

BIBLIOTHEEK  
Waterloopkundig Laboratorium  
Postbus 177 - DELFT

waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

2e EXEMPLAAR

schepen in dwarsstroom

gevoeligheidsanalyse voor twee typen  
stuurautomaten

AFGERANDELD

verslag wiskundig onderzoek

R 775 deel VI  
W 252 deel III tow-F

oktober 1982

F 14

**tow**

toegepast onderzoek  
waterstaat

12.DEC.1982

BIBLIOTHEEK  
Waterloopkundig Laboratorium  
Postbus 177 - DELFT

---

schepen in dwarsstroom

gevoeligheidsanalyse voor twee typen  
stuurautomaten

verslag wiskundig onderzoek

---

R 775 deel VI  
W 252 deel III tow-F

oktober 1982

F 14



toegepast onderzoek  
waterstaat



## INHOUD

### SYMBOLEN

	blz.
1. <u>Inleiding</u> .....	1
2. <u>Beschrijving van het rekenmodel</u> .....	2
2.1 Manoeuvreervergelijkingen.....	2
2.2 De stuurautomaat.....	3
2.3 Dwarsstroom-kracht relatie.....	4
3. <u>Specificatie van de rekenmodellen</u> .....	6
3.1 Opzet van een berekening.....	6
3.2 Specificatie van de coëfficiënten.....	6
4. <u>Bespreking van de berekeningen</u> .....	9
5. <u>Invloed van het gebruik van de relatieve bewegingshypothese</u> .....	12
5.1 Algemeen.....	12
5.2 Bespreking van de berekeningen.....	18
6. <u>Samenvatting en conclusies</u> .....	23

### LITERATUUR

## TABELLEN

- 1 Kenmerkende grootheden voor een Mariner
- 2 De manoeuvreercoëfficiënten van het "Mariner" schip "Compass Island" voor de manoeuvreervergelijkingen van Abkowitz
- 3 De coëfficiënten voor de stuurautomaat van het Mariner schip
- 4 Invloed van storingen op de maximale uitwijking voor dwarsstroomprofiel SIN1
- 5 Invloed van storingen op de maximale uitwijking voor dwarsstroomprofiel DR(1)
- 6 Overzicht van de tweede orde momenten van de dwarsstroomverdelingen
- 7 Maximale uitwijking van het schip voor diverse stroombeelden bij gebruik van een roerautomaat (SEE) en een referentiebesturing ( $V_c = 0,55$  m/s)
- 8 Maximale uitwijking van het schip voor diverse stroombeelden bij gebruik van een roerautomaat (SEE) en een referentiebesturing ( $V_c = 1,1$  m/s)



## FIGUREN

- 1 Invloed van diverse stuurautomaten op de maximale uitwijking
- 2 Invloed van diverse stuurautomaten op de plaats van de maximale uitwijking
- 3 Karakteristieke vaarbaan bij dwarsstroom
- 4 Dwarsstroomprofielen
- 5...16 Maximale uitwijking uit de gewenste vaarbaan
- 17 Bepaling van de maximale uitwijking volgens drie methoden
- 18 Stroomverdeling van een dwarsstroom
- 19 Maximale uitwijking, bepaald met de relatieve bewegingshypothese (ongecorrigeerd)
- 20 Stroomverdeling van een dwarsstroom met terugstroming (NR)
- 21...23 Maximale uitwijking bepaald met de relatieve bewegingshypothese

## SYMBOLLEN

A	massa matrix
$A_L$	oppervlakte van de langdoorsnede van het schip
a, b, c, d, e, f	coëfficiënten in de stuurautomaat
$\underline{a}_1, \underline{a}_2$	eigenvectoren
$a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$	kentallen van de vectoren $\underline{a}_1$ en $\underline{a}_2$
B	matrix van manoeuvreercoëfficiënten
$B_s$	breedte van het schip
C	matrix
$C_1, C_2$	konstanten
$C_D$	weerstandscoefficiënt
$\underline{c}$	vector
$c_1, c_2$	kentallen van de vector $\underline{c}$
$d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}$	coëfficiënten
E	amplitude
$F_D$	stroomkracht op het schip
$F_d$	stroomkracht, bepaald met de relatieve bewegingshypothese
$F_x, F_y, F_N$	krachten en moment werkend op het schip
$F'_y, F'_N$	dwarskracht en moment werkend op het schip tengevolge van de eigen beweging
$G_1, G_2, G_3$	invloedfuncties
I	eenheidsmatrix
$I_2$	traagheidsmoment
$I_i$	integraal
K	stuurcoefficient
L	lengte van het schip
$L_D$	breedte van de dwarsstroom
$l_F$	arm van de dwarskracht
M	massa van het schip
$M_d$	moment op het schip, bepaald met de relatieve bewegingshypothese
$N_v, N_r, N_\sigma$	manoeuvreercoëfficiënten
n	natuurlijk getal
O	nul matrix
r	koershoeksnelheid
T	de tijdsduur om door het dwarstroomveld te varen

$U$	referentiesnelheid van het schip
$u, v$	sneldheidscomponenten van het schip
$V_c$	referentiesnelheid van de dwarsstroom
$V_D$	sneldheid van de dwarsstroom
$\hat{V}_D$	sneldheidsamplitude
$V_{st}$	een karakteristieke sneldheid
$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$	toegevoegde massa coëfficiënten
$x, y$	coördinaten stelsel
$x_T, y_T$	coördinaten van een vaarbaan extreem
$Y_v, Y_r, Y_\delta$	manoeuvrercoëfficiënten
$Y_{og}$	afstand van middenschip tot de gewenste baan
$\alpha, \alpha_1, \alpha_2$	coëfficiënten
$\beta$	drifthoek van het schip
$\beta_c$	schijnbare drifthoek tengevolge van de dwarsstroom
$\delta$	roerhoek
$\delta_g$	gewenste roerhoek
$\delta_m$	maximale roerhoek
$\lambda_i$	eigenwaarden
$\Psi$	koershoek
$\Psi_g$	gewenste koershoek
$\rho$	dichtheid



## SCHEPEN IN DWARSSTROOM

### Gevoeligheidsanalyse voor twee typen stuurautomaten

#### 1. Inleiding

Een schip dat door een dwarsstroomveld vaart ondervindt daarvan een zijwaartse verplaatsing. In verslag W 252-II is de gevoeligheid van de grootte van deze zijwaartse verplaatsing voor variaties in het snelheidsveld nagegaan. Daarbij is speciaal gelet op de gevoeligheid van de maximale uitwijking, die optreedt bij het varen door een dwarsstroomveld van beperkte breedte. Uit het onderzoek blijkt dat voor niet te grote breedte van het dwarsstroomveld, de grootte van de integraal van de dwarsstroomkracht bepalend is voor de maximale uitwijking. Het gevoeligheidsonderzoek werd uitgevoerd met behulp van een wiskundig model. Ten gevolge van het grote aantal parameters in het model kon bovenstaande conclusie slechts getoetst worden voor een beperkte variatie in deze parameters. In het bijzonder is slechts een gering aantal stuurautomaten toegepast en is voor het verband tussen de stroomverdeling en de stroomkracht, werkend op het schip, slechts één relatie gebruikt. Alleen voor de uniforme dwarsstroom is een groter aantal automaten beproefd. In de Figuren 1 en 2 zijn voor deze stroomtoestand de maximale uitwijking  $y_T$  van het schip uit de gewenste rechte baan en de tot het punt van maximale uitwijking afgelegde weg  $x_T$  uitgezet als functie van de dwarsstroomsnelheid. Uit deze figuren blijkt dat, op basis van het gedrag van  $x_T$  bij afnemende dwarsstroomsnelheid ( $V_D \rightarrow 0$ ), de automaten in twee groepen verdeeld kunnen worden. Voor een deel van de automaten blijkt (zie Figuur 2) de afgelegde weg  $x_T$  ongevoelig te zijn voor de grootte van de dwarsstroomsnelheid. Voor het andere deel van de automaten blijkt de afgelegde weg  $x_T$  lineair met de grootte van de dwarsstroomsnelheid toe te nemen. De ongevoeligheid van de maximale uitwijking  $y_T$  van het schip voor de verdeling van de dwarsstroom is in [1] alleen getoetst voor een stuurautomaat, waarbij  $x_T$  voor uniforme dwarsstroom ongevoelig is voor de stroomsterkte. In de volgende hoofdstukken zal de conclusie getoetst worden voor een automaat van het tweede type. De toetsing wordt uitgevoerd voor het Mariner schip, daar het grootste deel van de berekeningen in het verslag W 252-II voor dit schip werd uitgevoerd.

Voorts worden ook vaarbanen berekend met behulp van de relatieve bewegingshypothese, teneinde na te gaan in hoeverre de gebruikte stroomveld-kracht relatie de maximale uitwijking van het schip beïnvloedt.

Het onderzoek is uitgevoerd in het kader T.O.W. Scheepvaart/Schepen in Dwarsstroom. Het verslag is samengesteld door ir. C. Flokstra.

## 2. Beschrijving van het rekenmodel

In het gebruikte manoeuvreermodel kan een drietal onderdelen worden onderscheiden:

- a de manoeuvreervergelijkingen
- b de stuurautomaat
- c de dwarsstroom-kracht relatie

Daar de berekeningen aansluiten op de berekeningen vermeld in [1] wordt voor de huidige berekeningen gebruik gemaakt van de daar toegepaste modellen.

Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar dat verslag.

In de volgende paragrafen zal een samenvatting worden gegeven.

### 2.1 Manoevreervergelijkingen

De manoevreervergelijkingen die toegepast worden zijn de niet-lineaire Abkowitz vergelijkingen:

$$(M - X_{\dot{u}}) \dot{u} = F_x (\Delta u, v, r, \delta) \quad (1)$$

$$(M - Y_{\dot{v}}) \dot{v} = (Mx_G - Y_{\dot{r}}) \dot{r} = F_y (\Delta u, v, r, \delta) \quad (2)$$

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

waarin

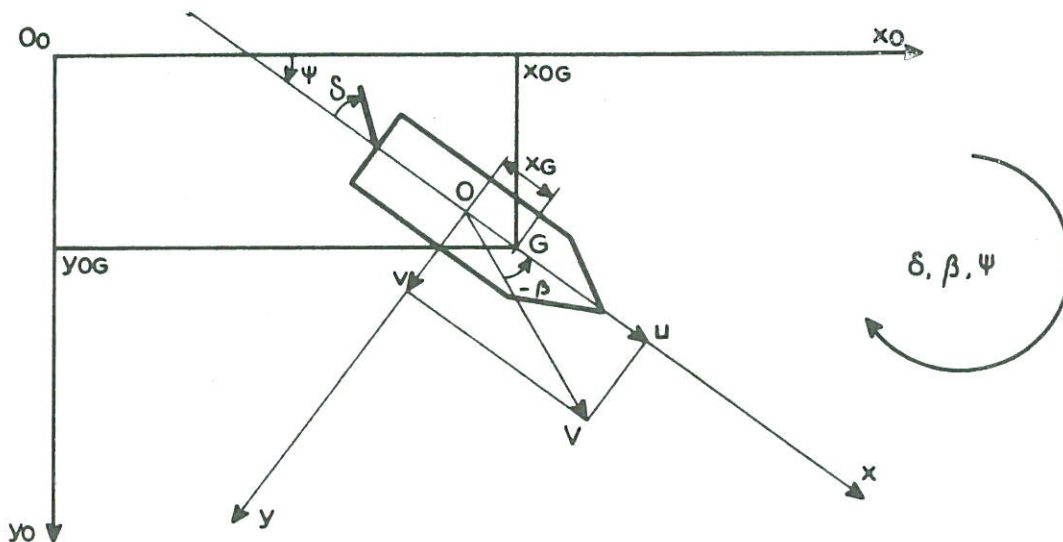
$M, X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$  = massa, toegevoegde massa, etc.

$u, v$  = de snelheidscomponenten

$r$  = de rotatiesnelheid

$F_x, F_y, F_N$  = krachten en moment werkend op het schip uit te drukken als machtreksen in  $u, v, r$ , en  $\delta$  waarvan de coëfficiënten bekend worden verondersteld

$\delta$  = roerhoek



Definitieschets

2.2 De stuurautomaat

De stuurautomaten die toegepast worden zijn op de volgende vergelijking gebaseerd:

$$\delta_g = a (\psi - \psi_g) + b (\dot{\psi} - \dot{\psi}_g) + c \ddot{\psi} + d y_{og} + e \dot{y}_{og} + f \quad (4)$$

waarin

$a, b, c, d, e, f$  = gegeven konstanten

$\psi - \psi_g = \psi + \arctan \frac{v}{u}$  = de hoek die de vaarrichting van het schip maakt met de gewenste vaarrichting

$y_{og}$  = afstand van het midden van het schip tot de gewenste vaarbaan

Als gewenste vaarbaan wordt in dit verslag steeds een rechte baan gekozen loodrecht op de dwarsstroom.

Voorts geldt:

$$\dot{\delta} = -K (\delta - \delta_g) \quad (5)$$

waarin  $K$  een gegeven konstante is.

Bovendien gelden de volgende bovengrenzen

$$|\delta| < \delta_m \quad (6)$$



$$|\dot{\delta}| < \dot{\delta}_m$$

$$|\ddot{\delta}| < \ddot{\delta}_m$$

Het beschreven systeem is koers- en baanhoudend. Deze stuurautomaat wordt in het verslag W 252-II aangeduid als SEE en behoort tot de automaten van de eerste soort.

Als automaat van de tweede soort wordt beproefd VSEE. Deze automaat ontstaat uit SEE wanneer vergelijking (5) wordt vervangen door

$$\dot{\delta} = K (\delta - \delta_m \text{sign}(\delta_g)) \quad (7)$$

Dit is een roerautomaat die voortdurend een maximale roeruitslag geeft.

### 2.3 Dwarsstroom-kracht relatie

De dwarskracht opgewekt door de dwarsstroom wordt in de vergelijkingen (1), (2) en (3) in rekening gebracht door extra termen toe te voegen aan het rechterlid, zodanig dat:

$$F_y = F'_y + F_D \quad (8)$$

$$F_N = f'_N + l_F F_D$$

waarin

$F'_y, F'_N$  = de kracht en het moment werkend op stil water

$F_D$  = de dwarskracht tengevolge van een stroom op het vastgehouden schip

$l_F$  = de arm van de dwarskracht  $F_D$

Voorts wordt voor  $u$  de relatieve langsnelheid ingevoerd.

Voor  $F_D$  wordt toegepast de formule:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_{st}^2 C_D \cdot A_L \quad (9)$$

waarin

$\rho$  = dichtheid van het water

- $C_D$  = de weerstandscoefficiënt  
 $A_L$  = lateraal oppervlak van het schip  
 $V_{st}$  = karakteristieke snelheid van de dwarsstroom

Bij de berekeningen worden voor de karakteristieke snelheid  $V_{st}$  een viertal definities toegepast:

$$a) V_{st} = V_d \quad (VP) \quad (10)$$

$V_{st}$  wordt gelijk gesteld aan de dwarsstroomsnelheid  $V_d$  ter plaatse van het midden van het schip.

$$b) V_{st} = \frac{1}{L} \int_{x-\frac{L}{2}}^{x+\frac{L}{2}} V_d dx \quad (VLS) \quad (11)$$

$V_{st}$  wordt gelijk gesteld aan de over de lengte van het schip lineair gemiddelde snelheid van de dwarsstroom.

$$c) V_{st}^2 = \frac{1}{L} \int_{x-\frac{L}{2}}^{x+\frac{L}{2}} V_d^2 dx \quad (VKS) \quad (12)$$

$V_{st}$  wordt bepaald als het kwadratisch gemiddelde van de dwarsstroomsnelheid over de scheepslengte.

$$d) V_{st}^2 = \frac{1}{L_D} \int_0^{L_D} V_d^2 dx \quad (VKD) \quad (13)$$

$V_{st}$  wordt voor elke plaats in het dwarsstroomveld konstant gehouden en gelijk gesteld aan de kwadratisch over de breedte van de dwarsstroom gemiddelde stroomsnelheid.

Tijdens het varen door de dwarsstroom worden  $l_F$  en  $C_D$  niet gevariëerd.

### 3. Specificatie van de rekenmodellen

In hoofdstuk 2 is het rekenmodel globaal beschreven. In dit hoofdstuk worden de gebruikte constanten nader gespecificeerd en de opzet van de berekeningen uiteengezet.

#### 3.1 Opzet van een berekening

Met behulp van de vergelijkingen (1), (2) en (3) wordt de baan berekend van een schip dat vaart door een dwarsstroom van beperkte breedte. Aanvankelijk vaart het schip een rechte koers loodrecht op de richting van de dwarsstroom. De berekening begint op het moment dat het schip de dwarsstroom invaart. Er wordt verondersteld dat tot dat moment niet geanticipeerd wordt op de dwarsstroom. Tijdens het varen door de dwarsstroom tracht de stuurautomaat het schip op een rechte baan te houden. Daar de gevoeligheid van het schip voor de dwarsstroom wordt afgemeten aan de maximale afwijking uit de rechte baan wordt gerekend tot het moment dat de maximale uitwijking wordt bereikt. In Figuur 3 worden de berekende grootheden  $x_T$  en  $y_T$  nader gedefinieerd.

#### 3.2 Specificatie van de coëfficiënten

De in paragraaf 3.1 beschreven berekening wordt uitgevoerd voor één type schip, de Mariner, waarvoor ook in [1] berekeningen zijn uitgevoerd. De afmetingen en manoeuvreercoëfficiënten van dit schip worden gegeven in respectievelijk tabel 1 en tabel 2.

De uitgangsvaarsnelheid van het schip is 5 m/s en wordt niet gevariëerd. Ook de armlengte  $l_F$  van de dwarskracht en de weerstandscoefficiënt  $C_D$  worden constant gehouden. Voor  $l_F$  is gekozen:

$$l_F = 40 \text{ m}$$

en voor de weerstandscoefficiënt:

$$C_D = 4$$



Deze waarden stemmen overeen met de waarden die bij een groot deel van de berekeningen in [1] zijn toegepast.

De berekeningen worden uitgevoerd voor een aantal verdelingen van de dwarstroom (zie Figuur 4).

a een uniforme snelheidsverdeling UNI:

$$\begin{aligned} V_D &= \hat{v}_D & 0 \leq x \leq L_D \\ V_D &= 0 & x < 0 \text{ en } x > L_D \end{aligned} \quad (14)$$

b een klokvormig snelheidsprofiel SIN 1:

$$\begin{aligned} V_D &= \hat{v}_D \sin \frac{\pi x}{L_D} & 0 \leq x \leq L_D \\ V_D &= 0 & x < 0 \text{ en } x > L_D \end{aligned} \quad (15)$$

c driehoekige snelheidsprofielen

$$\begin{aligned} \text{DR } (\alpha): V_D &= \frac{x}{\alpha L_D} \hat{v}_D & 0 \leq x < \alpha L_D \\ V_D &= \frac{L_D - x}{L_D (1-\alpha)} \hat{v}_D & \alpha L_D \leq x \leq L_D & \alpha=0; 0,5; 1,0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_D &= 0 & x < 0, x > L_D \\ \text{DRC } (\alpha): V_D &= \frac{\alpha L_D - x}{\alpha L_D} \hat{v}_D & 0 \leq x < \alpha L_D \\ V_D &= \frac{x - \alpha L_D}{L_D (1-\alpha)} \hat{v}_D & \alpha L_D < x < L_D & \alpha=0; 0,5; 1,0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V_D &= 0 & x < 0, x > L_D \\ \text{DRT } (n): V_D &= \hat{v}_D \left( 1 - 2 \left| \frac{xn}{L_D} - \text{entier} \left( \frac{xn}{L_D} \right) \right| \right) & 0 \leq x \leq L_D \\ V_D &= 0 & x < 0, x > L_D \end{aligned} \quad (18)$$

n = 1, 2, 3, 4 en 5

Bij de berekeningen wordt van de snelheidsprofielen alleen de breedte van de dwarsstroom ( $L_D$ ) gevariëerd:

$$0 < \frac{L_D}{L} < 10$$

Per snelheidsprofiel wordt  $\hat{v}_D$  konstant gehouden. Voor de verschillende snelheidsprofielen wordt een verschillende waarde voor  $\hat{v}_D$  toegepast en wel zodanig dat het kwadratisch gemiddelde van de dwarsstroomsnelheid over de breedte van de dwarsstroom, voor alle profielen, gelijk is:

$$\frac{1}{L_D} \int_0^{L_D} v_D^2 dx = 0,5$$

De coëfficiënten van de stuurautomaat worden niet gevariëerd. De waarden van deze coëfficiënten worden gegeven in Tabel 3 en stemmen overeen met [1]. De berekeningen worden uitgevoerd voor de automaten SEE en VSEE. In de berekening van de dwarskracht wordt de karakteristieke snelheid  $V_{st}$  bepaald volgens de definities VP, VLS en VKS.

De in paragraaf 3.1 beschreven berekeningen zijn uitgevoerd voor elke combinatie van stuurautomaat (SEE, VSEE), karakteristieke snelheid  $V_{st}$  (VP, VSL, VKS) en dwarsstroomprofiel (UNI, SIN, DR, DRC, DRT). Voor elk van deze combinaties worden de volgende dwarsstroombreedtes toegepast:  $L_D/L = 0,5, 1,0, 1,5, \dots 10,0$ .

#### 4. Bespreking van de berekeningen

In de Figuren 5 ... 16 zijn resultaten van de berekeningen uitgezet. In elke figuur wordt het verloop van de maximale uitwijking  $y_T$  van het schip uit de rechte baan als functie van de breedte van de dwarsstroom  $L_D/L$  weergegeven voor verschillende snelheidsprofielen. Alle krommen in een figuur hebben betrekking op een zelfde stuurautomaat en dwarsstroom-kracht relatie. Uit de figuren blijkt dat krommen die betrekking hebben op eenzelfde dwarsstroomverdeling maar op een verschillende dwarsstroom-krachtrelaties (VP, VKS, VLS) kwalitatief eenzelfde verloop bezitten. In het algemeen zijn de maximale uitwijkingen van VKS en VLS kleiner dan voor VP, daar de lengte waarover het schip de dwarsstroom ervaart bij VKS en VLS  $L_D+L$  is en bij VP  $L_D$ . Bij VKS en VLS kan dus enigszins op de stroom worden geanticipeerd, wat tot kleinere uitwijkingen leidt, in het bijzonder wanneer de snelheidsverdeling discontinu is, zoals bij UNI. Voorts zijn de maximale uitwijkingen bij VLS kleiner dan bij VKS daar de krachtintegraal  $\int F_D(x)dx$  voor VP en VKS bij een gegeven snelheidsprofiel dezelfde waarde heeft, maar voor VLS een kleinere waarde bezit. Vooral bij kleine dwarsstroombreedte is de invloed hiervan duidelijk te merken. De automaat VSEE blijkt slechts in beperkte mate bruikbaar te zijn, zoals nader zal worden besproken. In deze gevallen wordt een maximale uitwijking bereikt die kleiner is dan bij automaat SEE.

Voor het stroomprofiel UNI blijkt het gedrag van  $y_T$  als functie van  $L_D/L$  voor alle beproefde automaten en dwarsstroom-kracht relaties hetzelfde karakteristieke verloop te bezitten: een monotone toename van  $y_T$  met  $L_D/L$  tot een limietwaarde, die bij een zekere  $(L_D/L)_{\max}$  wordt bereikt. Voor  $\frac{L_D}{L} > (\frac{L_D}{L})_{\max}$  blijft  $y_T$  gelijk aan de limietwaarde. De uitwijking wordt voor grote  $L_D/L$  waarde konstant, omdat door de stuurautomaat het schip uiteindelijk in de uniforme dwarsstroom onder een evenwichtsdrifthoek langs de gewenste rechte baan zal gaan varen. Tijdens de manoeuvre om de bij deze dwarsstroom behorende evenwichtstoestand te bereiken, wordt na zekere afstand, gerekend van het punt waar het schip de dwarsstroom ervaart, een maximale uitwijking uit de gewenste baan bereikt. Indien de dwarsstroombreedte bij UNI breder is dan deze afstand zal de uitwijking  $y_T$  gelijk zijn aan de limietwaarde. De limietwaarde blijkt in geringe mate door de automaat te worden beïnvloed. Daarentegen heeft de dwarsstroom-kracht relatie een belangrijke invloed.



Voor het stroomprofiel SIN 1 neemt  $y_T$  in het algemeen toe met  $L_D/L$  tot een maximum om daarna weer af te nemen. Deze afname werd niet gekonstateerd bij de berekeningen in [1] waar de stuurautomaat SE werd toegepast. De automaat SE ontstaat uit SEE door het weglaten van de term  $-b \dot{\psi}_g$  in (4). Deze term leidt tijdens het varen in de dwarsstroom tot het geven van extra roer. De meeste krommen, berekend met de automaat VSEE, vertonen bij zekere  $L_D/L$  een knik. In Figuur 7 (VP, VSEE) treedt deze knik op bij  $L_D/L = 5$ . Deze knik vindt zijn oorzaak in de maximale roerhoeken die door VSEE opgelegd worden, ook als de gradient van de dwarsstroom klein is. Dit heeft tot gevolg dat nog voor het bereiken van de plaats waar de stroomsterkte maximaal is, het aanvankelijk gegeven roer al sterk door tegenroer gecorrigeerd moet worden, zodanig dat bij de maximale stroomsterkte meegestuurd wordt. Dit geeft aanleiding tot grote uitwijkingen. Voor VKS ( $L_D/L > 2$ ) en VLS ( $L_D/L < 1$ ) treden deze knikken in de krommen eerder op, omdat de daarbij toegepaste middelingen leiden tot een verkleining van de schijnbare gradiënten. Voor  $L_D/L$  waarden kleiner dan de waarde waarbij de knik optreedt geven VSEE en SEE goed overeenkomende resultaten.

Voor de stroomprofielen DR (0) en DR (1) treden grote verschillen op in de uitwijking  $y_T$ . Voor het profiel DR (0), waarbij het schip het eerst het gebied binnenvaart met de grootste stroomsterkte, geeft de  $y_T-L_D$  kromme voor alle condities een uniform beeld te zien: een sterke toename van  $y_T$  met  $L_D/L$ . Verschillen tengevolge van verschil in automaat zijn daarbij veel geringer dan ten gevolge van het verschil in de dwarsstroom-kracht relatie. Bij DR (1) vaart het schip eerst door het gebied met lage stroomsnelheden. Op het moment dat door de hoge stroomsnelheden wordt gevaren heeft de automaat van te voren de koers al kunnen corrigeren. Daardoor zal de uitwijking in het algemeen kleiner zijn dan bij DR (0). Voor de stuurautomaat VSEE treedt bij DR (1) het al eerder besproken gedrag op ten gevolge van te grote roerhoeken. In Figuur 7 (VP, SEE) treedt de afwijking op voor  $L_D/L > 2$ . Dit is een lagere waarde dan voor SIN 1 geldt, omdat bij eenzelfde breedte van de dwarsstroom de gradiënt bij DR(1) kleiner is dan bij SIN 1 (ongeveer een factor 2).

In de Figuren 11 en 15 is het gedrag van  $y_T$  geheel afwijkend. De fictieve gradiënten zijn daar kleiner dan bij VP. De vaarbaan is voor deze methoden zodanig dat de gewenste vaarbaan al een keer is gepasseerd voordat de aangegeven  $y_T$  wordt bereikt.



De krommen, betrekkinghebbend op DRC (0,5), bestaan in het algemeen uit twee takken met een overgangsgebied. De eerste tak ontstaat doordat de maximale uitwijking pas bij het varen door de tweede piek in de dwarsstroom wordt bereikt. Bij de tweede tak wordt het maximum bij de eerste piek bereikt. Voor de tweede tak geldt daarom:  $y_T (L_D/L; DRC (0,5)) = y_T (L_D/2L; DR (0))$ .

Voor de dwarsstroom DRT (n)  $n= 1, \dots 5$  blijkt voor kleine breedte van de dwarsstroom de invloed van het aantal pieken gering te zijn. Voor de stuurautomaat VSEE treedt voor de kleine gradiënten weer het afwijkende gedrag op. De verschillen ten gevolge van de toegepaste automaat worden pas significant bij relatief grote  $L_D/L$  waarden. De verschillen ten gevolge van verschil in de dwarsstroom-kracht relatie blijkt relatief groot te zijn.

In de figuren 5 t/m 12 geeft de spreiding van de krommen aan in welke mate bij een gegeven stuurautomaat en stroombeeld-kracht relatie de snelheidsverdeling van de dwarsstroom bij constante  $\frac{1}{L_D} \int F_D dx$  invloed heeft op de maximale uitwijking van het schip. Voor de figuren die betrekking hebben op VLS gaat dit niet op, daar de integraal  $\frac{1}{L_D} \int F_D dx$  voor de verschillende snelheidsverdelingen niet dezelfde waarden bezit. Uit de Figuren 5 t/m 12 blijkt dat voor grote  $L_D/L$  waarden de maximale uitwijking sterk door de snelheidsverdeling beïnvloed wordt. Voor kleine dwarsstroombreedten is de uitwijking minder gevoelig voor dwarsstroomvorm. Voor de automaten SEE en VSEE is deze ongevoeligheid bij kleine  $L_D/L$  van dezelfde orde van grootte. Het verschil tussen beide stuurautomaten (zie inleiding) leidt blijkbaar niet tot een verschillend gedrag met betrekking tot de gevoeligheid van de maximale uitwijking van het schip voor de vorm van de dwarsstroom. Wel bestaat de indruk dat voor de automaten SE, beproefd in [1] en SEE, behorend tot hetzelfde type automaat, verschil bestaat in de gevoeligheid voor de vorm van de dwarsstroom. Voor automaat SEE is het  $\frac{L_D}{L}$  bereik, waarover de uitwijking relatief ongevoelig is voor de vorm van de dwarsstroom, kleiner dan voor de automaat SE. Bij gebruik van de dwarsstroom-kracht relatie VP blijkt de maximale uitwijking ongevoeliger te zijn voor de vorm dan bij methode VKS. Bij kleine dwarsstroombreedten blijkt de mate van ongevoeligheid van de maximale uitwijking voor de vorm van de dwarsstroom bepaald volgens VP en VKS van ongeveer dezelfde orde grootte te zijn.

In hoeverre werkelijk van een ongevoeligheid voor de vorm van de dwarsstroom gesproken mag worden hangt af van de begrenzings van de vaarweg. Bij binnenvaart omstandigheden zal mogelijk de bij deze berekeningen gevonden spreiding van de maximale uitwijking nog significant zijn.

## 5. Invloed van het gebruik van de relatieve bewegingshypothese

### 5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt nagegaan of de relatieve ongevoeligheid van de maximale uitwijking van het schip voor de vorm van de dwarsstroom bij kleine breedte van de dwarsstroom afhangt van de gekozen stroomveld-kracht relatie. In het voorgaande is verondersteld dat de kracht ten gevolge van een dwarsstroom werkend op een schip berekend kan worden uit de snelheidsverdeling van de dwarsstroom volgens (9). Bij onderstaande berekeningen wordt gebruik gemaakt van de relatieve bewegingshypothese om de kracht op het schip ten gevolge van de dwarsstroom te bepalen. Bij relatie (9) wordt de stroomkracht uit de grootte van de dwarsstroomsnelheid berekend, terwijl bij gebruik van de relatieve snelheidshypothese de stroomkracht een functie is van de grootte van de dwarsstroomsnelheid en de gradiënt ervan. Alvorens de berekeningen te bespreken wordt eerst langs analytische weg nagegaan in hoeverre de verdeling en in het bijzonder de gradiënten van de dwarsstroom invloed hebben op de maximale uitwijking van het schip. Hierbij wordt uitgegaan van lineaire manoeuvreervergelijkingen.

Uit de Abkowitz-vergelijkingen kunnen de volgende gelineariseerde vergelijkingen worden afgeleid voor de drifthoek  $\beta$  en de rotatiesnelheid  $r$ . Er wordt aangenomen dat de langssnelheid  $U$  tijdens een manoeuvre niet verandert.

$$(M_{\dot{Y}_V} - Y_{\dot{V}}) U \dot{\beta} + (M_{\dot{X}_G} - Y_{\dot{r}}) \dot{r} = Y_V U \beta + Y_r r + Y_{\delta} \delta + F_d(x) \quad (19)$$

$$(M_{\dot{X}_G} - N_{\dot{V}}) U \dot{\beta} + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} = N_V U \beta + N_r r + N_{\delta} \delta + M_d(x)$$

De grootheden  $F_d(x)$  en  $M_d(x)$  geven de dwarskracht en het moment tengevolge van de dwarsstroom weer. Als geldt:

$$\dot{\Psi} = r \quad (20)$$

is de uitwijking  $y$  uit de gewenste rechte baan te schrijven als:

$$\dot{y} = U(\Psi + \beta) \quad (21)$$

Uit de bovenstaande vergelijkingen kan de baan van het schip als functie van het stuurgedrag, de dwarskracht en het giermoment worden bepaald. Uit vergelijking (20) en (21) volgt

$$y = U \int_0^t [(t-\tau)r + \beta] d\tau \quad (22)$$

Uit de vergelijkingen (19) kunnen  $r$  en  $\beta$  opgelost worden:

$$\begin{pmatrix} \beta \\ r \end{pmatrix} = \alpha_1 \underline{a}_1 + \alpha_2 \underline{a}_2 \quad (23)$$

waarin:

$$\alpha_i = d_{i1} \int_0^t \delta e^{\lambda_i(t-\tau)} d\tau + d_{i2} \int_0^t F_d(\tau) e^{\lambda_i(t-\tau)} d\tau + d_{i3} \int_0^t M_d(\tau) e^{\lambda_i(t-\tau)} dt \quad (24)$$

( $i=1,2$ )

De eigenwaarden  $\lambda_i$  volgen uit:

$$|A \lambda_i + B| = 0 \quad (25)$$

en voor de bijbehorende eigenvectoren  $\underline{a}_i$  geldt volgens definitie

$$(A \lambda_i + B) \underline{a}_i = 0 \quad (26)$$

De matrices A en B worden afgeleid uit de bewegingsvergelijkingen (19), in matrix notatie:

$$A \begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} \beta \\ r \end{pmatrix} = \underline{c} \delta + \begin{pmatrix} F_d(t) \\ M_d(t) \end{pmatrix} \quad (27)$$

Voorts geldt:

$$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} = C^{-1} \quad (28)$$

en

$$\begin{pmatrix} d_{13} \\ d_{23} \end{pmatrix} = C^{-1} \underline{c} \quad (29)$$

waarbij de matrix C bepaald wordt door:

$$C = (A \underline{a}_1, A \underline{a}_2) \quad (30)$$



De uitwijking uit de baan is nu te schrijven als:

$$y = U \int_0^t \int_0^\tau G_3(t, \tau, \tau^1) \delta d\tau^1 d\tau + U \int_0^t \int_0^\tau G_1(t, \tau, \tau^1) F_d(\tau^1) d\tau^1 d\tau + \\ + U \int_0^t \int_0^\tau G_2(t, \tau, \tau^1) M_d(\tau^1) d\tau^1 d\tau \quad (31)$$

waarin:

$$G_i = d_{1i} \{a_{12}(t-\tau) + a_{11}\} e^{\lambda_1(\tau-\tau^1)} + d_{2i} \{a_{22}(t-\tau) + a_{21}\} e^{\lambda_2(\tau-\tau^1)} \quad (32)$$

(i = 1, 2, 3)

Uit bovenstaande uitdrukking (31) voor y kunnen in principe snelheidsverdelingen van de dwarsstroom worden bepaald die bij een gegeven stuurgedrag dezelfde maximale afwijking van de gewenste vaarbaan veroorzaken. Het stuurgedrag zelf zal echter een functie van de stroomverdeling zijn. Voor relatief kleine breedte van het dwarsstroomveld en relatief sterke dwarsstromen, zal het stuurgedrag bepaald worden door de begrenzingen van de roeruitslag. Het roergedrag zal dan slechts in geringe mate variëren, waardoor verschillen in maximale uitwijkingen alleen het gevolg zijn van verschillen in dwarsstroomverdelingen.

De relatieve bewegingshypothese kan op veel manieren worden gedefiniëerd. Hier wordt ter wille van de uniformiteit de definitie toegepast zoals ook in het verslag [2] is toegepast. De relatieve snelheid en de gradiënt van de dwarsstroom worden ter plaatse van het midden van het schip bepaald. De uitdrukkingen voor de dwarskracht en het moment worden dan:

$$F_d(x) = -b_{11}\beta_c - (b_{12}U + Y_v U^2) \frac{\partial \beta_c}{\partial x} \quad (33)$$

en

$$M_d(x) = -b_{21}\beta_c - (b_{22}U + N_v U^2) \frac{\partial \beta_c}{\partial x} \quad (34)$$

waarin  $\beta_c$  de schijnbare drifthoek  $\frac{V_D}{U}$  is.

De uitdrukkingen (23) en (31) lenen zich voor analyse van de vaarbaan. Wanneer de breedte van het dwarsstroomveld kleiner is dan enige malen de scheepslengte, zal de maximale uitwijking van het schip optreden nadat het schip het dwarsstroomveld is gepasseerd.



Voor de numerieke bepaling van het verloop van de uitwijking uit de gewenste baan blijkt gebruik van formule (31) rekenintensief te zijn, zodat bij de later te bespreken berekeningen de baan bepaald wordt met behulp van een differentieschema afgeleid van het stelsel vergelijkingen:

$$\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ U & 0 & U & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ r \\ \psi \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 \delta \\ c_2 \delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_d(t) \\ M_d(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Bij een bekend roergedrag zal de maximale uitwijking dan afhangen van de waarde van  $y$ ,  $\psi$ ,  $\beta$  en  $r$  op het tijdstip  $T$  dat het schip het dwarsstroomveld uitvaart. Behalve van scheepsconstanten zijn  $\beta$  en  $r$  functies van:

$$\int_0^T F_d(\tau) e^{\lambda_i(T-\tau)} d\tau \quad (36)$$

en

$$\int_0^T M_d(\tau) e^{\lambda_i(T-\tau)} d\tau \quad (37)$$

De grootheden  $y$  en  $\psi$  zijn ook nog functies van:

$$\int_0^T F_d(t) dt$$

$$\int_0^T F_d(t) (T-t) dt \quad (39)$$

$$\int_0^T M_d(t) dt \quad (40)$$

$$\int_0^T M_d(t) (T-t) dt \quad (41)$$

Indien het moment een vaste arm maal de dwarskracht is en indien  $\lambda_i T \ll 1$  volgen als bepalende constanten voor de maximale uitwijking:

$$\int_0^T F_d(t) dt = C_1 \quad (42)$$

en

$$\int_0^T F_d(t) (t-T) dt = C_2 \quad (43)$$

Bij de in hoofdstuk 4 besproken uitkomsten blijken de uitwijkingen voor DR(0) en DR(1) het meest met de gemiddelde resultaten te verschillen. De waarden die  $C_2$  aanneemt voor deze profielen verschillen eveneens het sterkst van de gemiddelde waarde. Wanneer de dwarskracht symmetrisch is voegt vergelijking (43) geen extra beperking toe.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van de relatieve bewegingshypothese kunnen de uitdrukkingen (36) t/m (40) herleid worden tot uitdrukkingen die betrekking hebben op de snelheidsverdeling van de dwarsstroom. Er volgt dan:

$$\int_0^T V_D(t) e^{\lambda_i(T-t)} dt \quad (44)$$

$$\int_0^T \frac{\partial V_D}{\partial x}(t) e^{\lambda_i(T-t)} dt = \frac{V_D}{U_s} e^{\lambda_i(T-t)} \Big|_0^T + \lambda_i \int_0^T V_D e^{\lambda_i(T-t)} dt \quad (45)$$

$$\int_0^T V_D(t) dt \quad (46)$$

$$\int_0^T \frac{\partial V_D}{\partial x}(t) dt = \frac{V_D(T) - V_D(0)}{U_s} \quad (47)$$

$$\int_0^T (T-t) V_D(t) dt \quad (48)$$

$$\int_0^T (T-t) \frac{\partial V_D}{\partial x}(t) dt = \frac{(T-t)}{U_s} V_D \Big|_0^T + \int_0^T \frac{V_D(t)}{U_s} dt \quad (49)$$

Indien  $V_D(0) = V_D(T) = 0$ , dan zijn bovenstaande uitdrukkingen te herleiden tot:

$$\int_0^T V_D(t) e^{\lambda_i(T-t)} dt \quad (i=1,2) \quad (50)$$

$$\int_0^T V_D(t) dt \quad (51)$$

$$\int_0^T (T-t) V_D(t) dt \quad (52)$$

Bij een aantal gebruikte theoretische dwarsstroomverdelingen treedt een discontinuïteit op in de snelheidsverdeling. De gradiënt is in deze discontinuïteitpunten niet gedefiniëerd. Wordt in het discontinuïteitpunt de gradiënt gelijk genomen aan de linkse dan wel rechtse afgeleide dan zijn de grootheden

(50) tot (52) niet maatgevend, zoals uit de grootheden (44) tot (49) afgeleid kan worden. De fysisch realistische dwarsstromen zullen dergelijke discontinuïteiten niet bezitten.

Voor kleine waarden van  $\lambda_i T$  voegen de integralen (50) aan de integralen (51) en (52) de volgende integraal toe:

$$\int_0^T V_D(t) (T-t)^2 dt \quad (53)$$

Bij een gegeven dwarsstroombreedte zullen de volgende grootheden dus bij benadering de maximale uitwijking bepalen:

$$\int_0^T t^i V_D(t) dt \quad i=0,1,2 \quad (54)$$

Om deze benadering te toetsen wordt een stoorfunctie afgeleid die voldoet aan:

$$V_D(0) = V_D(T) = 0 \quad (55)$$

$$\int_0^T V_D(t) dt = 0 \quad (56)$$

$$\int_0^T V_D(t) (T-t) dt = 0 \quad (57)$$

$$\int_0^T V_D(t) (T-t)^2 dt = 0 \quad (58)$$

Deze gekozen stoorfunctie heeft de vorm

$$V_D = E \frac{x}{L_D} \left( \frac{x}{L_D} - 1 \right) \left[ 1 - 9 \frac{x}{L_D} + 21 \left( \frac{x}{L_D} \right)^2 - 14 \left( \frac{x}{L_D} \right)^3 \right] \quad (59)$$

en is in Figuur 18 op het SIN 1 profiel gesuperponeerd. De maximum afwijking door deze stoorfunctie veroorzaakt is 0,07 E. Bij een vaste roeruitslag zijn vaarbanen bepaald. Voor grote verstoringen blijken dan kleine verschillen in maximale uitwijking op te treden. In Tabel 4 en 5 zijn de maximale uitwijkingen weergegeven voor vaarten door de volgens functie (59) verstoorte stroomprofielen SIN 1 en DR(1). De verschillen tengevolge van variatie in E blijken gering te zijn, zodat een zekere ongevoeligheid voor de vorm van de dwarsstroom aanwezig is als aan de condities (54) wordt voldaan. De invloed van het roergedrag op de maximale uitwijking zal merkbaar worden wanneer de kracht en het moment, door het roer op het schip uitgeoefend, van dezelfde orde wordt als die door de dwarskracht en het giermoment.



Bij de afleiding van de integralen (54) wordt voor fysisch realistische dwarsstromen geen van deze integralen toegevoegd vanwege de aanwezigheid van een gradiëntterm in de uitdrukking voor de dwarskracht. Ook worden geen andere condities geïntroduceerd. De aanwezigheid van de gradiëntterm beïnvloedt de relatieve ongevoeligheid van de maximale uitwijking voor de vorm van de dwarsstroom dus niet. Daar bij de huidige beschouwingen alleen de integraal met  $i=0$  constant gehouden werd voor de dwarsstroomprofielen, kunnen de integralen met  $i=1$  en  $2$  wel gaan afwijken als een vrij glad profiel vergeleken wordt met een profiel waarin een sterke gradient aanwezig is. Deze verschillen hangen echter niet af van de dwarsstroom-kracht relatie.

## 5.2 Bespreking van de berekeningen

Aanvullend op de berekeningen, besproken in hoofdstuk 4, worden nu berekeningen toegelicht waarmee wordt nagegaan wat de invloed is van de gebruikte dwarsstroom-dwarskracht relatie op de maximale uitwijking. Nagegaan wordt in hoeverre het gebruik van de relatieve bewegingshypothese de ongevoeligheid van de uitwijking voor de vorm van de dwarsstroom beïnvloedt. In paragraaf 5.1 is voor een lineair manoeuvreermodel aangetoond, dat om eenzelfde uitwijking uit de gewenste baan te veroorzaken aan dwarsstroomvelden meer voorwaarden opgelegd moeten worden dan de voorwaarde dat de krachtintegraal voor de snelheidsverdelingen gelijk moet zijn. In deze paragraaf wordt echter aangesloten bij de voorgaande berekeningen en worden de snelheidsprofielen zodanig gekozen dat bij gegeven dwarsstroombreedte de krachtintegraal constant is.

De berekeningen worden uitgevoerd met het lineaire model, daar de beschikbare manoeuvreerprogramma's of niet gebaseerd zijn op de in hoofdstuk 2 beschreven vergelijkingen of de relatieve bewegingshypothese niet gebruikten om de dwarsstroomkracht te bepalen.

Teneinde na te gaan of het gelineariseerde model en het eerder gebruikte niet-lineaire Abkowitz-model tot gelijkwaardige resultaten leiden werden berekeningen uitgevoerd met het lineaire model en de krachtenformulering volgens Formule (9). Uit Figuur 7 blijkt dat de verschillen in de maximale uitwijking van deze twee methoden hier weergegeven voor het SIN1 profiel, gering zijn. Vervolgens zijn berekeningen uitgevoerd met het gelineariseerde model, waarbij de krachten bepaald zijn volgens de formules (33) en (34), afgeleid met de



relatieve bewegingshypothese. Daar de toegepaste weerstandcoëfficiënt in formule (9) vrij willekeurig is, is bij de laatste berekening een dwarsstroomsnelheid toegepast zodanig dat de uitwijking uit de gewenste baan van dezelfde orde van grootte wordt, als bij de eerst uitgevoerde berekeningen. Deze snelheid is ( $V_c = 1,1$  m/s) in de volgende berekeningen als referentie gebruikt. Uit Figuur 17 blijkt dat de algemene tendens van de krommen identiek is. De toppen liggen echter iets verschoven en de maximale uitwijking, voorspeld met de relatieve bewegingshypothese, neemt bij grote dwarsstroombreedte sterker af dan bij gebruik van relatie (9).

Voorts zijn berekeningen uitgevoerd voor de in paragraaf 3.2 beschreven dwarsstroomprofielen met behulp van het lineaire model en de relatieve bewegingshypothese. In Figuur 19 zijn de maximale uitwijkingen weergegeven, waarbij er voor gezorgd is dat voor elk snelheidsprofiel geldt:

$$\int_0^{L_D} V_D(x) dx = \text{constant bij gegeven } L_D = V_c L_D \quad (60)$$

$V_c$  is de referentiesnelheid, bepaald door het afstemmen op de SINI resultaten. De berekende uitwijkingen blijken nogal sterk af te wijken van de tot nu toe verkregen tendens dat voor kleine dwarsstroombreedte de invloed van de verdeling van de dwarsstroom op de maximale uitwijking maar gering is. Bij de gebruikte snelheidsverdeling is er gezorgd dat aan formule (60) voldaan wordt. In plaats daarvan zou een constante waarde voor de krachtintegraal toegepast moeten worden:

$$\int_0^{L_D} F_d(x) dx \text{ is constant} \quad (61)$$

Wanneer echter  $V_D$  continu is en voor  $x=0$  en  $x=L_D$  de dwarsstroomsnelheid dezelfde waarde aanneemt, is de uitdrukking, op een constante factor na, identiek aan de snelheidsintegraal (60). De profielen DR(0) en DR(1) mogen daardoor afwijkend gedrag vertonen. De variatie die de overige krommen vertonen is echter nog steeds groot. Opmerkelijk is ook het verschil in uitwijking voorspeld bij de konstante dwarsstroom UNI en SINI profiel, daar bij de oorspronkelijke berekeningen waarden van dezelfde orde van grootte worden voorspeld. Ook het gedrag van de kromme DR(1) is merkwaardig, daar de grootste uitwijkingen voor de kleinste dwarsstroombreedte worden bereikt. De huidige berekeningen tonen grote variaties. De oorzaak van deze variaties moet gezocht worden in de gradiënten

van de dwarsstroom. Volgens formule (33) wordt de dwarskracht bepaald volgens:

$$F_D = - Y_v \cdot V_D + (Y_r + Y_{\dot{v}} U) \frac{\partial V_D}{\partial x} \quad (62)$$

Voor de Mariner geldt:

$$\begin{aligned} Y_v &= -0,0101 * \frac{1}{2} \rho L^2 U \\ Y_r &= 0,00292 * \frac{1}{2} \rho L^3 U \\ Y_{\dot{v}} &= -0,00732 * \frac{1}{2} \rho L^3 \end{aligned} \quad (63)$$

Voor de lengte  $L = 160,93$  m wordt de verhouding tussen de coëfficiënten van  $V_D$  en  $\frac{\partial V_D}{\partial x}$  in de formule voor de kracht (62):

$$\left[ \frac{Y_v}{Y_r + Y_{\dot{v}} U} \right]^{-1} = 0,43 L \quad (64)$$

Daaruit volgt dat de gradiëntbijdrage een relatief sterke invloed heeft op de grootte van de kracht. Voor dwarsstroomprofiel DR(1) houdt dit in dat gedurende de gehele vaart door de dwarsstroom de bijdrage van gradiënt aan de dwarskracht steeds groter is dan de maximaal mogelijke bijdrage van de stroomsnelheid, als de breedte van de dwarsstroom kleiner is dan 70 m. Hier is de bijdrage van de gradiënt constant over de volle breedte van de dwarsstroom, terwijl de maximale bijdrage van de snelheid pas aan het eind van de dwarsstroom wordt bereikt. Ook voor breedten groter dan 70 m zal de gradiënt een belangrijk effect hebben op de maximale uitwijking.

Bij de berekeningen van de in Figuur 19 weergegeven maximale uitwijkingen uit de gewenste vaarbaan zijn de oneindig grote gradiënten die optreden bij discontinuïteiten in snelheidsverdeling niet in rekening gebracht. Wordt dit wel gedaan, wat fysisch gezien meer correct is, dan heeft bij gelijke dwarsstroombreedte de krachtintegraal (61) voor alle gebruikte snelheidsverdelingen dezelfde constante waarde. De invloed van deze correctie op de maximale uitwijking blijkt groot te zijn. In Figuur 21 zijn de resultaten weergegeven. De daarin geschetste krommen vertonen een beeld dat overeenkomt met de resultaten van Figuur 5, die betrekking heeft op methode VP voor de bepaling van de dwarskracht. In Figuur 21 staan ook uitwijkingen voor de dwarsstroom NR, waarvan de snelheidsverdeling in Figuur 20 staat aangegeven. De variatie in de krommen in Figuur 21 blijkt met het tweede moment van de snelheidsverdeling overeen te stemmen. In Tabel 6 zijn de waarden van de tweede orde momenten  $I_2$ :



$$I_2 = \int_0^{L_D} x^2 V_D(x) dx \quad (65)$$

weergegeven voor de toegepaste snelheidsverdelingen bij een zelfde nulde orde moment  $I_0$ :

$$I_0 = \int_0^{L_D} V_D(x) dx = V_c L_D \quad (66)$$

In het bijzonder blijken de waarden van  $I_2$  voor UNI, SIN1 en DR(0.5) nagenoeg gelijk te zijn, wat in Figuur 21 tot uitdrukking komt door onderling geringe verschillen tussen de krommen. In Figuur 21 is  $V_c = 1,1$  m/s. In de Figuren 22 en 23 zijn de uitwijkingen weergegeven voor respectievelijk  $V_c = 0,55$  m/s en  $V_c = 0,707$  m/s. De laagste snelheid laat voor  $\frac{L_D}{L} = 0,5$  de grootste verschillen zien. Dit duidt op een toenemende invloed van de stuurautomaat.

In Figuur 22 wordt in vergelijking met Figuur 21 voor kleine dwarsstroombreedten een relatief grote spreiding gevonden in de berekende maximale uitwijkingen. Het verschil tussen beide figuren betreft de grootte van de dwarsstroomsnelheid. De verhouding tussen de gemiddelde kracht ten gevolge van de dwarsstroom en de maximale roerkracht verandert daardoor. Indien de stroomkracht veel groter is dan de roerkracht zal de stuurautomaat maximaal roer geven, nagenoeg onafhankelijk van de verdeling van de dwarsstroom. Is daarentegen de roerkracht veel groter dan de dwarsstroomkracht, dan zal de stuurautomaat niet tot maximaal roer besluiten en zal het roersignaal meer afhankelijk zijn van de verdeling van de dwarsstroom. Als gevolg hiervan kan bij een verandering in de verhouding van deze krachten de gevoeligheid van de maximale uitwijking voor de vorm van de dwarsstroom veranderen. Om na te gaan hoeveel van de spreiding in de Figuren 21 en 22 door de reactie van de stuurautomaat op de vorm van de dwarsstroom wordt verklaard, zijn vaarbanen bepaald met een referentiestuursignaal. Als referentiestuursignaal is het roersignaal gekozen dat automaat SEE geeft voor de dwarsstroom SIN1. Dit roersignaal is toegepast voor de overige stroomverdelingen met dezelfde breedte. In de Tabellen 7 en 8 zijn de uitkomsten van deze berekeningen weergegeven. Bij gebruik van het referentiestuursignaal blijken de maximale uitwijkingen, aangegeven in kolom REF, aanzienlijk minder spreiding te vertonen dan bij gebruik van de automaat SEE aangegeven in kolom AUT. In de toename van de spreiding met de breedte van de dwarsstroom is bij REF duidelijk de invloed van de vorm te herkennen. Zoals in paragraaf 5.1 is aangegeven is de maximale uitwijking van het schip een functie van de

krachtintegraal en van een aantal andere integralen. Bij gebruik van de relatieve bewegingshypothese houdt dit bij benadering in dat de maximale uitwijking een functie is van de integralen

$$I_i = \int_0^{L_D} x^i V_D(x) dx \quad i=0,1,2 \quad (67)$$

De diverse profielen zijn zo gekozen dat de integraal voor  $i=0$  een gegeven vaste waarde heeft. De overige integralen ( $i=1,2$ ) variëren echter. In de Tabellen 7 en 8 valt op dat de profielen SIN1, UNI, DR(0,5), DRC(0,5) voor  $0 < \frac{L_D}{L} < 2$  een zeer geringe spreiding in de maximale uitwijking te zien geven voor de referentiebesturing:  $0.042B$  bij  $V_c = 0,55$  m/s en bij  $V_c = 1,1$  m/s, waarbij  $B_s$  de breedte van het schip is. Voor deze profielen hebben  $I_0$ ,  $I_1$  en  $I_2$  ongeveer dezelfde waarden. NR vergroot de spreiding tot:  $0,2B$  bij  $V_c = 0,55$  m/s en  $0,133B$  bij  $V_c = 1,1$  m/s. Voor NR wijkt  $I_2$  af van de waarden voor SIN1, DR(0,5), DRC(0,5) en UNI. Als DR(0) en DR(1) in de beschouwing worden betrokken, neemt de spreiding sterker toe. Voor deze profielen wijkt ook de waarde van  $I_1$  sterk af van de waarde van  $I_1$  bij de overige profielen. Het aandeel van de vorm van de dwarsstroom in de spreiding van de maximale uitwijking blijkt voor kleine dwarsstroombreedte betrekkelijk klein te zijn.

Uit bovenstaande beschouwingen volgt dat bij gebruik van de relatieve bewegingshypothese om de stroomkracht op het schip te bepalen geen essentieel andere conclusies getrokken kunnen worden met betrekking tot de ongevoeligheid van de maximale uitwijking voor de vorm van de dwarsstroom dan bij gebruik van de kwadratische snelheidsrelatie (9).



## 6. Samenvatting en conclusies

In dit verslag wordt een onderzoek beschreven naar de gevoeligheid van een schip, varend door een dwarsstroom, voor de snelheidsverdeling van de dwarsstroom. Als kenmerk van de vaarbaan is de maximale uitwijking uit de gewenste vaarbaan gekozen. Als aanvulling op de gevoeligheidsanalyse, vermeld in verslag [1], wordt in het huidige verslag ingegaan op de invloed van de stuurautomaat en op de invloed van de dwarskracht-stroom relatie op de maximale uitwijking van het schip. Er zijn twee typen voor de stuurautomaat toegepast aangeduid als SEE en VSEE, waarvan de laatste steeds maximaal roer geeft. Voorts is de invloed van de stuurautomaat op de vaarbaan vastgesteld door gebruik te maken van een referentiebesturing. Daarnaast zijn een tweetal relaties toegepast, die het verband weergeven tussen de stroomverdeling en de dwarskracht; een kracht evenredig gesteld met het kwadraat van de dwarsstroomsnelheid en een kracht bepaald met de relatieve bewegingshypothese.

Uitgangspunt voor deze studie is de conclusie vermeld in verslag [1] dat, bij een gegeven breedte van de dwarsstroom, de variatie in de maximale uitwijking van het schip door variatie in de verdeling van de dwarsstroom gering is, zolang de integraal van de stroomkracht op het vastgehouden schip over de breedte van de dwarsstroom een konstante waarde bezit. Deze conclusie geldt alleen voor kleine breedte van de dwarsstroom. In dit verslag wordt nagegaan in hoeverre deze conclusie afhangt van de keuze van de stuurautomaat en de dwarskracht-stroom relatie.

Het onderzoek leidt tot de volgende conclusies:

1. De twee typen stuurautomaten SEE en VSEE geven voor kleine breedte van de dwarsstroom geen essentieel verschillende indruk van de gevoeligheid van de maximale uitwijking van het schip voor de verdeling van de dwarsstroom.
2. De automaat VSEE is voor stroombeelden met kleine gradiënt en grote breedte van de dwarsstroom niet goed toepasbaar door het extreme roergeven. Voor het testen van een stuurautomaat verdient het daarom aanbeveling ook stroombeelden met kleine gradiënten te gebruiken.
3. De verschillen tussen stuurautomaten van hetzelfde type, zoals de in verslag [1] beproefde automaat SE en de hier gebruikte automaat SEE, kunnen een belangrijk effect hebben op de grootte van de maximale uitwijking.

4. Uit de berekeningen met de referentiebesturing blijkt dat de variatie die in de maximale uitwijking van het schip optreedt bij een vaste dwarsstroombreedte als gevolg van variatie in de stroomverdeling voor een belangrijk deel veroorzaakt wordt door de reactie van de stuurautomaat op de vorm van de dwarsstroom (zie tabel 7 en 8).
5. Het gebruik van de relatieve bewegingshypothese ter bepaling van de stroomkrachten op het schip, dan wel het gebruik van een kwadratische snelheidsrelatie blijkt nagenoeg tot een even grote ongevoeligheid van de maximale uitwijking van het schip voor de vorm van de dwarsstroom te leiden. De variatie van de vorm van de dwarsstroom is zodanig dat bij een gegeven breedte van de dwarsstroom, de integraal van de stroomkracht zijn waarde behoudt.
6. Bij de dwarskracht-stroom relatie wordt een verband gelegd tussen de dwarskracht werkend op het schip en een karakteristieke snelheid van de dwarsstroom. Bij de huidige berekeningen is voor de karakteristieke snelheid achtereenvolgens gekozen: de lokale stroomsnelheid ter plaatse van het midden van het schip, de lineaire over de lengte van het schip gemiddelde dwarsstroomsnelheid en de kwadratisch over de lengte van het schip gemiddelde dwarsstroomsnelheid. De berekende maximale uitwijkingen van het schip blijken in belangrijke mate afhankelijk te zijn van de gebruikte definitie voor de karakteristieke stroomsnelheid, in het bijzonder bij stroomverdelingen met sterke gradiënten.
7. Bij de huidige analyse is de stroomverdeling zodanig gevariëerd dat bij gegeven breedte van de dwarsstroom, de integraal van de dwarskracht ten gevolge van de dwarsstroom over de breedte van de dwarsstroom konstant is. Uit deze integraal kan een integraal met betrekking tot de snelheidsverdeling van de dwarsstroom afgeleid worden. Deze snelheidsintegraal is afhankelijk van de gebruikte dwarskracht-stroom relatie. In geval van de kwadratische relatie volgt dat de integraal van het kwadraat van de snelheid over de breedte van de dwarsstroom konstant is. In geval van gebruik van de relatieve bewegingshypothese volgt dat bij pulsformige stroomverdelingen de integraal van de dwarsstroomsnelheid over de breedte van de dwarsstroom konstant is bij variatie van de stroomprofielen.



8. De conclusies van deze studie betreffen steeds variaties van het stroomprofiel bij een vaste breedte van de dwarsstroom, zodat dus geen uitspraak gedaan wordt over de variatie van de maximale uitwijking van het schip ten gevolge van variatie in de breedte van de dwarsstroom bij een gegeven waarde van de krachtintegraal. Uit de tabellen 7 en 8 kan een indicatie verkregen worden en daaruit blijkt een afname van de uitwijking door toename van de dwarsstroombreedte. Dit stemt overeen met de ontwerpfilosofie: spreiding van het debiet.
  
9. In hoeverre van "ongevoeligheid voor de stroomverdeling" gesproken mag worden hangt af van de concrete toepassing. Bijvoorbeeld voor binnenvaartsituaties behoeft de variatie in de maximale uitwijking als gevolg van variatie in het stroombeeld niet verwaarloosbaar klein te zijn.



## LITERATUUR

- 1 Waterloopkundig Laboratorium  
De invloed van een dwarskracht op de vaarbaan van een schip  
Verslag W 252 deel II, november 1978
  
- 2 Waterloopkundig Laboratorium  
Simulatie van vaarbanen met een wiskundig model  
Verslag R 775-W 252-deel IV, augustus 1981

lengte tussen de loodlijnen	160,93 m
breedte grootspant	23,17 m
diepgang	7,47 m
waterverplaatsing	16,652 m <sup>3</sup>
traagheidsstraal in verband met gieren	40,23 m
referentiesnelheid	5 m/ s

Tabel 1 Kenmerkende grootheden voor een Mariner

$m^*$	0,008	$y_{\dot{v}}^*$	- 0,00732	$N_{\dot{v}}^*$	- 0,0005
$l_z^*$	0,0005	$y_{\dot{r}}^*$	0,00033	$N_r^*$	- 0,0037
$x_G^*$	- 0,0231	$y^{0*}$	- 0,00007	$N^{0*}$	0,000035
$x_{\dot{u}}^*$	- 0,0008	$y_u^{0*}$	0,0	$N_u^{0*}$	0,0
$x^{0*}$	0,0	$y_{uu}^{0*}$	0,0	$N_{uu}^{0*}$	0,0
$x_u^*$	- 0,00284	$y_v^*$	- 0,0101	$N_v^*$	- 0,00349
$x_{uu}^*$	- 0,01078	$y_{vvv}^*$	- 0,834	$N_{vvv}^*$	0,0
$x_{uuu}^*$	- 0,06438	$y_{vrr}^*$	- 0,07948	$N_{vrr}^*$	- 0,00968
$x_{vv}^*$	- 0,00854	$y_{v\delta\delta}^*$	0,0034	$N_{v\delta\delta}^*$	0,0042
$x_{rr}^*$	- 0,00246	$y_{vu}^*$	- 0,0101	$N_{vu}^*$	- 0,00349
$x_{\delta\delta}^*$	- 0,00174	$y_{vuu}^*$	0,0	$N_{vu}^*$	0,0
$x_{vvu}^*$	0,0	$y_r^*$	0,00292	$N_r^*$	- 0,002
$x_{rru}^*$	0,0	$y_{rrr}^*$	0,0	$N_{rrr}^*$	- 0,00912
$x_{\delta\delta u}^*$	- 0,00348	$y_{rvv}^*$	0,073	$N_{rvv}^*$	- 0,0654
$x_{vr}^*$	0,00671	$y_{r\delta\delta}^*$	0,0044	$N_{r\delta\delta}^*$	0,0016
$x_{v\delta}^*$	0,00187	$y_{ru}^*$	0,00292	$N_{ru}^*$	- 0,002
$x_{r\delta}^*$	0,00036	$y_{ruu}^*$	0,0	$N_{ruu}^*$	0,0
$x_{vru}^*$	0,00671	$y_{\delta}^*$	0,00232	$N_{\delta}^*$	- 0,0011
$x_{v\delta u}^*$	0,00187	$y_{\delta\delta\delta}^*$	- 0,01188	$N_{\delta\delta\delta}^*$	0,0063
$x_{r\delta u}^*$	0,00036	$y_{\delta vv}^*$	0,077	$N_{\delta vv}^*$	- 0,0386
		$y_{\delta rr}^*$	0,0036	$N_{\delta rr}^*$	- 0,0008
		$y_{\delta u}^*$	0,00464	$N_{\delta u}^*$	- 0,0022
		$y_{\delta uu}^*$	0,00464	$N_{\delta uu}^*$	- 0,0022
		$y_{vr\delta}^*$	0,0	$N_{vr\delta}^*$	0,0

Tabel 2 De manoeuvreercoëfficiënten van het "Mariner" schip "Compass Island" voor de manoeuvreervergelijkingen van Abkowitz



a	5
b	200 s
c	0
d	0,8 rad
e	0
f	0
K	2 s <sup>-1</sup>
$\delta_m$	0,7 rad
$\dot{\delta}_m$	0,06 rad/s
$\ddot{\delta}_m$	0,12 rad/s <sup>2</sup>

Tabel 3 De coëfficiënten voor de stuurautomaat van het Mariner schip

$L_D/L$	$Y_T/L$				
	$E = -17 V_c$	$E = -8,5 V_c$	$E = 0$	$E = 8,5 V_c$	$E = 17 V_c$
0,5	0,163	0,153	0,144	0,135	0,127
1,0	0,305	0,303	0,301	0,299	0,298
1,5	0,435	0,435	0,435	0,435	0,435
2,0	0,536		0,536		0,535
2,5	0,600		0,596		0,593
3,0	0,617		0,609		0,600
3,5	0,577		0,578		0,592
4,0	0,483		0,516		0,569

Tabel 4 Invloed van storingen op de maximale uitwijking voor dwarsstroomprofiel SIN1

$L_D/L$	$Y_T/L$				
	$E = -17 V_c$	$E = -8,5 V_c$	$E = 0$	$E = 8,5 V_c$	$E = 17 V_c$
0,5	0,529	0,503	0,476	0,451	0,427
1,0	0,525	0,520	0,516	0,512	0,508
1,5	0,499	0,499	0,499	0,500	0,500

Tabel 5 Invloed van storingen op de maximale uitwijking voor dwarsstroomprofiel DR(1)

profiel	$\int_0^{L_D} x^2 \bar{v}_D dx / V_c L_D^3$
DR(0)	0,167
NR	0,188
DR(0,5)	0,292
SIN1	0,297
UNI	0,333
DRC(0,5)	0,375
DR(1)	0,5

Tabel 6 Overzicht van de tweede orde momenten van de dwarsstroomverdelingen

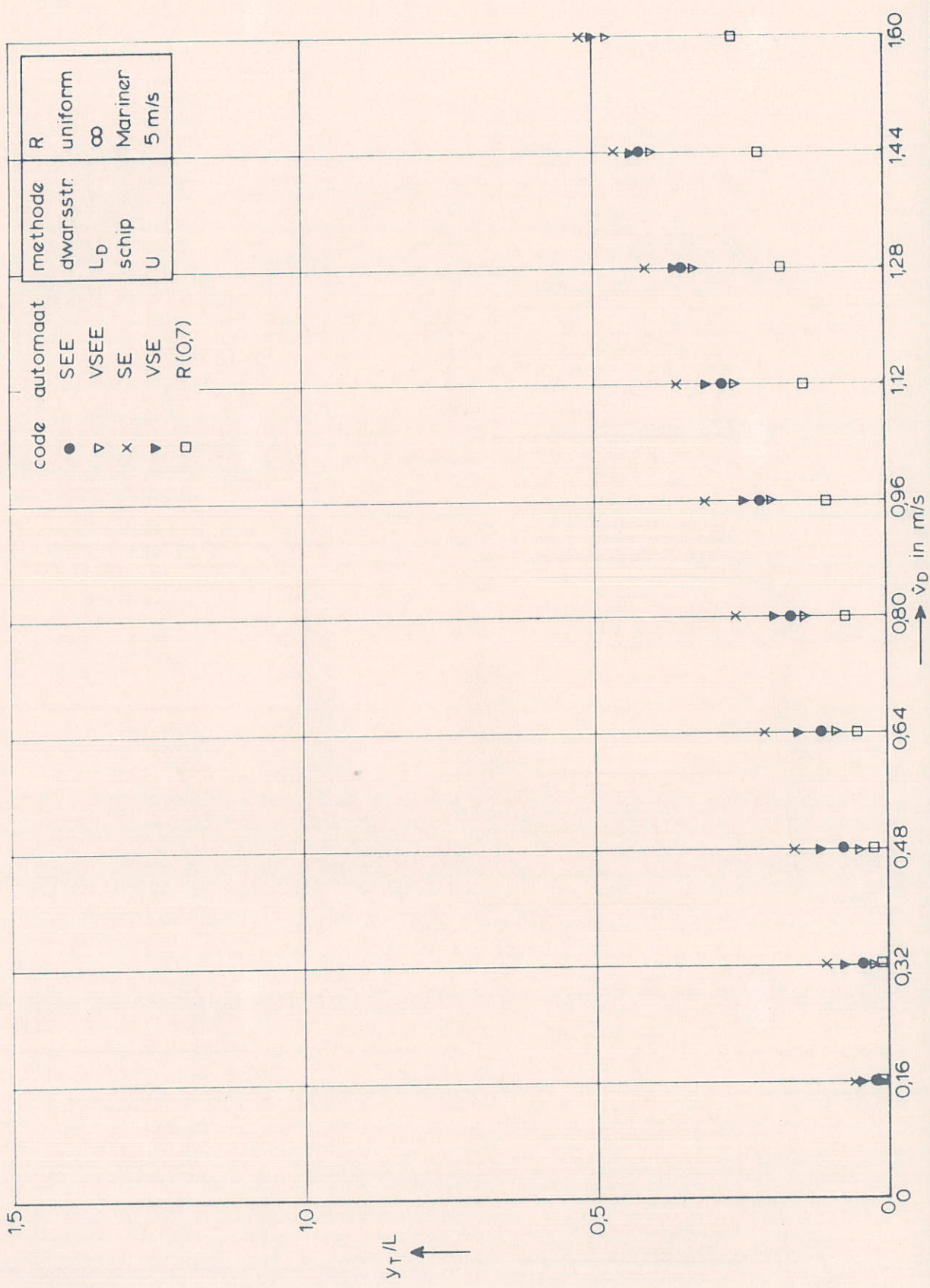
	$L_D/L = 0,5$		$L_D/L = 1,0$		$L_D/L = 1,5$		$L_D/L = 2,0$	
	AUT	REF	AUT	REF	AUT	REF	AUT	REF
SIN1	0,076	0,076	0,111	0,111	0,136	0,136	0,139	0,139
UNI	0,058	0,078	0,105	0,112	0,137	0,134	0,152	0,134
DR(0,5)	0,087	0,076	0,117	0,111	0,138	0,136	0,143	0,140
DRC(0,5)	0,108	0,080	0,154	0,112	0,192	0,132	0,222	0,138
DR(1)	0,054	0,075	0,081	0,086	0,094	0,072	0,109	0,024
DR(0)	0,092	0,081	0,148	0,138	0,201	0,196	0,251	0,249
NR	0,199	0,076	0,261	0,112	0,429	0,146	0,614	0,163
$Y_T/L$								

Tabel 7 Maximale uitwijking van het schip voor diverse stroombeelden bij gebruik van een roerautomaat (SEE) of een referentiebesturing (REF) ( $V_c = 0,55$  m/s)

	$L_D/L = 0,5$		$L_D/L = 1,0$		$L_D/L = 1,5$		$L_D/L = 2,0$	
	AUT	REF	AUT	REF	AUT	REF	AUT	REF
SIN1	0,195	0,195	0,345	0,345	0,462	0,462	0,550	0,550
UNI	0,174	0,200	0,314	0,350	0,432	0,464	0,529	0,547
DR(0,5)	0,205	0,195	0,350	0,345	0,466	0,462	0,563	0,550
DRC(0,5)	0,236	0,204	0,404	0,353	0,536	0,466	0,627	0,544
DR(1)	0,171	0,195	0,274	0,309	0,326	0,357	0,338	0,343
DR(0)	0,210	0,205	0,388	0,391	0,568	0,573	0,747	0,752
NR	0,243	0,196	0,587	0,344	0,998	0,465	1,444	0,563
$Y_T/L$								

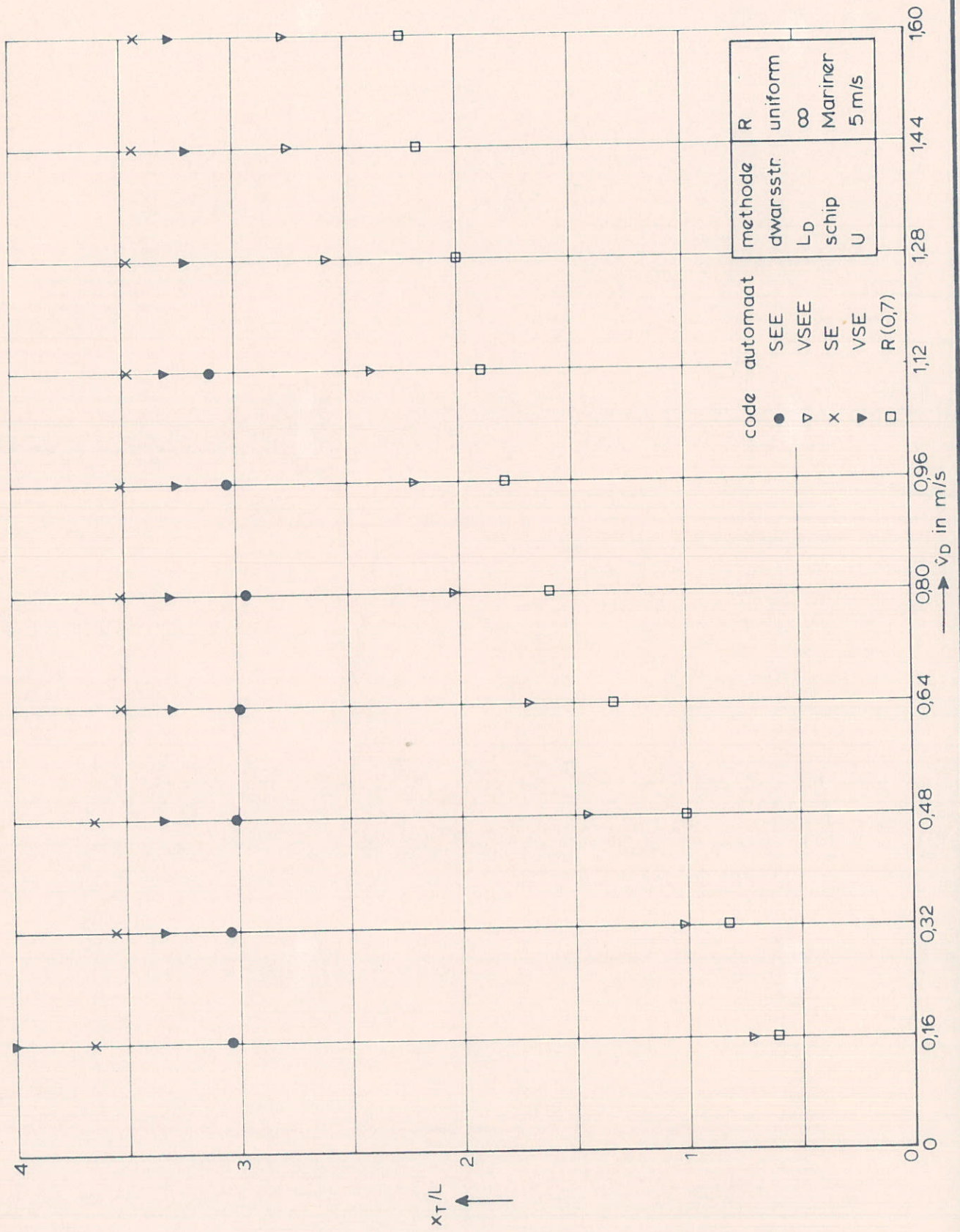
Tabel 8 Maximale uitwijking van het schip voor diverse stroombeelden bij gebruik van een roerautomaat (SEE) en een referentiebesturing ( $V_c = 1,1$  m/s)





INVLOED VAN DIVERSE STUURAUTOMATEN  
OP DE MAXIMALE UITWIJING



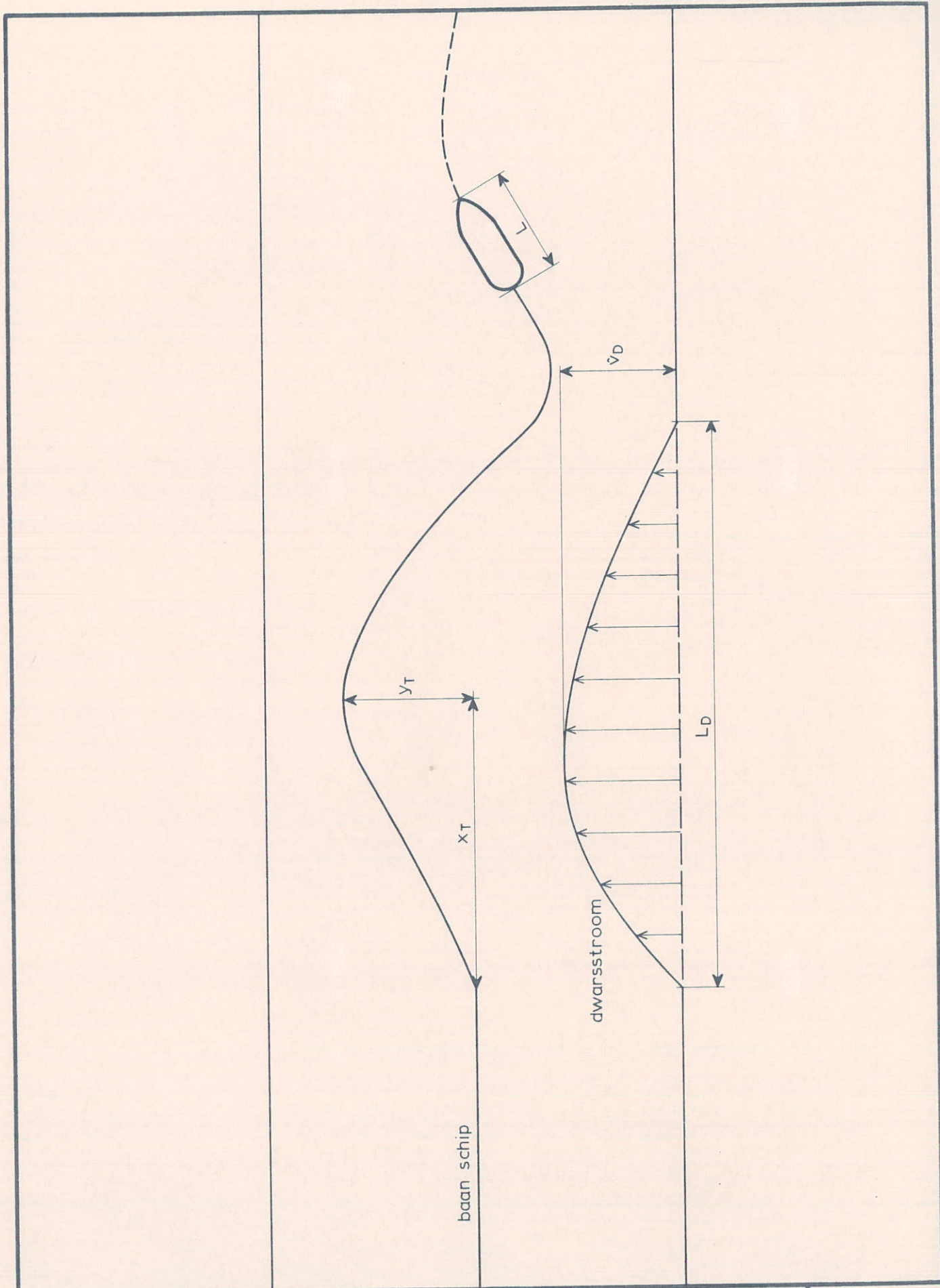


INVLOED VAN DIVERSE STUURAUTOMATEN OP DE  
PLAATS VAN DE MAXIMALE UITWIJING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

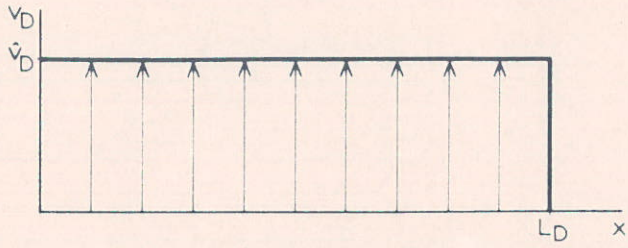
W 252

FIG. 2

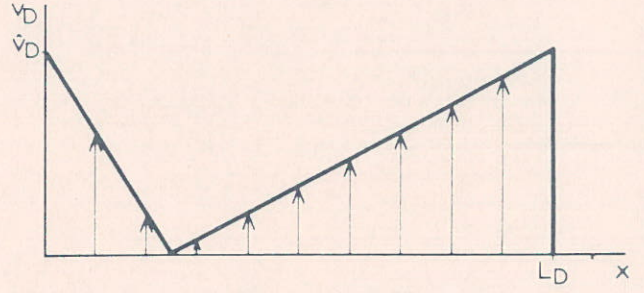


KARAKTERISTIEKE VAARBAAN BIJ DWARSSTROOM

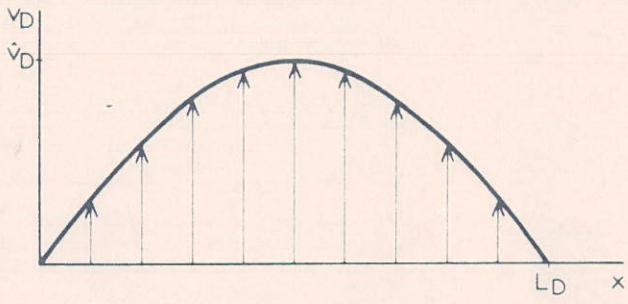




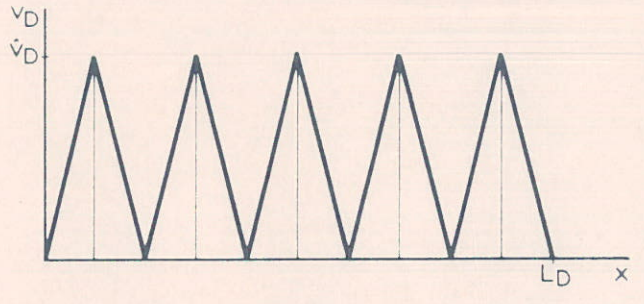
UNIFORM



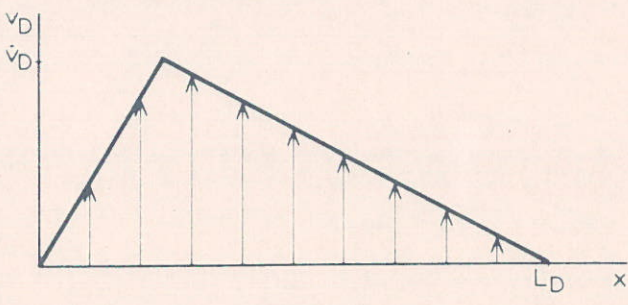
DRC (0,25)



SIN 1



DRT (5)



DR (0,25)

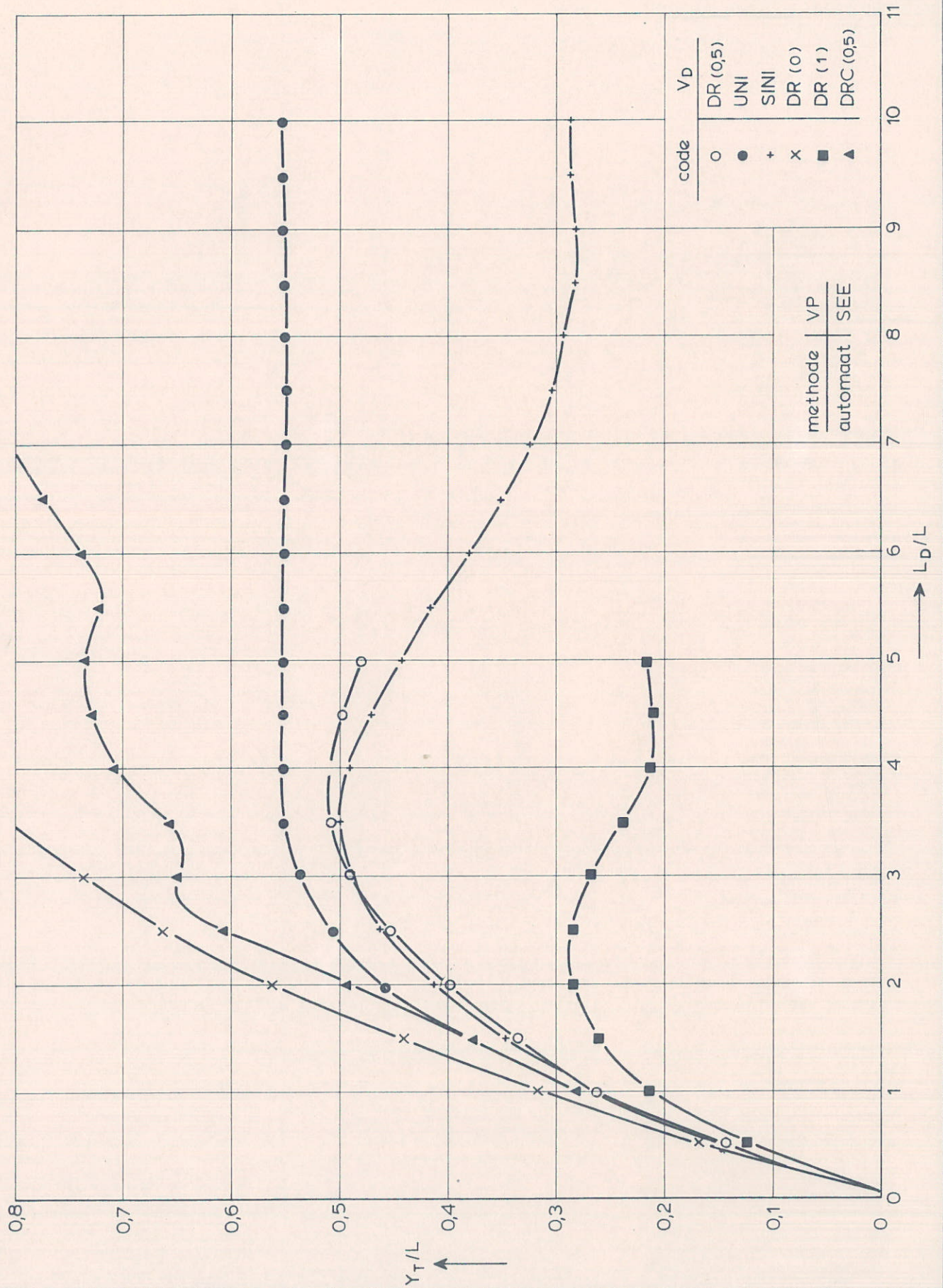
DWARSSTROOMPROFIELEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W 252

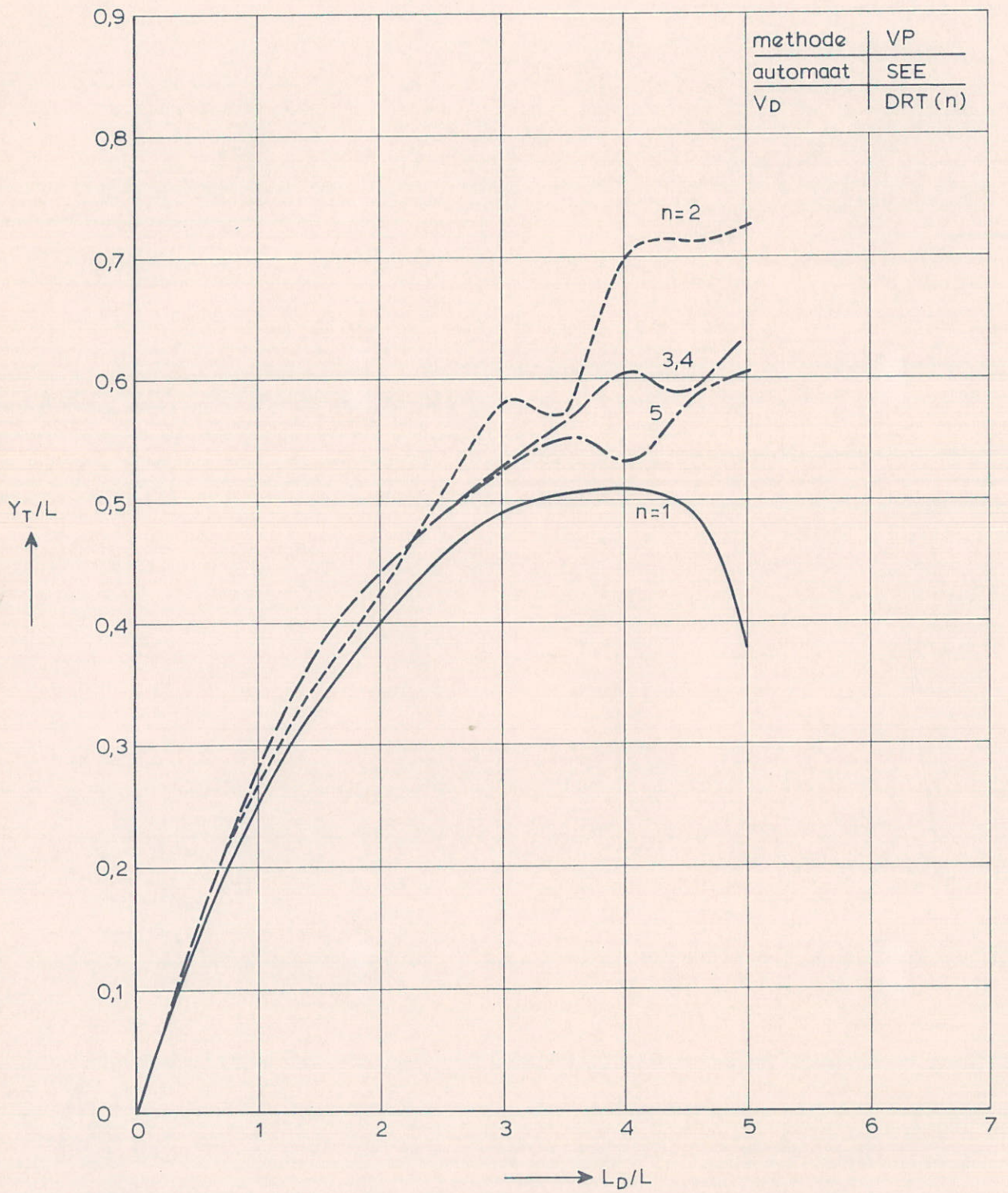
FIG.4





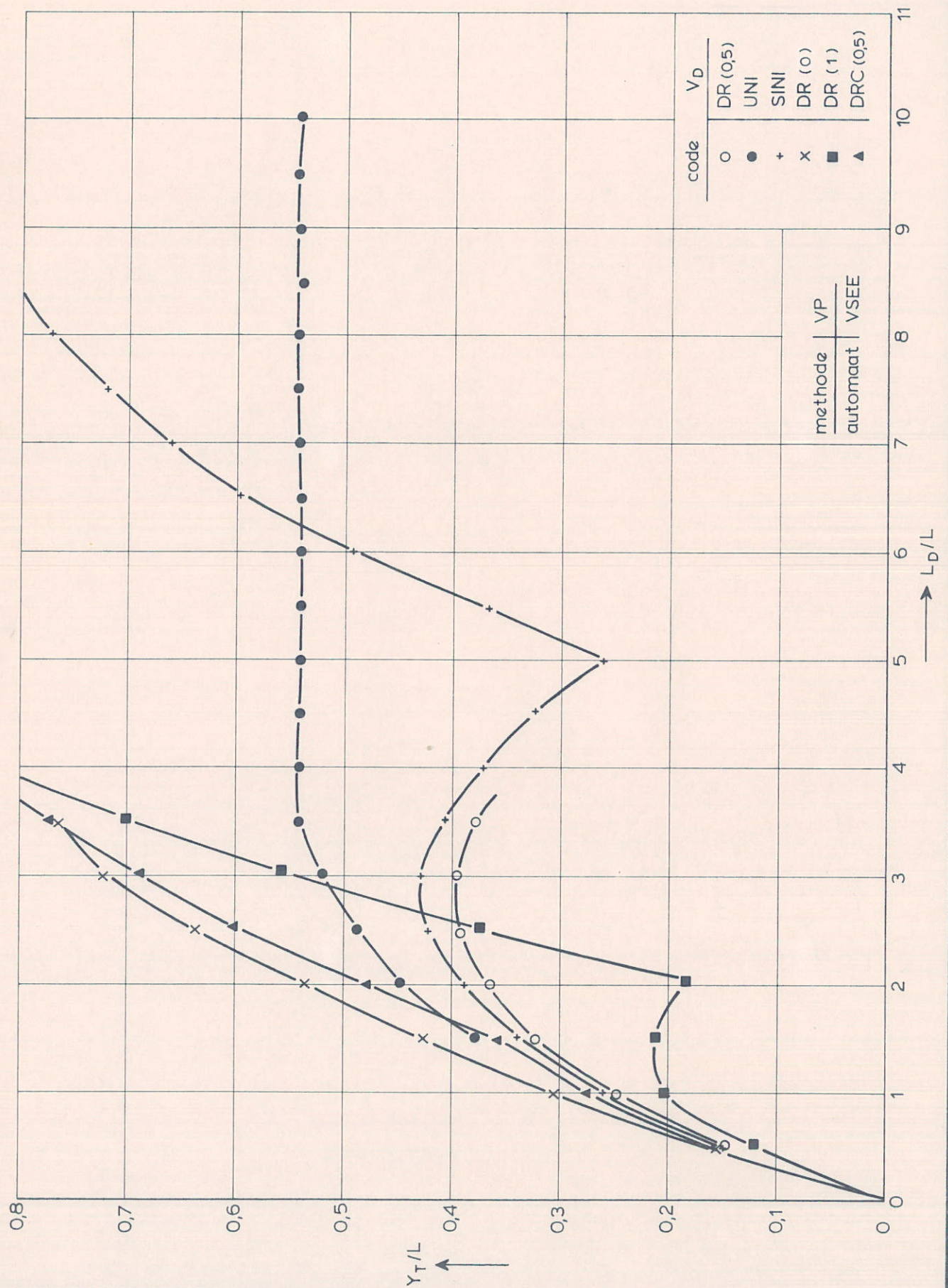
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





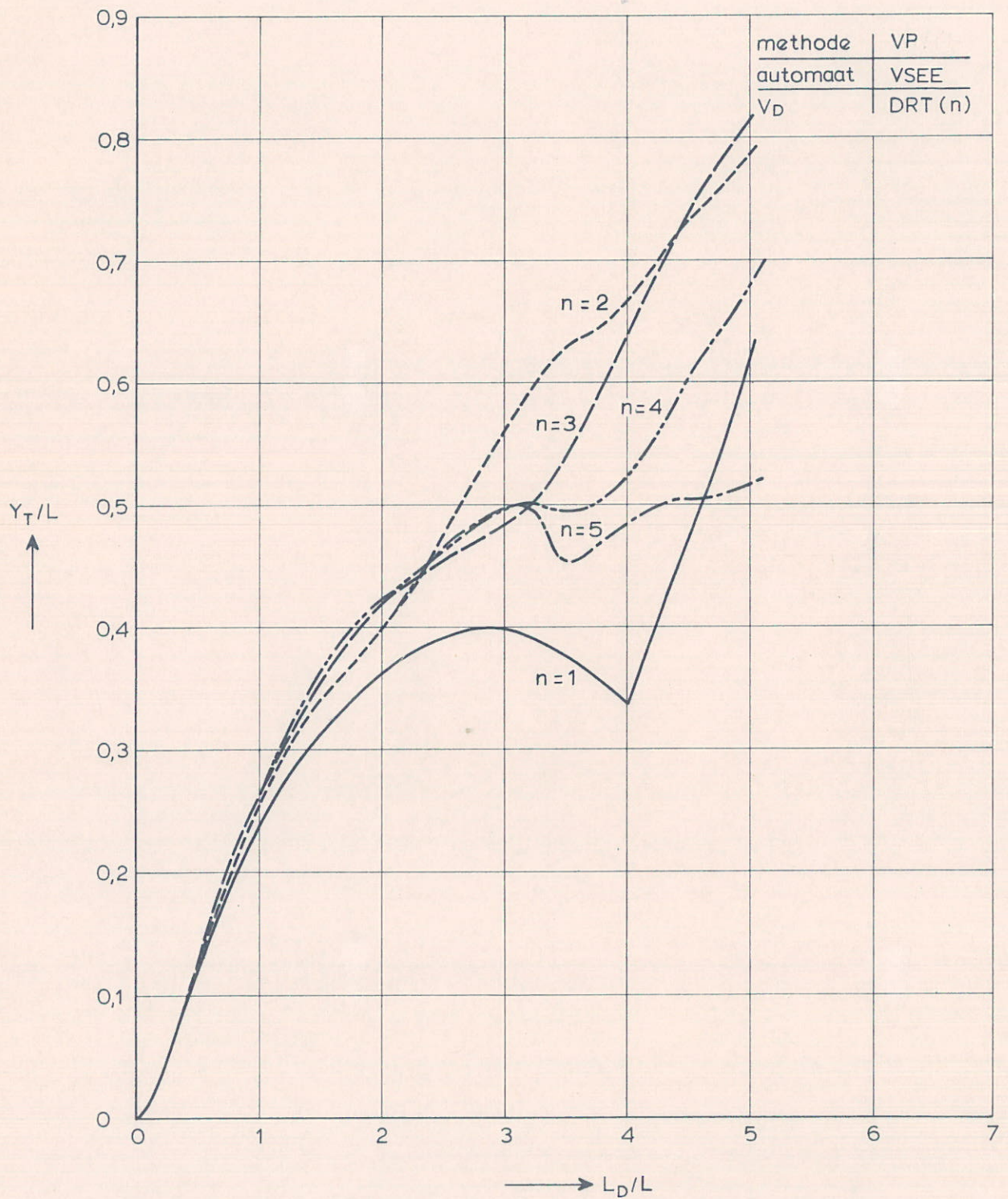
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





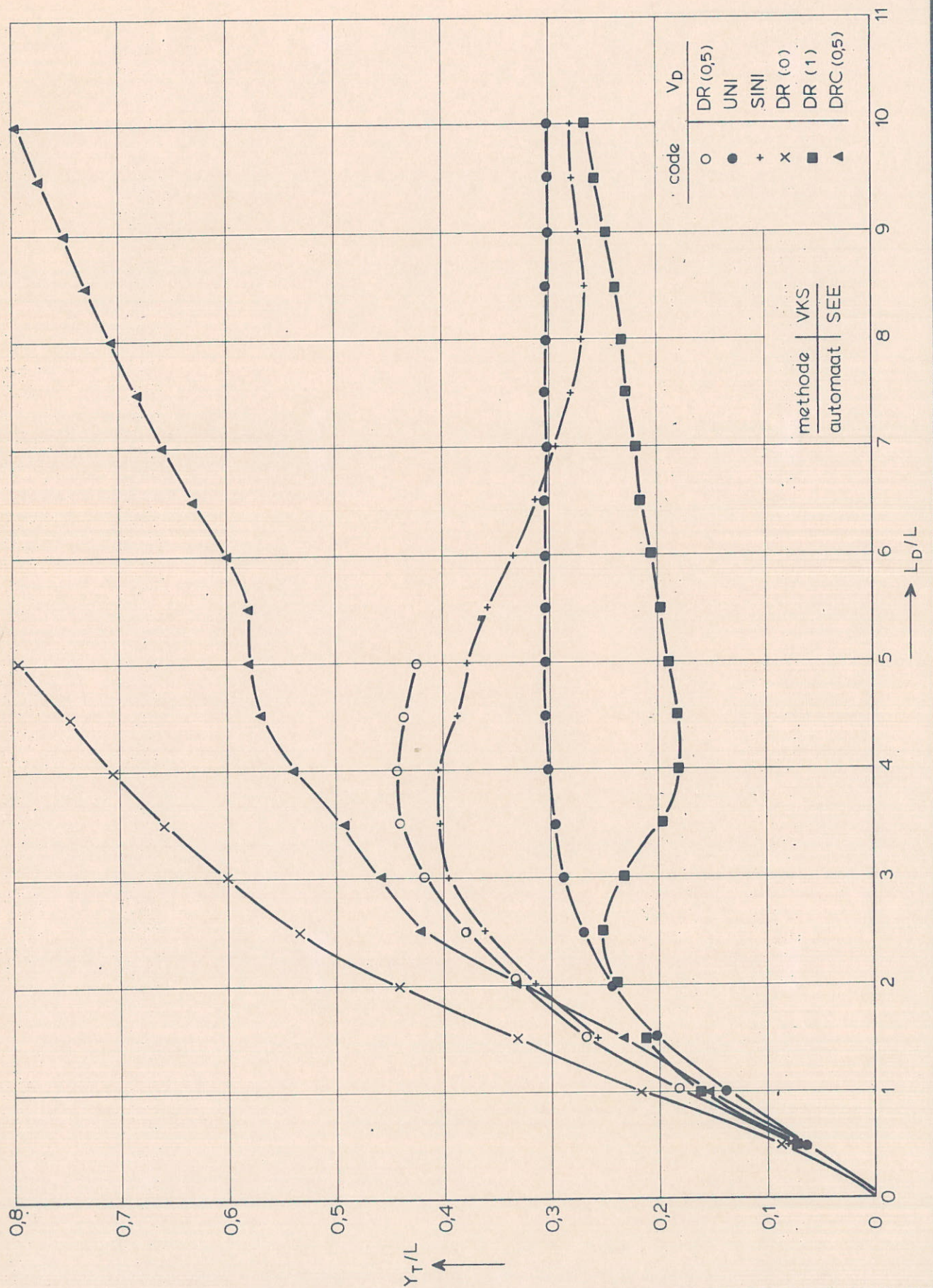
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





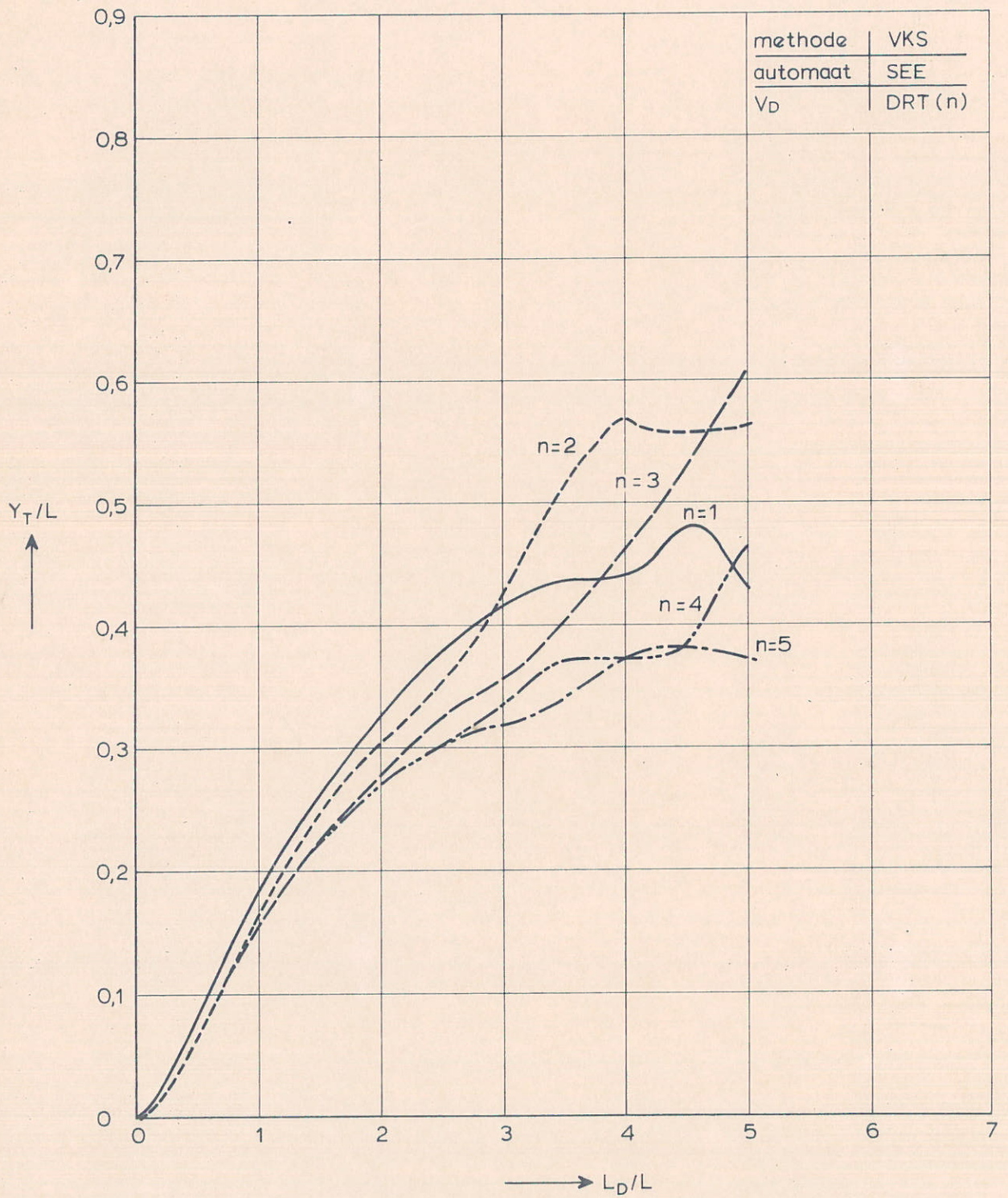
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





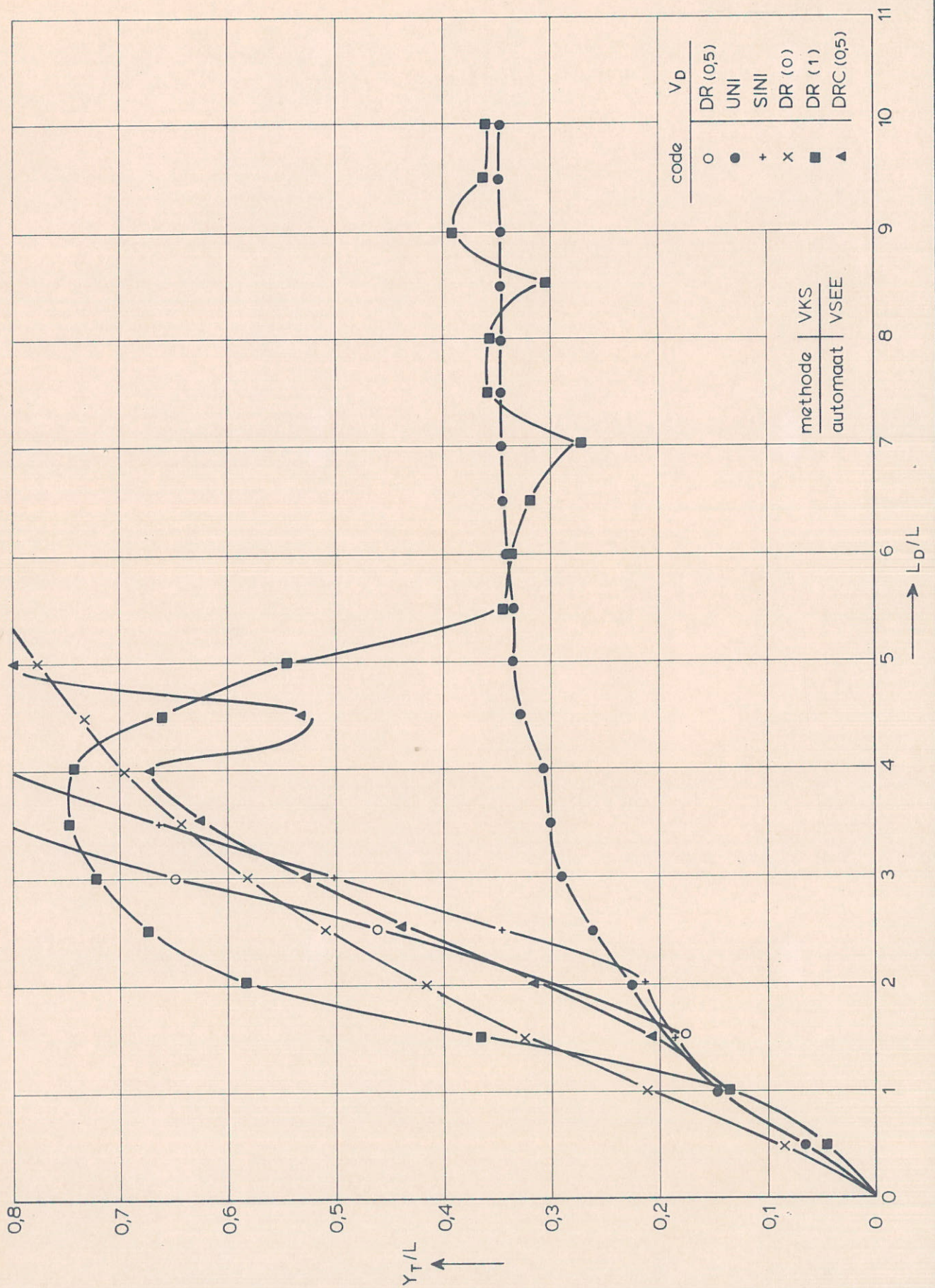
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





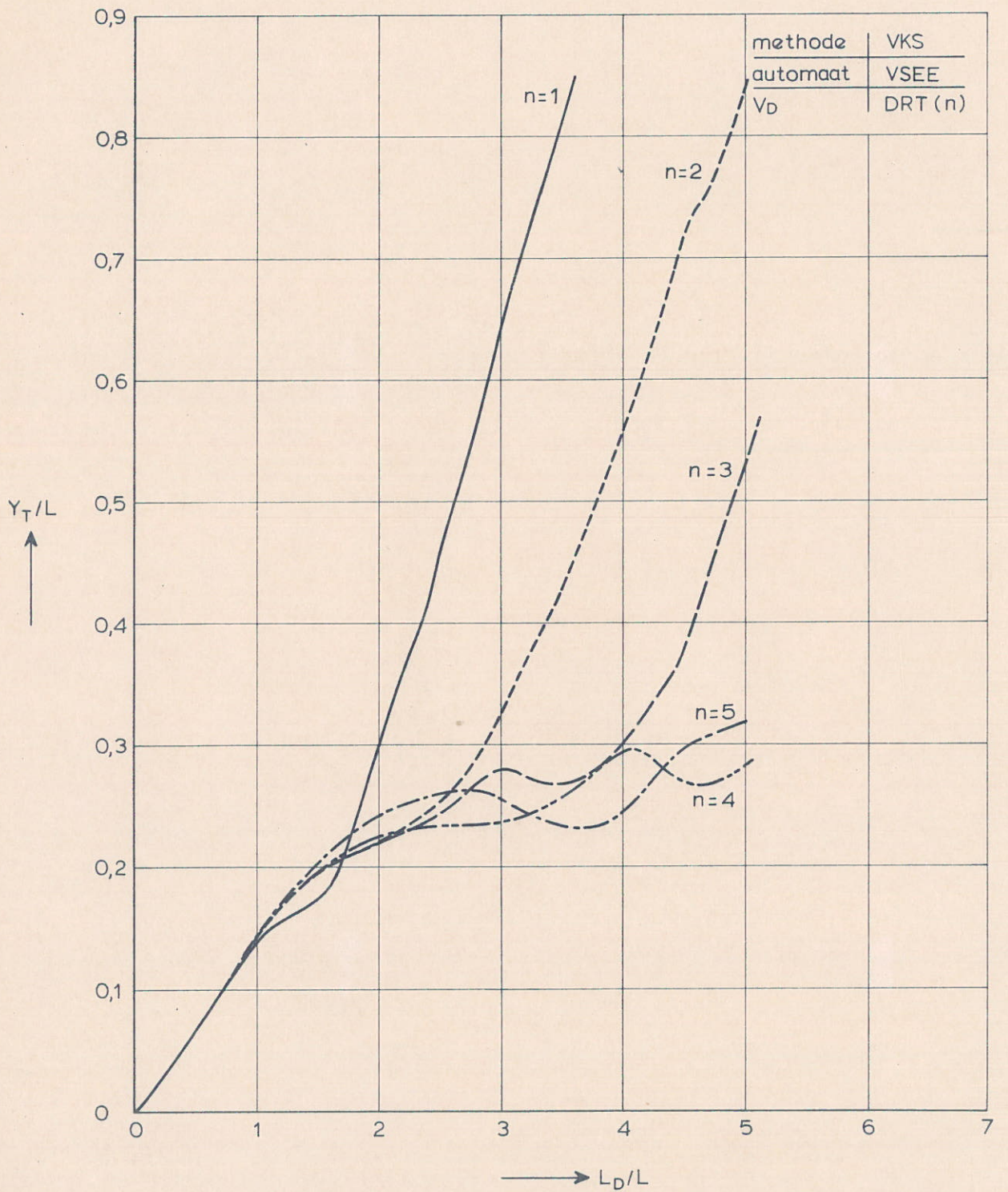
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





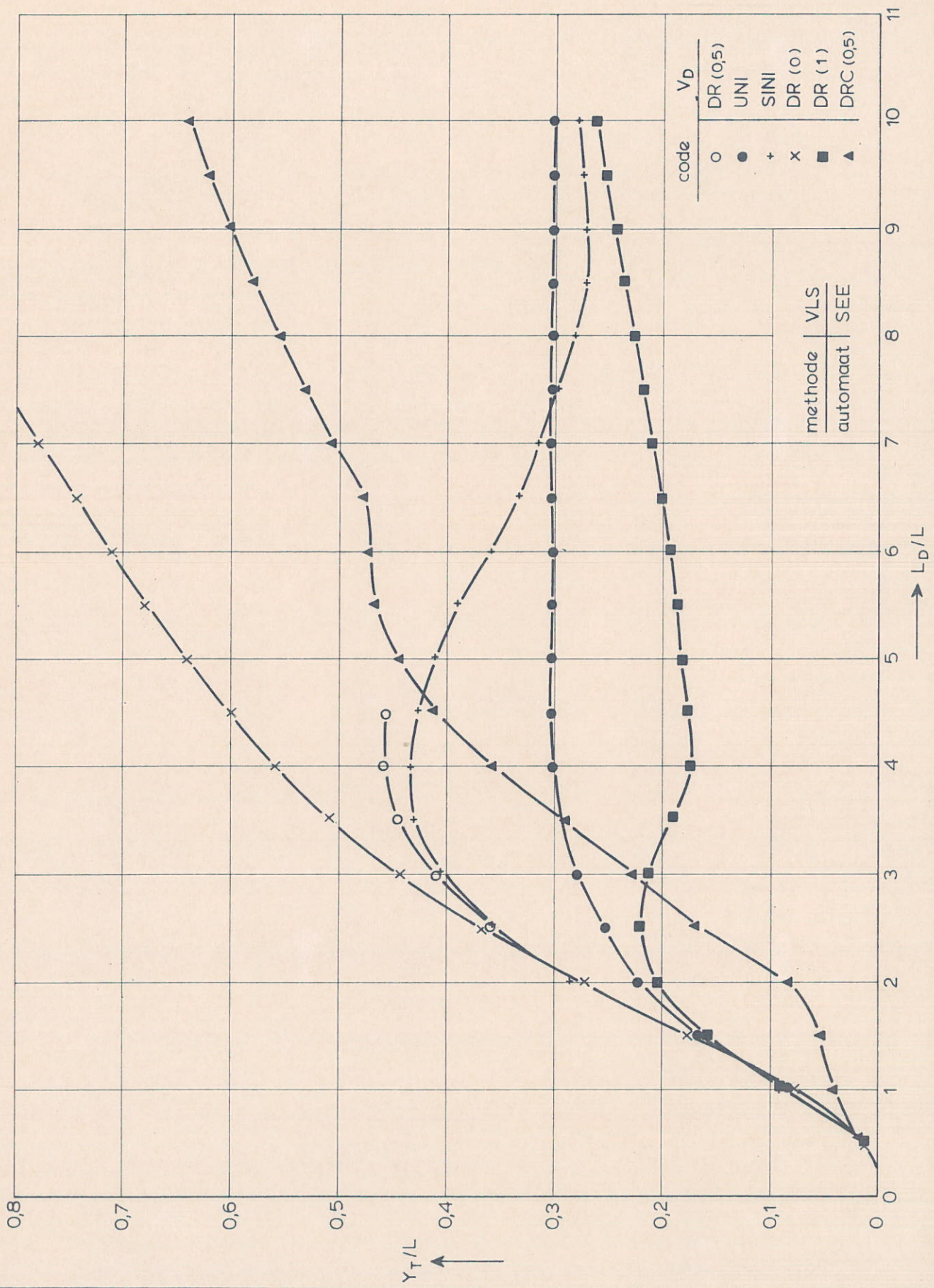
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





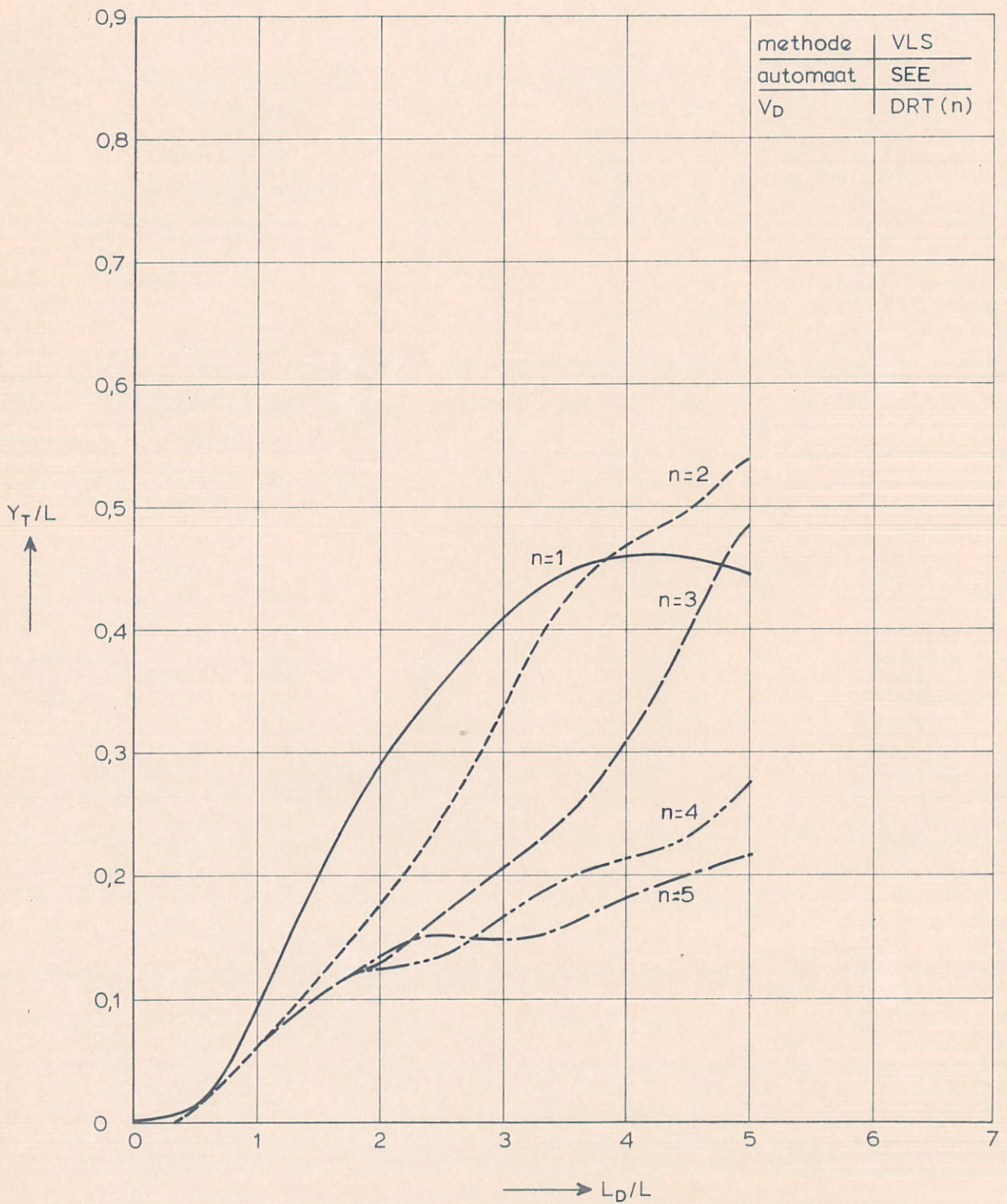
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





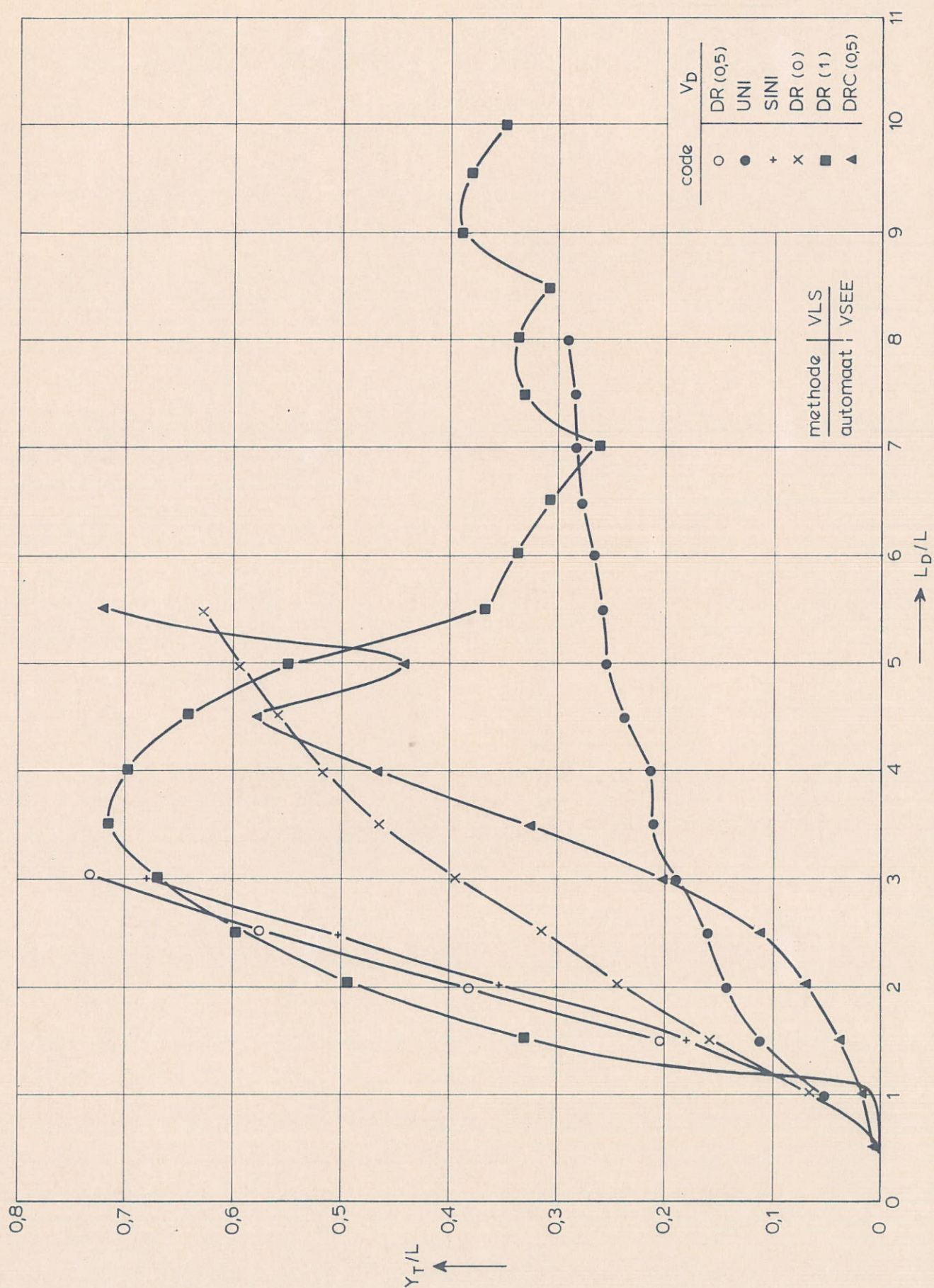
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





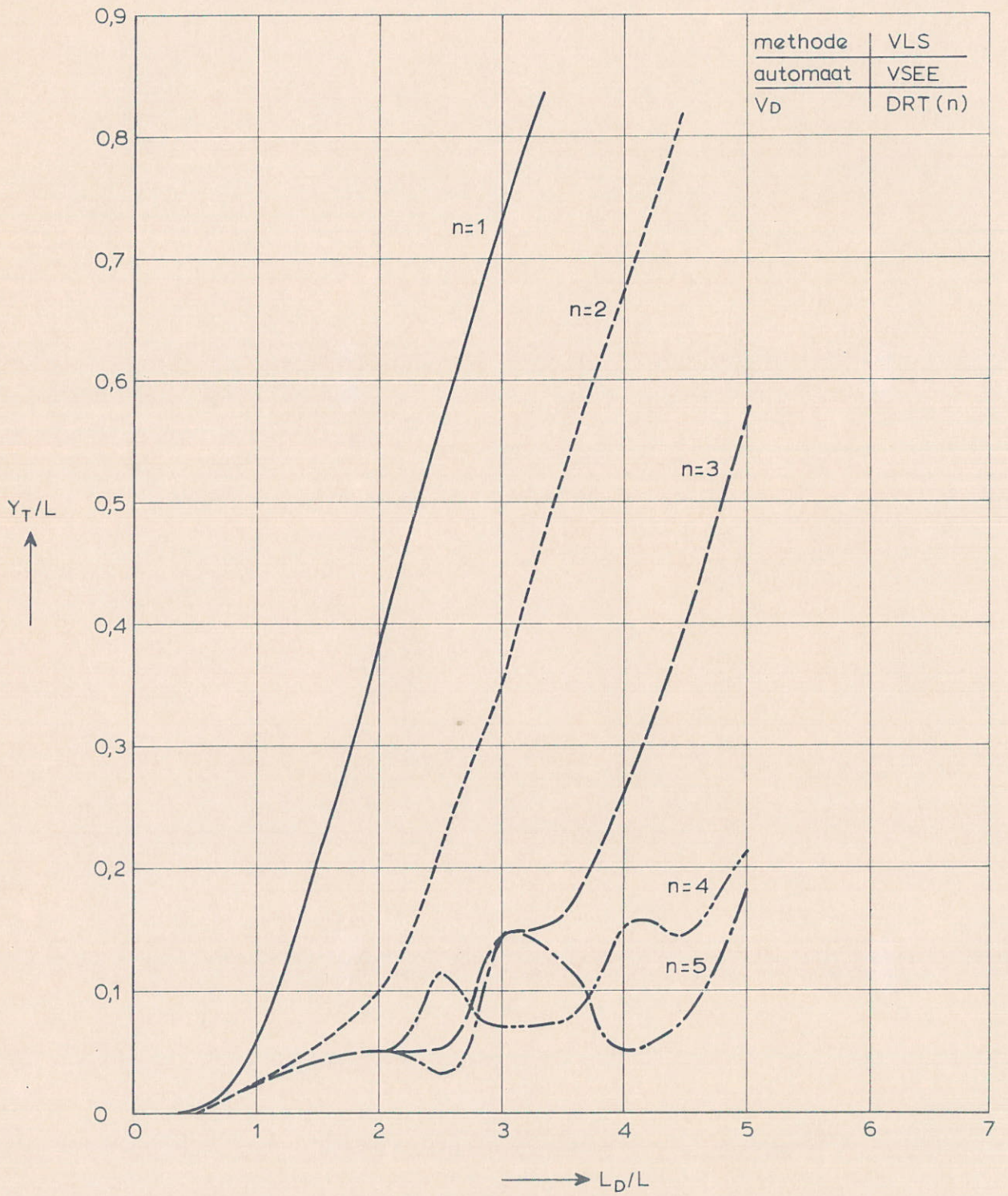
MAXIMALE UITWIJKING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





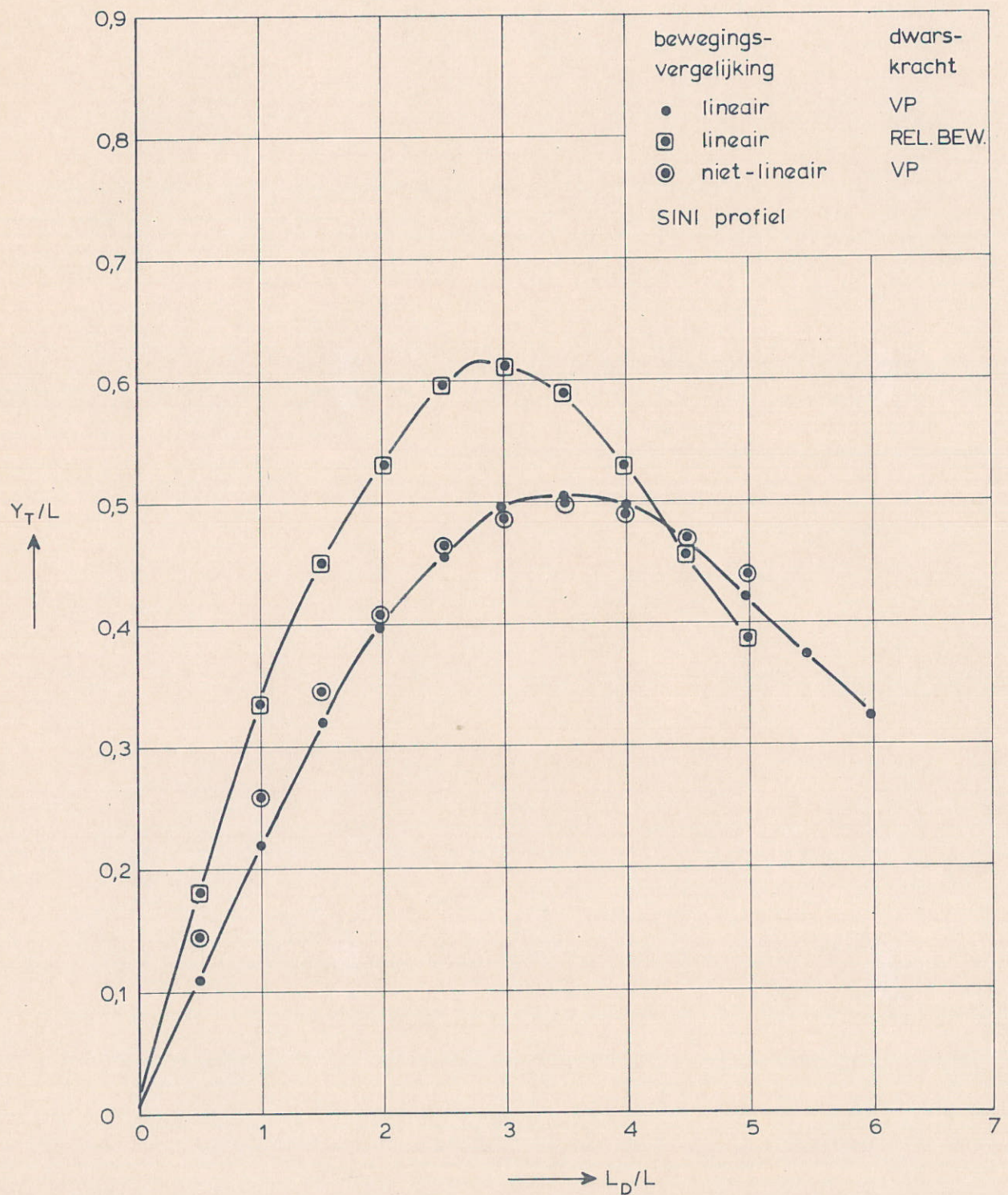
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





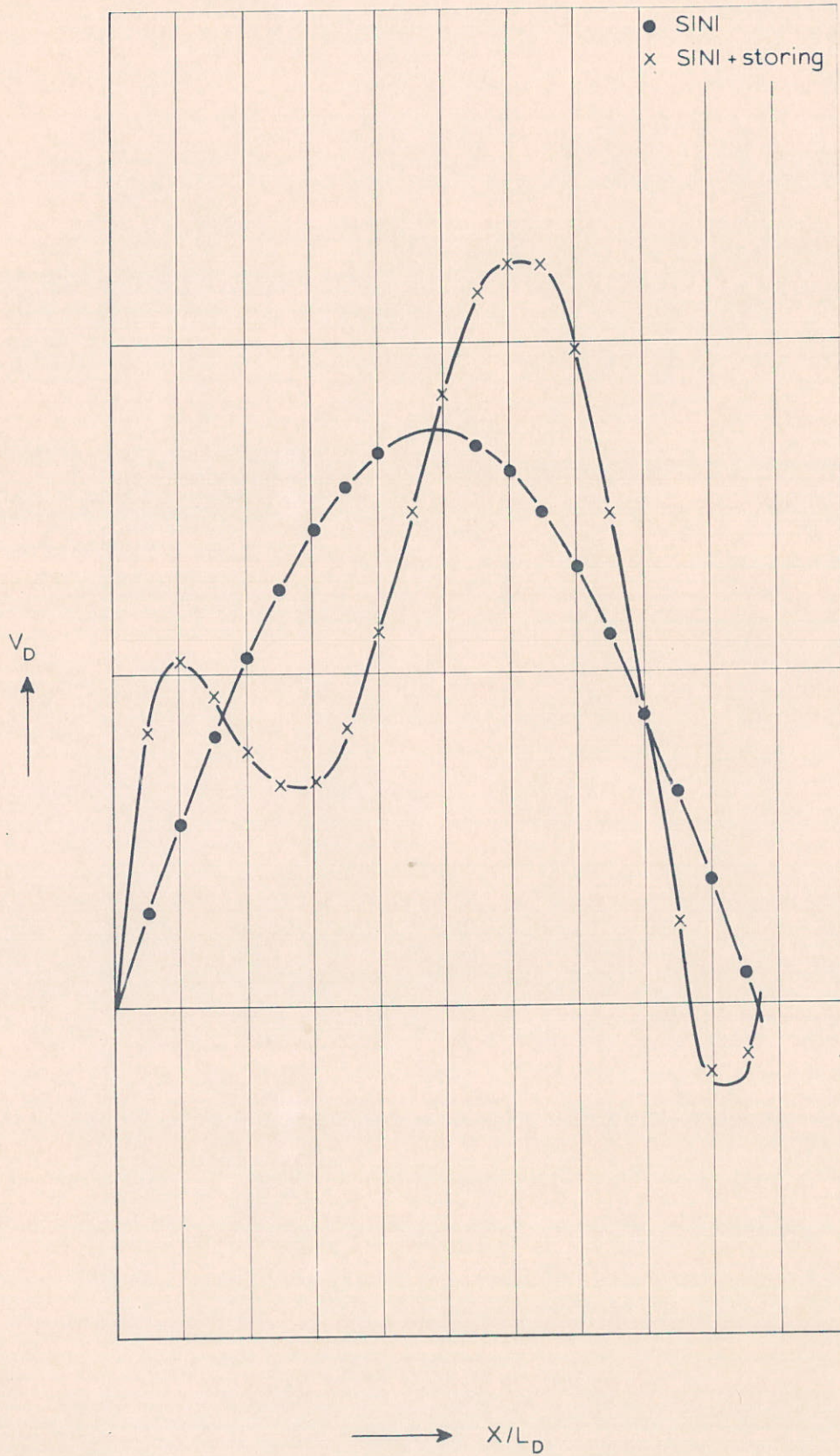
MAXIMALE UITWIJING UIT DE  
GEWENSTE VAARBAAN





BEPALING VAN DE MAXIMALE UITWIJKING  
VOLGENS DRIE METHODEN





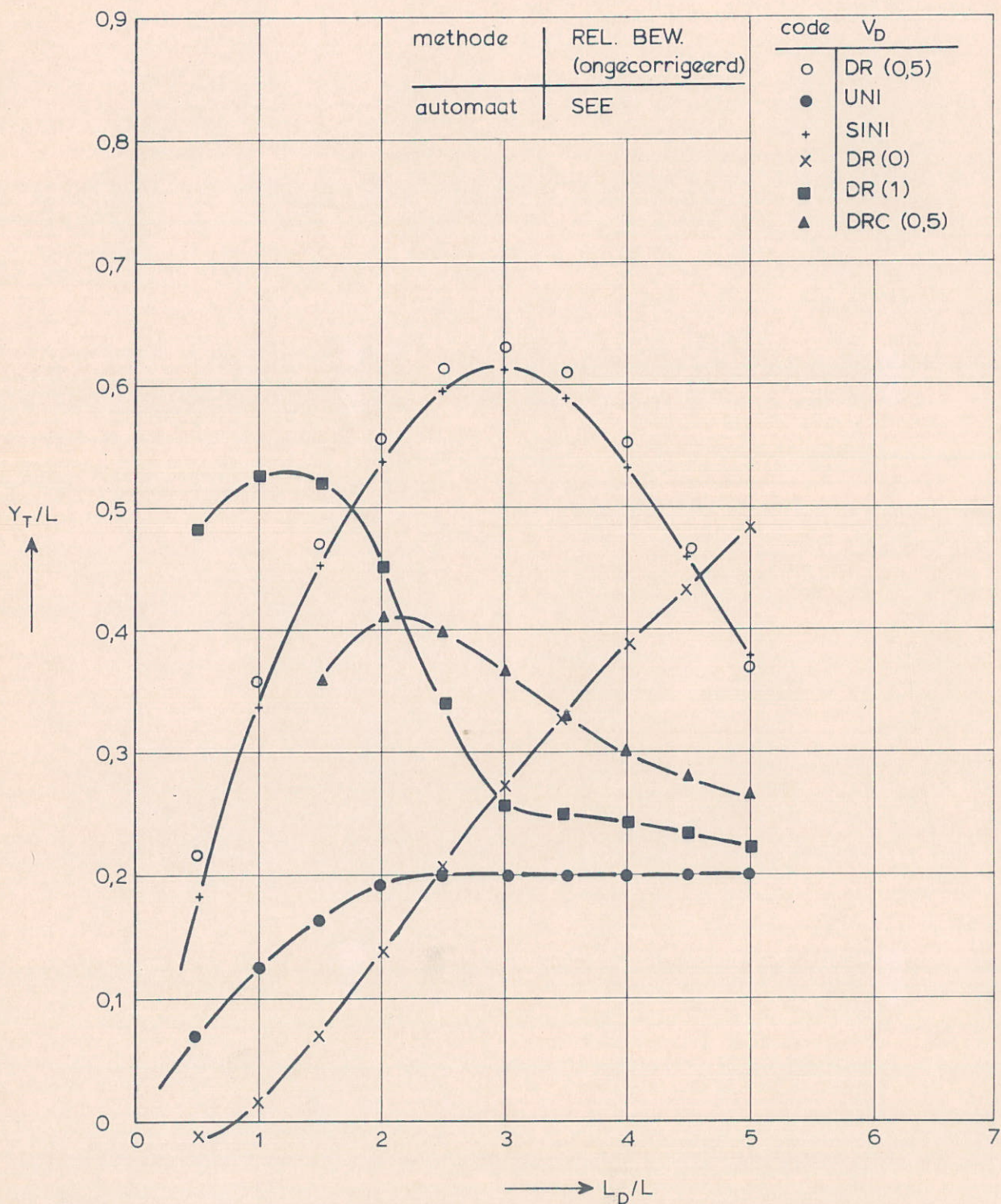
STROOMVERDELING VAN EEN DWARSSTROOM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W 252

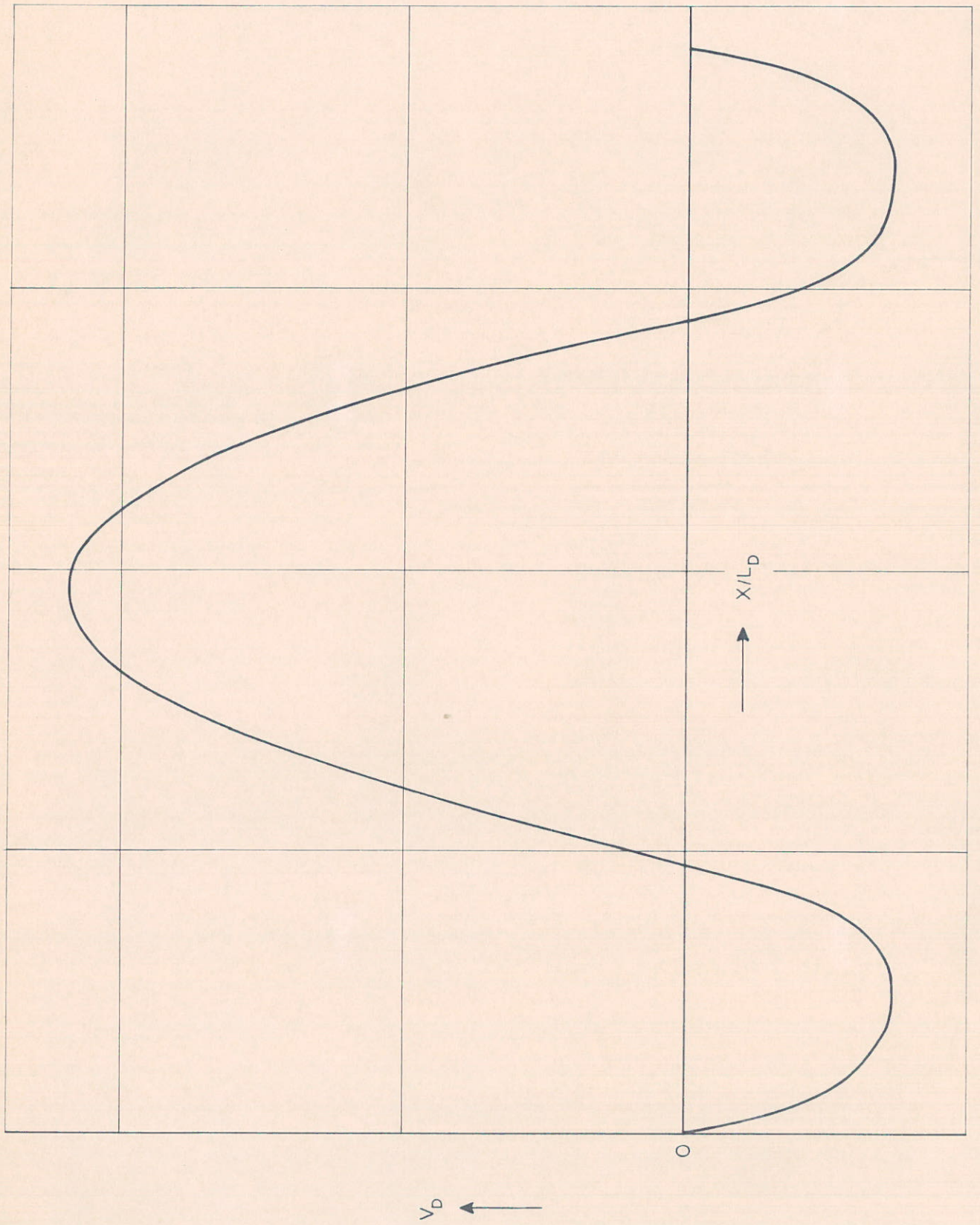
FIG. 18





MAXIMALE UITWIJ KING BEPAALD MET DE RELATIEVE  
BEWEGINGSHYPOTHESE (ONGECORRIGEERD)





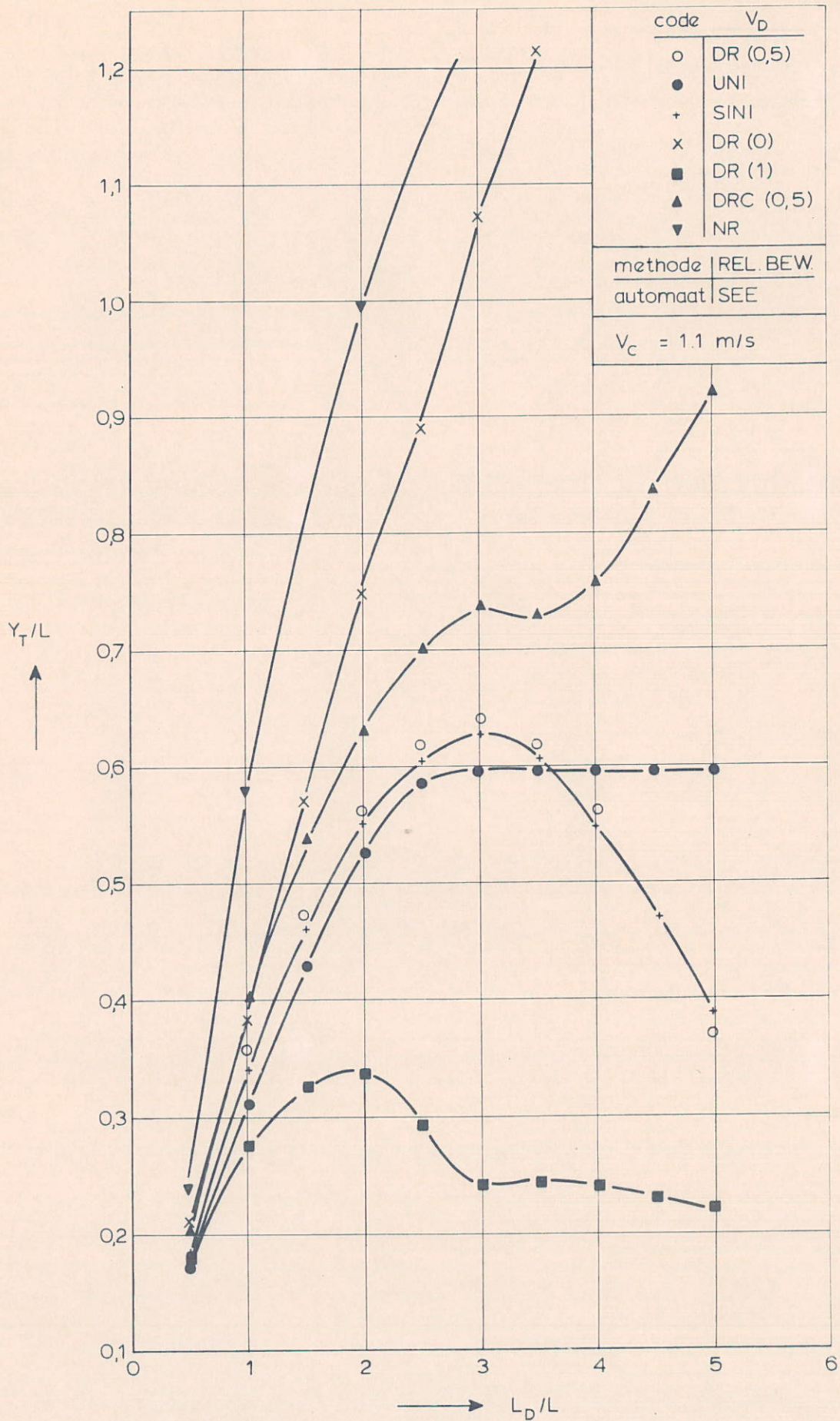
STROOMVERDELING VAN EEN DWARSSTROOM  
 MET TERUGSTROMING (N R)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

W 252

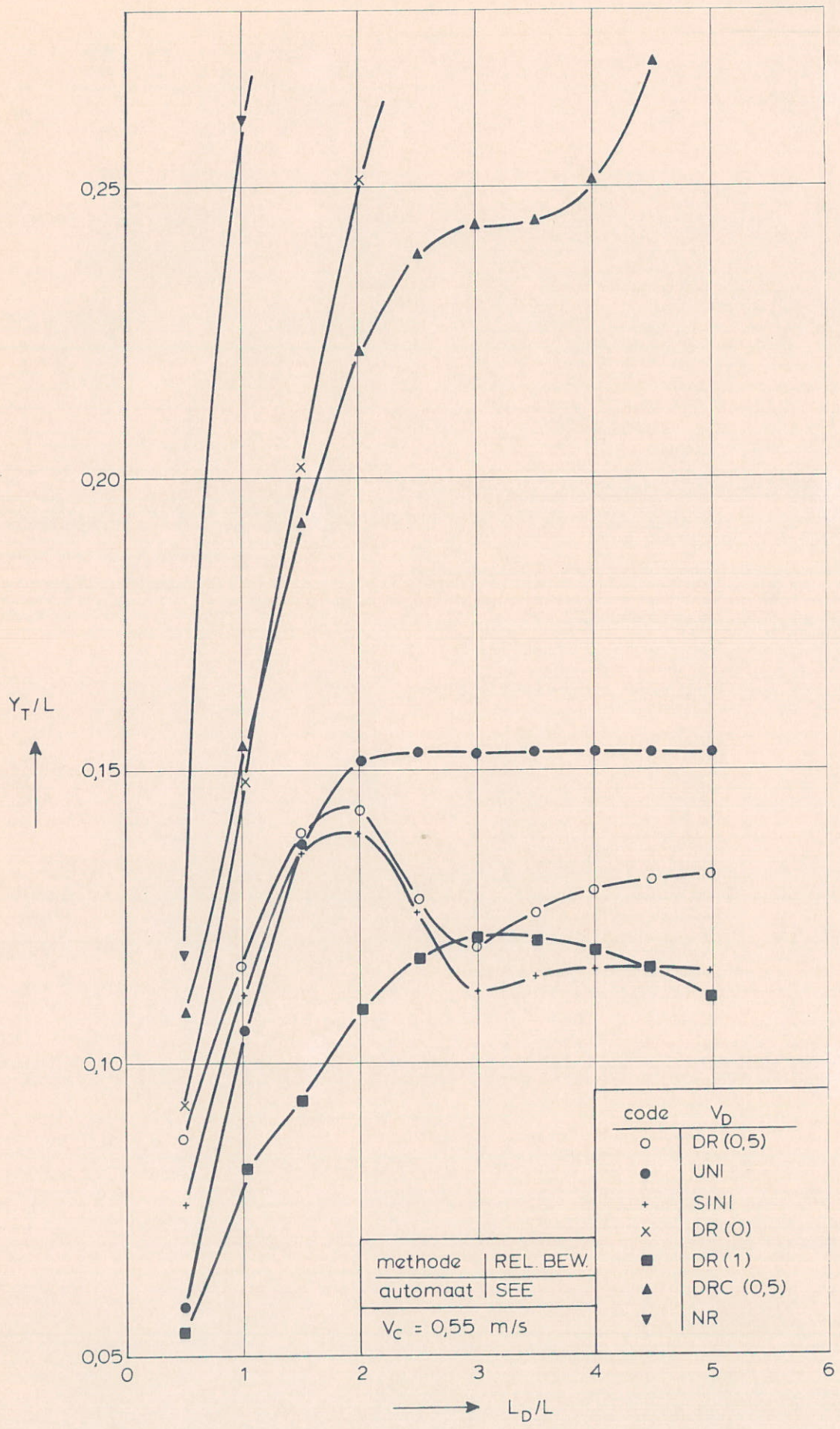
FIG. 20





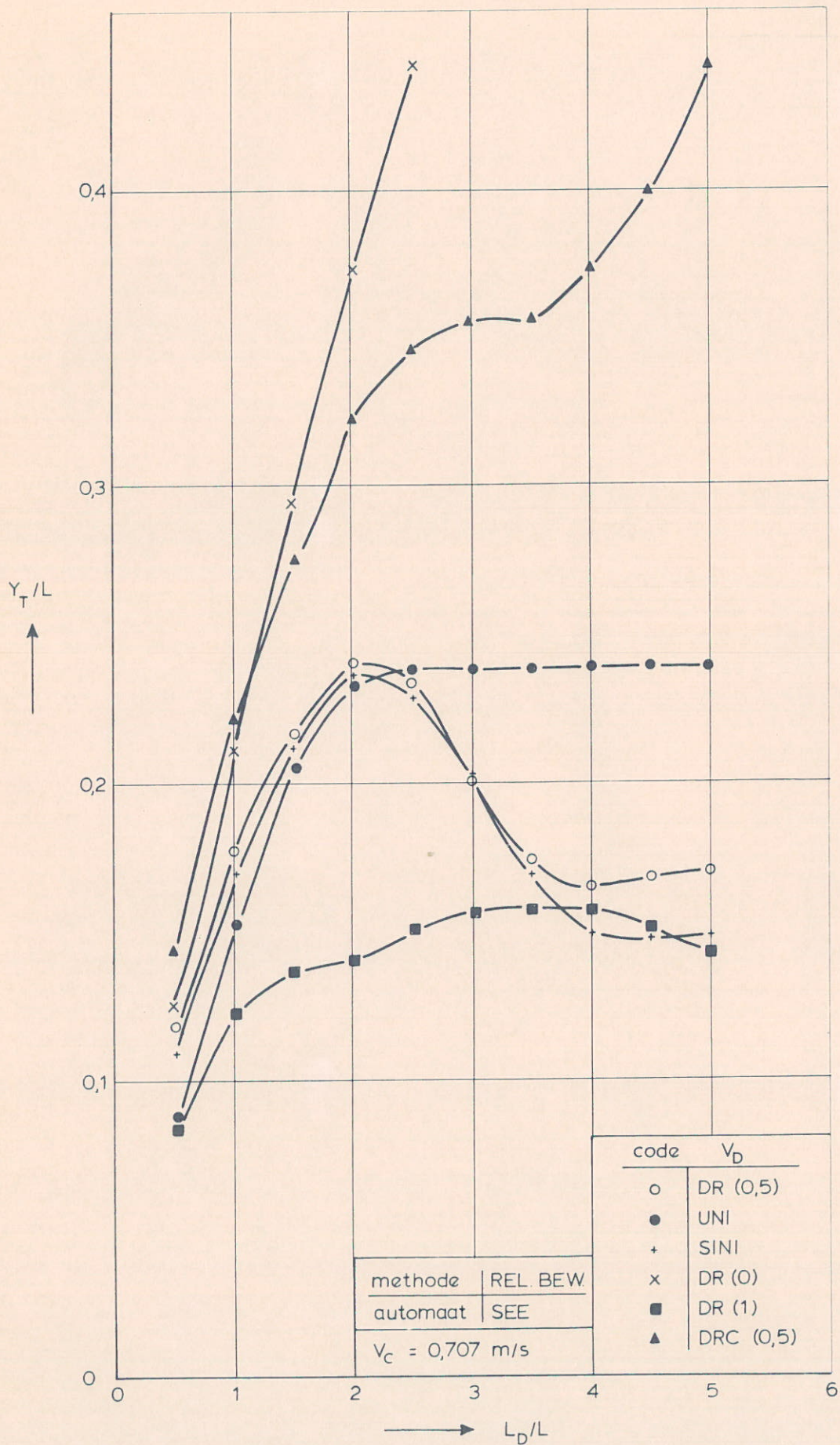
MAXIMALE UITWIJKING BEPAALD MET DE  
RELATIEVE BEWEGINGSHYPOTHESE





MAXIMALE UITWIJKING BEPAALD MET DE  
RELATIEVE BEWEGINGSHYPOTHESE





MAXIMALE UITWIJING BEPAALD MET DE  
RELATIEVE BEWEGINGSHYPOTHESE



p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands