

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

verificatie van numeriek 2 D (vertikaal) – model
DISTRO aan getijgootmetingen

verslag wiskundig onderzoek

M 896 – 45 (R 897 – VIII)

mei 1981

verificatie van numeriek 2 D (vertikaal) – model
DISTRO aan getijgootmetingen

verslag wiskundig onderzoek

M 896 – 45 (R 897 – VIII)

mei 1981

INHOUD

Lijst van symbolen

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

	blz.
<u>1</u> <u>Inleiding</u>	1
<u>2</u> <u>Overzicht van getijgootmetingen</u>	2
2.1 Beschrijving getijgoot.....	2
2.2 Beschikbare metingen.....	2
2.3 Meetnauwkeurigheid.....	4
<u>3</u> <u>Beschrijving van het wiskundig model</u>	5
3.1 Basisvergelijkingen.....	5
3.2 Randkondities.....	6
3.3 Turbulentiemodellering.....	8
3.4 Numerieke benadering.....	9
<u>4</u> <u>IJking van DISTRO</u>	10
4.1 Algemeen.....	10
4.2 IJking aan de homogene proef T22.....	10
4.3 IJking aan de zout/zoetproef T20.....	13
<u>5</u> <u>Verifikatie van DISTRO</u>	18
5.1 Algemeen.....	18
5.2 Verifikatie aan homogene proeven.....	19
5.2.1 Proef T12.....	19
5.2.2 Proef T32.....	19
5.2.3 Konklusies.....	20
5.3 Verifikatie aan zout/zoetproeven.....	20
5.3.1 Proef T10.....	20
5.3.2 Proef T31.....	22
5.3.3 Proef T30.....	24
5.3.4 Konklusies.....	26

INHOUD (vervolg)

6 Samenvatting..... 29

APPENDIX

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

Lijst van symbolen

<u>Symbool</u>	<u>Verklaring</u>	<u>dimensie</u>
a	amplitude vertikaal getij	m
a ₀	amplitude vertikaal getij in de mond	m
A ₀	amplitude 0 ^{de} Fourier-komponent vertikaal getij; middenstand	m
A ₁	amplitude 1 ^e Fourier-komponent vertikaal getij;	m
$\Delta A_0, \Delta A_1$	norm voor 0 ^{de} en 1 ^e Fourier-komponent	m
b	breedte	
B ₀	amplitude 0 ^{de} Fourier-komponent horizontaal getij; rivierdebiet	m ³ s ⁻¹
B ₁	amplitude 1 ^e Fourier-komponent horizontaal getij;	m ³ s ⁻¹
c	koncentratie	kgm ⁻³
c _{max}	koncentratie van water uit zeebassin	kgm ⁻³
C	Chézy-waarde	m ^{1/2} s ⁻¹
D _x	longitudinale diffusiecoëfficiënt	m ² s ⁻¹
D _z	vertikale diffusiecoëfficiënt	m ² s ⁻¹
F	dempingsfunctie voor verticale impulsuitwisseling	-
G	dempingsfunctie voor verticale massa-uitwisseling	-
g	gravitatieversnelling	ms ⁻²
H	totale waterdiepte	m
k _s	ekwivalente zandruwheid	m
L	fiktieve gootlengte (fig. 1)	m
L'	fysische gootlengte (fig. 1)	m
l _m	mengeweglengte	m
N _x	aantal rekenstappen in x-richting	-
N _z	aantal rekenstappen in z-richting	-
N _t	aantal rekenstappen in de tijd	-
P	druk	kgm ⁻¹ s ⁻²
P _s	druk aan wateroppervlak	kgm ⁻¹ s ⁻²
Q	debiet	m ³ s ⁻¹
Q _r	rivierdebiet	m ³ s ⁻¹
R	hydraulische straal	m
R _i	gradiënt Richardson-getal	-
t	tijd	s
T	getijperiode	s

Lijst van symbolen (vervolg)

<u>Symbool</u>	<u>Verklaring</u>	<u>dimensie</u>
T_x	turbulent massatransport in x-richting	$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
T_z	turbulent massatransport in z-richting	$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
u	snelheid in x-richting	ms^{-1}
u^*	schuifspanningssnelheid = $\sqrt{g/C^2} \times u$	ms^{-1}
w	vertikale snelheid	ms^{-1}
x	longitudinale coördinaat	m
Δx	onderlinge afstand meetstations	m
z	vertikale coördinaat	m
Δz	onderlinge afstand meetpunten in een vertikaal	m
z_0	ruwheidshoogte	m
z_b	plaats bodem	m
ϵ_x	longitudinale turbulente viscositeit	m^2s^{-1}
ϵ_z	vertikale turbulente viscositeit	m^2s^{-1}
η	waterstand ten opzichte van referentieniveau	m
κ	konstante van Von Karman	-
ρ	dichtheid	kgm^{-3}
ρ_0	dichtheid rivierwater	kgm^{-3}
$\Delta\rho$	dichtheidsverschil	kgm^{-3}
σ_1	standaarddeviatie in i	-
τ_v	rekentijdstap voor berekening van de getijbeweging	s
τ_D	rekentijdstap voor berekening van de zoutverdeling	s
τ_{xx}	turbulent impulstransport in x-richting	$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$
τ_{xz}	turbulent impulstransport in z-richting	$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$

~ boven grootheid: middelen over getijperiode

LWK	laagwaterkentering
MVS	maximale vloedstroom
HWK	hoogwaterkentering
MES	maximale ebstroom
1D	ééndimensionaal
2D	tweedimensionaal (x- en z-coördinaat)

Lijst van tabellen

- 1a. Gegevens referentieproef T10
- b. Proevenprogramma
- c. Bovenstroomse randkonditie
2. Overzicht van de berekeningen met waarden van de gebruikte parameters
3. Fourier-komponenten van het horizontale getij
4. Tendensen uit verificatie-onderzoek (in tekst par. 5.3.4)

Lijst van figuren

1. Overzicht van de getijgoot met notaties
2. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x ; Vergelijking getijgoot - DISTRO; proef T22
3. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T22
- 4-5. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T22
6. Vergelijking gemeten en berekende debietcurve; T22
7. Vergelijking gemeten en berekende 1D-koncentratieverdeling; T22
8. Invloed gelaagdheid op verticale uitwisseling; Dampingsfuncties $F(R_i)$ en $G(R_i)$
9. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x ; Vergelijking getijgoot - 2 DISTRO-berekeningen; T20
10. Vergelijking gemeten en 2 berekende 2D-dichtheidsverdelingen; T20
11. Vergelijking 1 gemeten en 2 berekende 1D-koncentratieverdelingen; T20
12. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T20
- 13-14. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T20
15. Vergelijking gemeten en berekende debietcurven; T20
16. Vergelijking gemeten en berekende dichtheidsverdeling in station 1 rond LWK; T20
17. Vergelijking gemeten en berekende 2D-dichtheidsverdeling; T20
18. Vergelijking gemeten en berekende 1D-koncentratieverdeling; T20
19. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x ; Vergelijking getijgoot - DISTRO; T12
20. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T12
- 21-22. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T12
23. Vergelijking gemeten en berekende debietcurven; T12
24. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x ; Vergelijking getijgoot - DISTRO; proef T32
25. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T32
- 26-27. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T32
28. Vergelijking gemeten en berekende debietcurven; T32
29. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x ; vergelijking getijgoot - DISTRO; T10
30. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T10
- 31-32. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T10
33. Vergelijking gemeten en berekende debietcurven; T10

Lijst van figuren (vervolg)

34. Vergelijking gemeten en berekende dichtheidsverdeling in station 1 rond LWK; T10
35. Vergelijking gemeten en berekende 2D-dichtheidsverdeling; T10
36. Vergelijking gemeten en berekende 1D-koncentratieverdeling; T10
37. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x; Vergelijking getijgoot - DISTRO; T31
38. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T31
- 39-40. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T31
41. Vergelijking gemeten en berekende debietcurven; T31
42. Vergelijking gemeten en berekende dichtheidsverdeling in station 1 rond LWK; T31
43. Vergelijking gemeten en berekende 2D-dichtheidsverdeling; T31
44. Vergelijking gemeten en berekende 1D-koncentratieverdeling; T31
45. Verloop Fourier-komponenten vertikaal getij met x; Vergelijking getijgoot - DISTRO; T30
46. Vergelijking gemeten en berekend vertikaal getij; T30
- 47-48. Vergelijking gemeten en berekende snelheidsprofielen; T30
49. Vergelijking gemeten en berekende debietcurven; T30
50. Vergelijking gemeten en berekende dichtheidsverdeling in station 1 rond LWK; T30
51. Vergelijking gemeten en berekende 2D-dichtheidsverdeling; T30
52. Vergelijking gemeten en berekende 1D-koncentratieverdeling; T30

1 Inleiding

In het kader van het Toegepast Onderzoek Waterstaat op het gebied van stromingen en transportverschijnselen is het tweedimensionaal (voortaan aan te duiden met 2D) numeriek zoutindringingsmodel DISTRO ontwikkeld. In dit 2D-model (met één horizontale en één verticale ruimtedimensie) kan de invloed van dichtheidsverschillen op de waterbeweging en op de verticale impuls- en massa-uitwisseling in rekening gebracht worden [7, 8].

Om de toepasbaarheid van dit 2D-model te toetsen wordt de getijgoot gebruikt als prototype van een homogene en inhomogene getijrivier. In de getijgoot is de getijbeweging en de concentratieverdeling reproduceerbaar instelbaar bij gegeven randkondities en gootparameters, terwijl daarnaast de goot systematisch doorgemeten kan worden. In de rechte goot met rechthoekige dwarsdoorsnede en bodemplaatjes als ruwheidselementen is de stroming in eerste benadering tweedimensionaal; bij nader inzien blijkt de snelheidsverdeling vanwege wandinvloeden (breedte-diepteverhouding ≈ 3) vooral bij de wanden 3D-aspekten te vertonen.

De in de getijgoot voor dit onderzoek uitgevoerde metingen en de daarbij behorende analyse van deze metingen hadden volgens bovenstaande tot doel betrouwbaar en eénuddig meetmateriaal te leveren voor de ijking en toetsing van het 2D-model. Het proevenprogramma van dit onderzoek is zodanig samengesteld dat bij elke keuze van de grootte van randkondities en gootparameters een rhodamineproef (geen dichtheidseffekten) en een zout/zoetproef uitgevoerd is. De homogene proeven zijn in rapport M 896-38A [11] uitvoerig weergegeven. De ijking van het 2D-model aan de homogene proef T22 is in rapport R 897-V [3] beschreven. De zout/zoetproeven zijn in rapport M 896-38B [12] weergegeven, terwijl de ijking van het 2D-model aan de zout/zoetproef T20 in de rapporten R 897-VI [4] en R 897-VII [5] beschreven is.

In dit rapport is weergegeven in hoeverre het geijkte 2D-model geschikt is om de getijbeweging en de zoutverdeling (alleen voor de zout/zoetproeven) te voorspellen bij verandering van de randkondities.

Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het getijgootonderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde. Het onderzoek is uitgevoerd door ir. P.A.J. Perrels en drs. M Karelse, welke laatste dit verslag samenstelde.

2 Overzicht van getijgootmetingen

2.1 Beschrijving getijgoot

De zogenaamde verifikatieproeven (zie M 896-38 [11] en [12]) zijn uitgevoerd in de getijgoot. De getijgoot heeft een lengte van 101,5 m en een rechthoekige dwarsdoorsnede (0,67 m breed en 0,50 m diep). De bodem van de goot ligt horizontaal. De goot is aan het benedenstroomse einde verbonden met een zeebassin van $6 * 8 * 1,5$ m. Het verticale getij op zee wordt geregeld met een regelklep. Aan het bovenstroomse einde van de goot kan een met de tijd variërend debiet (d.m.v. een getijtank) en een konstante afvoer (V-stuw) afzonderlijk ingesteld worden. Op ongeveer 64 m vanaf het zeebassin is de goot over 180° omgebogen (zie fig. 1). Op het rechte stuk van het zeebassin tot de bocht zijn 16 waterstandsvolgers (WAVO's) op onderlinge afstanden van $\Delta x = 3,66$ m opgesteld. Vanaf twee over de goot verrijdbare meetwagens kunnen snelheden, geleidbaarheden of andere eigenschappen van het modelwater gemeten worden.

De goot is zodanig ingericht (veel plaatjes op bodem, gladde wanden), dat de stroming in hoge mate tweedimensionaal is in het midden van de goot. Alleen nabij de wanden is de snelheidsverdeling driedimensionaal.

Er zijn zowel proeven zonder als met dichtheidsverschillen uitgevoerd. In de in [11] behandelde proeven zonder dichtheidseffekten is rhodamine WT gebruikt om de verspreiding in de goot van stof vanuit het zeebassin te bepalen. Het rhodaminegehalte van het water in het zeebassin wordt konstant gehouden door regelmatig een hoeveelheid rhodamine aan het zeebassinwater toe te voegen (ter compensatie van rivierwater). De temperatuur van het rivierafvoerwater (rhodaminegehalte nul) wordt aangepast aan de temperatuur van het zeebassinwater (m.b.v. boiler).

In de in [12] behandelde zout/zoetproeven wordt de dichtheid van het zeewater konstant gehouden door middel van een regelsysteem met pekelinjectie. De temperatuur van het zoete rivierwater, dat bij de V-stuw de goot instroomt, wordt aangepast aan de temperatuur van het zeewater voor het in stand houden van een konstant dichtheidsverschil tussen zee- en rivierwater.

2.2 Beschikbare metingen

In [11] is uitvoerig ingegaan op de samenstelling van het proevenprogramma. Alle proeven zijn uitgevoerd met bodemplaatjes $2 * 2$ cm als ruwheidsmiddel op

de eerste 64 m vanaf de mond van de goot. Op het bovenstroomse rechte eind van de goot zijn staafjes als ruwheidsmiddel gebruikt. De hoeveelheid staafjes en plaatjes is zodanig bepaald dat in permanente stroming bij de gekozen waterstand van 21,6 cm de Chézy-koëfficiënt $C = 19 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bedraagt.

In tabel 1 is een overzicht van het proevenprogramma gegeven. De bij de referentie-omstandigheden van het getijgootonderzoek uitgevoerde zout/zoetproef T10 is de meest gelaagde proef. Door vergroting van de amplitude a_0 van het vertikaal getij en door verkleining van de rivierafvoer zijn minder gelaagde proeven verkregen.

In de proeven is in 16 vaste meetstations (zie fig. 1) de waterstand gemeten, waarbij de onderlinge afstand 3,66 m bedroeg. In de rhodamineproeven zijn de snelheids- en concentratievertikaal als functie van de tijd gemeten in de oneven meetstations op Δx , $3\Delta x$ enz. van de mond, terwijl in de zout/zoetproeven in elk station vertikalen doorgemeten zijn. Voor de snelheid werden 12 punten per vertikaal gemeten met onderlinge tussenruimte $\Delta z = 1/13 \bar{h} = 0,0166 \text{ m}$ (\bar{h} : middelen over getijperiode T).

De rhodamineconcentratie is in 4 punten per vertikaal bepaald namelijk op $2\Delta z$, $5\Delta z$, $8\Delta z$ en $11\Delta z$ vanaf de bodem. De zoutconcentratie is in 12 punten per vertikaal bepaald (in de punten $n\Delta z$ met $n = 1$ t/m 12).

In [11] en [12] is gebruik gemaakt van een één dimensionaal numeriek model om de proeven te simuleren en te interpreteren. Deze simulatie is zinvol voor het onderzoek met het 2D-model omdat

- er op de benedenstroomse rand van de goot ($x = 0$) geen metingen beschikbaar zijn
- de grootte van de effectieve weerstand in een getijstroming niet voldoende nauwkeurig bekend is en afwijkt van de weerstand bij permanentie zoals deze in tabel 1a is opgegeven
- een gevoeligheidsonderzoek naar de invloed van randkondities en gootparameters zinvol is in verband met beperkte instelnaauwkeurigheid van deze grootheden.

In [11] is aangegeven dat de getijbeweging in de homogene proeven T12, T22 en T32 gesimuleerd kan worden met een homogeen 1D-model als

- getij-amplitude a_0 in $x = 0$ met 3% gereduceerd wordt (t.o.v. tabel 1)
- Chézy-koëfficiënt verhoogd wordt tot $C = 20$ à $20,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- extra faseverschil tussen vertikaal getij (in $x = 0$) en horizontaal getij (in $x = L$) van $-10,8^\circ$ wordt opgelegd (geïntroduceerd door weglaten van filter in getijtankregeling, zie [11]).

In [12] is aangegeven dat de getijbeweging in de vier beschikbare zout/zoetproeven niet met een zelfde recept gesimuleerd kan worden met een inhomogeen 1D-model:

- hoe groter de verticale gelaagdheid des te kleiner werd de effectieve weerstand
- de reductie van de getij-amplitude a_0 in $x = 0$ is in de proeven met de grootste getij-amplitude 5% in plaats van 3%.

2.3 Meetnauwkeurigheid

In [11] is uitvoerig ingegaan op de nauwkeurigheid van de modelinstelling en van de meetapparatuur. Bij toepassing van een Fourier-analyse van gemeten verticale getijden volgt als standaarddeviatie in de belangrijkste componenten

$$\sigma_{A_0} = 0,20 \text{ mm}$$

$$\sigma_{A_1} = 0,20 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\phi} = 1,5^\circ$$

Voor de nauwkeurigheid van de snelheid werd gevonden

$$\sigma_u = 0,75 \text{ cm/s}$$

waarbij in de figuren met snelheidsvertikalen $3\sigma_u$ als betrouwbaarheidsinterval (van 98,5%) aangegeven is. Voor de getijdebieten is een standaarddeviatie van 0,3 l/s opgegeven, doch gezien de onbekende systematische fouten bij integratie van de snelheidsverdeling is een reële schatting van het betrouwbaarheidsinterval (van 95%) 1 à 2 l/s.

De nauwkeurigheid in de meting van de dichtheid via geleidbaarheid en temperatuur kan gesteld worden op

$$\sigma_{\rho} = 0,25 \text{ kg/m}^3.$$

3 Beschrijving van het wiskundig model

3.1 Basisvergelijkingen

Na integratie over de breedte en gebruik makend van de ondiepwatbenadering worden de vergelijkingen voor de tweedimensionale (lengte en vertikaal) inhomogene getijstroom [14]

- de bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_{xx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\tau_{xz}}{\rho} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.1)$$

- de hydrostatische drukvergelijking

$$p = p_s + \rho_0 g(\eta - z) + g \int_z^\eta \rho d\theta \quad (3.2)$$

- de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

- de zoutbalansvergelijking

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial wc}{\partial z} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_z}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

De bovenstaande vergelijkingen gelden als de breedte konstant is (gootversie van DISTRO) en als de invloed van de dwarsmiddeling opgenomen is in de schuifspanningstermen τ_{xx} en τ_{xz} en in de transporttermen T_x en T_z

- de toestandvergelijking

$$\rho = \rho_0 + \beta c, \text{ waarin } \beta \text{ van de orde } 0,75 \text{ is} \quad (3.5)$$

Integratie van vergelijking (3.3) over de hoogte en substitutie van de kinematische randkondities:

$$u \frac{\partial z_b}{\partial x} - w = 0 \quad \text{voor } z = z_b \quad (3.6)$$

$$\text{en } \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} - w = 0 \text{ voor } z = \eta \quad (3.7)$$

levert de vergelijking waaruit de positie van het vrije oppervlak gevonden wordt

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_b^\eta u dz = 0 \quad (3.8)$$

3.2 Randkondities

Het wiskundige model heeft rand- en beginkondities nodig om de getijbeweging en de concentratieverdeling te kunnen berekenen. In het model wordt waar nodig gebruik gemaakt van zwakke randvoorwaarden in plaats van harde randvoorwaarden (zoals een gemeten snelheidsverdeling op de rand) om de voorspellende waarde van het model zo groot mogelijk te maken.

3.2.1 De benedenstroomse rand ($x = 0$)

Het verticale getij op de rand ($x = 0$) moet gegeven worden

$$\eta(0, t) = \eta_0(t) \quad (3.9)$$

Voor de snelheidsverdeling is een zwakke randvoorwaarde nodig

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.10)$$

Voor de concentratieverdeling geldt dat tijdens de vloedperiode de toename in de tijd tot een maximum waarde opgegeven moet worden:

$$\frac{dc}{dt} = c_{\max} g(t, z) \text{ voor } c < c_{\max} \quad (3.11)$$

$c = c_{\max}$ in resterend deel vloedperiode, terwijl tijdens de ebperiode een zwakke randkonditie gebruikt wordt

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \quad (3.12)$$

De functie $g(t,z)$ moet het gedrag van het zeegedeelte nabij de mond van de getijrivier als randvoorwaardefabriek weergeven. Deze functie beschrijft de overgang van de concentratie op LWK naar de maximale concentratie c_{\max} , die op zee aanwezig is. In DISTRO is de volgende vorm aangenomen

$$g = c_n \left\{ 1 + c_s \frac{(H-z)}{H} \right\} \quad \text{voor } c < c_{\max} \quad (3.13)$$
$$= 0 \quad \text{voor } c = c_{\max}$$

Met de keuze van c_n en c_s ligt de overgangperiode (van LWK tot tijdstip waarop c_{\max} bereikt wordt) vast. Via de keuze van c_s is het mogelijk om rond LWK een dichtheidsstroming op te drukken: de lengte van de overgangperiode hangt van z af. Bovendien hangt het tijdstip LWK ook van z af.

3.2.2 De bovenstroomse rand ($x = L'$)

Uitgaande van de gegeven onderlinge afstand van de meetstations ($\Delta x = 3,66$ m) zijn de DISTRO-berekeningen ter simulatie van getijgootproeven uitgevoerd met een stapgrootte $3,66/2 = 1,83$ m. De bovenstroomse rand L' bevindt zich in DISTRO daarom op een geheel aantal malen deze afstand namelijk op $55 * 1,83 = 100,65$ m; deze afstand is iets kleiner dan in de getijgoot.

De snelheidsverdeling wordt bepaald uit

$$u(L',t) = f(z) Q(t) \quad (3.14)$$

waarin $f(z)$ een logarithmische of blokvorm heeft en $Q(t)$ het ingesteld debiet is.

Voor de concentratie geldt

$$c(L',t) = 0 \quad (3.15)$$

3.2.3 Het vrije oppervlak ($z = \eta$)

Aan het vrije oppervlak geldt de kinematische randconditie (3.7). Voor de schuifspanningen geldt

$$\tau_{xx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_{xz} = 0 \quad (3.16)$$

Door het wateroppervlak kan geen zouttransport plaatsvinden zodat geldt:

$$T_x \frac{\partial \eta}{\partial x} + T_z = 0 \quad (3.17)$$

3.2.4 De bodem ($z = z_b$)

De snelheid aan de bodem is nul

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

en er vindt geen stoftransport door de bodem plaats

$$T_x \frac{\partial z_b}{\partial x} + T_z = 0 \quad (3.19)$$

3.3 Turbulentiemodellering

Om een gesloten stelsel vergelijkingen te krijgen is het nodig de diffusieve impuls- en zouttransporten uit te drukken in gemiddelde grootheden. Daartoe wordt een o-de orde turbulentiemodellering gebruikt:

$$\tau_{xx}/\rho = -\epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.20)$$

$$\tau_{xz}/\rho = -\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$T_x = -D_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.21)$$

$$T_z = -D_z \frac{\partial c}{\partial z}$$

De turbulente viskositeitsterm met ϵ_x in verg. (3.20) is vanwege numerieke redenen toegevoegd [3]. De gekozen waarde van ϵ_x is niet van invloed op de waterbeweging. De turbulente diffusie term met D_x in verg. (3.21a) is ook vanwege numerieke redenen toegevoegd, de grootte van deze term blijkt echter wel van invloed op de concentratieverdeling te zijn (zie o.a. [4]).

De grootte van de longitudinale diffusie term is afhankelijk van de longitudinale turbulente diffusie en van de dispersie-achtige bijdrage ten gevolge van het middelen van snelheid en concentratie over de breedte [14].

Voor de verticale uitwisseling van impuls en massa is in het huidige model DISTRO een mengweglengtebenadering toegepast

$$\epsilon_z = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| F(Ri) \quad (3.22)$$

$$D_z = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| G(Ri) \quad (3.23)$$

waarin de mengweglengte l_m gedefinieerd wordt door

$$l_m = \kappa(z+z_0) \quad \text{als} \quad 0 \leq z/H < \frac{1}{4} \quad (3.24)$$

$$l_m = \kappa(0,25H+z_0) \quad \text{als} \quad 0,25 < z/H < 1$$

en het lokale Richardson-getal Ri door

$$Ri = - \frac{g \partial \rho / \partial z}{\rho_0 (\partial u / \partial z)^2} \quad (3.25)$$

en de ruwheidsparameter z_0 door $z_0 = 1/33 k_s$, waarin k_s de ekwivalente zandruwheid is.

$F(Ri)$ en $G(Ri)$ zijn dempingsfuncties, die de invloed van de verticale gelaagdheid op de turbulente uitwisseling van impuls en massa aangeven. Door ijking van het numerieke model aan een getijgootmeting is een keuze voor deze functies gedaan [4 en 5].

3.4 Numerieke benadering

De numerieke realisatie van de basisvergelijkingen en de randkondities is uitvoerig beschreven in [2, 3 en 4].

4 IJking van DISTRO

4.1 Algemeen

DISTRO is geijkt aan 2 getijgootproeven, T22 en T20, met een amplitude van het vertikaal getij in de mond (a_0), die tweemaal zo groot is als de referentiewaarde uit het getijgootonderzoek (zie tabel 1). De ijking vond plaats in 2 fasen. In de eerste fase is de homogene proef T22 gebruikt om de getijbeweging te ijken [3]. Het aldus geijkte model is vervolgens in de tweede fase, na de substitutie van enkele relaties voor de demping van de verticale diffusie met toenemende gelaagdheid, gebruikt om de getijbeweging en zoutverdeling van de zout/zoetproef T20 te berekenen [4]. Daarna is DISTRO geijkt aan deze laatste proef door de koëfficiënten in de beste dempingsrelatie en de koëfficiënt in de longitudinale dispersierelatie af te stemmen op de meetresultaten. In de volgende paragrafen wordt het resultaat van deze ijking in het kort weergegeven.

4.2 IJking aan de homogene proef T22

Voor de ijking aan de homogene proef T22 zijn de volgende waarden voor de randcondities in DISTRO gebruikt [3]:

- het verticale getij aan de zeezijde is

$$\eta(o,t) = 0,02425 \sin \omega t$$

d.w.z. het in de mond ($x = 0$) optredende verticale getij is ten opzichte van het door de zeelep in het zeebassin opgedrukte getij met 3% gereduceerd. (Ook bij simulatie met 1D-model gevonden, zie par. 2.2).

- het horizontale getij aan de bovenstroomse rand L' is benaderd met een Fourier-benadering, waarvan de componenten in tabel 1c te vinden zijn.

- tijdens de vloedfase geldt aan de zeezijde

$$c(o,t) = c_r + \frac{c_{\max} t}{0,05 T} \text{ indien } c < c_{\max}$$

($g = 1/0,05T$).

Zodra de maximale concentratie c_{\max} bereikt wordt blijkt deze voor het resterend deel van de vloedperiode gehandhaafd $c(o,t) = c_{\max}$;

c_r is de concentratie aan het eind van de ebperiode.

In DISTRO is een z_0 gekozen die op de eerste 61,3 m vanaf de mond van de goot overeenkomt met een $C = 21,6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$ bij permanentie. Op dit stuk van de goot zijn bodemplaatjes als ruwheidsmiddel gebruikt. In het resterend deel van de goot, waar weerstandsstaafjes geplaatst zijn, is een z_0 gekozen, die overeenkomt met een $C = 19,6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$ bij permanentie. Hierbij is de ruwheidshoogte z_0 omgerekend naar de Chézy-waarde via de relatie

$$C = 18 \log \frac{12R}{33z_0} \quad (4.1)$$

waarin R : hydraulische straal voor het getijgemiddeld waterstandsniveau.

Ook in de 1D-simulatie was het nodig de Chézy-waarde groter te maken dan de opgegeven waarde $C = 19 \text{ m}^{\frac{1}{2}}\text{s}^{-1}$ die voor permanenties geldt (par. 2.2).

De verticale uitwisseling wordt gegeven door de vergelijkingen (3.7) t/m (3.9), waarbij voor de homogene stroming geldt:

$$F(Ri) = G(Ri) = 1 \quad (4.2)$$

Voor de horizontale uitwisselingscoëfficiënten zijn de volgende grootheden gebruikt:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= 0,37 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \\ D_x &= 2 u^* b + 0,005 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Deze laatste relatie is geijkt aan de gemeten rhodamineconcentratie. De vorm van deze relatie (4.3) is gebruikelijk in de literatuur voor getijstromen, waarin de tijdschaal voor menging over de dwarsdoorsnede veel kleiner is dan de getijperiode (zie o.a. [14]). Als algemene dispersierelatie voor getijstromen moet $D_x \sim u^* b$ echter afgeraden worden [13].

Het resultaat van de ijking van DISTRO aan proef T22 is wat het vertikaal getij betreft getoond in figuur 2, waar de belangrijkste Fouriercomponenten als functie van de afstand tot de mond van de goot uitgezet zijn. Hierbij is gebruik gemaakt van de Fourier-analyse volgens welke het getij aldus gesplitst wordt

$$\eta(t) = A_0 + \sum_k A_k \cos(k\omega t + \phi_k) \quad (4.4)$$

In figuur 3 zijn voor de stations 1 en 13 de getijcurven zelf, zoals deze gemeten en berekend zijn, vergeleken.

Uit bovenstaande vergelijking volgt dat DISTRO de verticale getijbeweging in homogene getijgootomstandigheden uitstekend kan simuleren.

Ten behoeve van een objektieve beoordeling van de resultaten van de simulatie is in rapport R 897-5 [3] onderstaande norm gedefinieerd:

de grootte van het verschil dat optreedt door de Chézy-waarde 5% te variëren.

Deze norm levert voor de omstandigheden van de ijkproeven

$$\Delta A_0 = 0,0003 \text{ m}$$

$$\Delta A_1 = 0,0007 \text{ m}$$

$$\Delta \phi_1 = 0,093 \text{ rad}$$

De verschillen in de hiervoor getoonde tabel zijn duidelijk kleiner dan deze norm.

In de figuren 4 en 5 zijn voor een 12-tal tijdstippen in de stations 1 en 7 de gemeten en berekende snelheidsvertikalen vergeleken. In figuur 6 zijn de daarbij horende debieten uitgezet als functie van de tijd. Uit de vergelijking van berekende en gemeten waarden valt op dat in station 1 rond het tijdstip van maximale vloedstroom de gemeten snelheden en debieten duidelijk kleiner zijn dan de berekende waarden. In station 7 daarentegen komen de berekende en gemeten snelheidsgegevens redelijk overeen. Daar debieten ook in andere stations (St. 3 en 13, zie [3]) redelijk overeenkomen wijst dit erop dat er bij het instromen (tijdens vloed) in de getijgoot aanloopverschijnselen optreden. Aangezien de gemeten snelheidsvertikalen er ook in de vloedfase goed ontwikkeld uitzien is waarschijnlijk de snelheidsverdeling in breedterichting ter plaatse van station 1 nog niet goed ontwikkeld. Daardoor zijn er in station 1 in de vloedfase duidelijk kleinere snelheden gemeten in het midden van de goot dan in de meer stroomopwaarts gelegen meetstations in het midden van de goot gemeten zijn.

In beide stations 1 en 7 en ook in 3 en 13 [3] worden er rond het tijdstip van maximale ebstroom te grote gemeten snelheden en debieten gevonden in vergelijking met de berekende waarden.

In de stations 3, 7 en 13 is de amplitude van het gemeten getijdebiet systematisch groter dan de amplitude van het berekende getijdebiet. In [3] zijn de Fourier-komponenten van de getijdebieten in de stations 3 en 13 $[Q = B_0 + B_1 \cos(\omega t + \phi_1) + \dots]$

positie x (m)	meting T22			berekening		
	B_0 (1/s)	B_1 (1/s)	ϕ_1 (rad)	B_0 (1/s)	B_1 (1/s)	ϕ_1 (rad)
10,98	-3,3	29,0	1,189	-2,9	27,8	1,209
47,58	-3,1	24,6	1,370	-2,9	23,7	1,358

Ook hieruit blijkt dat de gemeten waarde van B_1 groter is dan de berekende. Het bovenstaande kan verklaard worden uit het feit dat de stroming in de goot niet volkomen tweedimensionaal is. In het midden van de goot, waar ook de meting plaatsvindt, treden de grootste snelheden op, waardoor de gemeten debieten groter zijn dan de over de breedte gemiddelde debieten, zoals DISTRO deze berekent. (Uitzondering hierop vormen, zoals hiervoor vermeld, de vloed-debieten in de mond van de goot.)

In zowel de getijgoot als in DISTRO is de concentratieverdeling vrij uniform over de vertikaal.

In figuur 7 is een vergelijking van de over de vertikaal gemiddelde concentratieverdeling weergegeven. In de vloedfase is er een faseverschil tussen gemeten en berekende concentratieverdeling van ongeveer $0,02T$. Dit verschil komt hoofdzakelijk voort uit de keuze van een te grote concentratietoename in de randconditie $c(o,t)$ in het begin van de vloedfase. Een ander duidelijk verschil is dat in DISTRO de afgeleiden van de concentratie naar de tijd en naar de plaats bij de top van de kleurstoftong duidelijk anders verlopen zijn dan gemeten is in de goot.

Een uitgebreide beschrijving van de ijking van DISTRO aan proef T22 is gegeven in [3, 8].

4.3 IJking aan de zout/zoetproef T20

Met het aan de homogene proef T22 geijkte model DISTRO is de getijbeweging en de zoutverdeling voor de zout/zoetproef T20 berekend.

Terwijl bij ijking aan de homogene proef in de toestandsvergelijking (3.5) $\beta = 0$ genomen is (geen dichtheidsinvloeden) wordt bij de ijking aan proef T20 $\beta = 0,75$ genomen (invloed dichtheidsverschillen op getijbeweging).

De randcondities voor deze berekeningen zien er aldus uit:

- de getij-randcondities zijn nagenoeg hetzelfde als in de homogene proef op

een faseverschuiving van $6,2^\circ$ na in het horizontaal getij in $x = L'$.

(Deze faseverschuiving was het enige verschil in de ingestelde randkondities bij de proeven, zie [11])

- de zouttrandkonditie in $x = 0$ ziet er tijdens de vloedfase aldus uit:

$$c(o, z, t) = c_r(z) + \frac{c_{\max}}{0,4} \left\{ 1 + 3\left(\frac{\pi-z}{\eta}\right) \right\} \frac{t}{T}$$

voor het geval dat $c < c_{\max}$. Zodra $c > c_{\max}$ wordt geldt dat de concentratie konstant blijft gedurende het resterend deel van de vloedfase

$$c(o, z, t) = c_{\max}$$

Bovenvermelde randkonditie zorgt ervoor dat de grootte van de verandering van de concentratie met de tijd kan variëren over de vertikaal.

De uitwisselingsrelaties voor de simulatie van proef T20 zijn aldus gemodificeerd:

- de horizontale uitwisselingscoëfficiënt D_x is iets groter genomen:

$$D_x = 3 u^* b + 0,015 \quad (4.5)$$

- in de verticale uitwisselingsrelaties zijn de twee typen dempingsfuncties $F(Ri)$ en $G(Ri)$ gesubstitueerd (zie fig. 8).

Berekening I : dempingsrelaties volgens Munk/Anderson

$$\begin{aligned} F(Ri) &= (1 + 10Ri)^{-0,5} \\ G(Ri) &= (1 + 3,3Ri)^{-1,5} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Berekening II: dempingsrelaties volgend uit getijgootmetingen [9]

$$\begin{aligned} F(Ri) &= \exp(-4 Ri) \\ G(Ri) &= \exp(-15 Ri) \end{aligned} \quad (4.7)$$

In figuur 9 is voor bovengenoemde twee berekeningen het berekende verticale getij vergeleken met het gemeten getij met behulp van de Fourier-grootheden A_0 , A_1 en ϕ_1 :

$\Delta A_0(x)$ verschil middenstand A_0 in station x en dat in station 1

$A_1(x)$ amplitude van de eerste Fourierkomponent

$\Delta\phi_1(x)$ verschil in de fase van de eerste Fourier-komponent tussen station x en station 1.

Vooraf uit de amplitude A_1 blijkt dat berekening II een veel betere simulatie van het gemeten getij geeft dan berekening I.

In figuur 10 is voor beide berekeningen op 4 karakteristieke tijdstippen de tweedimensionale dichtheidsverdeling uitgezet samen met de gemeten dichtheidsverdeling. In figuur 11 zijn voor een viertal stations de over de vertikaal geïntegreerde dichtheidsverdeling voor beide berekeningen en voor de meting weergegeven. Uit de onderlinge vergelijking blijkt dat berekening II een veel meer gelaagde toestand oplevert dan berekening I en duidelijk beter de gemeten verdeling benadert.

Verdergaande ijking van DISTRO vond plaats door wijzigingen in de dempingsrelaties II en in de longitudinale dispersie. In [5] is als beste benadering gegeven een DISTRO-simulatie met

- dempingsrelaties

$$\begin{aligned} F(Ri) &= \exp(-4Ri) \\ G(Ri) &= \exp(-18Ri) \end{aligned} \tag{4.8}$$

Deze sterke afname van de verticale massa-diffusie met toenemende gelaagdheid heeft als konsekwentie dat voor $Ri > 0,4$ (demping faktor > 1000 ten opzichte van homogene situatie) de fysische diffusie (volgens de vergelijkingen (3.23) en (4.8)) kleiner wordt dan de numerieke diffusie [8]. Dit betekent dat in feite de numerieke diffusie een achtergrondswaarde levert van $D_{nz} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

De afname in de verticale impulsuitwisseling volgens (4.8) is veel kleiner dan de afname van de massadiffusie. Bovendien is de numerieke impulsdiffusie een orde kleiner dan de numerieke massadiffusie [8]. Het resultaat is dat de fysische impulsdiffusie (volgens de vergelijkingen (3.22) en (4.8)) dominerend blijft tot waarden van Ri veel groter dan 1.

- horizontale dispersiecoëfficiënt

$$D_x = 4,5 u^* b + 0,015 \tag{4.9}$$

In [3] is aangegeven dat de numerieke, longitudinale diffusie een orde kleiner is dan de fysische diffusie, volgend uit vergelijking (4.9).

In figuur 12 is voor 2 stations het verticale getij vergeleken. De Fourier-komponenten zijn in figuur 9 gegeven (analoog aan die van berekening II). De snelheidsvertikalen van de ijkingsberekening en de meting zijn in de figuren 13 en 14 vergeleken voor een tweetal stations, terwijl in figuur 15 voor deze stations de debietcurven gegeven zijn. In onderstaande tabel zijn de Fourier-komponenten van een tweetal stations gegeven:

positie x (m)	meting T20			DISTRO		
	B_0 (1/s)	B_1 (1/s)	ϕ_1 (rad)	B_0 (1/s)	B_1 (1/s)	ϕ_1 (rad)
10,98	-2,9	27,1	1,084	-2,9	28,9	1,126
47,58	-2,8	23,3	1,346	-2,9	23,8	1,336

Uit de vergelijking volgt

- dat de gemeten uitwisselingsstromen in de mond van de goot (rond LWK) groter zijn dan in DISTRO (fig. 13). De kentering bij de bodem vindt in de proef eerder plaats
- dat bij maximale vloedstroom de gemeten snelheden en dus ook de debieten duidelijk kleiner zijn dan DISTRO weergeeft. De vreemde piek in de DISTRO-vertikalen in de vloedfase is een gevolg van het optreden van Ri-instabiliteit, zoals deze in appendix A beschreven is
- dat de ebsnelheden en debieten in het algemeen goed door DISTRO weergegeven worden
- dat de amplitude B_1 van het horizontaal getij in de meting kleiner is dan uit DISTRO volgt; dit is vooral een gevolg van het verschil in vloeddebieten rond tijdstip MVS (zie fig. 15).

In figuur 16a is weergegeven in hoeverre de berekende zout-randconditie rond LWK lijkt op de gemeten randconditie met behulp van het verloop van de dichtheid met de tijd in de mond van de goot (station 1). Zoals uit de snelheidsprofielen in station 1 rond LWK blijkt (fig. 13) treedt in DISTRO nabij de bodem de kentering (LWK) duidelijk later op dan in de meting gevonden is. Dit faseverschil rond LWK is ook goed zichtbaar in het verloop van de dichtheid met de tijd ($z/H = 1/2$ en $2/3$ in fig. 16a).

De verticale gelaagdheid blijkt op LWK in goot en DISTRO nagenoeg hetzelfde te zijn als men $\partial\rho/\partial z$ in de grenslaag als maat voor de gelaagdheid neemt (fig. 16b). Wel is het dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag in de meting duidelijk kleiner bij bodemkentering ($t = 0,92T$).

In figuur 17 zijn de tweedimensionale dichtheidsverdeling van de proef en berekend door DISTRO vergeleken. In figuur 18 is hetzelfde gedaan voor de ééndimensionale verdeling. Uit vergelijking volgt

- dat in de proef bij de bodem de longitudinale dichtheidsgradiënt bij de top van de zouttong duidelijk groter is dan uit DISTRO volgt
- dat de verticale gelaagdheid in de proef over het algemeen iets groter is dan in DISTRO. Tijdens HWK is dit duidelijk te zien in figuur 17, terwijl tijdens MVS en MES de overgang tussen zoute onderlaag en brakke bovenlaag in de proef scherper is dan volgt uit DISTRO. In de brakke bovenlaag daarentegen geeft DISTRO een iets grotere verticale gelaagdheid dan in de proef: zie isopykne $\Delta\rho = 1 \text{ kgm}^{-3}$ tijdens LWK, MVS en HWK.

Zoals hiervoor reeds vermeld is, is uit de vorm van de berekende snelheidsprofielen in de vloedfase te zien dat er Ri-instabiliteit op kan treden. In appendix A is hierop nader ingegaan en daarbij is de konklusie getrokken dat om deze Ri-instabiliteit te vermijden in plaats van exponentiële dempingsrelaties (zoals bij ijking- en verifikatie-onderzoek van DISTRO gebruikt zijn) beter een andere vorm van de dempingsfuncties gekozen kan worden. De berekende dichtheidsverdeling verbetert echter niet essentieel bij gebruik van deze dempingsrelaties.

Uit de resultaten van de ijking van DISTRO aan proef T20 kunnen de volgende konklusies getrokken worden [4 en 5]:

- het verticale getij wordt redelijk weergegeven. De verschillen in de gemeten en berekende getij-amplitude en fase zijn overal kleiner dan de norm (blz. 13)
- het horizontale getij wordt redelijk weergegeven, doch rond LWK en MVS treden wel systematische verschillen op
- het totale beeld van de gesimuleerde dichtheidsverdeling komt redelijk overeen met de gemeten verdeling. In detail blijken er echter systematische verschillen op te treden ten aanzien van de mate van gelaagdheid en de longitudinale dichtheidsgradiënt bij de top van de zouttong.

5 Verifikatie van DISTRO

5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt beschreven in hoeverre het aan de getijgootproef T20 geijkte model DISTRO de getijbeweging en de dichtheidsverdeling goed voorspelt in situaties die duidelijk verschillend zijn van de ijksituatie. Bij deze verifikatieprocedure mag, behalve aan de randkondities niets aan het geijkte model veranderd worden.

Voor de verifikatie staat een aantal getijgootproeven ter beschikking:

- bij een kleine amplitude van het verticale getij in $x = 0$: de homogene proef T12 en de zout/zoetproef T10
- bij een grote amplitude van het verticale getij in $x = 0$: de homogene proef T32 en de zout/zoetproeven T31 en T30.

Tot nu toe is het model DISTRO slechts voor getijgootomstandigheden nader onderzocht op zijn voorspellende waarde. De berekende en gemeten getijbeweging en dichtheidsverdeling worden beoordeeld met de mate van overeenkomst in de ijksituatie als norm. Zijn de afwijkingen in de nieuwe situaties van dezelfde orde als in de geijkte situatie dan betekent dit dat het model een zekere voorspellende waarde heeft. In het tegengestelde geval betekent dit dat het model slechts een beperkt tot geen voorspellende waarde heeft.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt de gemeten en berekende getijbeweging vergeleken aan de hand van een geselecteerd aantal figuren:

- verloop Fourier-komponenten van het vertikaal getij $A_0(x)$, $A_1(x)$ en $\phi_1(x)$
- waterstandsverloop $h(t)$ in de stations 1 en 13
- snelheidsvertikalen $u(z)$ in station 1 op 12 tijdstippen gedurende het getij
- snelheidsvertikalen $u(z)$ in station 7 op 12 tijdstippen gedurende het getij
- getijdebieten $Q(t)$ in de stations 1 en 7.

Voor de zout/zoetproeven is bovendien de concentratieverdeling nog vergeleken aan de hand van

- de verandering van de concentratie in station 1 aan het begin van de vloedperiode
- het in het x/z -vlak door as van de goot getekend verloop van de isopyknen van $\Delta\rho = 1, 5, 10, 15$ en 20 kgm^{-3} op vier karakteristieke tijdstippen
- het verloop van de over diepte gemiddelde concentratie $c(t)$ in een viertal stations.

5.2. Verifikatie aan homogene proeven

5.2.1 Proef T12

In figuur 19 zijn de belangrijkste Fourier-komponenten van het gemeten en berekende verticale getij voor de homogene proef T12 met kleine getij-amplitude vergeleken, terwijl in figuur 20 voor 2 stations de getijcurven zelf nog eens zijn vergeleken. De overeenkomst tussen gemeten en berekend getij blijkt volgens deze figuren goed te zijn gezien de nauwkeurigheid van de meting. De gemeten getij-amplitude vertoont een lichte tendens naar een grotere waarde dan de berekende amplitude met toenemende x .

In de figuren 21 en 22 zijn de gemeten en berekende snelheidsvertikalen en in figuur 23 de daarbij behorende debietcurven voor een tweetal stations weergegeven. Omdat snelheden $< 2,5$ cm/s niet betrouwbaar te meten zijn met de micro-molen is er rond LWK geen goede vergelijking tussen gemeten en berekend profiel te geven. Tijdens maximale vloedstroom (MVS) is in de mond van de goot evenals in de proeven T22 en T20 (in de figuren 6 en 15) de gemeten snelheid duidelijk kleiner dan de berekende (aanloopverschijnsel, zie par. 4.2). Voor de overige tijdstippen is de overeenkomst tussen meting en berekening gezien de nauwkeurigheid van de meting redelijk. Dit laatste blijkt ook uit de vergelijking van de Fourier-komponenten van 2 debietcurven, zie tabel 3.

5.2.2 Proef T32

In figuur 24 zijn de belangrijkste Fourier-komponenten van het gemeten en berekende verticale getij voor de homogene proef T32 (met de grote getij-amplitude) vergeleken, terwijl in figuur 25 voor 2 stations de getijcurven zelf zijn vergeleken. In station 1 blijkt de overeenkomst redelijk te zijn met uitzondering van een kleine middenstandsverschuiving. Hierbij is echter wel het in de mond van de goot opgedrukt verticale getij iets meer gereduceerd dan in de ijkproef, namelijk $3\frac{1}{2}\%$ in plaats van 3% reductie van de amplitude in $x = 0$. Met toenemende x blijkt de amplitude van het gemeten getij wat tendens betreft kleiner te worden dan de amplitude van het berekende getij (zie fig. 24 en 25). Dit duidt erop dat de ruwheid in DISTRO iets te klein genomen is.

In de figuren 26 en 27 zijn de gemeten en berekende snelheidsvertikalen en in figuur 28 de daarbij behorende debietcurven voor een tweetal stations weergegeven. Daaruit blijkt dat de gemeten snelheden en debieten bij maximale eb-stroom (MES) duidelijk groter zijn dan de berekende debieten. Hetzelfde geldt

voor de gemeten snelheden en debieten bij maximale vloedstroom (MVS) in station 7. In station 13 blijkt de amplitude volgens tabel 3 ook duidelijk groter dan in de proef. Dit verschil kan slechts gedeeltelijk toegeschreven worden aan het feit dat in het midden van de goot, waar gemeten is, ook de snelheden het grootst zijn. Bij de vergelijking van het verticale getij is in het voorgaande vermeld dat in DISTRO de ruwheid iets te klein lijkt te zijn. Vergroting van de ruwheid betekent echter dat in DISTRO de snelheden en debieten nog kleiner worden: uit de debietcurven zou juist de tendens volgen dat de weerstand in DISTRO te groot is.

Uitzondering op het bovenstaande zijn de vloeddebieten en vloed-snelheidsprofielen in station 1, waar de gemeten grootheden kleiner zijn dan de berekende. Deze tendens is weer hetzelfde als reeds in de proeven T12 en T22 beschreven is en kan toegeschreven worden aan het in de breedterichting nog niet ontwikkeld zijn van de vloedstroming in de mond van de goot.

5.2.3 Konklusies

Voor homogene omstandigheden voorspelt DISTRO het verticale getij goed, terwijl de systematische afwijkingen die in het horizontaal getij aanwezig zijn ook reeds in de ijkproef geconstateerd zijn. Deze afwijkingen kunnen toegeschreven worden aan aanloopverschijnselen (vloedstroming in de mond) en aan de driedimensionale snelheidsverdeling alhoewel in proef T32 deze laatste afwijkingen te groot lijken.

In het algemeen mag gekonkludeerd worden dat de geometrische ruwheidscoëfficiënt z_0 de bodemweerstand redelijk weergeeft.

5.3 Verifikatie aan zout/zoetproeven

5.3.1 Proef T10

In figuur 29 is het verloop van de belangrijkste Fourier-komponenten van het vertikaal getij als functie van x weergegeven, terwijl in figuur 30 voor een tweetal stations de getijcurven zelf zijn weergegeven.

Uit vergelijking van het berekende en het gemeten getij met behulp van deze figuren blijkt dat:

- DISTRO een middenstandsverval voorspelt dat ongeveer een faktor 1,5 groter is dan het gemeten verval dA_0/dx . Een zelfde tendens werd bij de 1D-simulatie van deze proef gevonden. Naar schatting kan niet meer dan een kwart van

dit verschil verklaard worden uit het verschil in getij-amplitude (5%) tussen de DISTRO-berekening en de gootmeting. Een grotere getij-amplitude betekent namelijk ook een grotere golfopzet ten gevolge van het niet-lineaire karakter van de getijbeweging. Daarnaast wijst een groter middenstandsverval erop dat de weerstand in DISTRO groter is dan in de goot

- DISTRO in de gehele goot een te grote getij-amplitude A_1 voorspelt. Omdat reeds in de mond van de goot deze afwijking aanwezig is betekent dit dat er een betere zee-randkonditie ingesteld moet worden: in plaats van een reductie van 3% in de in de mond ($x = 0$) opgedrukte getij-amplitude a_0 moet voor proef T10 de reductie 6% bedragen. In figuur 29 is het verloop van de amplitude A_1 met x weergegeven bij deze grotere reductie. Daaruit volgt als tendens (vanaf station 5) dat het verschil tussen berekende en gemeten amplitude afneemt met toenemende x en dat betekent dat de weerstand in DISTRO wat tendens betreft te groot is.

In de figuren 31 en 32 zijn de snelheidsvertikalen en in figuur 33 de bijbehorende getijdebiëtcuren weergegeven voor de stations 1 en 7. Uit vergelijking van de berekende en gemeten snelheidsvertikalen volgt dat

- de uitwisselingsstromen rond LWK in DISTRO te zwak worden weergegeven (zie fig. 31 en 32)
- er een scherpe piek in diverse snelheidsprofielen tijdens de vloedfase aanwezig is, die aangeeft dat er in de berekening van zogenaamde Ri-instabiliteiten sprake is (zie appendix A).

Uit de debiëtcuren valt op:

- dat in station 1 tijdens de vloedfase de gesimuleerde debieten groter zijn dan de gemeten debieten. Dit verschijnsel is in al de hiervoor beschreven proeven ook geconstateerd en daar toegeschreven aan een aanloopverschijnsel van de goot
- dat in de overige meetstations de gesimuleerde amplituden van de getijdebiëten duidelijk kleiner zijn dan de gemeten amplituden (zie ook tabel 3). Dit verschil kan enerzijds toegeschreven worden aan het feit dat er in het midden van de goot, waar gemeten is, de grootste snelheden optreden. Anderzijds is dit in overeenstemming met de bij de vergelijking van het vertikaal getij geconstateerde tendens dat de weerstand in DISTRO te groot is.

In figuur 34 is de gelaagdheid op LWK en de overgang van de dichtheid aan het eind van de ebperiode naar de maximale dichtheid in station 1 vergeleken voor meting en berekening. De gesimuleerde gelaagdheid blijkt veel kleiner te zijn

dan de gemeten gelaagdheid. Daaruit volgt ook dat op een niveau waar het grensvlak passeert ($z/H = 0,75$) de gemeten overgang sneller verloopt dan de gesimuleerde. Zolang de gelaagdheid die DISTRO aan het eind van de ebperiode in de mond berekent duidelijk kleiner is dan de gemeten gelaagdheid valt er via de zout-randkonditie in de mond weinig winst te behalen.

In figuur 35 is in het x-z-vlak de vorm van een vijftal isopyknen op 4 karakteristieke tijdstippen weergegeven. De door DISTRO berekende dichtheidsverdeling blijkt duidelijk minder gelaagd te zijn dan de gemeten dichtheidsverdeling: vooral halverwege de zoutindringingslengte liggen de gemeten isopyknen veel dichter bijeen dan de gesimuleerde. Daarnaast is dit verschil te zien uit het horizontaler lopen van de gemeten isopyknen. Omdat de verticale gelaagdheid volgens DISTRO te klein is, betekent dit dat in DISTRO de demping van de verticale uitwisseling van impuls en massa ook te klein is, zodat een te grote weerstand in DISTRO resulteert. Dit laatste volgde ook al uit vergelijking van de getijbeweging.

Ook in deze gelaagde proef (evenals in de ijkproef T20) is de longitudinale dichtheidsgradiënt bij de top van de zouttong duidelijk groter dan volgens DISTRO. De zoutindringing is in DISTRO veel te klein.

In figuur 36 is de over de vertikaal gemiddelde zoutverdeling in een viertal stations vergeleken voor meting en berekening. Daaruit valt op dat de c/c_{\max} -curve in station 1 in meting en DISTRO redelijk overeenkomen, doch dat stroomopwaarts het verschil tussen beide steeds groter wordt. Dit duidt erop dat de longitudinale dispersie in DISTRO (verg. 4.9) te klein is.

5.3.2 Proef T31

In figuur 37 is het verloop van de belangrijkste Fourier-komponenten van het vertikaal getij als functie van x weergegeven, terwijl in figuur 38 voor een tweetal stations de getijcurven zelf zijn weergegeven. Uit vergelijking van het berekende en het gemeten getij met behulp van deze figuren blijkt

- de middenstand en de fase stemmen redelijk overeen
- de gesimuleerde getij-amplitude is in de gehele goot te groot. Enerzijds wordt dit veroorzaakt doordat de randkonditie niet voldoet: in plaats van een reductie van 3% moet de amplitude met ongeveer 5% in de mond gereduceerd worden. In figuur 37 is het verloop van A_1 met x bij een reductie van 5½% getoond. Anderzijds blijkt uit het verloop van $A_1(x)$ dat het verschil tussen berekende en gemeten amplitude met toenemende x toeneemt; dit duidt erop dat

in DISTRO de weerstand te klein is.

Dit laatste levert echter een te klein middenstandsverval op. Dit effect wordt tegengewerkt doordat een vergroting van de getij-amplitude ook een vergroting van de golfopzet ten gevolge van het niet-lineaire karakter van de getijbeweging levert. Het resultaat is zoals uit figuur 37 blijkt dat gemeten en berekend middenstandsverval goed overeenkomen.

In de figuren 39 en 40 zijn de snelheidsvertikalen en in figuur 41 de bijbehorende getijdebietcurven weergegeven voor de stations 1 en 7. Uit vergelijking van de berekende en gemeten debietcurven valt op:

- dat in station 1 tijdens de vloedfase de gesimuleerde debieten groter zijn dan de gemeten debieten. Dit verschijnsel is in al de hiervoor beschreven proeven ook gekonstateerd en daar toegeschreven aan een aanloopverschijnsel in de goot
- dat in de overige meetstations de gesimuleerde maxima van de vloed- en ebstroming (zie ook tabel 3) duidelijk kleiner zijn dan de gemeten maxima. Dit kan grotendeels toegeschreven worden aan het feit dat er in het midden van de goot, waar gemeten is de grootste snelheden optreden. De bij de vergelijking van de verticale getijbeweging genoemde tendens dat de weerstand in DISTRO te klein is wordt niet teruggevonden uit de vergelijking van het horizontaal getij.

Uit de vergelijking van de snelheidsprofielen (fig. 39 en 40) blijken er momentaan sterk afwijkende snelheidsprofielen uit DISTRO te kunnen volgen. Tijdens de tijdstippen van MVS en MES valt de tendens op te merken dat in de vloedperiode DISTRO een grotere $\partial u / \partial z$ geeft dan de meting en tijdens de ebperiode een kleinere. Dit zou erop wijzen dat de gravitatiecirculatie in de proef sterker aanwezig is dan in DISTRO. Tijdens de kenteringen is dit verschil tussen DISTRO en meting echter niet zichtbaar.

In figuur 42 is de gelaagdheid op LWK en de verandering van de dichtheid rond LWK in station 1 vergeleken voor meting en berekening. De gesimuleerde gelaagdheid blijkt aan het eind van de ebperiode in de mond groter te zijn dan de gemeten gelaagdheid. De overgangsperiode voor de zout-randconditie blijkt, uitgaande van het verschil in gelaagdheid op LWK, redelijk goed gekozen te zijn.

In figuur 43 is in het x-z-vlak de vorm van een drietal isopyknen op 4 karakteristieke tijdstippen vergeleken voor meting en berekening. In figuur 44 is

de ééndimensionale concentratieverdeling vergeleken voor meting en berekening. Uit beide figuren blijkt dat DISTRO een veel te grote zoutindringing voorspelt. Uit de dichtheidsverdeling op LWK (fig. 43) is duidelijk te zien dat in DISTRO de gelaagdheid groter is dan gemeten. Tijdens de daaropvolgende vloedperiode verdwijnt dit verschil om pas weer aan het eind van de ebperiode terug te keren. Omdat de verticale gelaagdheid volgens DISTRO te groot is betekent dit dat in DISTRO de demping van de verticale uitwisseling van impuls en massa ook te groot is, zodat een te kleine weerstand in DISTRO het resultaat is. Dit laatste volgde ook reeds uit vergelijking van de verticale getijbeweging. Uit de onderlinge afstand in x-richting van de isopyknen en de vorm van de 1D-verdeling volgt bij vergelijking dat in DISTRO de longitudinale dispersie duidelijk te groot is ($\partial c/\partial x$ veel kleiner dan in de meting). De relatie $D_x \sim u^*$ (verg. 4.9) geeft in deze proef met een grote getij-amplitude en dus ook relatief grote snelheden een duidelijk te grote longitudinale dispersie.

5.3.3 Proef T30

In figuur 45 is het verloop van de belangrijkste Fourier-komponenten van het vertikaal getij als functie van x weergegeven, terwijl in figuur 46 voor een tweetal stations de getijcurven zelf zijn weergegeven. Uit vergelijking van het berekende en het gemeten getij met behulp van deze figuren blijkt dat

- DISTRO in de gehele goot een te grote getij-amplitude berekent. Enerzijds wordt dit verschil veroorzaakt, doordat de zee-randkonditie niet voldoet. Daarom is in figuur 45 ook het verloop van $A_1(x)$ aangegeven uitgaande van een reductie van 6% in opgedrukte a_0 . Daaruit blijkt anderzijds dat het verschil tussen berekende en gemeten amplitude A_1 met toenemende x toeneemt en dit duidt erop dat in DISTRO de weerstand te klein is
- DISTRO een te groot middenstandsverval dA_0/dx berekent. Een zelfde tendens wordt ook met een 1D-simulatie van deze proef gevonden [12]. Uit het verschil in weerstand tussen DISTRO en getijgoot is dit niet te verklaren, omdat een te grote dA_0/dx duidt op een te grote weerstand wat in tegenspraak is met de konklusie uit de vergelijking van de $A_1(x)$ -curven. Wel is een deel te verklaren uit het verschil in de gemeten en berekende getijbeweging, waardoor in de DISTRO-berekening een grotere golfopzet aanwezig is dan in de meting. Omdat echter het verschil in gemeten en berekende getijbeweging in de proeven T31 en T30 vergelijkbaar is (fig. 37 en 45) zal ook deze vergroting van de golfopzet in beide proeven vergelijkbaar zijn. Echter in proef T31 is de overeenstemming in gemeten en berekend middenstandsverval goed

terwijl er in T30 een significant te groot verval berekend wordt.

Evenals bij de 1D-simulatie van getijgootproeven [12] wordt $A_1(x)$ veel maatgevender voor het vertikaal getij geacht dan $A_0(x)$, zodat in het vervolg alleen de konklusie uit het $A_1(x)$ -verloop gebruikt wordt.

In de figuren 47 en 48 zijn de snelheidsvertikalen en in figuur 49 de bijbehorende getijdebiectcurven weergegeven voor de stations 1 en 7. Uit vergelijking van de gemeten en berekende snelheidsvertikalen valt op dat:

- rond LWK DISTRO grotere uitwisselingsstromen voorspelt dan uit de meting volgt
- tijdens MVS de tendens aanwezig is dat DISTRO een minder uniforme snelheidsvertikaal oplevert dan gemeten is en tijdens MES deze tendens juist omgekeerd is.

Dit laatste zou erop kunnen wijzen dat de gravitatiecirculatie in DISTRO zwakker wordt weergegeven dan volgens meting nodig is. Echter rond de kentering geeft DISTRO volgens het voorgaande juist een grote uitwisseling.

Uit vergelijking van de gemeten en berekende getijdebiectcurven (fig. 49) volgt dat:

- in station 1 tijdens de vloedfase de DISTRO-debieten groter zijn dan de gemeten debieten. Dit verschijnsel is in al de voorgaande proeven geconstateerd en wordt toegeschreven aan een aanloopverschijnsel in de goot
- in de meetstations meer stroomopwaarts de berekende maxima van de vloed- en ebstroming (zie ook tabel 3) duidelijk kleiner zijn dan de gemeten maxima. Dit kan grotendeels toegeschreven worden aan het feit dat er in het midden van de goot, waar gemeten is, de grootste snelheden optreden.

In figuur 50 is de gelaagdheid op LWK en de verandering van de dichtheid rond LWK in station 1 vergeleken voor meting en berekening. De gelaagdheid blijkt in DISTRO aan het eind van de ebperiode in de mond veel groter te zijn dan gemeten is (fig. 50b). De overgangperiode voor de zout-randkonditie in de mond blijkt, uitgaande van dit verschil in gelaagdheid op LWK, redelijk goed te voldoen.

In figuur 51 is in het x-z-vlak de vorm van een vijftal isopyknen op 4 karakteristieke tijdstippen vergeleken voor meting en berekening. Ook uit deze figuur blijkt dat op tijdstip LWK de verticale gelaagdheid in DISTRO aanzienlijk groter is dan gemeten is. In de vloedfase wordt dit verschil kleiner: tijdens HWK is dit verschil in verticale gelaagdheid bijna geheel verdwenen. Op het tijdstip MES is de gelaagdheid volgens DISTRO iets groter dan gemeten

is, in de tijd neemt dit verschil dan verder toe tot het tijdstip van LWK.

In figuur 52 is de één-dimensionale concentratieverdeling vergeleken voor meting en berekening. Uit deze figuur en ook uit figuur 51 blijkt dat DISTRO een veel te grote zoutindringing voorspelt. Uit de vorm van de $\bar{c}(t)$ -curven en enigszins uit de longitudinale concentratiegradiënt is te zien dat in DISTRO de longitudinale dispersie te groot wordt weergegeven. Dit verschil was ook in proef T31 duidelijk aanwezig.

Omdat in DISTRO de gelaagdheid groter is dan in de meting wordt in DISTRO ook de demping van de verticale uitwisseling te groot weergegeven, zodat een te kleine weerstand in DISTRO het resultaat is. Dit laatste volgde ook reeds uit de vergelijking van de verticale getijbeweging.

5.3.4 Konklusies

Het totaalbeeld van de vergelijking van de getijbeweging en de zoutverdeling, zoals deze gemeten is in de goot en berekend is met DISTRO, is samen te vatten in de volgende tabel (waarbij DISTRO ten opzichte van meting weergegeven is):

randkonditie a_0 in $x = 0$	klein (T10)	groot (T31 en T30)
gelaagdheid	te klein	te groot
zoutindringing	te klein	te groot
demping verticale uit- wisseling	te klein	te groot
weerstand	te groot	te klein
verloop getij-amplitude met x	te klein	te groot

Tabel 4 Tendensen uit verifikatie-onderzoek

De in bovenstaande tabel opgesomde verschijnselen vertonen een logische samenhang. Uitgaande van bijvoorbeeld het te klein zijn van de verticale gelaagdheid volgt:

- een zoutindringing die te klein is
- een demping van de verticale uitwisseling die te klein is.

Dit laatste gegeven levert een te grote weerstand op met als gevolg dat het verloop van de getijamplitude met toenemende x kleiner is.

Dit resultaat benadrukt de centrale rol van de verticale gelaagdheid in de weergave van de getijbeweging en de zoutverdeling. Uit dit onderzoek volgt dat de verticale gelaagdheid voor de gelaagde proef T10 (kleine a_0) te klein is en voor de gemengde proeven T31 en T30 (grote a_0) te groot. In grote trekken betekent dit dus dat de verticale gelaagdheid in DISTRO over een te klein bereik varieert bij variatie van de opgedrukte getij-amplitude a_0 .

Behalve de in tabel 4 gegeven systematische verschillen tussen DISTRO en de getijgootmetingen zijn nog de volgende opvallende verschillen gevonden (die niet direkt vanuit het verschil in gelaagdheid te verklaren zijn):

- in 2 van de 3 zout/zoetproeven (T10 en T30) is het berekende middenstandsverval significant groter dan uit de meting volgt. Hetzelfde verschil is ook gevonden bij vergelijking van de getijgootmetingen en 1D-berekeningen (zie rapport M 896-38B [12]). Een éénduidige verklaring hiervoor is niet bekend
- er kan niet volstaan worden met een vaste correctie van de in de mond van de goot ($x = 0$) op te drukken getij-amplitude a_0 . (Reduktie van het getij dat opgedrukt wordt door de zeeklep van de getijgoot, die zich op 8 m van de mond van de goot bevindt.) In alle 3 de zout/zoetproeven blijkt de bij de ijkproef gevonden reductie van 3% te klein te zijn en orde 6% te moeten zijn
- in alle proeven is in station 1 gevonden dat in de vloedfase de vloeddebieten (en snelheidsvertikalen) volgens DISTRO groter zijn dan gemeten is, terwijl in de overige stations een tegengestelde tendens gevonden is. Dit wijst erop dat er sprake is van een aanloopverschijnsel: de snelheidsverdeling moet zich nog in breedterichting ontwikkelen
- in de ijkproef T20 en in sterkere mate nog in de meer gelaagde proef T10 worden de berekende snelheidsvertikalen in de vloedfase vervormd ten gevolge van het optreden van een Ri-instabiliteit. Zoals in appendix A is beschreven kan deze instabiliteit voorkomen worden door een andere vorm van de dempingsrelaties aan te nemen dan in DISTRO gekozen is. Deze nieuwe keus geeft echter geen essentiële verbetering van de dichtheidsverdeling
- in de gelaagde proef T10 worden de uitwisselingsstromen rond LWK te zwak door DISTRO weergegeven, terwijl in de gemengde proeven deze tendens niet of zelfs de tegenovergestelde tendens gevonden is. Uit de vorm van de snelheidsvertikalen tijdens MES en MVS daarentegen volgt wel weer dan ook in de gemengde proeven mogelijk de gravitatiecirculatie te klein is
- in de ijkproef is reeds gekonstateerd dat de in de proef optredende grote dichtheidsgradiënten (in verticale richting bij het grensvlak en in horizontale richting bij de top van de zouttong) sterk afgevlakt in DISTRO worden

weergegeven. In de gelaagde proef T10 is deze tendens nog in sterkere mate aanwezig

- de longitudinale dispersierelatie (4.9) geeft de grootte van de dispersie niet juist weer:

- . in de proef met de kleine getij-amplitude (T10) levert deze relatie een te kleine dispersiecoëfficiënt op
- . in de proeven met een grote getij-amplitude (T31 en T30) levert deze relatie een te grote dispersiecoëfficiënt op.

De invloed van de verticale gelaagdheid moet op een of andere wijze in deze relatie opgenomen worden. Daartoe is nader onderzoek nodig.

6 Samenvatting

Het tweedimensionale, breedte-gemiddelde numerieke model DISTRO is opgezet om de getijbeweging en de zoutverdeling in een smal estuarium te kunnen berekenen in een zoveel mogelijk voorspellende zin. Dit laatste betekent bijvoorbeeld dat in het model zoveel mogelijk van zwakke randkondities in plaats van harde, gemeten, randkondities gebruik gemaakt wordt. Om de mogelijkheden en beperkingen van dit model te toetsen is het model allereerst geijkt en daarna geverifieerd aan metingen in de getijgoot.

Uit de ijking van het model aan de homogene proef T22 en de daarbijbehorende zout/zoetproef T20 volgde dat DISTRO de getijbeweging en de zoutverdeling goed kan simuleren, doch dat er wel enkele systematische verschillen tussen goot en DISTRO aanwezig blijven. (In de meting is de verticale dichtheidsgradiënt bij het grensvlak en de horizontale dichtheidsgradiënt bij de top van de zouttong duidelijk groter dan DISTRO berekent.) Uitgaande van dit geijkte model is de getijbeweging en de zoutverdeling voorspeld voor 2 andere homogene en 3 andere zout/zoetgetijgootproeven met gewijzigde randkondities. Ten aanzien van de voorspellende waarde volgt uit het hier gerapporteerde onderzoek dat

- in homogene getijgootomstandigheden het model de getijbeweging goed voorspelt
- in zout/zoetomstandigheden het model de getijbeweging redelijk voorspelt als de juiste zeerandkonditie opgedrukt wordt
- de verticale gelaagdheid volgens DISTRO minder varieert met de variërende randkondities (voornamelijk a_0) dan gemeten is in de goot. Daardoor is de gelaagdheid in de gelaagde proef T10 te klein en in de gemengde proeven T30 en T31 te groot. Uit dit niet goed voorspellen van de verticale gelaagdheid volgt dat de dichtheidsverdeling en de zoutindringing niet juist voorspeld worden en dat dit effect ook in de weergave van de getijbeweging enigszins te zien is.

Daarnaast zijn er nog diverse andere systematische verschillen tussen DISTRO en getijgoot gekonstateerd die in paragraaf 5.3.4 nader beschreven zijn.

Uit het verifikatie-onderzoek blijkt dat de huidige turbulentiemodellering in DISTRO niet voldoende is om de zoutverdeling in de getijgoot gedurende de gehele getijcyclus, noch voor een heel bereik van min of meer gelaagde getijgootomstandigheden te voorspellen. Dit moet in de eerste plaats toegeschreven worden aan de onvoldoende kennis van de invloed van de gelaagdheid op de

vertikale uitwisseling. In de tweede plaats is het in gelaagde omstandigheden de vraag of, zoals in het huidige model DISTRO de mengweglengte alleen van de afstand tot de bodem afhangt of dat ook de afstand tot het interne grensvlak bepalend is [1].

Daarnaast moet ook de modellering van de longitudinale dispersie nader onderzocht worden. Een aspekt daarbij is bijvoorbeeld de invloed van de gelaagdheid op de vorm en grootte van de longitudinale dispersiecoëfficiënt. Dit punt zal zeker een rol spelen bij toepassing van DISTRO op een getijrivier.

De overgangsfunctie voor de zouttrandkonditie is een soort schematisatie van de gemeten zouttrandkonditie. Bij een mogelijke toekomstige toepassing op een getijrivier zal voor het invullen van deze functie toch een zekere kennis van de lokale situatie bij de zeerland nodig zijn.

APPENDIX A - Ri-stabiliteit

In het in dit rapport beschreven DISTRO-model worden de verticale turbulente uitwisseling van impuls en massa beschreven als gradiënt-type transporten; ze zijn evenredig met de verticale gradiënt van de longitudinale snelheid respectievelijk met de verticale gradiënt van de concentratie (zie verg. 3.20 en 3.21). De evenredigheidskonstanten ϵ_z respectievelijk D_z hangen af van de mengweglengte en de verticale snelheidsgradiënt $\partial u/\partial z$ en zijn in gelaagde omstandigheden tevens een functie van het gradiënt Richardson-getal (zie verg. 3.22 en 3.23). De grootte van dit Richardson-getal hangt af van zowel de verticale snelheidsgradiënt $\partial u/\partial z$ als ook van de verticale concentratiegradiënt (zie verg. 3.24). Dit betekent dat er via deze afhankelijkheid van impuls- en massatransport van het Richardson-getal een koppeling tussen snelheidsverdeling en concentratieverdeling aanwezig is. Kranenburg [6] heeft voor de mengwegbeschrijving van de turbulentie voor een eenvoudig geval (lineaire snelheids- en concentratieprofielen, die tijdsafhankelijk zijn) onderzocht onder welke voorwaarden deze koppeling stabiele oplossingen geeft. Via een lineaire stabiliteitsanalyse leidde hij stabiliteitsvoorwaarden voor de mengweghypothese af volgens welke de dempingsrelaties $F(Ri)$ en $G(Ri)$ moeten voldoen aan:

$$F\left[2 + \frac{d}{dRi} \left(\frac{G}{F} Ri\right)\right] + \left(2 - \frac{G}{F}\right)(-Ri \frac{dF}{dRi}) > 0 \quad (A1)$$

$$\frac{d}{dRi} \left(\frac{G}{F^{3/2}} Ri\right) > 0 \quad (A2)$$

De in DISTRO gebruikte dempingsrelaties (4.8) voldoen niet over het gehele Ri -bereik aan deze voorwaarden A1 en A2. Substitutie van de exponentiële dempingsrelaties van de vorm:

$$F = \exp(-fRi) \text{ met } f > 0 \quad (A3)$$

$$G = \exp(-gRi) \text{ met } g > 0$$

in de voorwaarden A1 en A2 levert de stabiliteitsvoorwaarden waaraan de exponentiële dempingsrelaties (A3) moeten voldoen:

$$2 + 2Ri f + (1 - gRi) \exp(f-g) Ri > 0 \quad (A4)$$

$$1 - gRi + 3f/2 Ri > 0 \quad (A5)$$

In het verifikatie-onderzoek is gebruik gemaakt van $f = 4$ en $g = 18$ (zie verg. 4.8). Dit betekent dat aan voorwaarde A5 slechts voldaan is als $Ri < 1/12$. Bij grotere Ri -getallen wordt er niet aan de stabiliteitsvoorwaarden van Kranenburg voldaan. Het effect van deze Ri -instabiliteit wordt geïllustreerd aan de afwijkende vorm van de snelheidsprofielen in figuur A1, die met de exponentiële functies met $f = 4$ en $g = 18$ berekend zijn. In het begin van de vloedperiode bevindt het snelheidsmaximum in een snelheidsprofiel zich nabij de bodem. In de grenslaag tussen de zoute onderlaag en de zoete bovenlaag heeft de verticale dichtheidsgradiënt een zekere waarde. Treedt het snelheidsmaximum nu op in deze grenslaag (zie fig. A1) dan zorgt de naar nul naderende snelheidsgradiënt $\partial u/\partial z$ voor grote Ri -waarden. Op deze plaats treedt dan ook de zogenaamde Ri -instabiliteit op, die in de snelheidsprofielen zichtbaar is aan de scherpe piek ter plaatse van de grenslaag.

Met het opkomen van de vloed wordt de zoute onderlaag in het vaste station 2 (fig. A1) dikker. Met de grenslaag beweegt ook deze snelheidspiek van bodem naar oppervlak toe om rond het tijdstip MVS te verdwijnen in het wateroppervlak.

Bij gebruik van exponentiële dempingsrelaties wordt er aan de stabiliteitsvoorwaarden A4 en A5 voldaan als

$$f > 2g/3 \quad (A6)$$

Deze voorwaarde volgt als een voldoende voorwaarde direkt uit (A5) en is tevens een voldoende voorwaarde voor (A4). Toepassen van exponentiële dempingsrelaties met $f = 6$ en $g = 9$ (die dus voldoen aan A6) levert echter nog steeds snelheidsprofielen op, met een weliswaar kleinere piek ter plaatse van het grensvlak. In het numerieke model DISTRO is de voorwaarde A6 blijkbaar nog niet streng genoeg om het optreden van instabiliteit te voorkomen (kan mede een gevolg zijn van verticale diskretisatie).

Bij gebruik van dempingsrelaties van de vorm

$$F = (1 + aRi)^{-n} \text{ met } a, n > 0$$

$$G = (1 + bRi)^{-m} \text{ met } b, m > 0$$

(A7)

volgt via substitutie van deze relaties in de voorwaarden A1 en A2 dat voldoende voorwaarden zijn

$$n > \frac{2}{3} (m-1)$$

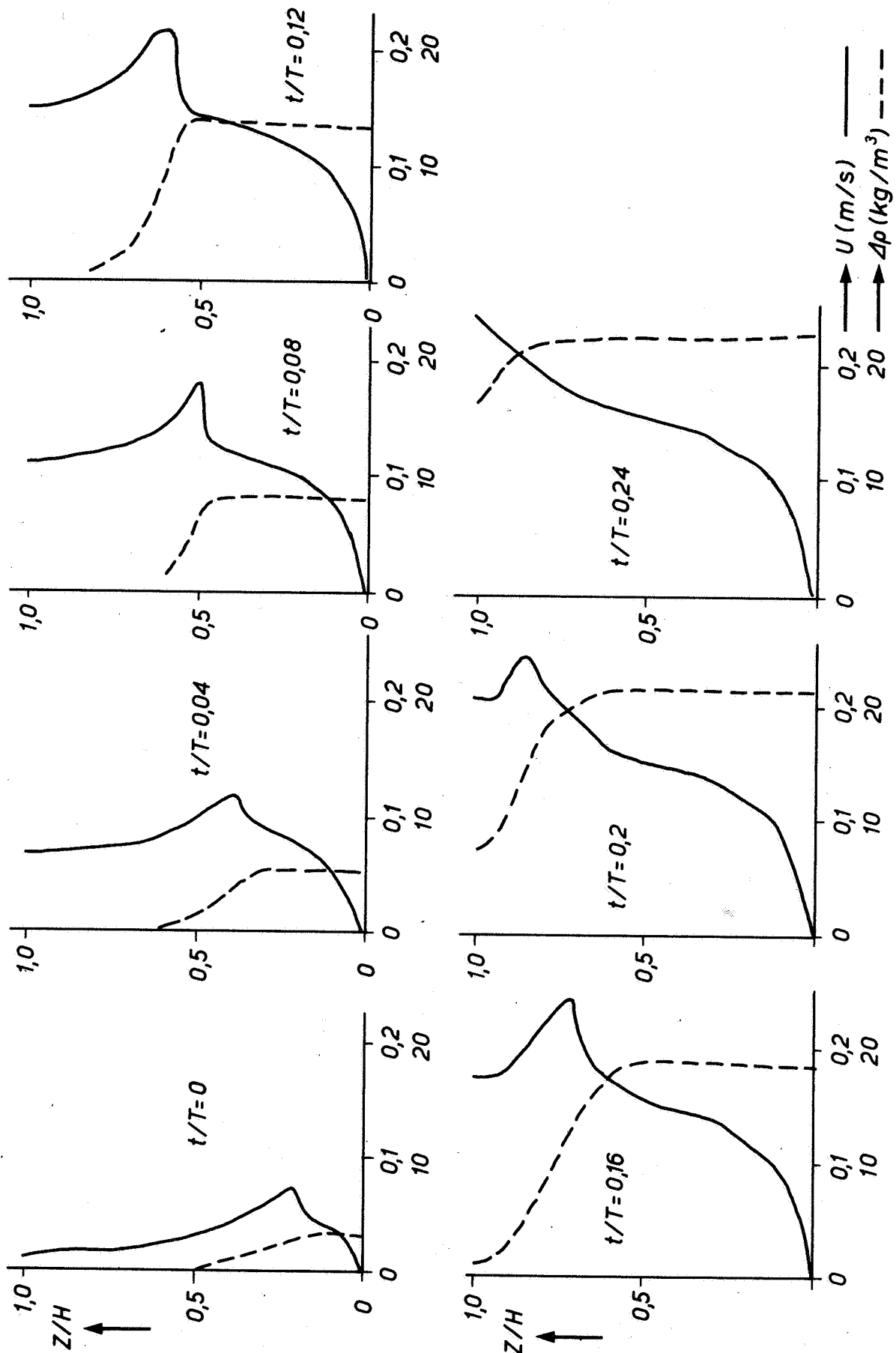
$$a/b > \frac{m-1}{1+3/2n} \quad (A8)$$

$$2(1+bRi)^{m+1} (1+aRi+anRi) + (1+aRi)^{n+1} (1+bRi-bmRi) > 0$$

Uit (A8) volgt dat voor alle (positieve) a , b en n aan deze voorwaarden voldaan is als $m < 1$.

Als voorbeeld is in figuur A2 het resultaat getoond van een DISTRO-berekening met dempingsrelaties van de vorm A7 met $m = n = 1$, $a = 8$, $b = 80$ die aan de stabiliteitsvoorwaarden (A8) voldoet. In de berekende snelheidsprofielen van figuur A2 ontbreekt tijdens de vloedperiode de scherpe piek die in figuur A1 te zien is.

De dempingsrelaties van de vorm (A7) met $(m = n) < 1$ blijken uit numerieke experimenten met DISTRO een beter gedrag ten aanzien van de Ri -instabiliteit te vertonen dan de exponentiële functies, ook in het geval dat de verticale snelheids- en concentratieverdeling vergelijkbaar zijn. De systematische afwijkingen tussen DISTRO en getijgoot (vertikale dichtheidsgradiënt in de grenslaag en de longitudinale dichtheidsgradiënt bij de top van de zouttong) zoals deze beschreven zijn bij de ijking van DISTRO (Hfdst. 4) blijven echter bij gebruik van dempingsrelaties van het type (A7) aanwezig. De berekende dichtheidsverdeling verbetert dus niet essentieel door het gebruik van de relaties (A7).



SNELHEIDS - EN DICHHEIDSPROFIEL IN STATION 3
 DISTR0 BEREKENING 5B (2^e GETJ)

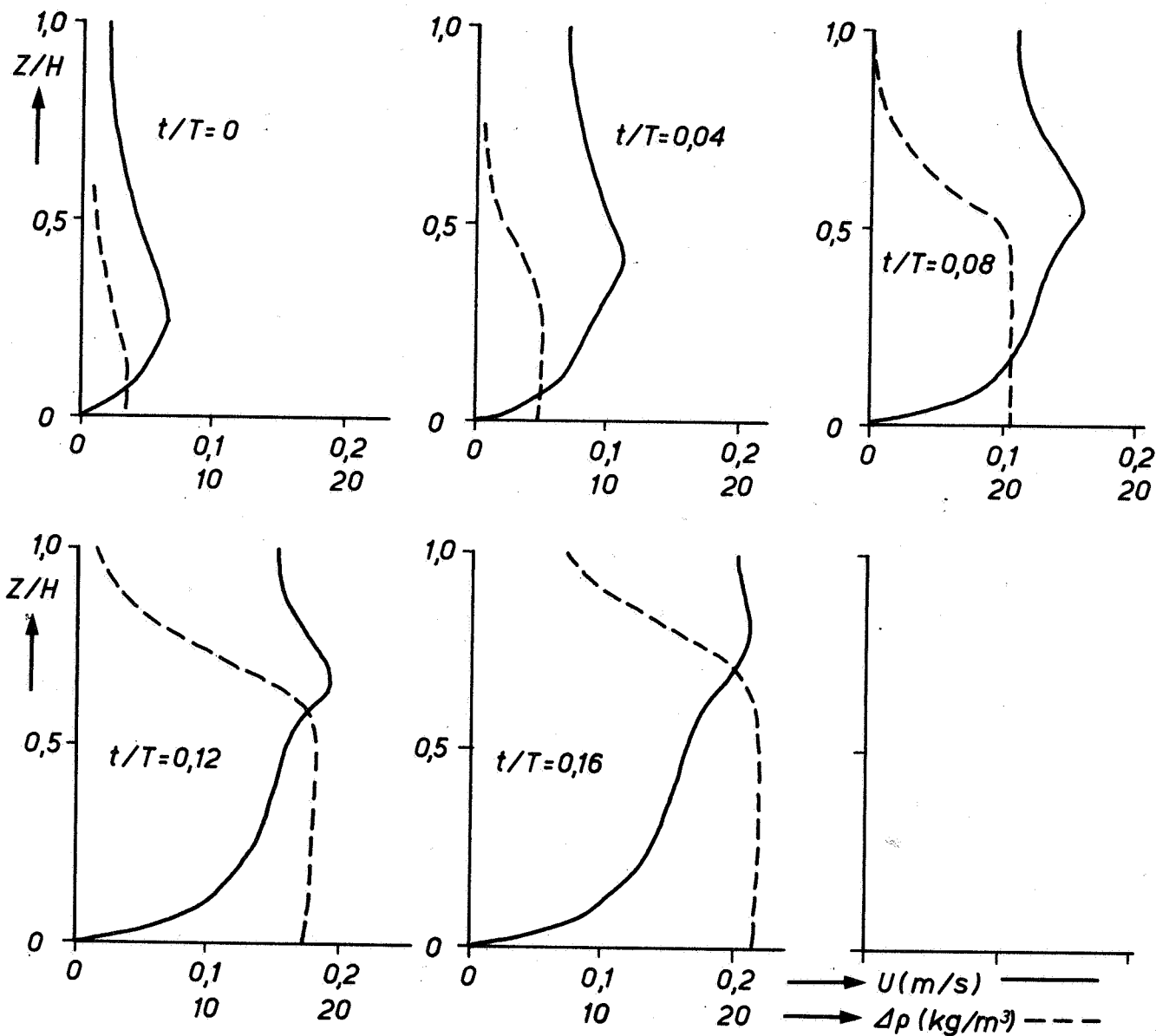
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-3028

FIG. A 1



SNELHEIDS - EN DICHTHEIDSPROFIELEN IN STATION 2
VOLGENS DISTRO - 16 (2^e GETU)

WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3029

FIG. A2

REFERENTIES

- 1 ABRAHAM, G., "On internally generated estuarine turbulence"
Proceedings of Sec. Int. Symp. on stratified flows, Trondheim paper 213,
pp. 344-353, 1980
- 2 Delft Hydraulics Laboratory, "Computation of flow in an estuary; numeri-
cal accuracy of the model"
report on mathematical investigation, R 897-IV, 1979
- 3 Delft Hydraulics Laboratory, "Computation of flow in an estuary; calibra-
tion for homogeneous flow in a tidal flume"
report on mathematical investigation, R 897-V, april 1979
- 4 Delft Hydraulics Laboratory, "Computation of flow in an estuary; calibra-
tion for inhomogeneous flow in a tidal flume"
report on mathematical investigation, R 897-VI, january 1980
- 5 Delft Hydraulics Laboratory, "Computation of flow in an estuary; extended
calibration for inhomogeneous flow in a tidal flume",
report on mathematical investigation, R 897-VII, 1980
- 6 KRANENBURG, C., "Analyses of a gradient transportmodel for turbulent
density-stratified shear flow"
Delft Univ. of Techn., Departm. of Civil Engin., report nr. 80-2, 1980
- 7 PERRELS, P.A.J. and KARELSE, M., "A two-dimensional numerical model for
salt intrusion in estuaries"
In "Hydrodynamics of estuaries and fjords", J.C.J. Nihoul, ed. pp. 106-
125, 1978
- 8 PERRELS, P.A.J. and KARELSE, M., "A two-dimensional laterally averaged
model for salt intrusion in estuaries"
contribution to the state of the art Symposium on Predictive abilities of
surface water flow and transport models, Berkeley, USA, 1980

REFERENTIES (vervolg)

- 9 REES, A.J. van, "Experimental results on exchange coefficients for non-homogeneous flow"
XIVth IAHR congress, paper C36, 1975
- 10 Waterloopkundig Laboratorium, "Tweedimensionaal onderzoek turbulente diffusiekoëfficiënten"
rapport M 896-28, 1976
- 11 Waterloopkundig Laboratorium, "Onderzoek met bodemruwheid ter verifikatie van tweedimensionaal numeriek zoutindringingsmodel, deel A homogene proeven"
rapport M 896-38A, 1979
- 12 Waterloopkundig Laboratorium, "Onderzoek met bodemruwheid ter verifikatie van tweedimensionaal numeriek zoutindringingsmodel, deel B zout/zoetproeven"
rapport M 896-38B, 1979
- 13 Waterloopkundig Laboratorium, "Toepasbaarheid ééndimensionaal diffusiemodel homogene getijstroming in kanalen"
rapport M 896-41 deel III, 1980
- 14 Waterloopkundig Laboratorium, "Getijgootonderzoek; invloed dwarsmiddeling op grootte van dispersietransporten in 2D (vertikaal)-beschrijving"
rapport M 896-46, 1981

Tabel 1

a. Gegevens referentieproef T10

Kondities		Eenheid	Model	Bijzonderheden
waterhoogte	\tilde{h}	m	0,216	
gootlengte	L	m	179,34	
bovenafvoer	Q_{Riv}	m^3/s	- 0,0029	
getijverschil	$2a_o$	m	0,025	
zoutconcentratie zee	c_{max}	kg/m^3	30	
ruwheid goot	C	$m^{1/2}/s$	19	bodemplaatjes
luchtinjectie	Q_L	geen lucht		2 x 2 cm
getijperiode	T	s	558,75	

b. Proevenprogramma

Omstandigheden (behalve $\Delta\rho$) afwijkend van REFER.	$\Delta\rho \sim 22,5 \text{ kg/m}^3$	$\Delta\rho \sim 10 \text{ kg/m}^3$	$\Delta\rho = 0$
REFER	T10		T12
$2a_o = 0,05 \text{ m}$	T20		T22
$2a_o = 0,075$	T30*	T31*	
$Q_{Riv} = 2,175 \text{ l/s}^*$			
$2a_o = 0,075 \text{ m}$			T32
$Q_{Riv} = 1,45 \text{ l/s}$			
$2a_o = 0,075 \text{ m}$		T41	T42
$Q_{Riv} = 0,3 \text{ l/s}$			
L = 64,05 m			

*Vanwege de grootte van Li_{max} bij keuze van $Q_{Riv} = 1,45 \text{ l/s}$ is in de proeven T30 en T31 de rivierafvoer vergroot.

Tabel 1c

Fouriercomponenten van de bovenstroomse randvoorwaarde op $x = 100,65$ m

komponent		T22	T20*	T12	T10**	T32	T31/T30
Bo	m^3s^{-1}	$-2,9 \cdot 10^{-3}$		$-2,9 \cdot 10^{-3}$		$-1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-3}$
B1	m^3s^{-1}	$14,7 \cdot 10^{-3}$		$10,12 \cdot 10^{-3}$		$18,344 \cdot 10^{-3}$	$18,38 \cdot 10^{-3}$
$\phi 1$	rad	1,453	1,541	1,342	1,431	1,515	1,512
B2	m^3s^{-1}	$3,15 \cdot 10^{-3}$		$1,72 \cdot 10^{-3}$		$4,138 \cdot 10^{-3}$	$4,46 \cdot 10^{-3}$
$\phi 2$	rad	3,375	3,552	-3,037	-2,860	-2,594	-2,784
B3	m^3s^{-1}	$1,73 \cdot 10^{-3}$		$0,98 \cdot 10^{-3}$		$2,507 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
$\phi 3$	rad	2,286	2,555	2,151	2,417	2,576	2,291
B4	m^3s^{-1}	$0,93 \cdot 10^{-3}$		$0,44 \cdot 10^{-3}$		$1,138 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$
$\phi 4$	rad	4,475	-1,450	-1,851	-1,496	-1,359	-1,822
B5	m^3s^{-1}	$0,10 \cdot 10^{-3}$		$0,03 \cdot 10^{-3}$		$0,333 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$
$\phi 5$	rad	2,598	3,011	1,984	2,427	-2,631	-3,322
B6	m^3s^{-1}	$0,16 \cdot 10^{-3}$		$0,06 \cdot 10^{-3}$		$0,256 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$
$\phi 6$	rad	4,247	-1,512	-2,335	-1,803	-1,092	-1,789
B7	m^3s^{-1}	$0,06 \cdot 10^{-3}$		$0,01 \cdot 10^{-3}$		$0,167 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
$\phi 7$	rad	3,907	4,589	-2,719	-2,099	-1,661	-2,172
B8	m^3s^{-1}	$0,18 \cdot 10^{-3}$		$0,06 \cdot 10^{-3}$		$0,301 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$
$\phi 8$	rad	5,237	-0,326	-1,345	-0,636	0,035	-2,663

* amplituden Bo t/m B8 zijn hetzelfde als in T22

** amplituden Bo t/m B8 zijn hetzelfde als in T12

Tabel 2. Overzicht van de berekeningen met waarden van de gebruikte parameters

DISTRO- bereke- ning	simulatie van proef	a ₀ m	damping %	fasever- schuiving rad	Δp kgm ⁻³	g(t,z) ¹⁾ kgm ⁻³ s ⁻¹	Q _r m ³ s ⁻¹	QRAND ²⁾	z ₀ ³⁾ m	F(RI) ⁴⁾	G(RI) ⁴⁾	ε _x m ² s ⁻¹	D _x ⁵⁾ m ² s ⁻¹	N _x	N _z	N _t	τ _v s	τ _D s	CPU ⁶⁾ s
H1	T22	0,025	3	0,02	0,0	α	0,0029	T22	c ₁	I	I	0,37	b	55	24	2400	0,93	0,23	1165
H2	T12	0,0125	3	0,02	-	-	0,0029	T12	c ₁	I	I	0,37	-	55	24	2400	0,93	-	359
H3	T32	0,0375	3,5	0,035	-	-	0,00145	T32	c ₁	I	I	0,37	-	55	24	2400	0,93	-	363
I	T20	0,025	3	0,02	22,8	β	0,0029	T20	c ₁	VR	VR	0,37	a	55	24	4800	0,93	0,23	
II	T20	0,025	3	0,02	22,8	β	0,0029	T20	c ₁	MA	MA	0,37	a	55	24	4800	0,93	0,23	
II	T20	0,025	3	0,02	22,8	β	0,0029	T20	c ₁	DTF	DTF	0,37	a	55	24	4800	0,93	0,23	3514
I2	T10	0,0125	3	0,02	21,5	β	0,0029	T10	c ₁	DTF	DTF	0,37	a	55	24	4800	0,93	0,23	3448
I3	T30	0,0375	3,5	0,035	21,8	β	0,00213	T30	c ₁	DTF	DTF	0,37	a	55	24	4800	0,93	0,23	3483
I4	T31	0,0375	3,5	0,035	10,1	β	0,00213	T31	c ₁	DTF	DTF	0,37	a	55	24	4800	0,93	0,23	3445

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met L = 100,65 m, H = 0,216 m en T = 558,75 s

1) de Griekse letters duiden op α: c_n + 7($\frac{H-z}{H}$) c_n

2) in tabel 1c is aangeduid wat letters betekenen
β: c_n + 3($\frac{H-z}{H}$) c_n

3) c₁: z₀ = 0,0050 m op eerste 61,3 m en z₀ = 0,0064 m op de laatste 34,35 m van de goot

4) VR: F(RI) = (1+10RI)^{-0,5} G(RI) = (1+3,3RI)^{-1,5}

MA: F(RI) = exp(-4RI) G(RI) = exp(-15RI)

DTF: F(RI) = exp(-4RI) G(RI) = exp(-18RI)

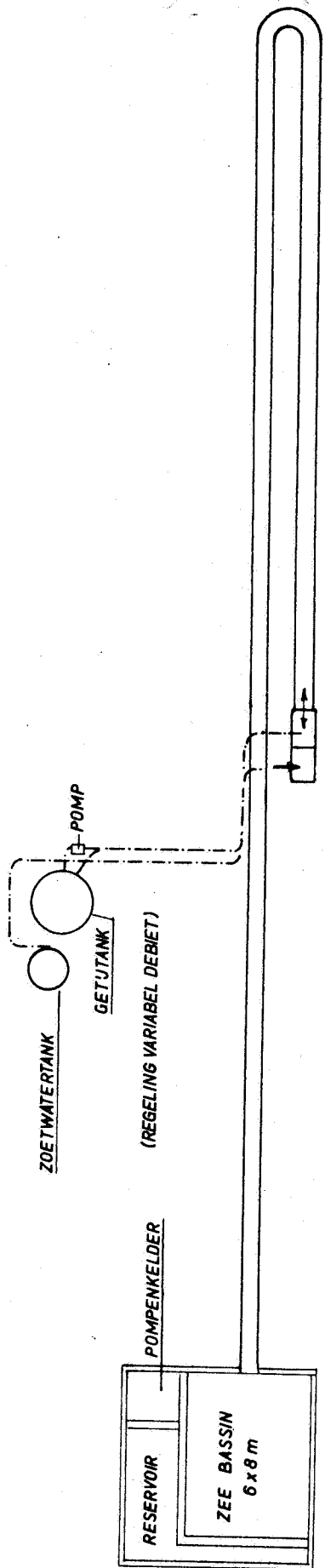
5) de letters duiden aan a: 4,5 $\overline{u^*}$ b + 0,015

b: 2,0 $\overline{u^*}$ b + 0,005

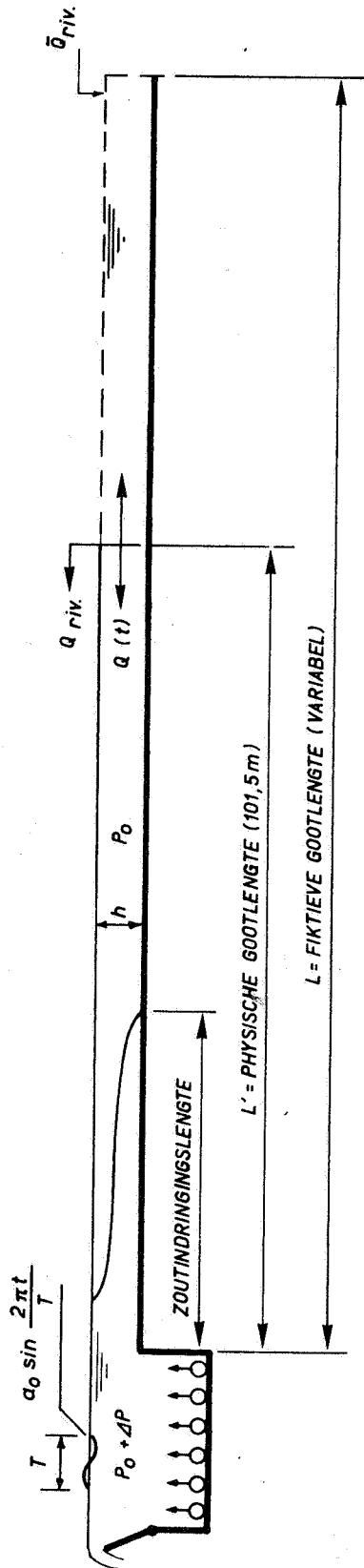
6) op een CDC-6600 computer

Tabel 3 Fouriercomponenten van het horizontale getij

metingen	berekeningen	positie (m)	B_0 (m^3s^{-1})	B_1 (m^3s^{-1})	ϕ_1 (rad)
T12		3,66	-0,0032	0,0182	1,077
	H2		-0,0029	0,0191	1,130
T12		47,58	-0,0028	0,0160	1,278
	H2		-0,0029	0,0161	1,265
T10		3,66	-0,0035	0,0145	1,100
	I2		-0,0029	0,0197	1,078
T10		47,58	-0,0032	0,0167	1,344
	I2		-0,0029	0,0153	1,243
T22		10,98	-0,0033	0,0290	1,189
	H1		-0,0029	0,0278	1,209
T22		47,58	-0,0031	0,0246	1,370
	H1		-0,0029	0,0237	1,352
T20		3,66	-0,0029	0,0271	1,084
	I1		-0,0029	0,0289	1,126
T20		47,58	-0,0028	0,0233	1,346
	I1		-0,0029	0,0238	1,336
T32		3,66	-0,0037	0,0359	1,189
	H3		-0,00145	0,0361	1,202
T32		47,58	-0,00137	0,0325	1,429
	H3		-0,00145	0,0297	1,411
T30		3,66	-0,0018	0,0374	1,148
	I3		-0,0021	0,0379	1,138
T30		47,58	-0,0025	0,0310	1,395
	I3		-0,0021	0,0306	1,349
T31		3,66	-0,0033	0,0351	1,159
	I4		-0,0021	0,0366	1,180
T31		47,58	-0,0025	0,0322	1,442
	I4		-0,0021	0,0300	1,391



a. BOVENAANZICHT GETJUGOOT



b. ZJAAANZICHT GETJUGOOT

OVERZICHT VAN DE GETJUGOOT MET NOTATIES

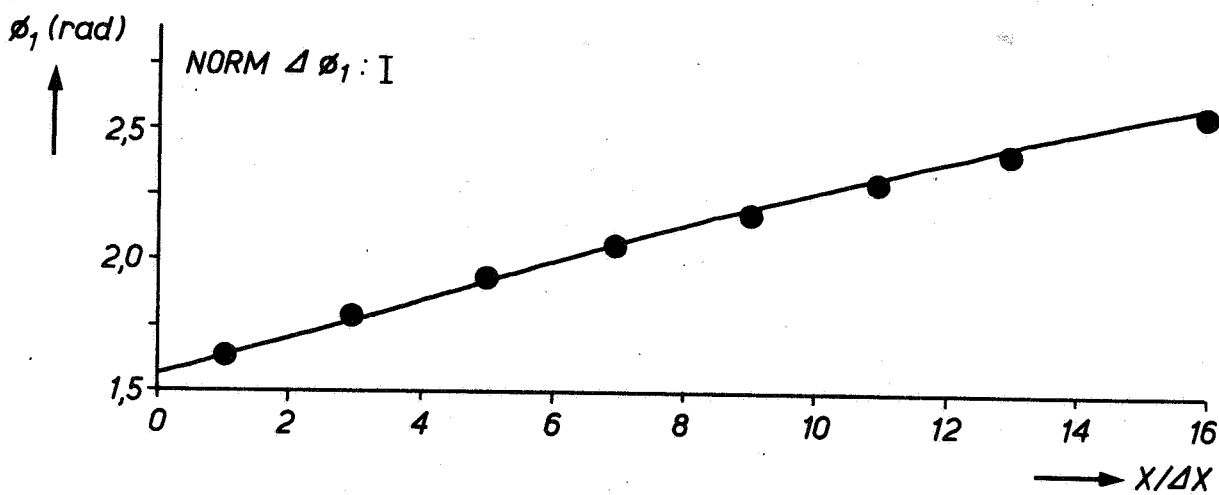
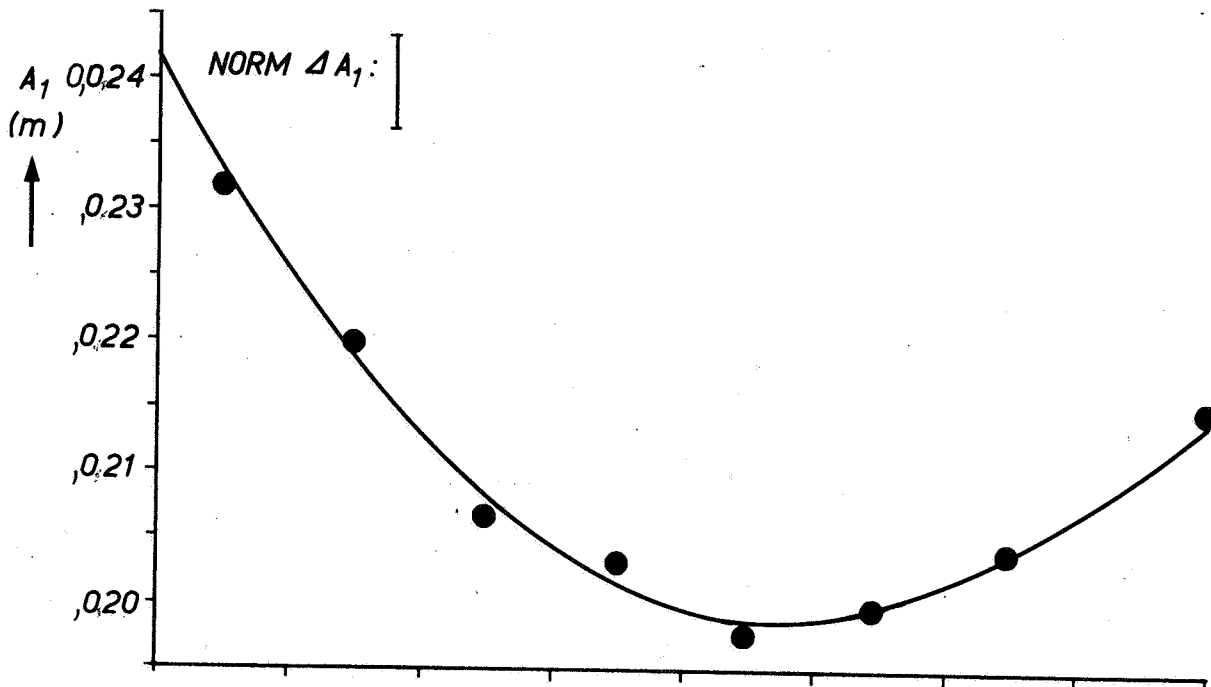
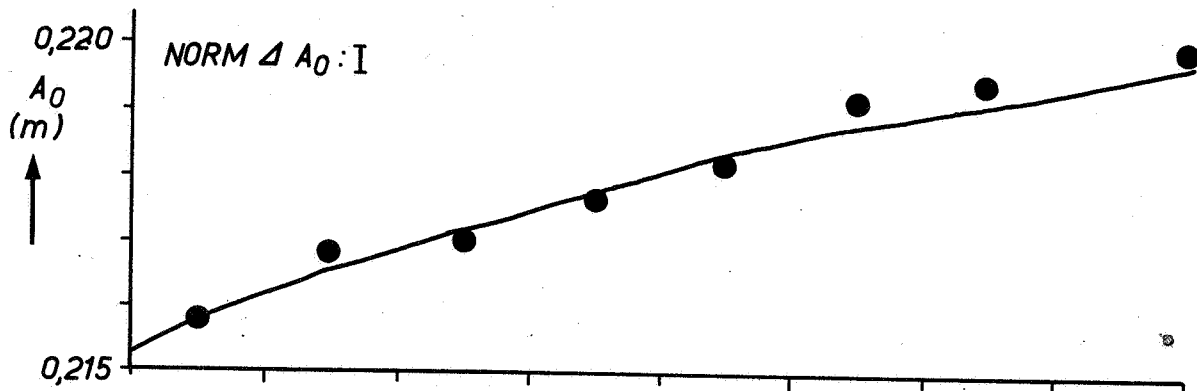
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2976

FIG. 1

W_K

A4



● GOOTPROEF (T 22)
 — DISTRO (H 1)

VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X
 VERGELIJING GETJGOOT - DISTRO

T22

WK

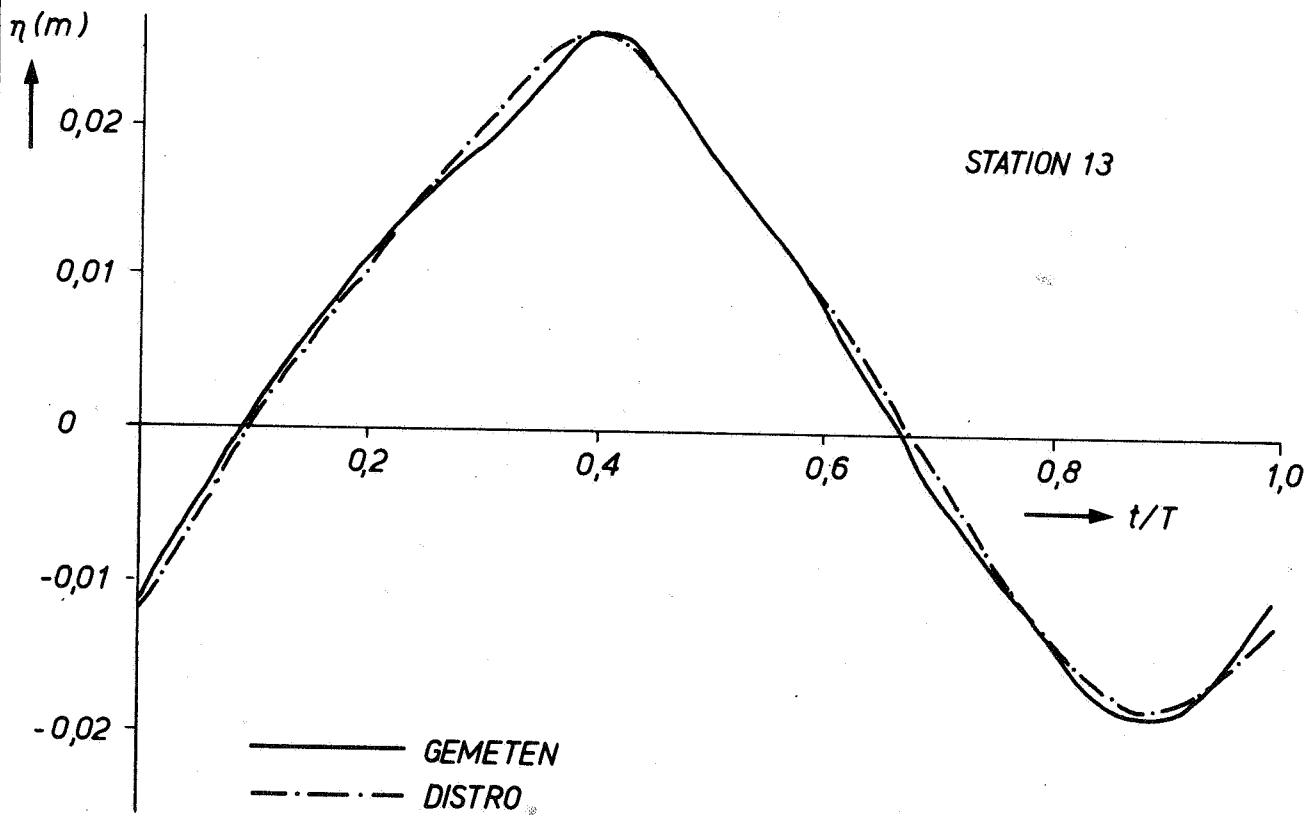
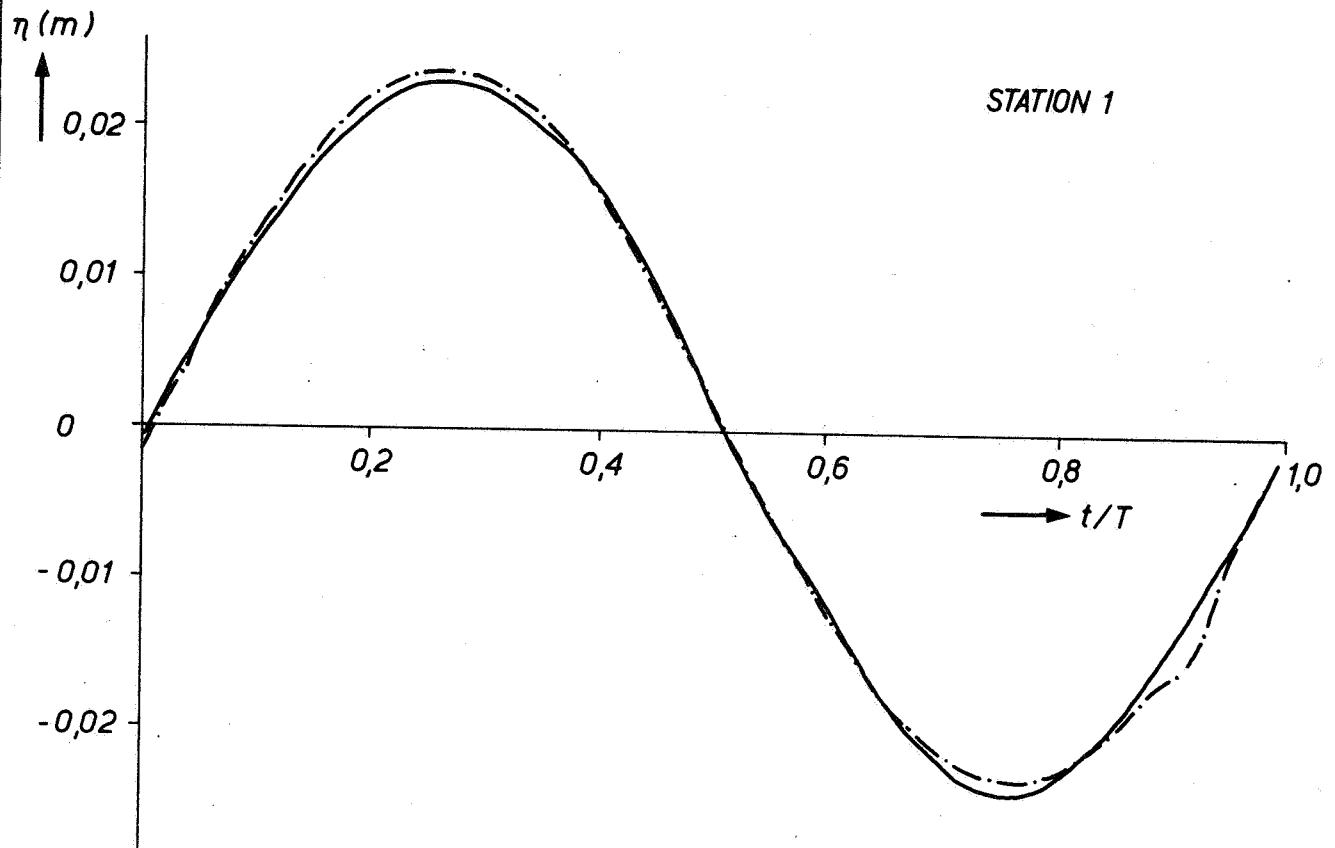
$\Delta X = 3,66$ m

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2978

FIG. 2



VERGELUKING GEMETEN EN BEREKEND VERTIKAAL GETUJ

T22

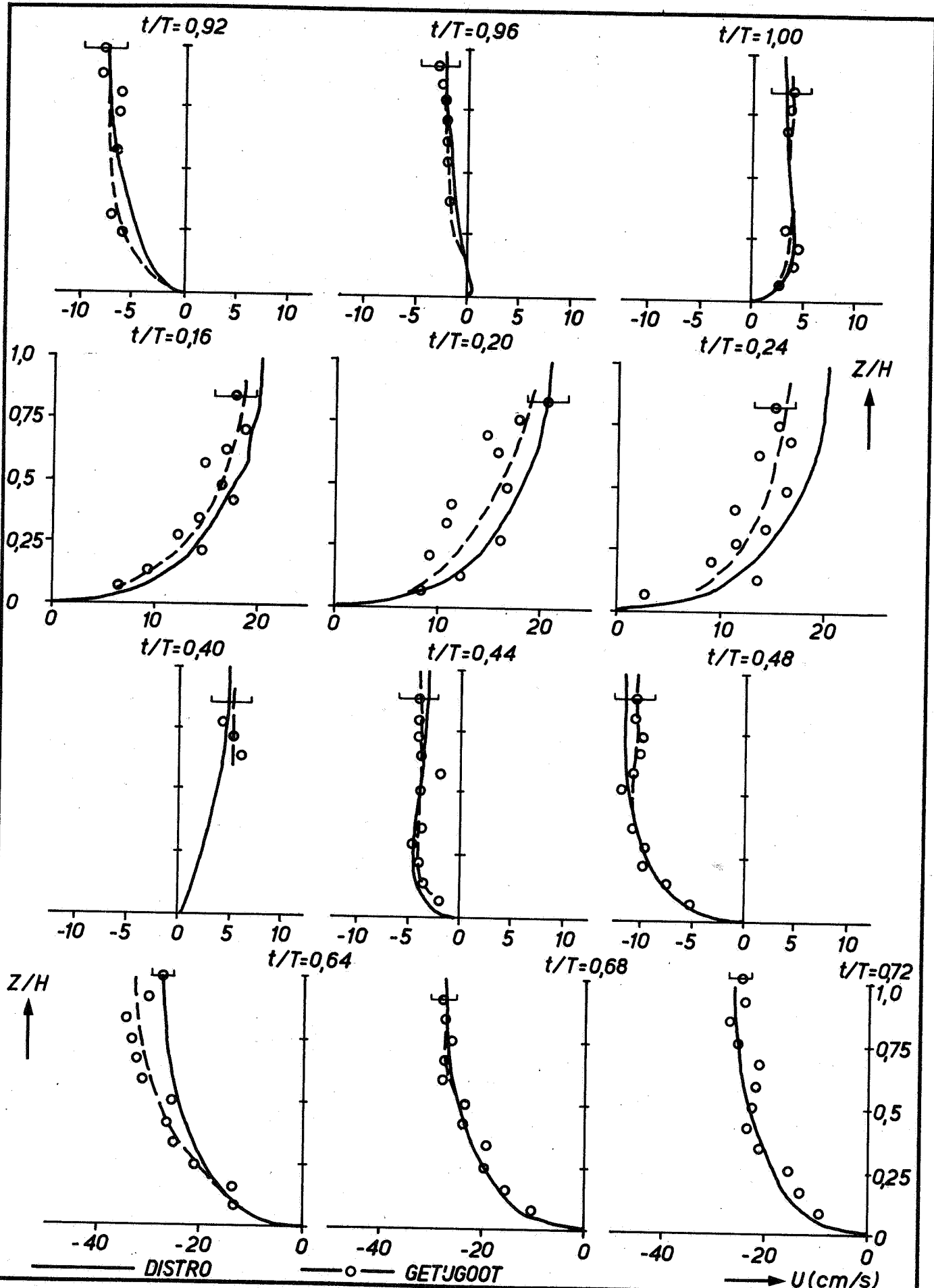
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896

FIG. 3



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 22

WK

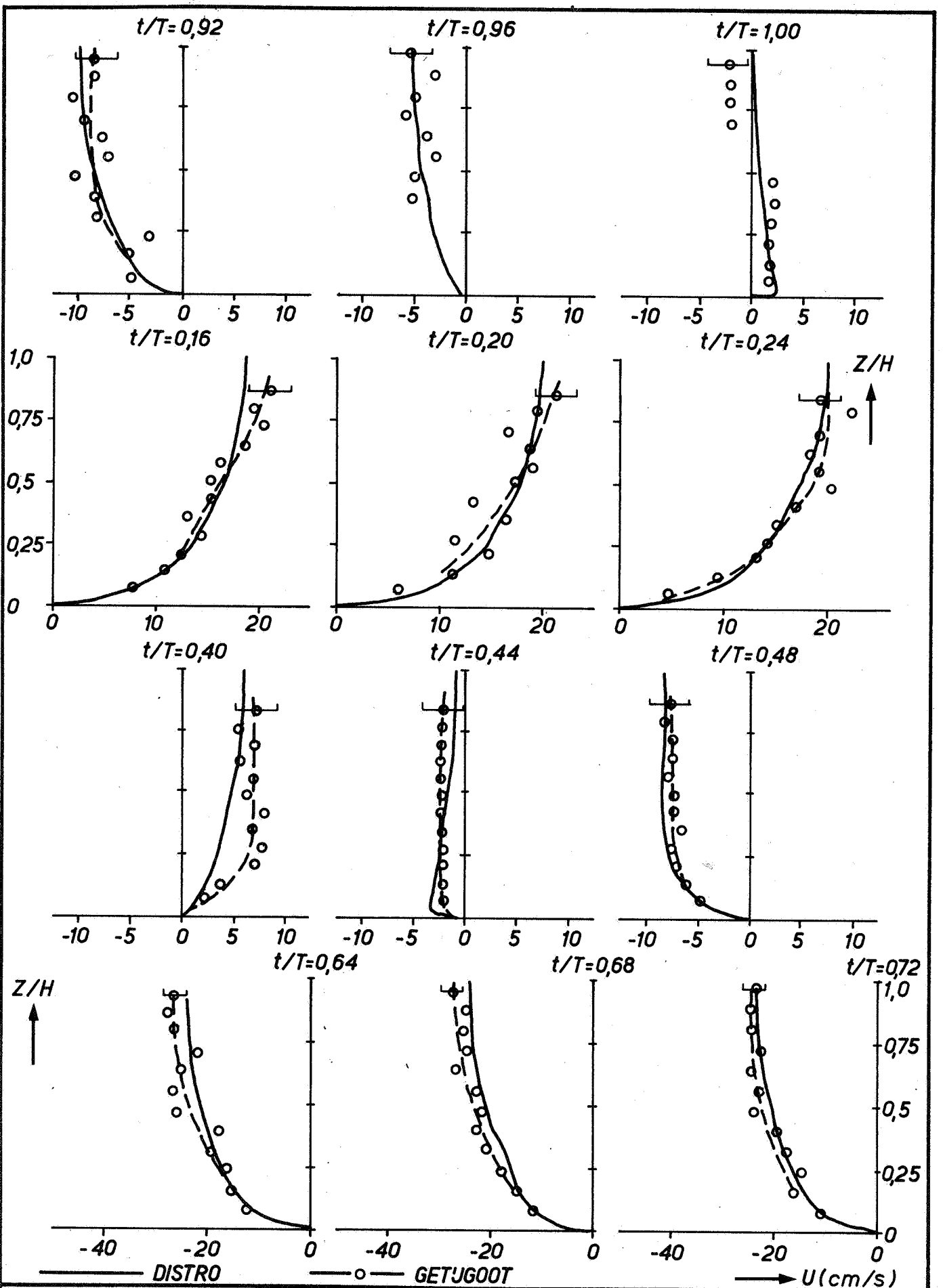
STATION 1

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2979

FIG. 4



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 22

WK

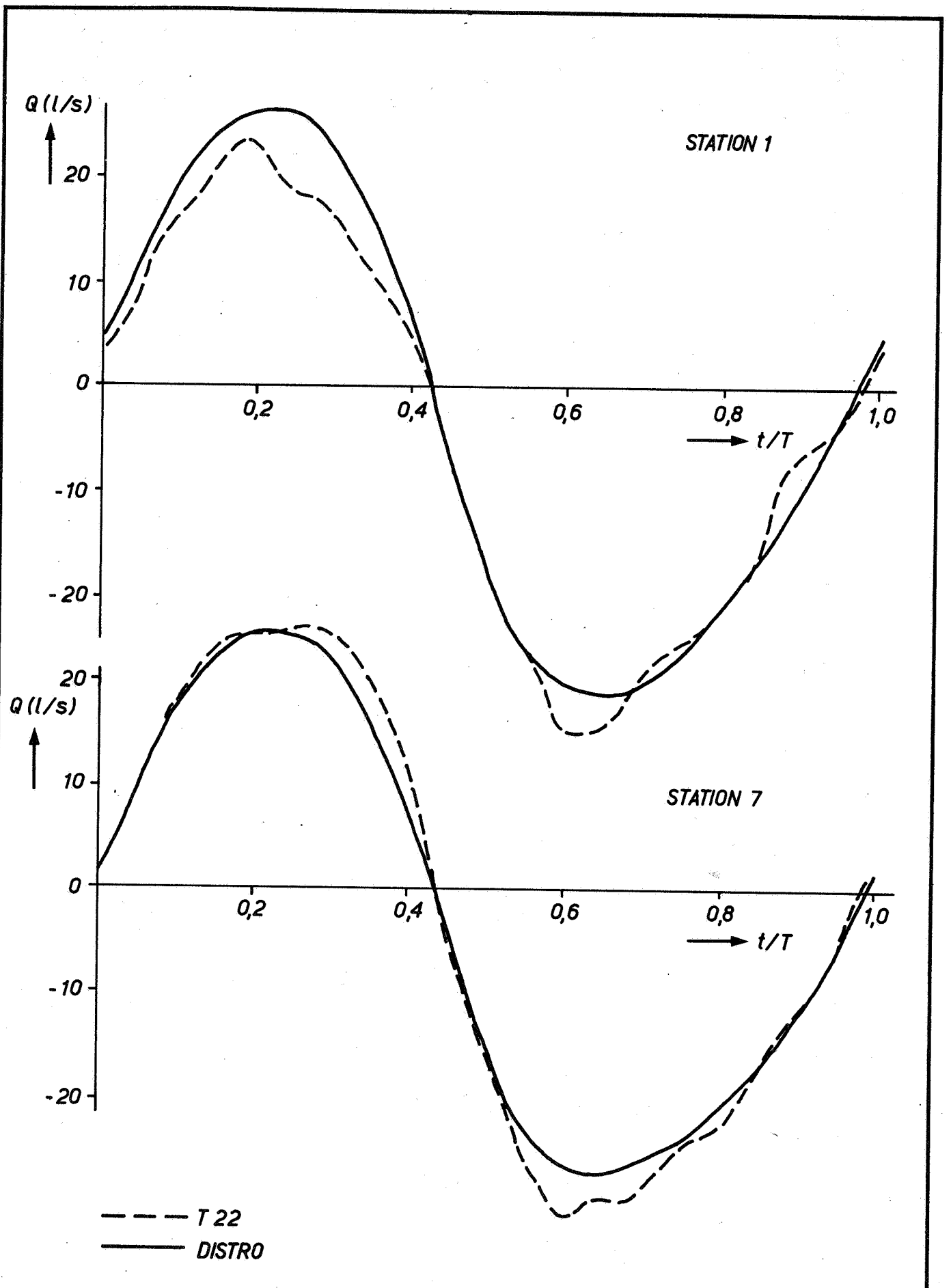
STATION 7

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2980

FIG. 5



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE DEBIETKURVEN

T 22

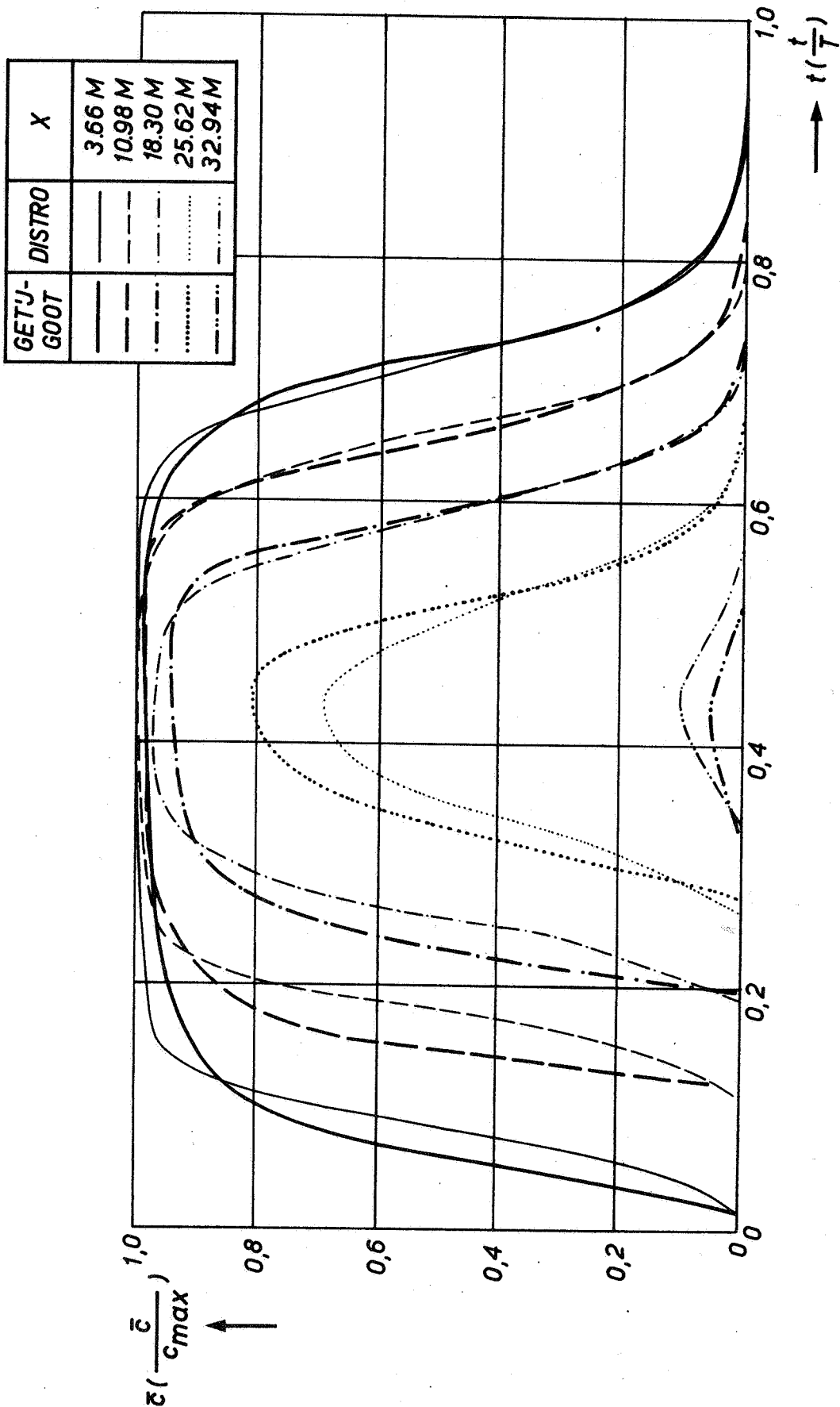
WK

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2981

FIG. 6



VERGELJING GEMETEN EN BEREKENDE
1D-KONCENTRATIEVERDELING

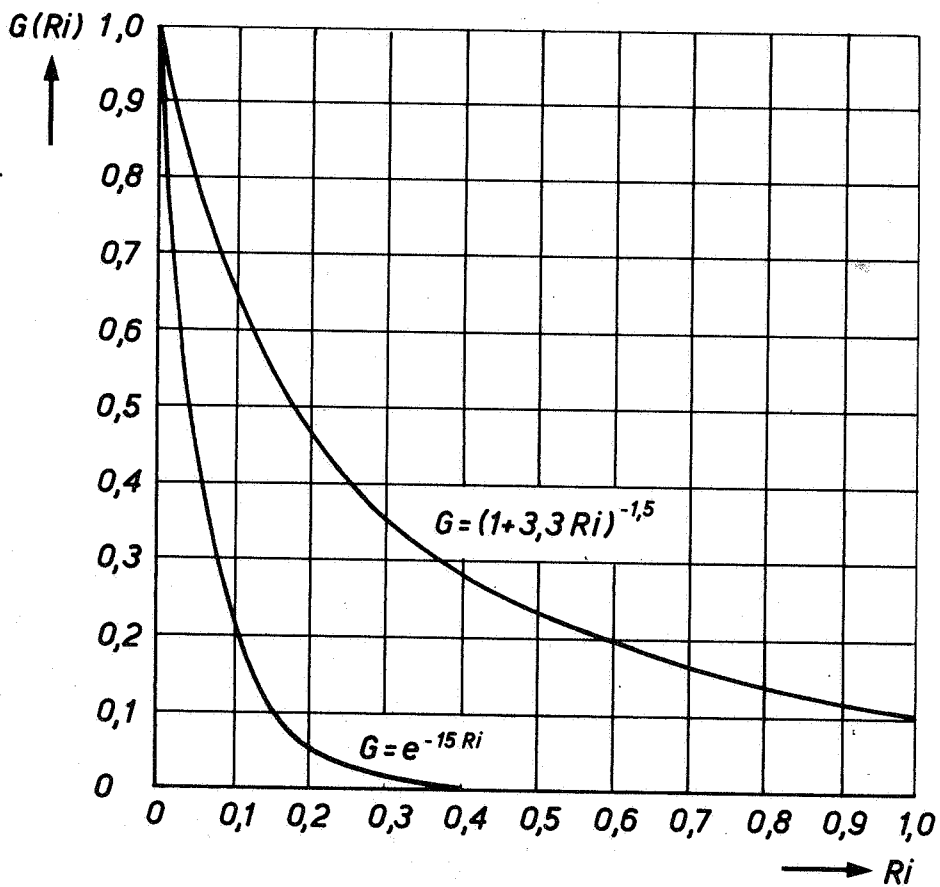
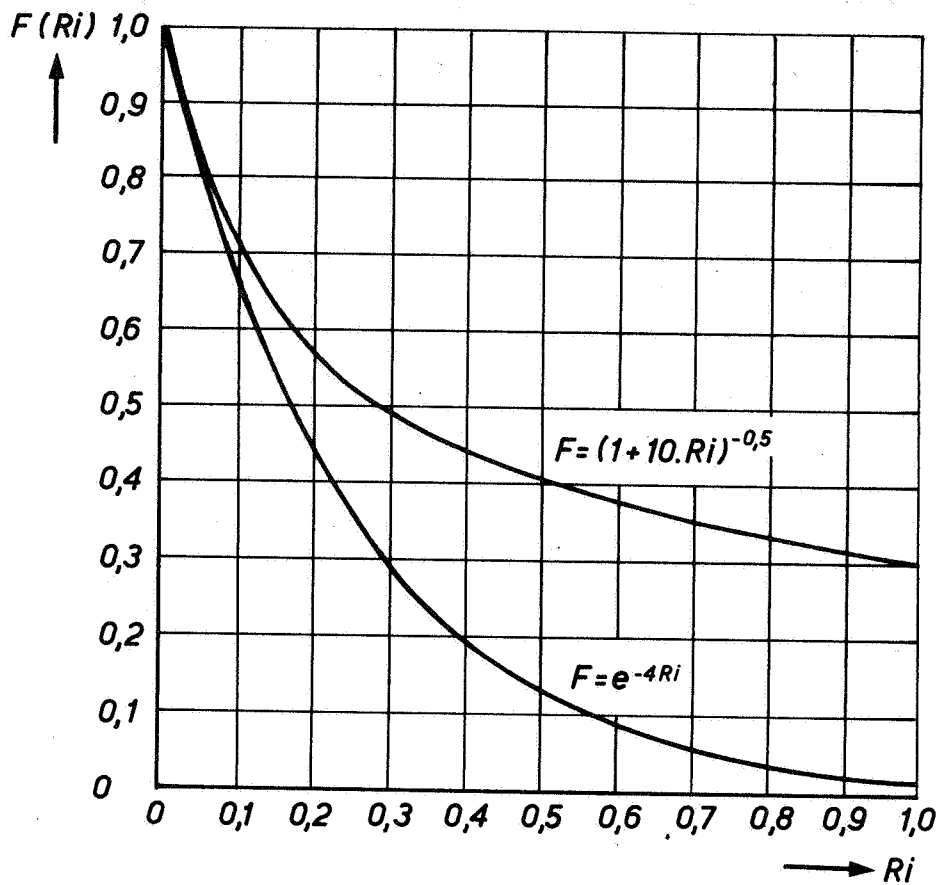
T 22

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 896 - 2982

FIG. 7



INVLOED GELAAGDHEID OP VERTIKALE UITWISSELING;
 DEMPINGSFUNKTIES $F(Ri)$ EN $G(Ri)$

WK

A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2983

FIG. 8

ΔA_0
(mm)

↑

4

2

0

A_1
(mm)

↑

24

22

20

$\Delta \phi_1$
(°)

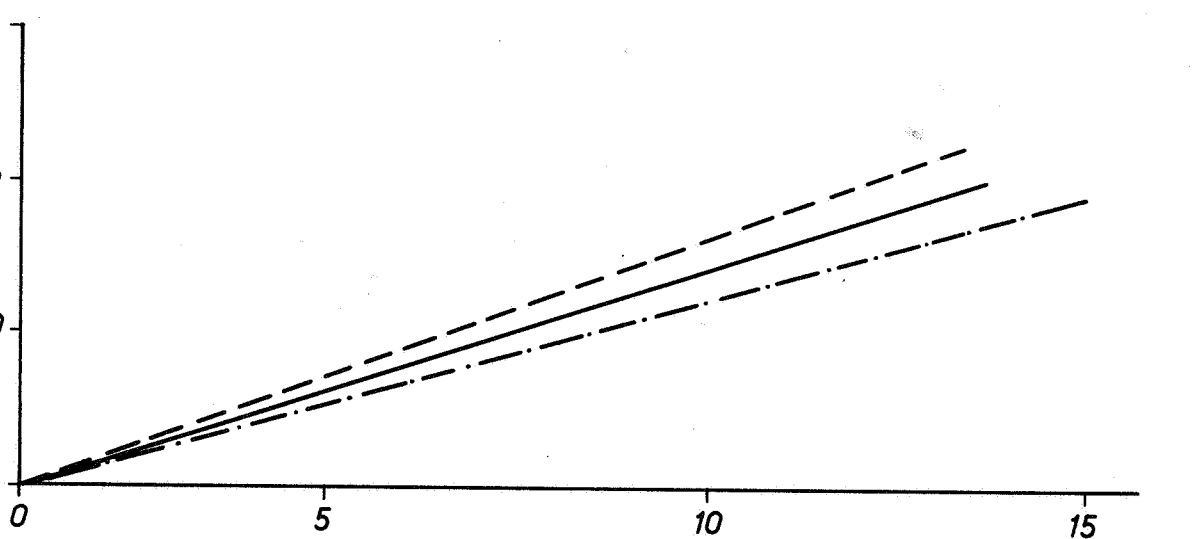
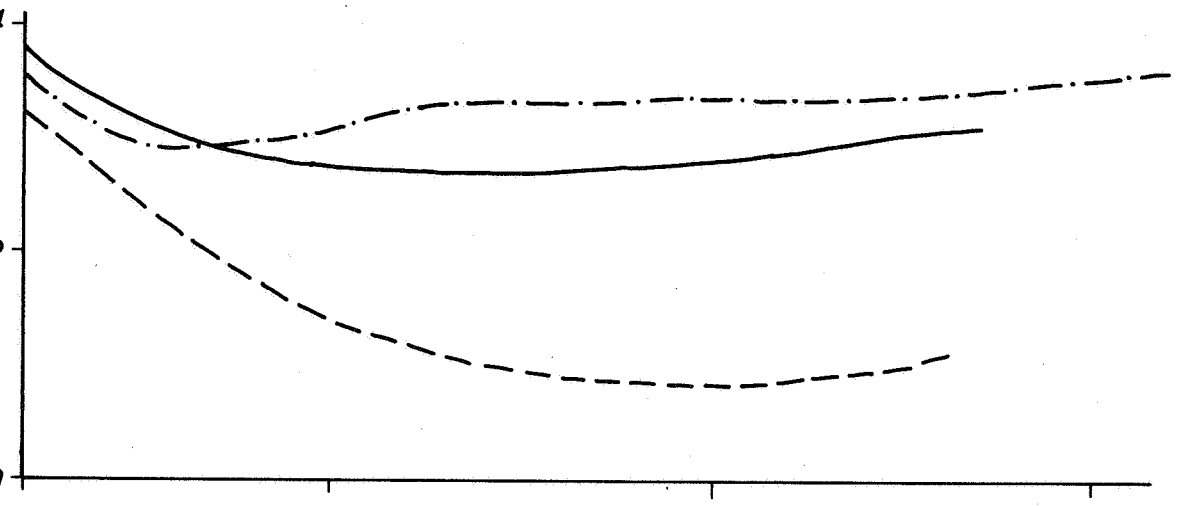
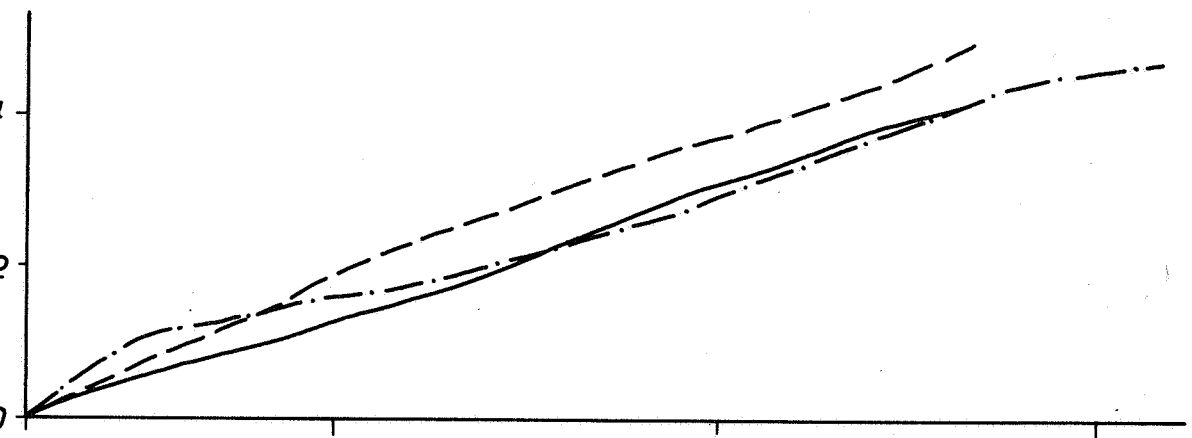
↑

60

40

20

0



— · — · — PROEF T 20
 ————— BEREKENING II
 - - - - - BEREKENING I

→ $X/\Delta X$ ($\Delta X = 366$ m)

VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X
 VERGELJING GETJGOOT - 2 DISTRO BEREKENINGEN

T 20

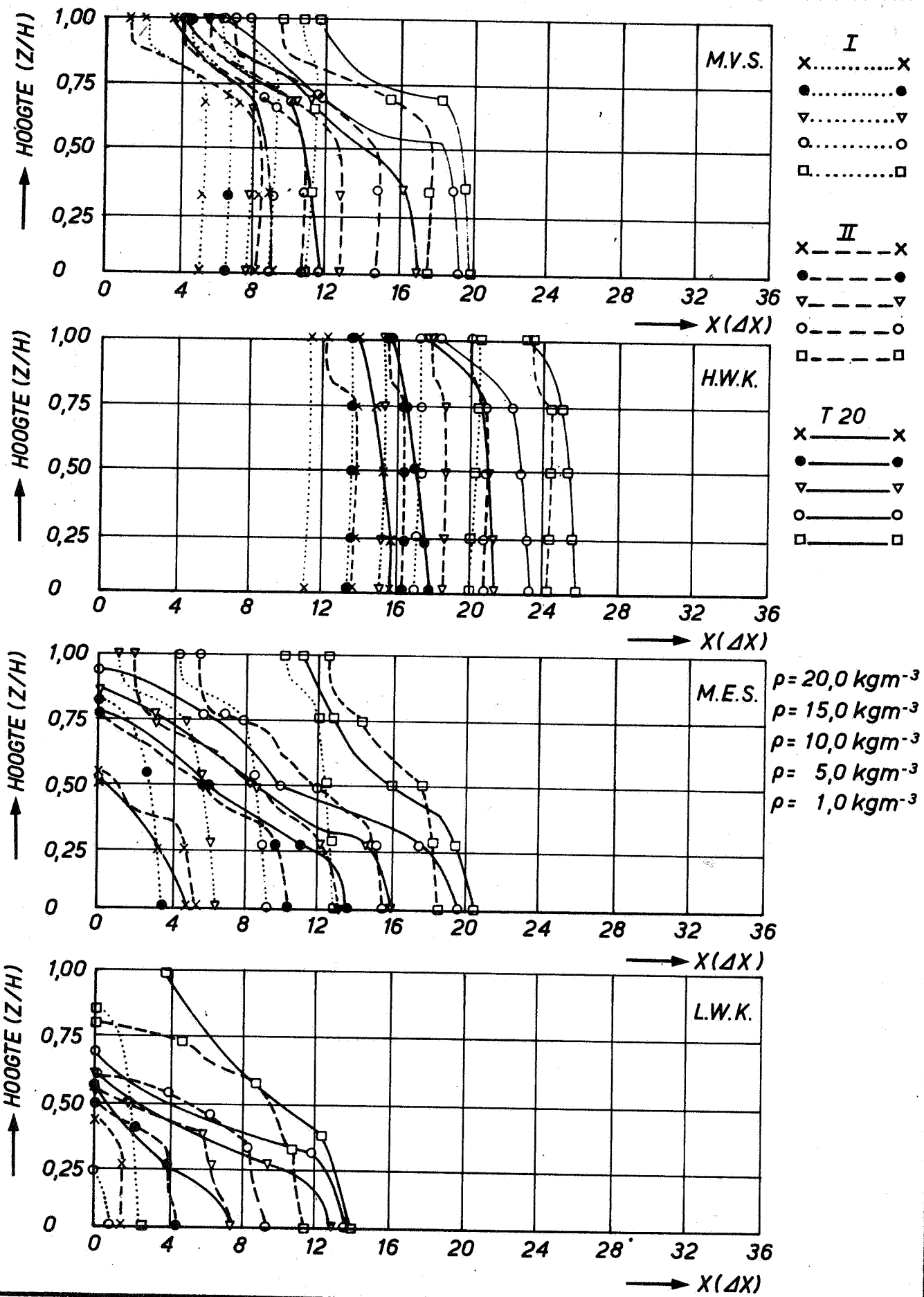
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2984

FIG. 9



VERGELIJING VAN 1 GEMETEN EN 2 BEREKENDE
2-D-DICHTHEIDSVERDELINGEN

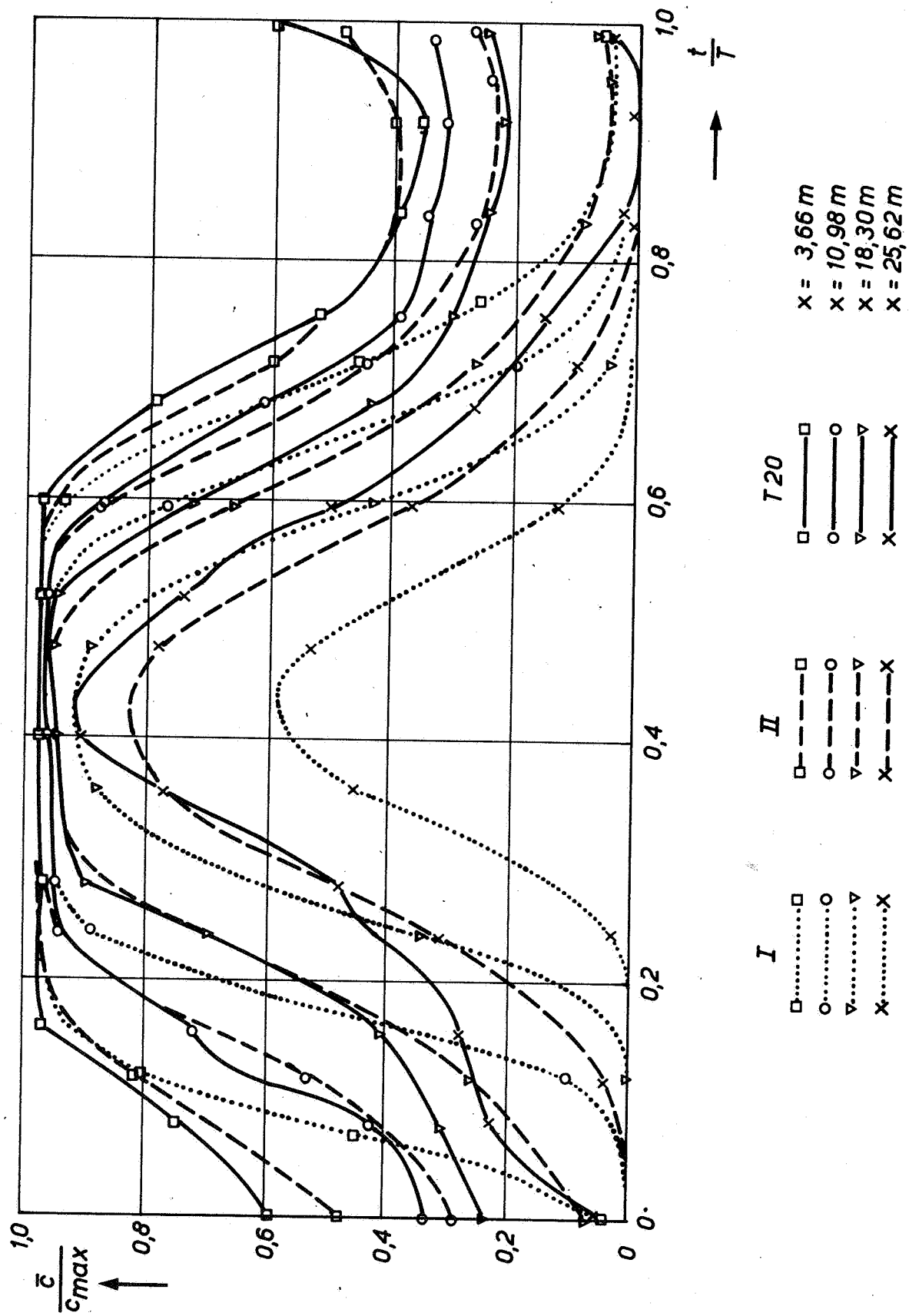
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T 20

ΔX = 1,83 m

M. 896 - 2985

FIG. 10



VERGELIJING GEMETEN EN 2 BEREKENDE
 1 D - KONCENTRATIEVERDELINGEN

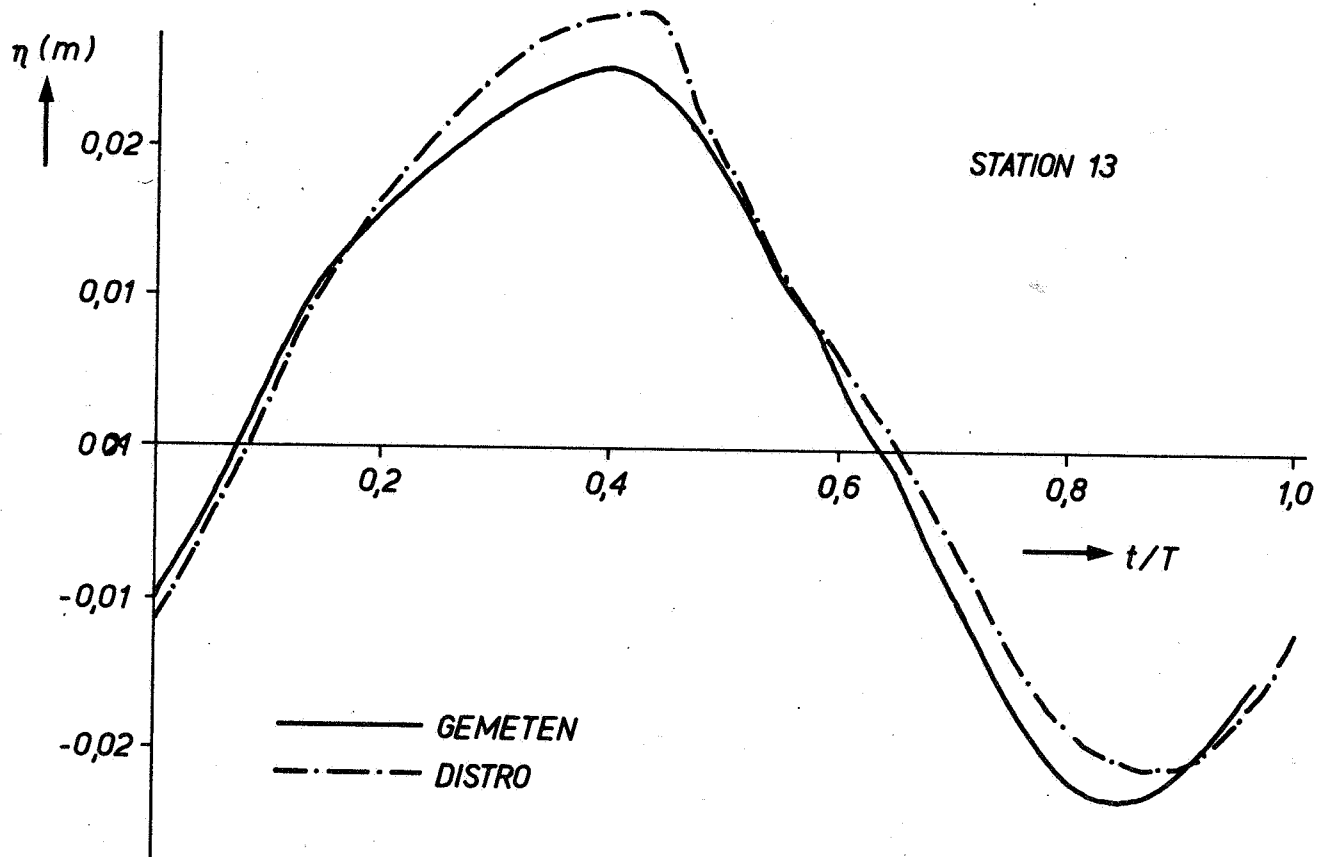
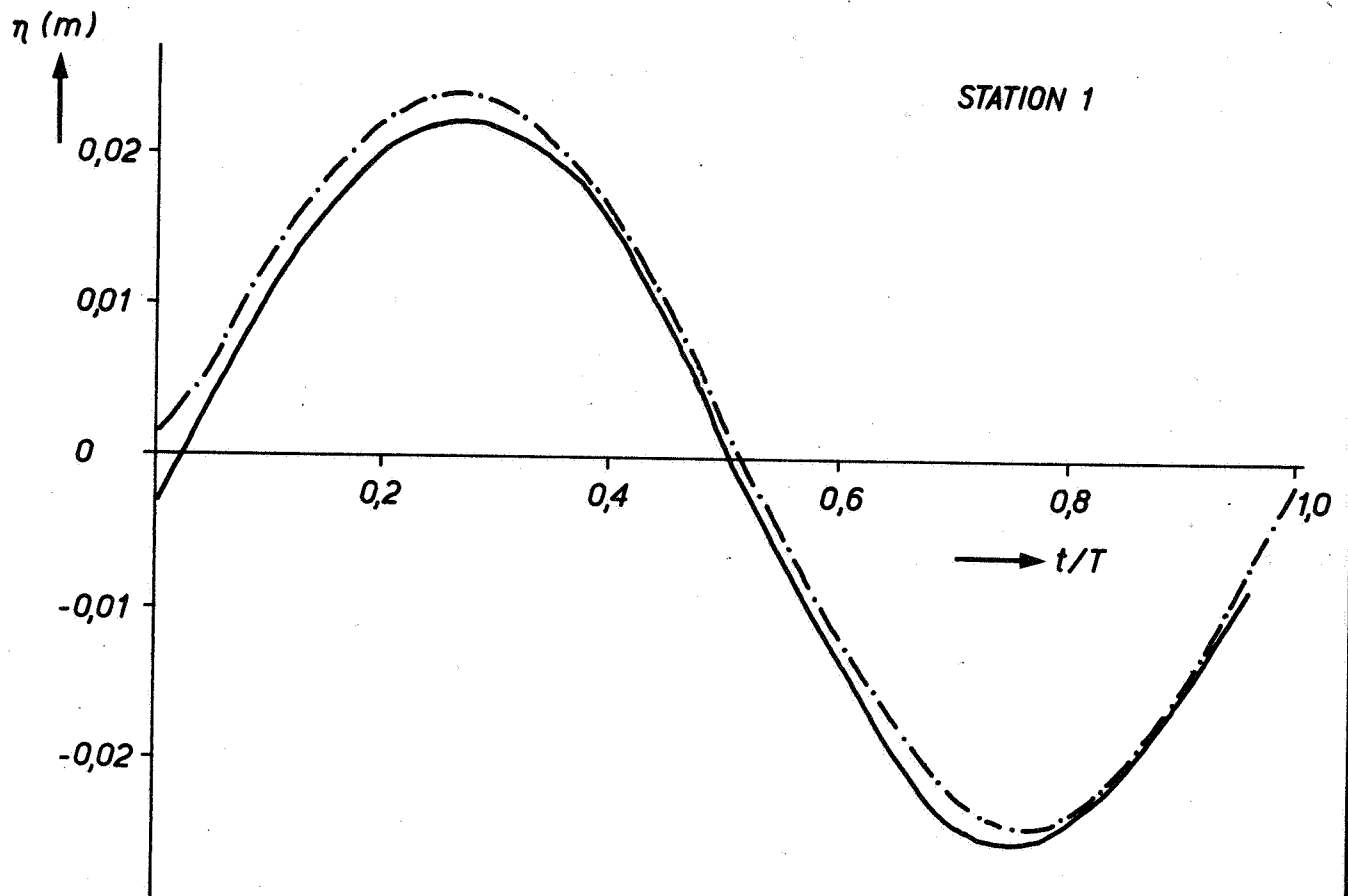
T 20

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2986

FIG.11



VERGELJKING GEMETEN EN BEREKEND VERTIKAAL GETJ

T 20

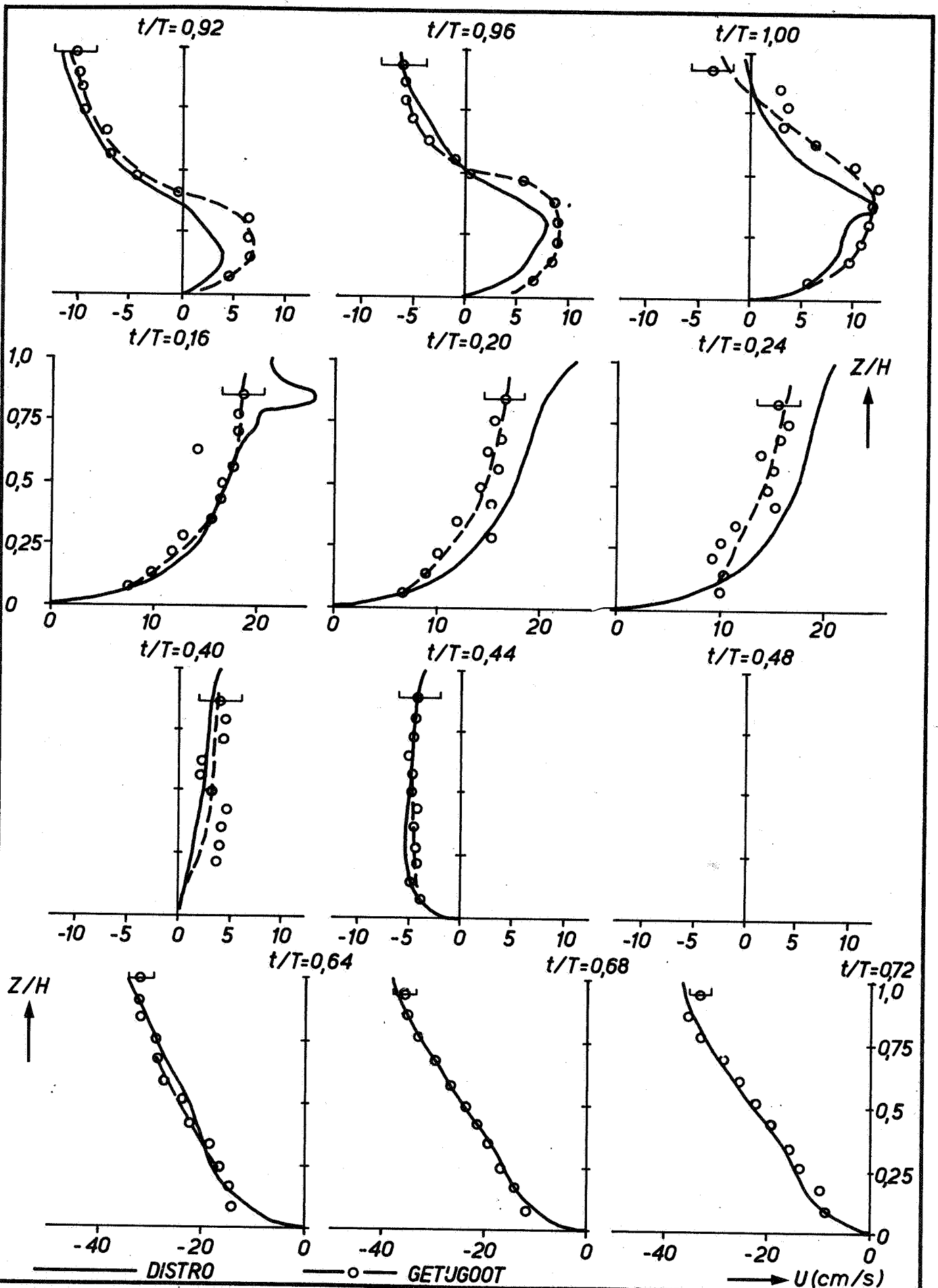
WK

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 896 - 2987

FIG. 12



VERGELJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 20

WK

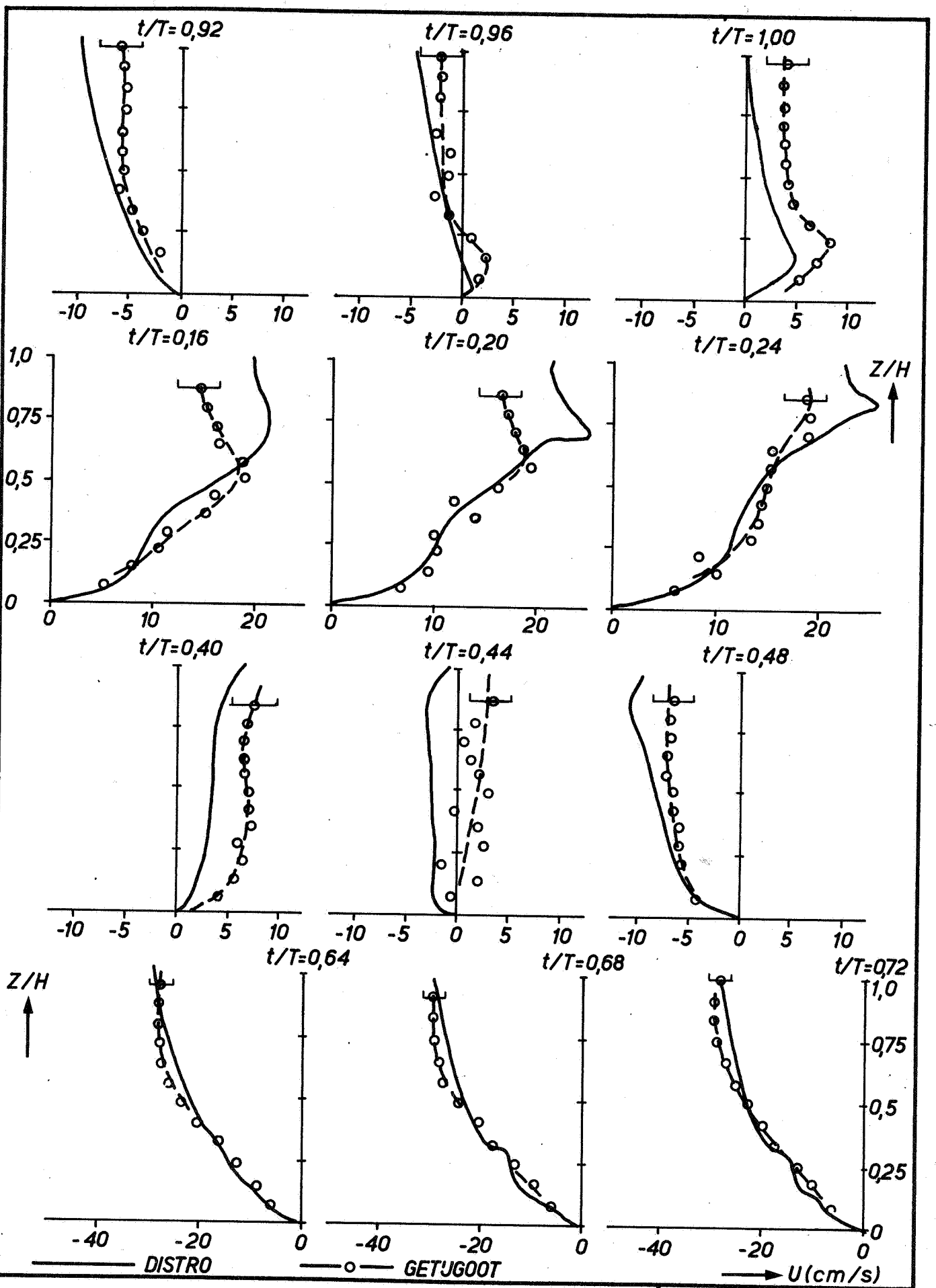
STATION 1

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2988

FIG. 13



VERGELJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 20

WK

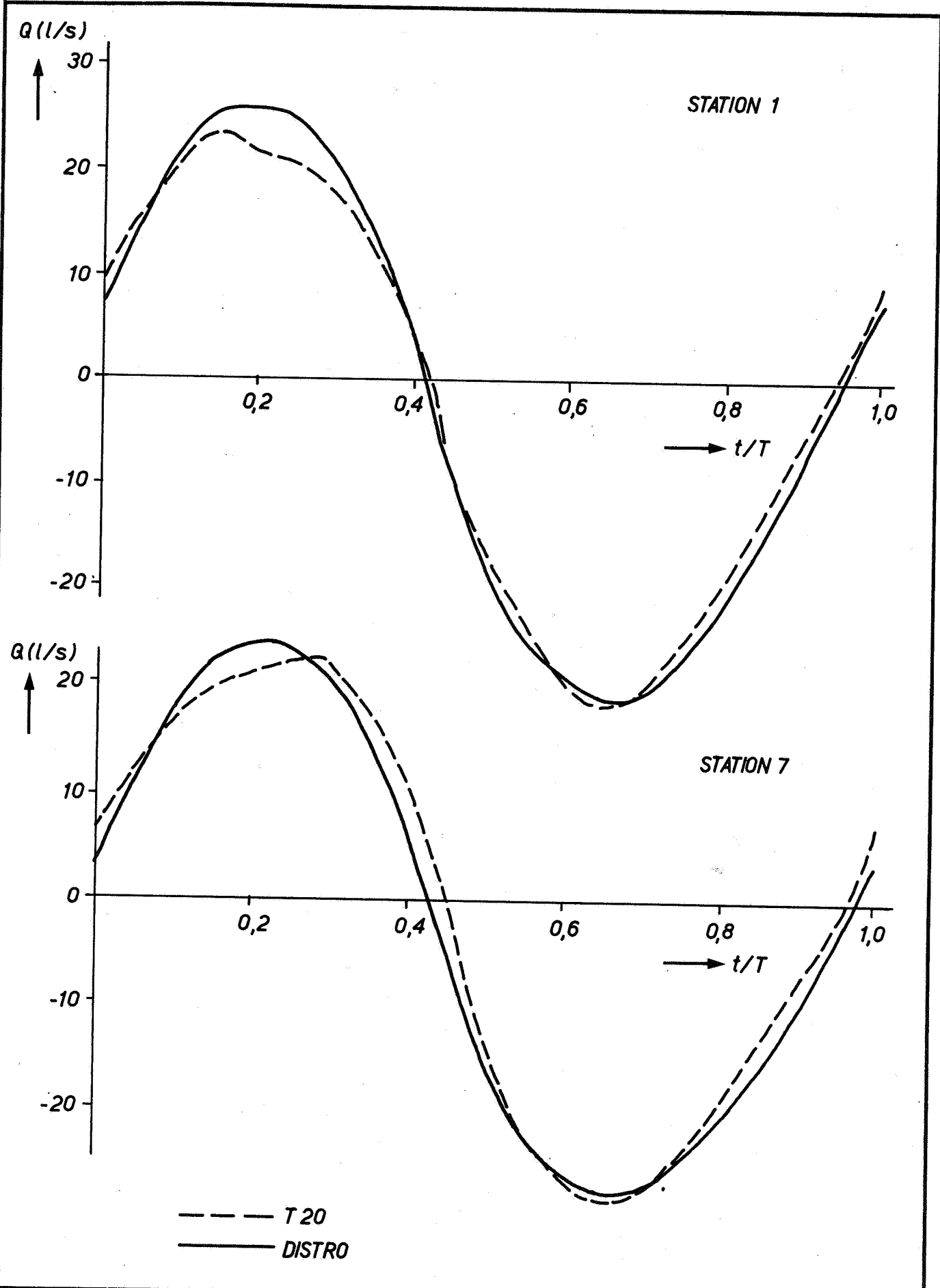
STATION 7

A 4

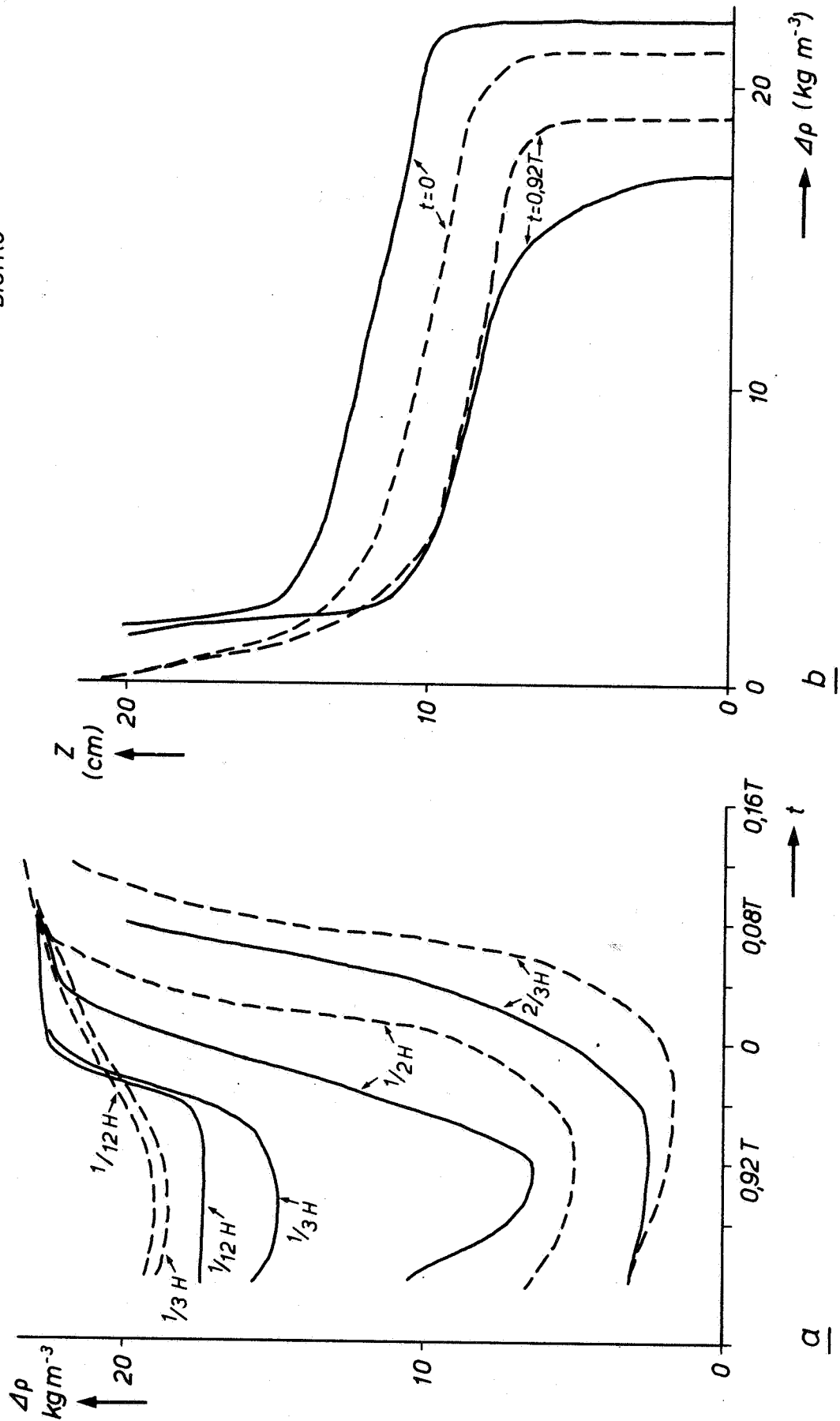
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2989

FIG. 14



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE DEBIETKURVEN	T 20	WK
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.896 - 2990	FIG. 15



VERGELUKING GEMETEN EN BEREKENDE DICHTHEIDS-
VERDELING IN STATION 1 ROND L.W.K.

T 20

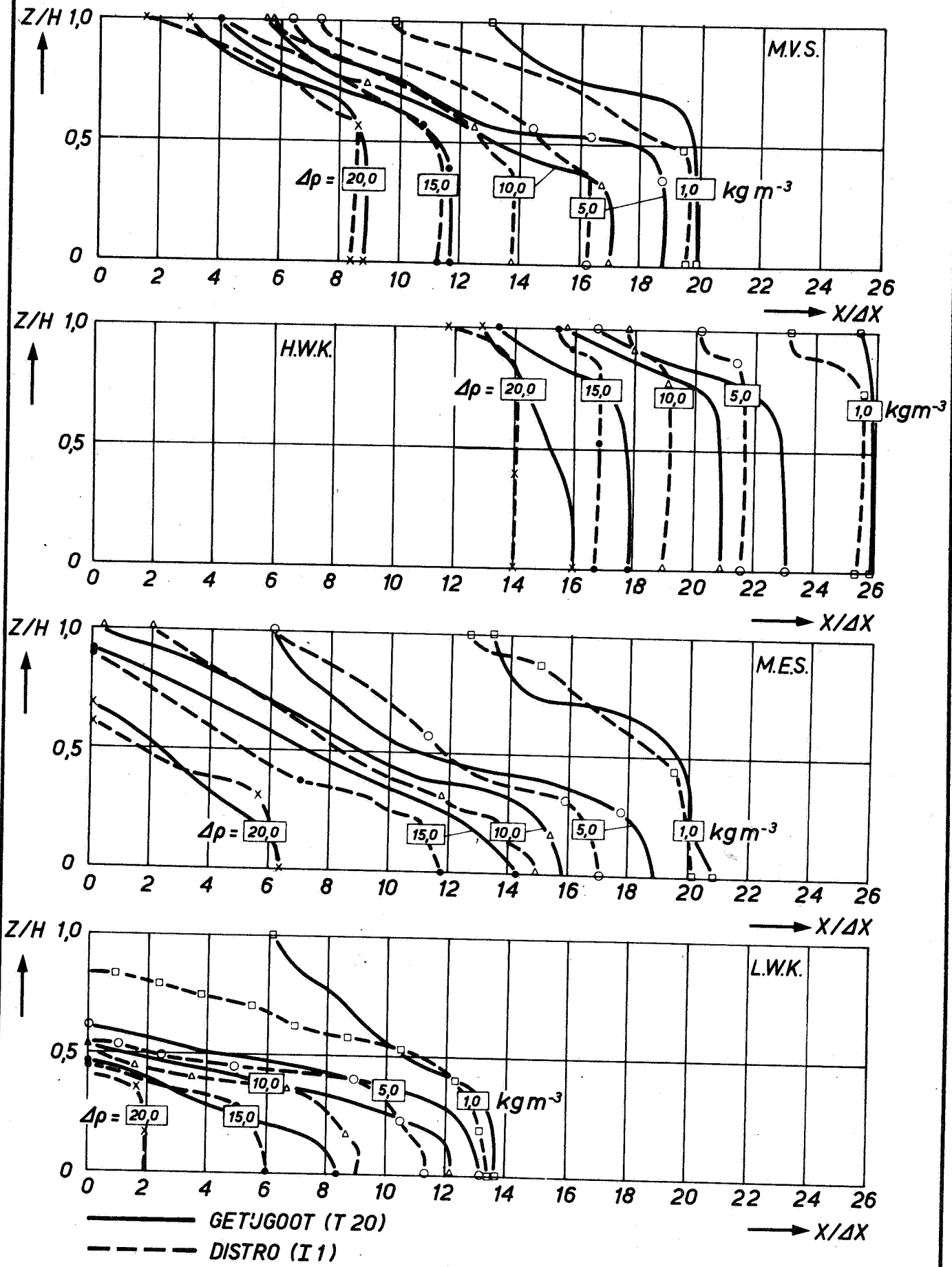
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2991

FIG.16

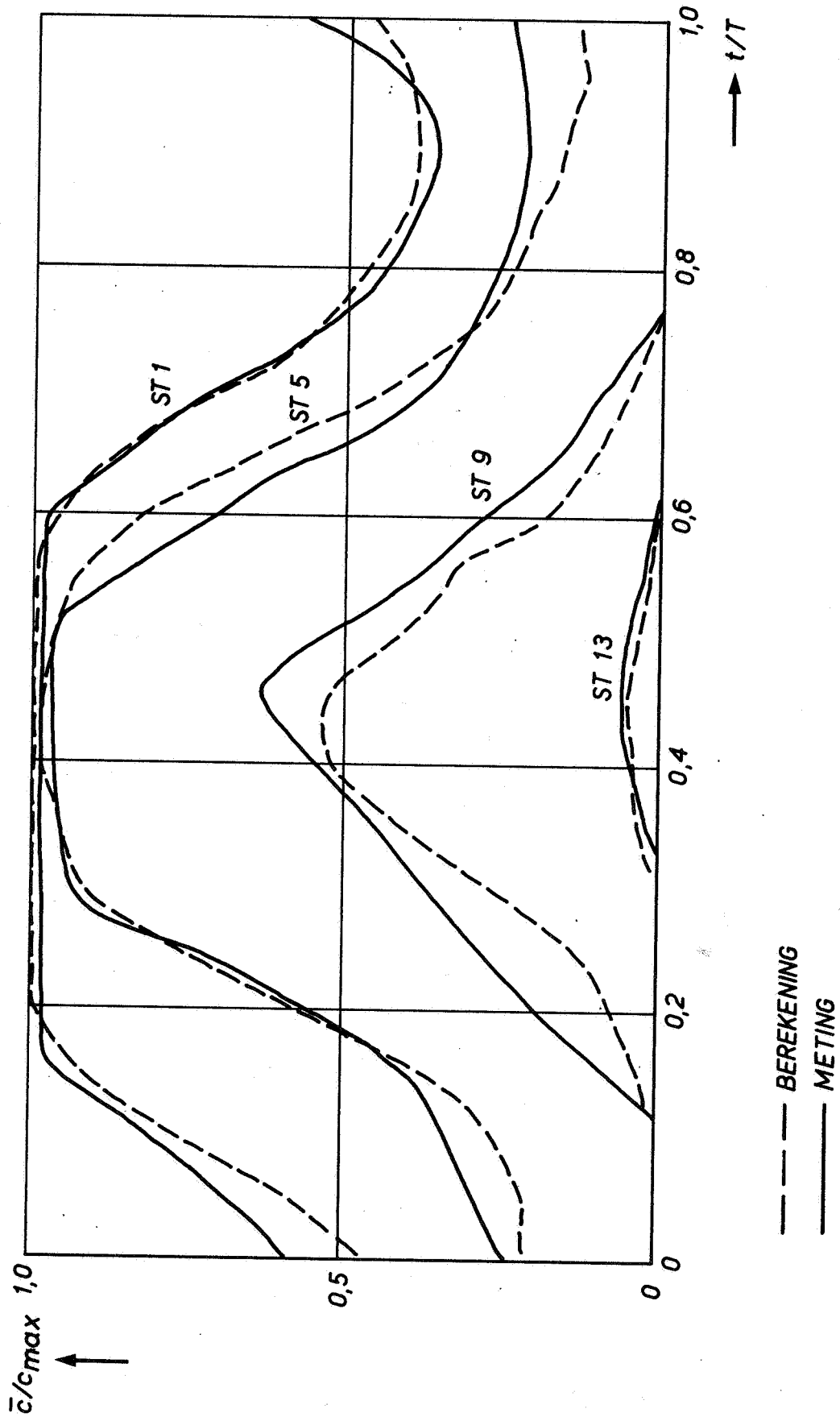


VERGELJING GEMETEN EN BEREKENDE
2 D- DICHTHEIDVERDELINGEN

T 20
 $\Delta X = 1,83 \text{ m}$ A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2992 FIG.17



VERGELJKING GEMETEN EN BEREKENDE
1 D-KONCENTRATIEVERDELING

T 20

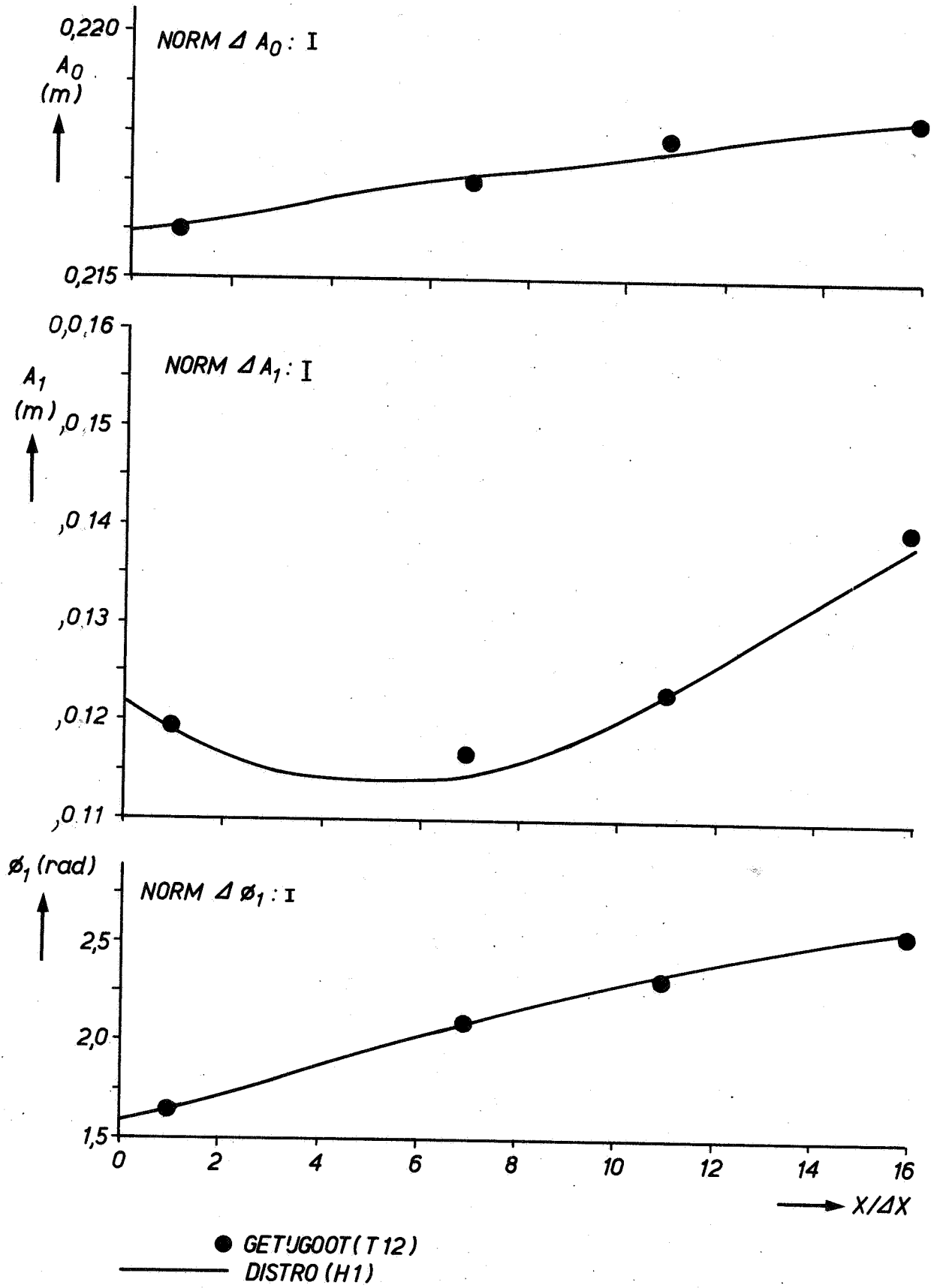
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2993

FIG. 18



VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X
 VERGELIJING GETJGOOT-DISTRO

T 12

WK

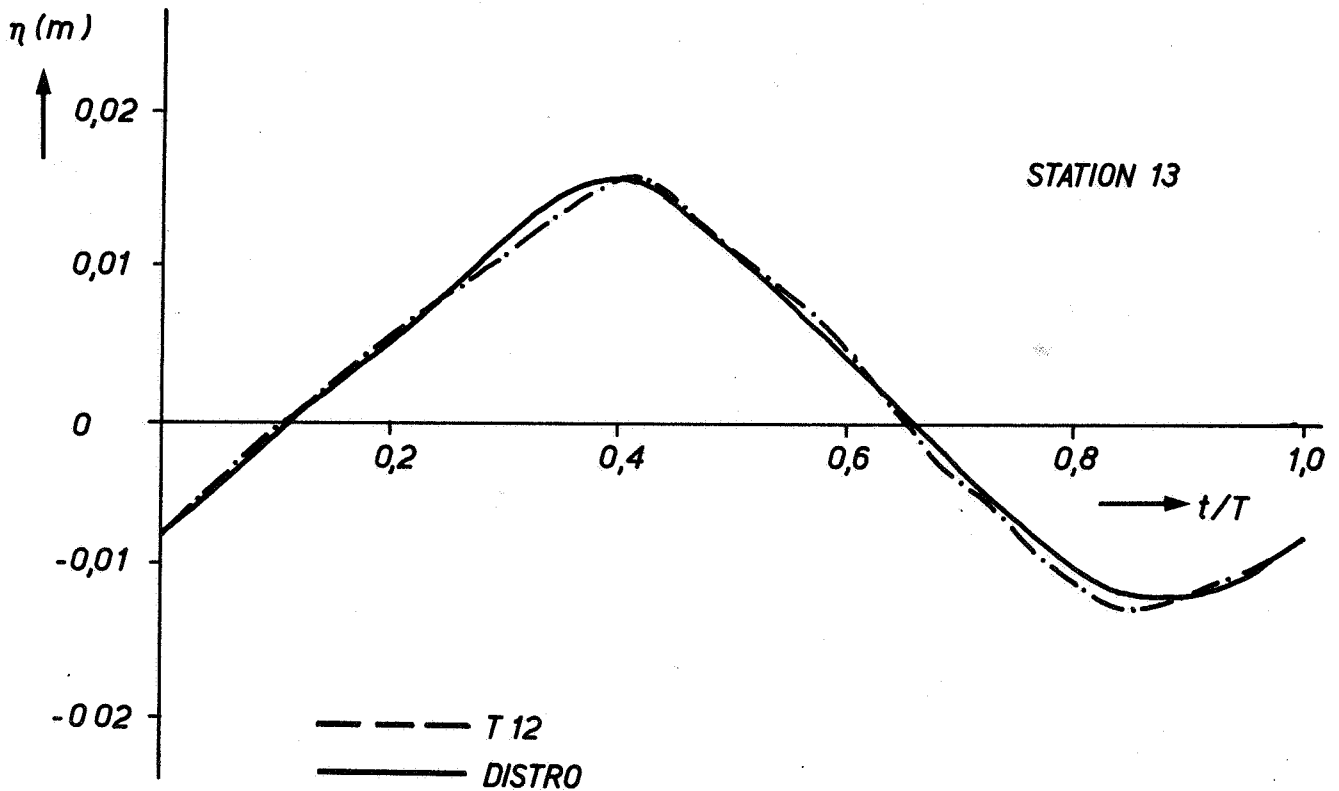
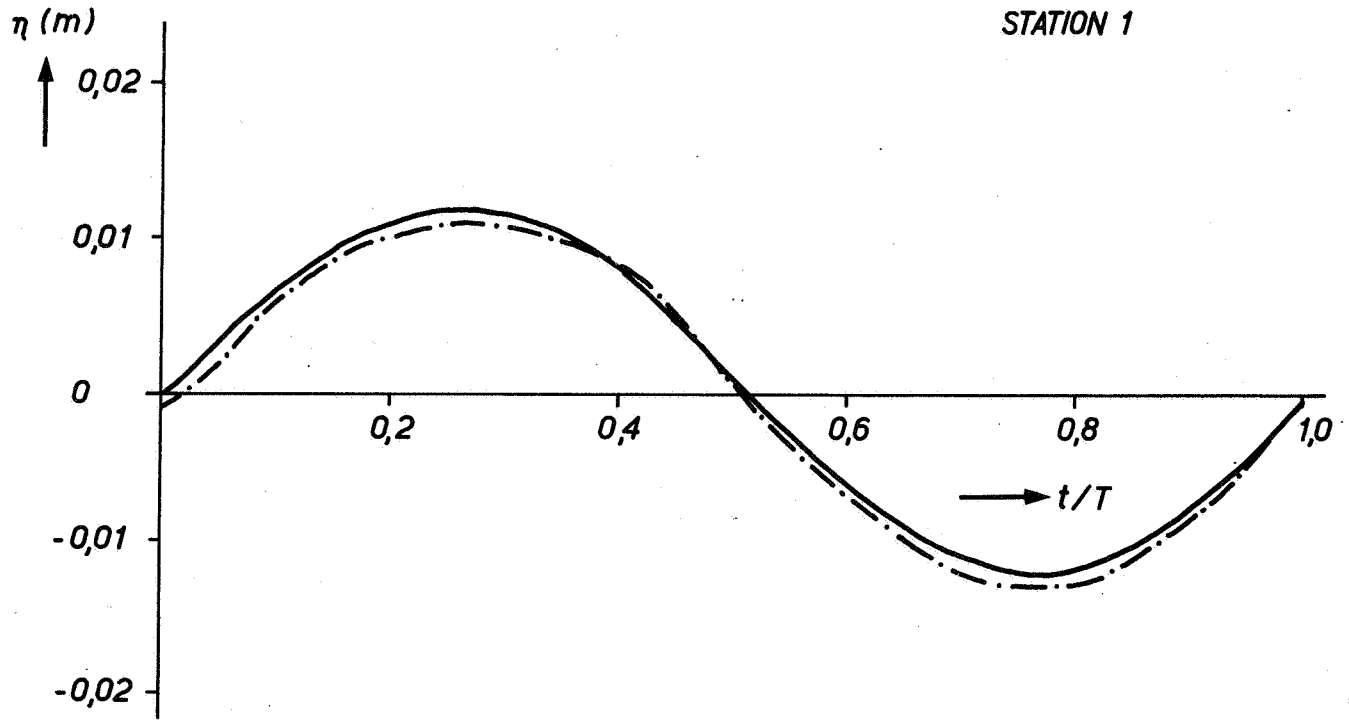
$\Delta X = 3,66$ m

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 2994

FIG. 19



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKEND VERTIKAAL GETUJ

T 12

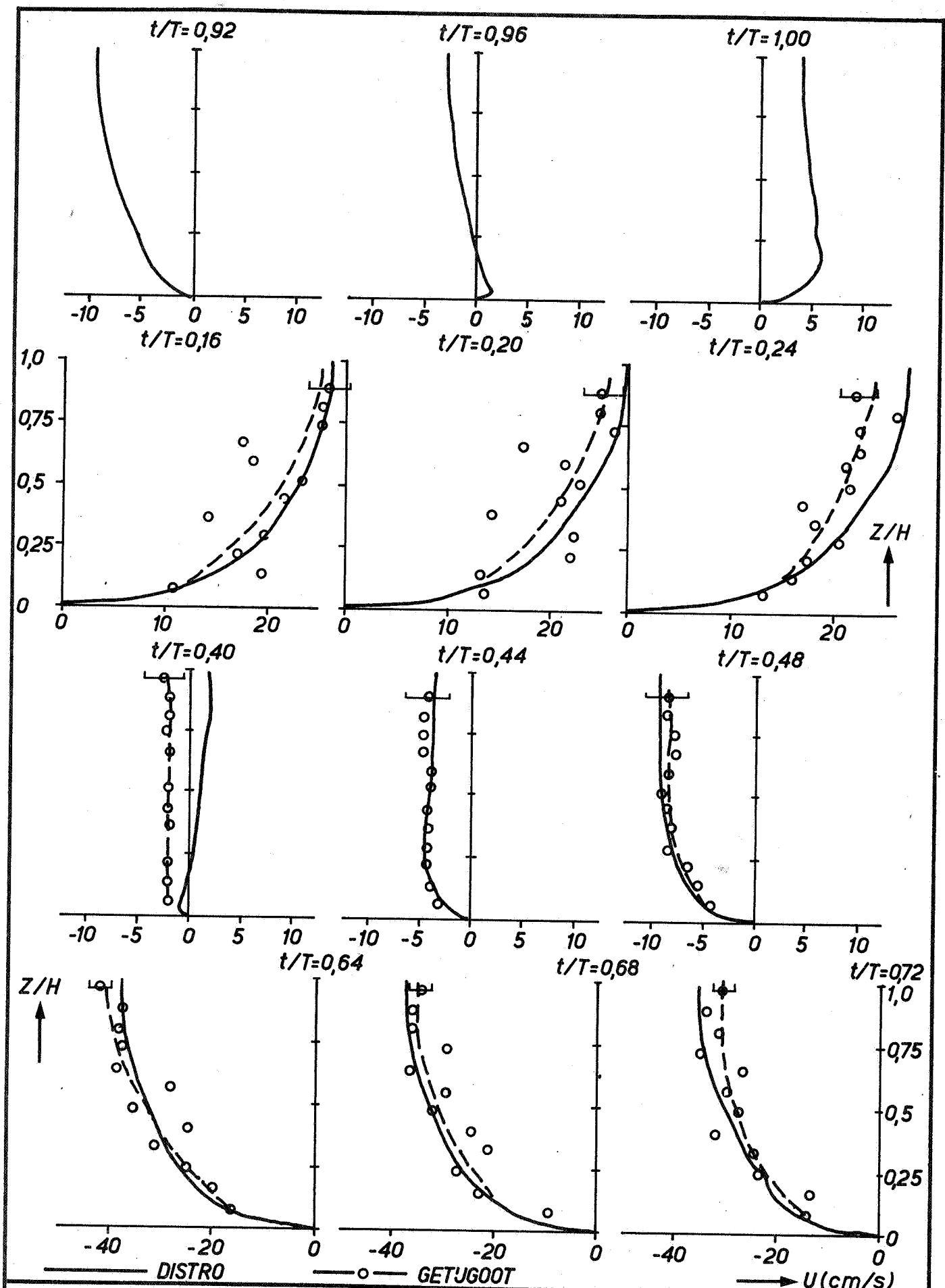
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2995

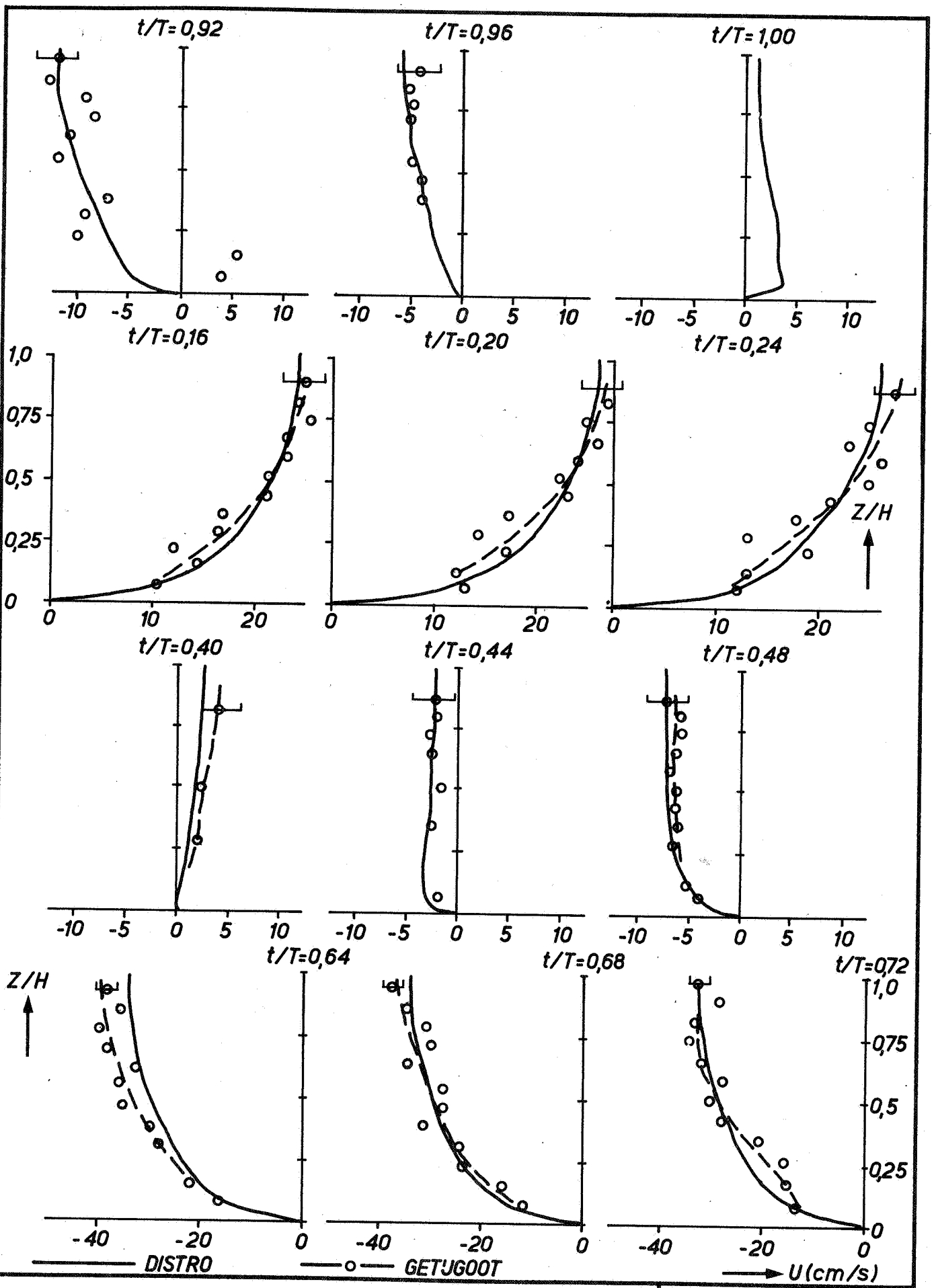
FIG. 20



VERGELJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T12	WK
STATION 1	A4
M.896 - 2996	FIG. 21

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T12

WK

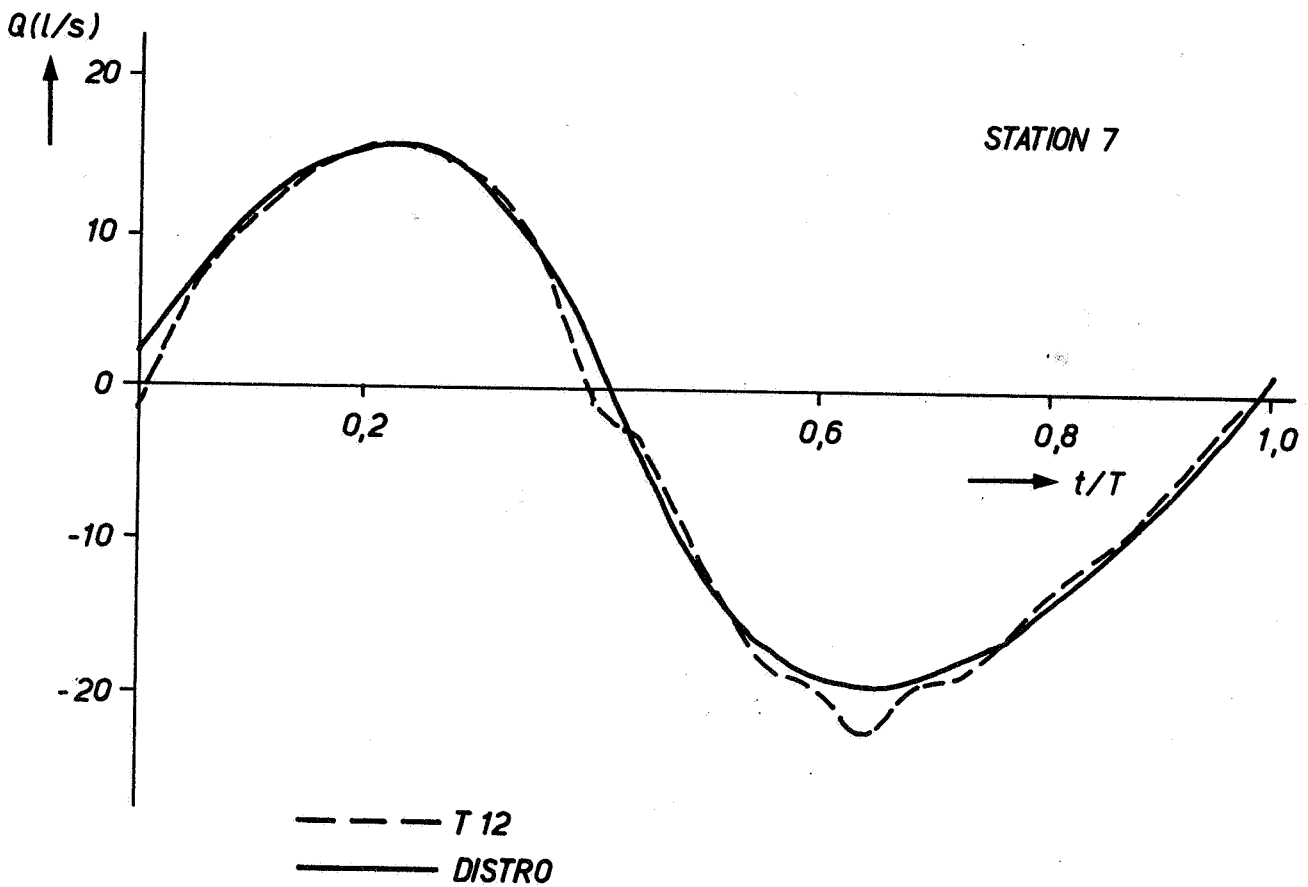
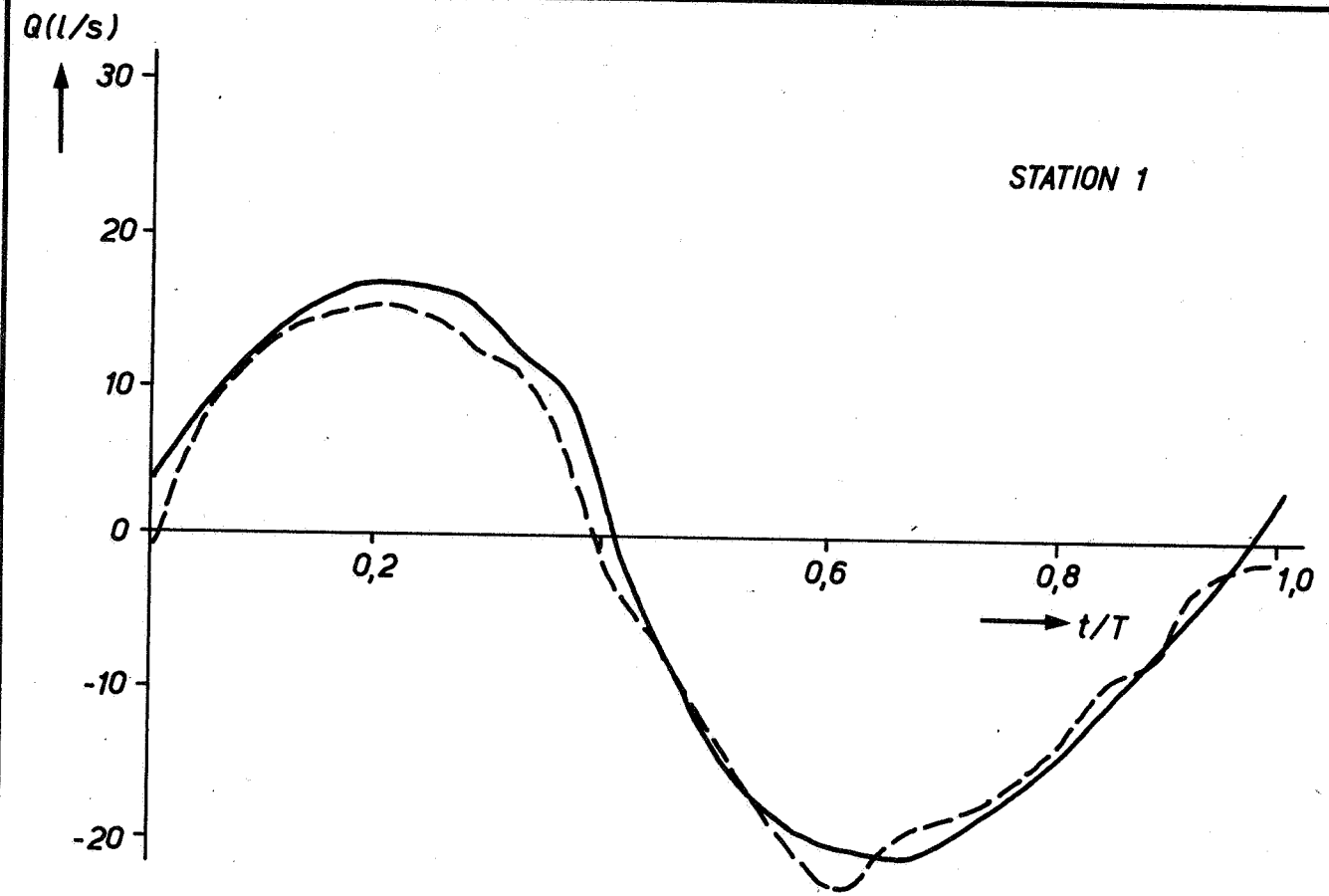
STATION 7

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2997

FIG. 22



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE DEBIETKURVEN

T 12

WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-2998

FIG. 23

A_0 (m)



0,220

NORM ΔA_0 : I

0,215

A_1 (m)



0,036

NORM ΔA_1 : I

,034

,032

,030

,028

,026

ϕ (RAD)



2,5

NORM $\Delta \phi_1$: I

2,0

1,5

0 2 4 6 8 10 12 14 16

$x/\Delta x$

● GETJGOOT (T 32)

— DISTRO (H 3)

VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X;
VERGELJING GETJGOOT - DISTRO

T 32

WK

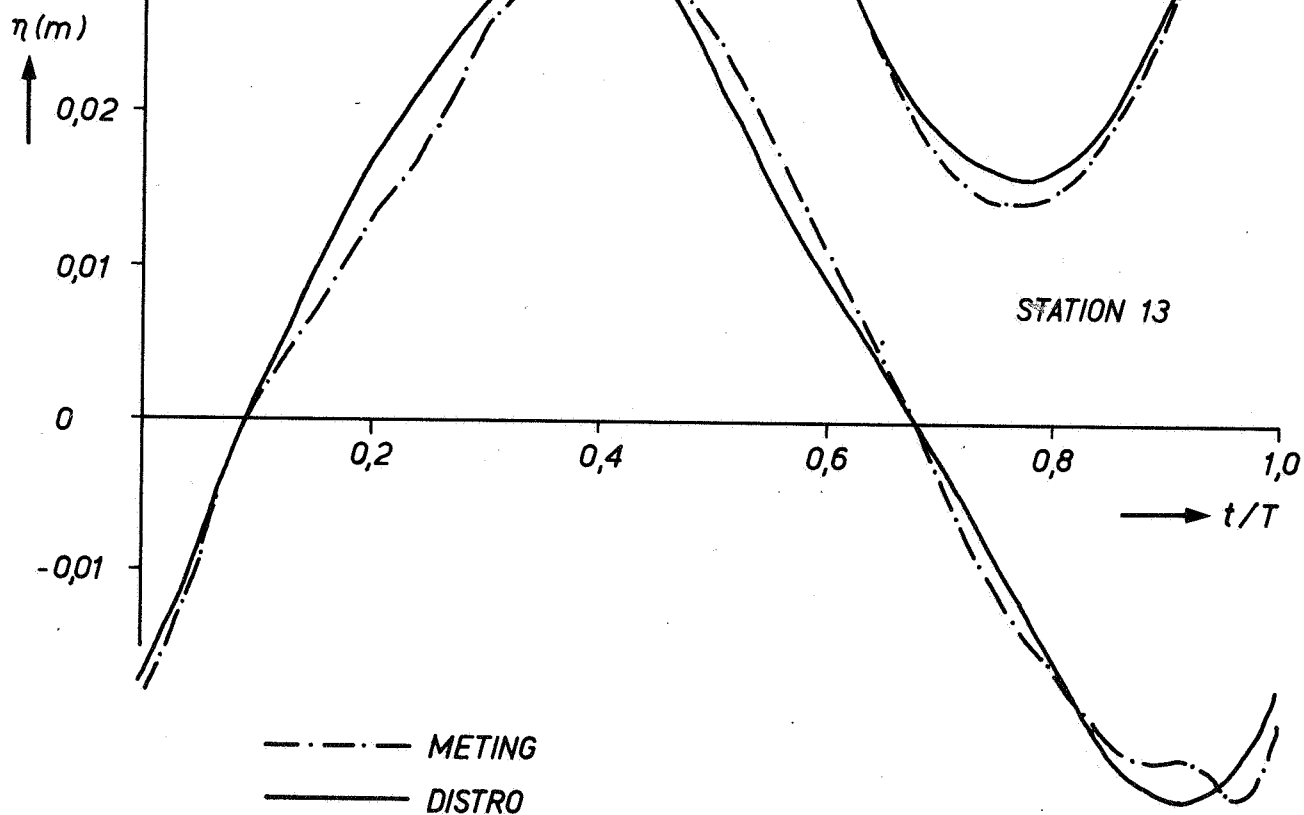
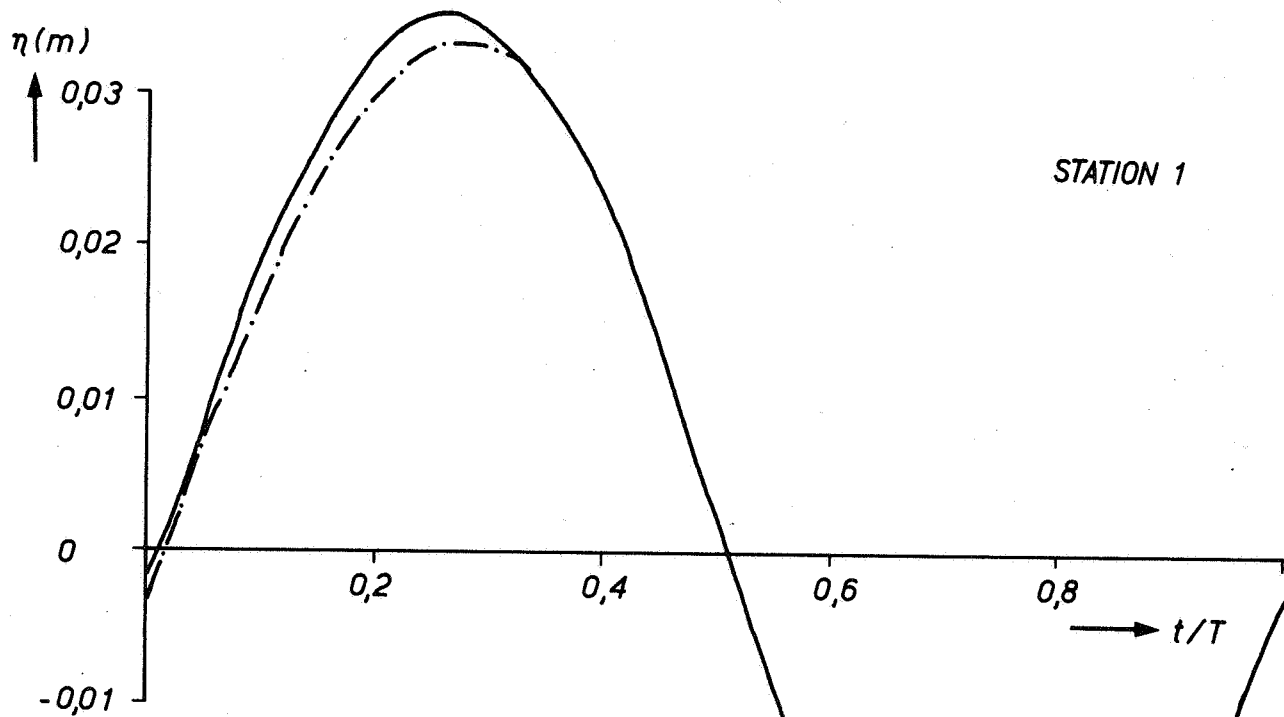
$\Delta x = 3,66$ m

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

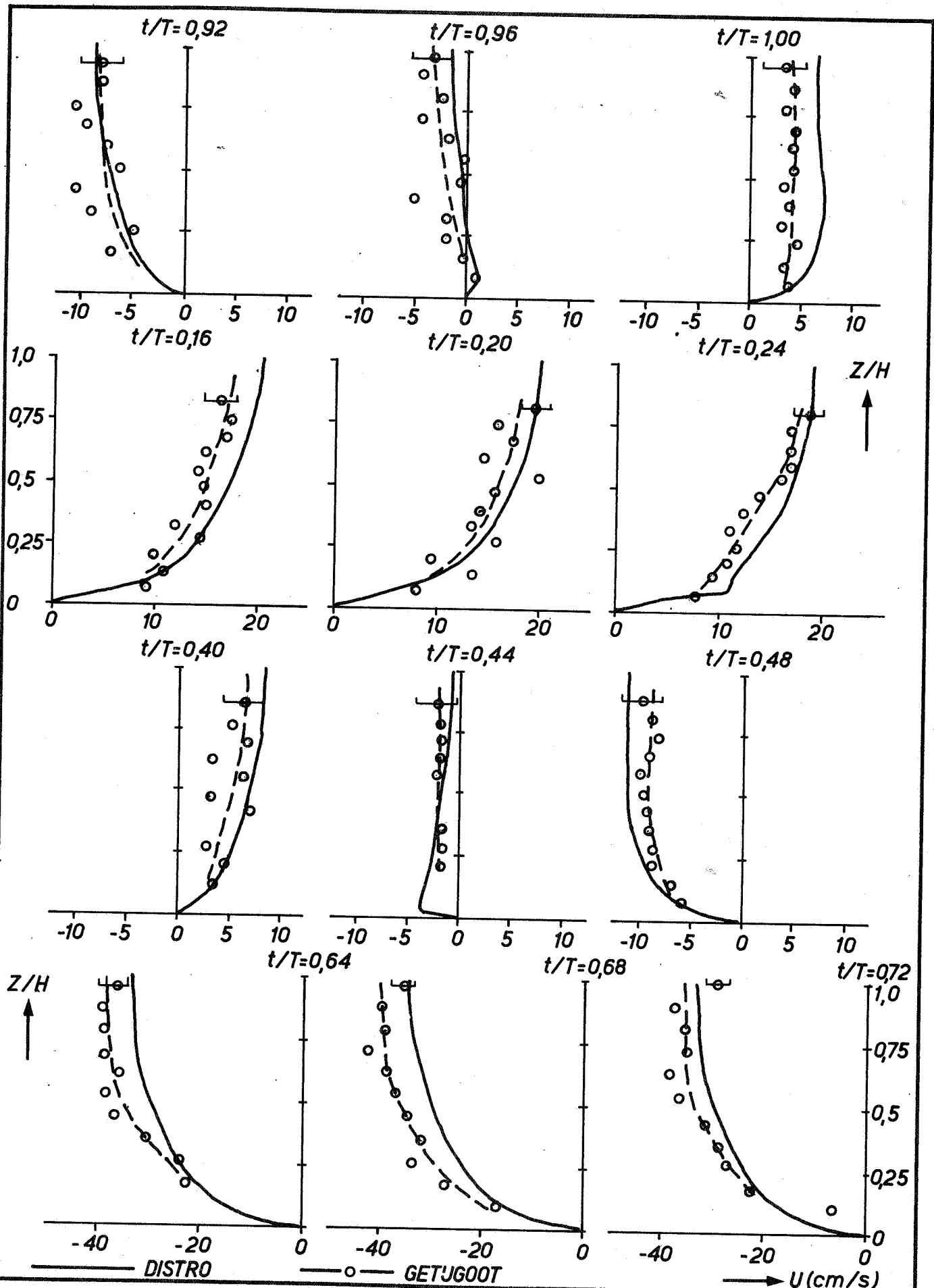
M. 896 - 2999

FIG. 24



--- METING
 — DISTRO

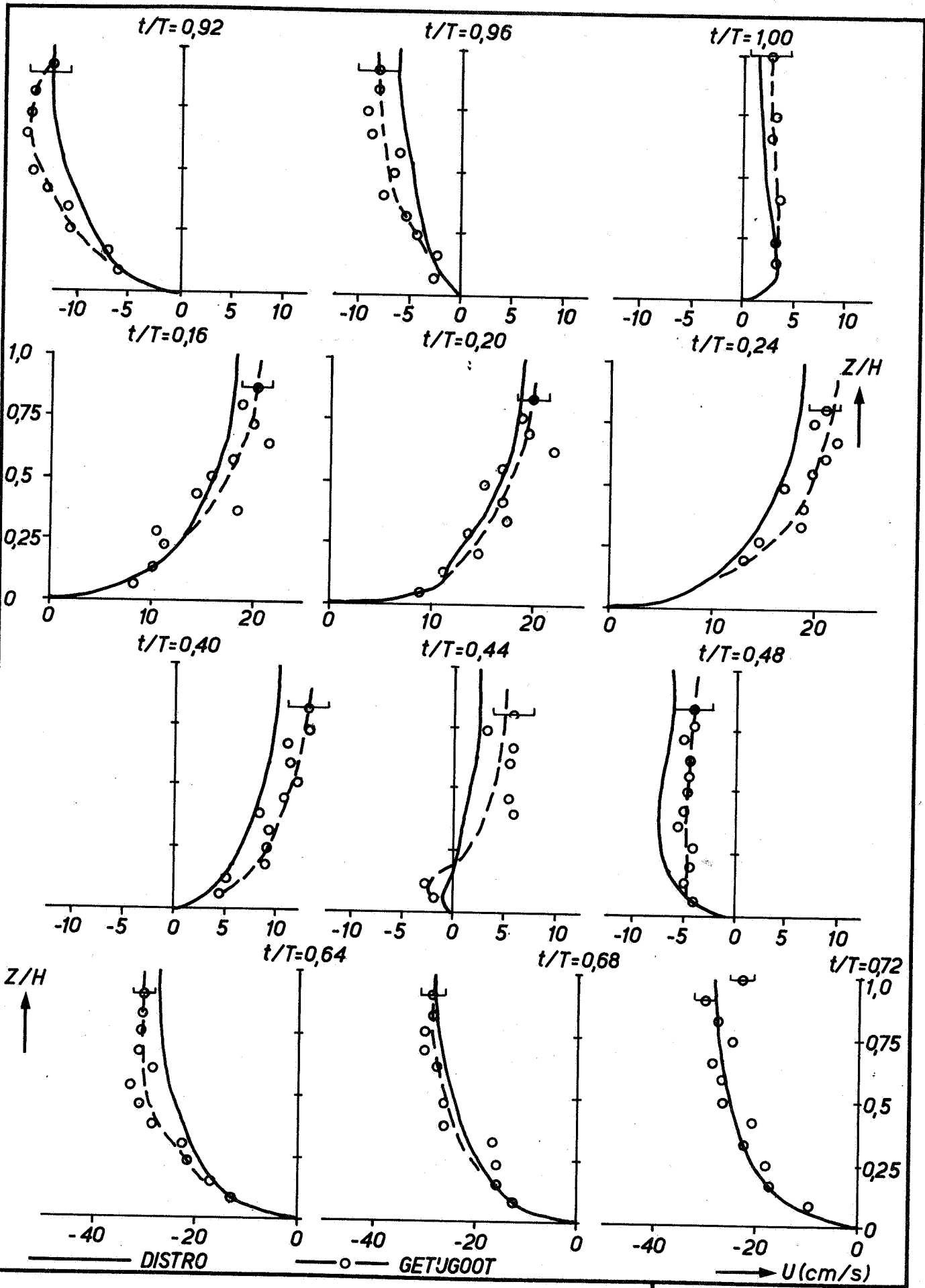
VERGELJING BEREKEND EN GEMETEN VERTIKAAL GETU	T 32	WK
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 896 - 3000	FIG. 25



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 32	WK
STATION 1	A 4
M.896 - 3001	FIG. 26

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 32

WK

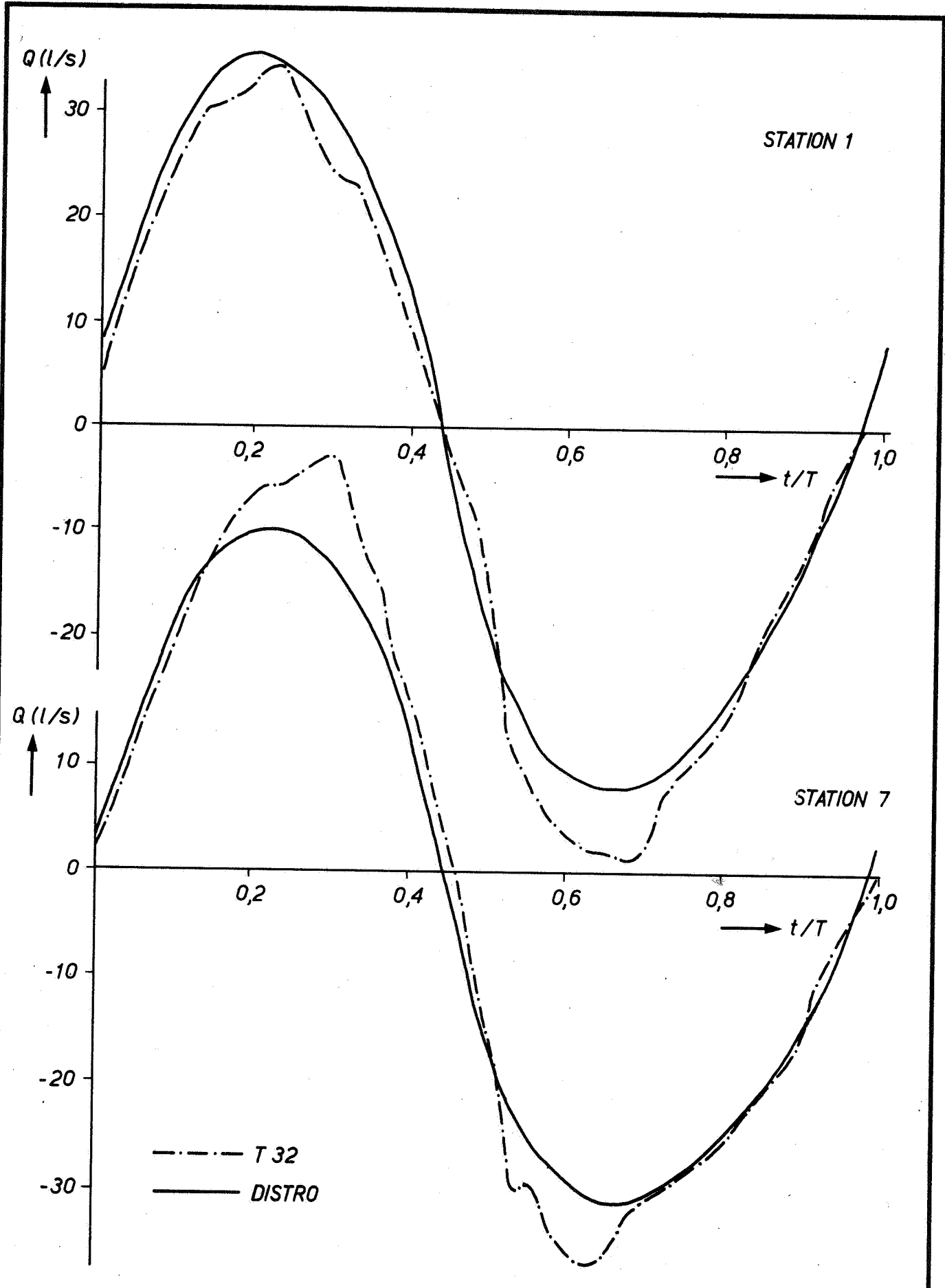
STATION 7

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3002

FIG. 27



VERGELJHING GEMETEN EN BEREKENDE DEBIETKURVEN

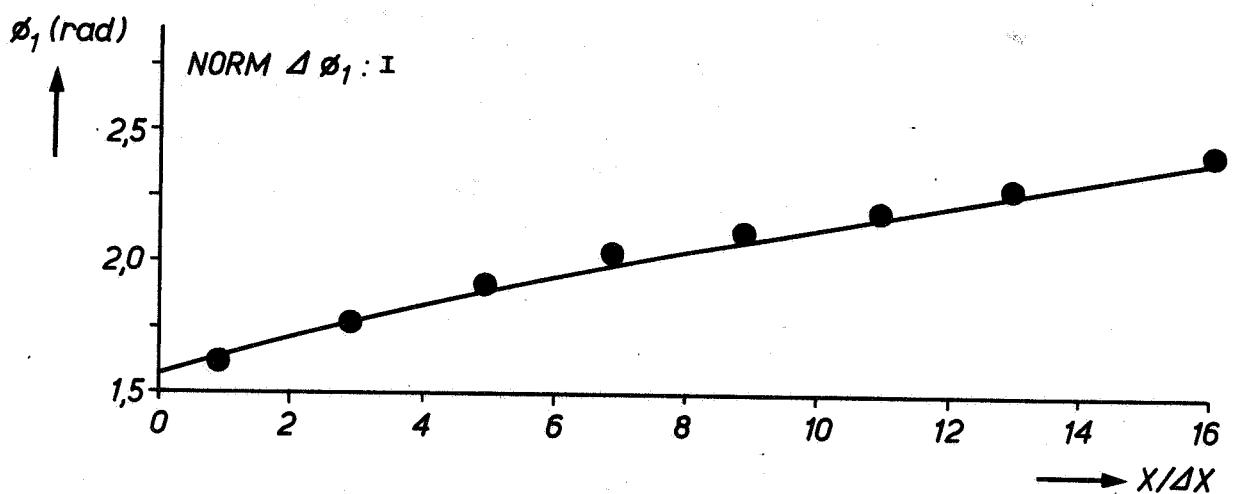
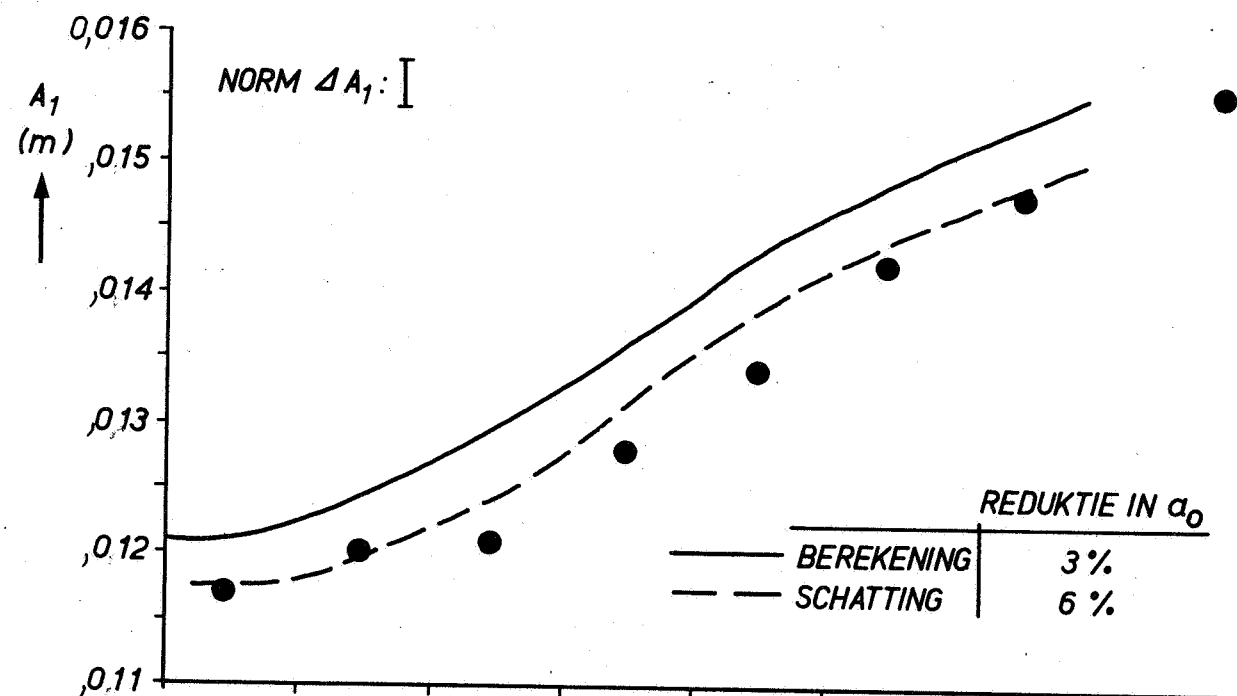
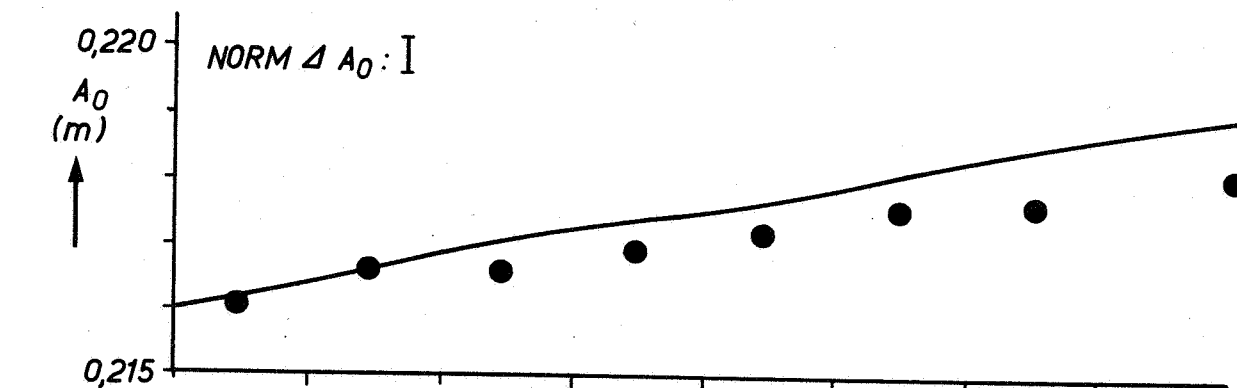
T 32 WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 896 - 3003

FIG. 28



● GOOTPROEF (T 10)
 — DISTRO (I 2)

VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X VERGELUKING GETJGOOT-DISTRO	T 10	WK
	$\Delta X = 3,66$ m	A 4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.896 - 3004	FIG. 29

η (m)



0,02

0,01

0

-0,01

-0,02

STATION 1

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

t/T

η (m)



0,02

0,01

0

-0,01

-0,02

STATION 13

0,2

0,4

0,6

0,8

1,0

t/T

————— METING
- · - · - · - DISTRO

VERGELJING GEMETEN EN BEREKEND VERTIKAAL

T 10

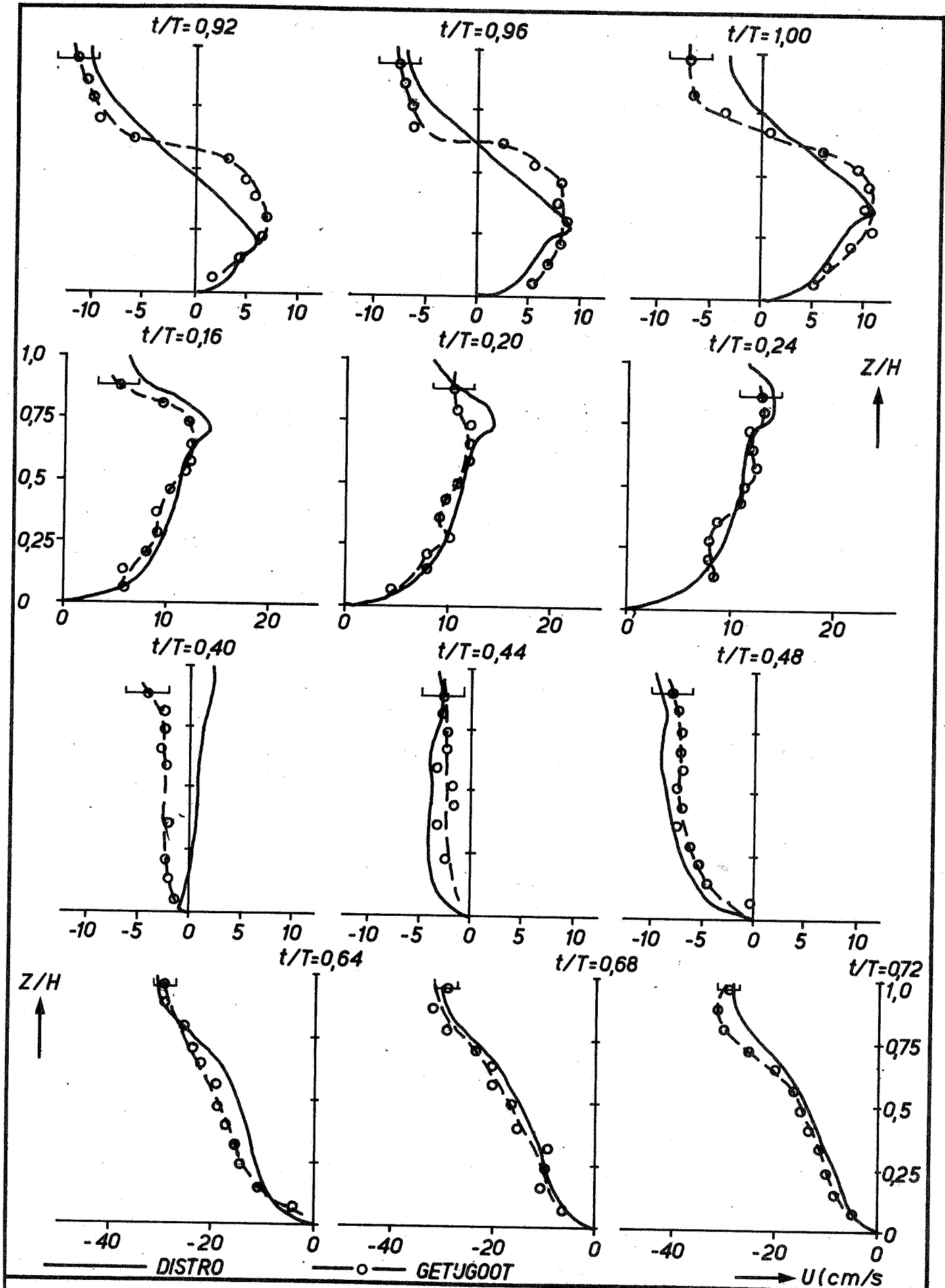
WK

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3005

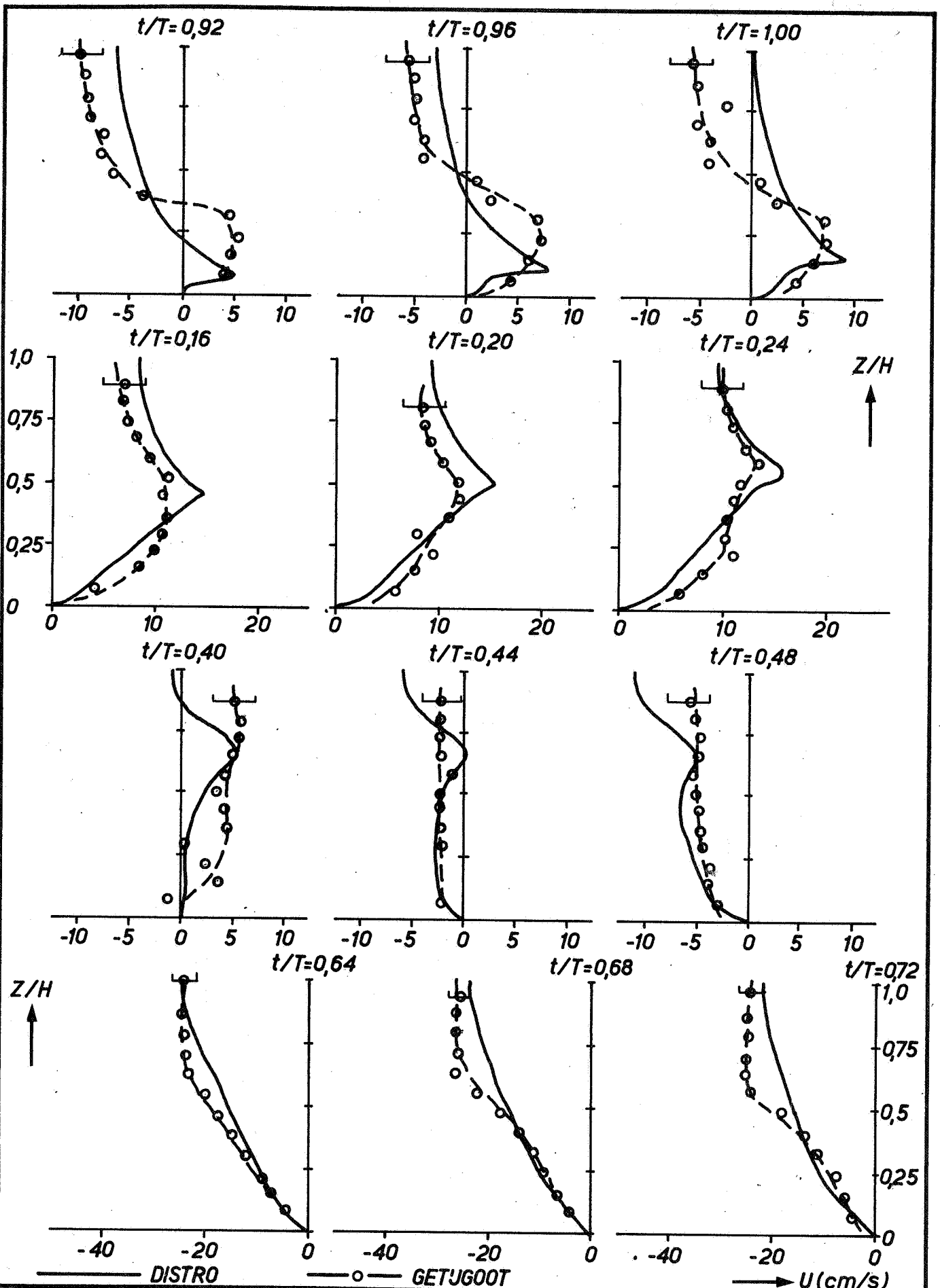
FIG. 30



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 10	WK
STATION 1	A 4
M.896 - 3006	FIG. 31

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 10

WK

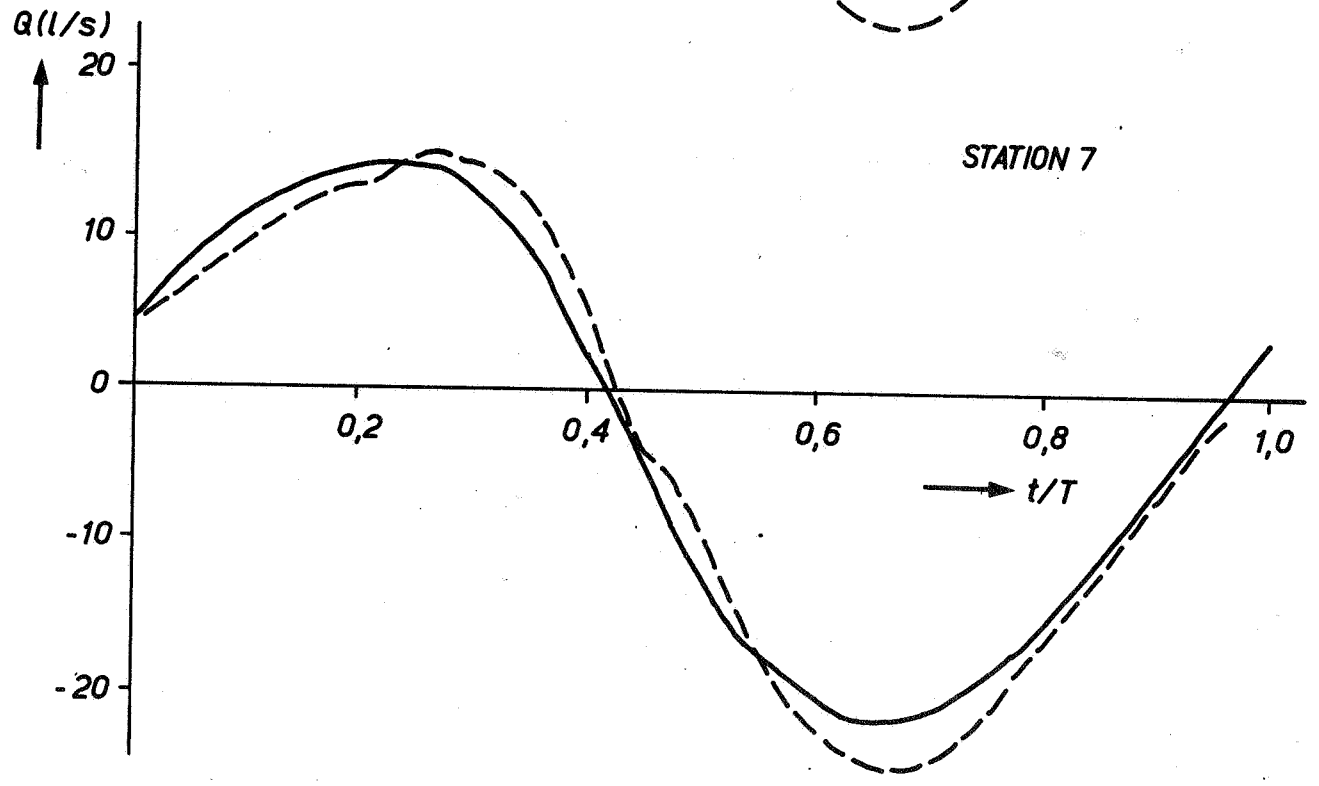
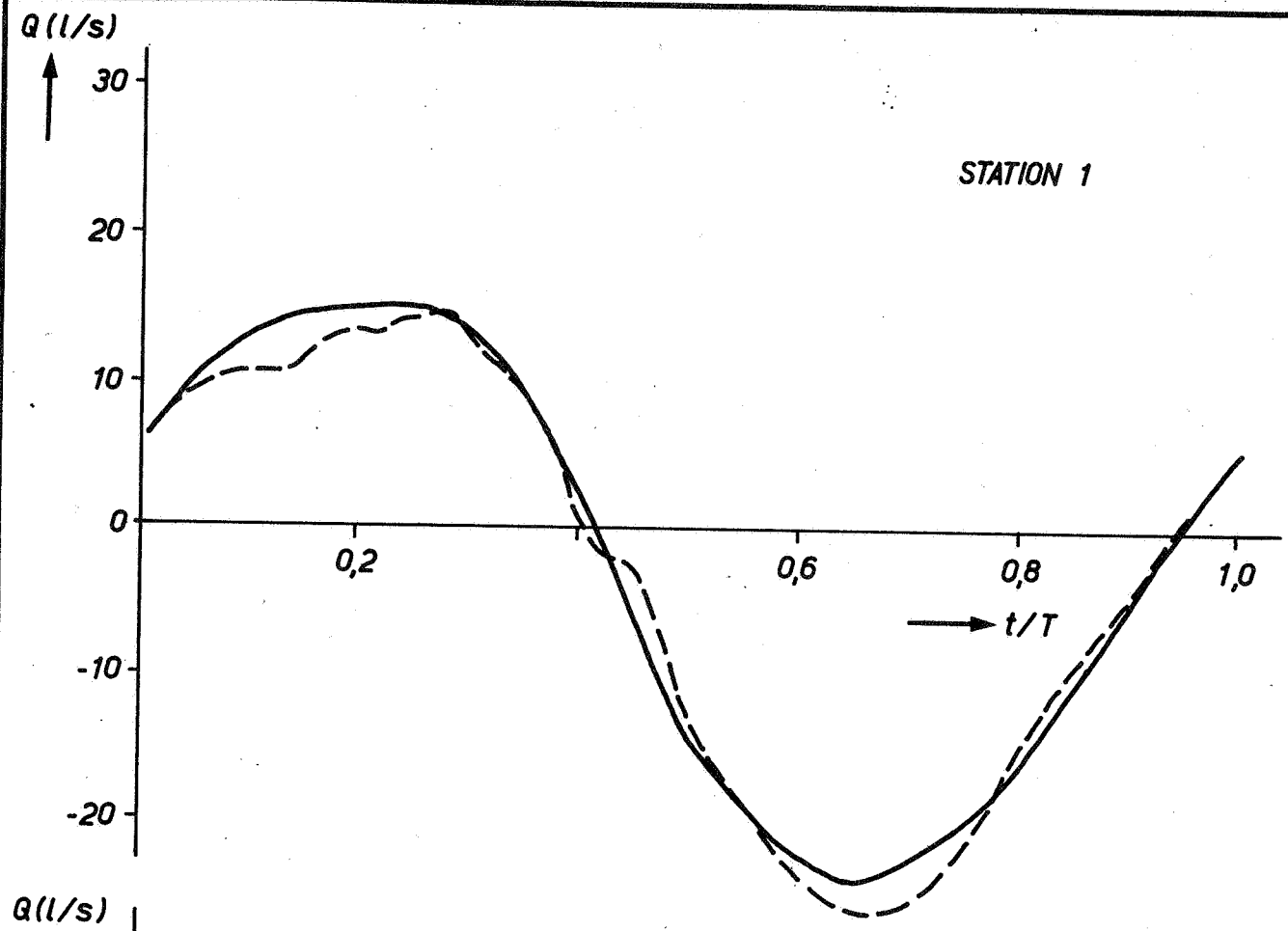
STATION 7

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3007

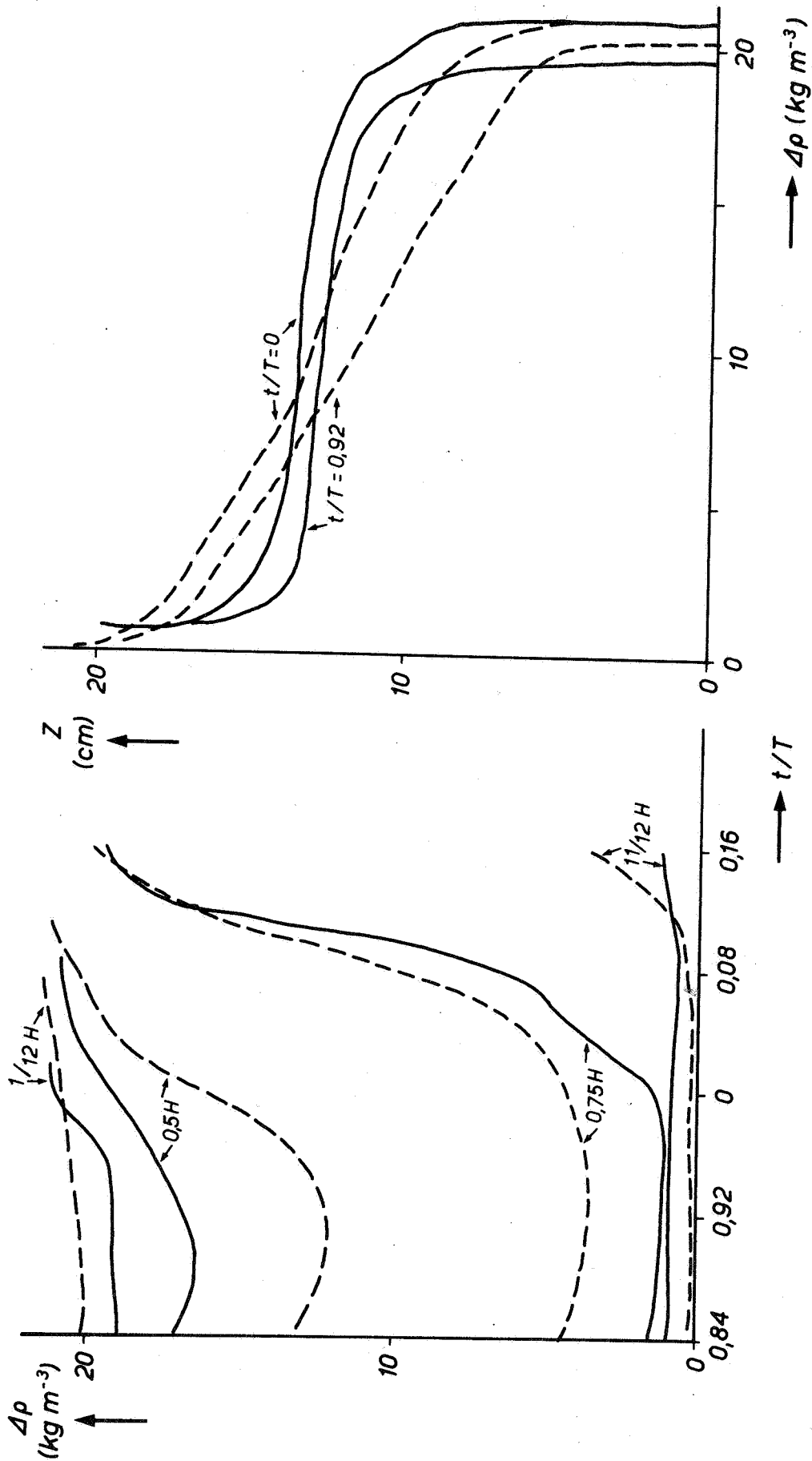
FIG. 32



- - - - T 10
 ——— DISTRO

VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE DEBIETKURVEN	T 10	WK
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 896 - 3008	FIG. 33

— PROEF
 - - - DISTRO



VERGELUKING GEMETEN EN BEREKENDE DICHTHEIDS-
 VERDELING IN STATION 1 ROND L.W.K.

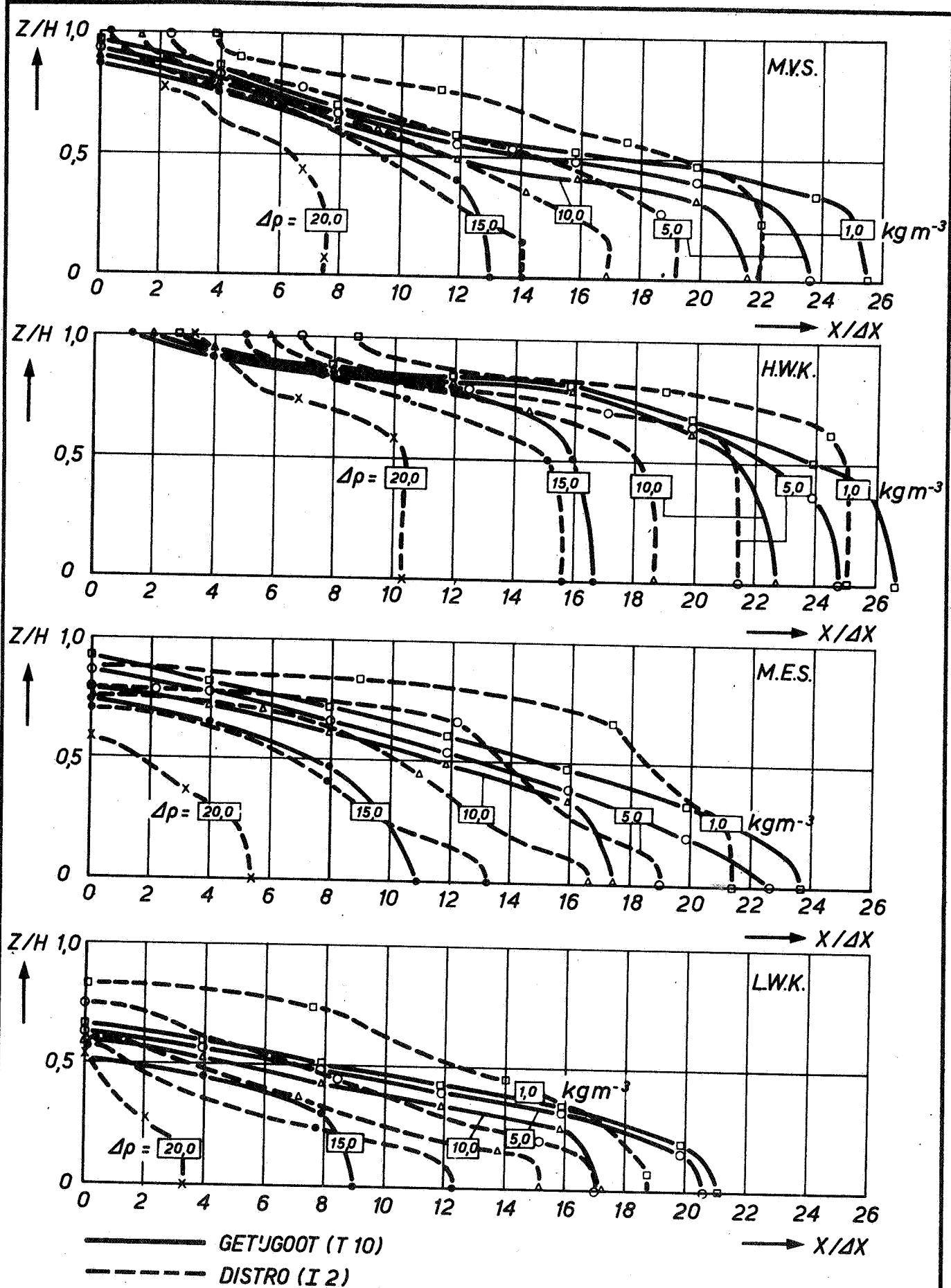
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3009

FIG. 34



VERGELUKING GEMETEN EN BEREKENDE
2 D- DICHTHEIDSV ERDELING

T 10

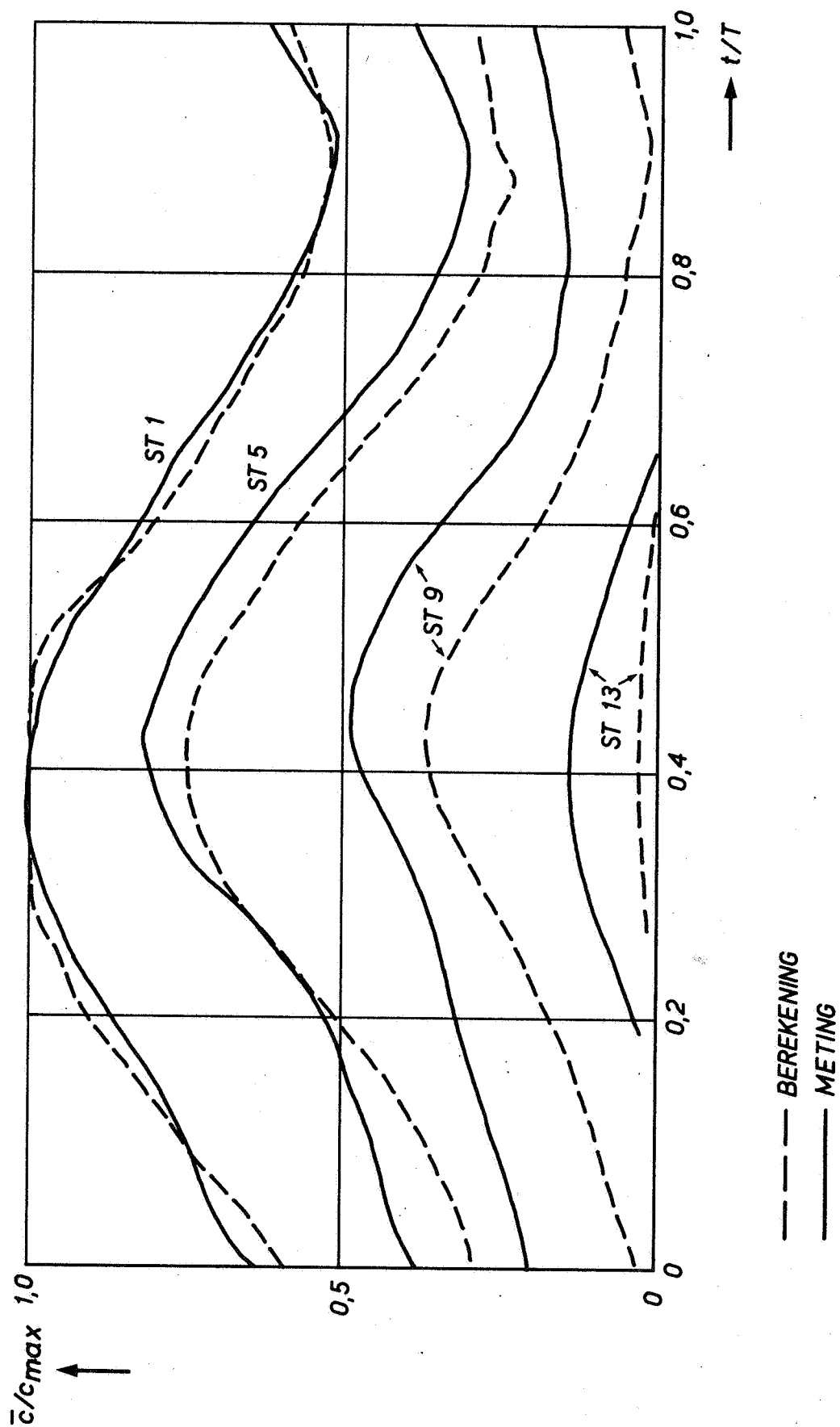
$\Delta X = 1,83 \text{ m}$

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3010

FIG. 35



VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE
1 D-KONCENTRATIEVERDELING

T 10

WK

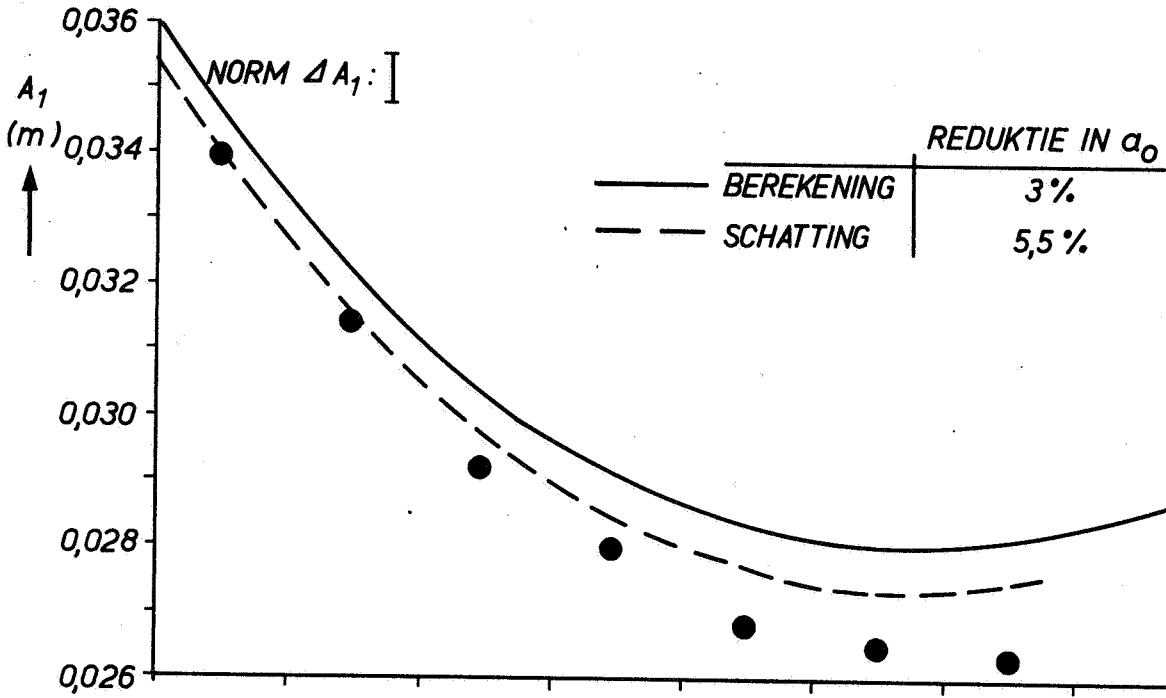
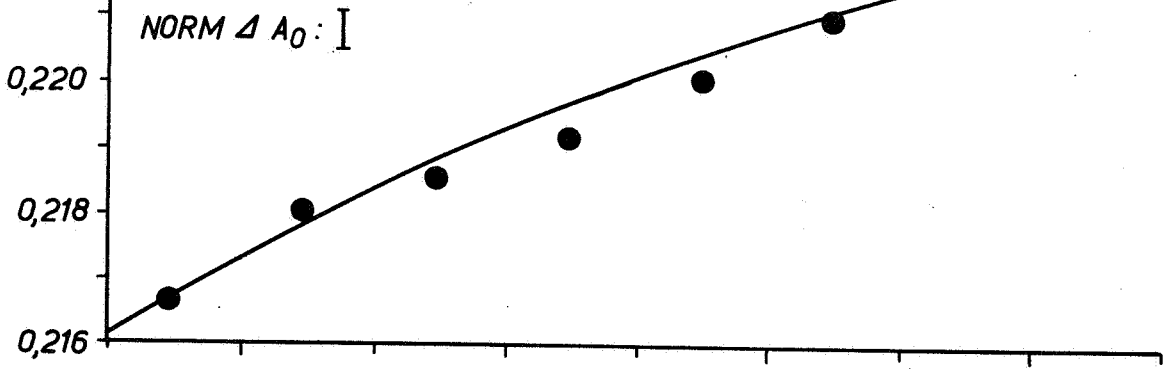
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

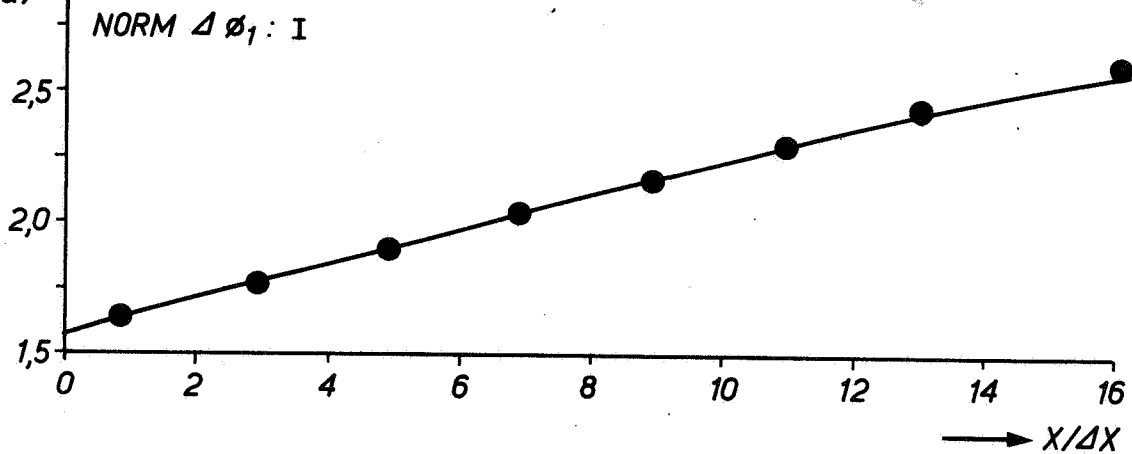
M.896 - 3011

FIG. 36

A_0 (m)



ϕ_1 (rad)



● GOOTPROEF (T 31)
 — DISTRO (I 4)

VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X
 VERGELJING GETJGOOT-DISTRO

T₃₁

WK

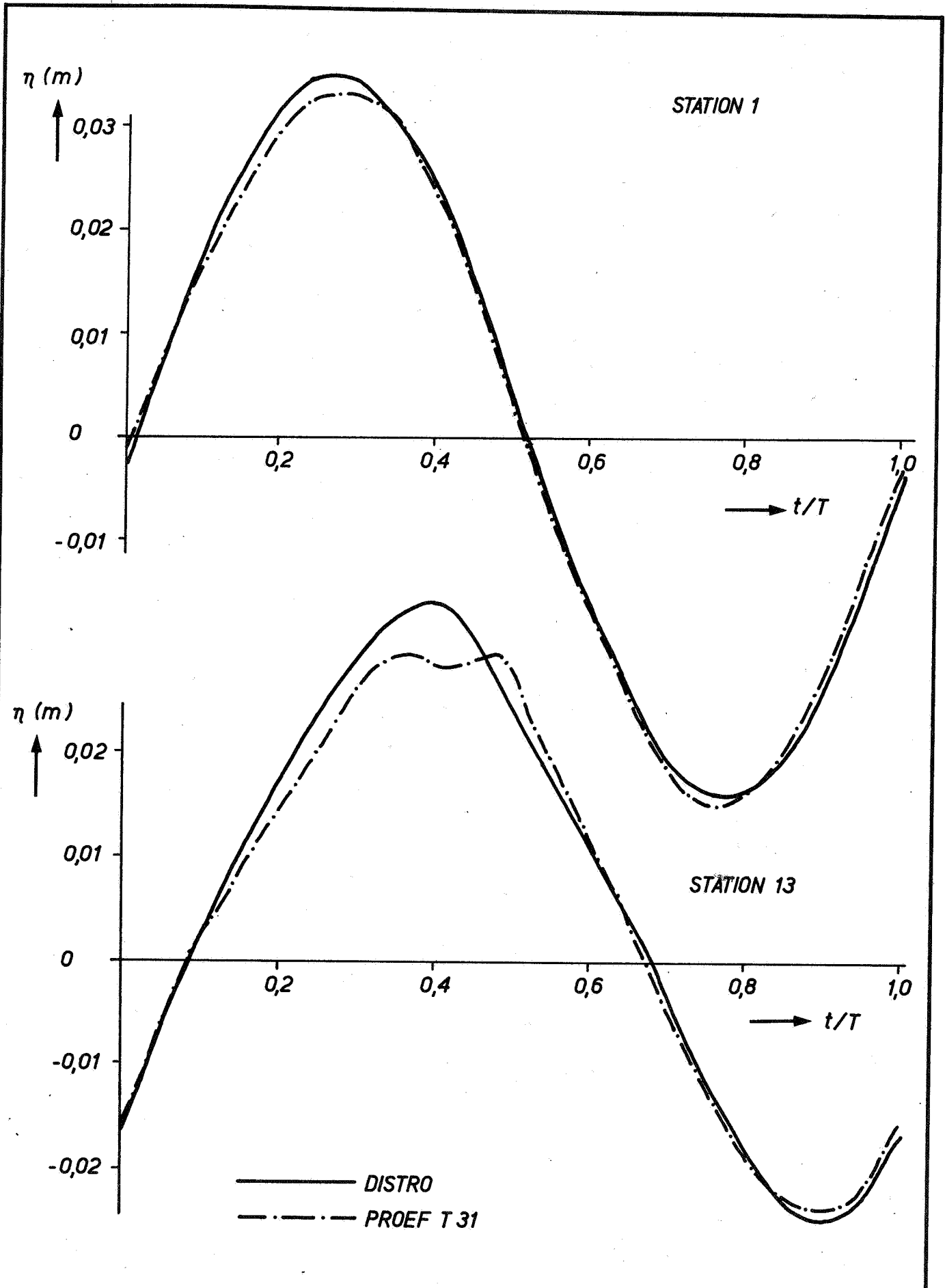
$\Delta X = 3,66$ m

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3012

FIG. 37.



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKEND VERTIKAAL GETU

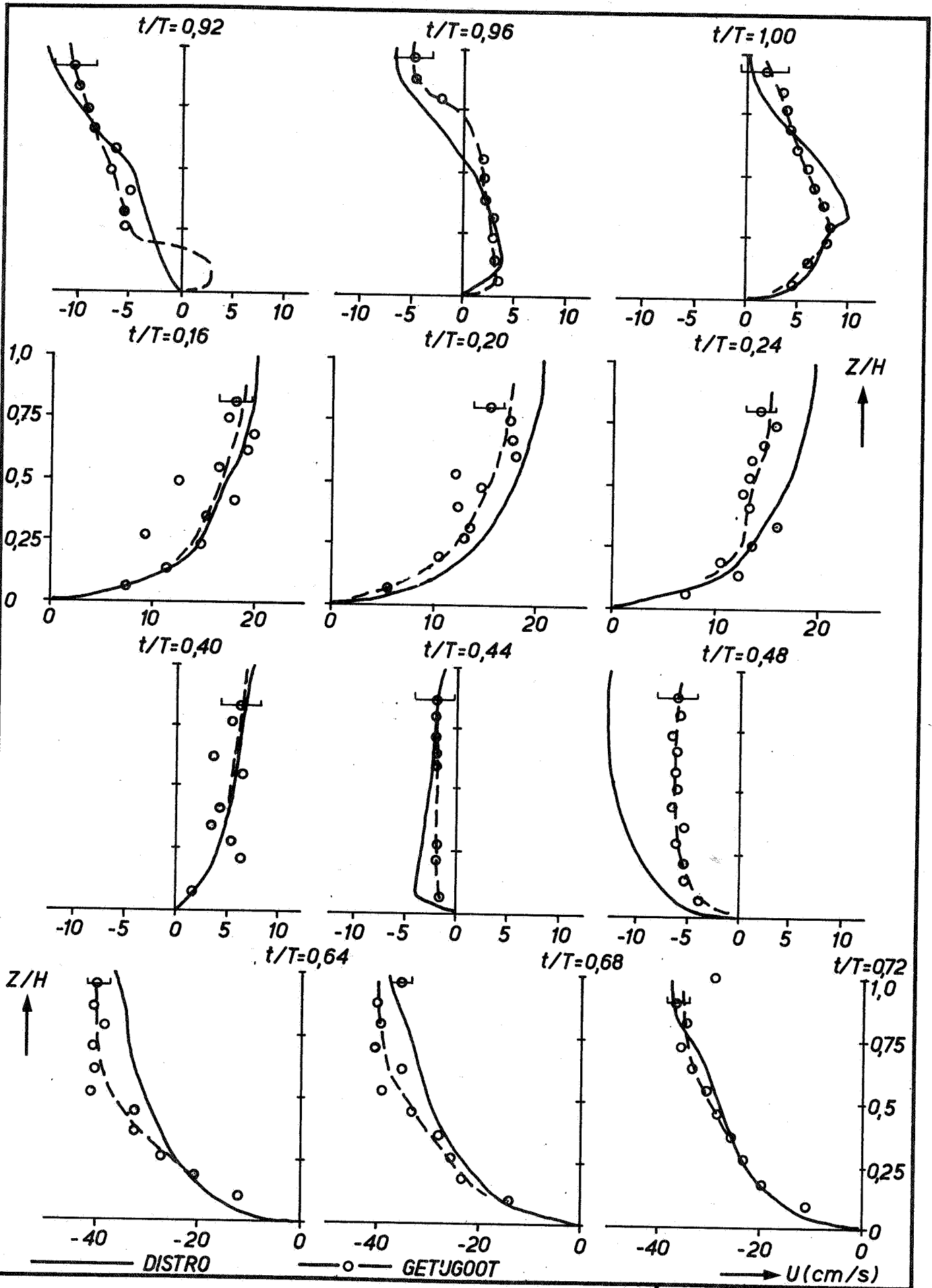
T 31 WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 896 - 3013

FIG. 38



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 31

WK

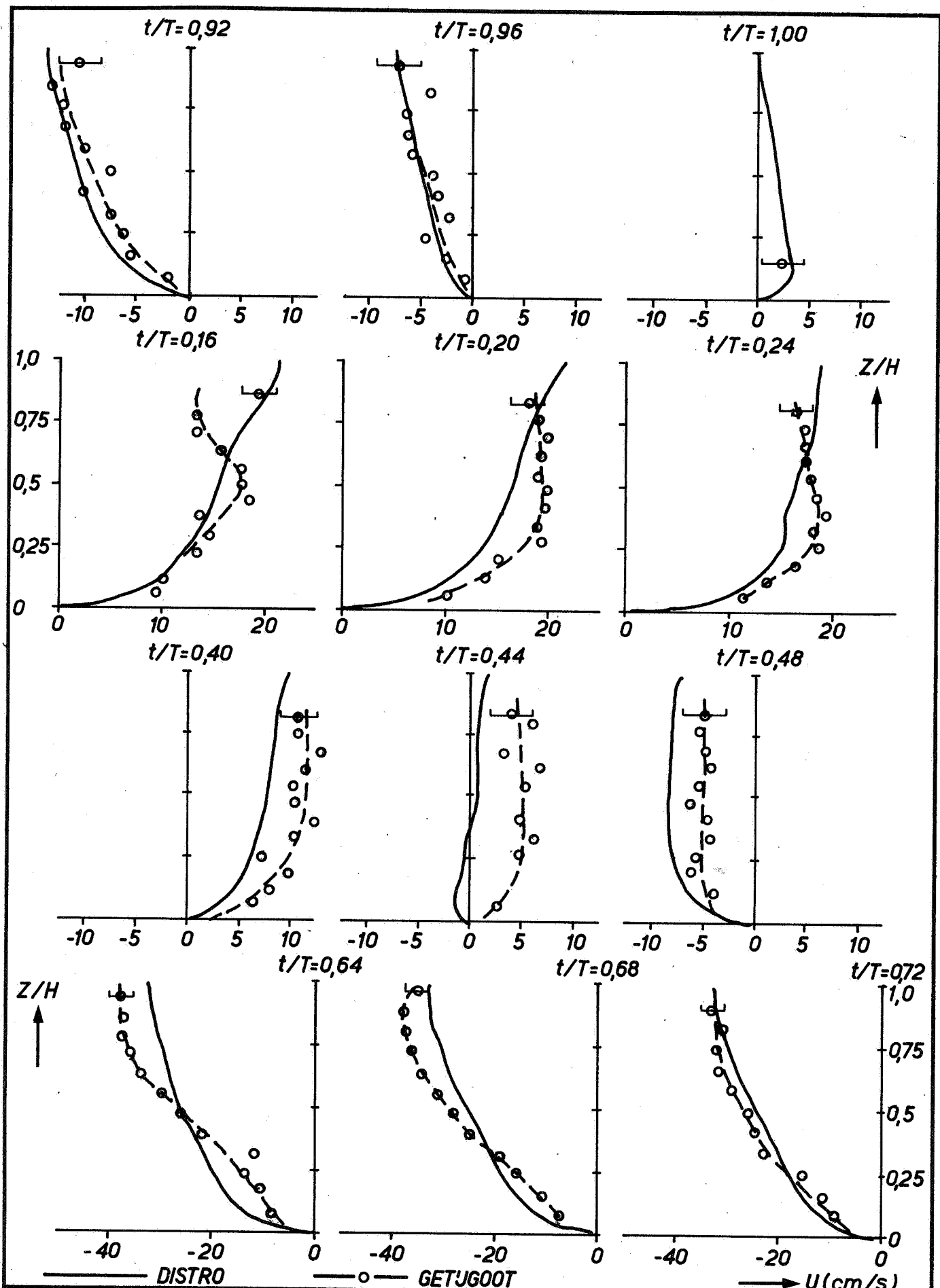
STATION 1

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3014

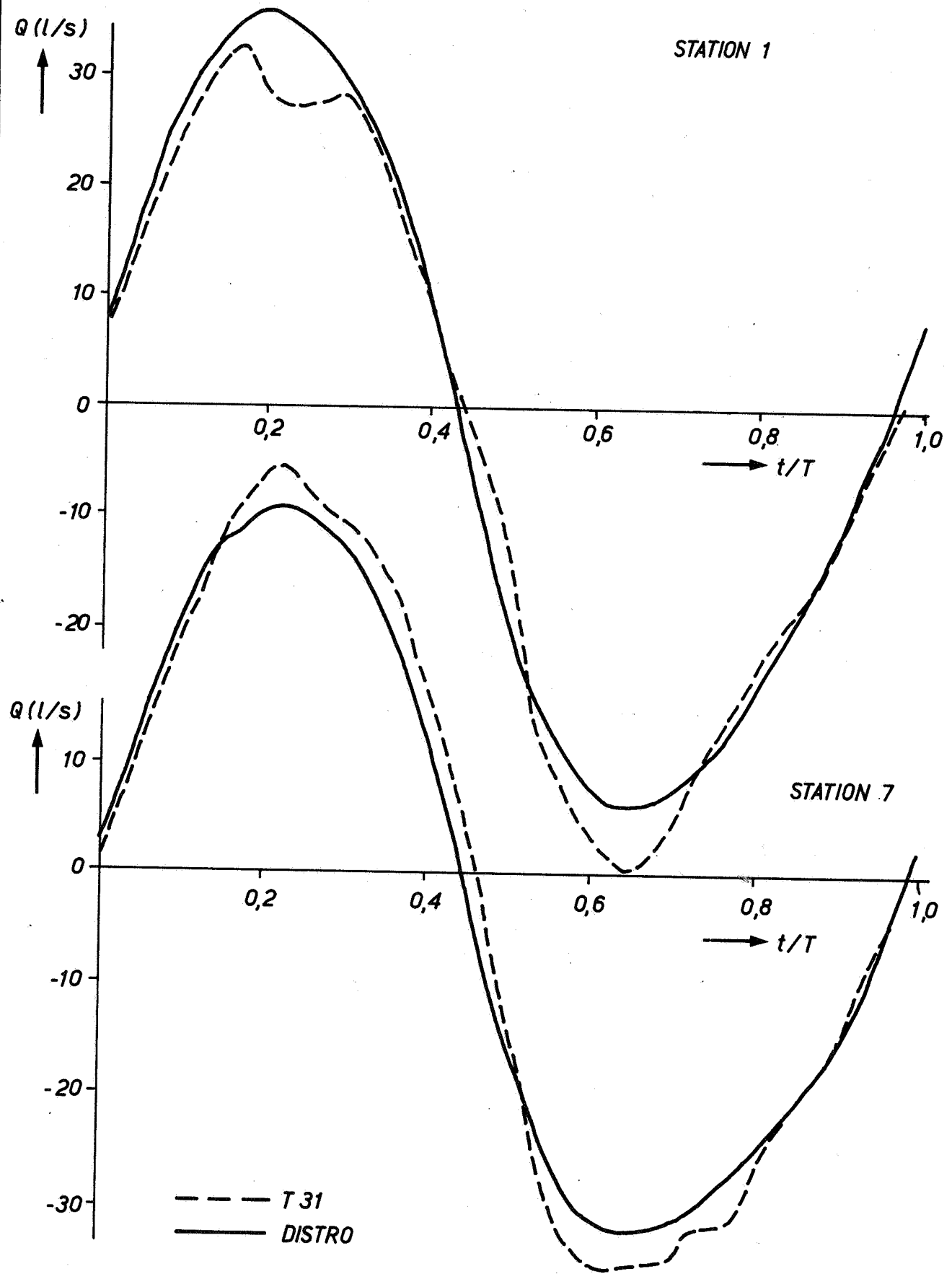
FIG. 39



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 31	WK
STATION 7	A 4
M.896 - 3015	FIG. 40

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



VERGELIJING VAN BEREKEND EN GEMETEN DEBIETKURVEN

T 31

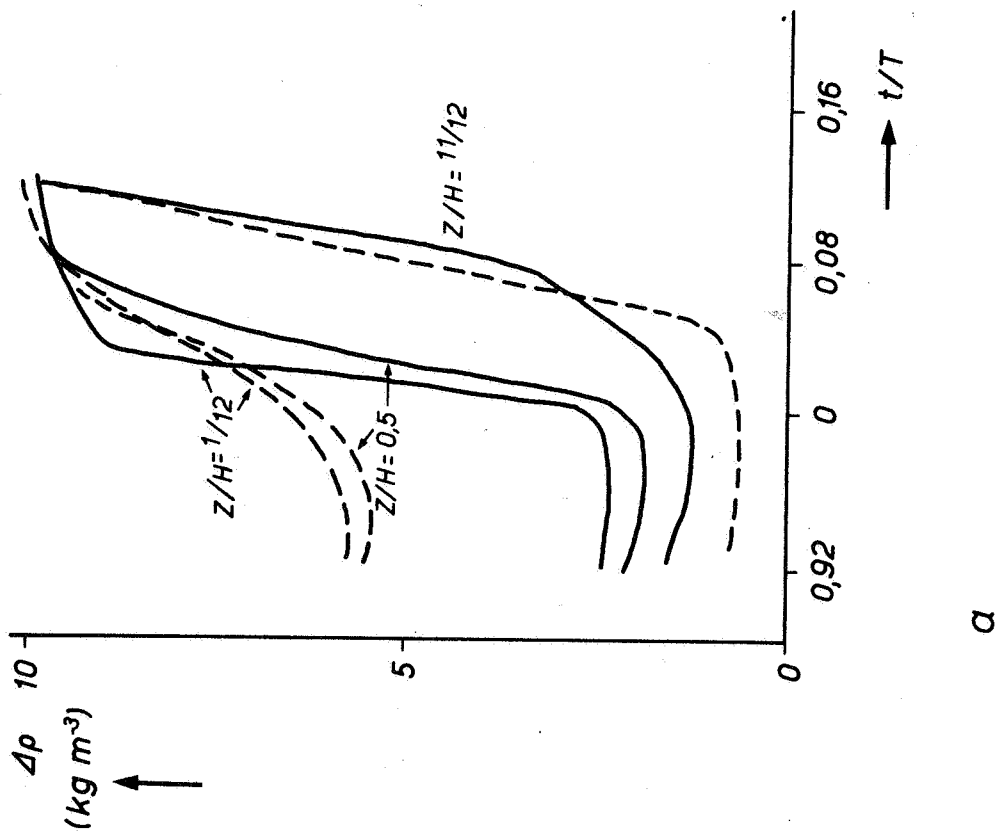
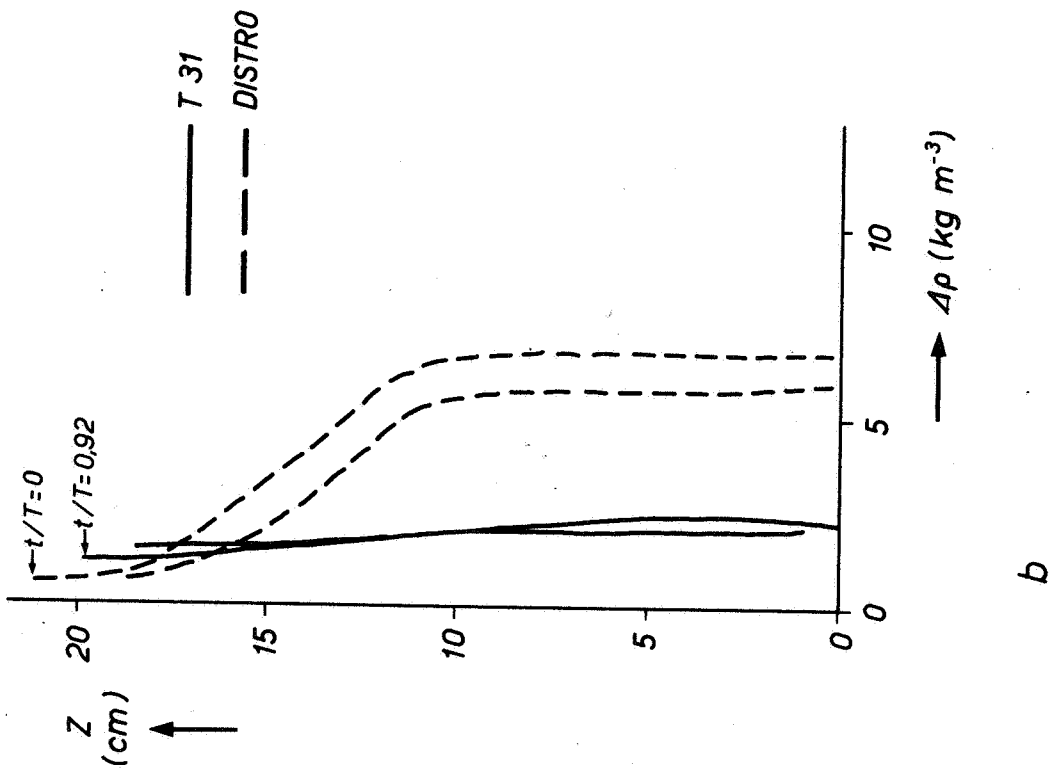
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3016

FIG. 41



VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE DICHTHEIDS-
VERDELING IN STATION 1 ROND L.K.W.

T 31

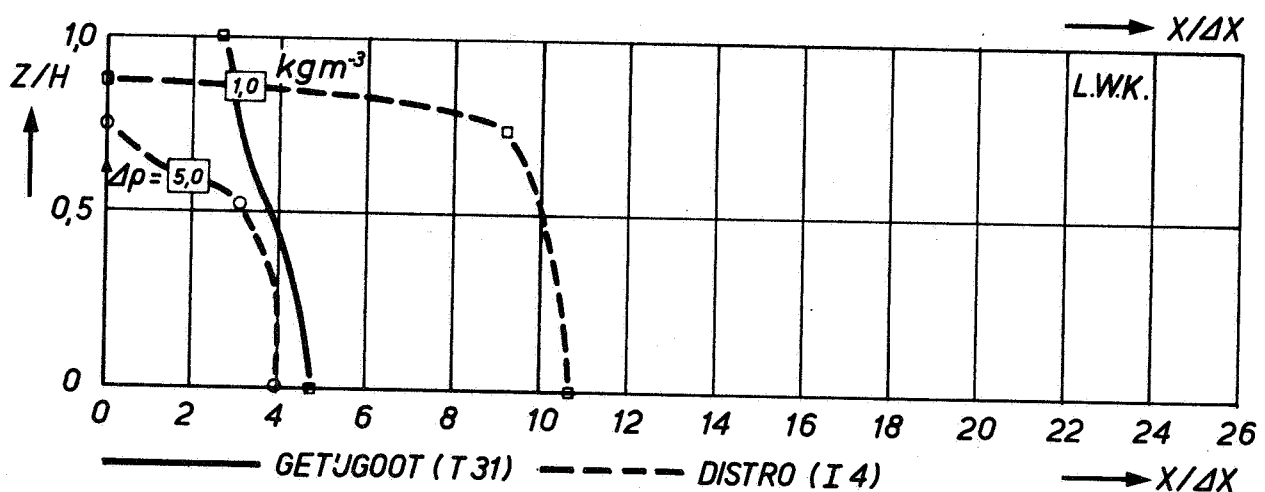
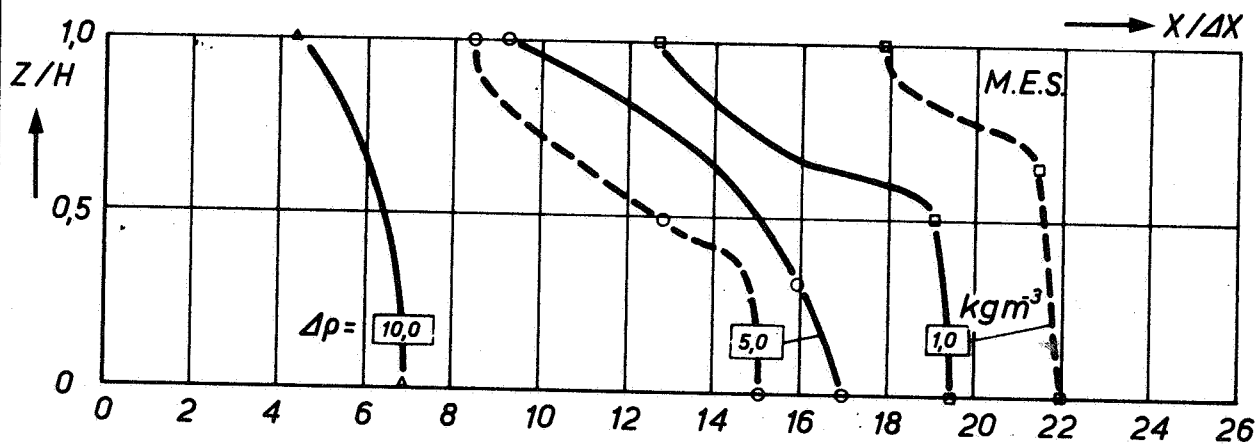
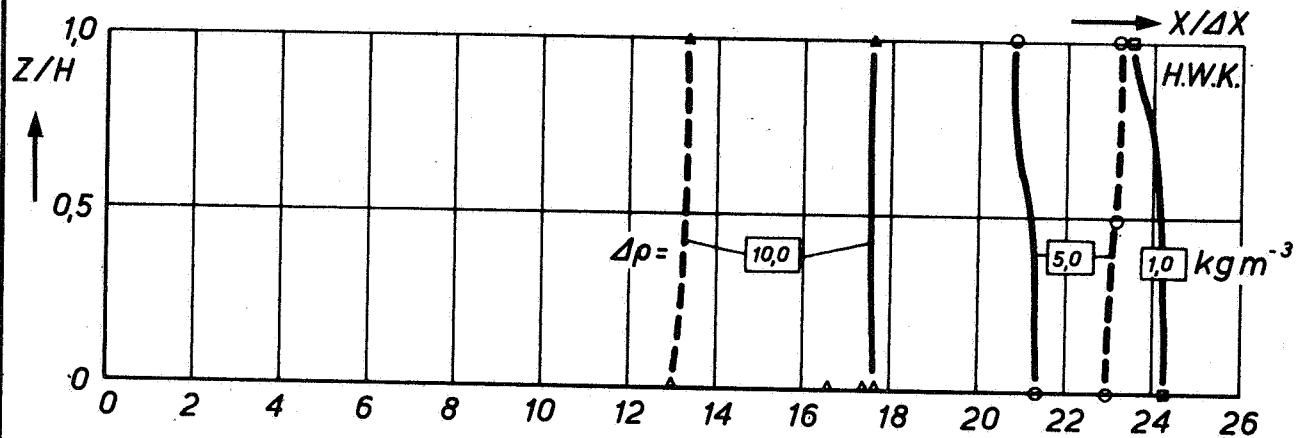
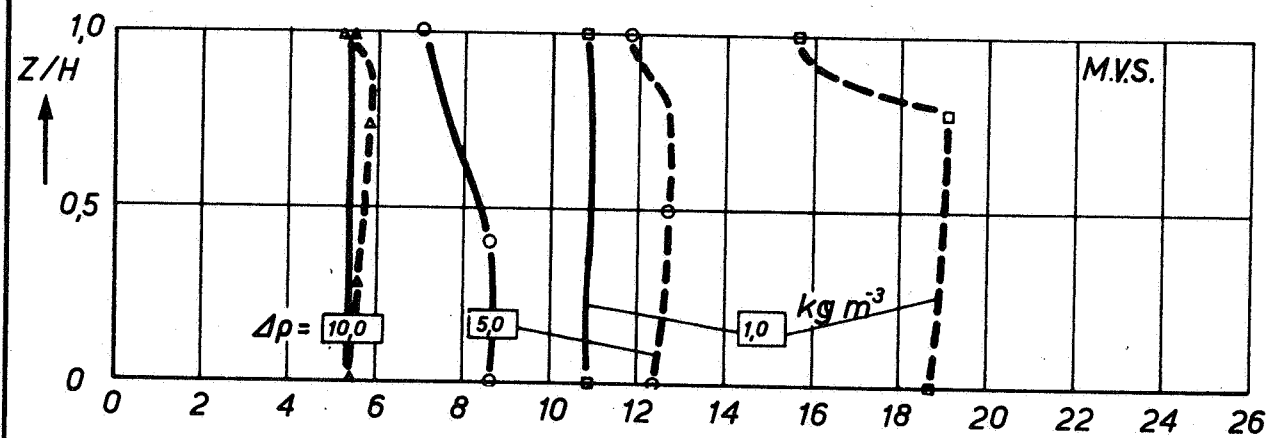
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3017

FIG. 42



VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE
2D-DICHTHEIDSVERDELING

T 31

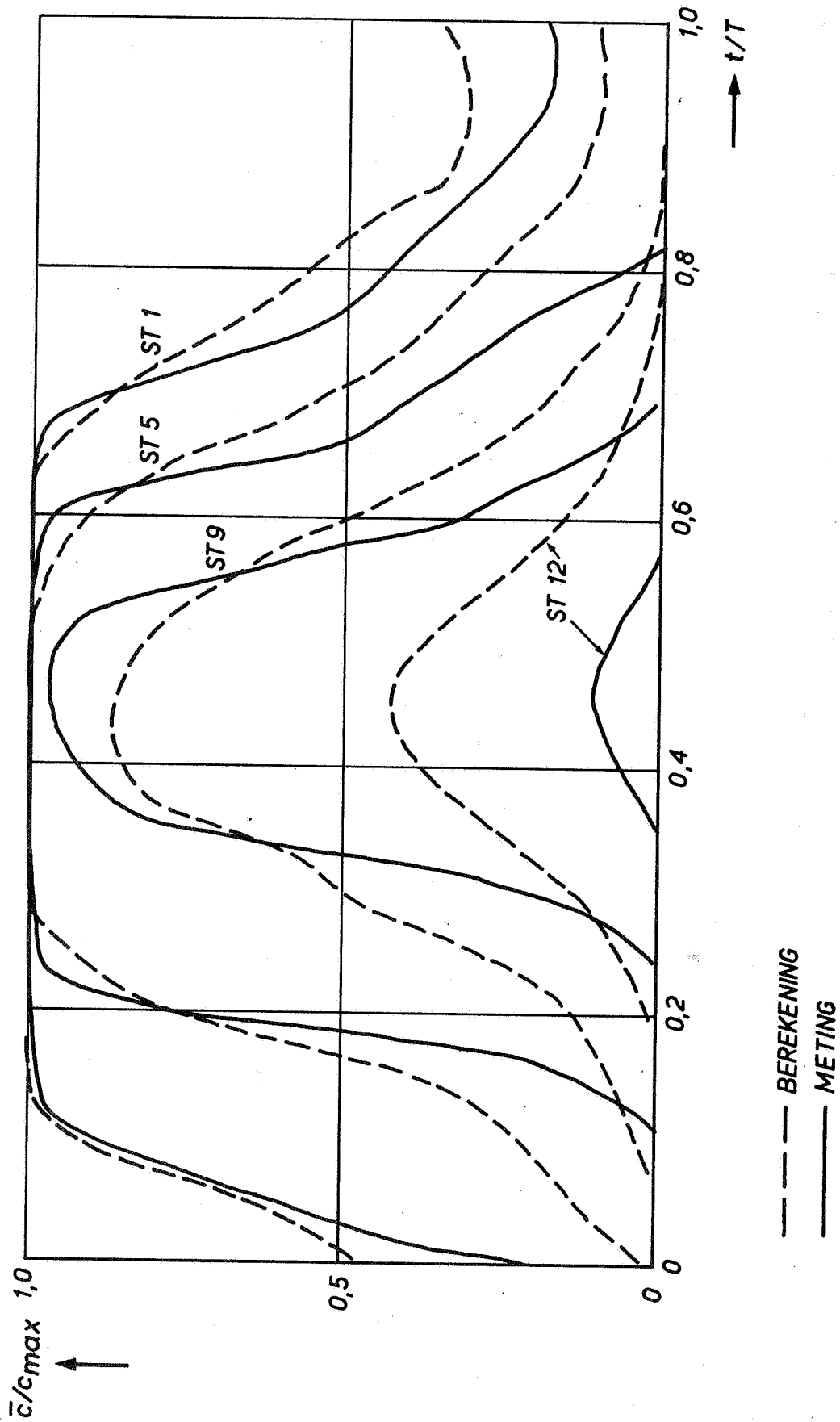
$\Delta H = 1,83$

A 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3018

FIG. 43



VERGELJJKING GEMETEN EN BEREKENDE
1 D - KONCENTRATIEVERDELING

T 31

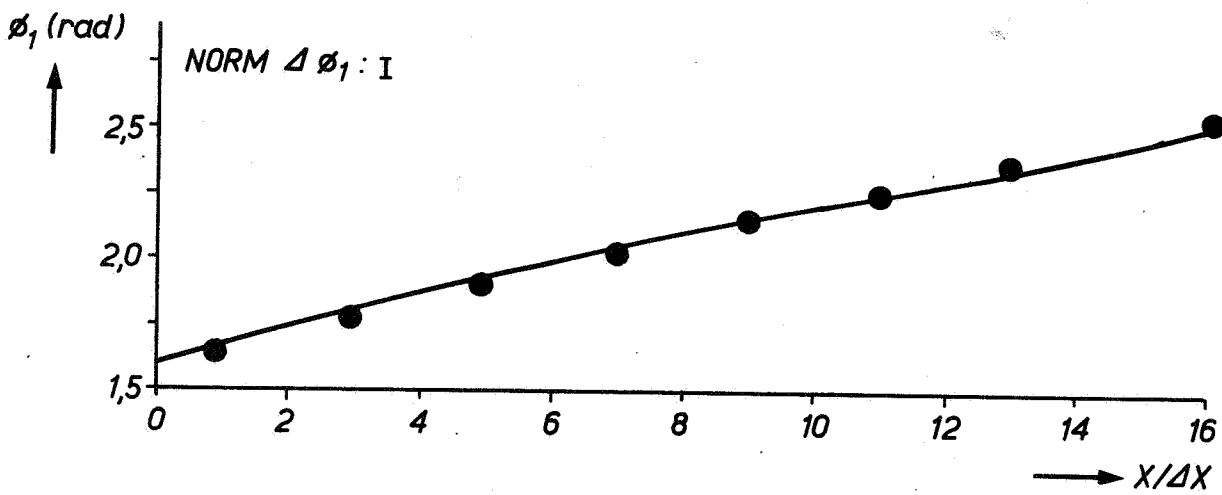
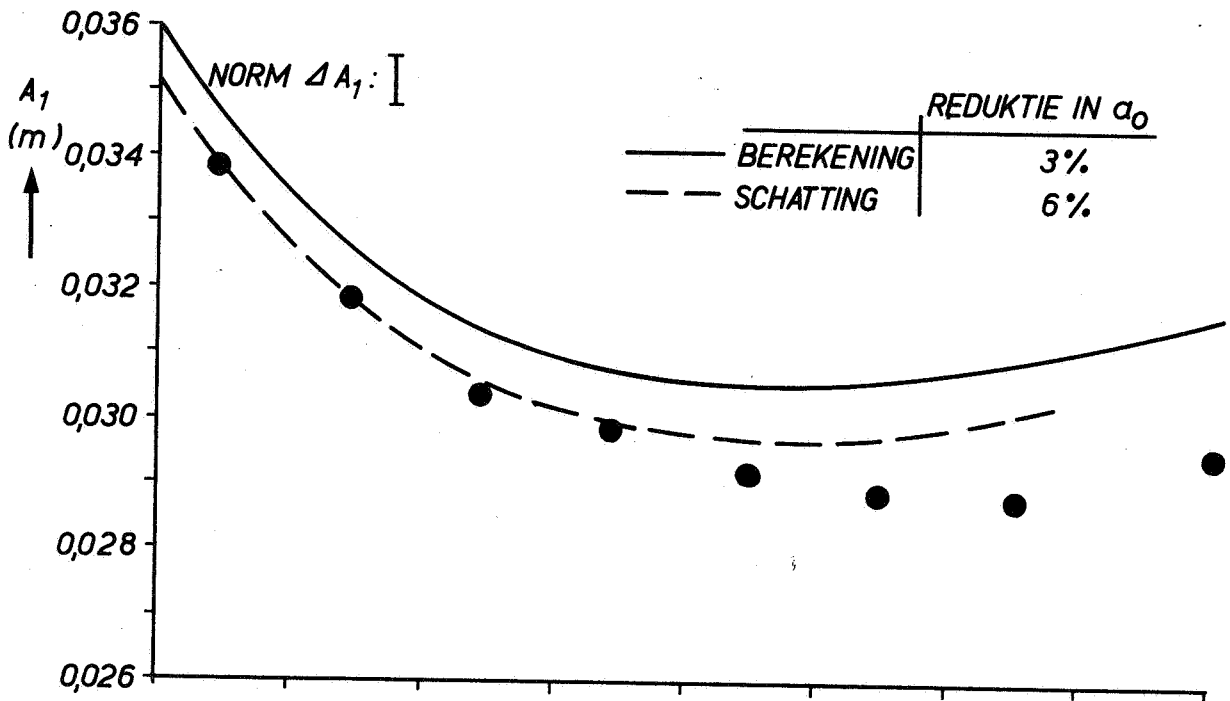
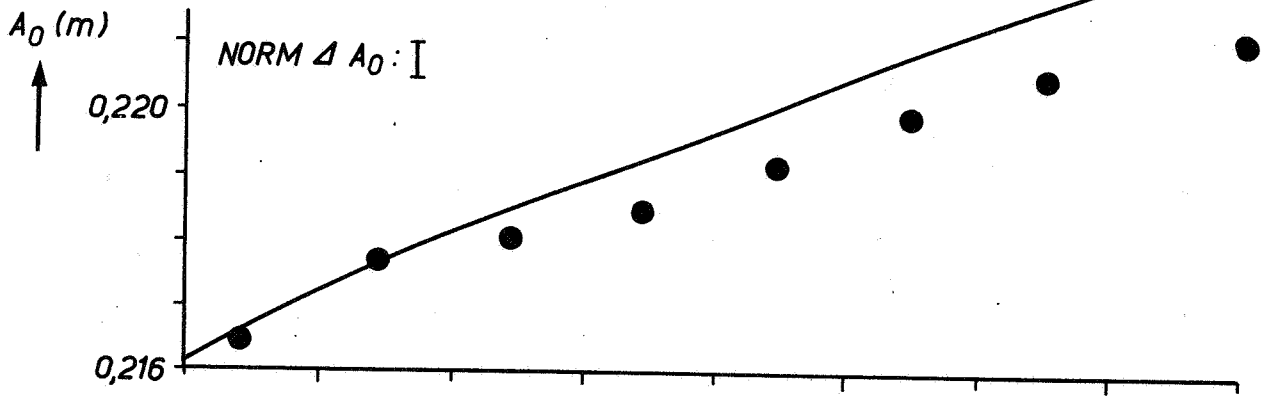
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3019

FIG. 44



● GOOTPROEF (T 30)
 — DISTRO (I3)

VERLOOP FOURIERKOMPONENTEN VERTIKAAL GETJ MET X
 VERGELUKING GETJGOOT-DISTRO

T 30

WK

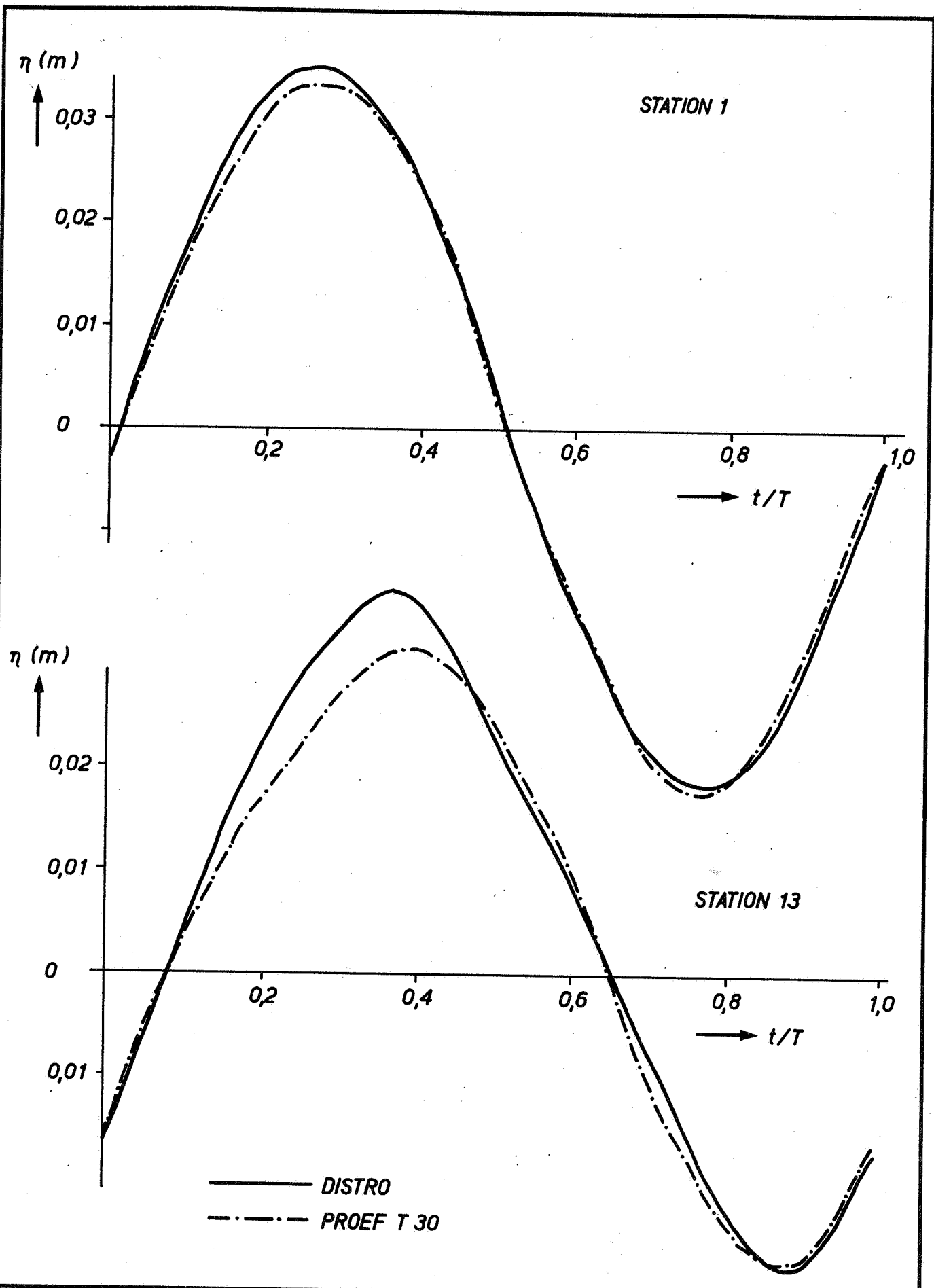
$\Delta X = 3,66$ m

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3020

FIG. 45



VERGELUKING GEMETEN EN BEREKEND VERTIKAAL GETUJ

T.30

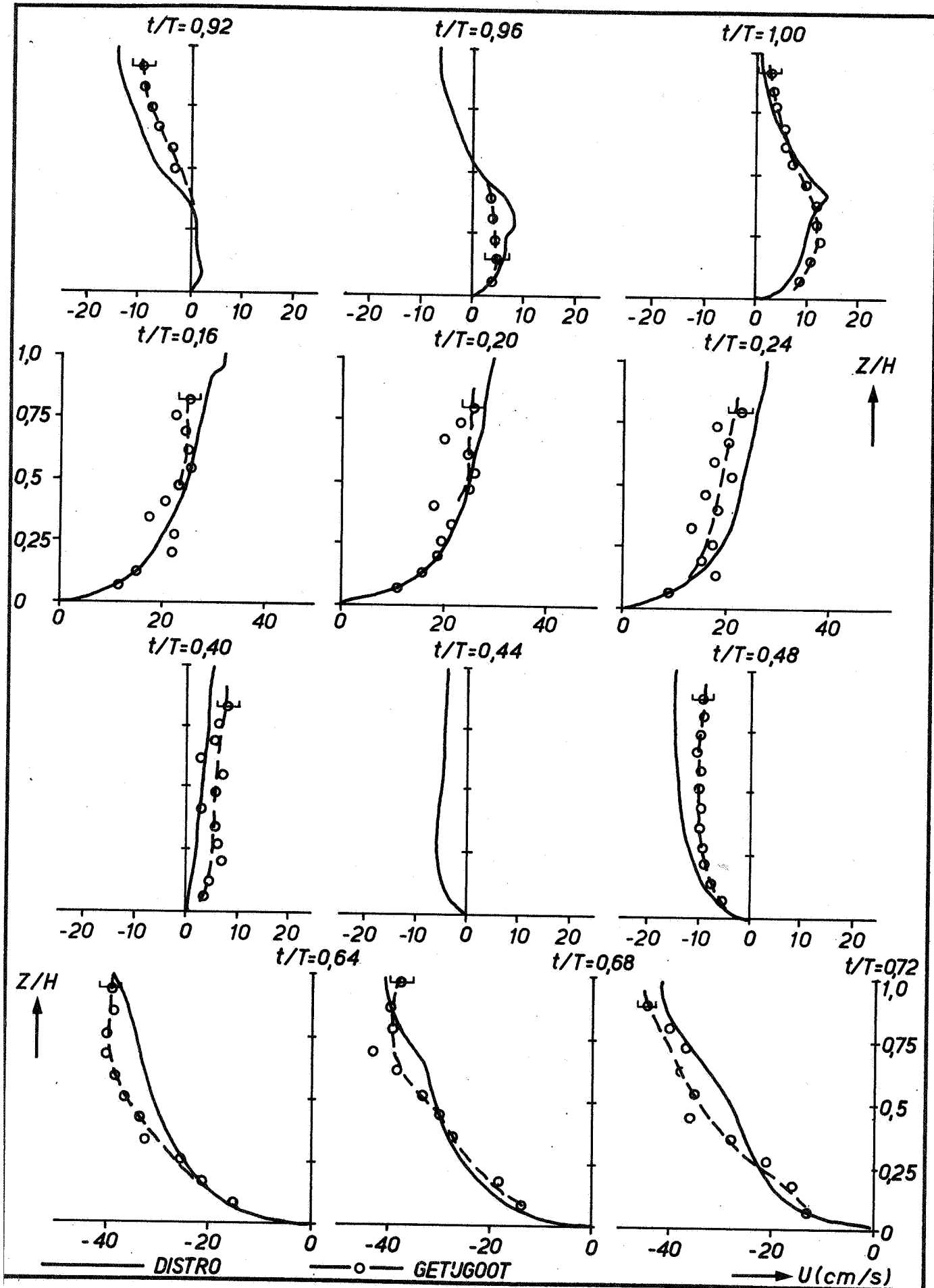
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3021

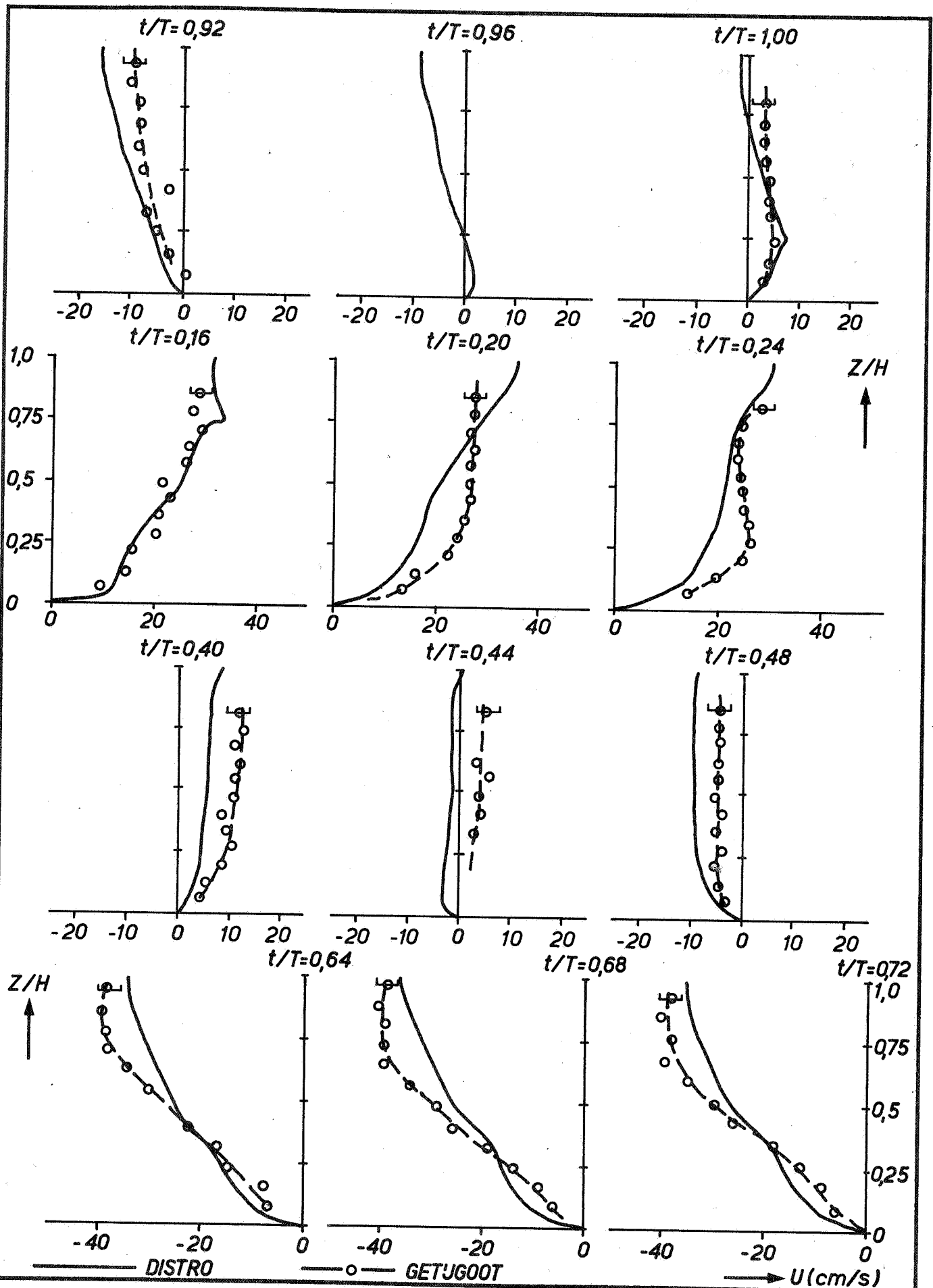
FIG. 46



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 30	WK
STATION 1	A4
M.896-3022	FIG. 47

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



VERGELIJING GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDSPROFIELEN

PROEF T 30

WK

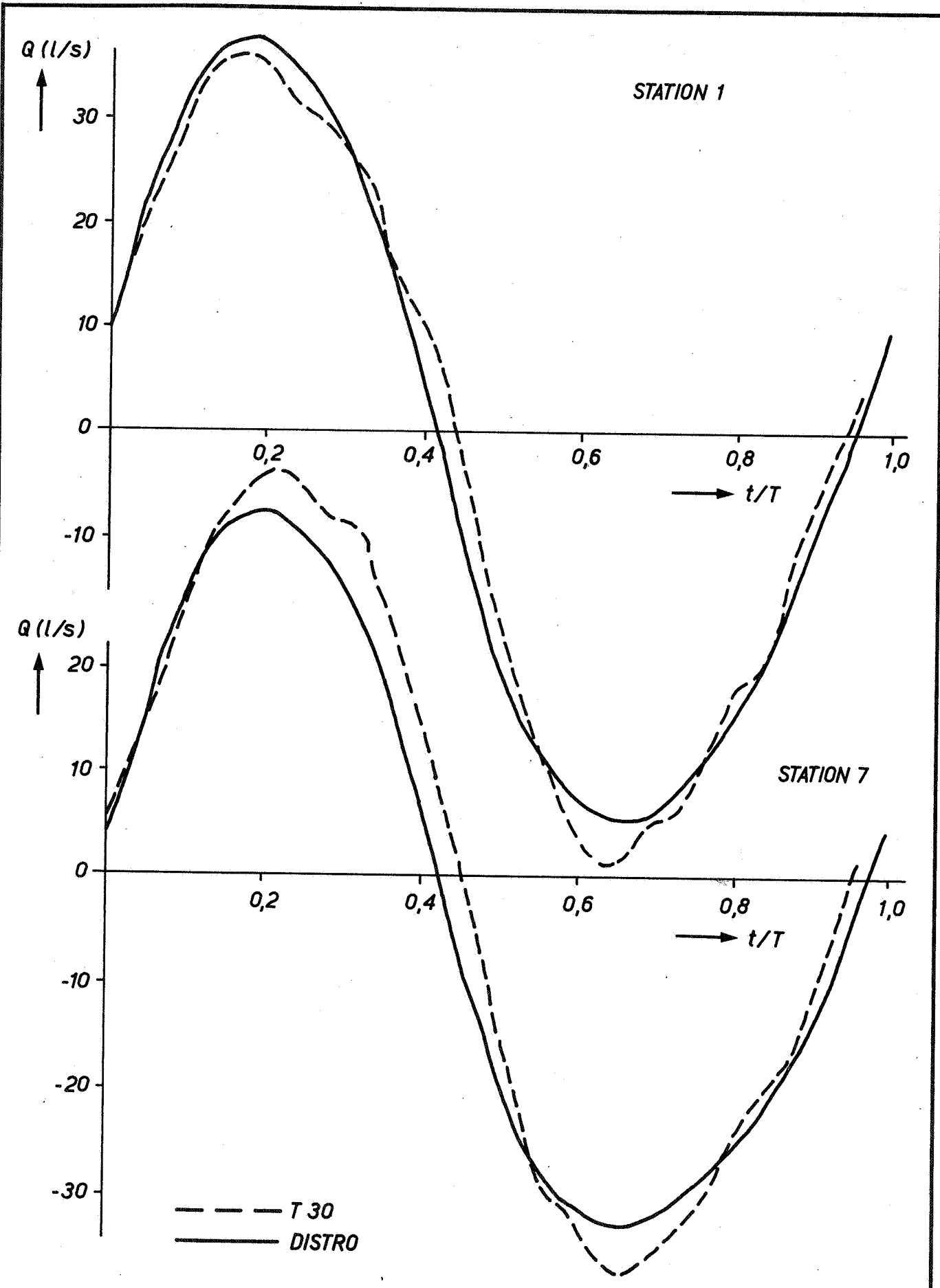
STATION 7

A4

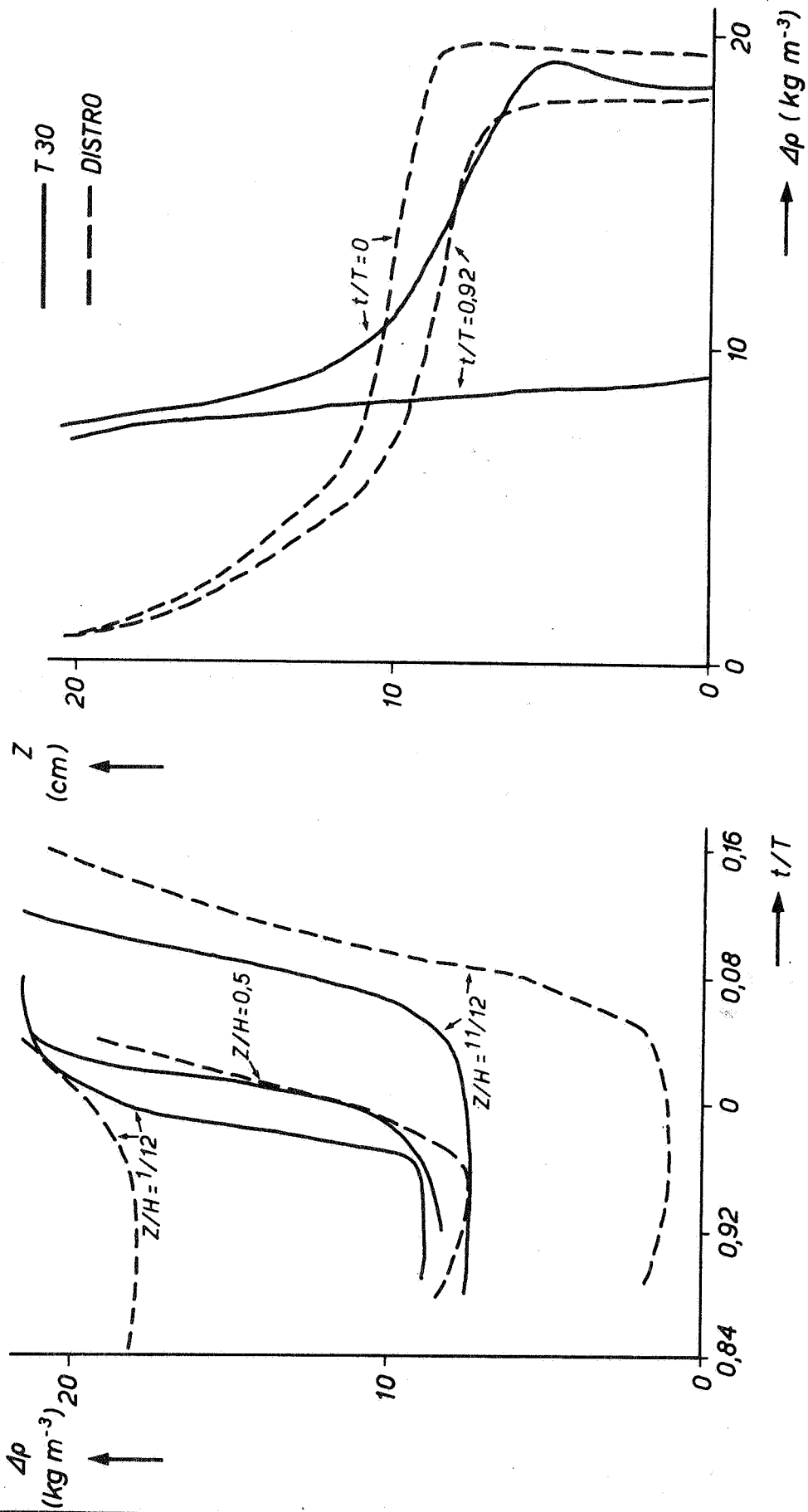
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3023

FIG. 48



VERGELJING BEREKEND EN GEMETEN DEBIETKURVEN	T 30	WK
		A 4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.896 - 3024	FIG. 49



VERGELIJING GEMETEN EN BEREREKENDE DICHTHEIDS -
VERDELING IN STATION 1 ROND L.W.K.

T 30

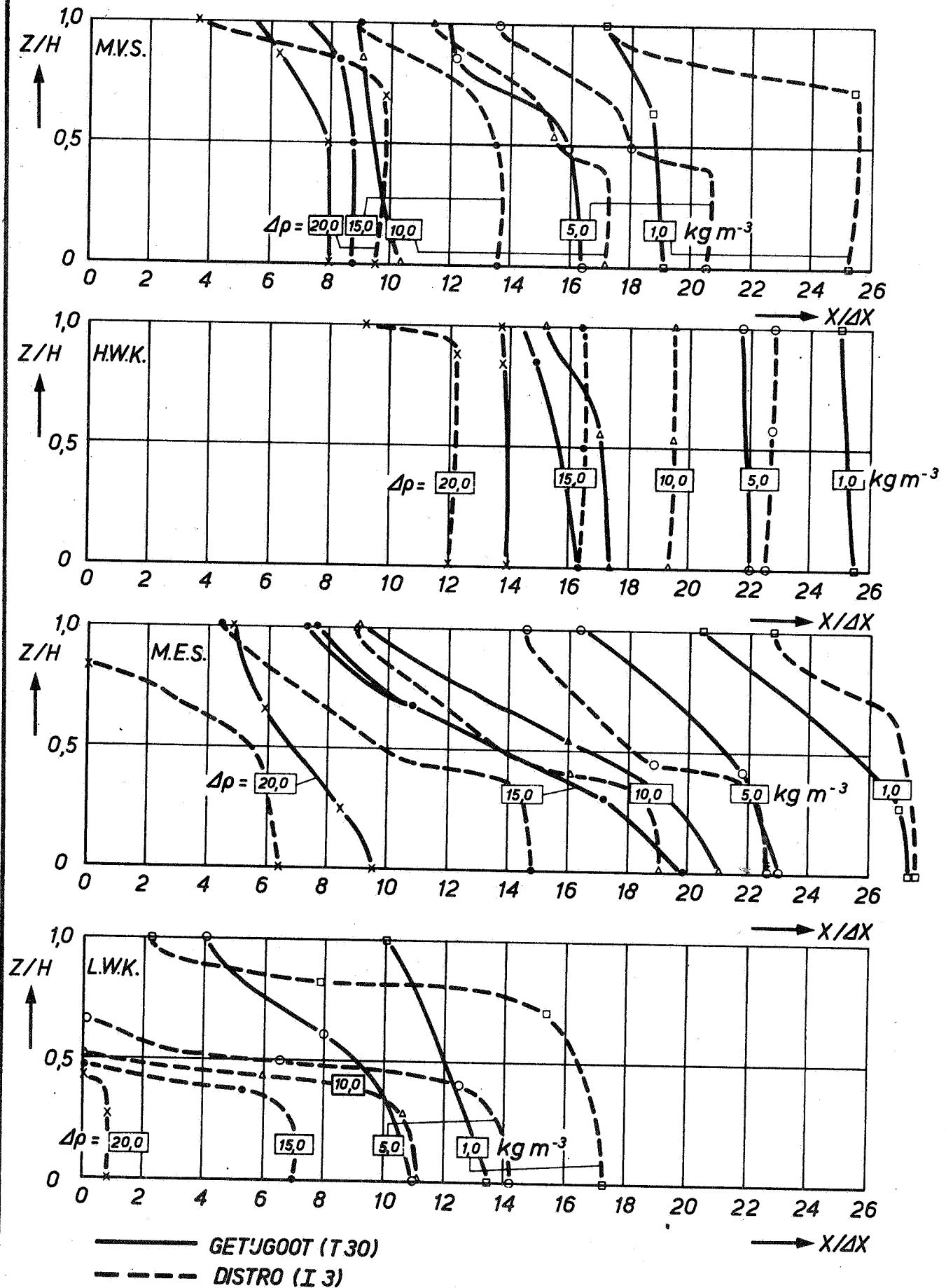
WK

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896-3025

FIG. 50



VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKENDE
2D - DICHTHEIDSVERDELING

T 30

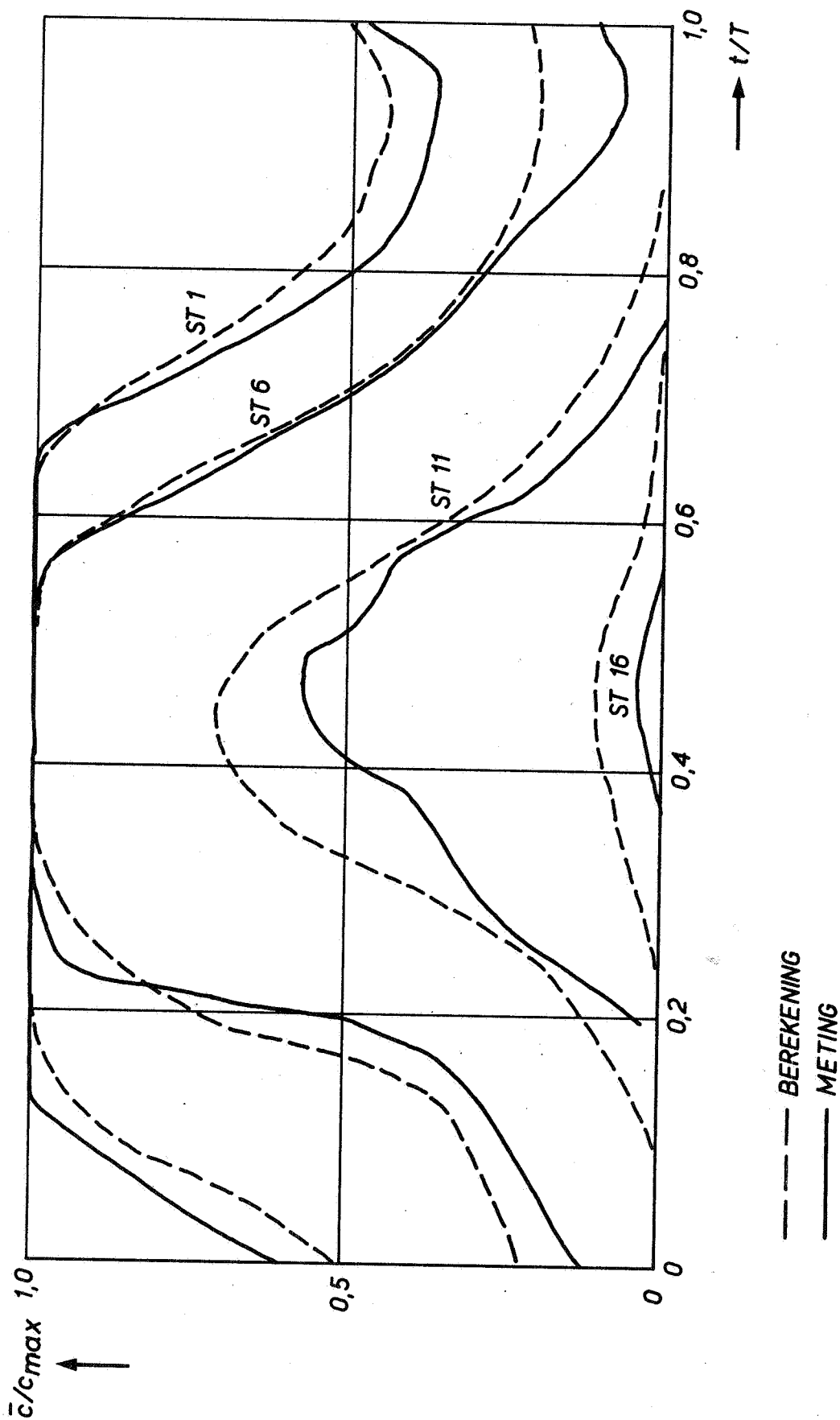
$\Delta X = 1,83$

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.896 - 3026

FIG. 51



VERGELJING GEMETEN EN BEREKENDE
1 D-KONCENTRIEVERDELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T 30

WK

A4

M.896 - 3027

FIG. 52

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands