij het fysisch [1] en wiskundig gevoeligheidsonderzoek [2] is toegepast. De automaat wordt beschreven door:

$$\delta = c_1 \dot{\psi}_o + c_2 \psi_o + c_3 \dot{y}_o + c_4 y_o + c_5 \tilde{V}_d(x+L_a) + c_6 \dot{\delta} \quad (28)$$

waarin c_1, \dots, c_6 coëfficiënten zijn

ψ_o	het verschil van de werkelijke koershoek met de gewenste
y_o	afstand van middenschip tot de gewenste baan
\tilde{V}_d	de globale snelheidsverdeling zoals bij de loods bekend geacht mag worden
L_a	anticipatielengte

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

$$|\delta| < \delta_{\max} \quad (29)$$

en door de maximale snelheid waarmee de roerstand kan veranderen:

$$|\dot{\delta}| < \dot{\delta}_{\max} \quad (30)$$

De bovenbeschreven roerautomaat is koers- en plaatsbehoudend.

De anticipatielengte wordt tweemaal de scheeps lengte gekozen. De coëfficiënten in de stuurautomaat zijn snelheidsafhankelijk. Bij de in [2] beschreven berekeningen zijn de coëfficiënten $c_1 \dots c_6$ overeenkomstig de in [1] afgeregelde coëfficiënten gekozen. Daarbij wordt echter niet voldaan aan de relatie

$$c_5 = -c_2 \frac{\psi_{\text{even}}}{V_d} \quad (31)$$

waarbij ψ_{even} de evenwichtskoershoek is bij een gegeven uniforme dwarsstroom V_d . Bij de huidige berekeningen wordt c_5 zo aangepast dat wel aan de bovenstaande relatie wordt voldaan, zodat bij een uniforme dwarsstroom de opgegeven gewenste baan kan worden gevolgd.

2.4 Beschrijving van de toerenautomaat

In het algemeen kan door toerenvariatie de manoeuvreerbaarheid van het schip veranderen en zal deze mogelijkheid door de loods in de besluitvorming worden betrokken. Bij de in [1] beschreven proeven met een fysisch schaalmodel is op zeer schematische wijze variatie van het toerental toegepast. Er is daarbij van uit gegaan dat een besluit tot aanpassing van het toerental alleen plaats heeft als door enkel roer te geven een gewenste manoeuvre niet kan worden uitgevoerd. Dit leidt tot de volgende schematisatie:

$$n = n_{\text{gew}} \text{ voor } |\delta| < \delta_m \quad (32)$$

$$n = n_{\text{max}} \text{ voor } |\delta| \geq \delta_m$$

waarbij

n_{gew} een gewenst toerental dat overeenstemt met de te varen scheepssnelheid
 n_{max} maximaal toerental
 δ_m een kritische uitslag van het roer

De snelheid waarmee het toerental maximaal kan veranderen is begrensd:

$$|\dot{n}| < \dot{n}_{\text{max}} \quad (33)$$

De hier gebruikte automaat stemt overeen met de in [2] gebruikte automaat.

3. Beschrijving van de proefcondities van het gevoeligheidsonderzoek

3.1 Algemeen

Het gevoeligheidsonderzoek [1], [2], [3] naar de hinder die bij varen door een dwarsstroom ondervonden wordt is uitgevoerd voor de vormgeving van een vaarweg, namelijk een haven met een toegangsheul. De stroomrichting staat loodrecht op de vaargeul en de hinder wordt bepaald voor het via de toegangsheul binnenvaren van de haven. De proefopzet is daarbij de volgende: op een vaste afstand van de haveningang wordt de manoeuvre gestart. De loods/stuurautomaat krijgt daarbij een vaardevies opgegeven dat een plaats- en een snelheidsvoorschrift inhoudt. Voorts wordt een dwarsstroom ingesteld. Voor de verschillende manoeuvres worden het vaardevies (DEVs), de stroomverdeling (EKSP) en de stroomsterkte (STRM) gevariëerd. De proeven worden uitgevoerd met een tanker (Tabel 1). De bovenstaande proevenserie is uitgevoerd op een manoeuvreersimulator [3] en in een schaalmodel [1]. De proefcondities zijn voor deze beide onderzoeksmethoden niet identiek. De verschillen zullen in de volgende paragrafen nader worden besproken. De proevenserie is eveneens uitgevoerd met een volledig wiskundig model, waarbij zo goed mogelijk is aangesloten bij de proefcondities van de beide andere onderzoeksmethoden. Dit resulteerde in twee afzonderlijke proevenseries die met het wiskundig model uiteindelijk zijn uitgevoerd.

3.2 Proefvaarten op de manoeuvreersimulator

Voor de in figuur 2 geschetste situatie zijn door een aantal loodsen vaarten op de manoeuvreersimulator gemaakt onder verschillende omstandigheden. Een beschrijving daarvan wordt gegeven in [1]. De grootheden die tijdens deze proeven gevariëerd zijn betreffen, het informatieniveau verkregen door buitenbeeld, radar, log, etc., de vorm en de sterkte van de dwarsstroom, de grootte van de tanker, en het vaarvoorschrift. Voor de huidige berekeningen worden alleen variaties in de vorm en sterkte van de dwarsstroom en in het vaardevies beschouwd. De variatie in het informatieniveau is relatief moeilijk weer te geven in een wiskundig model. Overigens blijkt de invloed er van op de vorm van de vaarbaan vrij gering te zijn.

De grootte van de tanker is bij de fysische modelproeven niet gevariëerd en wordt daarom ook bij de berekeningen met het wiskundig model niet gevariëerd.

De hoofdafmetingen van de gebruikte tanker staan vermeld in tabel 2. De snelheidsverdelingen van de dwarsstroom (EKSP = 1,2) zijn voor de grootste stroom-

sterkte (STRM = 1) weergegeven in de figuren 3 en 4. De stroomsterkte van de zwakke dwarsstroom (STRM = 2) is de helft van de stroomsterkte van sterke dwarsstroom (STRM = 1).

Elke manoeuvre begint op een punt op vaste afstand van de havenmond verwijderd:

$x = -4500$ m.

De y-coördinaat van het startpunt hangt af van het opgegeven vaardevies.

De vaardeviezen gebruikt bij de proeven op de manoeuvreersimulator zijn:

Vaardevies 1:

Uw taak is het schip de haven binnen te brengen met ongeveer de beginsnelheid zijnde 7.5 kn., en met deze snelheid de stoplijn te passeren. U moet er hierbij voor waken niet met het schip buiten de geulgrenzen van 200 meter weerszijden van de geulas te geraken.

Vaardevies 2:

Uw taak is het schip met de hoogst mogelijke snelheid de haven binnen te brengen en met deze snelheid de stoplijn te passeren. Let erop dat uw snelheid niet beneden de 10.0 kn. komt. Bovendien is uw taak zo nauwkeurig mogelijk de geulas te volgen.

Vaardevies 3:

Uw taak is het schip met de hoogst mogelijke snelheid de haven binnen te brengen en met deze snelheid de stoplijn te passeren. Let erop dat uw snelheid in elk geval niet beneden de 10.0 kn. komt. Bovendien is het uw taak het schip gedurende de gehele manoeuvre binnen de bovenstroomse helft van de geul te houden.

Vaardevies 4

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.

Bovendien is uw taak gedurende de manoeuvre zo nauwkeurig mogelijk de geul-as te volgen.

Vaardevies 5

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. De startsnellheid bedraagt 5.0 kn. Bovendien is het uw taak het schip gedurende de gehele manoeuvre binnen de bovenstroomse helft van de geul te houden.

De interpretatie van deze deviezen zoals bij de fysische schaalproeven is toegepast, wordt ook in het wiskundig model aangehouden. Er wordt verondersteld dat gedurende een manoeuvre het toerental konstant wordt gehouden, behalve wanneer de roeruitslag een bepaalde waarde overschrijdt. In dat geval wordt maximum toeren gegeven. Het toerental bij een bepaalde manoeuvre wordt gelijk gehouden aan het toerental waarmee gestart is bij de overeenkomstige simulatorproef. Met betrekking tot het plaatsvoorschrift (PLTS) van het vaardevies wordt verondersteld dat in de baan en koershoudende automaat alleen de gewenste vaarbaan behoeft te worden ingesteld.

De interpretatie van de op de manoeuvreersimulator gebruikte vaardeviezen wordt dan:

$$\begin{aligned} \text{Devies 1: } n &= 51.3 \text{ rpm} & (34) \\ y_{\text{gew}} &= 0.0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Devies 2: } n &= 81.6 \text{ rpm} & (35) \\ y_{\text{gew}} &= 0.0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Devies 3: } n &= 81.6 \text{ rpm} & (36) \\ y_{\text{gew}} &= -100,0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Devies 4: } n &= 40.5 \text{ rpm} & (37) \\ y_{\text{gew}} &= 0.0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Devies 5: } n &= 40.5 \text{ rpm} & (38) \\ y_{\text{gew}} &= -100,0 \text{ m} \end{aligned}$$

Als maximum toerental n_{\max} wordt gebruikt

$$n_{\max} = 85.0 \text{ rpm} \quad (39)$$

welk toerental ook wordt ingesteld als voor de roerhoek δ geldt:

$$|\delta| > 34^\circ$$

De maximale roerhoek bedraagt steeds:

$$\delta_{\max} = 35^\circ$$

3.3 Proefvaarten in een fysisch schaalmodel

In een schaalmodel is met een scheepsmodel een aantal vaarten gemaakt, met als doel het binnenvaren van een haven bij aanwezigheid van een dwarsstroom te simuleren. Deze proeven, die deels de in de vorige paragrafen beschreven proeven overlappen, zijn weergegeven in [3]. Bij deze proeven is gebruikgemaakt van een stuurautomaat. Een beperkt aantal vaarten is herhaald met handbesturing. De proeven in het schaalmodel, modelschaal 1:125, bestaan uit een drietal series:

- a. vaarten onder omstandigheden als aanwezig bij de simulatorproeven
- b. vaarten bij van a afwijkende dwarsstroomverdeling
- c. vaarten voor afwijkende stuurautomaten.

De proeven zijn uitgevoerd voor één scheepsmodel. De registratie van elke vaart start op ongeveer 1000 m voor de haveningang en eindigt 1000 m na de haveningang. De vaardeviezen zijn gesimuleerd op de in de vorige paragraaf aangegeven manier. Onder elke proefomstandigheid zijn vijf vaarten gemaakt. Voor de berekeningen worden als startwaarden van een vaart de gemiddelde startwaarden uit het schaalmodel aangehouden.

Het proevenschema voor de onder a. vermelde vaarten wordt weergegeven in tabel 2. Vaardevies 1 wordt dus niet toegepast. De verdeling van de dwarsstroomsnelheid wordt in de figuren 25 en 26 weergegeven. De voor serie a gebruikte startwaarden zijn gegeven in tabel 3. De overige series proeven worden niet nader beschreven.

Aanvullend zijn in stil water nog een aantal draaicirkel- en zigzagproeven uitgevoerd, teneinde na te gaan in hoeverre het wiskundig model van het schip overeenkomt met het in het schaalmodel gebruikte schip. De resultaten van deze proeven worden gegeven in de tabellen 4 en 5.

4. Beschrijving van de aanvullende berekeningen

Naast de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met het volledige wiskundig model, worden in [2] de gevonden rangorden van de hinderbeïnvloedende factoren en de maximale uitwijkingen uit de gewenste vaarbaan vergeleken met overeenkomstige resultaten afgeleid uit de proeven met de simulator en het schaalmodel. Daarbij kan een aantal verschillen tussen de uitkomsten vastgesteld worden die nu nader zullen worden beschouwd:

In tabel 6 staan de rangorden weergegeven die met de verschillende methoden worden verkregen. In tabel 7 staan de baanbereiken $(y_{\max} - y_{\min})/L$ weergegeven. Voor de optredende verschillen kan een aantal redenen worden aangevoerd, waarvan de relevantie in dit verslag wordt nagegaan. De onderzochte oorzaken zijn:

- de stuurautomaat
- de startcondities
- de relatieve bewegingshypothese

Om de verschillen in proefopzet zo gering mogelijk te houden is in het schaalmodel en in het wiskundig model dezelfde stuurautomaat en dezelfde stuurauto- maatafstelling aangehouden. De coëfficiënten van deze automaat zijn bepaald in het schaalmodel door te eisen dat bij een uniforme dwarsstroom een opgegeven gewenste rechte baan gevolgd kan worden. Achteraf is gebleken dat om de evenwichtsbaan te kunnen varen een bepaalde roerhoek ($\neq 0$) ingesteld moet worden. In het wiskundig model kan bij een roerhoek $\delta = 0$ wel in evenwicht met de dwars- stroom gevaren worden. Gebruik van de coëfficiënten bepaald in het schaalmodel leidt daarom bij het wiskundig model tot aanzienlijke afwijkingen van de ge- wenste vaarbaan. Bij de simulatie van de simulatorvaarten is dit erg duidelijk opgetreden. In tabel 8 zijn deze afwijkingen samengevat. Door deze afwijking in de stuurautomaat zal gedurende de beginfase van de manoeuvre als de dwars- stroom nagenoeg uniform verdeeld is het schip naar een afwijkende evenwichtbaan varen. Indien de afstand tussen het startpunt van de manoeuvre en de plaats waar de grootste gradiënt in het dwarsstroomprofiel optreedt klein is, zal het schip nog geen dynamisch evenwicht bereiken op het moment dat de gradiënt wordt ingevaren. Dit zal dan het baanbereik beïnvloeden. Indien het dynamisch evenwicht wel wordt bereikt voordat de dwarsstroomgradiënt wordt gepasseerd, zal het baanbereik vermoedelijk weinig worden beïnvloed, daar de dwarsstroom-

verdeling in dwarsrichting nagenoeg uniform is. Dit wordt bevestigd door de lage plaats in de rangorde van factoren die het plaatsvoorschrift PLTS unaniem heeft bij de diverse methoden. De afstand tussen het startpunt en de plaats van de dwarsstroomgradiënt bedraagt bij de simulatorproeven en de proeven in het schaalmodel respectievelijk ca. 4400 m en ca. 1000 m. Voor de simulatie van de simulatorproeven wordt daarom een gering effect verwacht.

Bij de berekening van de manoeuvres met het volledig wiskundig model zijn startwaarden gebruikt die afgeleid zijn uit de simulatorproeven en de proeven in het schaalmodel. De uit de simulatorstudie overgenomen startwaarden zijn bij het wiskundig model anders geïnterpreteerd dan gebruikt bij de simulatorstudie. Dit heeft tot gevolg gehad dat bij de wiskundige berekeningen een duidelijk inschakelverschijnsel in de vaarbaan optreedt. Dit effect heeft slechts vrij lokale betekenis en zal geen effect hebben op het baanbereik.

Bij de proeven in het schaalmodel was enige variatie in de startpositie aanwezig. Voorts zijn per proefconditie 5 vaarten uitgevoerd. De startwaarden per proefconditie voor het wiskundig model zijn bepaald door middeling van de startwaarden van deze 5 vaarten. Door deze middeling kunnen niet-evenwichtsstartcondities ontstaan, die tot een inschakelverschijnsel leiden. Daar de afstand tussen startpunt en plaats van de grote dwarsstroomgradiënt betrekkelijk kort is kan beïnvloeding van het baanbereik optreden.

Bij het vergelijken van de baanbereiken, bepaald met het wiskundig model en het schaalmodel, blijken nogal verschillen in voorspelde grootte aanwezig te zijn. Steeds blijken de resultaten van het wiskundig model lager te zijn dan die van het schaalmodel, behalve voor de conditie EKSP1 * STRM1, waar juist het omgekeerde geldt. Deze verschillen in uitkomsten van het schaalmodel en wiskundig model kunnen behalve door de bovenvermelde oorzaken ook ontstaan door:

- verschil tussen het manoeuvreergedrag van het schaalmodel en van het wiskundig model
- verschil tussen de werkelijke stroomkracht en de met het relatieve bewegingsprincipe bepaalde stroomkracht.

Het verschil in manoeuvreergedrag wordt bevestigd door de draaicirkel- en zigzagproeven die met beide onderzoeksmethoden zijn uitgevoerd. Het aanpassen van de manoeuvreercoëfficiënten in het wiskundig model wordt gezien de grootte van de daarvoor vereiste inspanning buiten beschouwing gelaten.

De wijze waarop de relatieve snelheid wordt bepaald beïnvloedt in belangrijke mate de maximale uitwijkingen van het schip [4]. In [5] wordt een tweetal interpretaties van de relatieve snelheid gebruikt: een relatieve snelheid t.o.v. de stroomsnelheid in het midden van het schip en een relatieve snelheid t.o.v. de scheepslengte gemiddelde dwarsstroomsnelheid. De invloed op het baanbereik door dit verschil in formulering wordt daarin nagegaan voor het type stroombeeld zoals gebruikt wordt bij het gevoeligheidsonderzoek. Uit de studie blijkt dat de verschillen in baanbereik tengevolge van het gebruik van de twee hypothesen, een functie zijn van de dwarsstroomgradiënt. De gradiënten van EKSP1 en EKSP2 zijn respectievelijk 0.0156 rad/s en 0.0066 rad/s. Voor EKSP1 * STRM2 blijken de verschillen in vaarbaanbereik tengevolge van de gebruikte relatieve bewegingshypothese groot te zijn ten opzichte van de overige proefcondities. Gebruik van de over de scheepslengte gemiddelde stroomsnelheid kan daarom mogelijk leiden tot een consistent beeld tussen de afwijkingen in baanbereik, die voorspeld zijn met het schaalmodel en met het wiskundig model.

De bovenstaande argumenten hebben tot de volgende serie berekeningen geleid:

- a. Een beperkte serie berekeningen voor de proefcondities afgeleid uit de proeven op de manoeuvreersimulator. Er worden alleen proeven met vaardevies 4 uitgevoerd. In dit geval geeft de ongewijzigde in [2] gebruikte automaat (AUTO 1) de grootste afwijkingen uit de gewenste baan. Bij vaardevies 4 worden voor alle stroomcondities (EKSP1, 2 en STRM1, 2) de vaarbanen bepaald.

Het doel van deze berekeningen is na te gaan in welke mate het volgen van een afwijkende evenwichtsbaan in [2] het baanbereik heeft beïnvloed. Daartoe werden evenwichtsstartcondities en een aangepaste stuurautomaat (AUTO 5) gebruikt. Bij de gebruikte relatieve bewegingshypothese wordt uitgegaan van de lokale stroomsnelheid die door interpolatie van de stroomsnelheidscomponenten wordt bepaald.

- b. Berekeningen voor proefcondities die afgeleid zijn van de proeven in het schaalmodel:

- bl. Bepaling van de vaarbanen voor een tweetal proefcondities

EKSP1 STRM1 DEVS2

EKSP2 STRM1 DEVS4

Voor elk van deze proefcondities wordt een serie berekeningen uitgevoerd om de afzonderlijke invloed van de startcondities, de automaatinstelling en de relatieve beweging op de vaarbaan na te gaan.

- b2. Op grond van de onder b1 uitgevoerde berekeningen wordt vastgesteld, welke veranderingen tot verbetering leiden van de overeenkomst met het baanbereik bepaald in het schaalmodel. Met het aldus bepaalde wiskundig model wordt het volledige proevenschema uitgevoerd: (EKSP1, 2; STRM 1, 2; DEVS 2, 3, 4, 5). Met deze resultaten wordt de rangorde van de effecten nogmaals bepaald.

5. Bespreking van de rekenresultaten

5.1 Bespreking van de simulatorvaarten

Van de in [2] bepaalde vaarbanen wordt slechts een beperkt gedeelte opnieuw bepaald, daar verwacht wordt dat door de in hoofdstuk 4 besproken oorzaken de verschillen tussen de wiskundige berekeningen en de uitkomsten van de manoeuvreersimulator slechts in geringe mate beïnvloed zullen worden. In tabel 9 en 10 worden respectievelijk de coëfficiënten van de roerautomaat AUTO 5 en de evenwichtsstartcondities weergegeven. De berekende vaarbanen, roersignalen en verloop van het toerental worden voor deze condities weergegeven in de figuren 5 ... 8. Ter beoordeling van de vaarbanen zijn de tabellen 11 ... 13 samengesteld, waarin de maximale uitwijking y_{\max} , de minimale uitwijking y_{\min} en het baanbereik $y_{\max} - y_{\min}$ zijn weergegeven.

Uit de figuren 5 tot 8 blijkt dat het inschakelverschijnsel bij de start nu nagenoeg afwezig is en dat de gewijzigde automaat in staat is in het uniforme gedeelte van de dwarsstroom de gewenste vaarbaan goed te volgen.

In de tabellen 11 tot 13 worden de nu verkregen resultaten, kolom C, vergeleken met de overeenkomstige resultaten bepaald in [2], kolom A. In kolom B staan de resultaten voor dezelfde condities als voor A echter berekend met een interpolatie van de snelheidscomponenten i.p.v. een interpolatie van de grootte en de richting. Het vergelijken van de kolommen A en B geeft aan dat alleen voor EKSP1 verschil in de berekende vaarbaan optreedt ten gevolge van de interpolatie. Dit verschil wordt veroorzaakt tijdens het varen door de grootste dwarsstroomgradient (y_{\max} wordt bereikt juist voor de gradiënt en y_{\min} er na). Er treedt voorts zowel verkleining als vergroting van het baanbereik op. Vergelijking van de kolommen A en C laat zien dat y_{\max} bij de huidige berekening steeds kleiner is dan de in [2] berekende waarde. Dit is het gevolg van de nu niet optredende afwijking van de gewenste evenwichtsbaan. y_{\min} blijkt alleen voor EKSP1 * STRM1 kleiner dan de oorspronkelijke waarde te worden. Blijkbaar houdt de aanpassing van de stuurautomaat niet eenvoudig een verplaatsing van de vaarbaan in over de afwijking tussen de evenwichtsbanen. Dit kan verklaard worden doordat alleen coëfficiënt c_5 in (28) voor beide automaten verschilt. Indien op een afstand $L_a (= 2L)$ voor het midden van het schip geen dwarsstroomveld meer aanwezig is zijn beide automaten identiek geworden. Dit treedt al op voordat het schip door de grote gradiënt vaart. Vanaf dat moment houden beide

automaten effectief dezelfde gewenste baan aan en bepaalt alleen het verschil in toestand op dat moment de uiteindelijk optredende y_{\min} . Het uiteindelijk effect van de aangepaste stuurautomaat op het baanbereik (tabel 13), blijkt behalve voor toestand EKSP1 * STRM1 vrij groot te zijn 0(25%).

5.2 Bespreking van de vaarten in het schaalmodel

5.2.1 Gevoeligheidsonderzoek

Teneinde de gevoeligheid van de baan voor een aantal effecten vast te stellen zijn voor een tweetal proefcondities vaarbanen berekend, waarbij deze effecten al dan niet zijn meegenomen. Deze vaarbanen worden weergegeven in de figuren 11 ... 13. De startcondities zijn weergegeven in tabel 14. De waarden voor de maximale uitwijking en de minimale uitwijking van de vaarbaan, en het baanbereik zijn weergegeven in de tabellen 15 en 16.

Wat de vorm van de banen betreft blijkt dat het starten onder de gemiddelde fysische startcondities, zoals in [2] is uitgevoerd, aanleiding geeft tot een nogal andere vaarbaan dan bij een start onder evenwichtcondities (uitgaande van het toerental en de lokale dwarsstroomsnelheid van een startpunt $x = -1000$ m, $y = 0$ worden de startgrootheden bepaald. Daar de vaarbanen berekend met de gemiddelde fysische startcondities beter aansluiten bij de fysisch bepaalde vaarbanen, wordt bij de vervolgsérie uitgegaan van de fysische startcondities. Uit de tabellen 15 en 16 blijkt dat de overgang van automaat 1 (de oorspronkelijke) naar automaat 5 steeds een verlaging van y_{\max} , van de orde 0(25%) inhoudt. Ook voor y_{\min} kan meestal een verlaging 0(10%) worden vastgesteld. De overgang van een lokale stroomsnelheid naar een scheepsgemiddelde snelheid heeft op y_{\max} slechts een gering effect: 0(5%) verlaging voor EKSP2 * STRM1 * DEVS4 en een matig tot groot effect 0(10-50%) voor EKSP1 * STRM1 * DEVS2. De invloed op y_{\min} is respectievelijk een 0(10%) en 0(30%) verhoging. Het resulterende effect op het baanbereik van de gewijzigde stuurautomaat blijkt een verlaging van ongeveer 10% voor EKSP2 * STRM1 * DEVS4 en een hoging van 0(5%) van EKSP1 * STRM1 * DEVS2 in te houden ten opzichte van de overeenkomstige waarden van AUTO1. Middeling van de stroomsnelheid over de scheepslengte geeft een verlaging van het baanbereik van 0(10%) en 0(30%) voor respectievelijk EKSP2 * STRM1 * DEVS4 en EKSP1 * STRM1 * DEVS2.

De invloed van het gebruik van evenwichtstartcondities op het baanbereik blijkt voor EKSP1 * STRM1 * DEVS2 een verlaging van 0(10%) en voor EKSP2 * STRM1 * DEVS4 en verhoging van 0(10%) te zijn.

Vergelijking van de nu verkregen resultaten (tabel 15, 16) met de resultaten uit het schaalmodel geeft aan dat bij EKSP1 * STRM1 * DEVS2 een behoorlijke overeenkomst in het baanbereik verkregen wordt als gebruik wordt gemaakt van de gecorrigeerde stuurautomaat (AUTO5) en de scheepsgemiddelde relatieve snelheid: 0(35%) verschil wordt 0(2%) verschil. Voor EKSP2 * STRM1 * DEVS4 is onder dezelfde condities de overeenkomst verslechterd: 0(42%) → 0(52%).

Het uiteindelijke effect van de stuurautomaat en de begincondities op het baanbereik blijkt dus 0(10%). Door de aanpassing van het relatieve bewegingsprincipe treedt een duidelijk verschil in het baanbereik op, afhankelijk van de proefconditie 0(10%) tot 0(30%). Uit het bovenstaande volgt dat de voorgestelde aanpassing van de rekenmethode toch nog belangrijke verschillen onverklaard laat.

5.2.2 Bespreking van de vaarbanen

Gebruikmakend van de gewijzigde stuurautomaat (AUTO5), de fysische gemiddelde startcondities en een scheepsgemiddelde relatieve snelheid, zijn voor de volledige serie proefcondities (EKSP = 1, 2; STRM = 1, 2; DEVS 2, 5) vaarbanen bepaald. De startcondities en de coëfficiënten van de stuurautomaat zijn weergegeven in de tabellen 3 en 17.

In de figuren 14 tot 29 wordt het verloop van het schroeftoerental, de roerhoek en de vaarbaan weergegeven. In tabel 18 wordt het gevonden baanbereik en schroeftoerenbereik weergegeven. Ter vergelijking is tabel 7 samengesteld waarin alle tot nu toe verkregen resultaten zijn opgenomen.

Uit deze tabel blijkt dat voor EKSP1 * STRM1 de overeenkomst tussen de resultaten gevonden in het schaalmodel en bepaald met het gewijzigde wiskundig model door de aangebrachte veranderingen is verbeterd:

Kwalitatief wordt bij deze conditie nu ook een onderschatting van de resultaten van het fysisch schaalmodel verkregen, kwantitatief worden de verschillen eveneens kleiner: ca.40% overschatting naar 15% onderschatting. Voor de overige stroomcondities gaat nu een duidelijk minder goed beeld ontstaan. Afwijkingen tot 50% kunnen worden vastgesteld. Gemiddeld wordt dus door de aanpassing van het wiskundig model nauwelijks een verbetering in de overeenkomst van de baan bereikt.

Om de rangorde van de hinderbeïnvloedende factoren te bepalen wordt de in [1] en [2] toegepaste methode gevolgd. Daarbij worden twee kenmerken per baan onderscheiden, namelijk het baanbereik (BAAN) gedefiniëerd als $y_{\max} - y_{\min}$ en het roerbereik (ROER) $\delta_{\max} - \delta_{\min}$. Met behulp van de variantieanalyse programma's MANOVA en ANOVA worden voor deze variabelen de rangorden bepaald van de effecten: vaardevis (DEVs), vorm van de dwarsstroom (EKSP) en sterkte van de dwarsstroom (STRM). Daar in het vaardevis twee voorschriften aanwezig zijn, het plaatsvoorschrift (PLTS) en het snelheidsvoorschrift (SNELH), wordt de analyse herhaald, nu voor de effecten EKSP, STRM, SNELH, PLTS en hun interacties, om het relatieve belang van de twee voorschriften SNELH en PLTS te kunnen vaststellen.

De resultaten van deze analyse zijn vastgelegd in de tabellen 19 en 20. In tabel 6 wordt de rangorde verkregen met MANOVA vergeleken met de overeenkomstige rangorden verkregen uit de simulatorstudie, uit de schaalmodelstudie en de in [2] gerapporteerde studie met het wiskundig model. Uit deze tabel blijkt dat er nu duidelijk meer overeenkomst is gekomen tussen de rangorden, bepaald uit de schaalmodelresultaten en uit de resultaten verkregen met het wiskundige model voor uit het schaalmodel afgeleide proefcondities. De rangorde voor de hoofdeffecten is nu identiek. De rangorde voor de interacties is nog sterk verschillend. De volgorde van de hoofdeffecten is nu ook identiek geworden met de rangorde, bepaald uit resultaten van het wiskundig model bij gebruik van de simulatorproefcondities. Gezien de in paragraaf 5.1 gevonden verschillen in het vaarbaanbereik is het niet zeker dat deze laatste uit [2] overgenomen rangorde nog juist is.

6. Conclusies

In de voorgaande hoofdstukken is nagegaan of door verandering van het wiskundig model en de proefcondities vaarbanen bepaald kunnen worden, die beter overeenstemmen met de overeenkomstige vaarbanen verkregen op een manoeuvreersimulator en in een schaalmodel dan de in [2] gerapporteerde berekeningen. De aanpassingen betreffen de startcondities, de stuurautomaat en de relatieve bewegingshypothese. De volgende conclusies kunnen worden getrokken.

- De aanpassing van de stuurautomaat en de startcondities leidt bij de wiskundige simulatie van de simulatorvaarten tot verkleining van het baanbereik ($y_{\max} - y_{\min}$) van de orde 10% tot 25%.
- De invloed van de stuurautomaat en de startcondities op het baanbereik is bij de vaarbanen, bepaald door wiskundige simulatie van de schaalmodelproeven, voor elk effect afzonderlijk ca. 10%.
- Het vervangen van een lokale door een scheepslengte gemiddelde relatieve beweging leidt bij de gesimuleerde schaalmodelproeven tot 10 à 30% verkleining van het baanbereik.
- Het gebruik van gemiddelde startcondities leidt tot betere overeenkomst met de in het schaalmodel gemeten vaarbanen dan het gebruik van de evenwichtscondities.
- Bij gebruik van de gemiddelde startcondities, de gecorrigeerde stuurautomaat en de scheepsgemiddelde relatieve snelheid wordt alleen voor het stroombeeld met piek en de sterke dwarsstroom (EKSP1 STRM1) een verbetering verkregen in overeenkomst tussen het baanbereik, bepaald in het schaalmodel en bij het wiskundig model. Voor deze aanpassingen gaat de overschatting door het wiskundig model over in een onderschatting. Voor de overige stroomcondities worden de verschillen groter.
- Bij gebruik van de fysische startcondities, de aangepaste stuurautomaat en de over de scheepslengte gemiddelde relatieve snelheid is het berekende baanbereik tot 40% kleiner dan in het schaalmodel gemeten wordt.

- De overeenkomst van de rangorden van hinderbeïnvloedende factoren is door de genoemde aanpassing verbeterd met betrekking tot de hoofdeffecten.
- Door de nu ingevoerde veranderingen van het wiskundig model blijven nog veel verschillen tussen de vaarbanen, die bepaald zijn in het schaalmodel en met het wiskundig model, onverklaard. Een mogelijke reden voor de verschillen zal in eerste instantie gezocht moeten worden in verschillen in manoeuvreergedrag van het modelschip en het wiskundig model.

LITERATUUR

- 1 Schepen in dwarsstroom - Fysisch gevoeligheidsonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R 775 deel IX/M 1670, oktober 1983
- 2 Schepen in dwarsstroom - Wiskundig gevoeligheidsonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R 775 deel VI/W 252 deel III, okt.1983
- 3 Schepen in dwarsstroom - Gevoeligheidsonderzoek
NSP - rapport no. 03010-1-ns, september 1982
- 4 Schepen in dwarsstroom - De invloed van een dwarskracht op de vaarbaan
van een schip
Waterloopkundig Laboratorium, verslag W 252 deel II, november 1978
- 5 Schepen in dwarsstroom - Invloed van stroomsnelheid en gradient op
vaarbaanbreedte
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R 775 deel X/R 1741, november 1983

	Tanker
L	289.8 m
B	44.0 m
T	17.5 m
∇	200 000 m ³
V_{\max}	12.0 kn
n_{\max}	85 rpm

Tabel 1 Eigenschappen van de beproefde tanker

	EKSP 1		EKSP 2	
	STRM 1	STRM 2	STRM 1	STRM 2
DEVS 2				
DEVS 3				
DEVS 4				
DEVS 5				

EKSP 1 Stroomverdeling met piek (figuur 25)

EKSP 2 Stroomverdeling zonder piek (figuur 20)

STRM 1 Hoge dwarsstroomsnelheid (1x)

STRM 2 Lage dwarsstroomsnelheid ($\frac{1}{2}$ x)

DEVS 2 Lichtenlijn: toerental 85.0 rpm

DEVS 3 Bovenstrooms; toerental 85.0 rpm

DEVS 4 Lichtenlijn: toerental 40.5 rpm

DEVS 5 Bovenstrooms; toerental 40.5 rpm

Tabel 2 Proevenschema voor het volledig wiskundig model,
afgeleid van de proeven met een schaalmodel (serie a)

EKSP	STRM	DEVS	x (m)	y (m)	ψ (grd)	u (m/s)	v (m/s)	r (grd/s)	δ (grd)	n (rpm)
1	1	2	-992.18	13.51	-17.88	5.37	2.11	0.01	- 8.88	85.05
1	1	3	-992.33	- 88.84	-17.35	5.48	2.02	0.01	- 4.25	84.95
1	1	4	-996.93	- 46.67	-24.33	2.52	1.06	0.0	- 0.22	40.14
1	1	5	-996.50	-150.19	-23.66	2.61	1.02	-0.01	- 9.39	40.12
2	1	2	-993.76	41.32	-18.22	5.90	2.45	-0.01	-15.90	84.47
2	1	3	-993.77	- 46.53	-18.60	5.91	2.34	-0.02	-13.46	84.30
2	1	4	-996.46	17.53	-26.16	3.14	1.46	-0.02	-23.12	39.96
2	1	5	-996.14	- 67.14	-27.10	3.10	1.61	-0.02	-17.09	39.86
1	2	2	-992.0	15.50	- 9.27	5.99	1.18	0.01	- 4.40	85.05
1	2	3	-992.07	- 82.63	- 9.16	6.00	1.12	0.01	- 1.07	85.00
1	2	4	-995.39	- 15.79	-11.71	3.17	0.59	0.0	- 1.64	40.14
1	2	5	-997.16	-112.24	-12.33	3.09	0.58	0.0	- 5.28	40.06
2	2	2	-992.24	29.92	-10.06	6.21	1.28	-0.01	- 8.23	84.67
2	2	3	-991.52	- 82.45	- 8.90	6.22	1.03	0.0	- 7.05	84.50
2	2	4	-995.21	8.71	-12.84	3.36	0.78	-0.03	-14.62	39.89
2	2	5	-995.97	- 81.79	-14.24	3.26	0.85	-0.01	-13.62	39.80

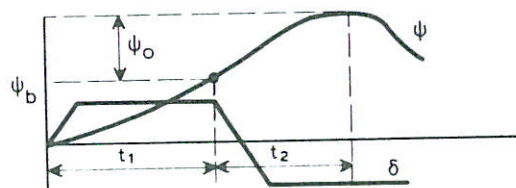
Tabel 3 Startwaarden voor diverse grootheden bij het berekenen van de vaarbanen afgeleid uit de proeven met het schaalmodel.

n (rpm)	40.5		85.0	
δ (grd)	r(MM) (grd/s)	r(FM) (grd/s)	r(MM) (grd/s)	r(FM) (grd/s)
-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
25.0	-.1768	-0.085	-.3722	-0.36

Tabel 4 Resultaten van draaicirkelproeven met het wiskundig model en het fysisch schaalmodel

n (rpm)	ψ_b (grd)	δ (grd)	t_1' (s)		t_2 (s)		ψ_o (grd)	
			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



Tabel 5 Resultaten van zigzagproeven met het wiskundig model en het fysisch model

Faktor	Simulator	wiskundig model		fysisch model
		SIM	FYS	
SNELH	5	2	3;2*	2
PLTS	8	7	7;7	7
EKSP	2	3	1;3	3
STRM	1	1	2;1	1
SNELH * PLTS	6	9	10;6	8
SNELH * EKSP	7	6	4;5	9
SNELH * STRM	3	5	6;8	4
PLTS * EKSP	9	10	9;9	10
PLTS * STRM	10	8	8;10	6
EKSP * STRM	4	4	5;4	5

* n;m n rangorde volgens [2], m rangorde volgens de huidige berekening

Tabel 6 Rangorde van de factoren volgens drie onderzoeksmethoden bij toepassing van MANOVA

		EKSP1						EKSP2					
		STRM1			STRM2			STRM1			STRM2		
DEVS1													
SNELH1	PLTS1	.84	.5	.954*	.27	.16	.25	.43	.35	.30	.2	.22	.24
		.66		.49	.22		.26	.36		.54	.23		.26
SNELH1	PLTS2	.75		.90	.28		.31	.49		.30	.22	.18	.24
		.68	.44	.47	.23	.14	.24	.43	.40	.53	.17		.23
SNELH2	PLTS1	.98		.85	.47		.45	.90		.55	.38	.26	.27
		.87	.54	.79	.30	.25	.40	.53	.44	.92	.30		.28
SNELH2	PLTS2	1.02		.94	.49		.74	.91		.52	.38	.27	.42
		1.08	.60	.70	.35	.31	.39	.59	.46	.79	.27		.38

- *a b a $(y_{\max} - y_{\min})/L$, MM(SIM), [2]
c e d b $(y_{\max} - y_{\min})/L$, MS, [3]
c $(y_{\max} - y_{\min})/L$, MM(FYS), [2]
d $(y_{\max} - y_{\min})/L$, FM, [1]
e $(y_{\max} - y_{\min})/L$, MM(FYS), huidige berekening

Tabel 7 Het baanbereik volgens drie onderzoekstechnieken

		EKSP1		EKSP2	
		STRM1	STRM2	STRM1	STRM2
DEVS1		0.213	0.112	0.181	0.096
SNEH1	PLTS1	0.174	0.096	0.210	0.110
	PLTS2	0.173	0.096	0.197	0.107
SNEH2	PLTS1	0.324	0.171	0.332	0.172
	PLTS2	0.33	0.171	0.310	0.164

Tabel 8 Maximale afwijking van de gewenste baan (in L) bij evenwichtsomstandigheden tengevolge van de automaatafstelling (simulator vaarcondities)

Proef	1	2	3	4
DEVS	4	4	4	4
STRM	1	2	1	2
EKSP	1	1	2	2
x (m)	-4500	-4500	-4500	-4500
y (m)	0	0	0	0
φ (grd)	-26.62	-12.95	-29.33	-14.18
u(m/s)	2.227	2.718	2.223	2.749
v(m/s)	1.116	0.625	1.249	0.695
r(grd/s)	0	0	0	0
δ (grd)	0	0	0	0
n(rpm)	40.5	40.5	40.5	40.5

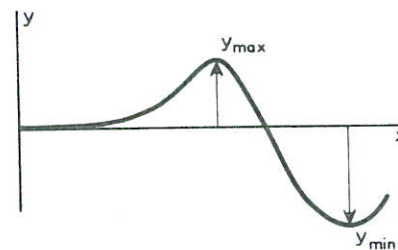
Tabel 9 Evenwichtsstartwaarden bij de berekening van de vaarbaan voor proefcondities afgeleid uit simulatorproeven

Proef	1	2	3	4
DEVS	4	4	4	4
STRM	1	2	1	2
EKSP	1	1	2	2
C_1	890	890	890	890
C_2	4	4	4	4
C_3	0	0	0	0
C_4	0.4	0.4	0.4	0.4
C_5	83.1	79.9	83.1	79.9
C_6	0	0	0	0

Tabel 10 Coëfficiënten van de gewijzigde stuurautomaat (AUTO 5) bij de proeven afgeleid uit simulatorvaarten

EKSP	STRM	DEVS	y_{\max} (m)		
			A	B	C
1	1	4	165.74	166.17	107.54
1	2	4	83.17	84.22	58.35
2	1	4	145.24	143.62	91.70
2	2	4	67.82		45.46

- A y_{\max} volgens [2]
 B (u_c, v_c) interpolatie
 i.p.v. (V_D, ψ_D) interpolatie
 C aangepaste automaat, evenwichtsstartcondities, (u_c, v_c) interpolatie



Tabel 11 Maximale uitwijking uit de gewenste baan voor een aantal simulatorproefcondities

EKSP	STRM	DEVS	y_{\min} (m)		
			A	B	C
1	1	4	-125.97	-144.15	-172.66
1	2	4	- 55.19	- 47.33	- 45.06
2	1	4	-117.23	-116.48	-103.99
2	2	4	- 43.19		- 38.30

(zie tabel 11)

Tabel 12 Minimale uitwijking uit de gewenste baan voor een aantal simulatorproefcondities

EKSP	STRM	DEVS	$y_{\max}-y_{\min}$		
			A	B	C
1	1	4	291.71	310.32	280.20
1	2	4	138.36	131.55	103.41
2	1	4	262.47	260.10	195.69
2	2	4	111.01		83.76

(zie tabel 11)

Tabel 13 Het baanbereik voor een aantal simulatorproefcondities

DEVS	2	4
EKSP	1	2
STRM	1	1
x (m)	-1000.0	-1000.0
y (m)	0.0	0.0
ψ (grd)	- 14.15	- 29.32
u (m/s)	5.25	2.512
v (m/s)	1.32	1.410
r (grd/s)	0.0	0.0
δ (grd)	0.0	0.0
n (rpm)	85	40.5

Tabel 14 Evenwichtsstartcondities voor berekeningen afgeleid van de schaalmodelproeven

startpunt	automaat	relatieve bewegings principe	y_{\max} (m)	y_{\min} (m)	$y_{\max} - y_{\min}$ (m)
Fys	1	lokaal	34.45	-158.59	193.04
Fys	5	lokaal	26.88	-177.53	204.41
Fys	5	gemiddeld	18.24	-126.08	144.32
Evenwicht	1	lokaal	67.01	-112.00	179.01
Evenwicht	5	lokaal	58.11	-125.66	183.77
Evenwicht	5	gemiddeld	50.00	- 80.00	130.00
schaalmodel [1]			30.0	-111.0	141.0

Tabel 15 Een aantal baankenmerken van vaarbanen bepaald met een wiskundig model voor de schaalmodelproefconditie: EKSP1, STRM1, DEVS2

startpunt	automaat	relatieve bewegings principe	y_{\max} (m)	y_{\min} (m)	$y_{\max} - y_{\min}$ (m)
Fys	1	lokaal	68.0	-85.88	153.88
Fys	5	lokaal	50.0	-90.89	140.89
Fys	1	gemiddeld	63.11	-74.03	137.14
Fys	5	gemiddeld	47.13	-80.49	127.62
Evenwicht	1	lokaal	99.13	-74.09	173.21
Evenwicht	5	lokaal	77.49	-79.17	156.66
Evenwicht	1	gemiddeld	93.36	-65.34	158.70
Evenwicht	5	gemiddeld	73.04	-59.68	132.72
Schaalmodel [1]			63.50	-202.0	265.50

Tabel 16 Een aantal baankenmerken van vaarbanen bepaald met een wiskundig model voor de schaalmodelproefconditie: EKSP2, STRM1, DEVS4.

EKSP	1;2	1;2	1;2	1;2
STRM	1	1	1	2
DEVS	2;3	4;5	2;3	4;5
C_1	410	890	410	890
C_2	4	4	4	4
C_3	0.0	0.0	0.0	0.0
C_4	.4	.4	.4	.4
C_5	37.5	83.1	37.2	79.9
C_6	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabel 17 Automaatafstellingen (AUTO5) gebruikt bij de berekening met het wiskundig model ter simulatie van schaalmodelproeven

			EKSP1		EKSP2	
			STRM1	STRM2	STRM1	STRM2
DEVS2	SNELH1	PLAATS1	144 49	46 37	100 38	65 23
DEVS3		PLAATS2	127 48	41 37	115 40	52 28
DEVS4	SNELH2	PLAATS1	153 63	71 53	128 52	76 35
DEVS5		PLAATS2	174 70	88 54	132 54	80 36

EKSP1 = stroombeeld met piek
 2 = stroombeeld zonder piek
 STRM1 = stroomsnelheid groot
 2 = stroomsnelheid klein
 SNELH1 = sloopssnelheid groot
 2 = sloopssnelheid klein
 PLAATS1 = lichtenlijn aanhouden
 2 = bovenstrooms geulhelpt aanhouden

eerste getal in cel = vaarbaanbereik (m)
 tweede getal in cel = roerhoekbereik (grd)

Tabel 18 Resultaten bepaald met het wiskundig model voor de schaalmodelproefcondities (AUTO5, sloopsgemiddelde relatieve beweging)

Faktor	MANOVA	ANOVA	
	BAAN/ROER	BAAN	ROER
EKSP	136.96(2)**	8.97(4)	398.49(2)
STRM	276.92(1)	363.68(1)	445.33(1)
DEVS(4)*	31.68(3)	18.44(3)	168.71(3)
EKSP * STRM	9.93(4)	24.31(2)	6.10(5)
EKSP * DEVS	1.59(5)	1.92(5)	7.45(4)
STRM * DEVS	0.53(6)	.18(6)	3.02(6)

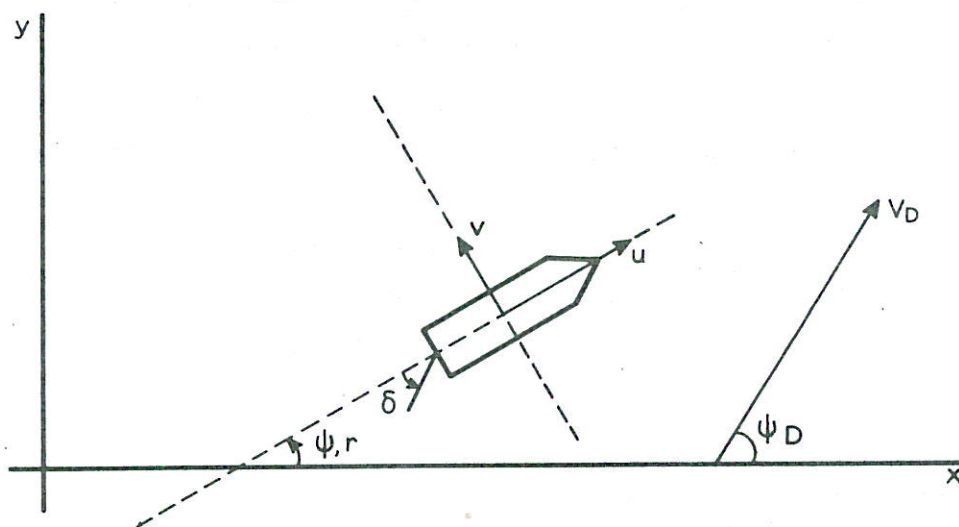
* DEVS heeft 4 niveau's

** a(n): a is de F-waarde, n het rangnummer

Tabel 19 F-waarden bepaald met M(ANOVA) uit de resultaten verkregen met het wiskundig model voor de fysische proefcondities

Faktor	MANOVA	ANOVA	
	BAAN/ROER	BAAN	ROER
SNELH	74.19(2)	43.75(3)	183.49(2)
PLTS	1.56(7)	.38	3.87(6)
EKSP	60.88(3)	8.07(4)	147.78(3)
STRM	146.47(1)	327.14(1)	165.16(1)
SNELH * PLTS	2.31(6)	5.64(5)	0.33(8)
SNELH * EKSP	2.60(5)	2.76(6)	5.91(4)
SNELH * STRM	1.14(8)	.26(8)	1.62(7)
PLTS * EKSP	0.19(9)	.17(10)	0.12(10)
PLTS * STRM	0.09(10)	.19(9)	0.12(9)
EKSP * STRM	14.03(4)	59.7 (2)	4.66(5)

Tabel 20 F-waarden bepaald met (M)ANOVA uit de resultaten verkregen met het wiskundig model voor de fysische proefcondities

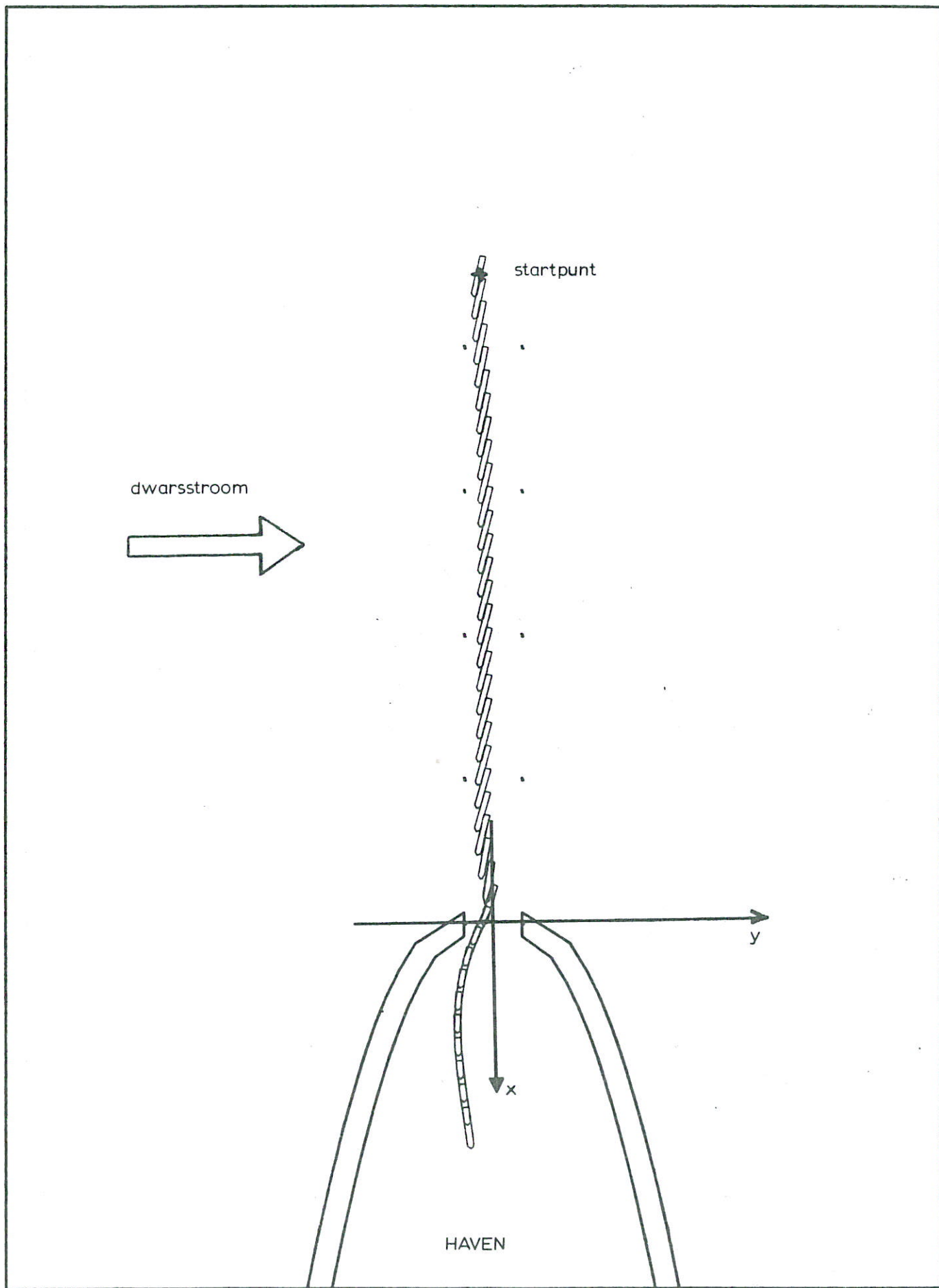


DEFINITIESCHETS

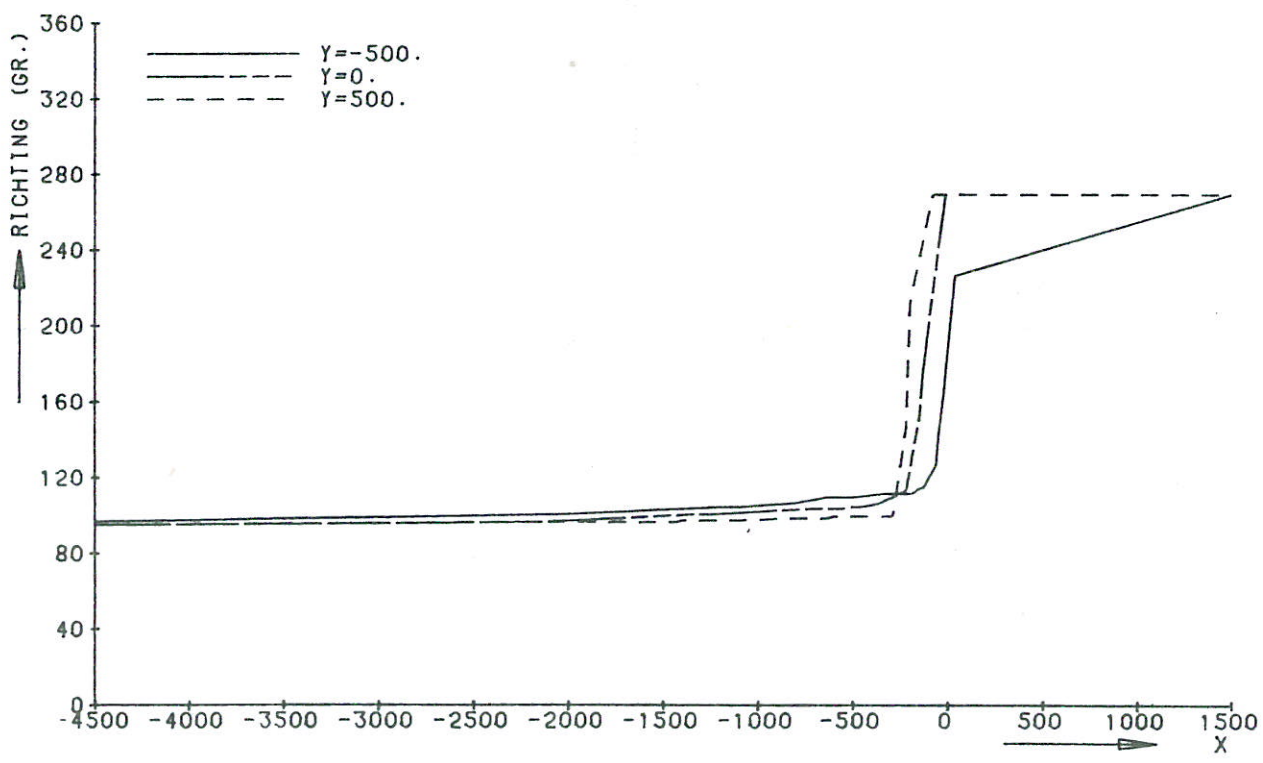
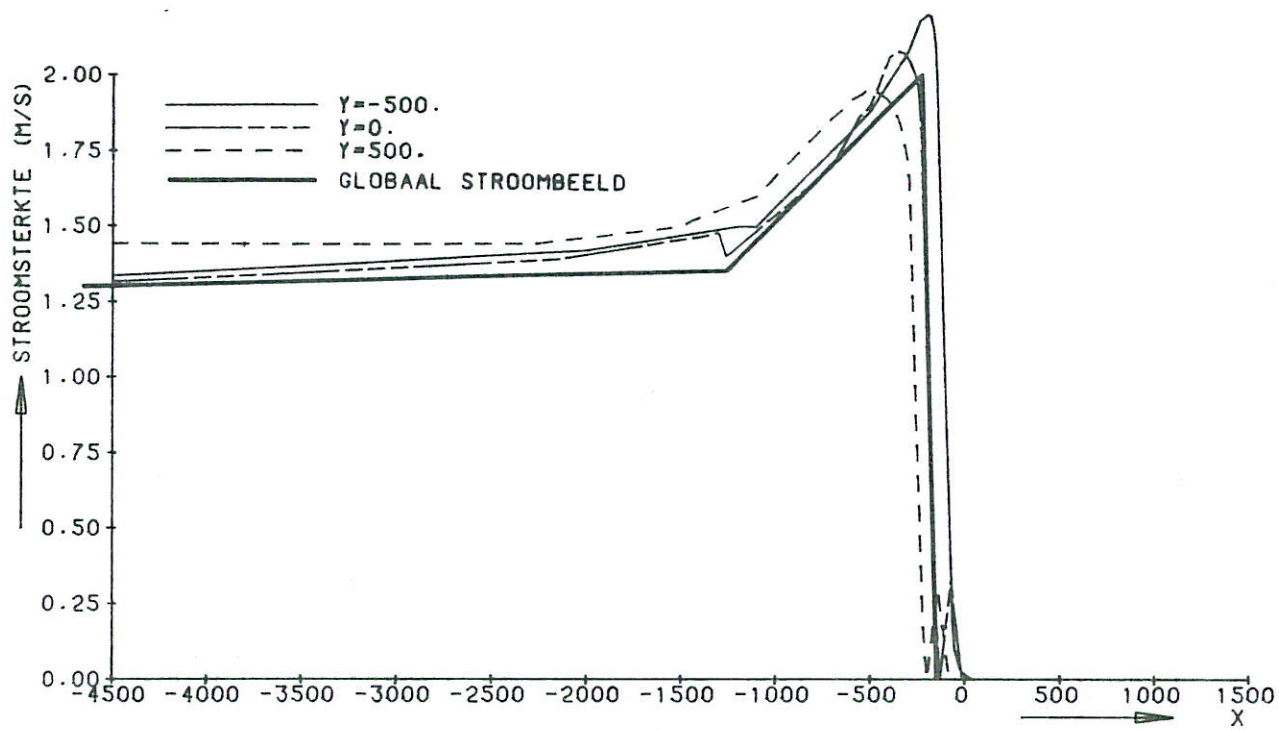
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W 252

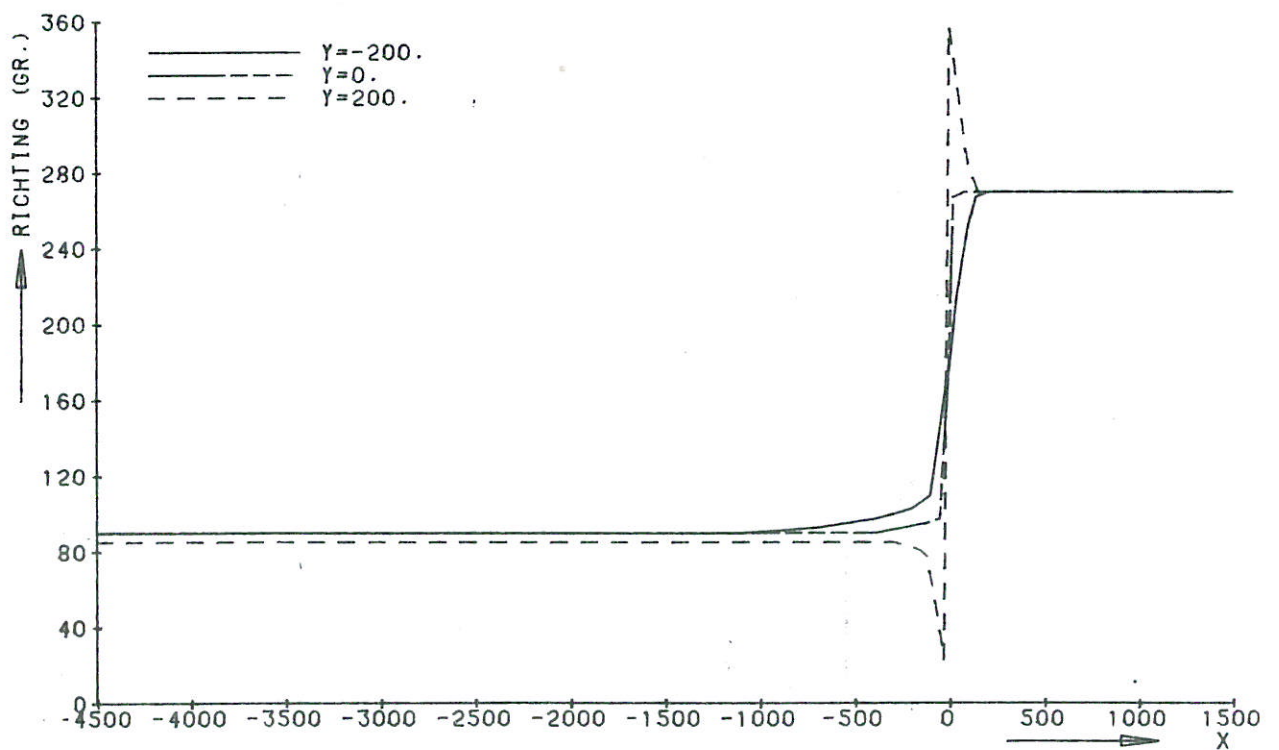
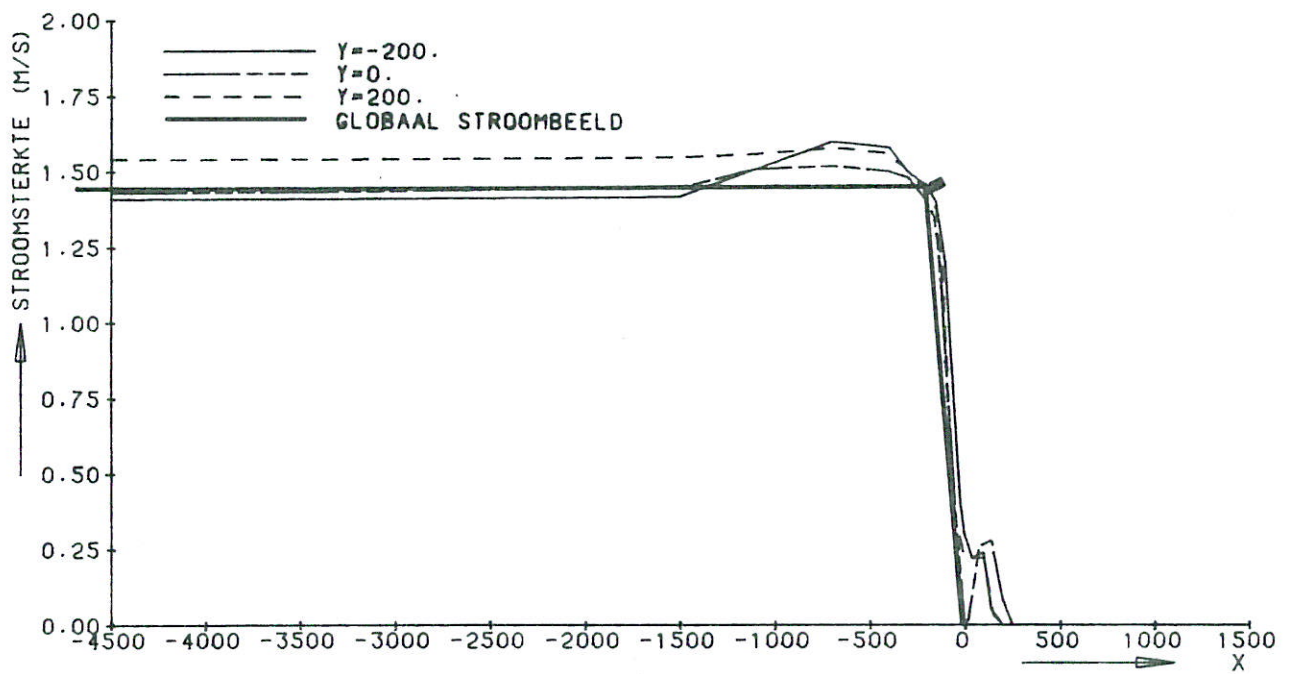
FIG. 1



KARAKTERISTIEKE VAARBAAN		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	W252	FIG. 2



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

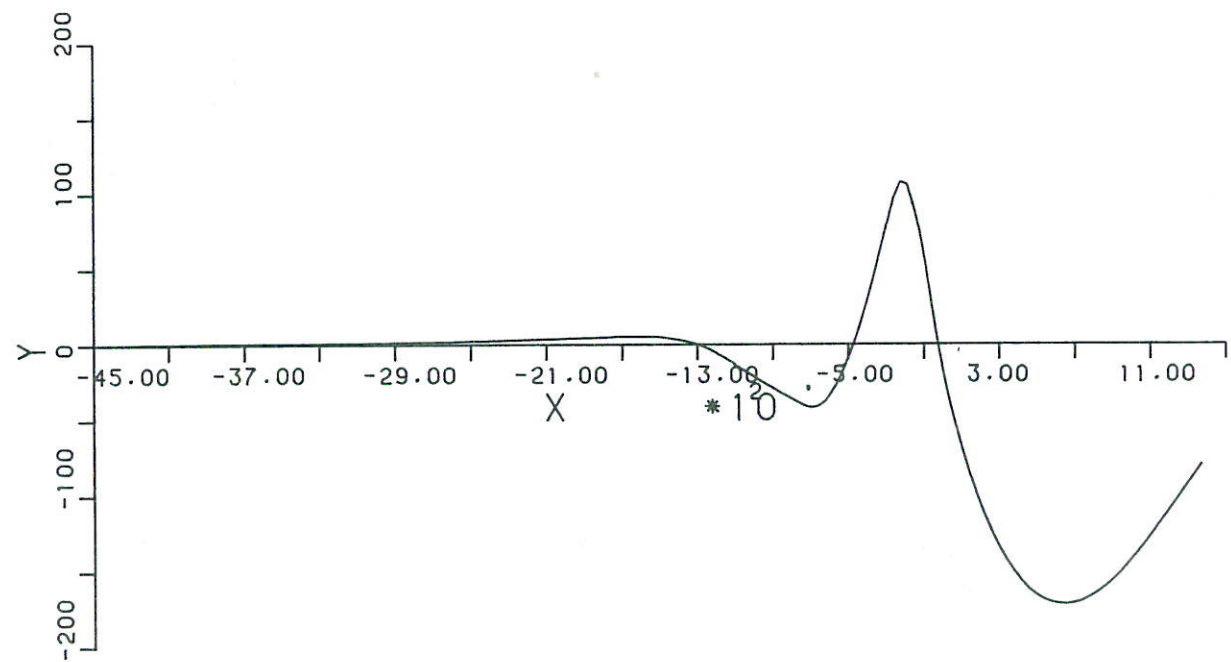
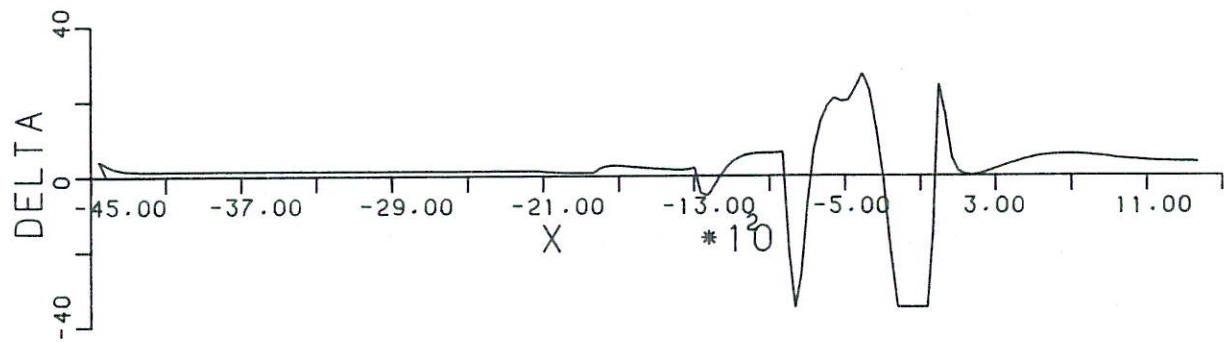
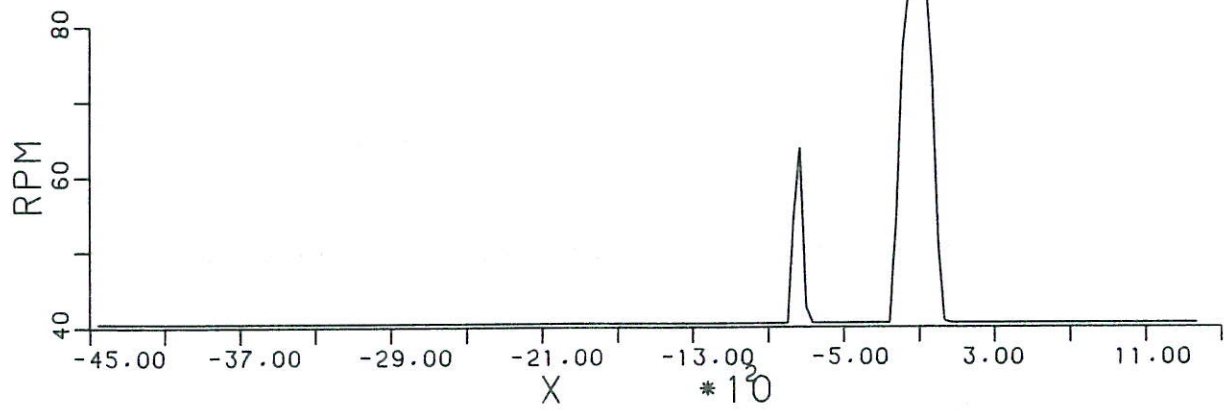


SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM
SIM., STRM=1, EKSP=2

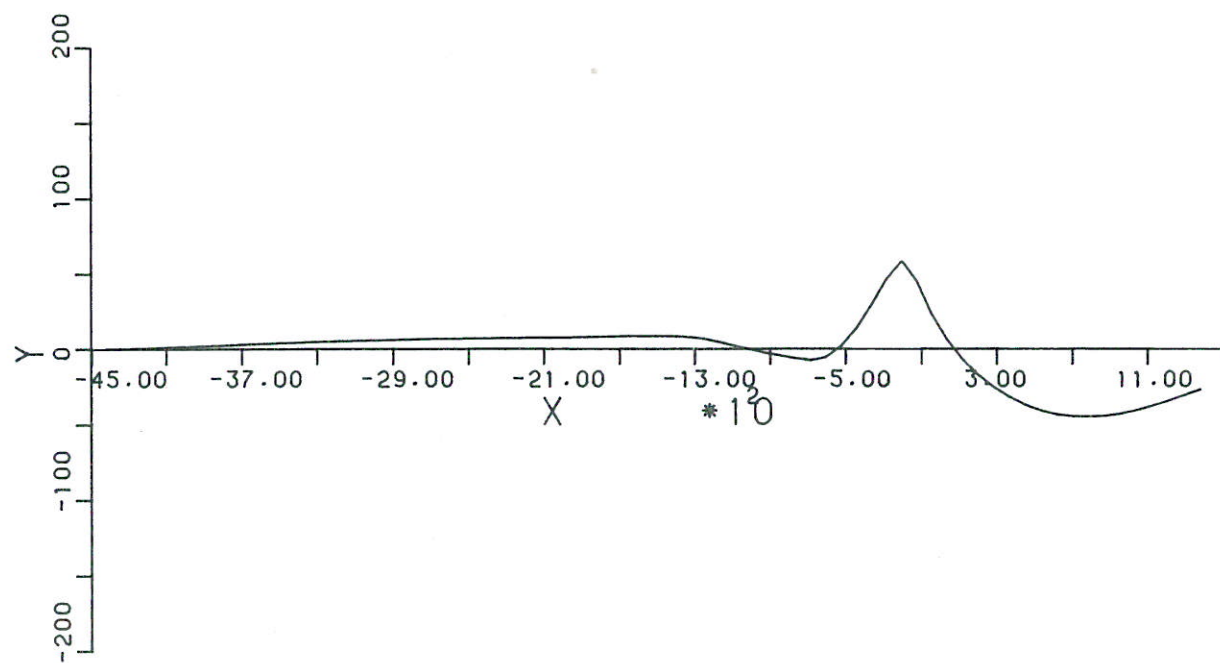
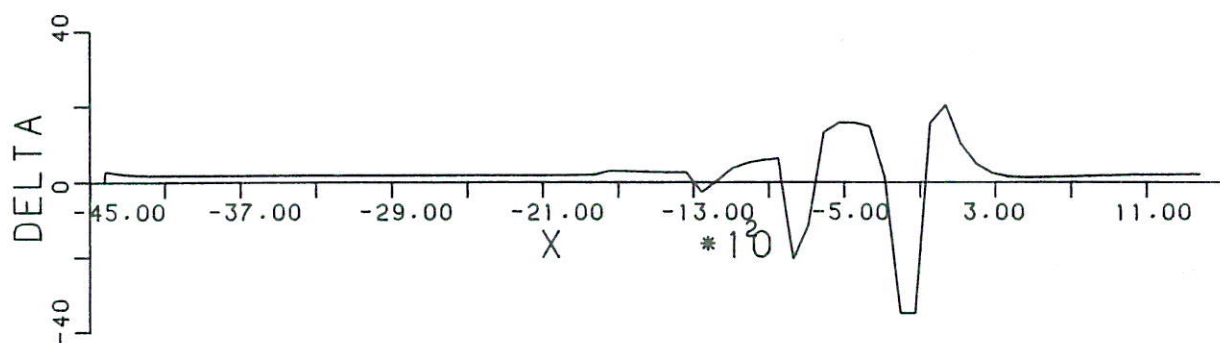
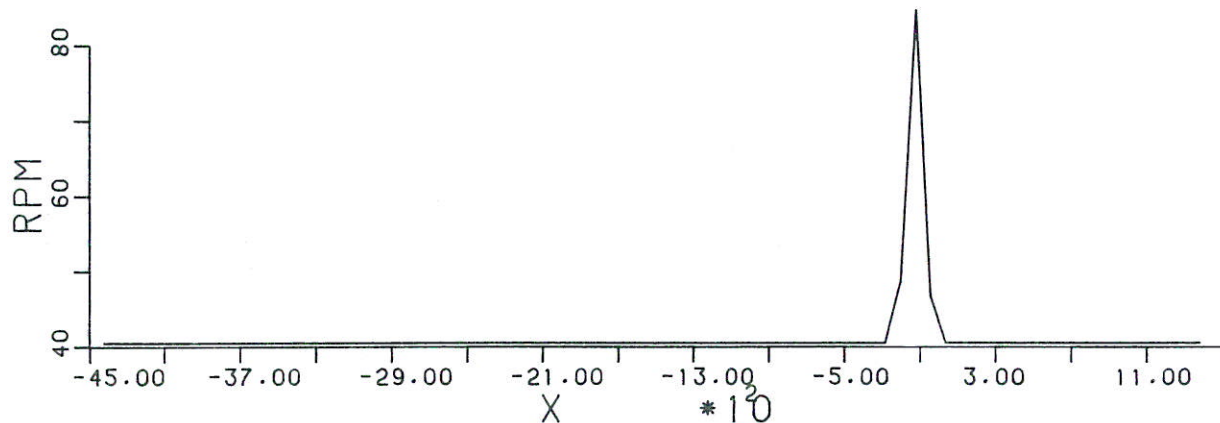
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

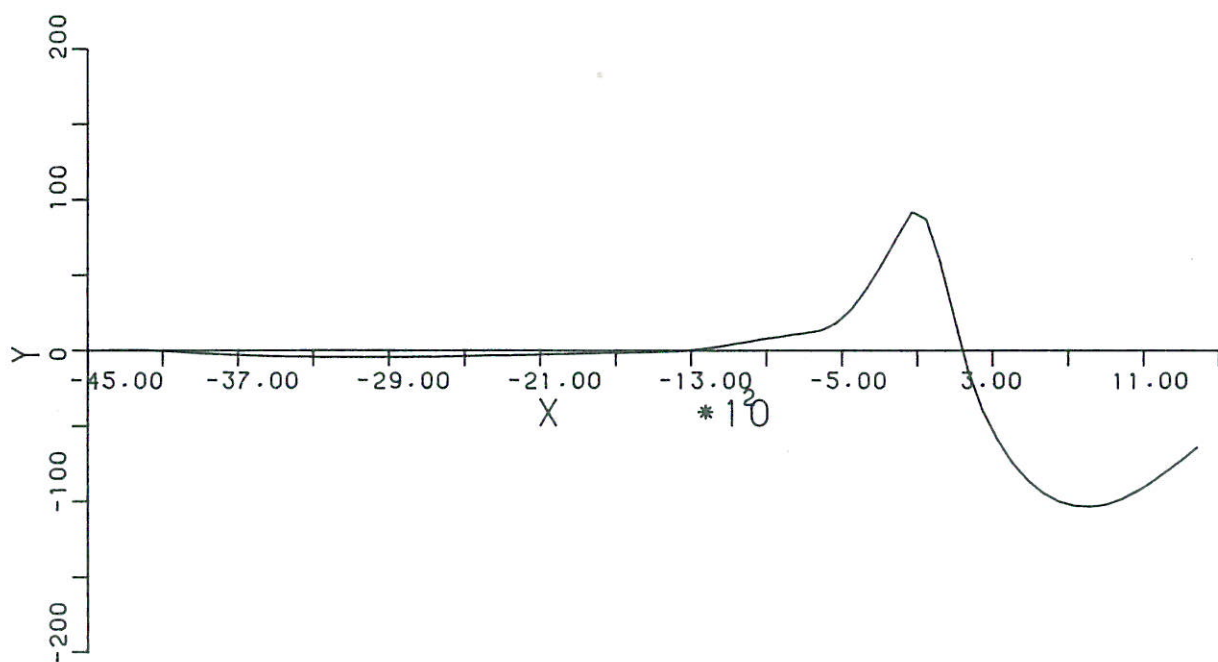
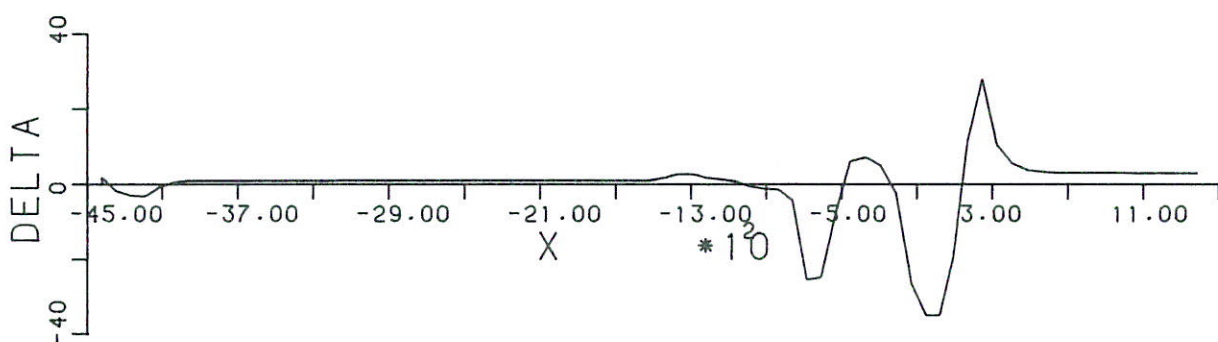
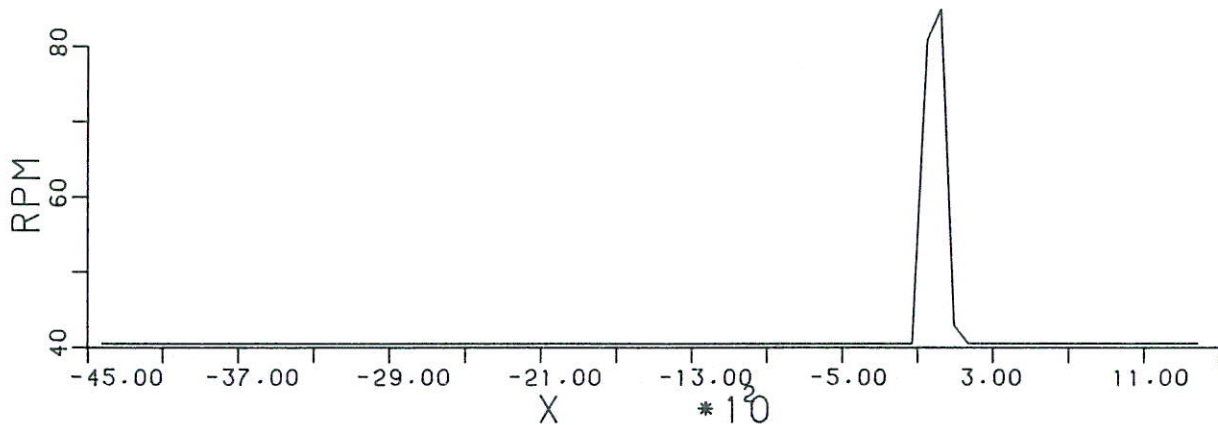
FIG. 4



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL VOOR DE CONDITIES : SIM., STRM=1, EKSP=1, DEVS=4, AUTO=5.		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	W252	FIG. 5



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL VOOR DE CONDITIES : SIM., STRM=2, EKSP=1, DEVS=4, AUTO=5.		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	W252	FIG. 6

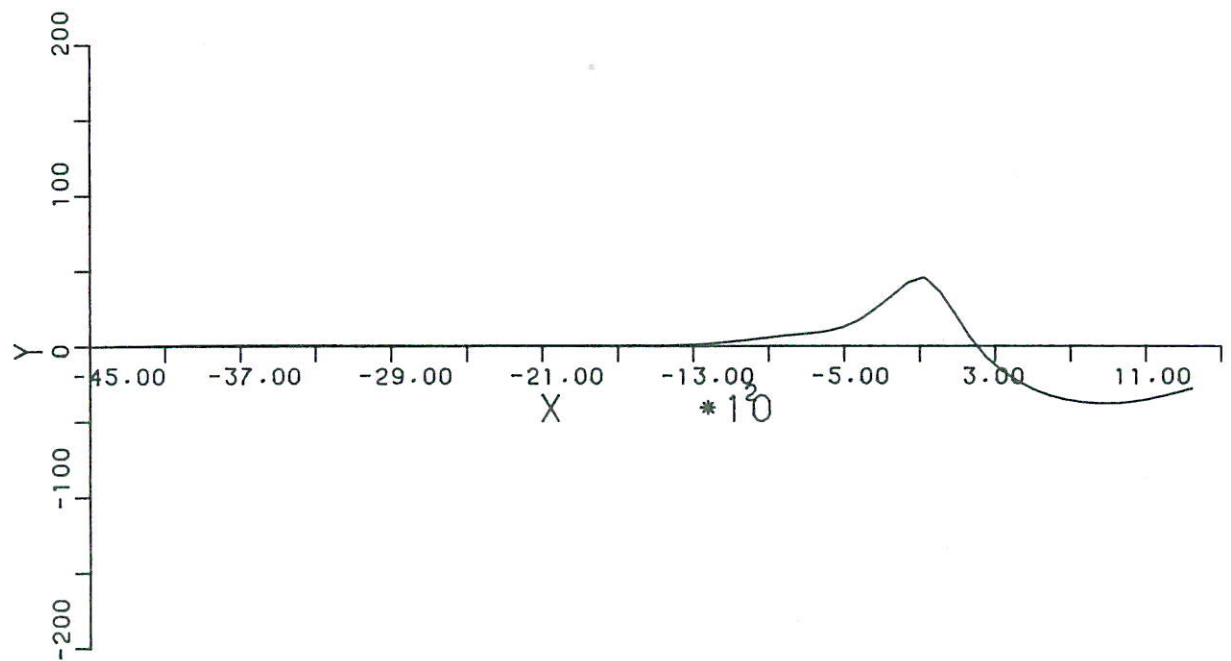
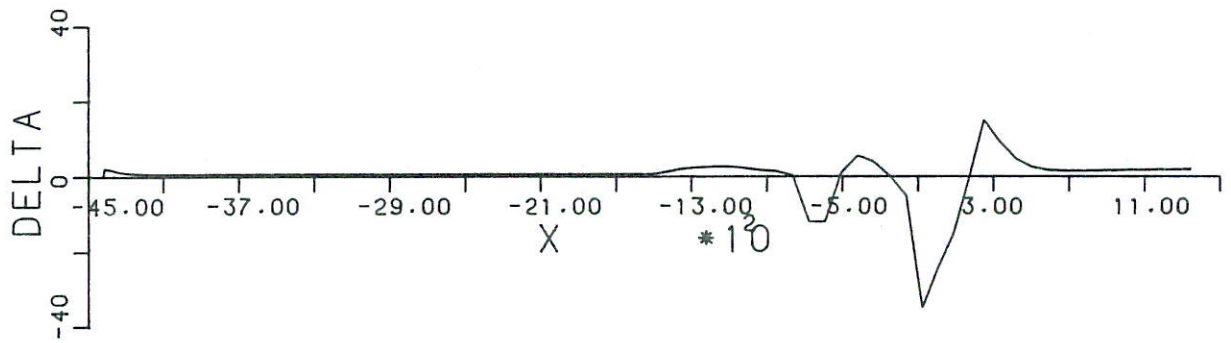
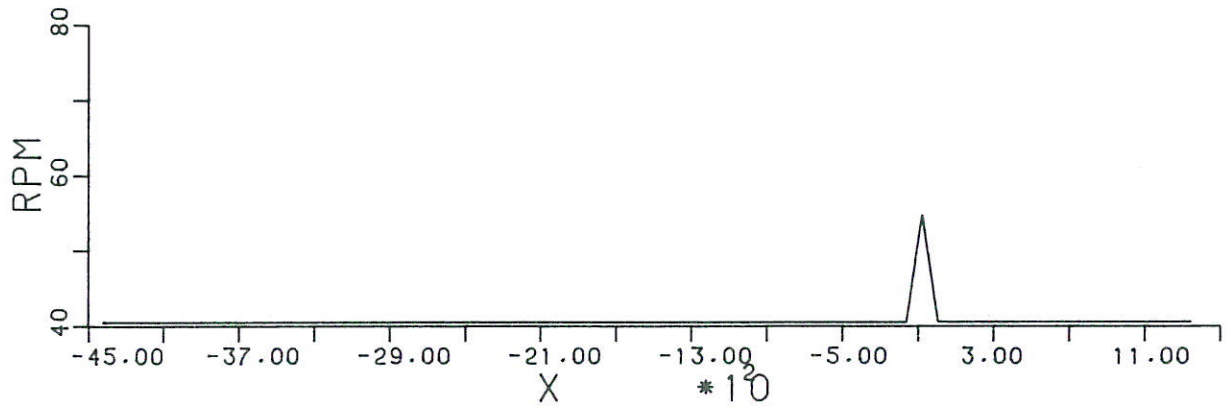


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 SIM., STRM=1, EKSP=2, DEVS=4, AUTO=5.

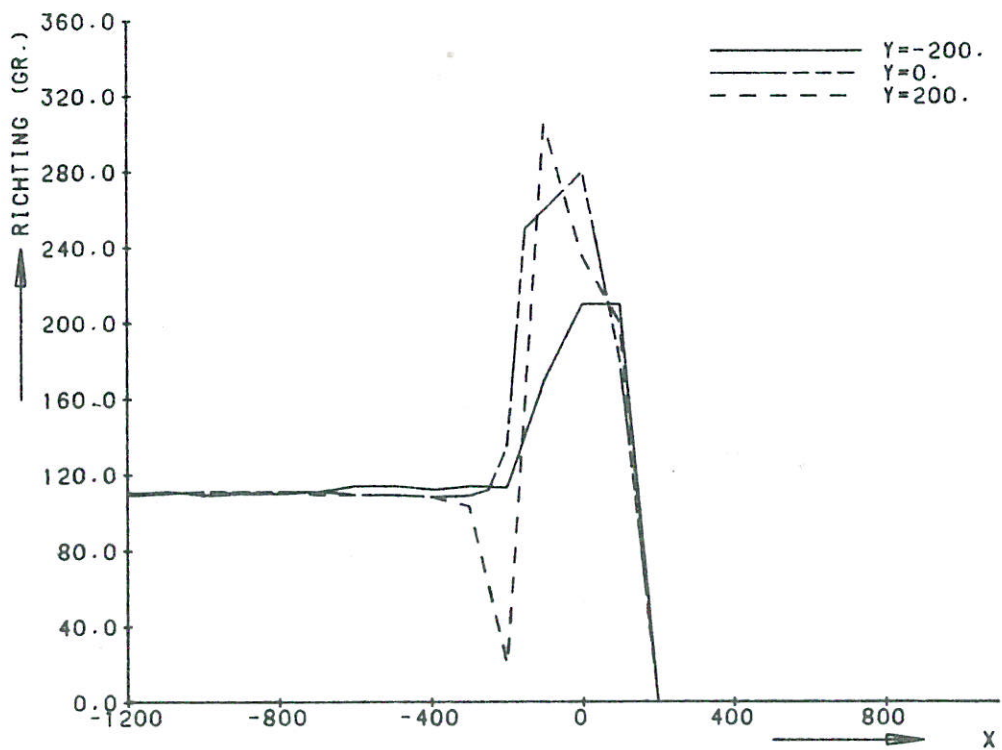
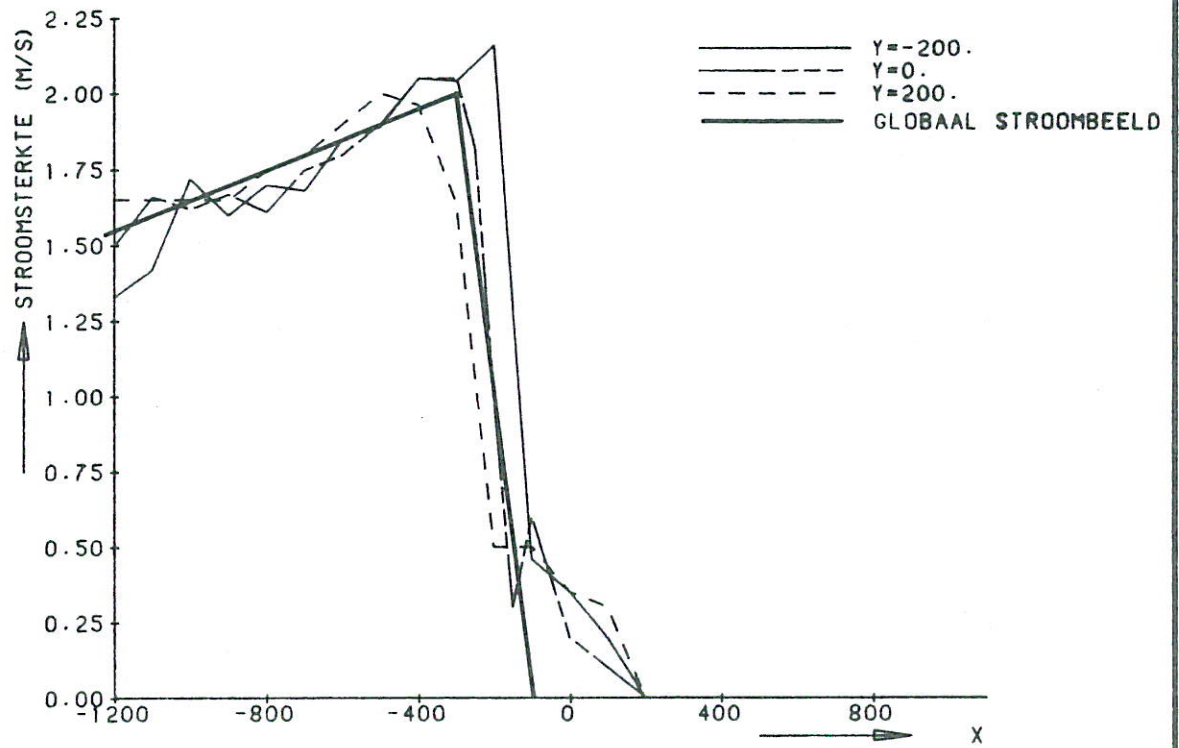
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 7



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 SIM., STRM=2, EKSP=2, DEVS=4, AUTO=5.

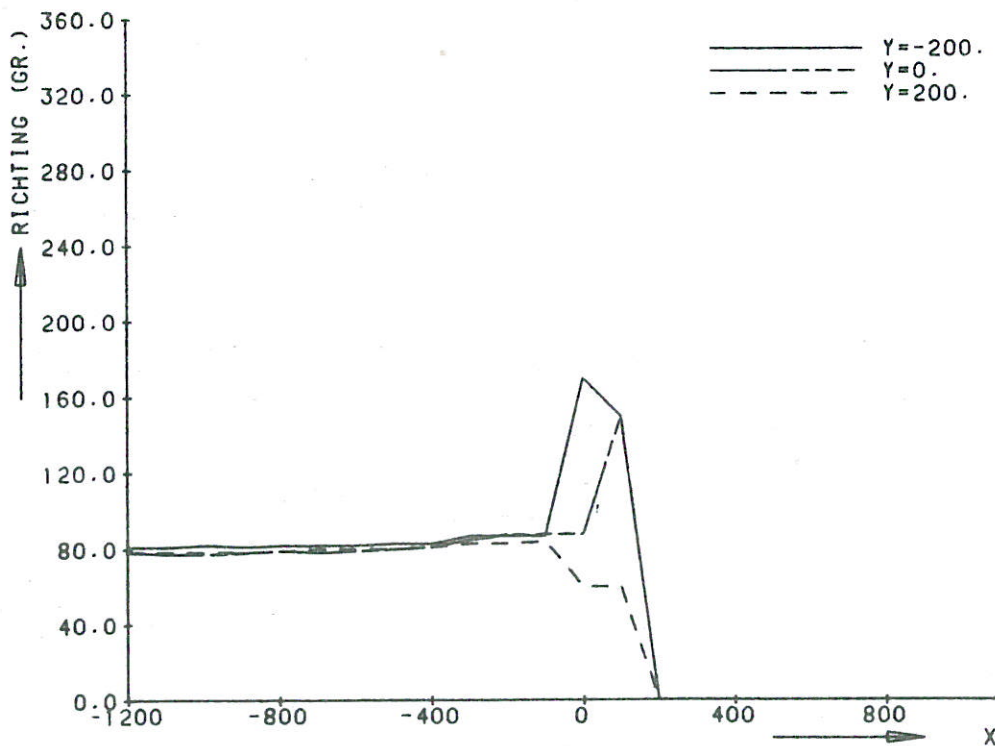
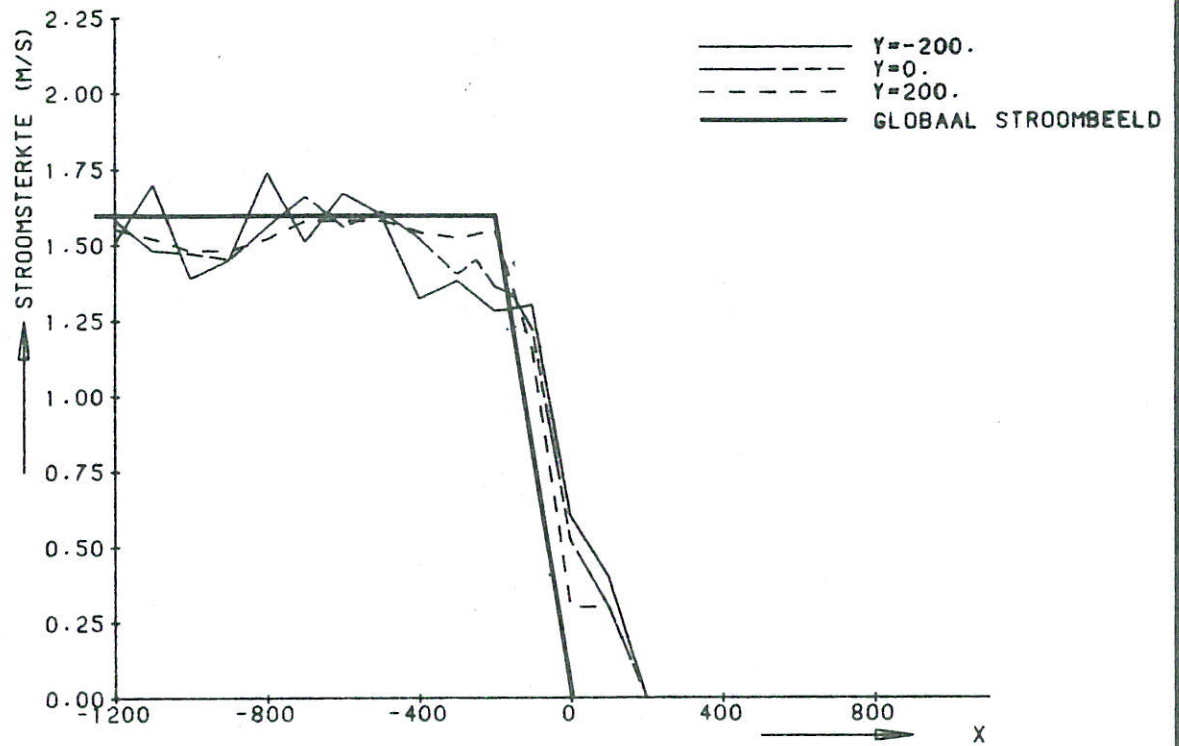


SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM
FYS., STRM=1, EKSP=1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 9

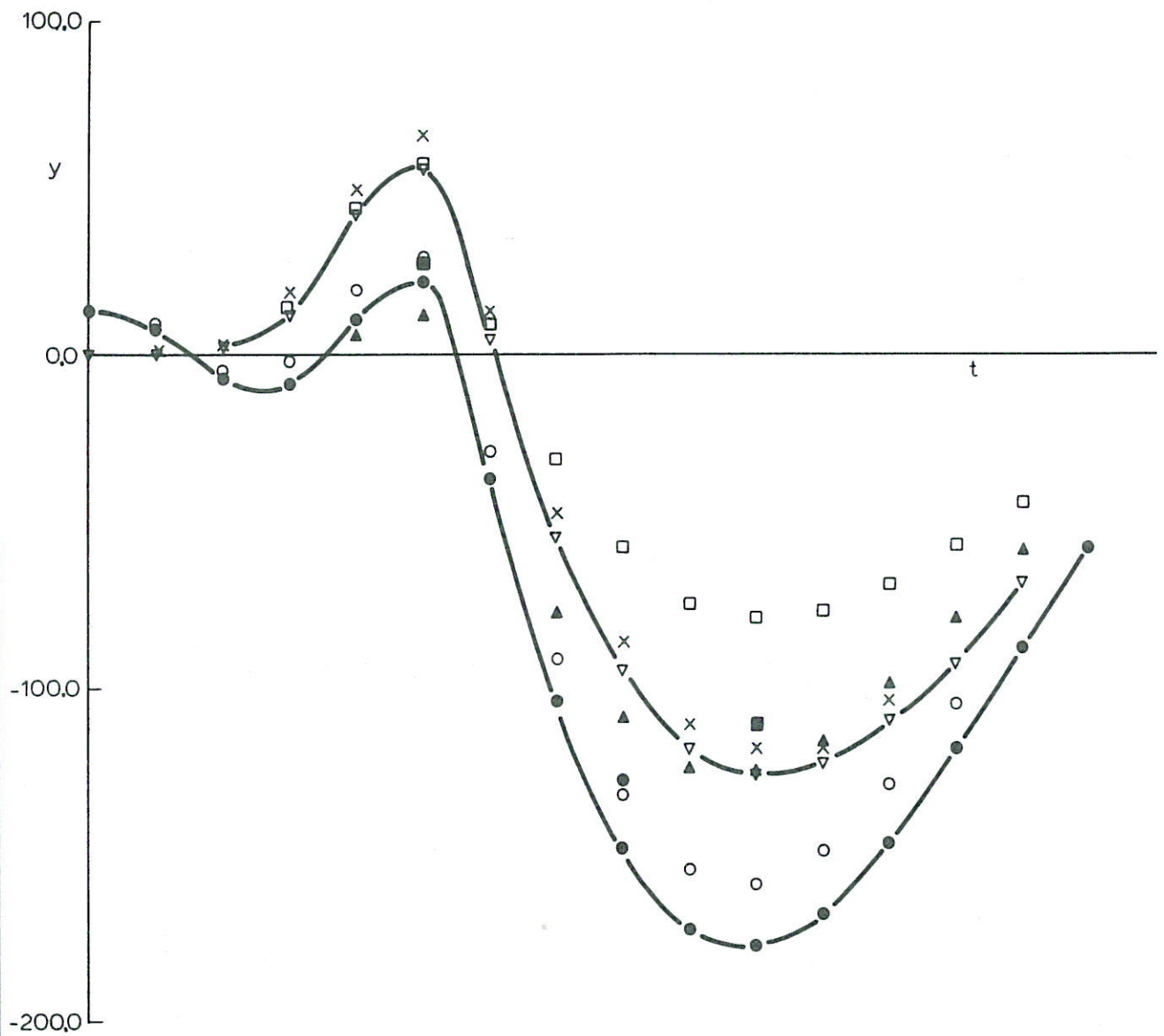


SNELHEIDSVERDELING VAN DE DWARSSTROOM
FYS., STRM=1, EKSP=2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

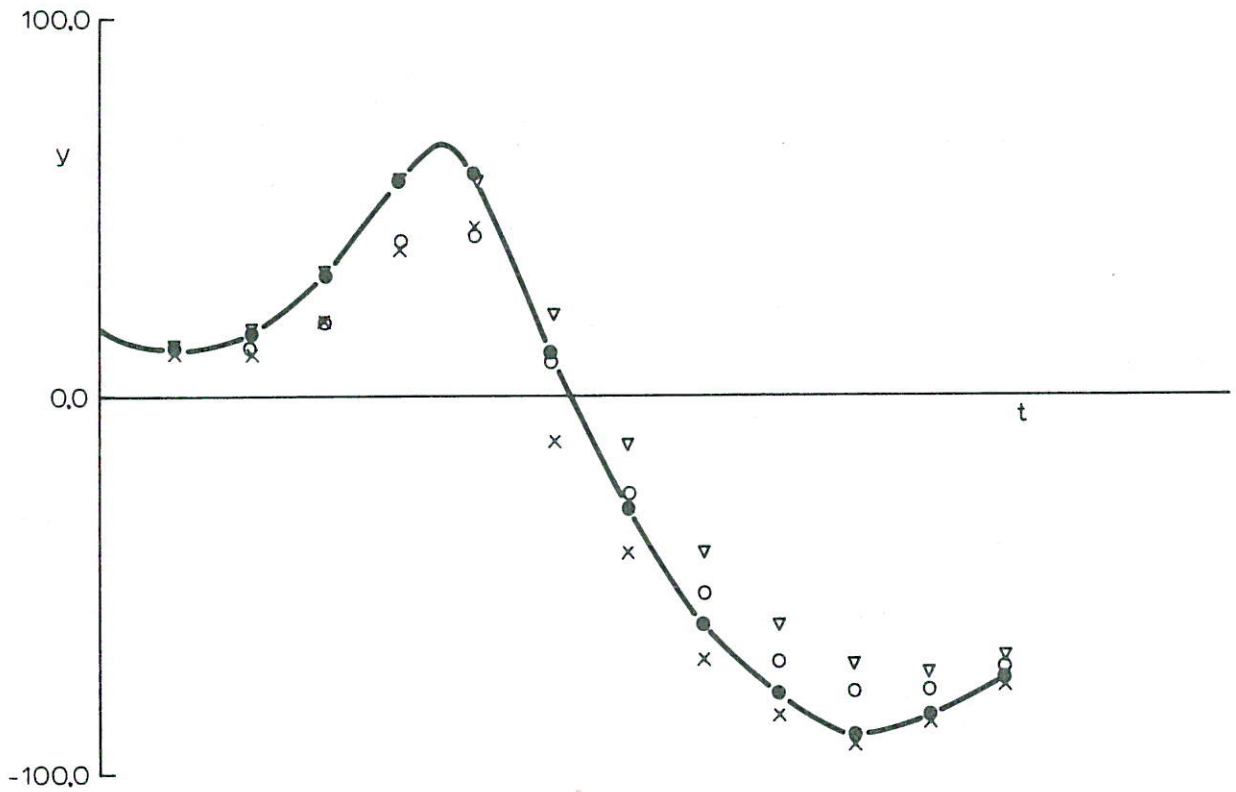
W252

FIG. 10



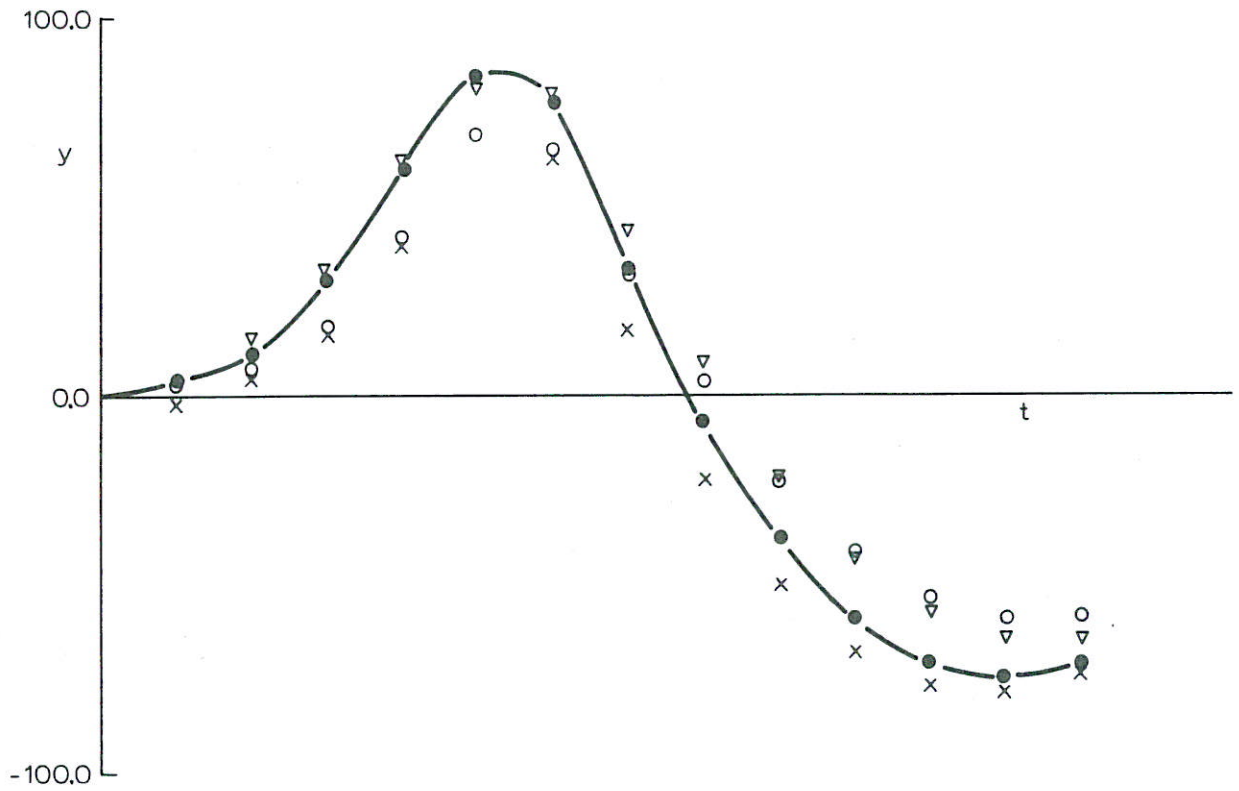
- automaat 5
fysisch startpunt
lokale stroomsnelheid
- automaat 1
fysisch startpunt
lokale stroomsnelheid
- ▲ automaat 5
fysisch startpunt
scheepsgemiddelde stroomsnelheid
- ▼ automaat 5
evenwicht startpunt
lokale stroomsnelheid
- × automaat 5
evenwicht startpunt
lokale stroomsnelheid
- automaat 5
evenwicht startpunt
scheepsgemiddelde stroomsnelheid
- fysisch schaalmodel

INVLOED VAN STARTPUNT, STUURAUTOMAAT EN
RELATIEVE BEWEGINGSPRINCIPE OP VAARBAAN
FYS, EKSP=1, STRM=1, DEVS=2



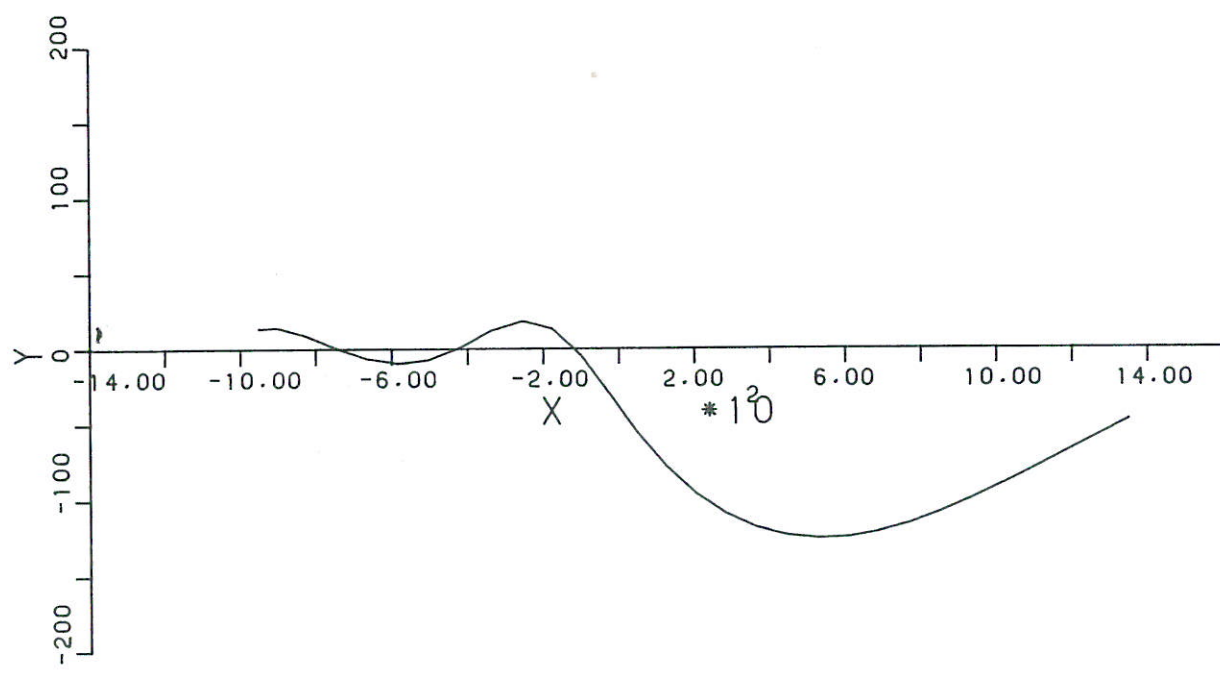
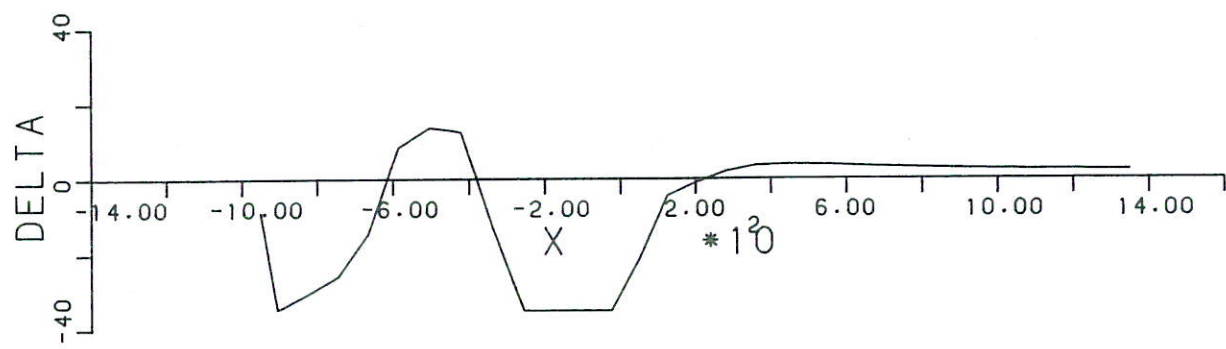
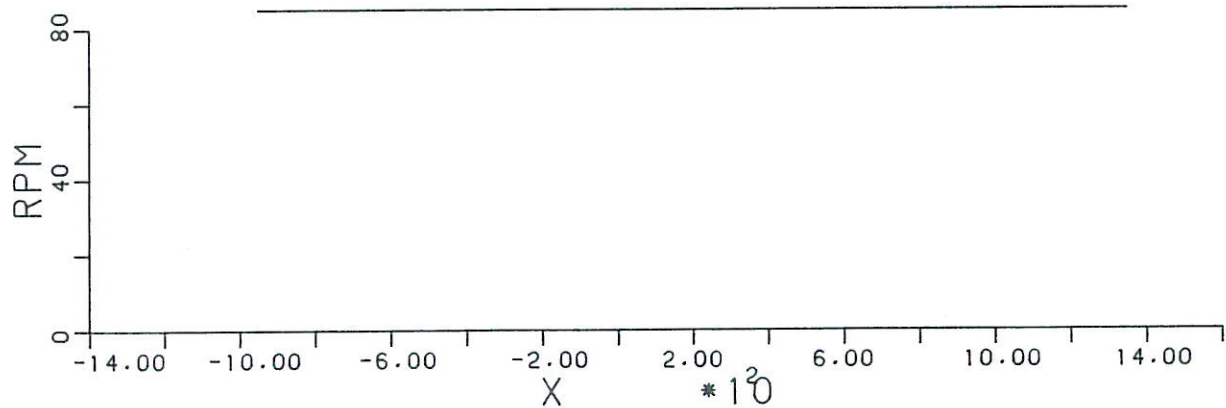
- automaat 1
lokale stroomsnelheid
- × automaat 5
lokale stroomsnelheid
- ▽ automaat 1
scheepsgemiddelde stroomsnelheid
- automaat 5
scheepsgemiddelde stroomsnelheid

INVLOED VAN STUURAUTOMAAT EN RELATIEVE
BEWEGINGSPRINCIPE OP VAARBAAN
FYS, EKSP=2, STRM = 1, DEVS = 4

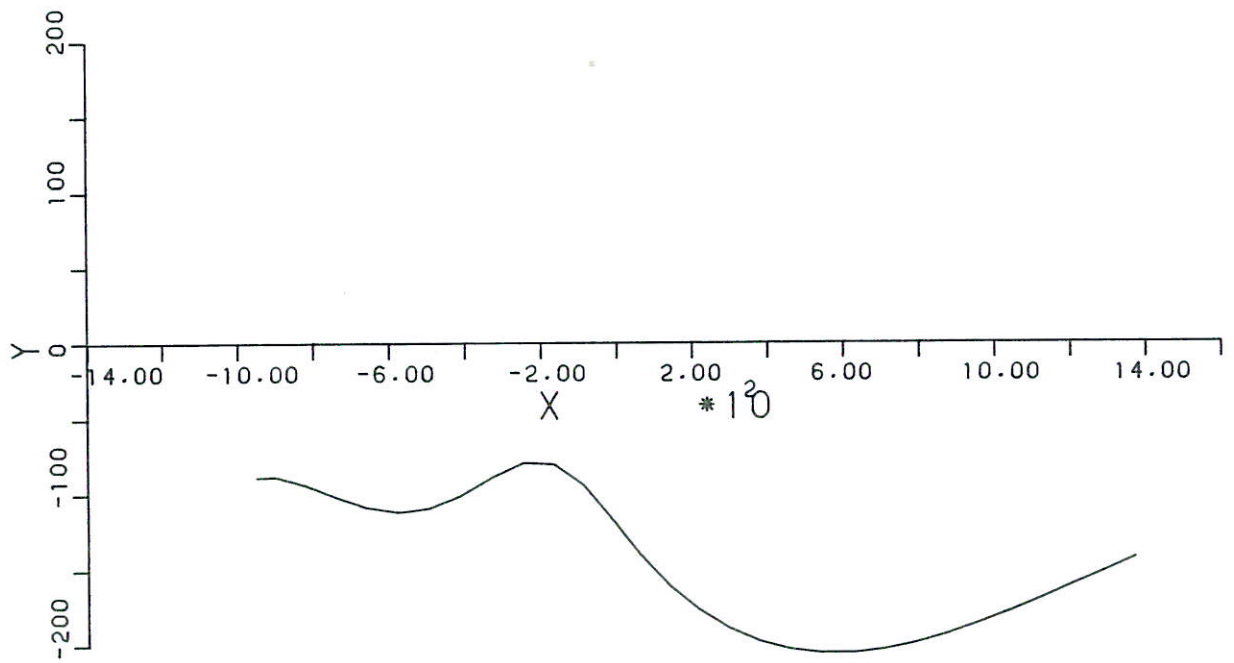
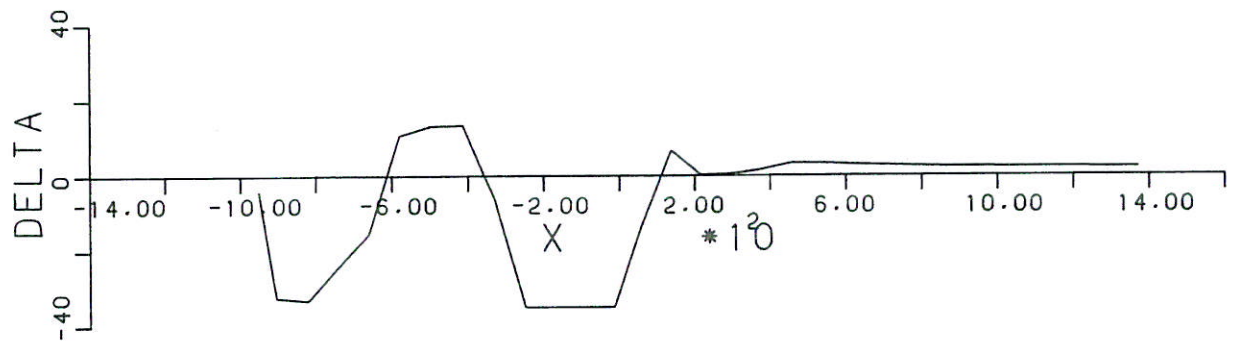
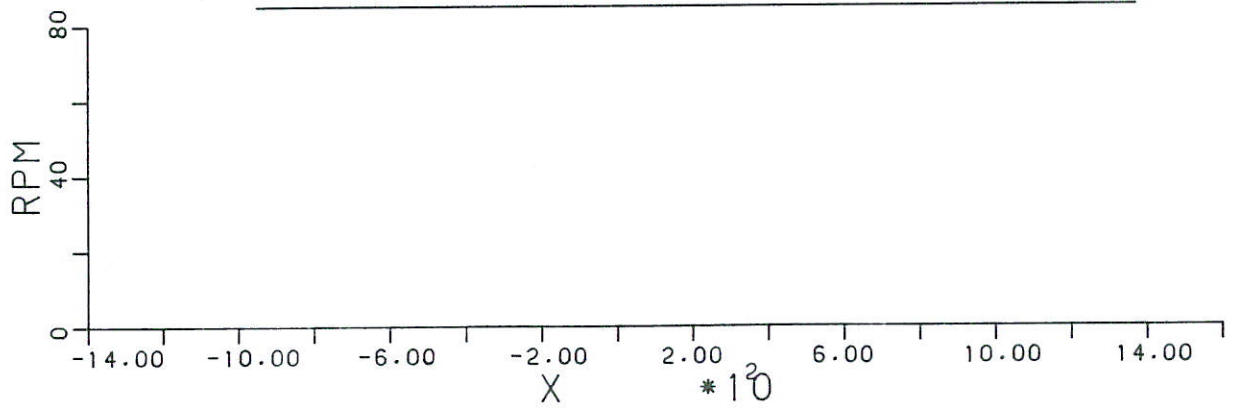


- automaat 1
lokale stroomsnelheid
- x automaat 5
lokale stroomsnelheid
- ▽ automaat 1
scheepsgemiddelde stroomsnelheid
- automaat 5
scheepsgemiddelde stroomsnelheid

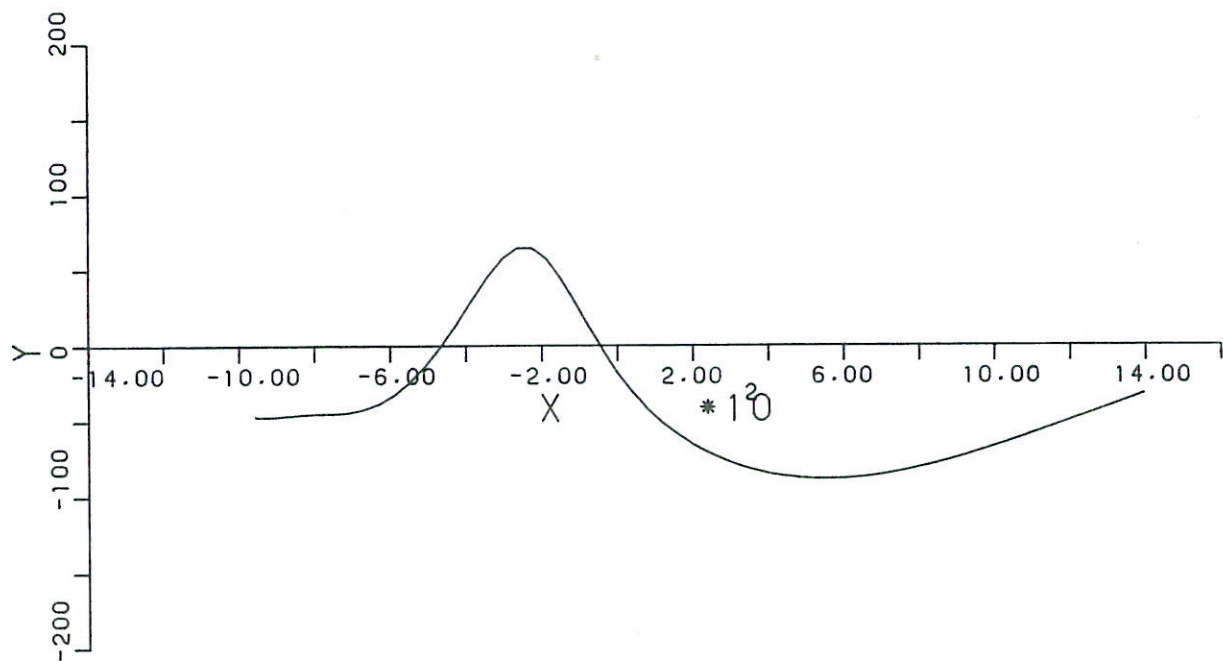
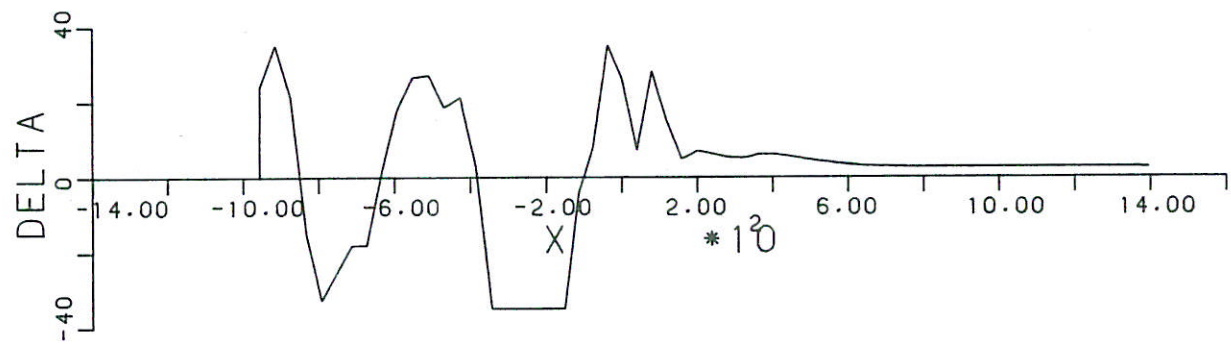
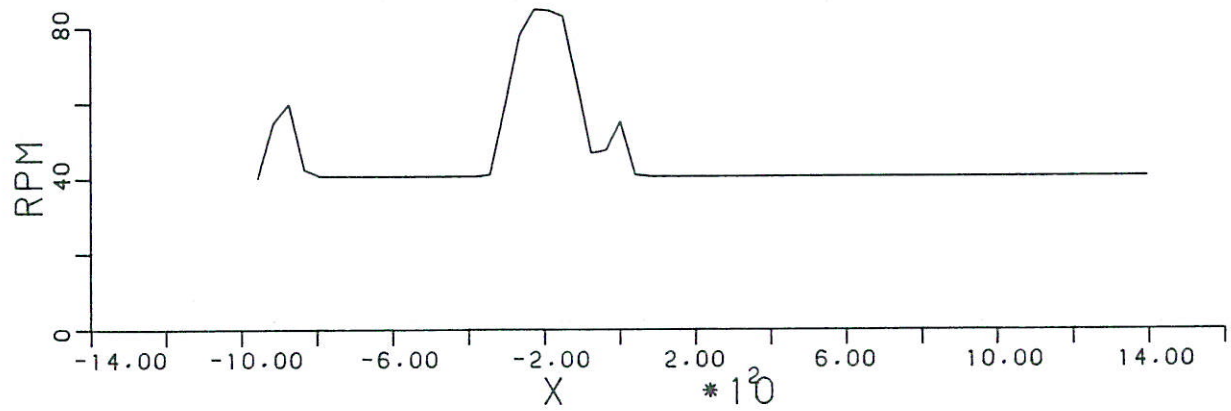
INVLOED VAN STUURAUTOMAAT EN RELATIEVE
BEWEGINGSPRINCIPE OP VAARBAAN (EVENWICHTS
STARTPUNT). FYS, EKSP=2, STRM=1, DEVS=4



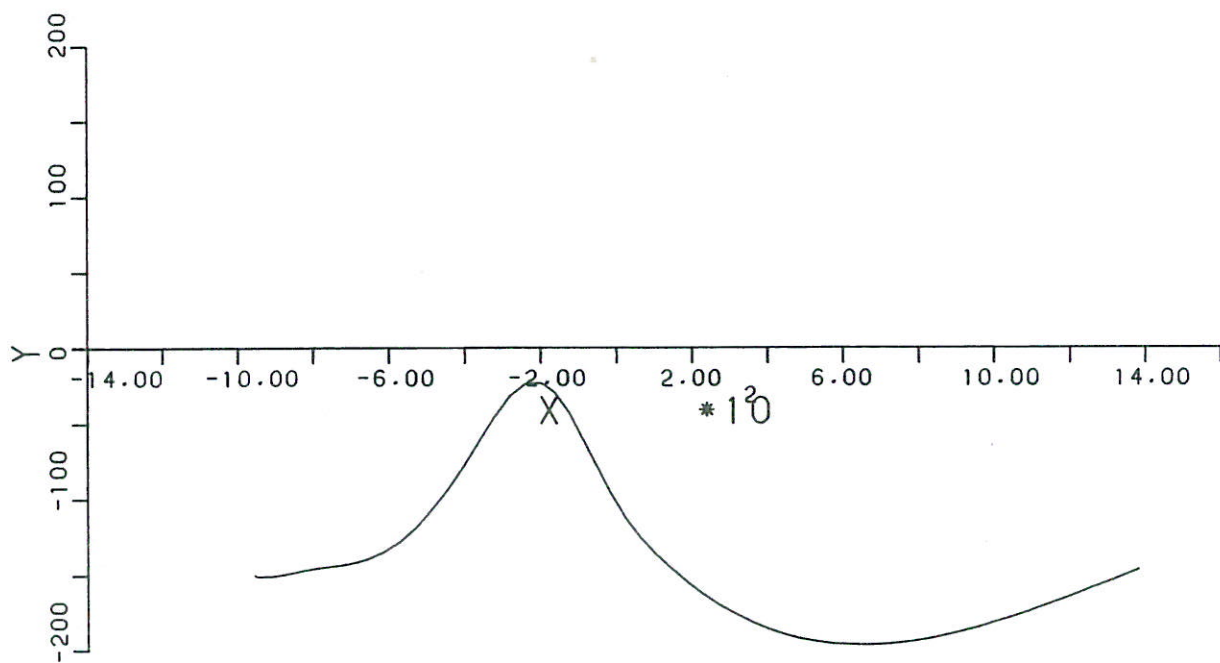
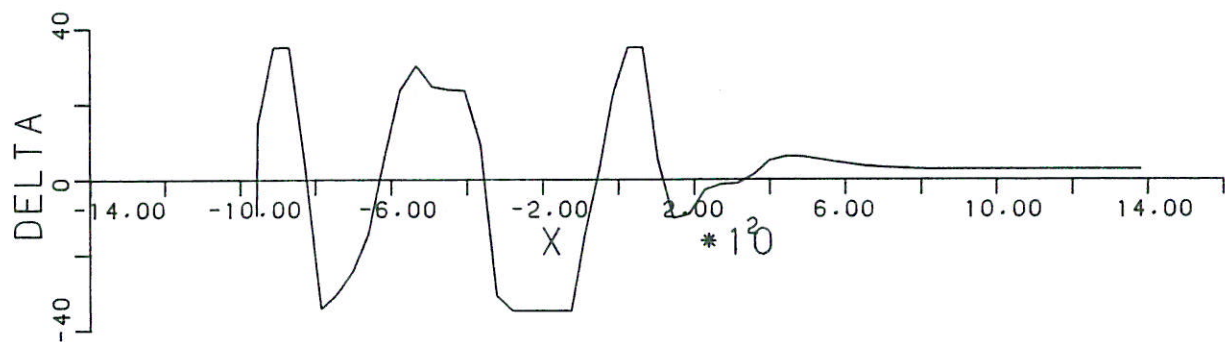
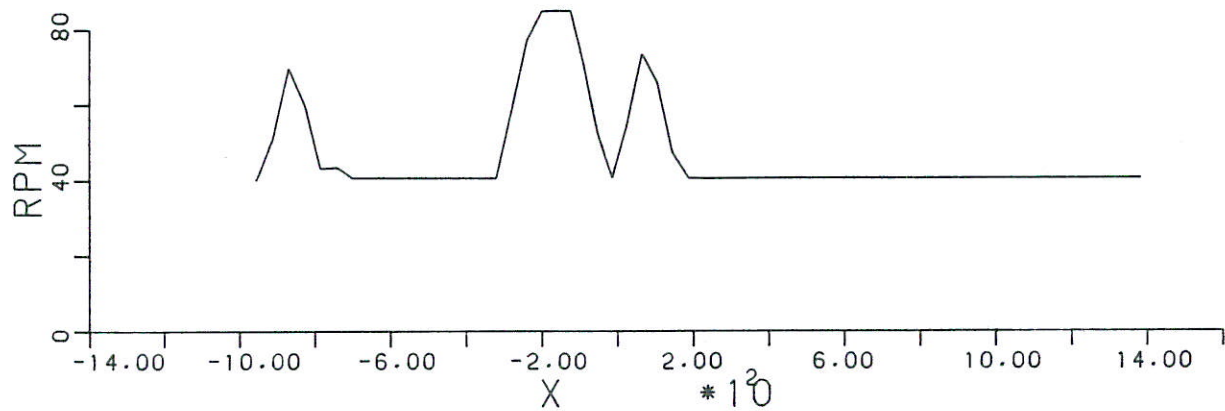
VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL VOOR DE CONDITIES : FYS., STRM=1, EKSP=1, DEVS=2, AUTO=5.		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	W252	FIG. 14



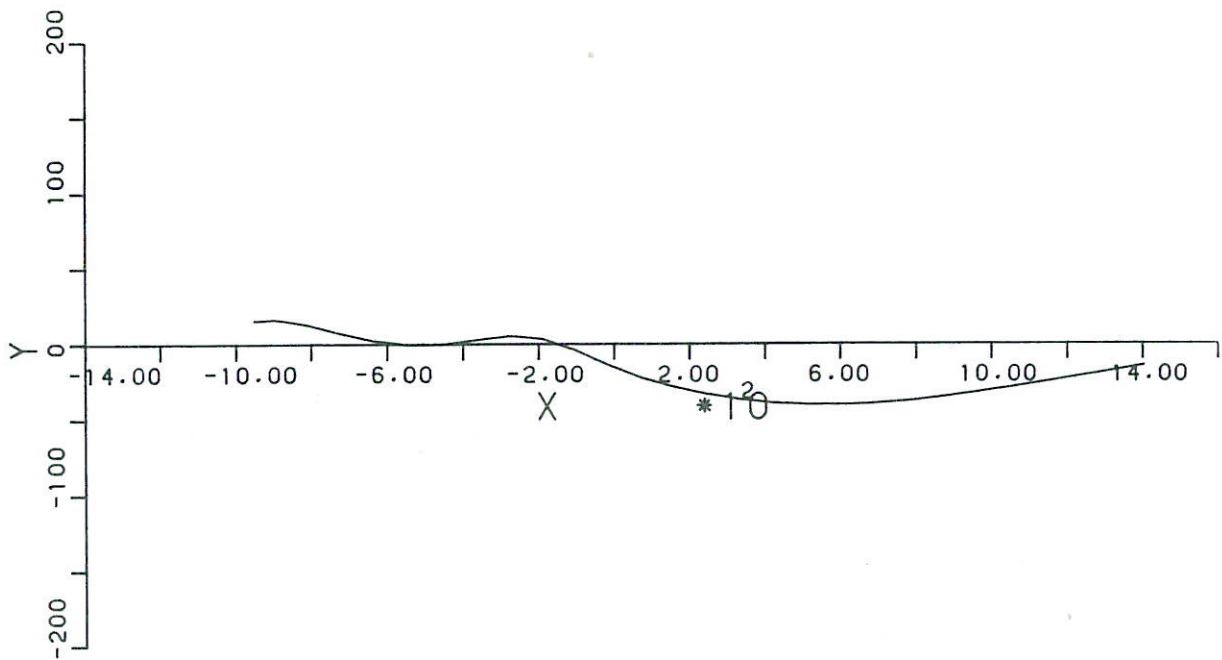
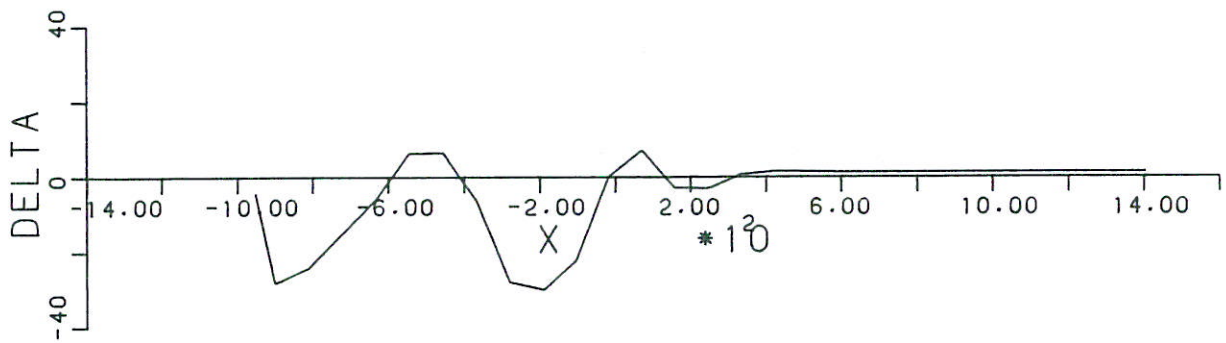
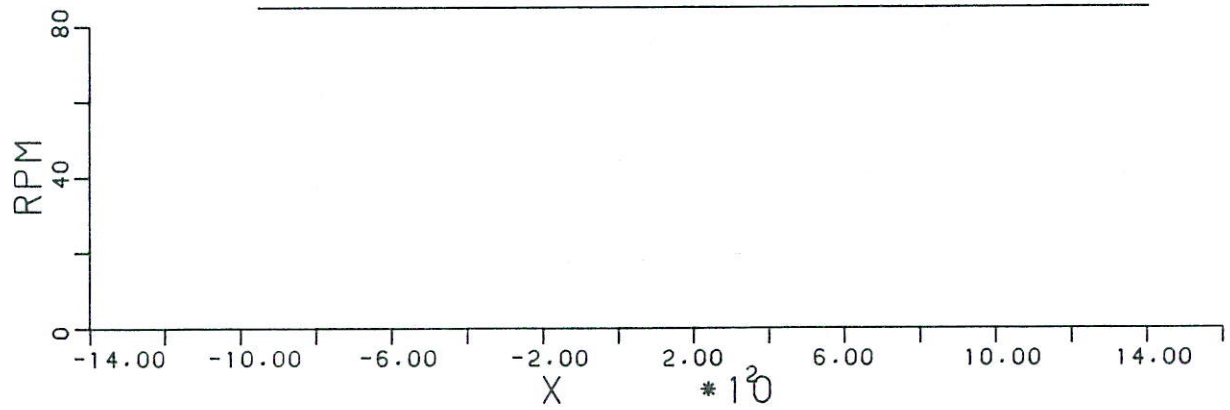
VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL VOOR DE CONDITIES : FYS., STRM=1, EKSP=1, DEVS=3, AUTO=5.		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	W252	FIG. 15



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=1, EKSP=1, DEVS=4, AUTO=5.



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=1, EKSP=1, DEVS=5, AUTO=5.

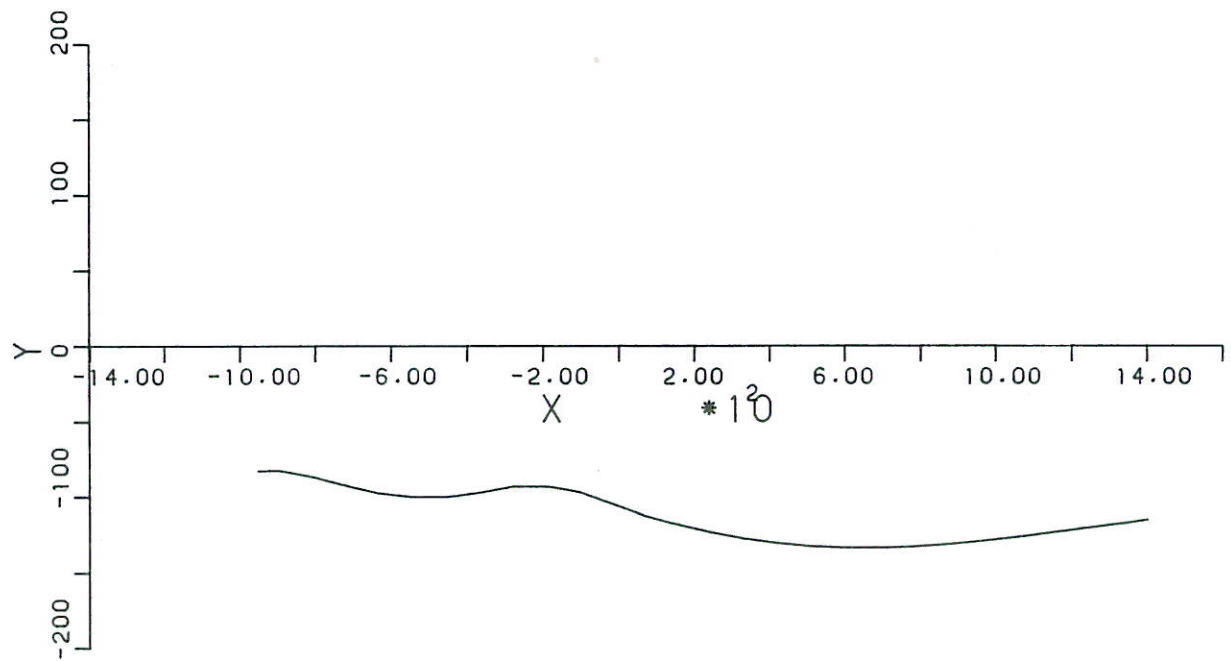
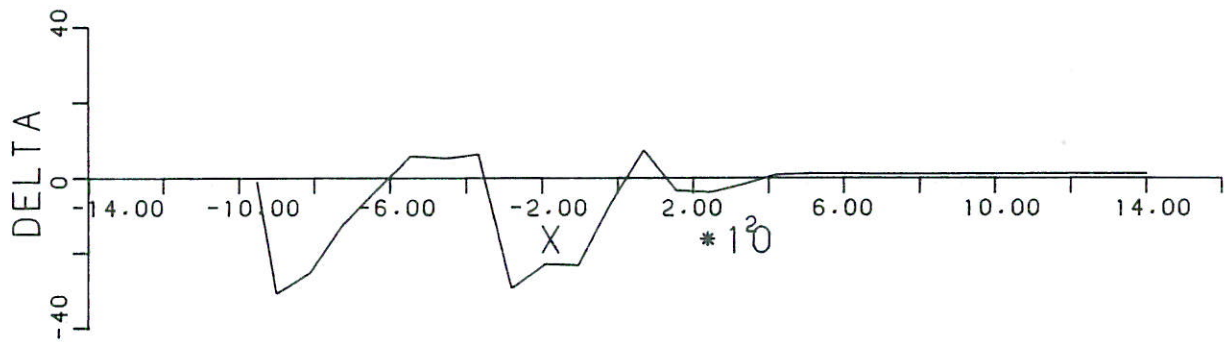
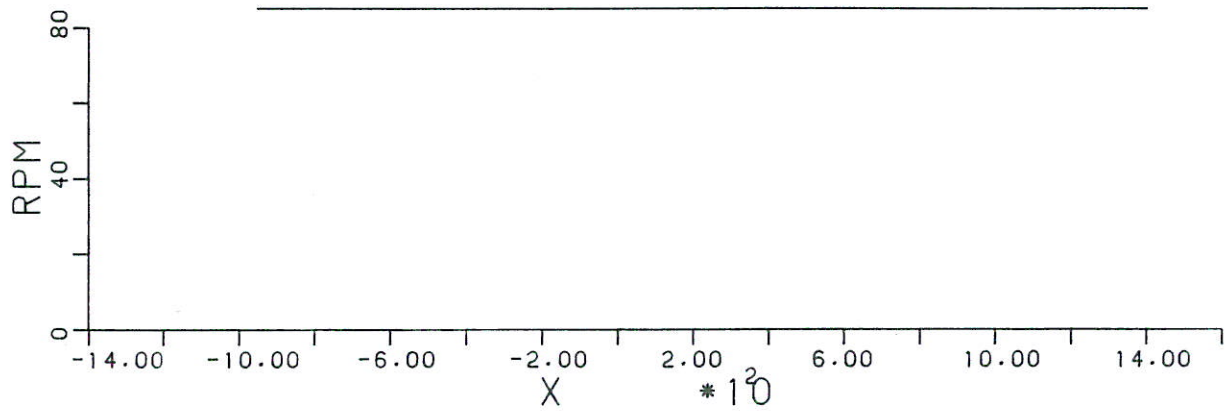


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=1, DEVS=2, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 18

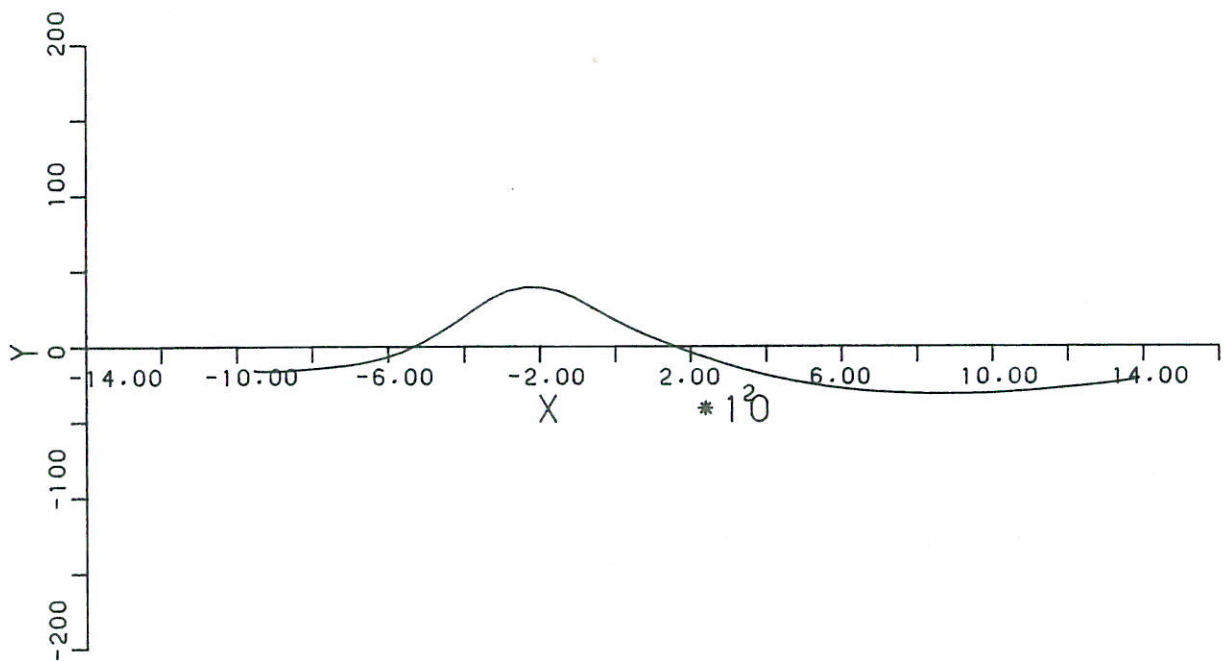
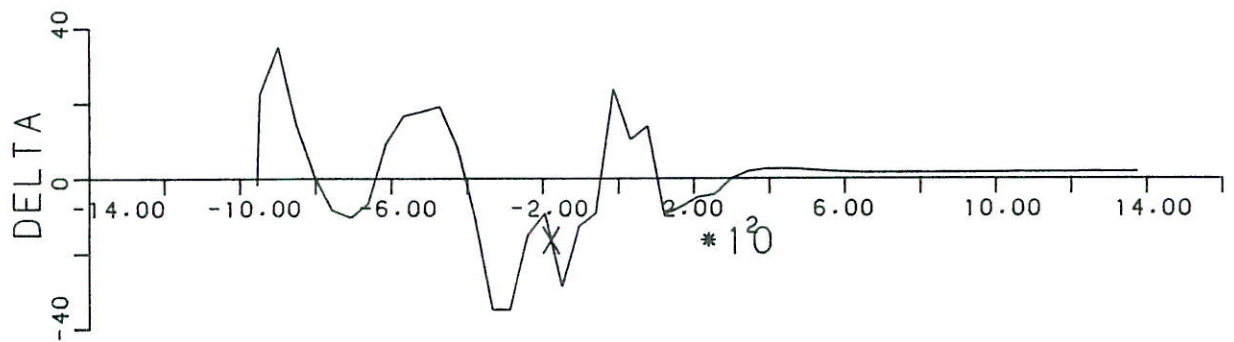
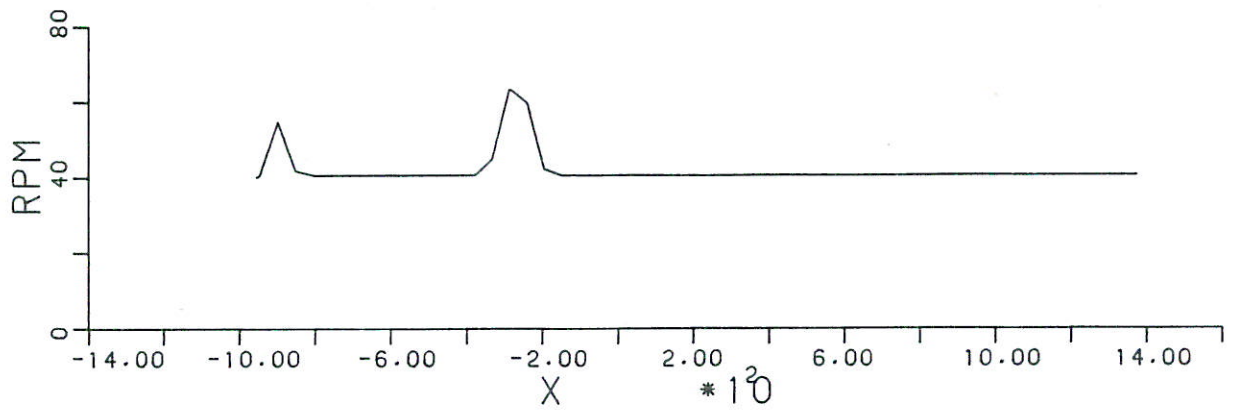


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=1, DEVS=3, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 19

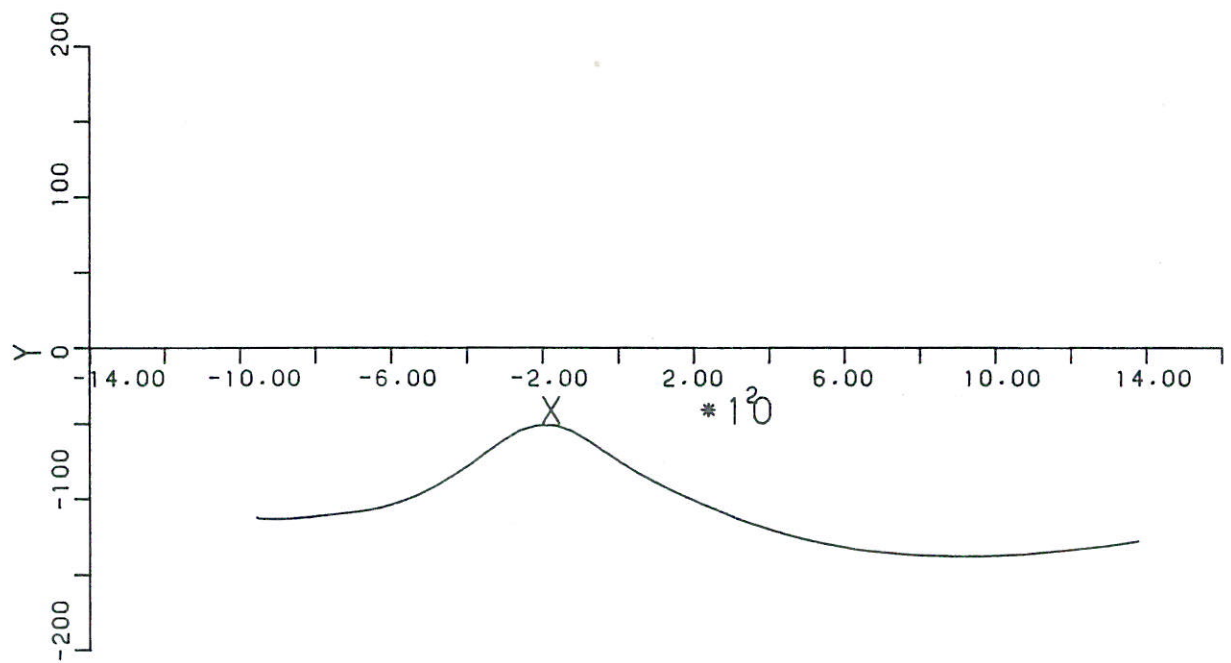
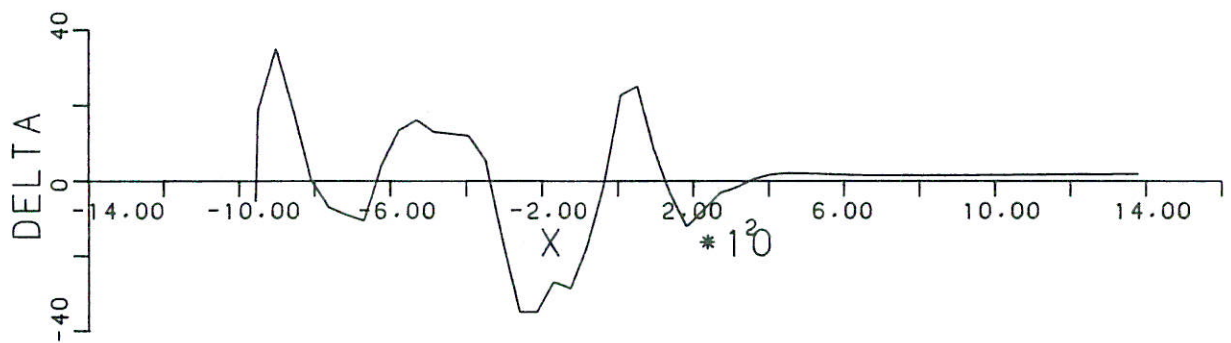
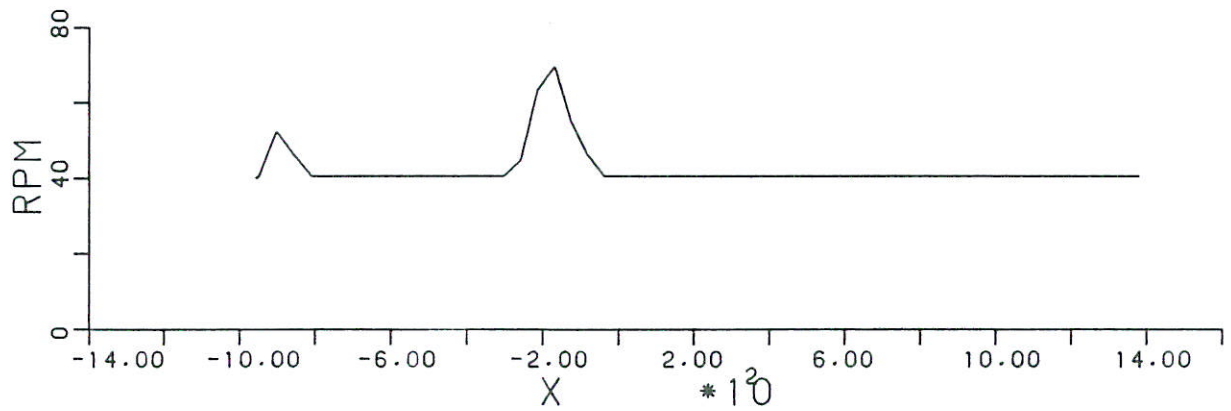


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=1, DEVS=4, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 20

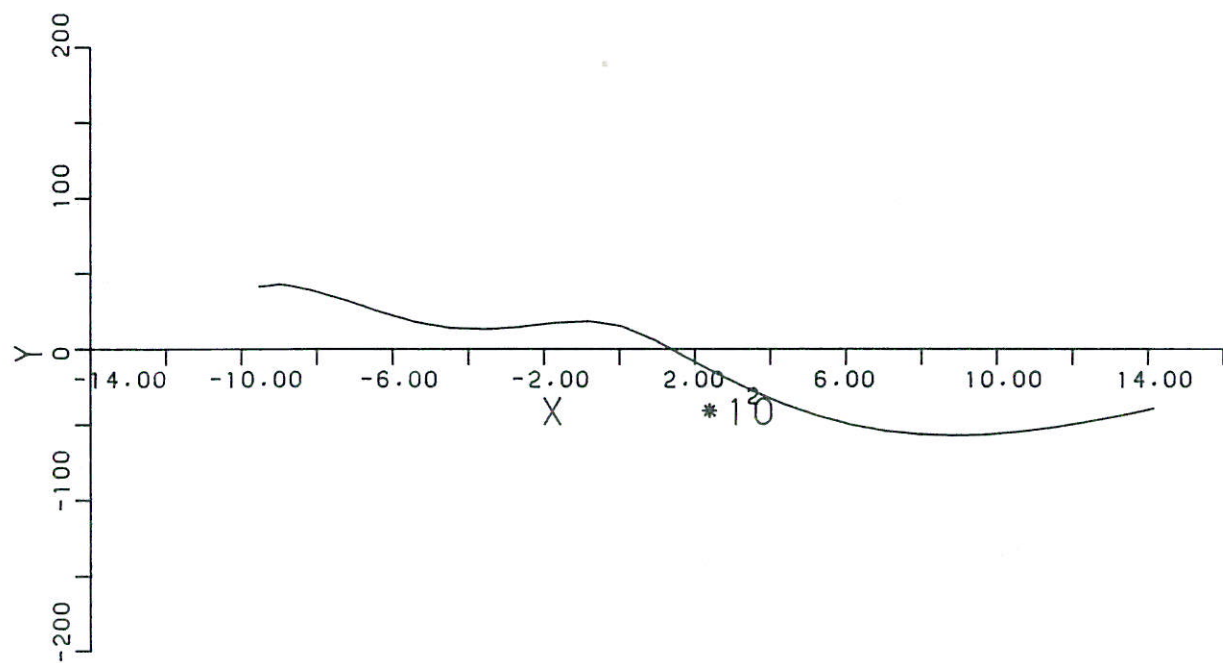
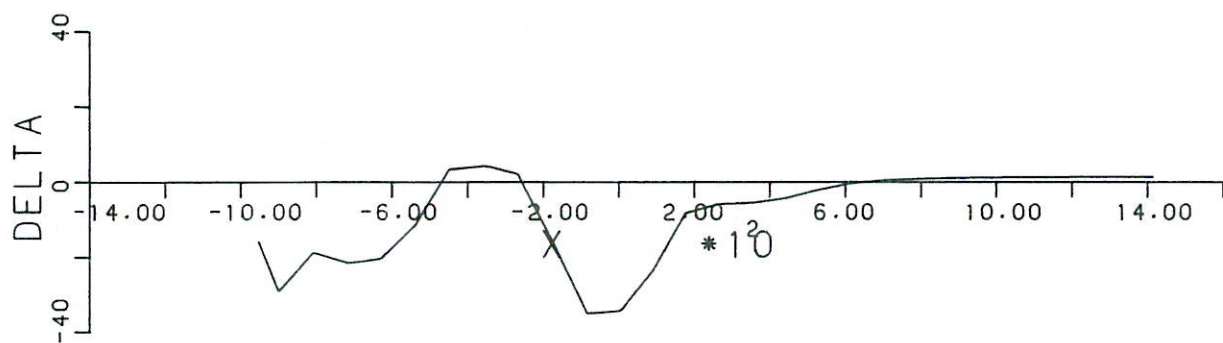
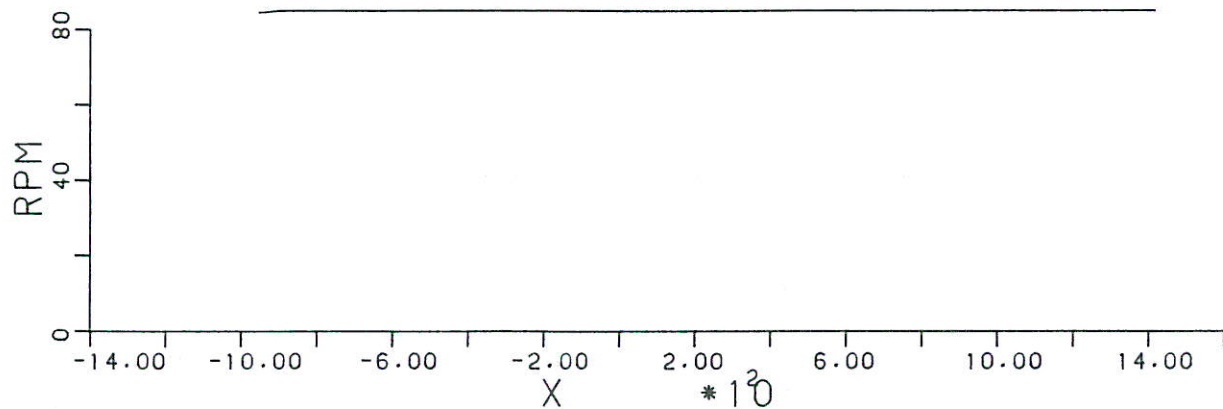


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=1, DEVS=5, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 21

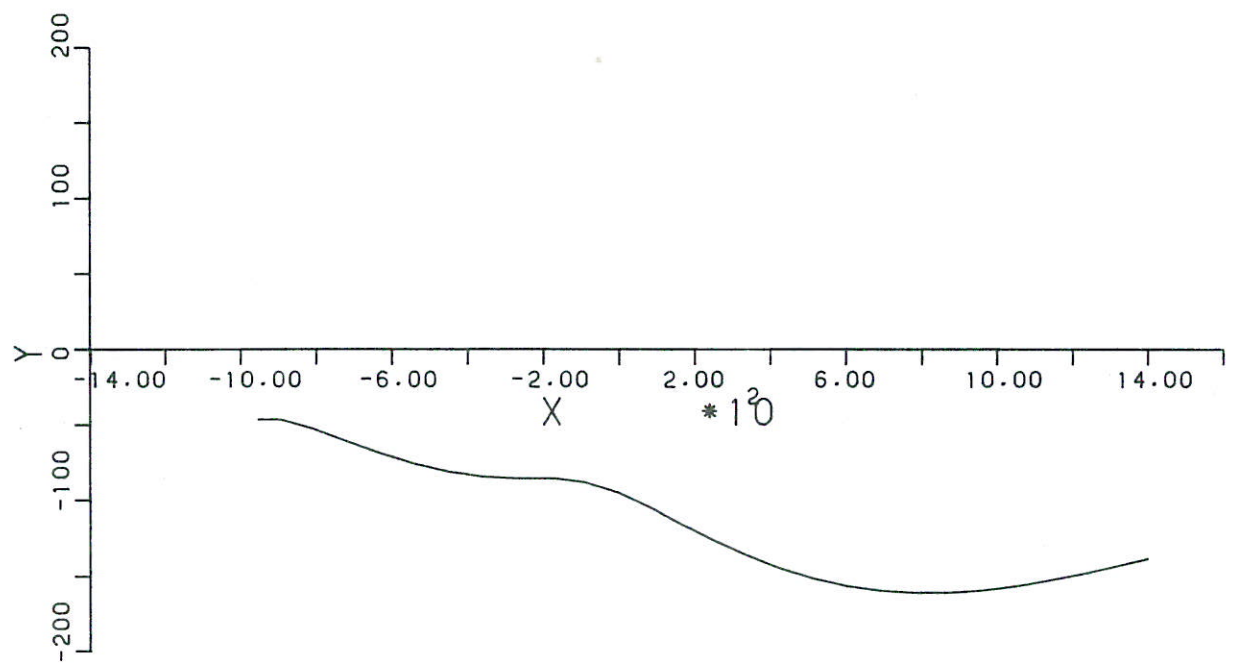
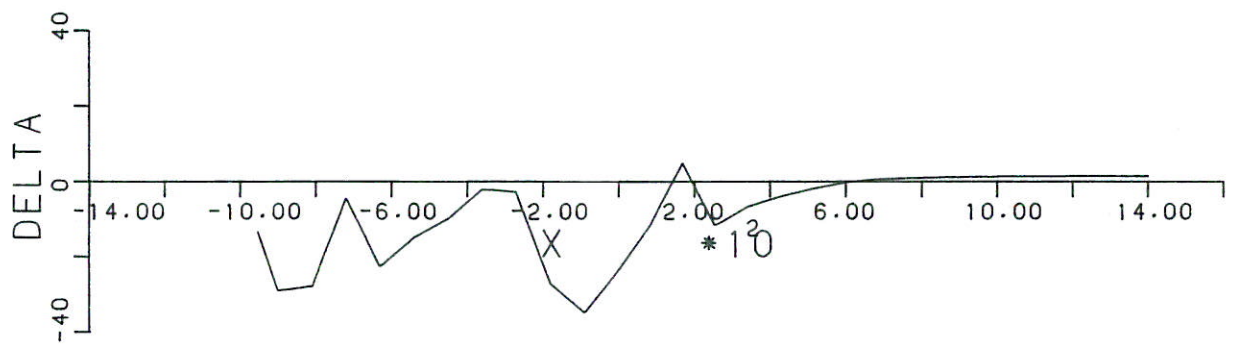
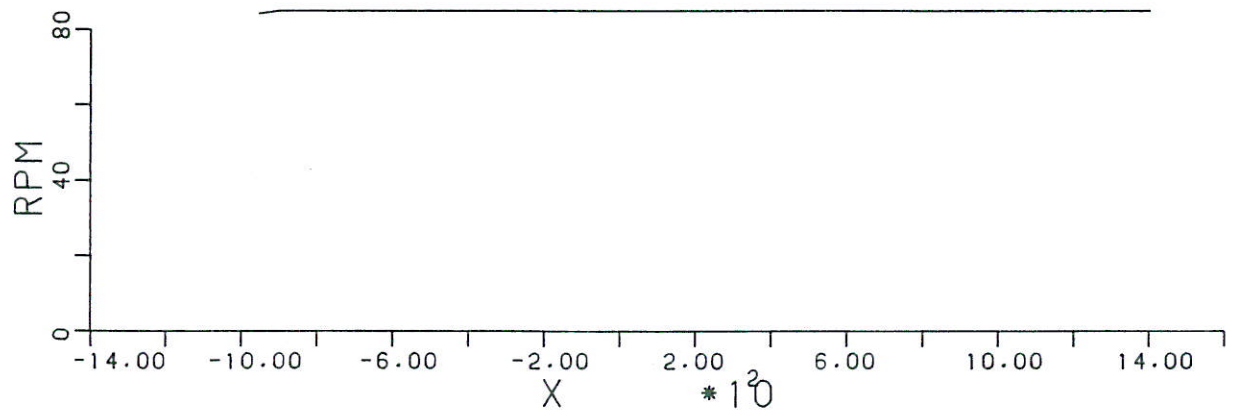


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=1, EKSP=2, DEVS=2, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 22

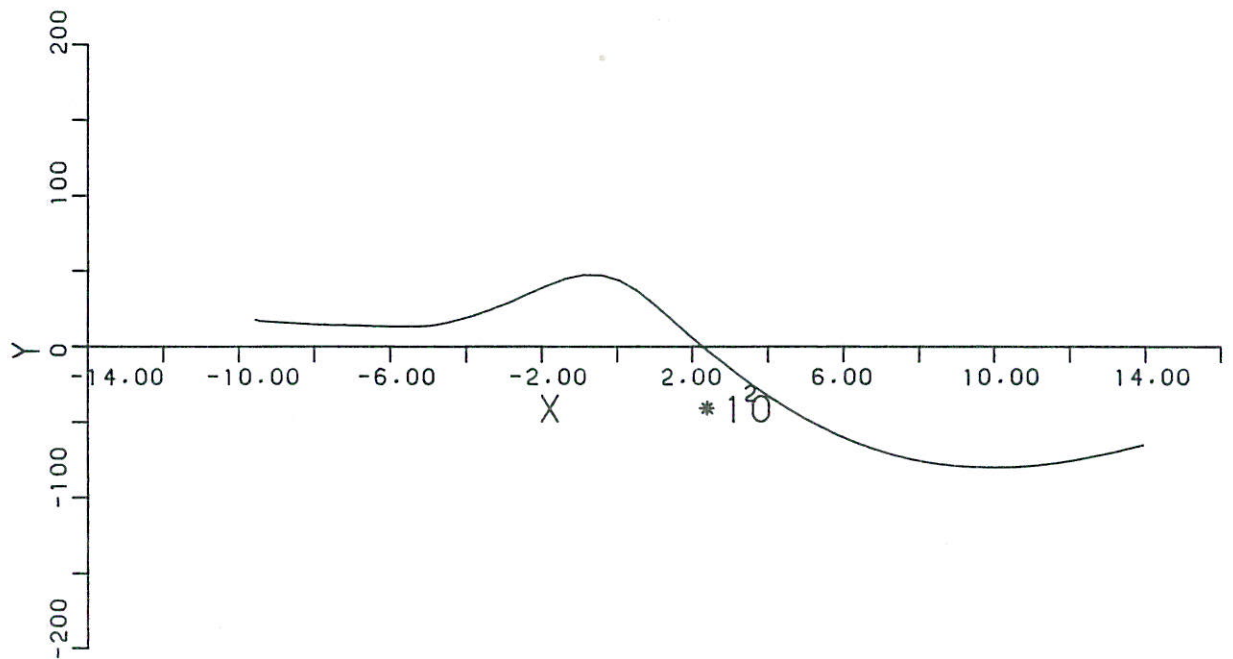
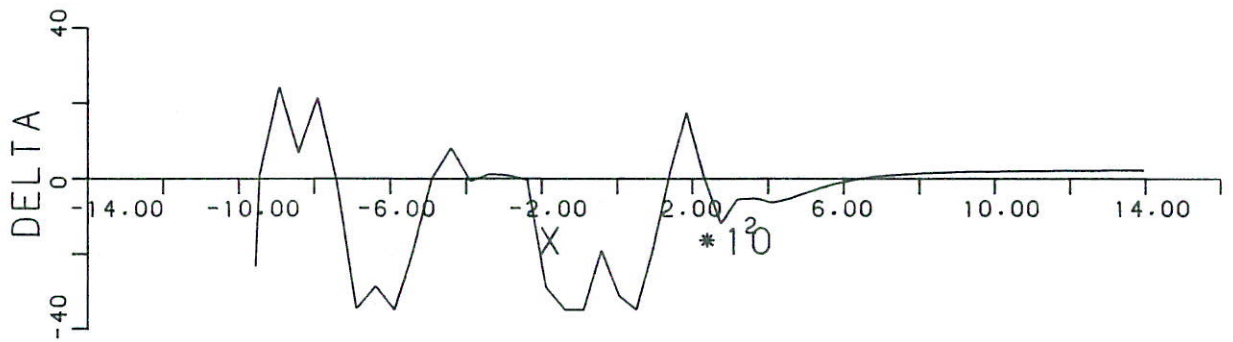
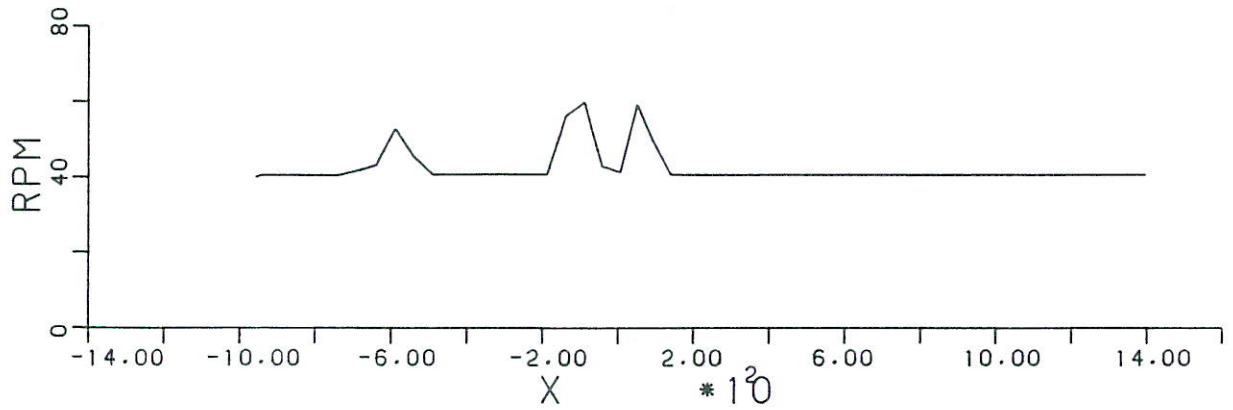


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=1, EKSP=2, DEVS=3, AUTO=5.

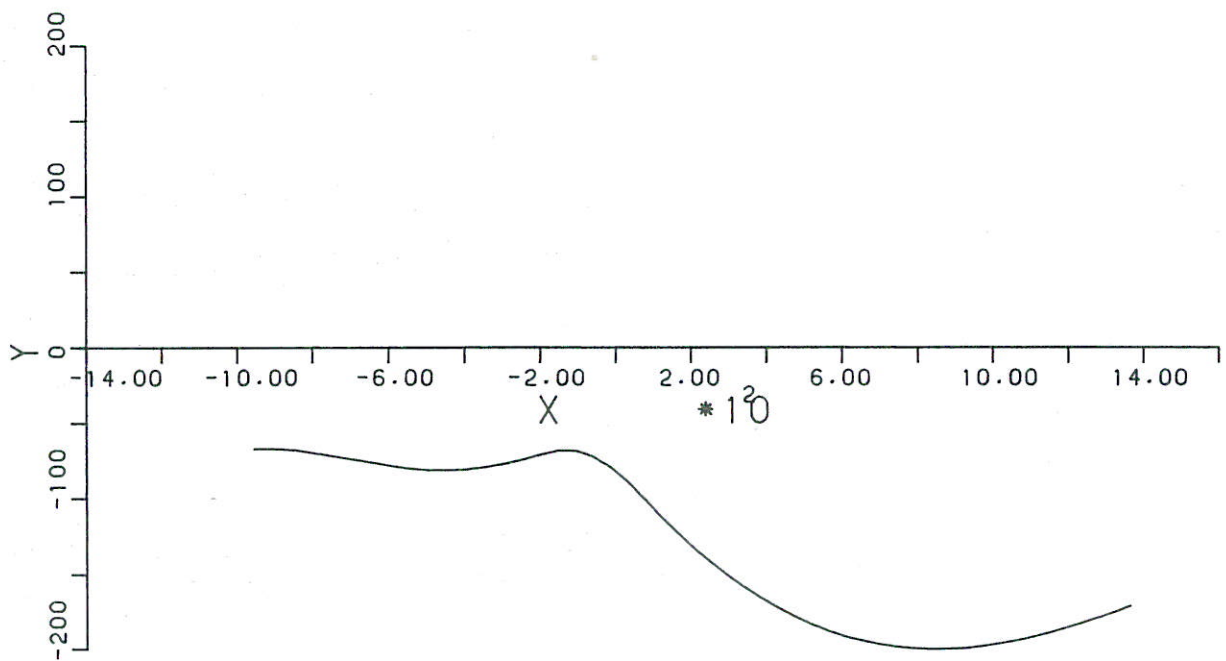
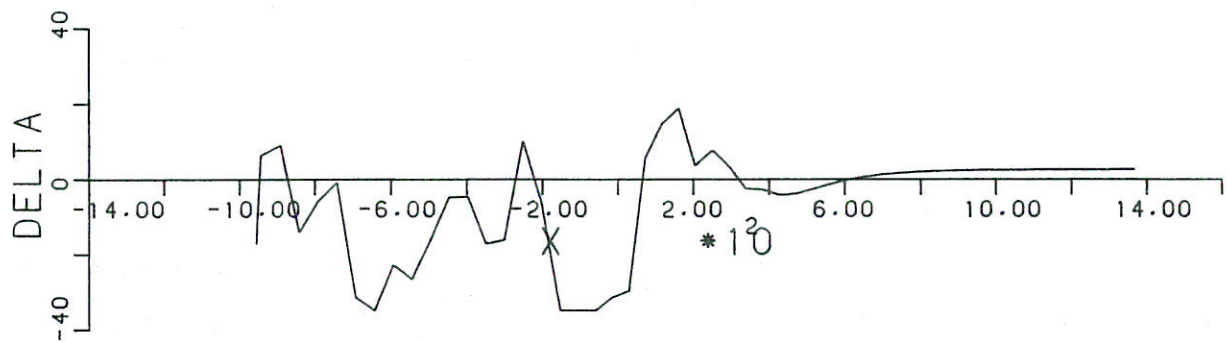
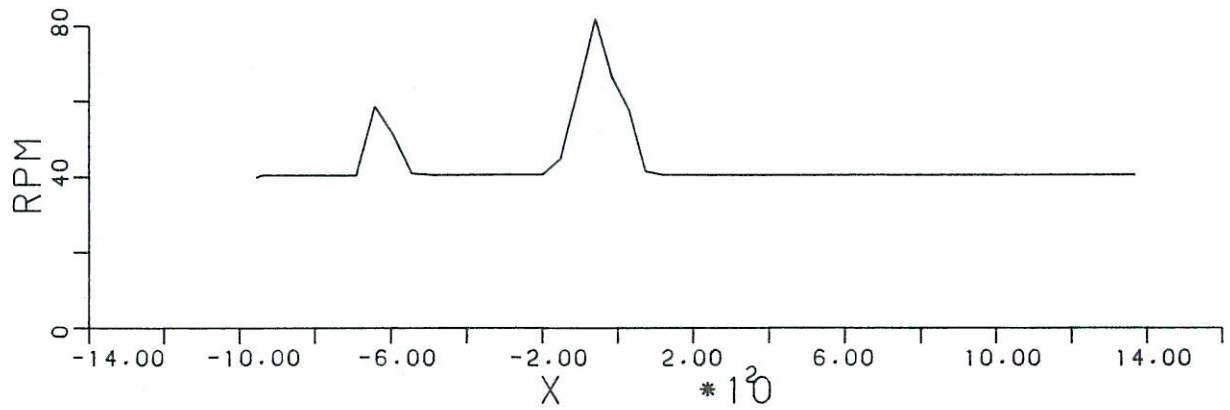
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 23



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=1, EKSP=2, DEVS=4, AUTO=5.

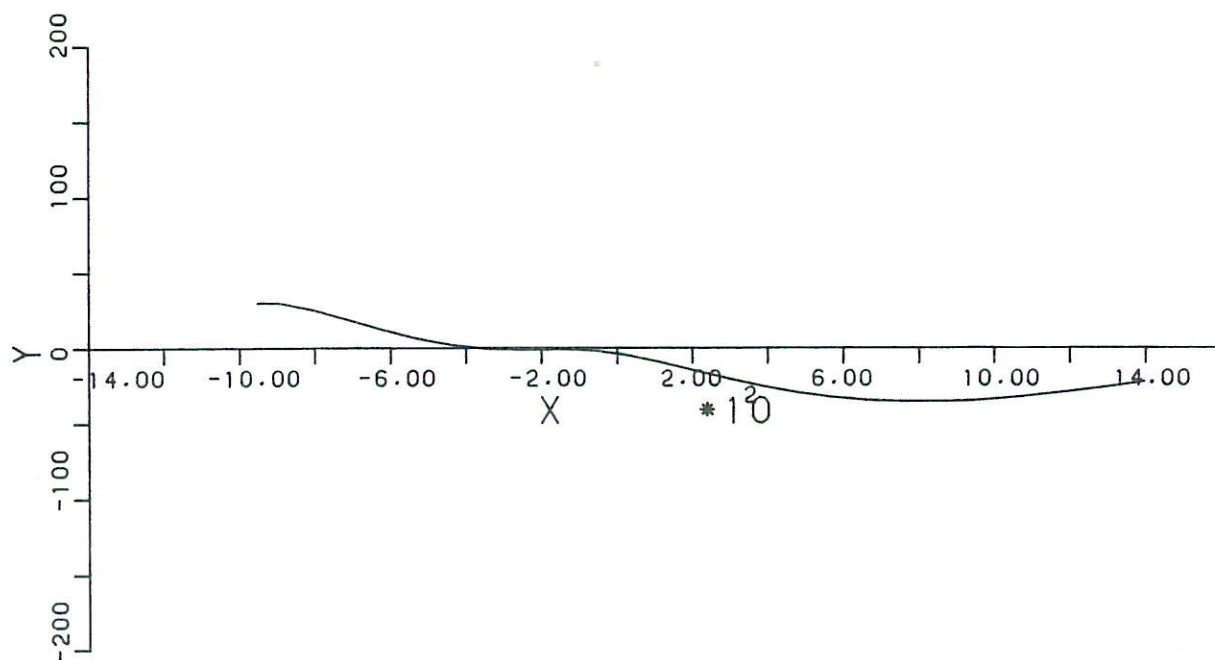
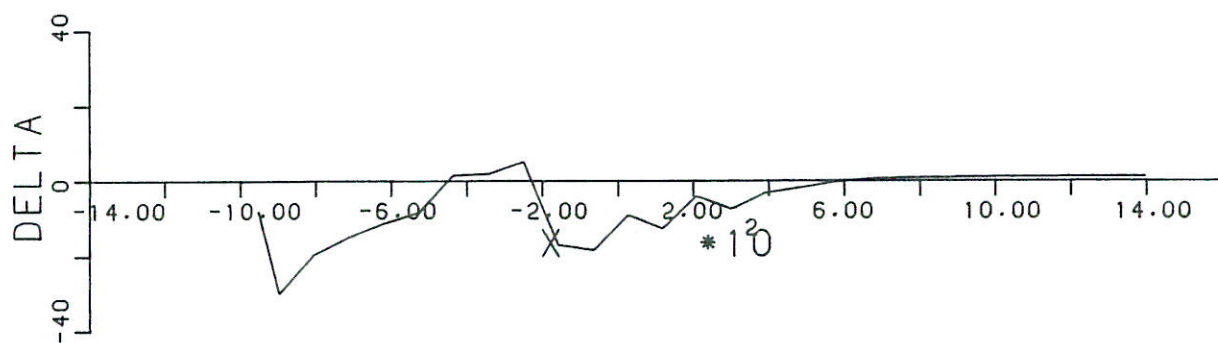
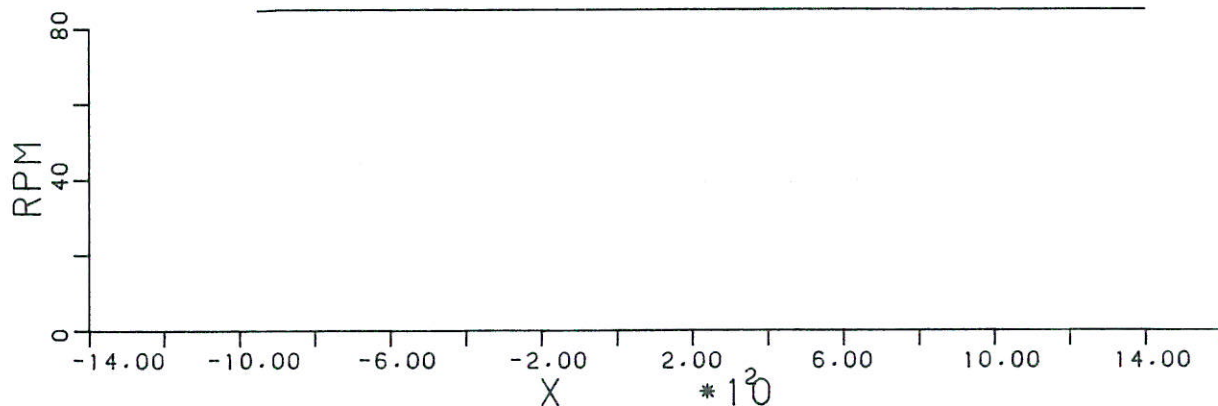


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=1, EKSP=2, DEVS=5, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 25

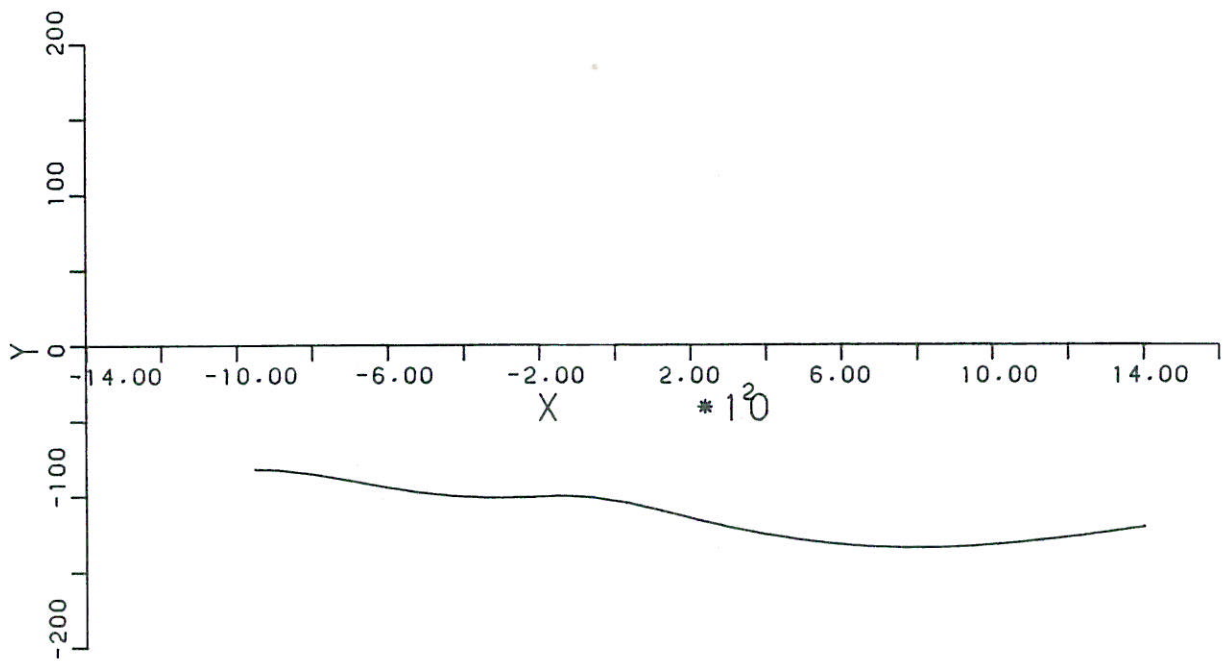
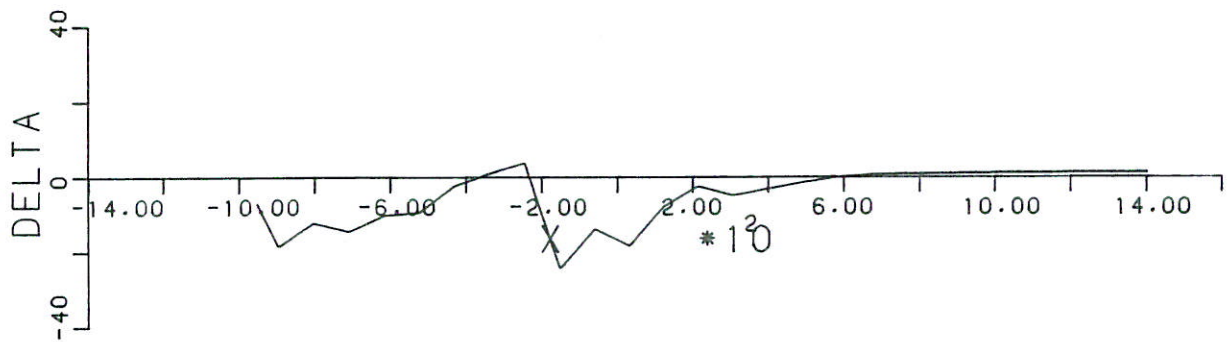
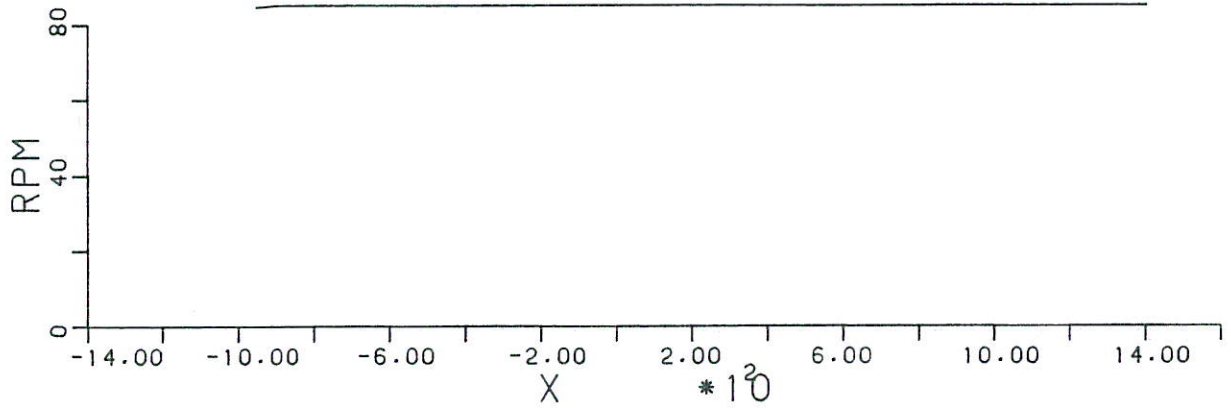


VAARBAAN.ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2.EKSP=2.DEVS=2.AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 26

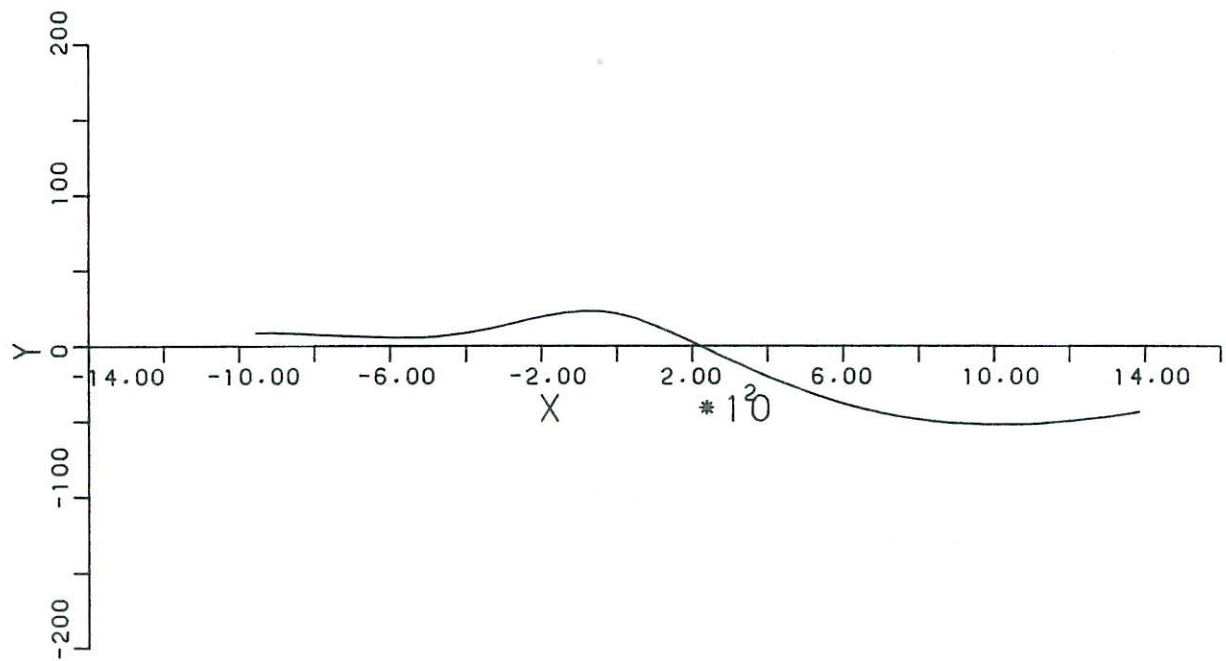
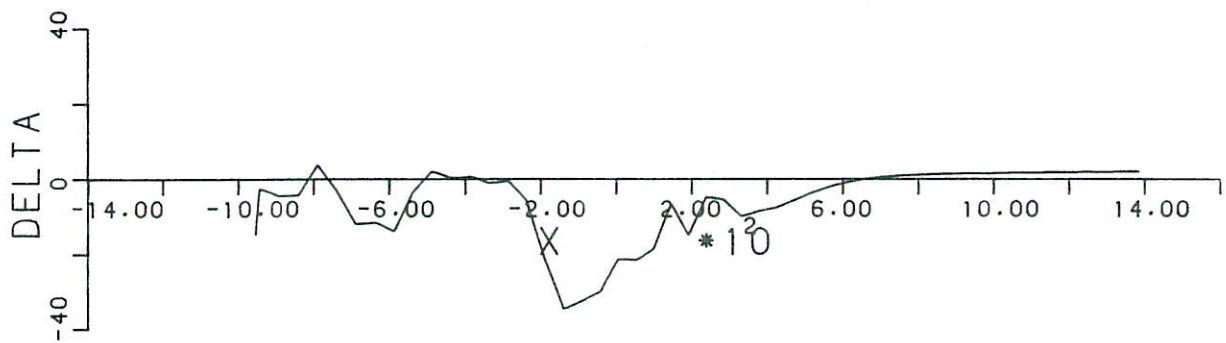
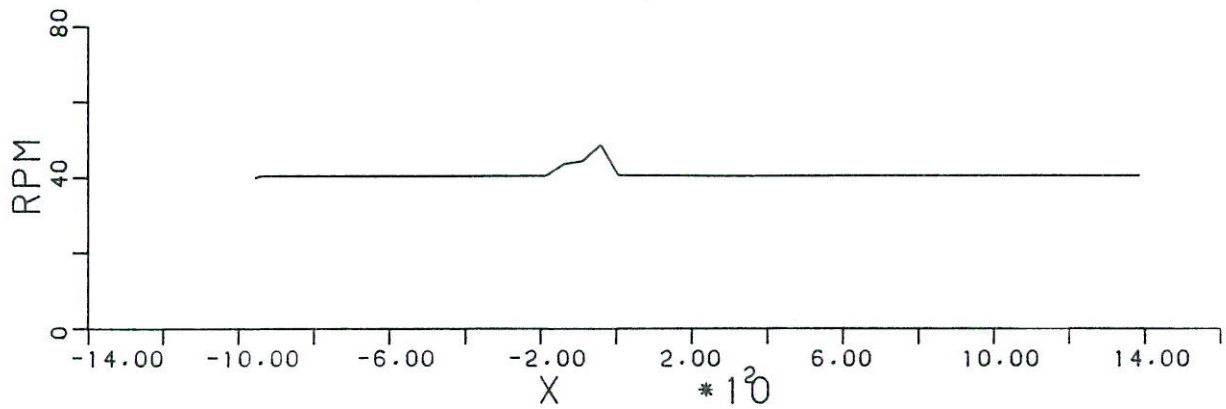


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=2, DEVS=3, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG.27

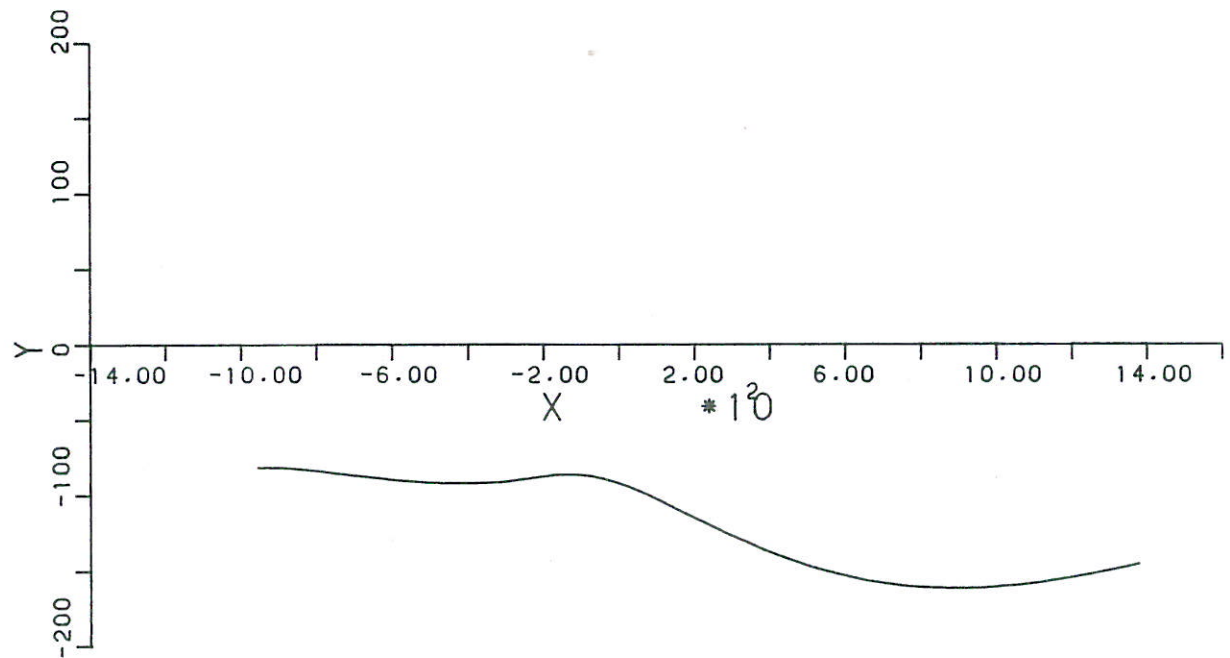
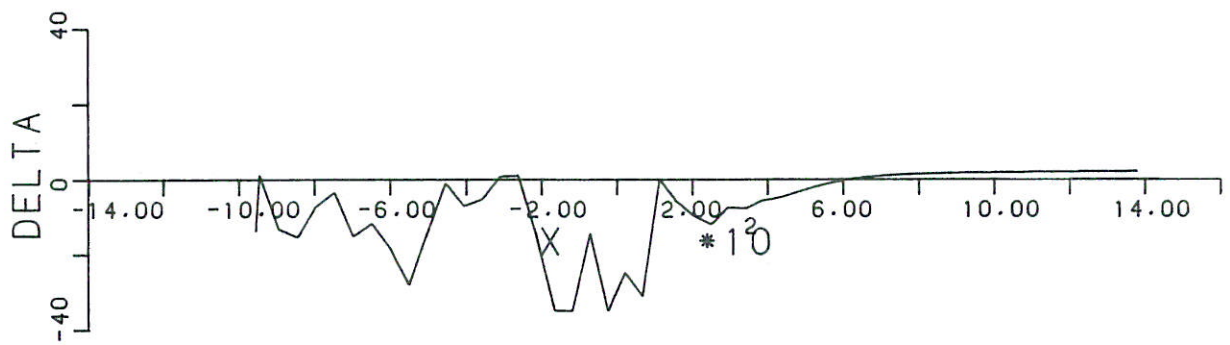
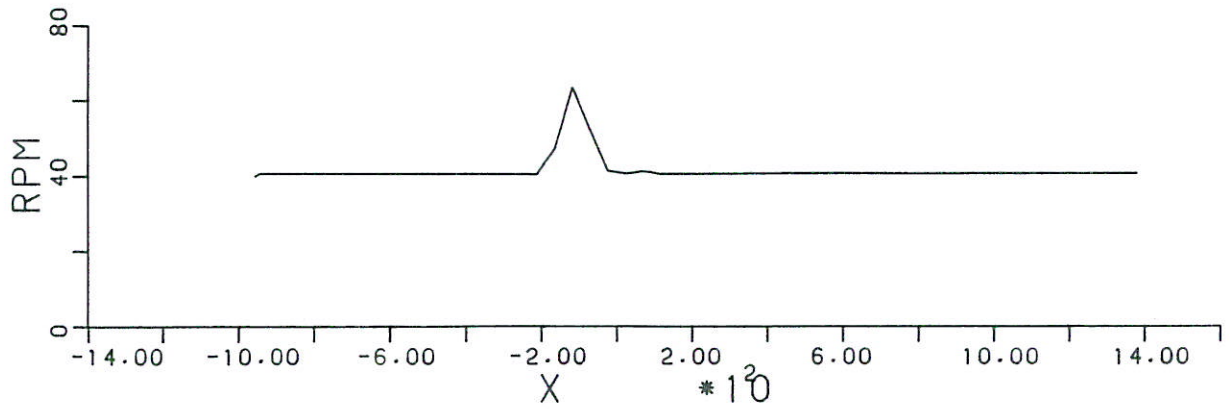


VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=2, DEVS=4, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 28



VAARBAAN, ROERHOEK EN TOERENTAL
 VOOR DE CONDITIES :
 FYS., STRM=2, EKSP=2, DEVS=5, AUTO=5.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W252

FIG. 29

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands