


AFGEHANDELD

opdrachtgever:  
Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren

## de kalibratie van de $C_d$ -coëfficiënt in ZUNOWAK

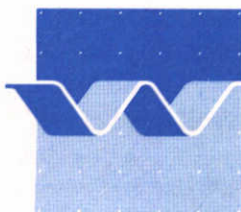
1	geheim
2	niet ter inzage derden
3	niet ter inzage derden gedurende 10 jaar
<input checked="" type="checkbox"/>	openbaar

april 1992

	bibliotheek postbus 177 - 2600 MH Delft waterloopkundig laboratorium/WL
<b>BB</b>	<i>Fyog</i>
<b>WL</b>	
<b>EXPL</b>	



de kalibratie van de  $C_d$ -coëfficiënt  
in ZUNOWAK



DE KALIBRATIE VAN DE  $C_d$ -KOËFFICIËNT IN ZUNOWAK

Inhoud:	1. Inleiding . . . . .	2
	2. Inregelen $C_d$ -ZUNOWAK. . . . .	5
	2.1 De parametrisatie van de $C_d$ -koëfficiënt . . . . .	5
	2.2 De kostenfunctie. . . . .	6
	2.3 Minimalisatie van de kostenfunctie. . . . .	7
	3. Resultaten kalibratie $C_d$ -ZUNOWAK. . . . .	11
	3.1 De februari 1989 storm. . . . .	11
	3.2 De februari 1983 storm. . . . .	16
	3.3 De november 1981 storm. . . . .	18
	3.4 $C_d$ -ZUNOWAK. . . . .	20
	4. Vergelijking ZUNOWAK, WADDEN en metingen. . . . .	23
	4.1 De februari 1989 storm. . . . .	24
	4.2 De februari 1983 storm. . . . .	25
	4.3 De november 1981 storm. . . . .	26
	4.4 Kostenfuncties, RMS en hoogwatersverschillen volgens ZUNOWAK en WADDEN . . . . .	28
	5. Samenvatting, konklusies en aanbevelingen . . . . .	30
	6. Referenties . . . . .	35
	Appendix. Kostenfuncties van alle ZUNOWAK berekeningen. 36	
	Figuren	

## 1. INLEIDING

Voor het genereren van randvoorwaarden voor kuststrookmodellen is bij Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, het numerieke getijmodel ZUNOWAK ontwikkeld. ZUNOWAK is een afkorting van Zuidelijke Noordzee WaterKwaliteits model. Het model is een WAQUA-derivaat en is gedefinieerd op het gedeelte van de Noordzee dat in het zuiden wordt begrensd door het Kanaal ( $\sim 50^{\circ}55'$  N.B.), en in het noorden door de 'parallel' van Scarborough (Engeland) naar Helgoland ( $\sim 54^{\circ}15'$  N.B.). Op dit gebied rekent het model in bolkoördinaten met maaswijdte  $1/24^{\circ}$  in de oost-west richting (hetgeen tot 227 mazen leidt) en  $1/36^{\circ}$  in de noord-zuid richting (124 mazen). Uitgedrukt in km komt dat overeen met een maaswijdte van 3.2 km. Zie figuur 1a voor een illustratie van het gebied waarop ZUNOWAK rekent (uit: Rijkswaterstaat, Nota WWKZ 85.G005, 1985).

Als voorbeelden van waterbewegings- en waterkwaliteitsmodellen die gebruik maken van met ZUNOWAK gegenereerde randvoorwaarden kunnen LOSWAL NOORD, HOKU, EEMS, DUCO, OOSTWAD en WADDEN worden genoemd. Op zijn beurt kan ZUNOWAK echter als detailmodel worden opgevat van het CSM-model (Continental Shelf Model, zie Gerritsen en Bijlsma, 1988): niet alleen rekent ZUNOWAK op een deelgebied van CSM maar ontleent er tevens zijn randvoorwaarden aan.

In het bijzonder worden CSM en (vervolgens) ZUNOWAK gebruikt voor het genereren van randvoorwaarden voor de detailmodellen onder storm kondities. Aangezien onder deze omstandigheden de oppervlaktewrijving een groot effect heeft op de waterbeweging, is het van belang dat die oppervlaktewrijvings-term nauwkeurig gemodelleerd is. Ten aanzien van het CSM model hebben in het verleden reeds activiteiten plaatsgevonden t.a.v. het afregelen van de oppervlaktewrijvingsterm onder stormkondities. De daar gevonden oppervlaktewrijvingskoëfficiënt werd tot nu toe ook voor het ZUNOWAK-model gebruikt.

Dit onderzoek zal zich richten op het ZUNOWAK model onder storm kondities en het model zal voor het Wadden-gedeelte worden afgeregeld op de 'drag'-koëfficiënt  $C_d$  die voorkomt in de oppervlaktewrijvingsterm.

Het primaire doel van het hier gerapporteerde onderzoek is dus het verbeteren van de  $C_d$ -formulering (en dus de oppervlaktewrijvingsterm) in het ZUNOWAK-model (voor het Waddengedeelte) onder stormkondities. Hierbij worden impliciet belangrijke neven-doelen gerealiseerd (i) verbetering van de met ZUNOWAK berekende waterbeweging en daarmee (ii) verbetering van de randvoorwaarden voor de uit ZUNOWAK geneste detailmodellen, en, (iii) verbeterde  $C_d$ -formulering voor de geneste modellen en daarmee verbetering van de waterbeweging/stoftransport (i.h.b. voor het Waddengedeelte) gegenereerd door die modellen. T.a.v. (iii) wordt als toelichting opgemerkt dat geen van de  $C_d$ -formuleringen van de uit ZUNOWAK geneste detailmodellen ooit is afgeregeld. Er wordt verwacht dat het 'overhevelen' van de voor het ZUNOWAK-model optimale  $C_d$  naar zo'n genest model, ook voor deze een betere oppervlaktewrijvingmodellering zal opleveren. Deze verwachting zal in deze notitie worden getoetst voor het WADDEN-model. Zie figuur 1b voor een illustratie van het rekengebied van het WADDEN-model. Deze figuur is ontleend aan Nota WWKZ 85.G005 (Rijkswaterstaat, 1985) waar eveneens enige numerieke gegevens van het WADDEN-model (maaswijdte, tijdstap, enz...) te vinden zijn.

Dit rapport is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 2 wordt in grote lijnen de methode geschetst die is gebruikt voor de kalibratie van de  $C_d$ -coëfficiënt. Desgewenst kan dit hoofdstuk worden overgeslagen. In hoofdstuk 3 wordt die kalibratiemethode toegepast voor drie stormen, de februari storm van 1989, de februari storm van 1983 en de november storm van 1981. Als resultaten worden de ingeregelde  $C_d$ -formuleringen gegeven, alsmede statistische gegevens t.a.v. de overeenkomst van de waterstanden volgens het geöptimaliseerde model en waterstanden zoals die tijdens de stormen zijn gemeten. In hoofdstuk 4 wordt nagegaan in hoeverre de voor ZUNOWAK optimale  $C_d$  eveneens een verbetering geeft voor een uit ZUNOWAK genest model, in dit geval het WADDEN model. Deze verbetering wordt enerzijds nagegaan voor het 'overall gedrag' van de modellen (a.d.h.v. het root mean square verschil van voorspelde en gemeten waterstanden) en anderzijds t.a.v. de prestaties van de modellen om hoogwaters te voorspellen. Hoofdstuk 5 geeft tenslotte een korte samenvatting van dit onderzoek met discussie en aanbevelingen.

Dit onderzoek werd in opdracht van de Dienst Getijdewateren van Rijkswaterstaat (opdracht DG-403, projectkode GETIJ\*3A) door het Waterloopkundig

Laboratorium verricht. Namens het Waterloopkundig Laboratorium werden de werkzaamheden uitgevoerd door dr. H.F.P. van den Boogaard die ook dit rapport heeft samengesteld. Namens Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren werd dit onderzoek begeleid door Ir. L.P.M. de Vrees en Ing. R.P. van Dijk.

---

## 2. INREGELEN $C_d$ -ZUNOWAK

In dit hoofdstuk wordt de procedure geschetst die is gevolgd voor het inregelen van de winddragcoëfficiënt  $C_d$  in het ZUNOWAK-model. Hierin komen achtereenvolgens de **parametrisatie** van de  $C_d$ -coëfficiënt aan de orde (paragraaf 2.1), de definitie van het criterium waarop wordt ingeregeld (ofwel de **kostenfunctie**; zie paragraaf 2.2) en de **optimalisatietechniek** die is gevolgd bij het inregelen (paragraaf 2.3).

---

### 2.1 De parametrisatie van de $C_d$ -coëfficiënt

In het ZUNOWAK model wordt de winddrag-coëfficiënt  $C_d$  berekend uit de windsnelheid. Dit gebeurt aan de hand van een 'gebroken lineaire functie' met twee 'knikpunten'. In een formule ziet dit voorschrift van  $C_d$  er als volgt uit:

$$\begin{aligned}
 C_d(U_{10}) &= y_1 && \text{indien } U_{10} < x_1 \\
 C_d(U_{10}) &= y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (U_{10} - x_1) && \text{indien } x_1 \leq U_{10} \leq x_2 \\
 C_d(U_{10}) &= y_2 && \text{indien } U_{10} > x_2
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Zie figuur 1c voor een illustratie van de vorm van  $C_d$  zoals die wordt bepaald door de knikpunten.

---

N.B.  $C_d$  is dus geen enkelvoudige konstante maar een functie van de windsnelheid. Dit wordt vanaf hier aangegeven met de notatie  $C_d(\cdot)$ . M.a.w.:  $C_d(\cdot)$  is een compacte schrijfwijze voor de functie  $U_{10} \rightarrow C_d(U_{10})$ .

---

In formule (2.1) is  $U_{10}$  de snelheid van de wind op 10 meter boven het wateroppervlak. De  $\{x_1, y_1, x_2, y_2\}$  zijn vier vorm-parameters die de 'knikpunten' in het voorschrift van  $C_d(\cdot)$  vastleggen. T.a.v. het instellen van

de knikpunten laat het ZUNOWAK model een zekere vrijheid toe. In hoofdstuk 3 zal hiervan gebruik worden gemaakt door (per storm) de parameters zodanig in te stellen dat de overeenkomst tussen enerzijds gemeten waterstanden en anderzijds de met ZUNOWAK voorspelde waterstanden zo groot mogelijk is.

---

## 2.2 De kostenfunctie

Om de overeenkomst van model en metingen te kwantificeren wordt een zogenaamde kostenfunctie  $J$  gedefinieerd. Hier wordt een kostenfunctie gekozen die leidt tot een zogenaamd 'kleinste kwadraten criterium':

$$J(x_1, y_1, x_2, y_2) = \sum_m (h_{\text{obs}} - h_{\text{mod}})_m^2 \cdot A_m \quad (2.2)$$

Hierin is  $(h_{\text{obs}} - h_{\text{mod}})_m$  het verschil van de  $m^{\text{e}}$ -gemeten waterstand  $h_{\text{obs}}$ , en de daarmee volgens het model overeenkomstige waterstand  $h_{\text{mod}}$ . De teller  $m$  in de sommatie  $\sum_m$  loopt over alle beschikbare metingen (dus zowel over de stations als over de tijdstippen waarop daar gemeten is).

Merk op dat elke  $h_{\text{mod}}$  van de parameters  $\{x_1, y_1, x_2, y_2\}$  afhangt, hetgeen niet het geval is voor de  $h_{\text{obs}}$ . Met de getallen  $A_m$  kan een gewicht worden toegekend aan de metingen. Nauwkeurige/betrouwbare metingen kan men op deze manier bijvoorbeeld zwaarder laten wegen dan onbetrouwbare metingen. Bovendien kan men aan de hand van de gewichten  $A_m$  bepaalde aspecten van de meetreeks benadrukken waarvan het gewenst is dat het model deze zo goed mogelijk reproduceert. Denk hierbij als voorbeeld aan de extremen van de gemeten reeksen. Een dergelijke 'voorkeursbehandeling' zal hier echter niet worden toegepast. Er wordt uitgegaan van een uniforme weging van de gemeten waterstanden, d.w.z.  $A_m=1$  voor alle  $m$ .

Merk op dat naarmate de overeenkomst tussen model en metingen groter wordt, de kostenfunctie  $J$  kleiner wordt. Om de maximale overeenkomst tussen model en metingen te vinden moeten derhalve de waarden van  $x_1, y_1, x_2, y_2$  worden gevonden waarvoor de kostenfunctie  $J$  minimaal is. In het ideale geval dat het model de metingen reproduceert, zal de kostenfunctie  $J$  nul zijn. In de praktijk zal deze mate van modelperfektie echter niet haalbaar zijn en moet men al tevreden zijn wanneer  $h_{\text{mod}}$  en  $h_{\text{obs}}$  minder dan, zeg, 10% afwijken.



T.a.v. de keuze van de kostenfunctie moet nog worden vermeld dat de precieze formulering iets afwijkt van wat hierboven is vermeld. De ZUNOWAK-waterstanden  $h_{\text{mod}}$  worden namelijk niet meteen vergeleken met de metingen maar worden eerst gecorrigeerd voor systematische modelfouten. Dit corrigeren leidt tot een konversie van **berekende** naar **voorspelde** waterstanden. Het idee is als volgt. Idealiter zou zonder windinvloed het ZUNOWAK-model waterstanden  $h_0$  moeten produceren die overeenkomen met het astronomische getij  $h_{\text{ast}}$  ( $h_{\text{ast}}$  volgt uit getijanalyses van lange waarnemingsreeksen en is voor de meeste Nederlandse kuststations bekend). In de praktijk zullen  $h_0$  en  $h_{\text{ast}}$  niet precies overeenkomen. Echter, het verschil  $h_{\text{ast}} - h_0$  kan als (eerste orde) correctie aan elke berekende  $h_{\text{mod}}$  worden toegevoegd:  $h_{\text{mod}} - h_{\text{mod}} + h_{\text{ast}} - h_0$ . Bij een lineair model kan dezelfde correctie bij elke berekende  $h_{\text{mod}}$  worden gebruikt en hoeven geen hogere orde termen te worden meegenomen. Voor niet-lineaire modellen moet dat formeel wel, vooral bij sterke windforcering, d.w.z. in gevallen waar de  $h_{\text{mod}}$  'ver' van de  $h_0$  aflight. Omdat hogere orde termen moeilijk of niet te bepalen zijn wordt meestal, en ook hier, toch volstaan met een eerste orde correctie.

Met deze correctie op de berekende waterstanden en een uniforme weging volgens  $A=1$  vinden we tenslotte als kostenfunctie:

$$J(x_1, y_1, x_2, y_2) = \sum_m (h_{\text{obs}} - (h_{\text{mod}} - h_0 + h_{\text{ast}}))_m^2 \quad (2.3a)$$

$$= \sum_m \{ (h_{\text{obs}} - h_{\text{ast}})_m - (h_{\text{mod}} - h_0)_m \}^2 \quad (2.3b)$$

Merk op dat vorm (2.3b) aantoont dat het afregelen nu feitelijk op de **surges** plaatsvindt.

### 2.3 Minimalisatie van de kostenfunctie

Het voorafgaande kan worden samengevat met de opmerking dat het inregelen van het ZUNOWAK-model naar de  $C_d(\cdot)$ -koëfficiënt vertaald is naar de minimalisatie van de kostenfunctie  $J$  naar de  $C_d(\cdot)$ -parameters. Zodoende resteert het probleem hoe deze minimalisatie moet worden uitgevoerd. De meest voor de hand liggende methode is om voor een aantal keuzes van  $(x_1, y_1, x_2, y_2)$  een ZUNOWAK berekening uit te voeren, vervolgens de bijhorende kostenfunctie volgens (2.3) te berekenen en daarna die combinatie van de

parameters te kiezen die tot de kleinste waarde van de kostenfunctie leidt. Het grote nadeel van deze eenvoudige 'direct-search' aanpak is dat voor een voldoende nauwkeurige schatting van de  $C_d(\cdot)$ -parameters een groot aantal modelberekeningen nodig zullen zijn (alleen in het geval van 1 à 2 vrije parameters is deze aanpak verdedigbaar). Daarom moet de voorkeur worden gegeven aan een meer gestructureerde methode die met minder rekenwerk volstaat. Uit de literatuur zijn diverse gestructureerde en efficiënte inregelmethoden bekend, b.v. het Kalman Filter en Optimale Besturing (in combinatie met een Geadjungeerd Systeem). Zie b.v. Heemink (1986) en van den Boogaard (1988). Zowel Kalman Filtering als Optimale Besturing hebben echter als nadeel dat ze niet modelonafhankelijk zijn, en er een aanzienlijke hoeveelheid (model)specifieke programmatuur moet worden ontwikkeld voordat ze kunnen worden ingezet. Daarom is in dit geval gekozen voor een alternatieve methode die wel modelonafhankelijk inzetbaar is: de zogenaamde DUD-methode. Deze 'black-box'-methode wordt nu kort toegelicht.

DUD is een acroniem voor Doesn't Use Derivatives hetgeen meteen 'onthult' dat het een methode is die voor het minimaliseren geen afgeleiden gebruikt. De methode werd voor het eerst gepresenteerd door Ralston en Jennrich (1978) t.b.v. de minimalisatie van een 'kwadratische som' van functies, ofwel een (kosten)functie  $F(\cdot)$  van de vorm:

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) = \sum_{m=1}^M [y_m - f_m(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)]^2 \quad (2.4)$$

Hierin zijn  $\alpha := \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$  de model parameters,  $y := \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$  de metingen en  $f := \{f_m(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) \mid m=1, M\}$  de met  $y$  overeenkomstige modeluitkomsten. In de huidige context corresponderen  $\alpha$ ,  $y$  en  $f$  met respectievelijk de  $C_d(\cdot)$ -parameters, de gemeten waterstanden, en de met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.

Indien de modelfuncties  $f_m(\cdot)$  lineair in de parameters  $\alpha$  zijn dan vormt de minimalisatie van  $F(\cdot)$  een 'linear least squares probleem' en kan het minimum analytisch worden bepaald. Voor de in de praktijk gangbare numerieke modellen (zoals ZUNOWAK) zal dit echter nooit het geval zijn omdat hun uitkomsten (d.w.z. toestandsvariabelen zoals waterstanden en snelheden) niet-lineair afhangen van modelcoëfficiënten (zoals bodem- en oppervlakte-wrijving).

De essentie van DUD is het op een 'slimme' manier lineariseren van de model functies  $f_m(\cdot)$  en dan met een 'gesimuleerde linear least squares' een bestaande schatting van het minimum (en diens lokatie in de parameterruimte) verbeteren. Door deze procedure een aantal keer te herhalen wordt iteratief een minimum van de functie  $F(\cdot)$  gevonden en daarmee de optimale waarden van de modelparameters.

Voor het lineariseren benadert DUD de modelfuncties  $f_m(\cdot)$  met functies  $\lambda_m(\cdot)$  van de vorm  $\lambda_m(\alpha) = c_0 + c_1 \cdot \alpha_1 + c_2 \cdot \alpha_2 + \dots + c_p \cdot \alpha_p$ . Hierin worden de konstanten  $c_j$  zo gekozen dat voor  $p+1$  verschillende waarden van de parametervektor  $\alpha$  de waarden  $f_m(\alpha)$  en  $\lambda_m(\alpha)$  samenvallen.

Als 'initialisatie' moet in de eerste iteratiestap het model dus  $p+1$  keer worden doorgerekend. Dit zal men geneigd zijn te doen voor  $p+1$  parameterwaarden  $\alpha$  die men spreidt rond een redelijke 'first guess' van de parameters (b.v. op basis van fysische kennis van het systeem). Hierdoor kan deze eerste stap worden opgevat als een soort gevoeligheidsonderzoek van het model. Merk op dat men bij handmatig inregelen in eerste instantie ook zoiets zal doen. Het verschil is echter dat vanaf de tweede iteratie DUD veel systematischer te werk gaat. Nadat de  $p+1$  parametervektoren  $\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^{p+1}$  zijn gesorteerd op dalende kostenfunctie, wordt op basis van de in de vorige alinea beschreven linearisatie de lokatie  $\hat{\alpha}$  van het minimum van  $F(\cdot)$  voorspeld. Omdat de  $f_m(\cdot)$  i.h.a. niet lineair zijn in  $\alpha$  zal  $F(\hat{\alpha})$  niet meteen het minimum van de kostenfunctie zijn. Als blijkt dat  $F(\hat{\alpha}) < F(\alpha^{p+1})$  dan wordt  $\alpha^{p+2} := \hat{\alpha}$ . In het andere geval wordt op de lijn door  $\alpha^{p+1}$  en  $\hat{\alpha}$  naar een  $\alpha^{p+2}$  gezocht waarvoor  $F(\alpha^{p+2})$  wel kleiner is dan  $F(\alpha^{p+1})$ . Met  $\alpha^{p+2}$  als een update van het nieuwe minimum wordt de hier beschreven procedure herhaald met  $\alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^{p+2}$ . Dit gebeurt net zo lang tot opvolgende stappen geen (of nauwelijks een) afname van de functie  $F(\cdot)$  geven. In het geval van  $p$  parameters moet men i.h.a. uitgaan van ongeveer  $3p$  model berekeningen (dit is inclusief de  $p+1$  berekeningen die het in eerste instantie uit te voeren gevoeligheidsonderzoek vergt).

De DUD-methode zoals hier beschreven is feitelijk een generalisatie van de bekende Gauß-Newton methode. Beide methodes lineariseren de modelfuncties  $f_m(\cdot)$ . Het verschil is echter dat de Gauß-Newton methode dat doet m.b.v. raakvlakken (waarbij dus afgeleiden nodig zijn) terwijl de DUD-methode dat

doet m.b.v. zogenaamde **secant**-vlakken.

Voor een uitgebreide toelichting op de DUD-methode wordt verwezen naar Ralston en Jennrich (1978).

---

### 3. RESULTATEN KALIBRATIE $C_d$ -ZUNOWAK

In dit hoofdstuk worden voor de resultaten gegeven van de kalibratie van de  $C_d(\cdot)$ -koëfficiënt in ZUNOWAK voor de stormen van februari 1989, februari 1983 en november 1981. Deze resultaten zijn verkregen konform de in hoofdstuk 2 samengevatte inregelmethode.

Bij alle sommen geldt dat er is gerekend met geanalyseerde windvelden uit het LAM-model.

---

#### 3.1 De februari 1989 storm

Voor kalibratie van de  $C_d(\cdot)$  in ZUNOWAK voor de 1989-storm werden waterstandsmetingen gebruikt van 9 kuststations gedurende de periode 13 februari 0<sup>h</sup>.00 tot en met 16 februari 0<sup>h</sup>.00. De waarnemingen van elk 'heel uur' zijn gebruikt zodat er per station 73, en in totaal 657 waterstandsmetingen beschikbaar waren. De tijdstap in de ZUNOWAK berekeningen bedroeg 10 minuten. Na 8 ZUNOWAK berekeningen werd bij de volgende  $C_d(\cdot)$ -parameters een minimum van 17.3 (eenheid  $m^2$ ) voor de kostenfunctie gevonden:

1989

$$x_1=9.34 \text{ m/s}, y_1=0.00122, x_2=18.7 \text{ m/s}, y_2=0.00260$$

In de onderstaande tabel wordt een aantal statistische kentallen gepresenteerd die de mate van overeenkomst kwantificeert tussen enerzijds de gemeten waterstanden en anderzijds de met ZUNOWAK voorspelde waterstanden bij bovenstaande  $C_d(\cdot)$ -parameters. Deze statistische kentallen zijn gegeven per meetstation én 'overall', dus over alle metingen.

Tabel 3.1		De februari 1989 storm. Gemeten en met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.							
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	$\Delta Hw$
*HOEK v. HOL.	73	0.2	14.8	14.8	-44.2	15d.01h.	35.6	15d.08h.	3.4
*PETTEN	73	-6.5	15.7	14.3	-48.7	15d.01h.	18.8	14d.03h.	-2.4
DEN HELDER	73	1.8	14.9	14.8	-39.4	15d.01h.	28.9	14d.08h.	19.1
OUDE SCHILD	73	4.9	19.4	18.8	-38.5	15d.02h.	46.1	14d.03h.	5.2
HARLINGEN	73	-10.1	18.4	15.4	-39.2	15d.02h.	29.7	14d.11h.	12.8
VLIEL. HAV.	73	1.6	14.3	14.2	-28.6	15d.12h.	36.5	14d.12h.	33.4
W. - TERSCH.	73	-0.7	13.7	13.7	-29.1	15d.01h.	31.6	14d.09h.	30.9
WIERUMERGR.	73	-8.7	16.0	13.4	-39.4	15d.00h.	31.6	14d.02h.	-11.2
HUIBERTGAT	73	-0.9	13.6	13.6	-37.2	15d.01h.	31.3	14d.02h.	-8.1
EEMSHAVEN	73	2.5	16.6	16.4	-37.0	15d.02h.	44.7	14d.17h.	2.3
DELFIJL	73	-0.5	17.9	17.9	-49.0	15d.02h.	52.2	14d.17h.	16.3
OVER ALL	803	-1.5	16.1	16.0	-49.0	15d.02h.	52.2	14d.17h.	15.5

De metingen in met '\*' gemarkeerde stations zijn niet gebruikt bij de optimalisatie van  $C_d(\cdot)$ . Deze stations zijn toch in deze tabel opgenomen om de 'prestaties' van het model te verifiëren op plaatsen waar niet op afgeregeld is. Voor de geografische positie van de diverse stations wordt verwezen naar figuur 1d.

In Tabel 3.1 is:

#obs = aantal waarnemingen van het betreffende station

gem. = gemiddelde verschil van de waargenomen en voorspelde waterstand [cm]

RMS = root-mean-square verschil van waargenomen en voorspelde waterstand [cm]

SIGMA = standaard deviatie van het verschil van waargenomen en voorspelde waterstand [cm]

Min. = onderextreem: het minimale verschil van waargenomen en voorspelde waterstand [cm]

$T_{min}$  = de dag (februari 1989) en tijd waarop het onderextreem is gevonden

Max. = bovenextreem: het maximale verschil van waargenomen en voorspelde waterstand [cm]

$T_{max}$  = de dag (februari 1989) en tijd waarop het bovenextreem is gevonden

$\Delta Hw$  = het verschil tussen het gemeten hoogste hoogwater en het voorspelde hoogwater, dus  $\Delta Hw := Hw_{obs} - Hw_{pred}$  [cm]

De hoogwaters  $Hw_{obs}$  en  $Hw_{pred}$  zullen i.h.a. niet op precies het zelfde tijdstip vallen. Merk op dat een positieve  $\Delta Hw$  betekent dat het model een te laag hoogwater voorspelt, terwijl bij een negatieve  $\Delta Hw$  het model het hoogwater heeft overschat.

Opmerking 1. Het verschil tussen RMS en SIGMA volgt uit hun definities:

$$RMS := \sqrt{\langle (h_{obs} - h_{pred})^2 \rangle} \quad (3.1a)$$

$$\sigma := \sqrt{\langle (h_{obs} - h_{pred} - \langle h_{obs} - h_{pred} \rangle)^2 \rangle} \quad (3.1b)$$

Hierbij betekent  $\langle \cdot \rangle$  middelen over de metingen, bijvoorbeeld:

$$\langle h_{obs} - h_{pred} \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (h_{m,obs} - h_{m,pred}) \quad (3.1c)$$

Hierin is M het aantal metingen per station (of het totale aantal metingen zoals op de regel met de OVER ALL resultaten). De uitdrukking  $\langle h_{obs} - h_{pred} \rangle$  komt overeen met 'gem' zoals die in de tabel is gegeven. Ruwweg gezegd betekent dit dat  $\sigma$  de RMS is na korrektie voor de middenstand. Altijd geldt dat  $RMS \geq \sigma$ . Alleen als de middenstand  $\langle h_{obs} - h_{pred} \rangle = 0$  is  $RMS = \sigma$ .

Opmerking 2. De 'over-all' gegevens in de onderste rij van Tabel 3.1 hebben betrekking op de waterstandsgegevens van alle in de tabel opgenomen stations. Er is één uitzondering: de  $\Delta Hw$  in de laatste kolom is het gemiddelde van de hoogwaterafwijkingen  $|\Delta Hw|$  exclusief die van Hoek van Holland en Petten.

Opmerking 3. In het Appendix zijn tabellen gegeven waarin van alle ZUNOWAK sommen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd (en dus i.h.b. voor de 1989 storm) de instelling van de  $C_d$ -parameters  $(x_1, y_1, x_2, y_2)$  is te vinden, alsmede de kostenfuncties  $J(x_1, y_1, x_2, y_2)$  die daar uit volgden.

Aan de hand van de figuren 2.1 tot en met 2.11 worden de berekende waterstanden vergeleken met de gemeten waterstanden; ter verifikatie van de invloed die de wind heeft uitgeoefend zijn tevens de astronomische waterstanden getekend (stippellijnen). In figuur 3 is de geöptimaliseerde  $C_d(\cdot)$  als functie van de windsnelheid te zien.

De hier toegepaste methode om de optimale waarde van de  $C_d(\cdot)$ -parameters te vinden bestond uit het minimaliseren van een zogenaamde kostenfunctie  $J$  (zie hoofdstuk 2 voor nadere toelichting). Formeel levert deze methode geen waarde voor de nauwkeurigheid waarmee de parameters geschat zijn en/of de gevoeligheid van het (gekalibreerde) model t.a.v. deze parameters. Om hier toch een idee van te krijgen is de volgende procedure gevolgd.

Van alle parametervektoren  $\alpha := (x_1, y_1, x_2, y_2)^T$  waarvoor een modevaluatie is uitgevoerd zijn die  $\alpha$  geselecteerd die tot een kostenfunctie  $J$  leiden die met minder dan 10% de gevonden minimale kostenfunctie  $J_{\min}$  overschrijden. De  $\alpha$  die aan dit criterium voldoen zullen we schrijven als  $\alpha^*$ .

Hieruit zijn per windsnelheid  $U_{10}$  een ondergrens  $C_d^{\min}(U_{10})$  en een bovengrens  $C_d^{\max}(U_{10})$  van de  $C_d(\cdot)$ -koëfficiënt bepaald volgens het voorschrift:

$$\begin{aligned} C_d^{\min}(U_{10}) &:= \min_{\alpha} \{ C_d(U_{10} | \alpha) \mid J(\alpha) \leq \beta \cdot J_{\min} \} = \min_{\alpha^*} \{ C_d(U_{10} | \alpha^*) \} \\ C_d^{\max}(U_{10}) &:= \max_{\alpha} \{ C_d(U_{10} | \alpha) \mid J(\alpha) \leq \beta \cdot J_{\min} \} = \max_{\alpha^*} \{ C_d(U_{10} | \alpha^*) \} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Gezien de marge van 10% die is gekozen als toegestane overschrijding van het minimum van de kostenfunctie is  $\beta=1.1$  in vergelijking (3.2).

Het idee van deze definitie is dat elke functie  $U_{10} \rightarrow C_d(U_{10})$  waarvoor geldt dat deze wordt ingesloten door  $C_d^{\min}(\cdot)$  en  $C_d^{\max}(\cdot)$  zal leiden tot een kostenfunctie die minder dan 10% de minimale kostenfunctie  $J_{\min}$  overschrijdt. Aangezien de kostenfunctie hier kwadratisch in de residuen (=verschil van gemeten waterstanden en die volgens het model) is, is de tolerantie in die waterstandsresiduen dus 5%.

Het resultaat van deze procedure voor de 1989 storm is te zien in figuur 3. Deze toont de functies  $C_d^{\min}(\cdot)$ ,  $C_d^{\max}(\cdot)$  (onderbroken grafieken) en de  $C_d(\cdot)$



zoals die na optimalisatie van de parameters werd gevonden (doorgetrokken grafiek). Deze figuur laat rond de optimale  $C_d(\cdot)$  een relatief brede band zien waaruit kan worden gekonkludeerd dat de optimale waarden van de  $C_d(\cdot)$ -parameters niet 'scherp getuned' zijn. Dat betekent dat aan de optimale waarde van  $\alpha := (x_1, y_1, x_2, y_2)^T$  nog relatief grote verstoringen kunnen worden aangebracht zonder dat daardoor de overeenkomst tussen de ZUNOWAK-waterstanden en de gemeten waterstanden essentieel verslechtert.

Figuur 3 toont een relatieve asymmetrie van de posities van de  $C_d^{\min}(\cdot)$  en  $C_d^{\max}(\cdot)$  t.o.v. de optimale  $C_d(\cdot)$ . Bovendien blijken de optimale  $C_d(\cdot)$  en  $C_d^{\max}(\cdot)$  samen te vallen voor windsnelheden kleiner dan 12 m/s. Dit alles is een gevolg van het relatief kleine aantal ZUNOWAK-berekeningen waarmee deze betrouwbaarheidsbanden moesten worden samengesteld. Bovendien komen deze ZUNOWAK berekeningen voort uit het 'traject dat het optimalisatieproces in de parameter ruimte heeft afgelegd'. Hierdoor is het alles behalve zeker dat de  $C_d(\cdot)$ 's waarvoor ZUNOWAK berekeningen zijn uitgevoerd netjes symmetrisch gespreid zijn rond de optimale  $C_d(\cdot)$ . Als daarentegen een groot aantal modelevauaties zou zijn uitgevoerd (i.p.v. het schamele aantal van 8 zoals in dit geval) voor 'at random' gekozen parametervektoren  $\alpha = (x_1, y_1, x_2, y_2)^T$  zou een band zijn gevonden die niet alleen de optimale  $C_d(\cdot)$  bevat maar ook een minder grillige vorm heeft (echter, vanwege de niet lineaire afhankelijkheid van de ZUNOWAK-waterstanden van  $C_d(\cdot)$  zal deze band niet symmetrisch om de optimale  $C_d(\cdot)$  zijn gepositioneerd). Het is belangrijk om te realiseren dat de betrouwbaarheidsband die met een dergelijk Monte Carlo gevoeligheidsonderzoek (zie b.v. Janssen et al., 1990) zou zijn bepaald, in ieder geval de band omvat die nu is gevonden, m.a.w. de 'echte' 5%-band is minstens zo breed als wat nu in figuur 3 is aangegeven.

---

### 3.2 De februari 1983 storm

De optimalisatie procedure zoals die in Hoofdstuk 2 is beschreven, en in de vorige paragraaf is toegepast voor de 1989 storm, is op dezelfde manier gebruikt voor het optimaliseren van de  $C_d(\cdot)$  in ZUNOWAK onder de kondities van de februari 1983 storm.

Voor deze kalibratie werden waterstandsmetingen gebruikt van dezelfde 9 kuststations als in de vorige paragraaf, maar nu gedurende de periode 01 februari 0<sup>h</sup>.00 tot en met 04 februari 0<sup>h</sup>.00, 1983. Deze waarnemingen waren weer voor elk 'heel uur' beschikbaar zodat er per station 73 metingen beschikbaar waren ofwel 657 in totaal. De tijdstap in de ZUNOWAK berekeningen bedroeg 10 minuten. Na 11 ZUNOWAK berekeningen werd bij de volgende  $C_d(\cdot)$ -parameters een minimum van 27.47 ( $m^2$ ) voor de kostenfunctie gevonden:

<p>1983</p> $x_1=11.4 \text{ m/s}, y_1=0.00147, x_2=19.5 \text{ m/s}, y_2=0.00220$
--

In de onderstaande tabel wordt een aantal statistische kentallen gepresenteerd die de mate van overeenkomst kwantificeert tussen enerzijds de gemeten waterstanden en anderzijds de met ZUNOWAK voorspelde waterstanden bij de bovenstaande, geoptimaliseerde  $C_d(\cdot)$ -parameters. Deze statistische kentallen zijn enerzijds gegeven per meetstation én anderzijds 'overall', dus over alle metingen.

Tabel 3.2		De februari 1983 storm. Gemeten en met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.							
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	$\Delta Hw$
*HOEK v.HOL.	73	-2.0	18.3	18.1	-65.8	02d.11h.	34.7	01d.12h.	-12.6
*PETTEN	73	-10.0	21.1	18.6	-65.2	02d.17h.	36.6	01d.15h.	0.0
DEN HELDER	73	-2.5	19.0	18.8	-47.1	02d.17h.	40.4	01d.14h.	10.3
OUDE SCHILD	73	4.2	27.8	27.5	-53.5	02d.18h.	73.6	01d.16h.	-3.0
HARLINGEN	73	-7.3	18.0	16.5	-43.6	02d.20h.	23.2	01d.01h.	12.0
VLIEL. HAV.	73	-3.2	12.5	12.1	-28.4	02d.18h.	37.3	01d.14h.	31.7
W.-TERSCH.	73	-8.2	14.1	11.4	-34.7	02d.13h.	33.8	01d.22h.	19.8
WIERUMERGR.	73	-1.6	15.8	15.7	-35.4	01d.20h.	45.1	01d.14h.	18.7
HUIBERTGAT	73	-7.0	16.8	15.3	-42.3	02d.12h.	25.9	01d.23h.	19.1
EEMSHAVEN	73	0.5	23.6	23.6	-64.2	02d.21h.	51.2	01d.16h.	41.9
DELFIJL	73	3.3	29.4	29.2	-76.4	02d.22h.	67.5	02d.01h.	66.1
OVER ALL	803	-3.1	20.3	20.1	-76.4	02d.22h.	73.6	01d.16h.	24.7

De betekenis van #obs, gem, ... is zoals in Tabel 3.1. T.a.v. het verschil in hoogwater wordt vermeld voor alle stations  $\Delta Hw$  is bepaald voor het extreem in de middag van 1 februari 1983. Alleen voor Hoek van Holland is dat bepaald voor de morgen van 2 februari aangezien de hoogste waterstand van dit station hierin optrad.

In de figuren 4.1 tot en met 4.11 worden de (voor de optimale waarden van de  $C_d(\cdot)$ -parameters) met ZUNOWAK voorspelde waterstanden vergeleken met de gemeten waterstanden. Tevens zijn in deze figuren de astronomische waterstanden getekend (stippellijnen).

Konform de procedure zoals geschetst in paragraaf 3.1 is rond de optimale  $C_d(\cdot)$  een gevoeligheidsband bepaald die aangeeft in welke mate de  $C_d(\cdot)$  nog mag variëren zonder dat de minimale kostenfunctie met meer dan 10% wordt overschreden (hetgeen met 5% 'tolerantie' in het RMS-verschil van berekende en gemeten waterstanden overeenkomt). Het resultaat is te zien in figuur 5.

### 3.3 De november 1981 storm

De optimalisatie procedure zoals die in Hoofdstuk 2 is beschreven en in de vorige paragrafen is toegepast op de 1989 en de 1983 storm, is op dezelfde manier gebruikt voor het optimaliseren van de  $C_d(\cdot)$  in ZUNOWAK onder de kondities van de november 1981 storm.

Voor deze kalibratie werden waterstandsmetingen gebruikt van dezelfde 9 kuststations als bij de twee voorafgaande kalibraties. Bij deze storm zijn dat de waterstandsmetingen van 23 november tot en met 25 november 1981. De metingen zijn weer voor elk 'heel uur' beschikbaar zodat er per station 73 metingen beschikbaar waren, en in totaal 657. De tijdstap in de ZUNOWAK berekeningen bedroeg 10 minuten. Na 11 ZUNOWAK berekeningen werd bij de volgende  $C_d(\cdot)$ -parameters een minimum van 21.09 ( $m^2$ ) voor de kostenfunctie gevonden:

1981

$$x_1=11.85 \text{ m/s}, y_1=0.00119, x_2=17.2 \text{ m/s}, y_2=0.00245$$

In de onderstaande tabel wordt een aantal statistische kentallen gepresenteerd die de mate van overeenkomst kwantificeert tussen enerzijds de gemeten waterstanden en anderzijds de met ZUNOWAK voorspelde waterstanden bij de bovenstaande  $C_d(\cdot)$ -parameters. Deze statistische kentallen zijn enerzijds gegeven per meetstation én anderzijds 'overall', dus over alle metingen.

Tabel 3.3		De november 1981 storm. Gemeten en met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.								
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	$\Delta Hw1$	$\Delta Hw2$
*HOEK v.HOL.	73	10.3	18.3	15.1	-21.7	25d.06h.	68.3	23d.19h.	16.1	15.2
*PETTEN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DEN HELDER	73	2.1	11.4	11.2	-20.1	25d.07h.	43.2	23d.19h.	11.1	12.8
OUDE SCHILD	73	6.1	16.9	15.8	-26.6	25d.07h.	55.9	23d.19h.	3.9	-7.1
HARLINGEN	73	-6.5	13.4	11.7	-35.4	24d.12h.	20.9	24d.16h.	-5.6	2.2
VLIEL. HAV.	73	2.7	12.0	11.7	-18.2	25d.04h.	35.1	24d.19h.	21.2	6.8
W-TERSCHEL.	73	-3.7	11.8	11.2	-30.0	24d.09h.	28.1	24d.06h.	16.7	12.3
WIERUMERGR.	73	-4.2	16.5	15.9	-35.6	25d.06h.	54.7	23d.19h.	12.2	11.1
HUIBERTGAT	73	-1.9	14.1	13.9	-36.8	23d.18h.	49.1	23d.20h.	7.8	3.8
EEMSHAVEN	73	3.9	23.7	23.4	-53.4	23d.23h.	66.5	23d.21h.	33.4	1.4
DELFIJL	73	7.3	31.3	30.4	-56.5	25d.18h.	84.5	25d.10h.	62.6	27.3
OVER ALL	730	1.6	18.0	17.9	-56.5	25d.18h.	84.5	25d.10h.	19.4	9.4

De betekenis van #obs, gem, ... is zoals in Tabel 3.1 en 3.2. Aangezien er in dit geval geen meetgegevens voor Petten beschikbaar waren is deze rij leeg. Verder moet nog worden aangetekend dat er in dit geval twee hoogwaters zijn genomen waarop model en metingen zijn vergeleken: zie de  $\Delta Hw1$  en  $\Delta Hw2$  kolommen. De reden om twee hoogwaters te nemen i.p.v. één, zoals voor de 1989 en 1981 storm, komt voort uit het feit dat voor alle stations de beide hoogwaters van 24 november ongeveer even groot zijn.

In de figuren 6.1 tot en met 6.11 worden de (voor de optimale waarden van de  $C_d(\cdot)$ -parameters) met ZUNOWAK voorspelde waterstanden vergeleken met de gemeten waterstanden. Tevens zijn in deze figuren de astronomische waterstanden te vinden (stippellijnen). Voor de 1981 storm waren er voor Petten (figuur 6.2) geen metingen beschikbaar.

Analoog aan de procedure geschetst in paragraaf 3.1 en 3.2 is rond de optimale  $C_d(\cdot)$  een gevoeligheidsband bepaald die aangeeft in welke mate de  $C_d(\cdot)$  nog mag variëren zonder dat de minimale kostenfunctie met meer dan 10% wordt overschreden (hetgeen met 5% 'tolerantie' in het RMS-verschil van berekende en gemeten waterstanden overeenkomt). Het resultaat is te zien in figuur 7.

### 3.4 $C_d$ -ZUNOWAK

Op basis van de in de vorige paragrafen gevonden optimale  $C_d(\cdot)$ -formuleringen voor de 1989, 1983 en 1981 storm wordt hier een 'standaard'  $C_d(\cdot)$  voorgesteld voor het ZUNOWAK-model. Om een eerste idee te verkrijgen hoe die standaard  $C_d(\cdot)$  er uit zou moeten zien zijn in figuur 8 de drie afzonderlijk geöptimaliseerde  $C_d(\cdot)$ 's getekend. Uit deze figuur blijkt dat de  $C_d(\cdot)$ 's van 1981 en 1989 goed overeenkomen terwijl die van 1983 zichtbaar afwijkt. De overeenkomst van de  $C_d(\cdot)$ 's van 1981 en 1989 wordt verder bevestigd door figuur 9 (waar de  $C_d(\cdot)$  van 1989 in het 5% onzekerheidsgebied van 1981 is getekend) en figuur 10 (waar de  $C_d(\cdot)$  van 1981 in het 5% onzekerheidsgebied van 1989 is getekend).

Om op basis van de drie  $C_d(\cdot)$ -koëfficiënten één 'standaard'  $C_d(\cdot)$  te konstrueren werd in eerste instantie overwogen om het gemiddelde te nemen. Een nadere inspectie waarin die gemiddelde  $C_d(\cdot)$  werd vergeleken met de drie afzonderlijke  $C_d(\cdot)$ 's (samen met hun betrouwbaarheidsbanden) liet zien dat de gemiddelde  $C_d(\cdot)$  buiten de banden van 1989 en 1983 valt. Op basis van de grote overeenkomst van de  $C_d(\cdot)$ 's van de 1981 en 1989 storm (zie vorige alinea) werd toen besloten om de standaard  $C_d(\cdot)$  via 'middeling van de knikpunten' uit de optimale  $C_d(\cdot)$ 's van 1981 en 1989 te konstrueren. Zoals mocht worden verwacht bleek dat deze  $C_d(\cdot)$  binnen de banden van zowel de 1981 storm als van de 1989 storm bleef.

De  $C_d(\cdot)$  van 1983 is als gevolg van bovenstaande konstruktie van de standaard  $C_d(\cdot)$  min of meer buiten spel gezet. De reden is dat de 1983 storm een afwijkend karakter lijkt te hebben t.o.v. de twee andere stormen. Dit vermoeden wordt ingegeven door de sterk afwijkende  $C_d(\cdot)$  die voor 1983 werd gevonden. Bovendien is de veel grotere kostenfunctie (en dus slechtere overeenkomst tussen de voorspelde en gemeten waterstanden) die na minimalisatie werd gevonden een indicatie van dit vermoeden. Het afwijkende gedrag van de 1983 storm zou nader onderzocht kunnen worden door de windvelden van de drie stormen te vergelijken. Dit valt echter buiten de doelstelling van dit onderzoek.

Het bovenstaande leidt tot de volgende standaard  $C_d(\cdot)$ . Het eerste knikpunt is bepaald door  $x_1 = \frac{1}{2}(x_1^{1981} + x_1^{1989})$  en  $y_1 = \frac{1}{2}(y_1^{1981} + y_1^{1989})$ . Het tweede

knikpunt wordt analoog afgeleid. Dat leidt tot

Cd-ZUNOWAK

$$x_1=10.6 \text{ m/s}, y_1=0.00121, x_2=17.9 \text{ m/s}, y_2=0.00252$$

Om een idee te verkrijgen in welke mate het ZUNOWAK-model met deze  $C_d(\cdot)$  afwijkt van de modellen die per storm naar deze koëfficiënt geoptimaliseerd zijn, worden in onderstaande tabel de bijhorende kostenfuncties, RMS-waarden en gemiddelde hoogwatersverschillen  $\Delta H_w$  (van model en zoals gemeten) met elkaar vergeleken.

tabel 3.4.1 ZUNOWAK	kostenfuncties met standaard $C_d(\cdot)$ en met de optimale $C_d(\cdot)$			
	$J_{opt}$	$J_{zun}$	$J_{zun}/J_{opt}$	$\Delta J/J_{opt}$
feb. 1989	17.30	17.44	1.01	0.8%
feb. 1983	27.47	30.86	1.12	12.3%
nov. 1981	21.09	21.12	1.00	0.1%

tabel 3.4.2 ZUNOWAK	RMS-waarden met standaard $C_d(\cdot)$ en met de optimale $C_d(\cdot)$			
	$RMS_{opt}$	$RMS_{zun}$	$RMS_{zun}/RMS_{opt}$	$\Delta RMS/RMS_{opt}$
feb. 1989	16.2	16.3	1.01	0.4%
feb. 1983	20.4	21.7	1.06	6.0%
nov. 1981	17.9	17.9	1.00	0.1%

tabel 3.4.3 ZUNOWAK	$\Delta H_w$ -waarden met standaard $C_d(\cdot)$ en met de optimale $C_d(\cdot)$			
	$\Delta H_w_{opt}$	$\Delta H_w_{zun}$	$\Delta H_w_{zun}/\Delta H_w_{opt}$	$\Delta(\Delta H_w)/\Delta H_w_{opt}$
feb. 1989	15.5	16.1	1.04	4%
feb. 1983	24.7	17.7	0.72	-28%
nov. 1981a	19.4	18.1	0.93	-7%
nov. 1981b	9.4	8.0	0.85	-15%

De grootheden met onderindex 'opt' hebben betrekking op ZUNOWAK voor de individueel, per storm geoptimaliseerde  $C_d(\cdot)$ , terwijl de onderindex 'zun' betrekking heeft op ZUNOWAK met bovenstaande 'standaard'  $C_d(\cdot)$ . De kostenfuncties (in  $m^2$ ), RMS-waarden (in cm) en  $\Delta H_w$  (in cm) in deze tabellen zijn allen **exclusief Hoek van Holland en Petten**. Een positief percentage in de laatste kolom betekent dat het geoptimaliseerde model beter presteert terwijl bij een negatief percentage het model met de 'standaard'  $C_d(\cdot)$  het beter doet.

Uit deze tabellen blijkt dat voor de **1989-storm** de waterstanden volgens ZUNOWAK met de standaard  $C_d(\cdot)$  niet of nauwelijks afwijken van die met hun optimale  $C_d(\cdot)$ .

Voor de **1983 storm** moet een 'verlies' van 6% worden geaksepteerd in de RMS-overeenkomst tussen voorspelde en gemeten waterstanden. Daar staat echter een redelijke verbetering van het gemiddelde hoogwatersverschil tegenover. Deze compenserende feiten, alsmede de maten waarin zij optreden, verdedigen het gebruik van de (op basis van 1981 en 1989 gekozen) 'standaard'  $C_d(\cdot)$  voor de 1983 kondities.

Voor de **1981 storm** blijken de beide ZUNOWAK modellen in hun overall overeenkomst (RMS) met de metingen verwaarloosbaar weinig van elkaar af te wijken. De hoogwaters worden marginaal beter (1 à 1.5 cm) voorspeld.

Zoals mocht worden verwacht laat tabel (3.4.2) zien dat voor alle stormen de kostenfunctie voor de standaard  $C_d(\cdot)$  groter is dan de kostenfunctie voor de (per storm) afgeregelde  $C_d(\cdot)$ . Opvallend is daarentegen de tendens dat de hoogwaters met de standaard  $C_d(\cdot)$  beter lijken te worden voorspeld. Vooral voor de 1983 storm wordt een aanzienlijke verbetering gevonden. Mogelijk is het afregelkriterium hieraan debet: het model werd afgeregeld op 'alle' gemeten waterstanden, dus zowel de (aanzienlijk) verhoogde waterstanden tijdens - als de waterstanden vóór en na het hoogtepunt van de storm. Gegeven de hier gevonden resultaten lijkt het er dan op dat dit kriterium wat meer nadruk legt op een goede overeenkomst van het 'over-all gemiddelde gedrag' van de gemeten en voorspelde waterstanden (middenstanden) dan op een goede overeenkomst bij de extremen.

---



## 4. VERGELIJKING ZUNOWAK, WADDEN EN METINGEN

Met de in het vorige hoofdstuk gevonden 'standaard'  $C_d(\cdot)$  zijn zowel met het ZUNOWAK model als met het WADDEN-model de stormen van 1989, 1983 en 1981 doorgerekend. In dit hoofdstuk worden de met deze modellen berekende waterstanden met elkaar vergeleken. Anderzijds worden deze voorspellingen ook aan de gemeten waterstanden 'getoetst'.

Bij deze sommen moet t.a.v. het WADDEN-model worden aangetekend dat er (nog) niet met een in de ruimte variërende wind kon worden gerekend. Hier is voor elke storm gerekend met de wind zoals die ten tijde van die stormen gold voor het Eierlandse Zeegat (= punt (68,32) in het CSM16-model). Deze wind is uiteraard wel tijdsafhankelijk.

Voor de duidelijkheid wordt benadrukt dat alle in dit hoofdstuk gepresenteerde resultaten, dus zowel die van ZUNOWAK als die van het WADDEN-model, zijn berekend met de 'standaard'  $C_d(\cdot)$ -formulering zoals die in het vorige hoofdstuk is gevonden, dus:

Cd-ZUNOWAK/WADDEN

$$x_1=10.6 \text{ m/s}, y_1=0.00121, x_2=17.9 \text{ m/s}, y_2=0.00252$$

Tenslotte wordt nog vermeld dat voor het CSM-model, waaraan ZUNOWAK zijn randvoorwaarden heeft ontleend, er is gerekend met de volgende  $C_d(\cdot)$ .

Cd-CSM

$$x_1=10.0 \text{ m/s}, y_1=0.00100, x_2=15.0 \text{ m/s}, y_2=0.00250$$

## 4.1 De 1989 storm

T.a.v. de overeenkomst tussen de met het ZUNOWAK-model en het WADDEN-model voorspelde waterstanden volgen hier twee tabellen konform de opzet in het vorige hoofdstuk.

Tabel 4.1.1		De februari 1989 storm. Gemeten en met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.							
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	ΔHw
*HOEK v.HOL	73	0.9	15.1	15.0	-44.2	15d.01h.	36.3	15d.08h.	4.7
*PETTEN	73	-5.6	15.5	14.4	-47.8	15d.01h.	20.9	14d.03h.	-1.5
DEN HELDER	73	2.7	15.3	15.0	-38.5	15d.01h.	30.7	14d.08h.	20.2
OUDE SCHILD	73	5.9	19.9	19.0	-37.6	15d.02h.	47.0	14d.03h.	6.0
HARLINGEN	73	-8.4	17.6	15.5	-37.4	15d.02h.	31.5	14d.11h.	14.2
VLIEL. HAV.	73	2.6	14.5	14.2	-28.1	15d.12h.	37.5	14d.12h.	34.2
W. -TERSCH.	73	0.4	13.7	13.7	-27.6	15d.01h.	34.1	14d.09h.	31.5
WIERUMERGR.	73	-7.8	15.4	13.3	-38.5	15d.00h.	32.3	14d.02h.	-10.3
HUIBERTGAT	73	0.1	13.7	13.7	-36.4	15d.01h.	32.0	14d.02h.	-7.1
EEMSHAVEN	73	3.7	17.2	16.8	-36.4	15d.02h.	46.7	14d.17h.	3.3
DELFIJL	73	0.7	18.2	18.2	-48.6	15d.02h.	54.9	14d.17h.	18.0
OVER ALL	803	-0.4	16.1	16.1	-48.6	15d.02h.	54.9	14d.17h.	16.1

Tabel 4.1.2		De februari 1989 storm. Gemeten en met WADDEN voorspelde waterstanden.							
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	ΔHw
*HOEK v.HOL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
*PETTEN	73	-6.5	15.4	14.0	-47.8	15d.01h.	18.1	14d.01h.	-0.1
DEN HELDER	73	2.3	14.3	14.1	-36.1	15d.01h.	34.2	14d.04h.	19.7
OUDE SCHILD	73	4.2	14.4	13.8	-32.2	15d.02h.	39.7	14d.04h.	24.2
HARLINGEN	73	-3.1	14.1	13.8	-31.3	15d.00h.	41.3	14d.03h.	21.4
VLIEL. HAV.	73	4.6	16.6	16.0	-33.3	15d.01h.	44.2	14d.09h.	21.3
W. -TERSCH.	73	4.4	16.2	15.6	-28.7	15d.01h.	44.9	14d.04h.	18.7
WIERUMERGR.	73	-7.2	15.3	13.5	-39.6	15d.00h.	33.9	14d.02h.	-9.1
HUIBERTGAT	73	0.1	13.6	13.6	-36.1	15d.01h.	33.6	14d.03h.	-7.9
EEMSHAVEN	73	3.5	16.2	15.9	-29.7	15d.02h.	47.8	14d.17h.	7.1
DELFIJL	73	2.7	16.2	15.9	-35.1	15d.02h.	42.1	14d.17h.	10.4
OVER ALL	730	0.5	15.3	15.3	-47.8	15d.01h.	47.8	14d.17h.	15.5

Een nadere vergelijking van de modellen a.d.h.v. kostenfuncties, RMS-waarden en hoogwatersverschillen (allen exclusief Hoek van Holland en Petten) is te vinden in de tabellen 4.4-4.6 in paragraaf 4.4.

In de figuren 11.1 tot en met 11.11 zijn de gemeten en de met beide modellen voorspelde waterstanden getekend.

Op basis van zowel de kostenfuncties, de hoogwatervoorspellingen en de figuren blijkt dat voor de 1989 storm het WADDEN-model in slechts zeer beperkte mate beter presteert dan ZUNOWAK.

#### 4.2 De 1983 storm

T.a.v. de overeenkomst tussen de met het ZUNOWAK-model en het WADDEN-model voorspelde waterstanden volgen hier twee tabellen konform de opzet in het vorige hoofdstuk.

Tabel 4.2.1		De februari 1983 storm. Gemeten en met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.								
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	ΔHw	
*HOEK V.HOL.	73	-5.6	19.1	18.2	-71.9	02d.11h.	27.2	01d.12h.	-18.2	
*PETTEN	73	-15.0	23.7	18.4	-64.7	02d.17h.	20.1	01d.15h.	-13.3	
DEN HELDER	73	-7.4	18.7	17.1	-48.3	02d.11h.	28.6	01d.14h.	-6.3	
OUDE SCHILD	73	-0.6	26.4	26.4	-54.8	02d.18h.	59.0	01d.16h.	-19.8	
HARLINGEN	73	-14.8	22.5	16.9	-54.3	01d.07h.	22.4	01d.01h.	-10.5	
VLIEL. HAV.	73	-8.4	14.2	11.4	-31.2	02d.08h.	23.2	01d.14h.	21.0	
W. - TERSCH.	73	-14.2	18.5	11.8	-41.0	02d.13h.	17.0	01d.22h.	8.1	
WIERUMERGR.	73	-6.4	18.5	17.3	-51.1	01d.20h.	35.4	01d.14h.	5.2	
HUIBERTGAT	73	-12.0	19.4	15.3	-50.9	02d.12h.	17.1	01d.08h.	10.6	
EEMSHAVEN	73	-5.5	23.7	23.1	-65.3	02d.10h.	37.2	01d.16h.	27.9	
DELFIJL	73	-2.9	29.1	29.0	-75.1	02d.22h.	53.7	02d.01h.	49.7	
OVER ALL	803	-8.4	21.6	19.9	-75.1	02d.22h.	59.0	01d.16h.	17.7	

Tabel 4.2.2		De februari 1983 storm. Gemeten en met WADDEN voorspelde waterstanden.							
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	ΔHw
*HOEK v.HOL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
*PETTEN	73	-16.7	25.0	18.6	-64.3	02d.17h.	19.1	01d.00h.	-21.9
DEN HELDER	73	-9.1	19.5	17.2	-48.7	02d.10h.	26.5	01d.14h.	-12.8
OUDE SCHILD	73	-5.2	15.0	14.1	-31.6	02d.18h.	20.9	01d.00h.	-10.9
HARLINGEN	73	-10.4	22.2	19.6	-57.5	01d.20h.	33.8	01d.01h.	-6.2
VLIEL. HAV.	73	-2.9	13.2	12.8	-33.4	02d.18h.	36.9	01d.14h.	-8.8
W. - TERSCH.	73	-5.0	13.6	12.7	-30.0	02d.12h.	25.2	02d.02h.	-4.3
WIERUMERGR.	73	-7.3	18.5	17.0	-50.3	01d.20h.	31.3	01d.14h.	-2.1
HUIBERTGAT	73	-13.6	20.3	15.0	-52.3	02d.12h.	17.4	01d.08h.	11.4
EEMSHAVEN	73	-8.8	17.1	14.7	-41.0	02d.13h.	24.0	02d.01h.	24.3
DELFIJL	73	-4.5	22.4	21.9	-65.7	01d.22h.	28.5	02d.01h.	35.1
OVER ALL	730	-8.4	19.1	17.1	-65.7	01d.22h.	36.9	01d.14h.	12.9

Een nadere vergelijking van de modellen a.d.h.v. kostenfuncties, RMS-waarden en hoogwatersverschillen (allen exclusief Hoek van Holland en Petten) is te vinden in de tabellen 4.4-4.6 in paragraaf 4.4.

In de figuren 12.1 tot en met 12.9 zijn de gemeten en de met beide modellen voorspelde waterstanden getekend.

Op basis van zowel kostenfuncties als (in enige mate) de hoogwatervoorspellingen blijkt dat voor de 1983 storm het WADDEN-model beter presteert dan ZUNOWAK.

#### 4.3 De 1981 storm

T.a.v. de overeenkomst tussen de met het ZUNOWAK-model en het WADDEN-model voorspelde waterstanden volgen hier twee tabellen konform de opzet in het vorige hoofdstuk.

Tabel 4.3.1		De november 1981 storm. Gemeten en met ZUNOWAK voorspelde waterstanden.									
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	$\Delta Hw1$	$\Delta Hw2$	
*HOEK v.HOL.	73	9.2	17.8	15.2	-23.0	25d.06h	67.5	23d.19h	14.4	13.4	
*PETTEN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DEN HELDER	73	0.9	11.2	11.2	-20.5	25d.07h	42.2	23d.19h	9.3	10.0	
OUDE SCHILD	73	5.0	16.6	15.8	-26.8	25d.07h	55.6	23d.19h	2.2	-7.9	
HARLINGEN	73	-8.7	14.7	11.8	-39.0	24d.12h	17.4	24d.16h	-9.0	0.3	
VLIEL. HAV.	73	1.5	11.8	11.7	-18.2	25d.04h	34.3	24d.19h	19.2	5.6	
W. - TERSCH.	73	-5.2	12.3	11.2	-32.0	24d.09h	25.9	24d.06h	14.3	10.8	
WIERUMERGR.	73	-5.4	16.9	16.0	-36.1	25d.06h	54.2	23d.19h	10.6	9.5	
HUIBERTGAT	73	-3.2	14.3	13.9	-37.3	23d.18h	48.7	23d.20h	6.2	1.8	
EEMSHAVEN	73	2.2	23.4	23.3	-56.1	23d.23h	66.1	23d.21h	31.3	-1.1	
DELFIJL	73	5.5	30.8	30.3	-58.1	25d.18h	81.6	25d.10h	60.9	24.7	
OVER ALL	730	0.2	17.9	17.9	-58.1	25d.18h	81.6	25d.10h	18.1	8.0	

Tabel 4.3.2		De november 1981 storm. Gemeten en met WADDEN voorspelde waterstanden.									
STATION	#obs.	gem.	RMS	SIGMA	Min.	Tmin	Max.	Tmax	$\Delta Hw1$	$\Delta Hw2$	
*HOEK v.HOL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
*PETTEN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DEN HELDER	73	-0.4	9.8	9.8	-22.3	25d.01h	31.8	23d.19h	5.4	6.8	
OUDE SCHILD	73	2.9	9.5	9.0	-18.8	24d.13h	25.0	24d.22h	4.0	14.0	
HARLINGEN	73	-3.8	12.4	11.8	-30.3	25d.06h	24.6	24d.03h	-4.5	4.5	
VLIEL. HAV.	73	6.8	12.9	10.9	-13.4	23d.00h	34.5	24d.22h	13.6	-2.4	
W. - TERSCH.	73	3.1	11.6	11.1	-16.1	23d.00h	35.9	24d.22h	8.5	-1.0	
WIERUMERGR.	73	-4.5	16.3	15.6	-39.9	23d.18h	38.2	23d.19h	7.7	15.2	
HUIBERTGAT	73	-2.1	13.6	13.5	-40.9	23d.18h	39.5	23d.20h	3.1	7.7	
EEMSHAVEN	73	6.4	18.2	17.0	-29.3	23d.23h	59.8	24d.04h	16.1	18.3	
DELFIJL	73	11.2	23.6	20.8	-29.8	24d.12h	56.3	24d.05h	31.3	35.9	
OVER ALL	657	2.2	14.8	14.7	-40.9	23d.18h	59.8	24d.04h	10.5	11.8	

Een nadere vergelijking van de modellen a.d.h.v. kostenfuncties, RMS-waarden en hoogwatersverschillen (allen exclusief Hoek van Holland en Petten) is te vinden in de tabellen 4.4-4.6 in paragraaf 4.4.

In de figuren 13.1 tot en met 13.9 zijn de gemeten en de met beide modellen voorspelde waterstanden getekend.

Op basis van vooral de kostenfuncties (en in beperkte mate t.a.v. de hoogwaters) blijkt dat voor de 1981 storm het WADDEN-model aanzienlijk beter presteert dan ZUNOWAK.

#### 4.4 Kostenfuncties, RMS en hoogwatersverschillen volgens ZUNOWAK en WADDEN

tabel 4.4	kostenfuncties met standaard Cd(.) voor ZUNOWAK en WADDEN			
	$J_{ZUNOWAK}$	$J_{WADDEN}$	$J_{WAD}/J_{ZUN}$	$\Delta J/J_{WADDEN}$
feb. 1989	17.44	15.30	0.88	14%
feb. 1983	30.86	21.96	0.71	40%
nov. 1981	21.12	14.43	0.68	46%

Deze kostenfuncties zijn allen exclusief Hoek van Holland en Petten. De eenheid is  $m^2$ .

tabel 4.5	RMS met standaard Cd(.) voor ZUNOWAK en WADDEN			
	$RMS_{ZUN}$	$RMS_{WAD}$	$RMS_{WAD}/RMS_{ZUN}$	$\Delta RMS/RMS_{WAD}$
feb. 1989	16.3	15.3	0.94	7%
feb. 1983	21.7	18.3	0.84	19%
nov. 1981	17.9	14.8	0.83	21%

Deze RMS-waarden zijn allen exclusief Hoek van Holland en Petten. De eenheid is cm.

tabel 4.6	$\Delta H_w$ met standaard $C_d(\cdot)$ voor ZUNOWAK en WADDEN			
	$\Delta H_{wZUN}$	$\Delta H_{wWAD}$	$\Delta H_{wWAD}/\Delta H_{wZUN}$	$\Delta\Delta H_w/\Delta H_{wWAD}$
feb 1989	16.1	15.5	0.96	4%
feb 1983	17.7	12.9	0.73	37%
nov 1981a	18.1	10.5	0.58	72%
nov 1981b	8.0	11.8	1.48	-32%

Deze  $\Delta H_w$ -waarden zijn de gemiddelden  $\langle |\Delta H_{w_k}| \rangle$  over alle stations  $k$ , echter **exklusief Hoek van Holland en Petten**. De eenheid is cm. Een positief percentage in de laatste kolom betekent dat het WADDEN-model beter presteert terwijl bij een negatief percentage het ZUNOWAK-model met de 'standaard'  $C_d(\cdot)$  het beter doet.

## 5. SAMENVATTING, KONKLUSIES en AANBEVELINGEN

De twee belangrijkste activiteiten die in deze notitie zijn gerapporteerd zijn:

### - De kalibratie van de $C_d(\cdot)$ -coëfficiënt in ZUNOWAK

De  $C_d(\cdot)$ -coëfficiënt in de bolkoördinaten versie van ZUNOWAK is driemaal afgeregeld, één keer onder de condities van de februari 1989 storm, één keer onder de condities van de februari 1983 storm, en één keer onder de condities van de november 1981 storm. Dat afregelen vond plaats op basis van waterstandsmetingen. Uit de 'individuele'  $C_d(\cdot)$ 's van de 1981 en 1989 storm is één 'standaard'  $C_d(\cdot)$  voor het ZUNOWAK-model gekonstrueerd.

### - Vergelijking ZUNOWAK en WADDEN model onder stormcondities

De 'standaard'  $C_d(\cdot)$  die in de vorige stap werd gevonden is in het WADDEN-model opgenomen. Voor de drie hierboven beschreven stormen zijn zowel met ZUNOWAK als met WADDEN waterstandsvoorspellingen berekend. Beide berekende waterstandsreeksen zijn vergeleken met de indertijd gemeten waterstanden.

Samenvattend kunnen op basis van het uitgevoerde onderzoek de volgende konklusies en aanbevelingen worden geformuleerd.

### Konklusies t.a.v. afregelen ZUNOWAK:

1. Met de DUD-methode kan (per storm) snel de optimale  $C_d(\cdot)$  worden geschat. Het aantal model berekeningen dat bij deze methode per storm nodig was is van de orde 10.
2. De  $C_d(\cdot)$ -coëfficiënten die bij het afregelen van ZUNOWAK zijn gevonden voor de 1981 en 1989 storm komen goed overeen. De optimale  $C_d(\cdot)$  voor de 1983 storm wijkt hier echter aanzienlijk van af.



3. Op basis van het RMS-verschil tussen de enerzijds met ZUNOWAK voorspelde waterstanden, en anderzijds de gemeten waterstanden blijkt dat het ZUNOWAK model aanmerkelijk beter presteert voor de 1989 storm en (in iets mindere mate) voor de 1981 storm dan voor de 1983 storm. T.a.v. de voorspelling van extreme waterstanden geldt dezelfde tendens.  
Voor de 1989, 1981 en 1983 stormen werd voor het RMS verschil tussen voorspelde en gemeten waterstanden respectievelijk 16, 18 en 20 cm gevonden.
4. Op basis van de  $C_d(\cdot)$ 's van 1981 en 1989 is één 'standaard'  $C_d(\cdot)$  voor het ZUNOWAK model gekonstrueerd. Voor beide stormen geldt dat het model met de 'standaard'  $C_d(\cdot)$  nauwelijks afwijkt van het model met de individueel optimale  $C_d(\cdot)$ 's. Voor de 1983 storm geldt dat het model met de 'standaard'  $C_d(\cdot)$  niet onakseptabel veel afwijkt van het model met de voor 1983 optimale  $C_d(\cdot)$  (6% verlies in het RMS-verschil van voorspelde en gemeten waterstanden).
5. De rond de optimale  $C_d(\cdot)$ 's gekonstrueerde gevoeligheidsbanden laten zien dat het model maar beperkt gevoelig is voor de drag-koëfficiënt. Dit geldt vooral voor de  $C_d(\cdot)$ -waarden voor windsnelheden kleiner dan 10 m/s.  
N.B. Dit is in overeenstemming met het in het vorige aandachtspunt gevonden resultaat dat de  $C_d(\cdot)$  die op basis van de 1981 en 1989 stormen werd gekonstrueerd nog redelijk voldoet voor de 1983 storm.
6. Vooral voor de oostenlijke waddenstations (Eemshaven en Delfzijl) wijken de ZUNOWAK voorspellingen van de extreme waterstanden nog aanzienlijk af van de extremen zoals waargenomen (zelfs bij de optimale  $C_d$ ). Dit geldt met name voor de 1983 storm. Mogelijk dat de 'eenvoudige'  $C_d(\cdot)$  zoals die hier is gebruikt daar debet aan is. Zie ook aandachtspunten 10 en 11.

Konklusies t.a.v. vergelijking ZUNOWAK en WADDEN:

7. Voor de 1983 en 1981 storm is gevonden dat het WADDEN model (voorzien van de voor ZUNOWAK gekonstrueerde optimale  $C_d$ ) redelijke verbeteringen van de waterstandsvoorspellingen geeft (t.o.v. van ZUNOWAK). Voor de 1989 storm is die verbetering nihil. Dit geldt zowel voor het RMS verschil van voorspelde waterstanden en gemeten waterstanden, als voor de voorspelling van hoogwaters.
- Echter, gezien de mate van die verbeteringen, en daarbij de aanzienlijke meerinspanning in overweging nemende die WADDEN sommen vergen t.o.v. ZUNOWAK-sommen, moet worden gekonkludeerd dat voor het routinematig voorspellen van extreme waterstanden men met het ZUNOWAK model al voldoende 'bewapend' is.
- N.B. Dit feit ondersteunt de hier gevolgde aanpak om ZUNOWAK af te regelen en diens optimale  $C_d(\cdot)$  over te hevelen naar WADDEN.
8. Bij de vergelijking van ZUNOWAK en WADDEN zoals die in aandachtspunt 7 is samengevat moet worden aangetekend dat het ZUNOWAK model met een plaatsafhankelijk windveld heeft gerekend terwijl in het WADDEN-model de wind van één station voor het hele gebied werd gebruikt. Hier was dat een station in het westelijk gedeelte (Eierlandse gat). Er is niet gecontroleerd in hoeverre een alternatieve keuze, b.v. in de vorm van een windstation in het meer oostenlijke gedeelte, de 'prestaties' van het WADDEN-model zou verbeteren (met name voor de oostenlijke stations Eemshaven en Delfzijl). Zo'n gevoeligheidsonderzoek van het model t.a.v. de keuze van het windstation zou vooral voor de 1981 storm nog zinvol zijn geweest aangezien bij deze storm twee min of meer gelijkwaardige waterstandsextremen optraden waartussen de wind is gedraaid. Een betere aanpak is echter om ook het WADDEN model te voorzien van de mogelijkheid om met plaatsafhankelijke winden te rekenen. Op basis van de huidige resultaten en het daarmee verworven inzicht wordt echter verwacht dat deze verbetering niet meer zal bedragen dan 1 à 2 cm in het RMS-verschil van voorspelde en gemeten waterstanden. Voor de predikties van de waterstandsextremen worden verbeteringen in de grootte orde van 5 à 10 cm verwacht.

### Aanbevelingen.

9. T.b.v. van verdere verbetering van het WADDEN-model wordt aanbevolen dit model aan te passen opdat ook hier met een plaatsafhankelijke windvelden kan worden gerekend.
  
10. In de hier uitgevoerde studie is gerekend met een relatief eenvoudige  $C_d(\cdot)$ -formulering: de  $C_d(\cdot)$  is alleen afhankelijk van de windsnelheid. Uit de literatuur is bekend dat zo'n formulering tekortkomingen heeft en dat formuleringen die informatie van het oppervlaktegolvenveld gebruiken een betere beschrijving van de oppervlakte ruwheid van de zee geven. Zie b.v. van den Boogaard et. al. (1991) voor een review t.a.v. golfafhankelijke  $C_d(\cdot)$ -formuleringen en Mastenbroek (1991) voor een toepassing op de Noordzee. Deze overwegingen pleiten voor een golfafhankelijke  $C_d(\cdot)$ -formulering in het ZUNOWAK en/of WADDEN model. Dit zou echter de koppeling van deze modellen met een golfmodel vereisen. Het grote praktische nadeel hiervan is de inspanning die gemoeid is met de realisatie van die koppeling. Bovendien wordt men vervolgens geconfronteerd met een aanzienlijke toename van de rekeninspanning voor de getijsimulaties. Een alternatief dat zou kunnen worden overwogen is om de golfinformatie niet met een geëavanceerd golfmodel te verwerven, maar daarentegen gebruik te maken van meer eenvoudige, analytische voorspellingen van de belangrijkste golfparameters, b.v. via de 'Wave prediction equations' zoals in de Shore Protection Manual door de United States Army corps of Engineers (1984). Met deze voorspellingen (gedaan op basis van windsnelheden, strijklengten, diepten, etc..) van de belangrijkste golfparameters kunnen wellicht al essentiële verbeteringen van de  $C_d(\cdot)$ -formulering tot stand worden gebracht.

Gezien de complicaties die optreden bij golfafhankelijke  $C_d(\cdot)$ 's wordt in het volgende aandachtspunt nog een alternatieve  $C_d(\cdot)$  voorgesteld die rechtstreeks aansluit bij de huidige relatief eenvoudige windafhankelijke formulering.

11. Het is bekend dat de drag koëfficiënt  $C_d(\cdot)$  aanzienlijk groter is voor ondiepe wateren (zoals meren en estuaria) dan voor diepe wateren zoals oceanen, zie b.v. Geernaert, 1990. Deze diepte afhankelijkheid van  $C_d(\cdot)$  zal dus met name voor het huidige modelgebied, de Waddenzee, een belangrijke rol spelen. In de huidige formulering en de daaraan toegevoegde kalibratie is met die (on)diepte, ofwel plaatsafhankelijkheid, niet expliciet rekening gehouden. Een aanpak die snel op resultaat is te verifiëren, is om de huidige formulering goeddeels te handhaven, doch de waarde van de knikpunten  $\alpha := (x_1, y_1, x_2, y_2)$  afhankelijk te laten zijn van de plaats in het modelgebied. Hiertoe zou men de Waddenzee in een aantal vakken kunnen opdelen (b.v. drie: westelijke-, midden- en oostelijke Waddenzee) en de parametervektor  $\alpha$  per vak vrij laten. Bij  $n$  vakken zou dat dan leiden tot  $4 \cdot n$  parameters (eventueel wordt alleen op het tweede knikpunt gekalibreerd en heeft men 'slechts'  $2 \cdot n$  parameters). Zolang het aantal niet boven de 15 à 20 uitkomt (dus 5 à 10 vakken) is deze kalibratie nog goed met de DUD-methode uit te voeren.
12. De resultaten van dit onderzoek (in de vorm van de dragkoëfficiënten en de kostenfuncties die na optimalisatie werden gevonden) lijken er op te wijzen dat de 1983 storm een ander karakter heeft dan de 1981 en 1989 storm. M.a.w., er is mogelijk een verband tussen de optimale  $C_d(\cdot)$  en eigenschappen van de storm (denk hierbij b.v. aan de duur van de storm, de windrichting, strijklengte, enz..). Dit idee leidt tot de suggestie om voor een aantal andere stormen eveneens de  $C_d(\cdot)$  te optimaliseren waarna onderzocht kan worden of er inderdaad een relatie is tussen enerzijds de  $C_d(\cdot)$ -parameters en anderzijds kentallen die de storm karakteriseren. Als zo'n relatie kan worden aangetoond zou dat voor de praktijk een essentiële verbetering van waterstandsvoorspellingen onder stormkondities kunnen opleveren.
-

## 6. REFERENTIES

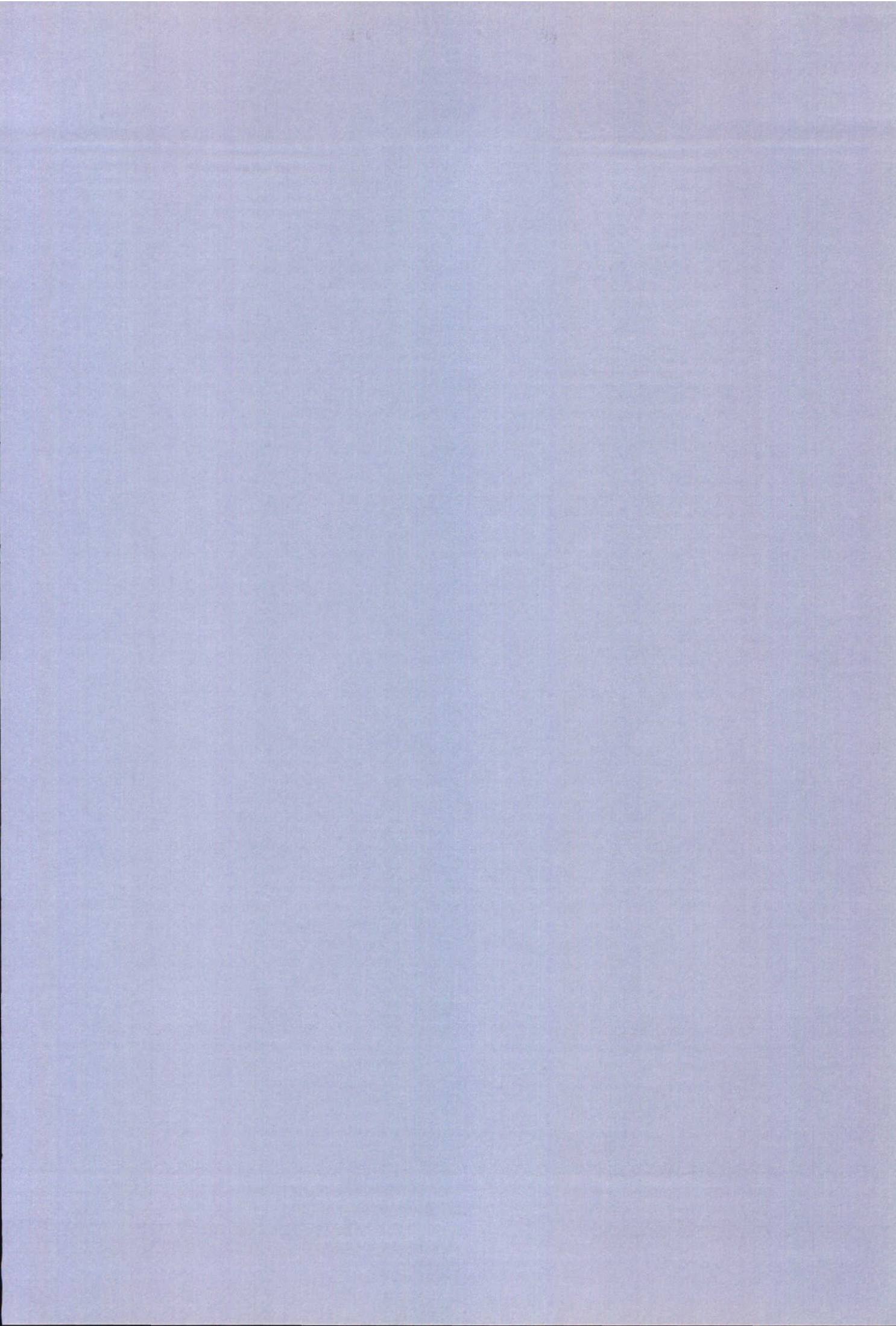
- Geernaert, G.L.: Bulk parameterizations for the wind stress and heat fluxes. In: Surface Waves and Fluxes. Vol I - Current theory, ed. by G.L. Geernaert and W.J. Plant, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 91-172, 1990.
- Gerritsen, H. and A.C. Bijlsma: Modelling of tidal and winddriven flow: the Dutch Continental Shelf Model. In: Computer Modelling in Ocean Engineering, Schrefler & Zienkiewicz (ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, 1988.
- Heemink, A.W.: Storm Surge Prediction using Kalman Filtering, Ph.D. Dissertation, Univ. of Twente, The Netherlands, 1986.
- Janssen, P.H.M., W. Slob and J. Rotmans: Gevoeligheidsanalyse en Onzekerheidsanalyse: een inventarisatie van Ideeën, Methoden en Technieken. RIVM report no. 958805001, Bilthoven, The Netherlands, 1990.
- Mastenbroek, C., G. Burgers and P.A.E.M. Janssen: The dynamic coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer. Personal Memorandum, 00-91-28, KNMI, De Bilt, The Netherlands, Submitted for publication, 1991.
- Ralston M.L. and R.I. Jennrich: DUD, a Derivative-Free Algorithm for Nonlinear Least Squares. Technometrics, vol. 20, no 1, 1978.
- Rijkswaterstaat: Nota WWKZ 85.G005; overzicht van bij de Deltadienst en Distrikt Kust en Zee in gebruik zijnde WAQUA-modellen. Directie waterhuishouding en waterbeweging, Distrikt Kust en Zee, April 1985.
- U.S. Army Corps of Engineers: Shore Protection Manual, 4th edition, Coastal Engineering Research Centre, Fort Belvoir, Virginia, 1984.
- van den Boogaard, H.F.P.: Calibration of Mathematical Models by Optimal Control (in Dutch). Delft Hydraulics Report Z62.10/Z107.04. Delft, The Netherlands, August 1988.
- van den Boogaard, H.F.P., R.U. Uittenbogaard and H. Gerritsen: The dependence of surface drag on waves; a literature survey. Delft Hydraulics, Report Z462, Delft, The Netherlands, October 1991.
-

## APPENDIX. KOSTENFUNKTIES VAN ALLE ZUNOWAK BEREKENINGEN

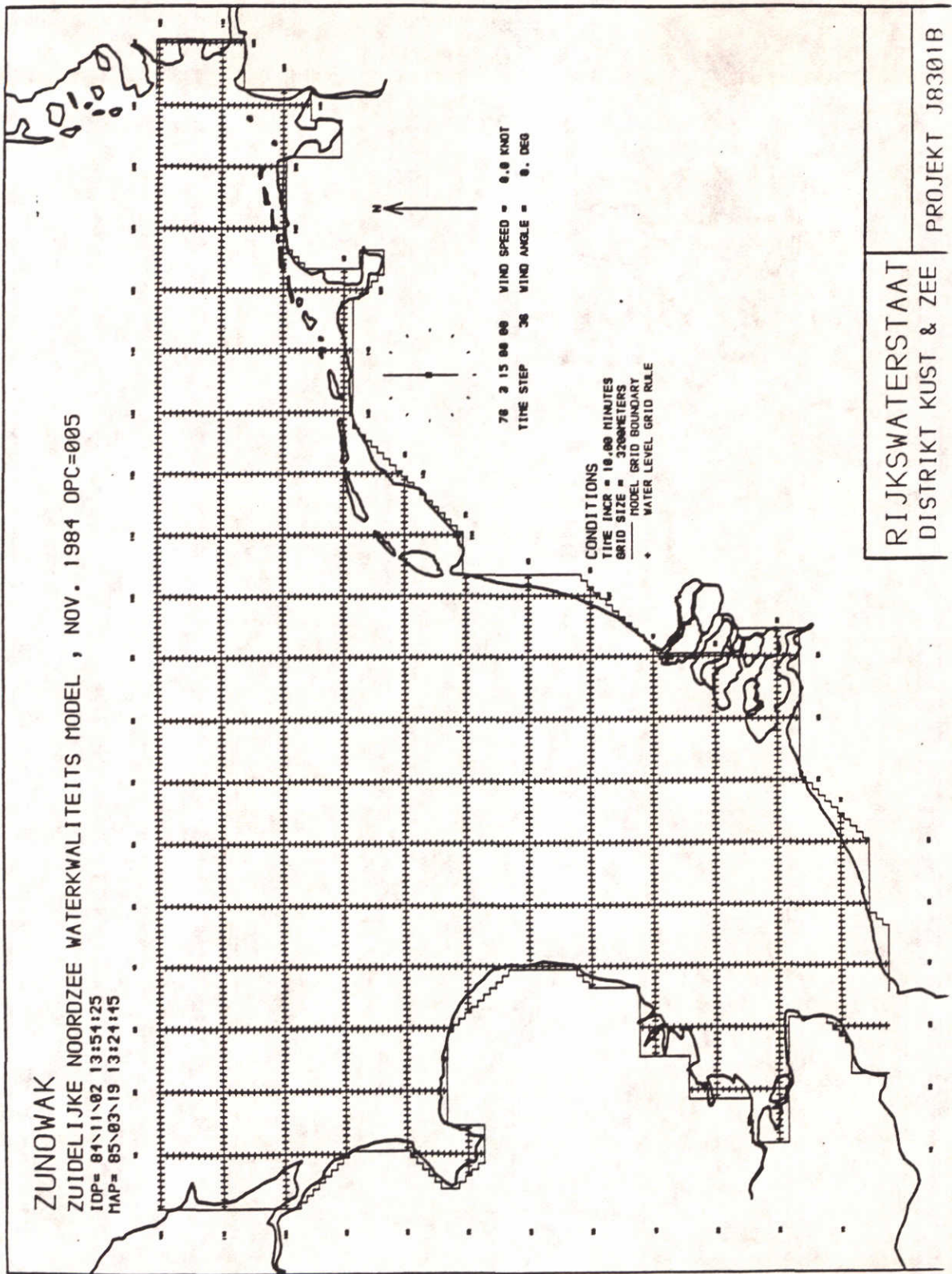
1989				
$x_1$	$y_1 \cdot 10^3$	$x_2$	$y_2 \cdot 10^3$	J
10.0	1.00	14.0	2.30	20.46600
8.0	0.90	15.0	2.50	19.35201
10.331	1.04	14.661	2.45	19.00542
10.0	1.00	15.0	2.50	18.67220
11.0	1.00	15.0	2.70	18.62351
10.0	1.10	16.0	2.50	18.04744
9.6695	1.16	17.339	2.55	17.45313
9.3389	1.22	18.678	2.60	17.29736

1983				
$x_1$	$y_1 \cdot 10^3$	$x_2$	$y_2 \cdot 10^3$	J
11.0	1.0	15.0	2.70	38.60766
8.0	0.90	15.0	2.50	32.62256
10.0	1.0	15.0	2.50	31.77332
10.0	1.10	16.0	2.50	31.52312
10.6	1.21	17.90	2.52	30.85564
10.077	0.80	11.2	2.33	29.99253
10.077	0.80	11.2	2.3	29.57970
13.17	1.84	23.31	2.24	29.20448
10.0	1.10	14.0	2.30	28.74173
9.12	1.01	14.76	2.16	28.13140
12.86	1.65	20.81	2.2	28.07515
12.27	1.65	21.41	2.22	27.96759
7.9	1.07	16.46	2.2	27.95231
9.9225	1.20	16.8	2.27	27.67384
9.9225	1.20	16.8	2.2	27.57927
9.8838	1.30	18.2	2.2	27.50684
11.37	1.47	19.51	2.2	27.46862

1981				
$x_1$	$y_1 \cdot 10^3$	$x_2$	$y_2 \cdot 10^3$	J
11.0	1.0	15.0	2.70	26.77801
11.28	1.72	14.47	2.47	23.41637
8.0	0.90	15.0	2.50	23.28615
10.0	1.0	15.0	2.50	22.80461
9.0	0.93	16.2	2.52	22.43236
10.0	1.10	14.0	2.30	22.30267
10.0	1.10	16.0	2.50	22.28099
12.2	0.88	18.77	2.44	22.27207
11.26	1.30	15.8	2.48	22.11072
11.52	1.50	15.6	2.46	22.07382
10.60	1.21	17.90	2.52	21.11756
11.85	1.19	17.18	2.45	21.09362







Rekengebied van het ZUNOWAK model

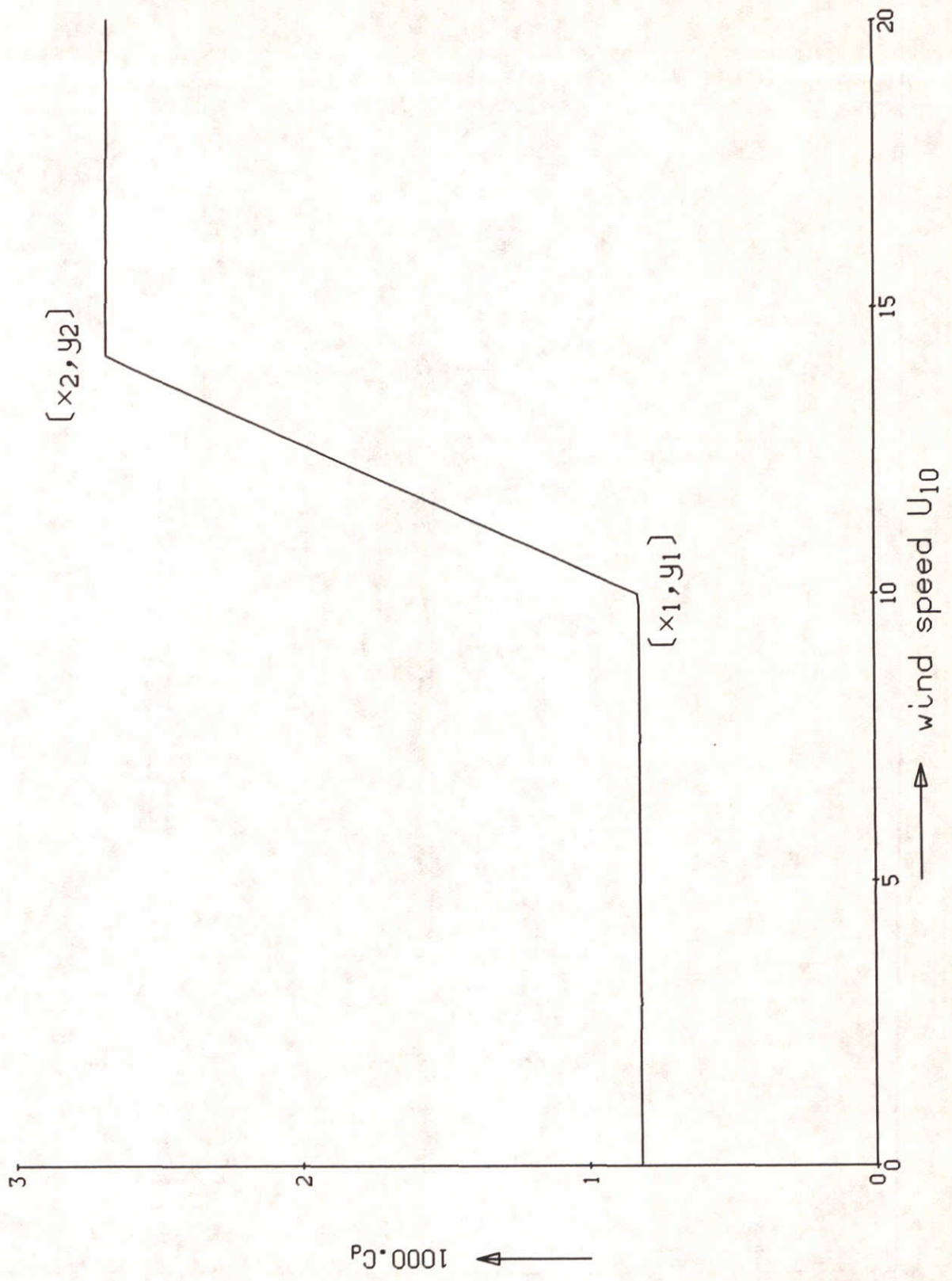
ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.1a





wind stress coefficient  $C_d$  in ZUNOWAK model  
as function of the wind speed

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.1c

OVERZICHTSKAART MEETLOKATIES



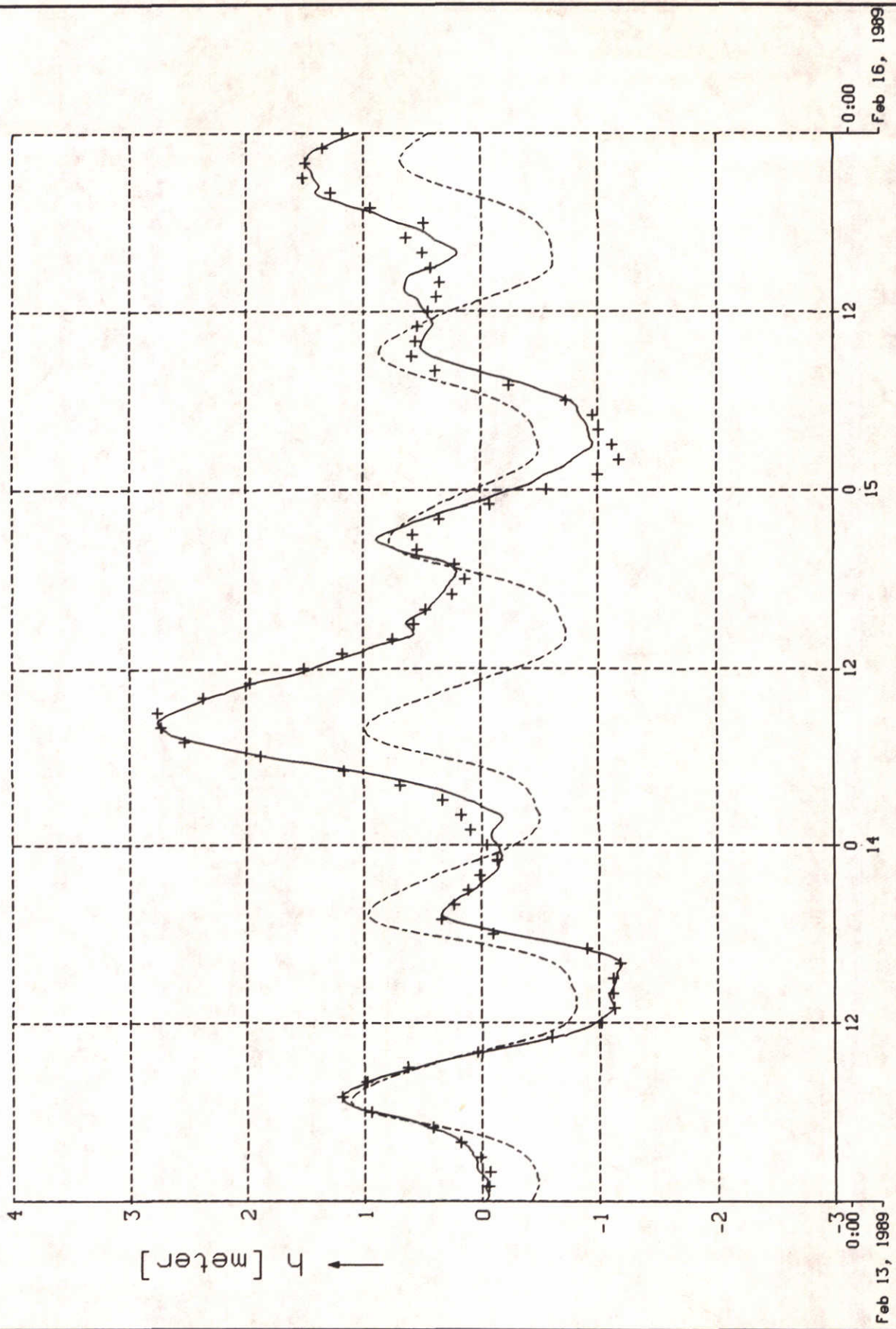
posities van waarnemingsstations

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.1d



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

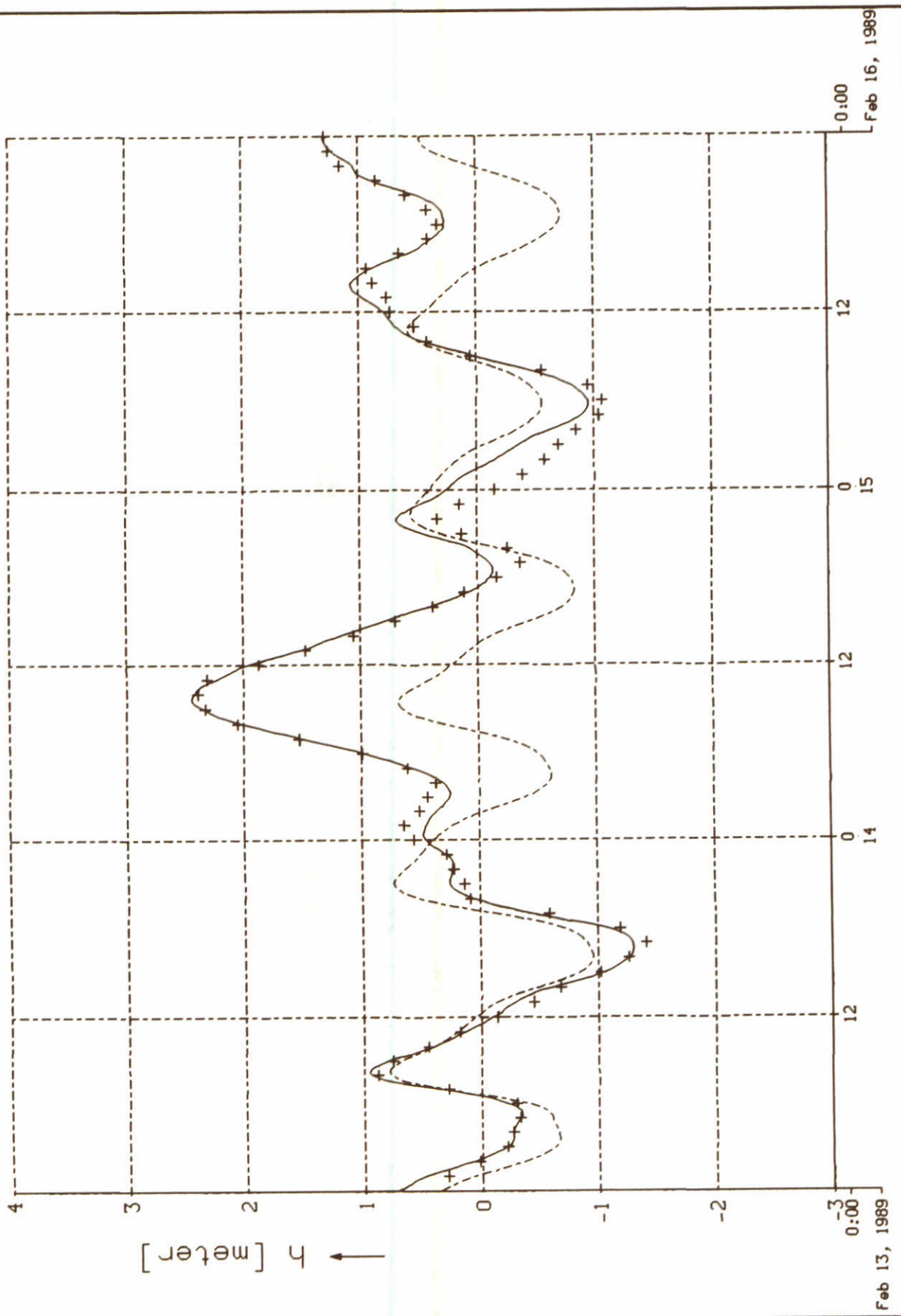
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Hoek v. Holland

ZUNOWAK

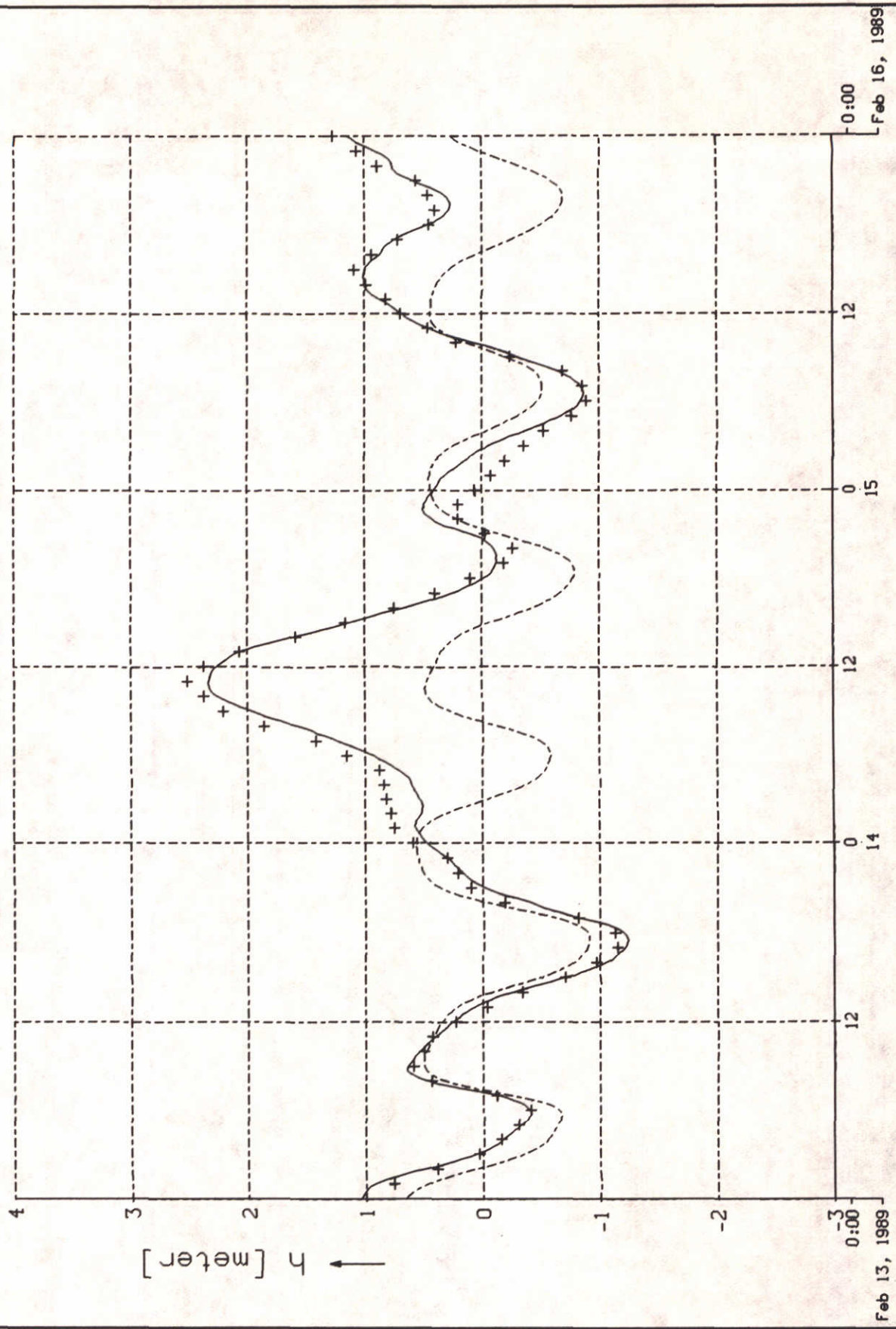
DELFT HYDRAULICS

Z-530

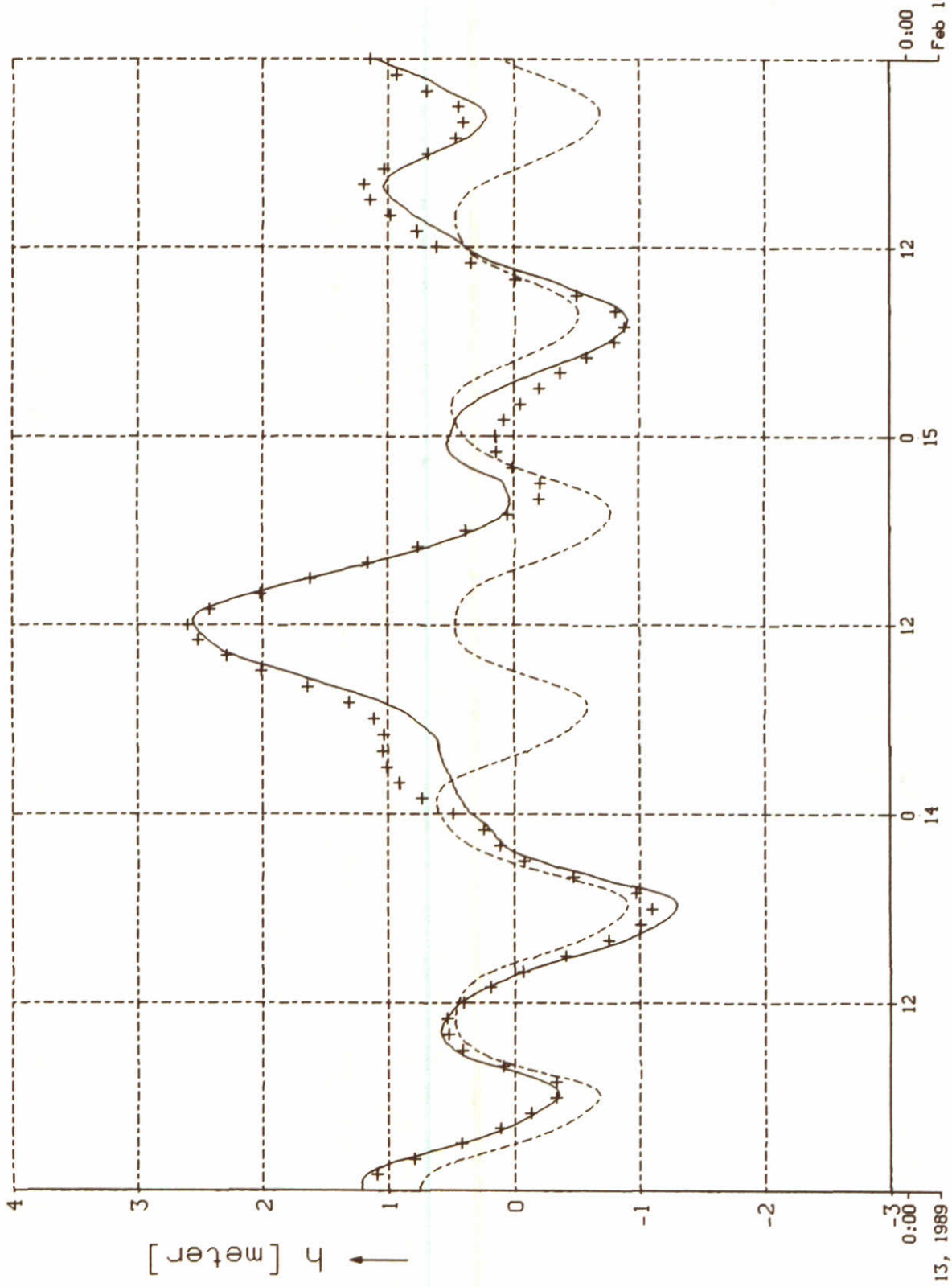
Fig. 2.1



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989 observations (+) and ZUNOWAK predict. at Petten		feb.1989
	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.2.2



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989 observations (+) and ZUNOWAK predict. at Den Helder		feb.1989
	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.2.3



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989

feb.1989

observations (+) and ZUNOWAK predict. at Oude Schild

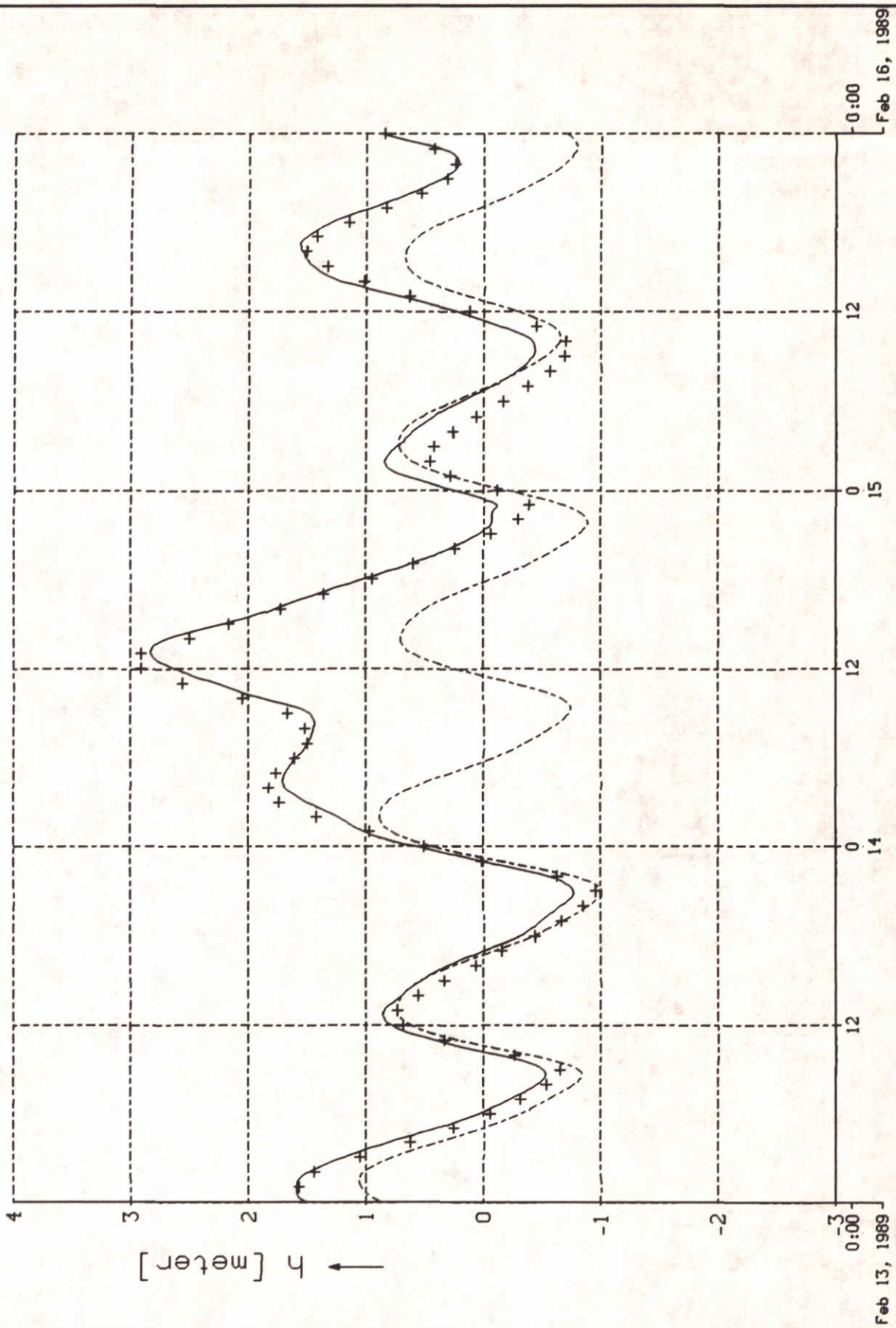
ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.2.4





ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989

feb.1989

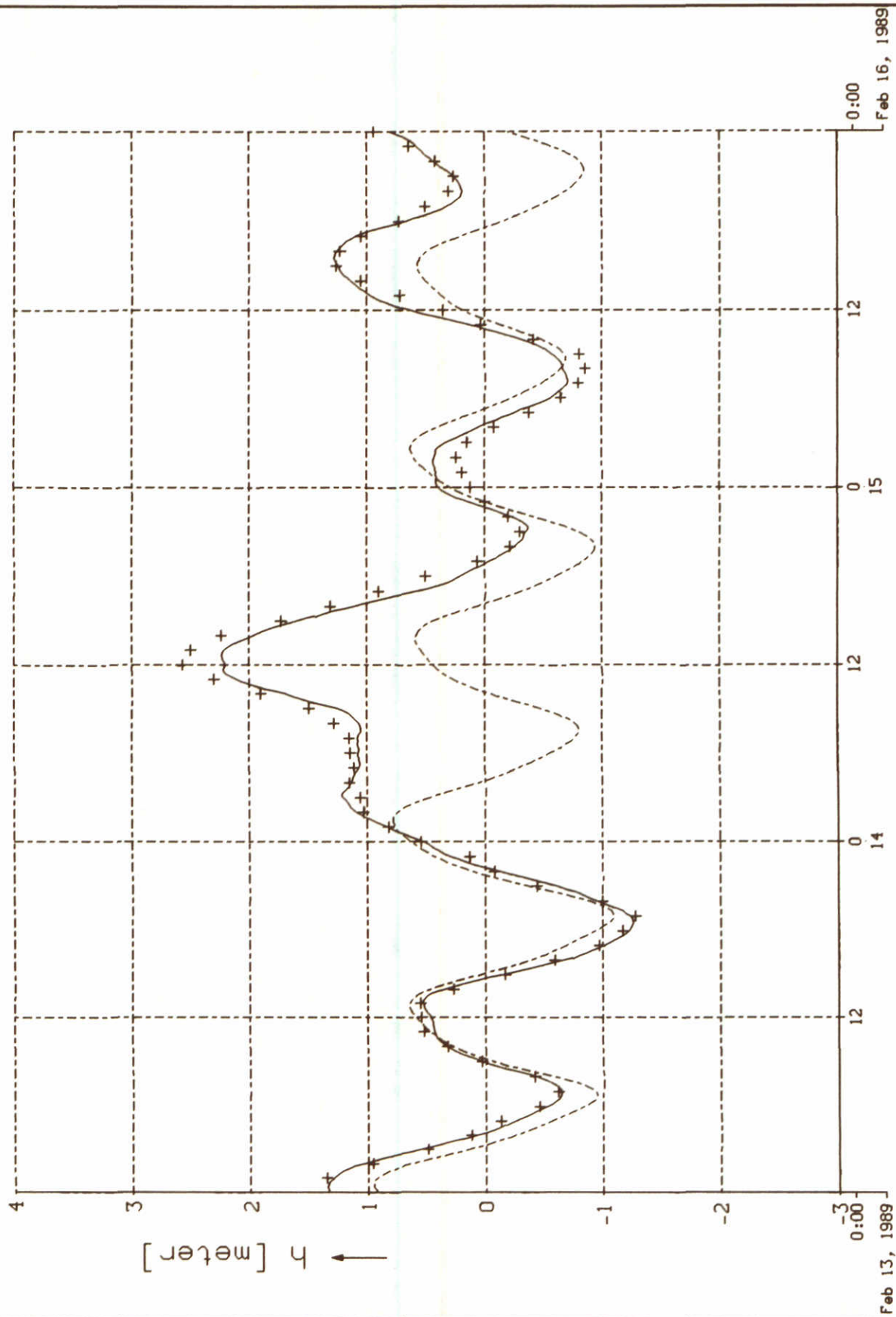
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Harlingen

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.2.5



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989

feb.1989

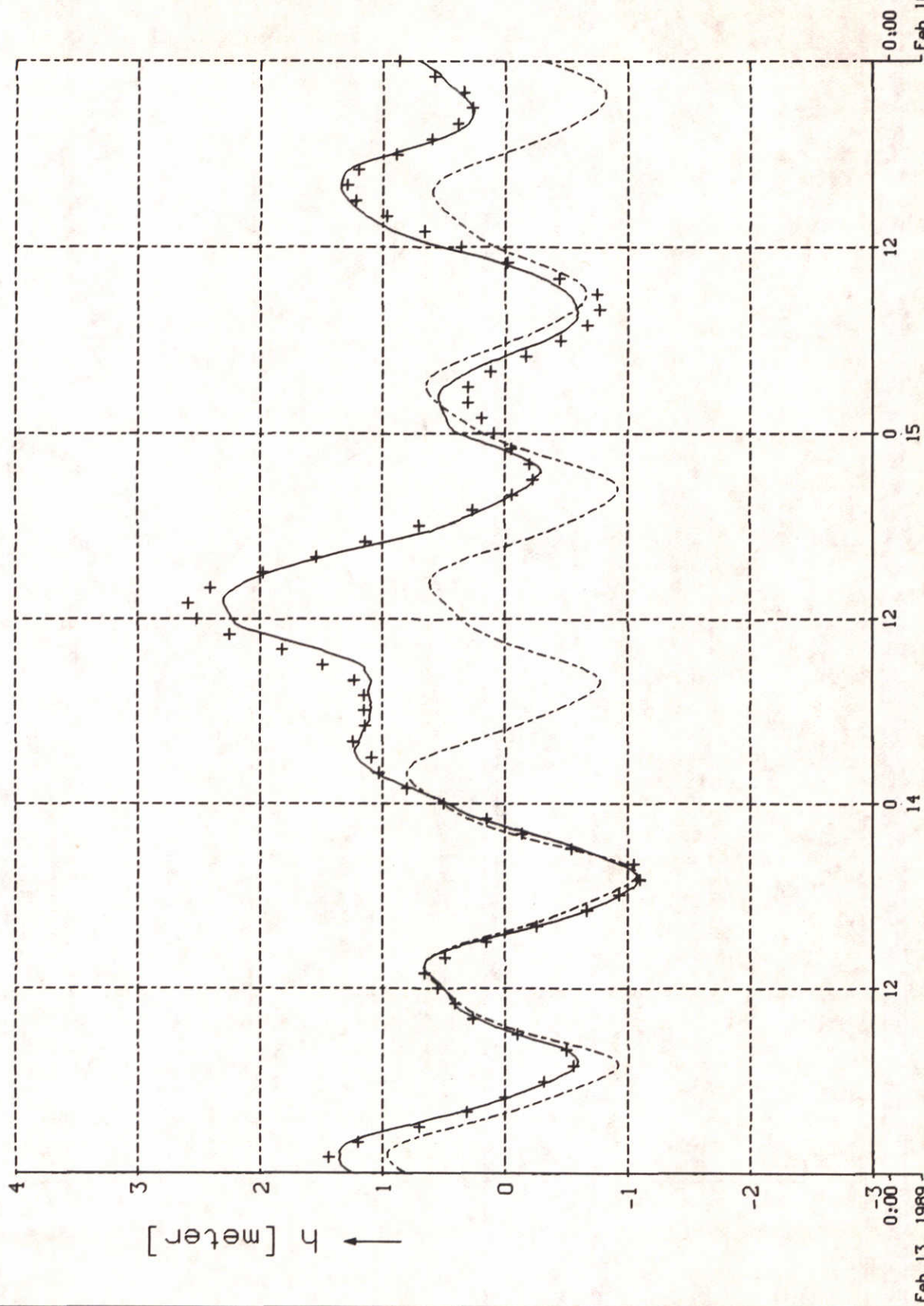
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Vlieland Haven

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

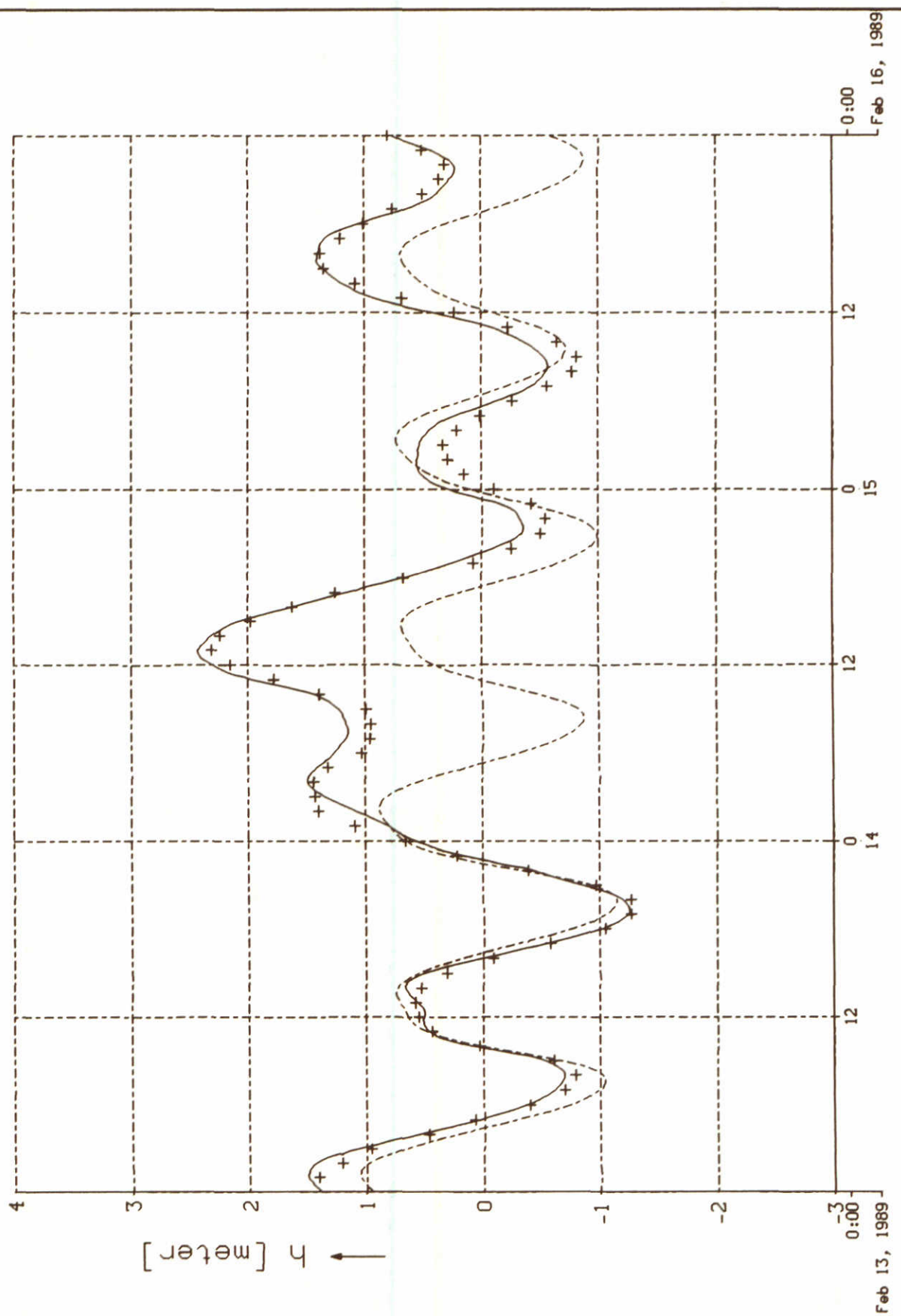
Fig.2.6



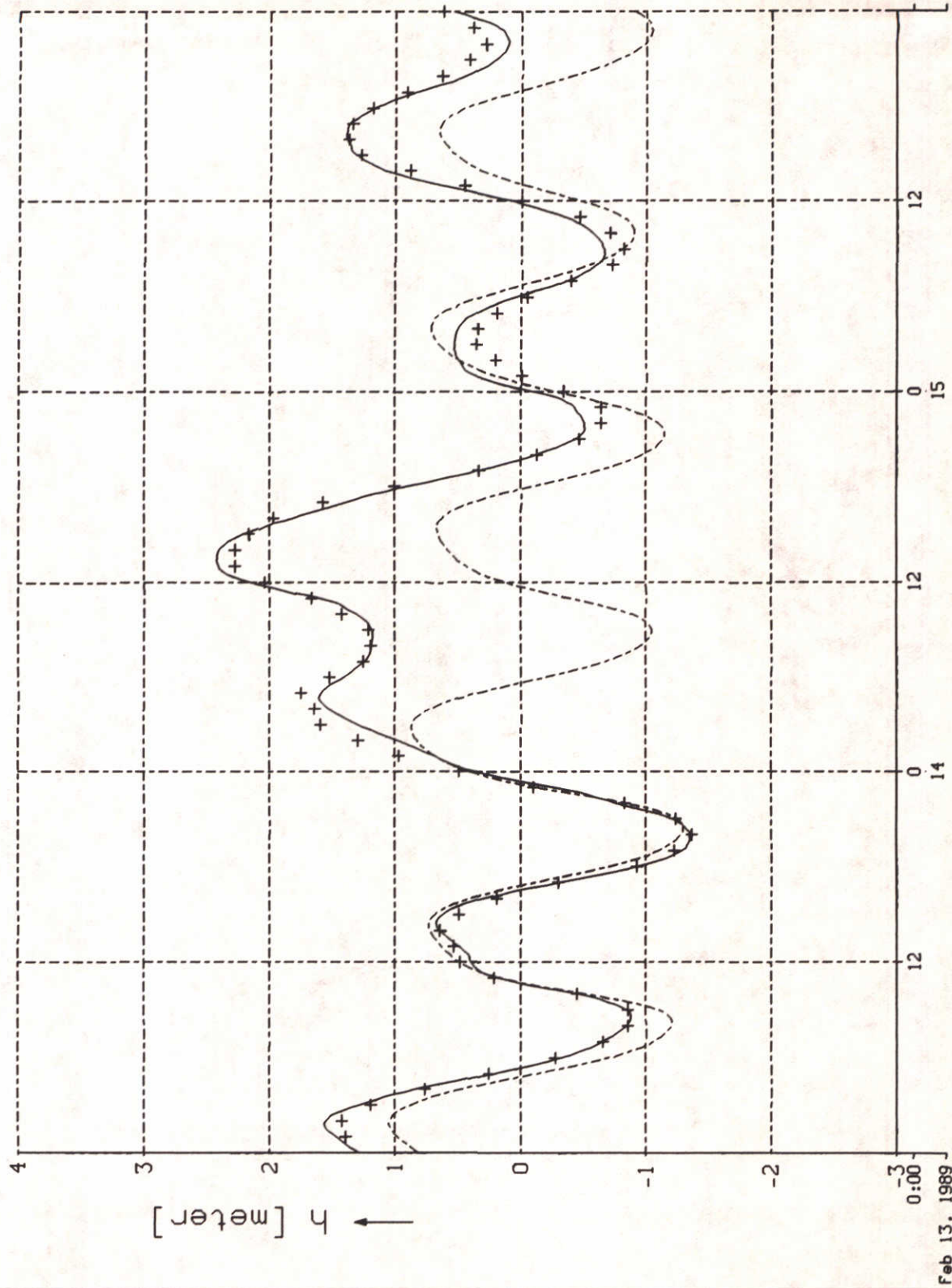
Feb 16, 1989  
0:00

Feb 13, 1989  
0:00

ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989		feb. 1989
observations (+) and ZUNOWAK predict. at W. Terschelling	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig. 2.7



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989		feb.1989
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Wierumergronden	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.2.8



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989

observations (+) and ZUNOWAK predict. at Huibertgat

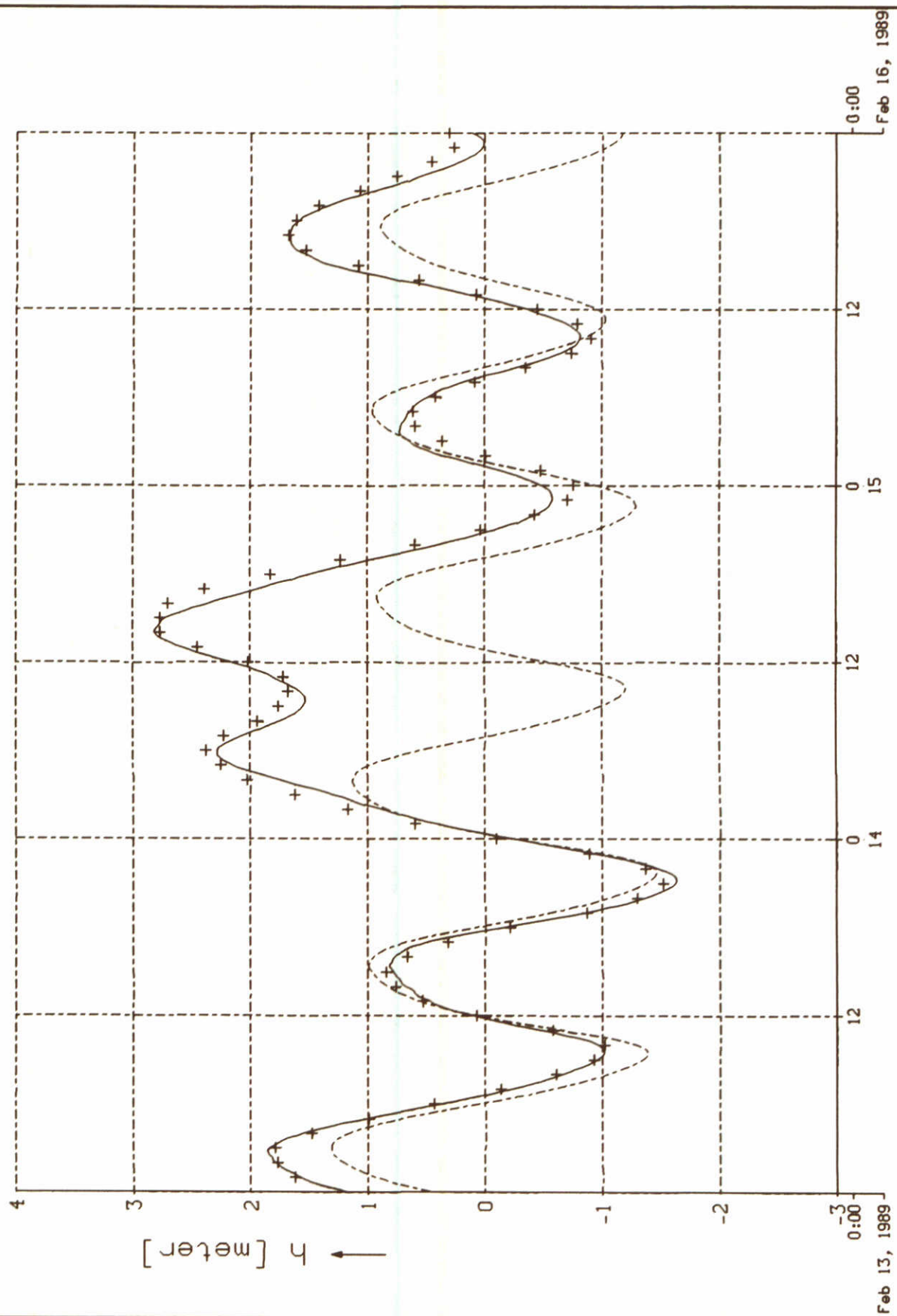
DELFT HYDRAULICS

ZUNOWAK

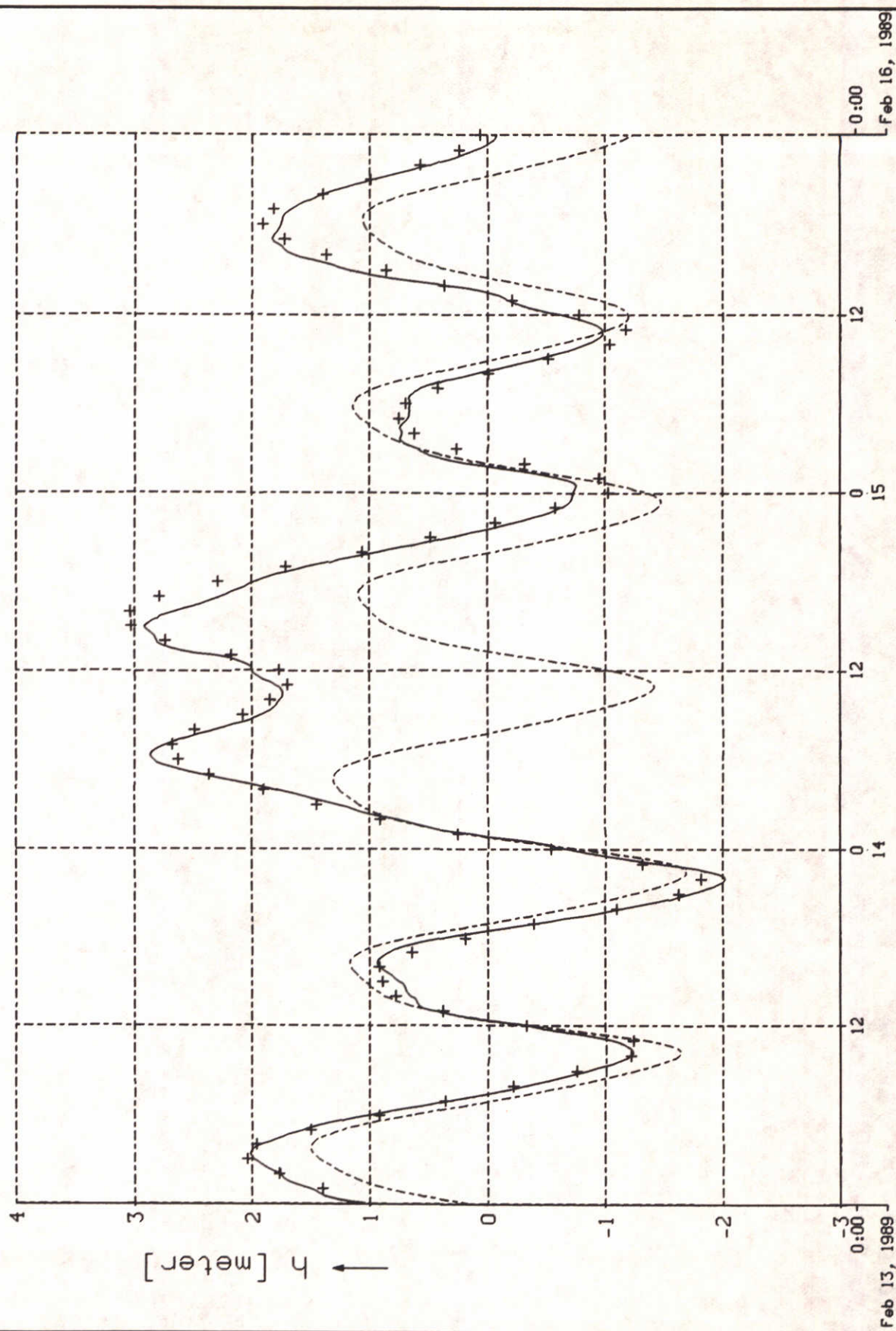
Z-530

feb.1989

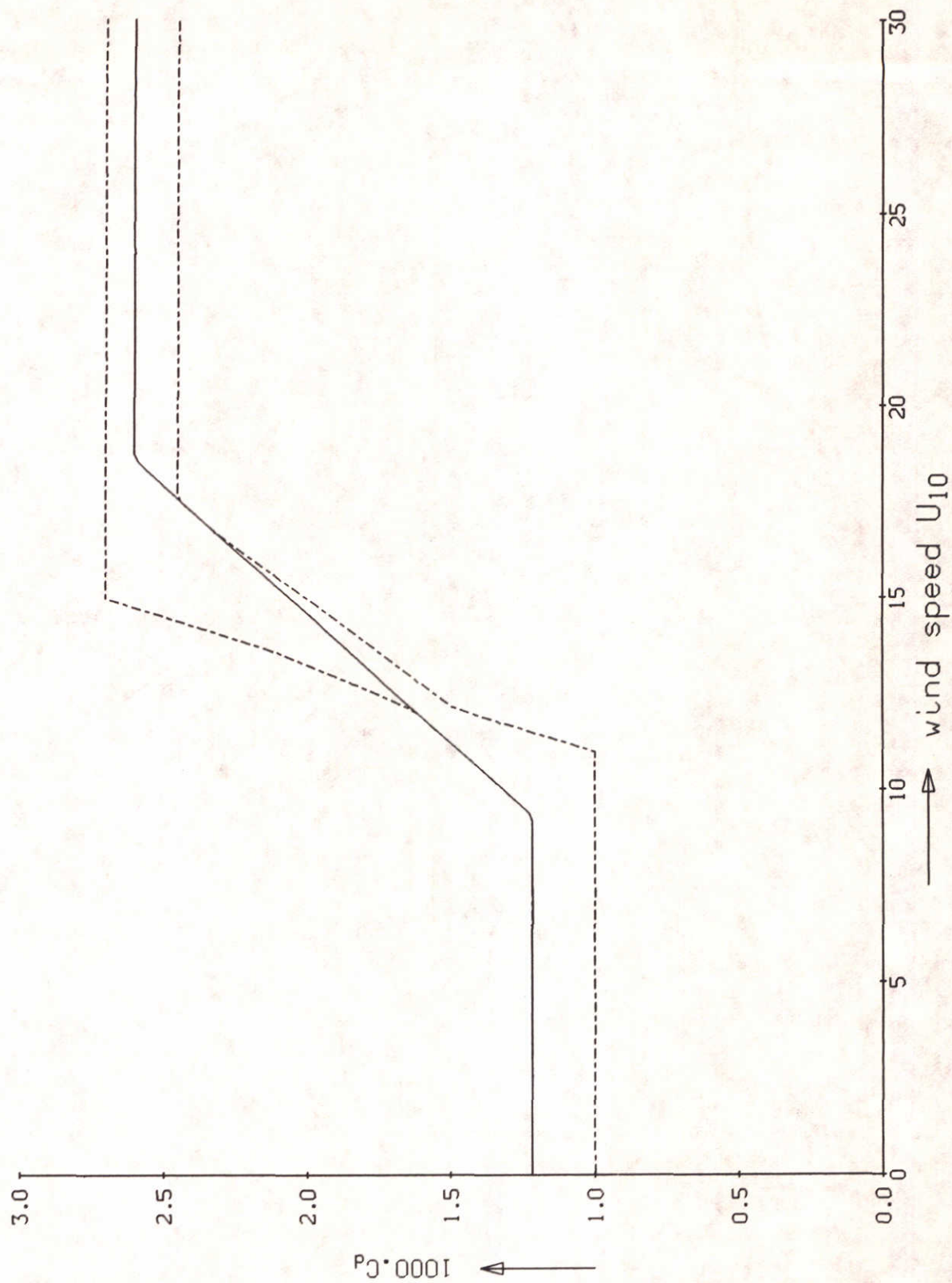
Fig.2.9



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989		feb.1989
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Eemshaven	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.2.10



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 13-15, 1989		feb.1989
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Delfzijl	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.2.11



wind stress coefficient in ZUNOWAK mode,  
during february-1989-storm

ZUNOWAK

Z0530

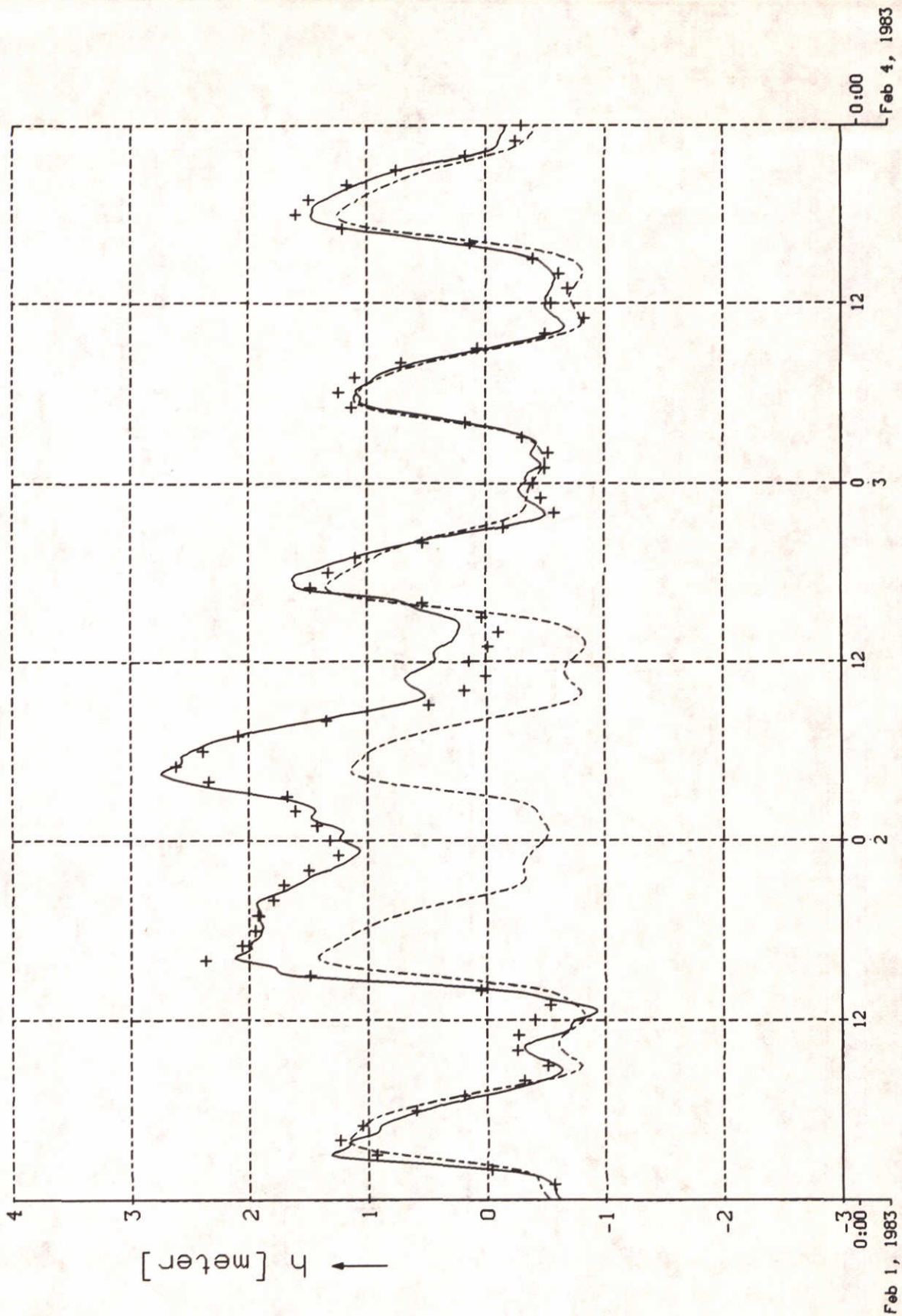
A4

DELFT HYDRAULICS

5%

Fig.3





ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983

feb.1983

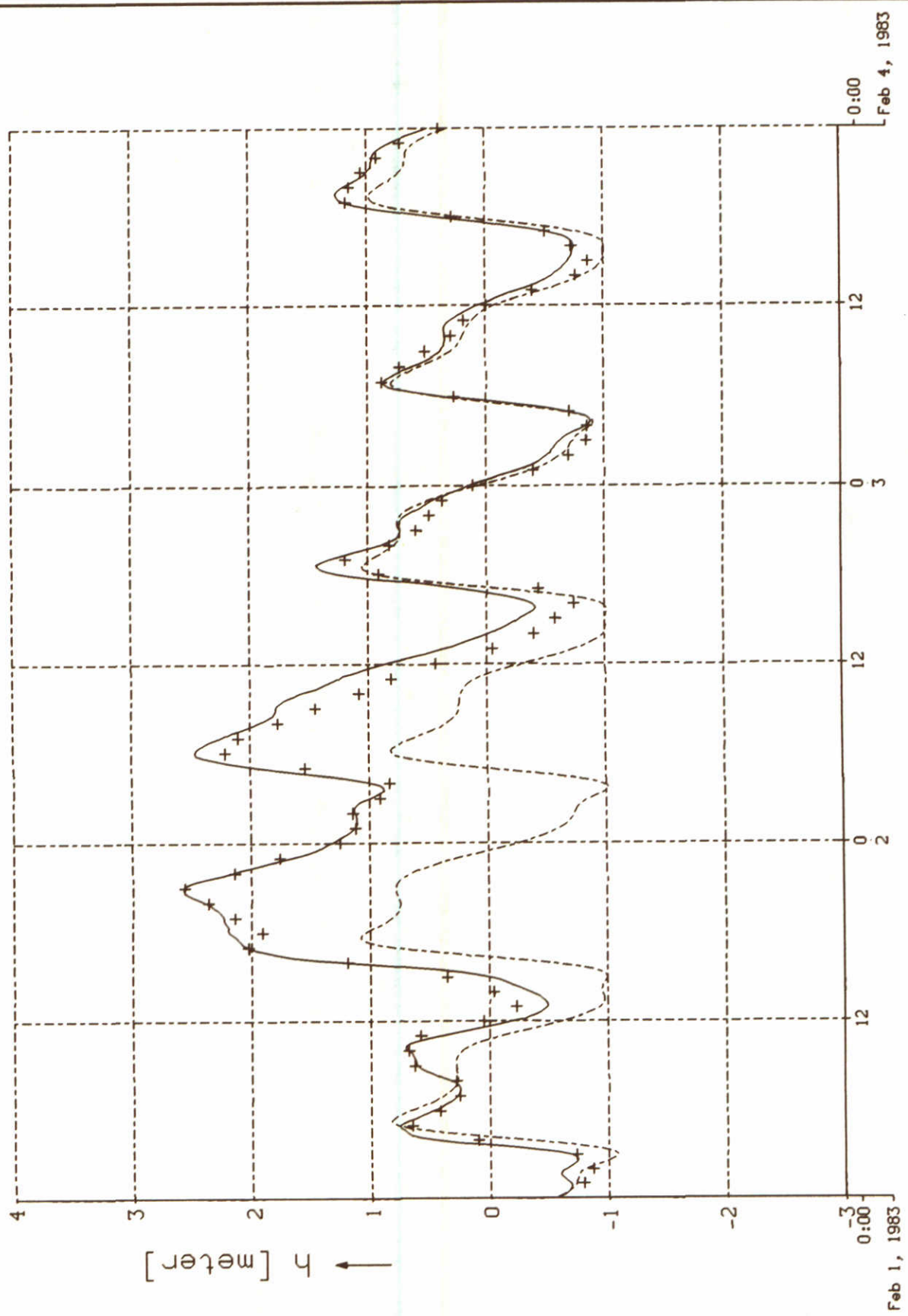
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Hoek v. Holland

ZUNOWAK

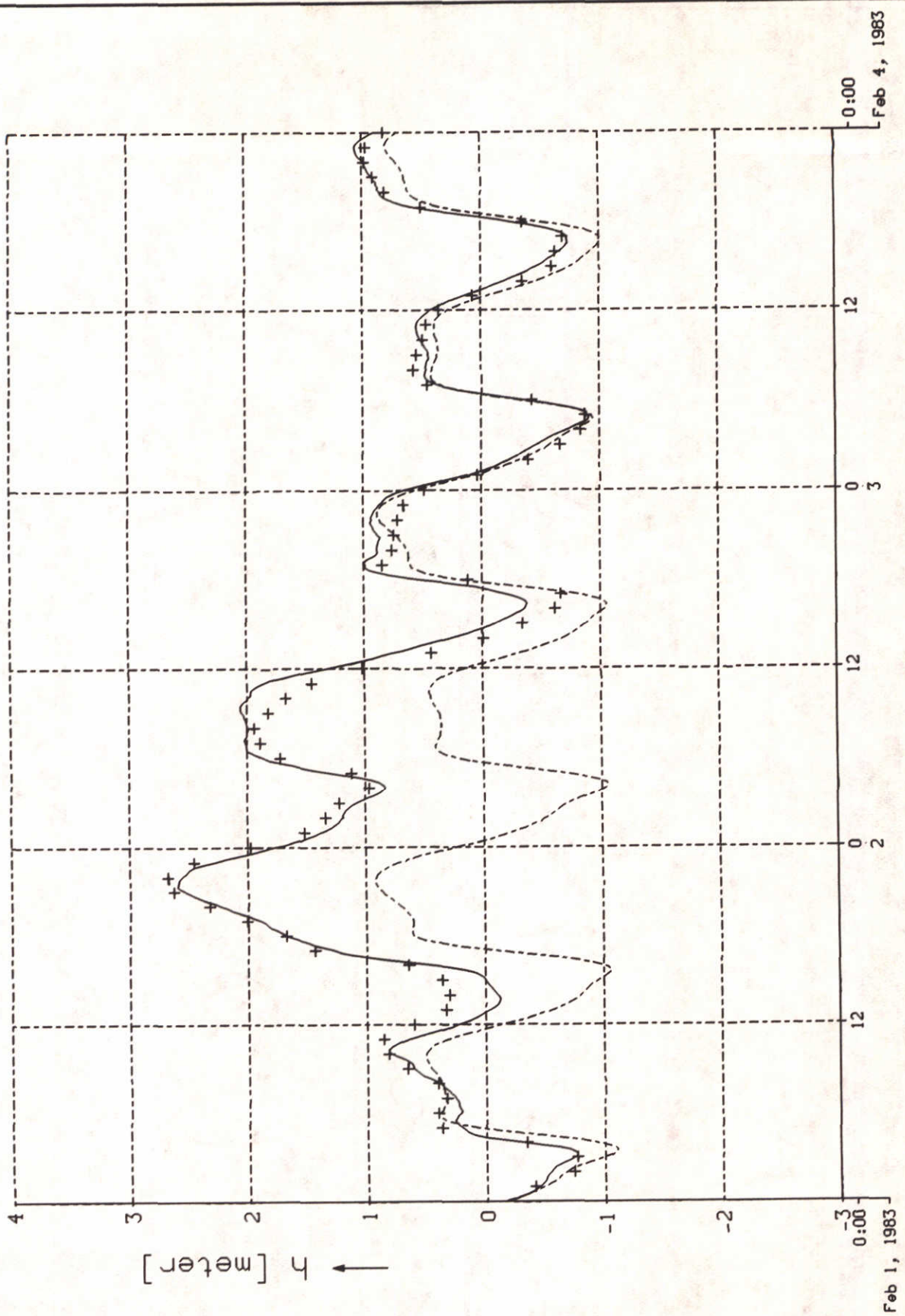
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.4.1



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Petten	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.4.2



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

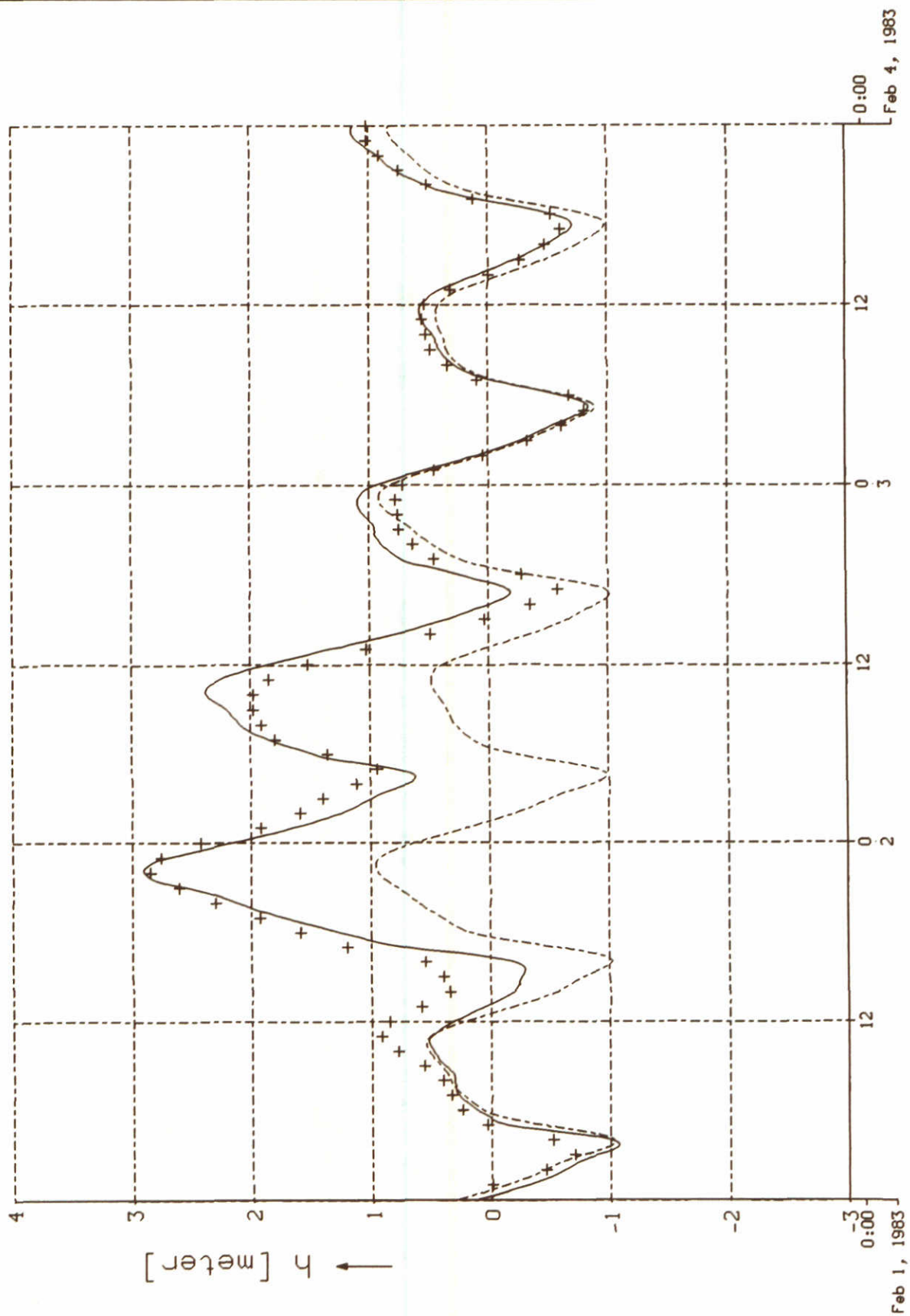
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Den Helder

ZUNOWAK

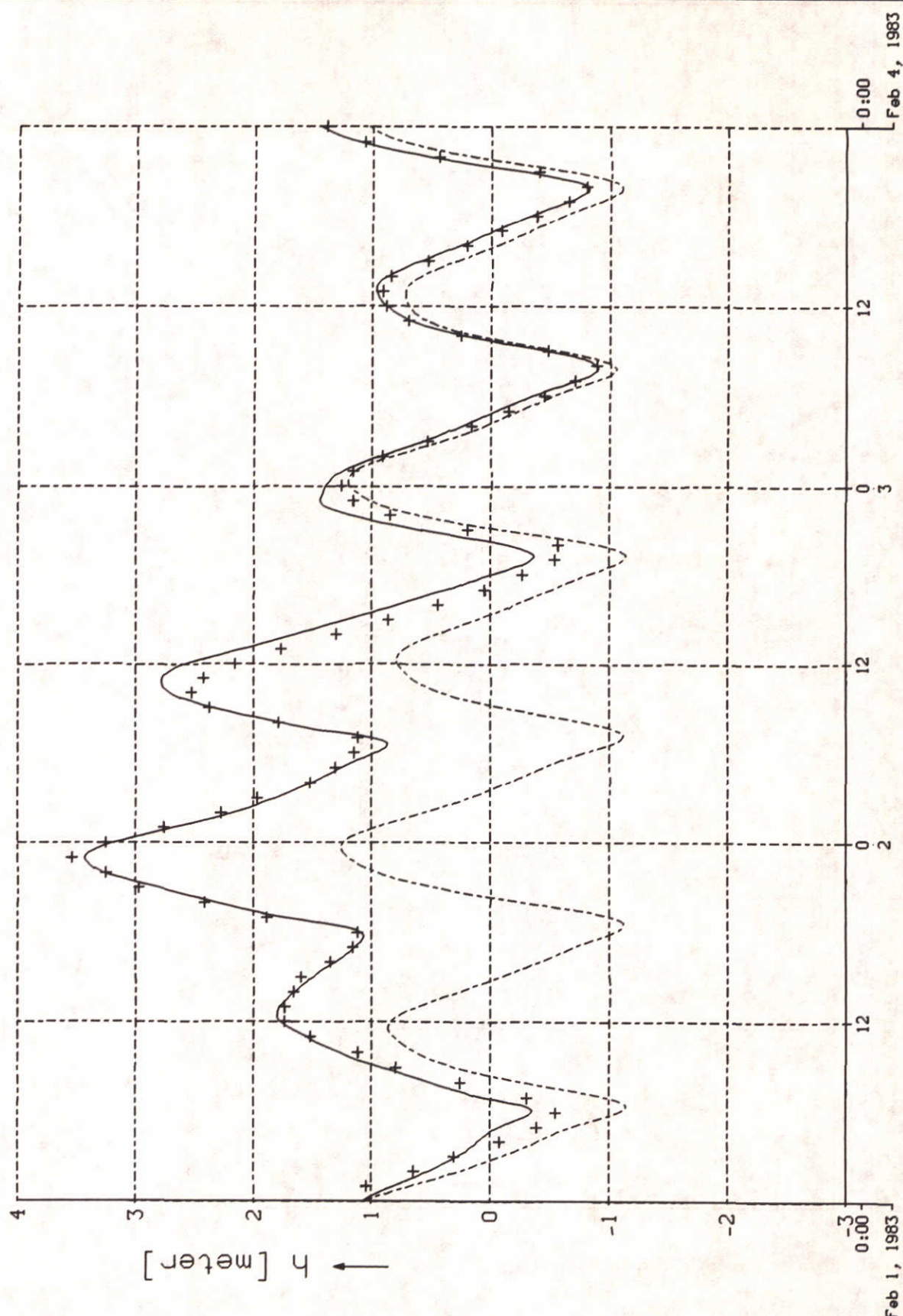
DELFT HYDRAULICS

Z-530

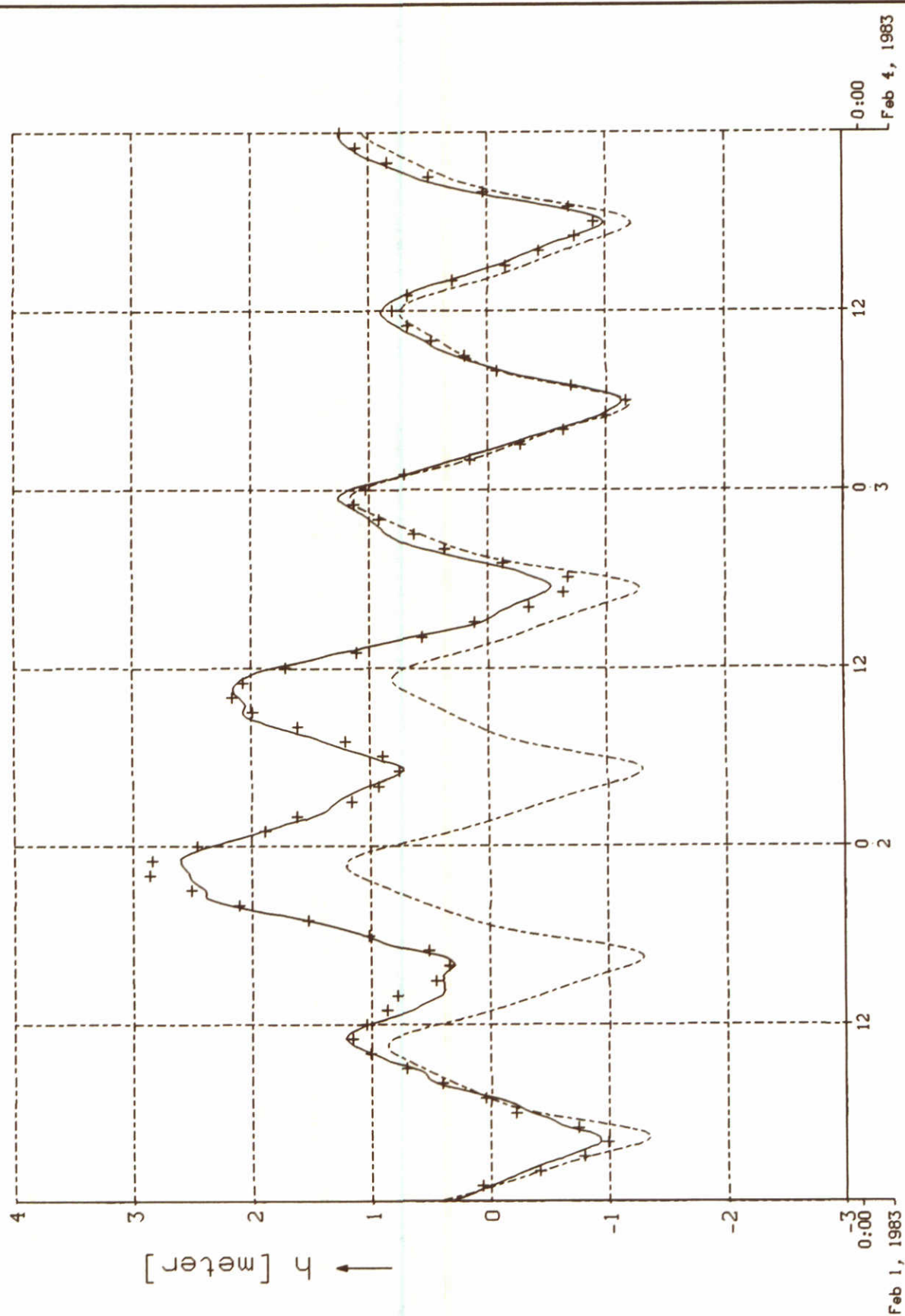
Fig. 4.3



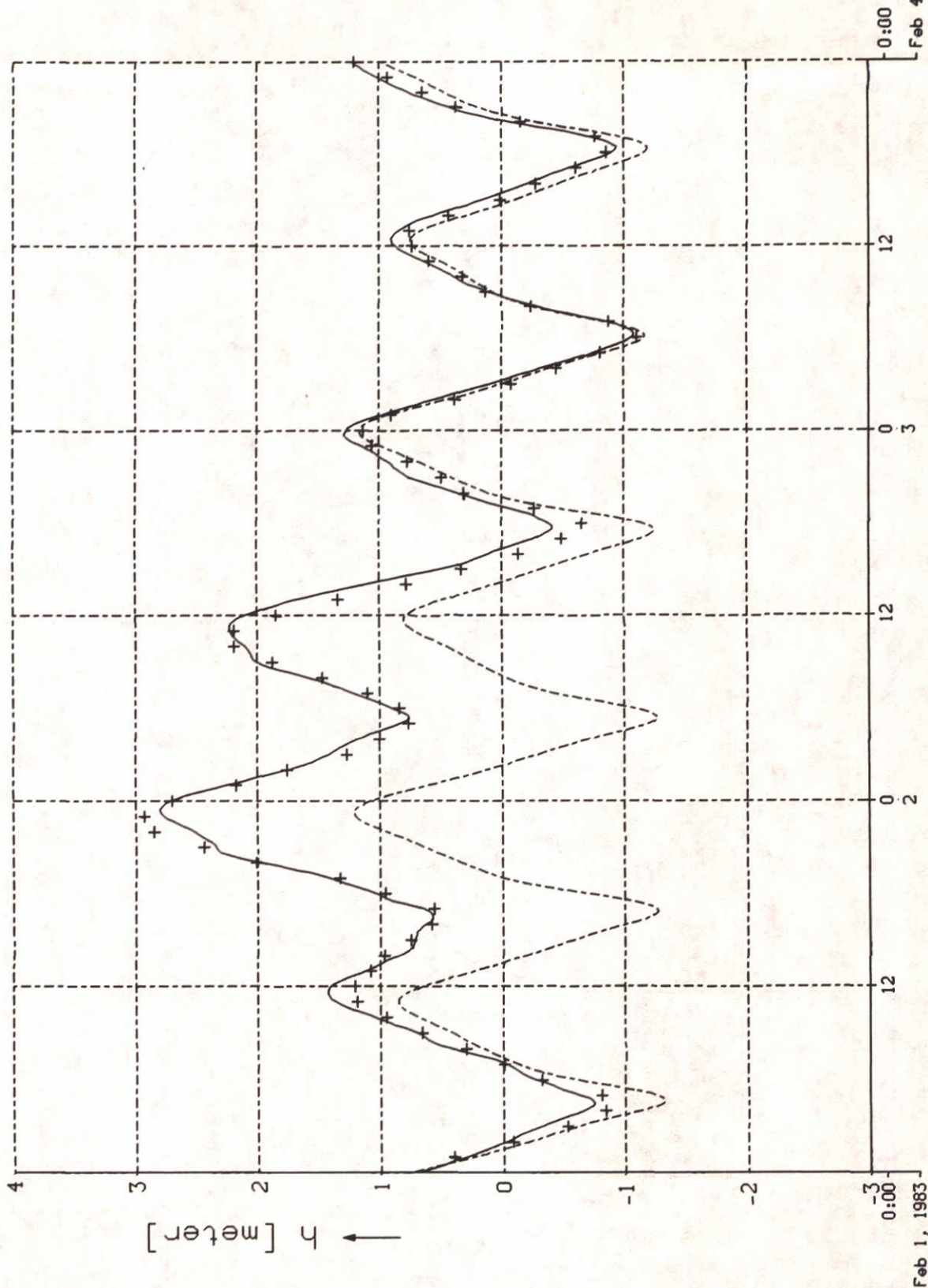
ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Oude Schild	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.4.4



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Harlingen	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.4.5



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Vlieland Haven	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.4.6



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983

feb.1983

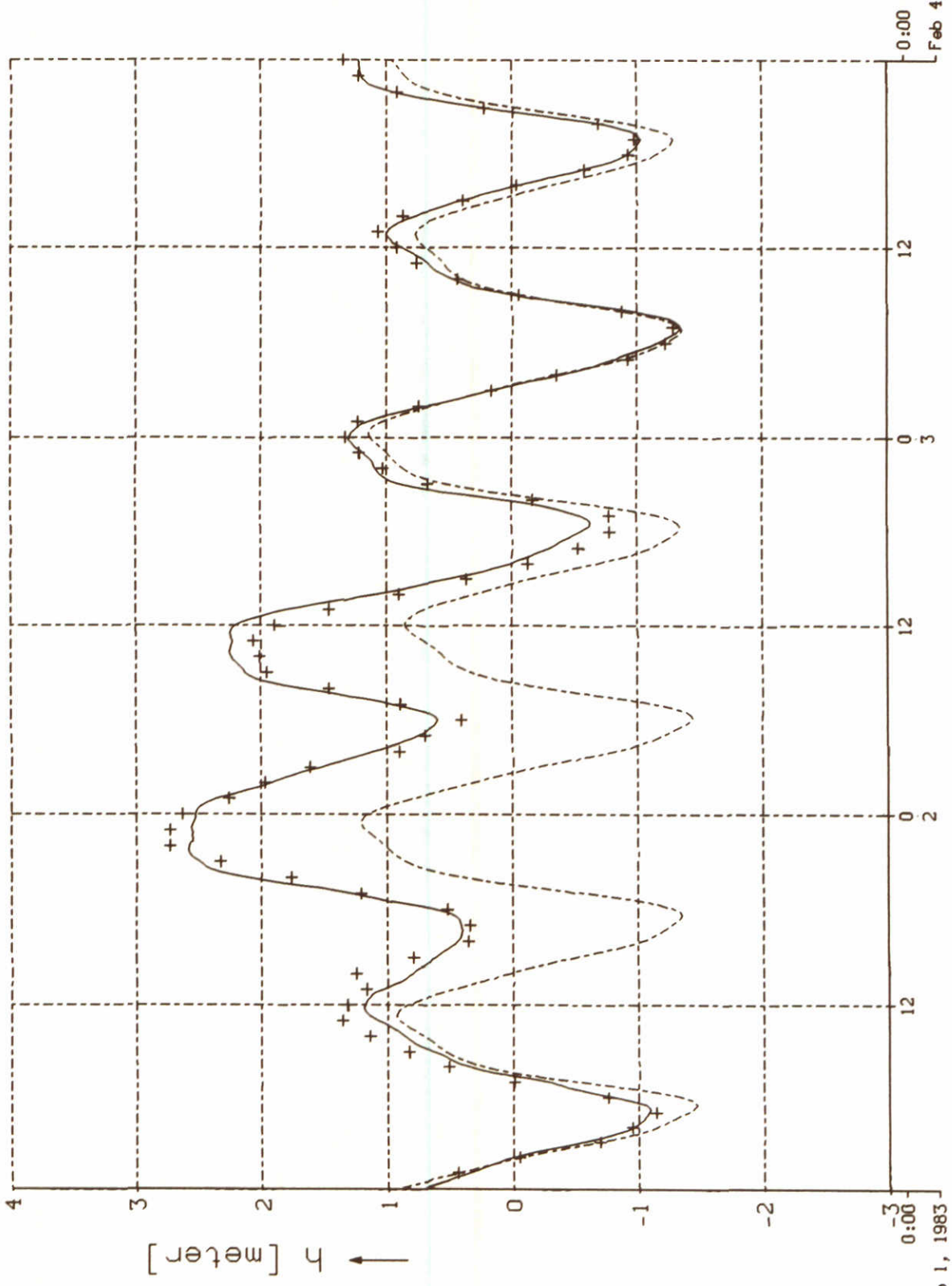
observations (+) and ZUNOWAK predict. at W. Terschelling

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

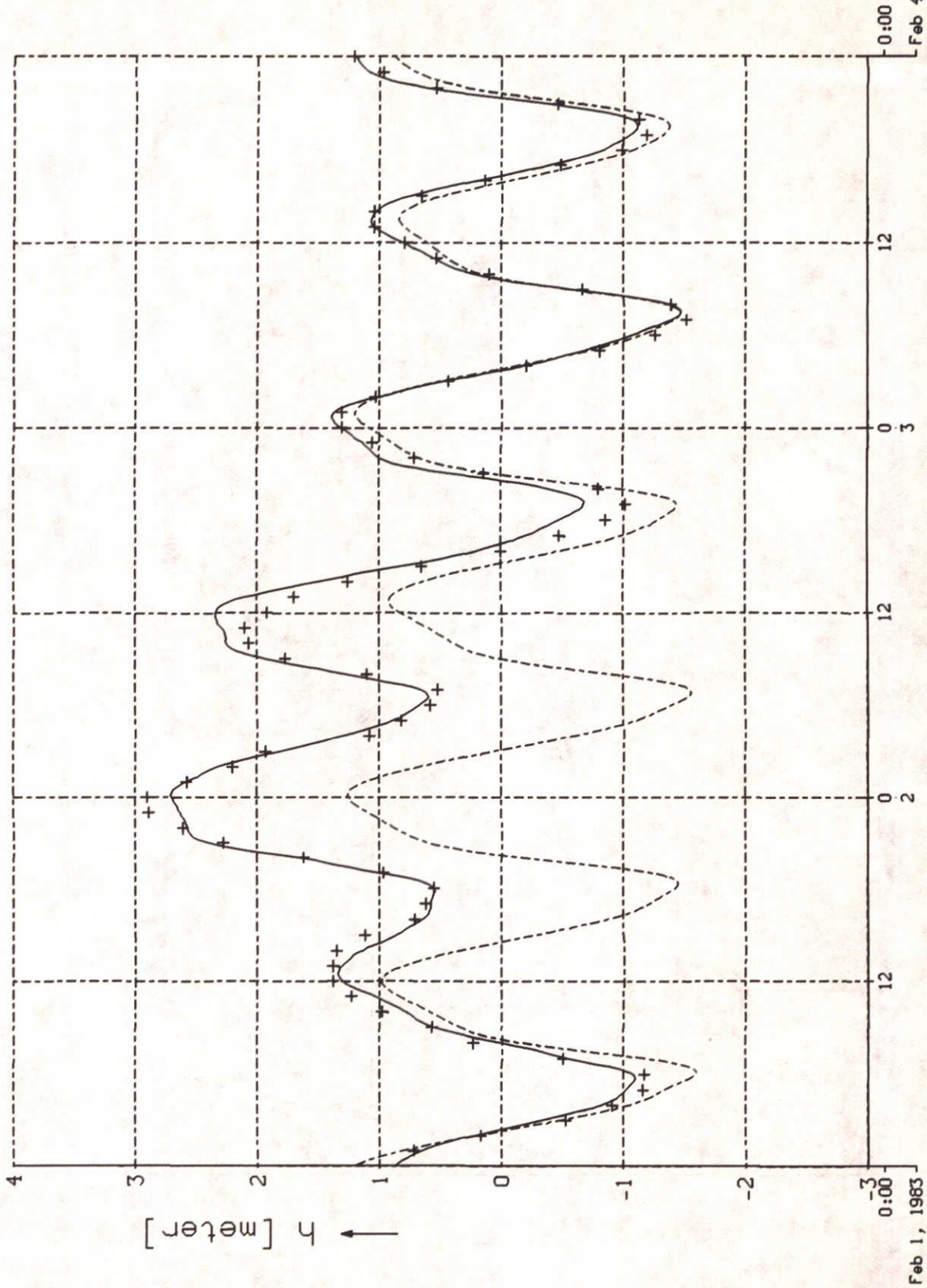
Z-530

Fig.4.7



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Wierumergronden	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.4.8





ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983

feb.1983

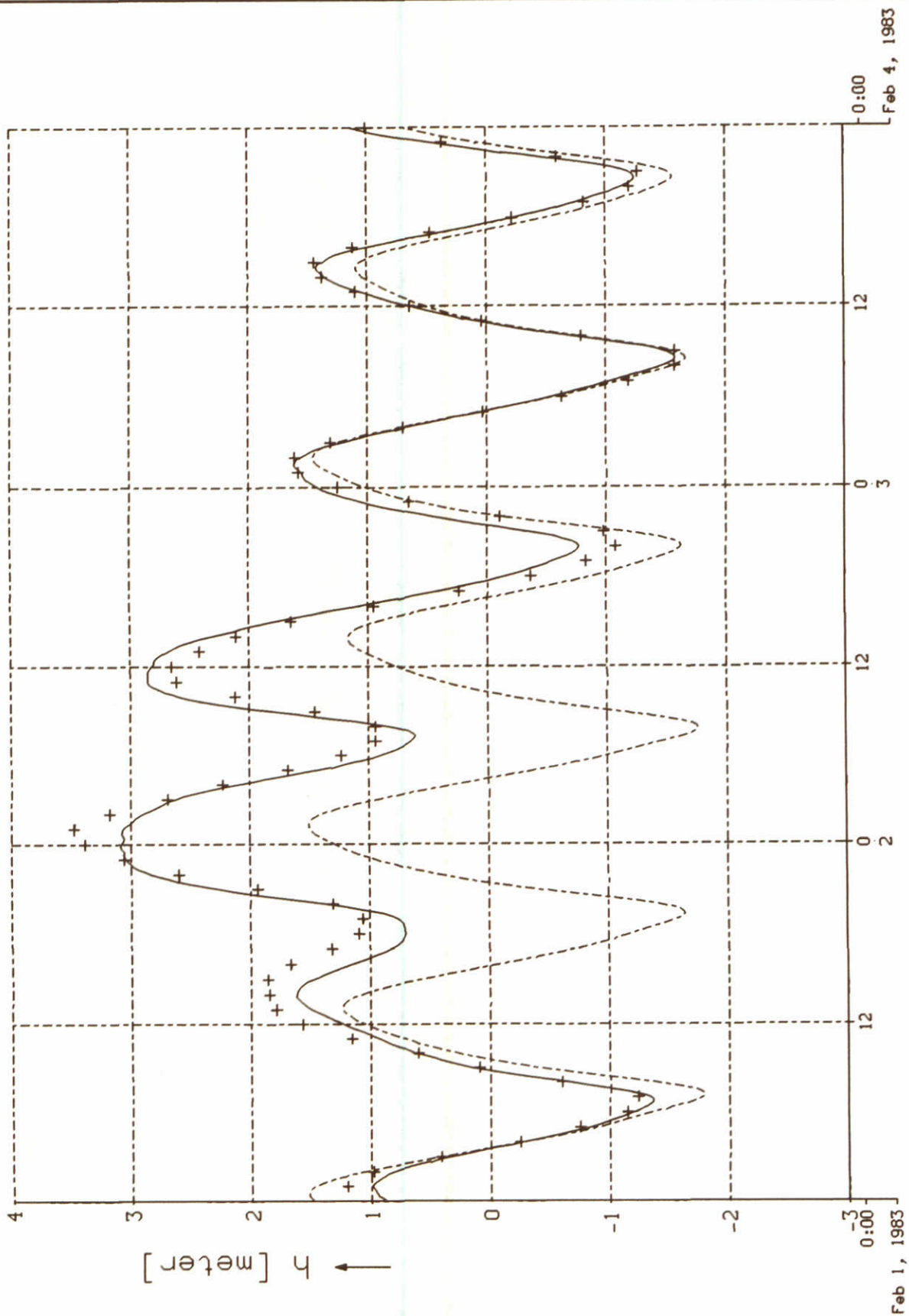
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Huibertgat

ZUNOWAK

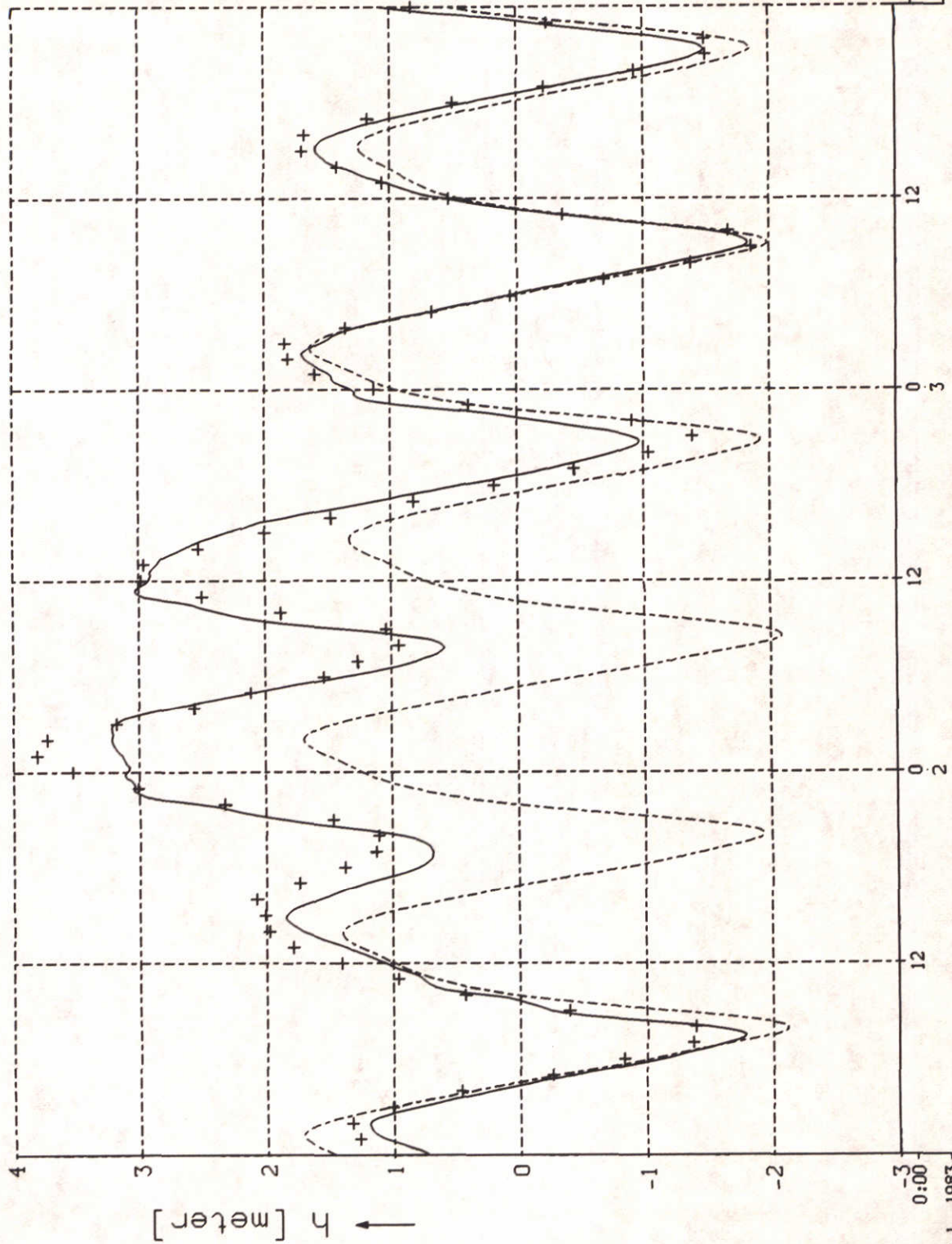
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.4.9



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Eemshaven	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.4.10



ZUNOWAK-Cd optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

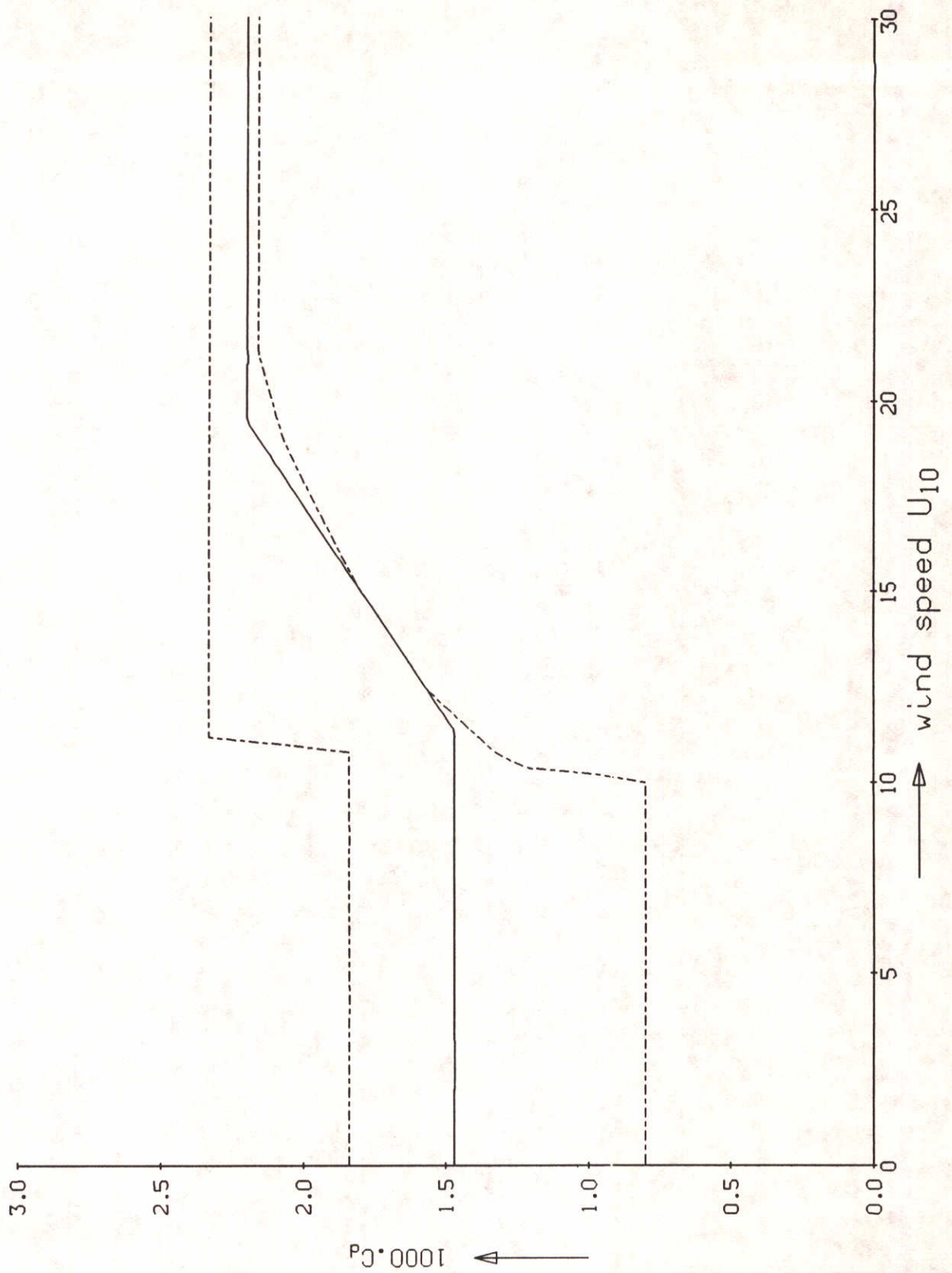
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Delfzijl

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 4.11



wind stress coefficient in ZUNOWAK mode  
 during february-1983-storm

ZUNOWAK

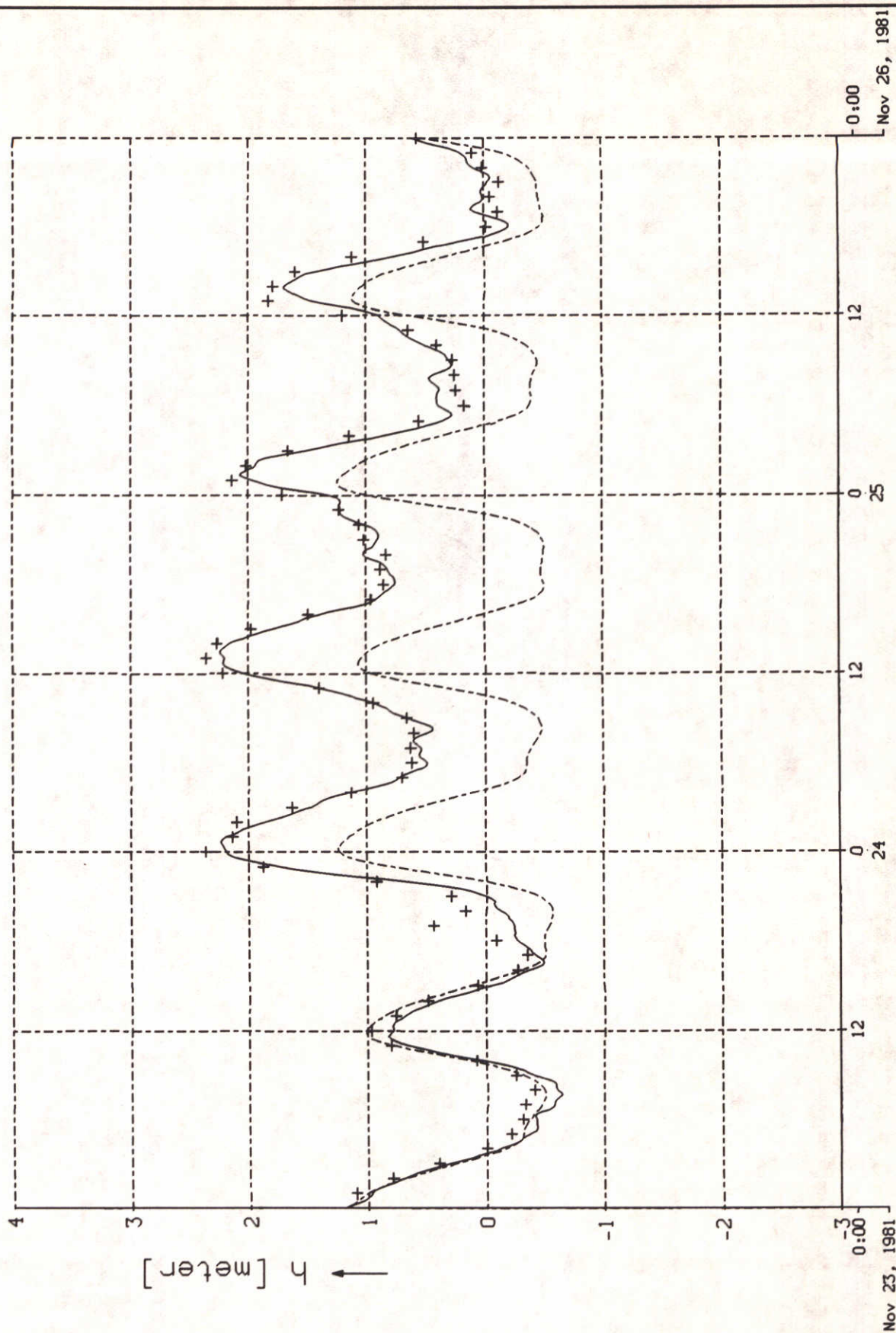
Z0530

A4

DELFT HYDRAULICS

5%

Fig.5



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

observations (+) and ZUNOWAK predict. at Hoek v. Holland

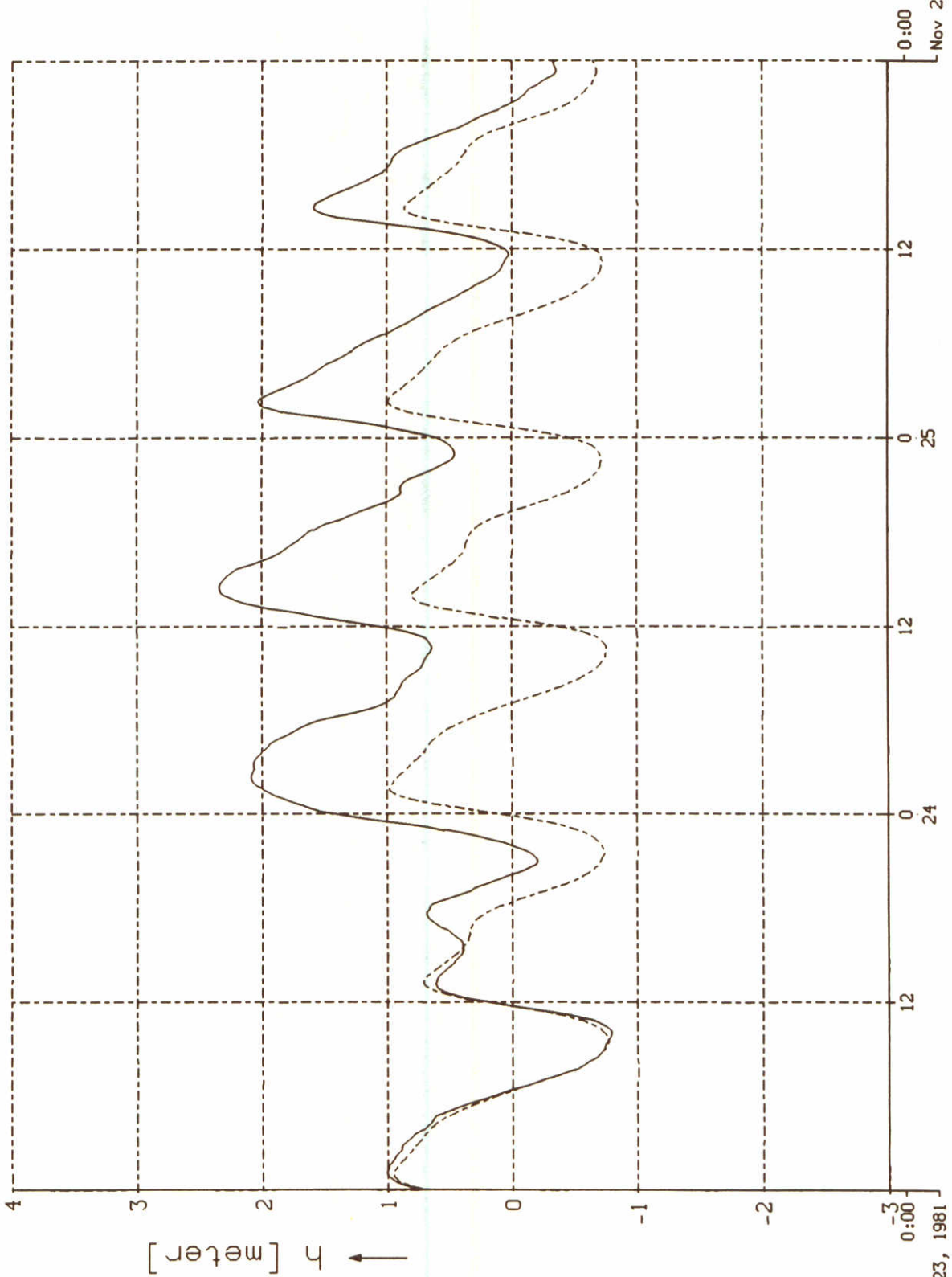
DELFT HYDRAULICS

ZUNOWAK

Z-530

nov.1981

Fig.6.1



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

observations (+) and ZUNOWAK predict. at Petten

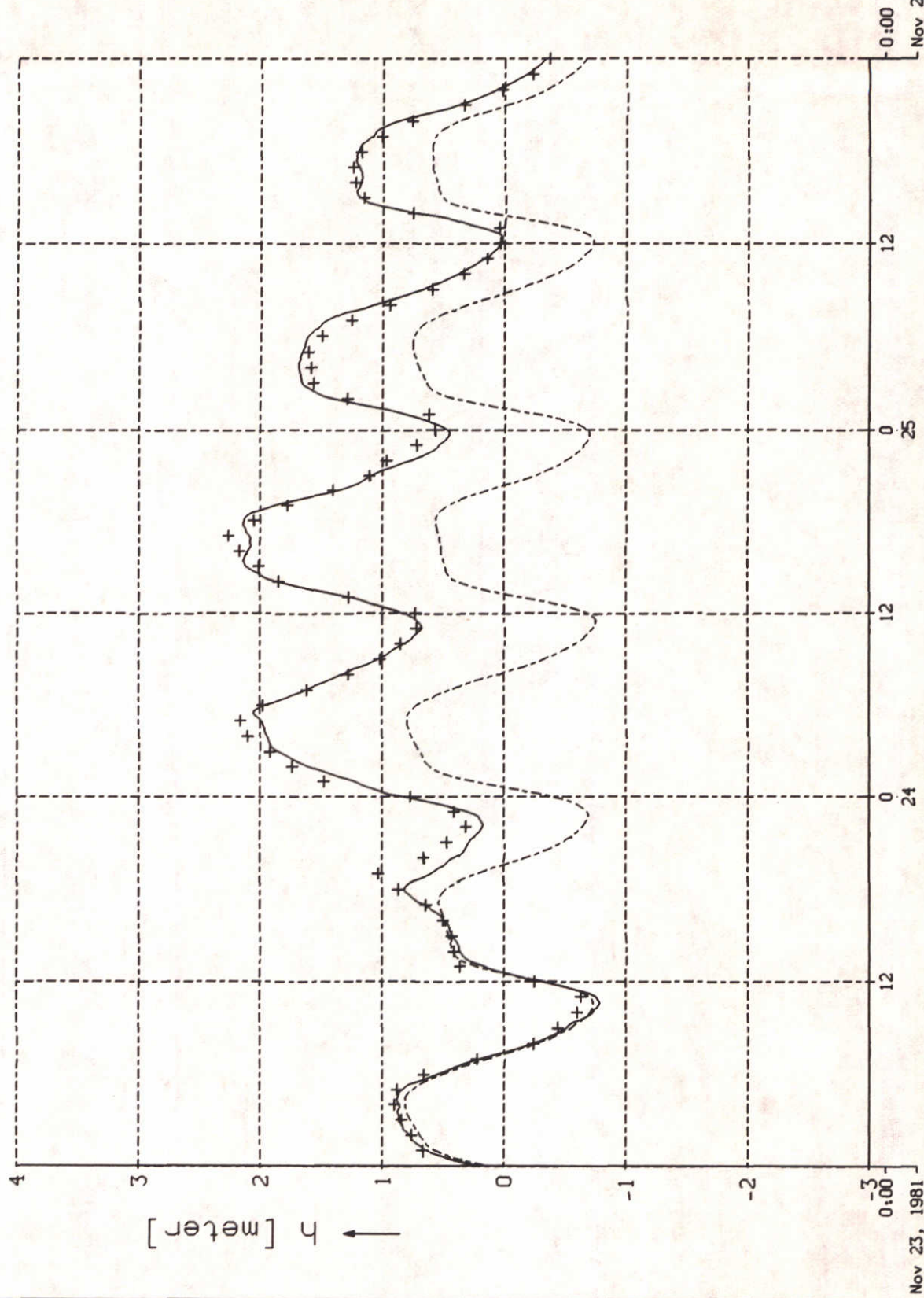
DELFT HYDRAULICS

nov.1981

ZUNOWAK

Z-530

Fig.6.2



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

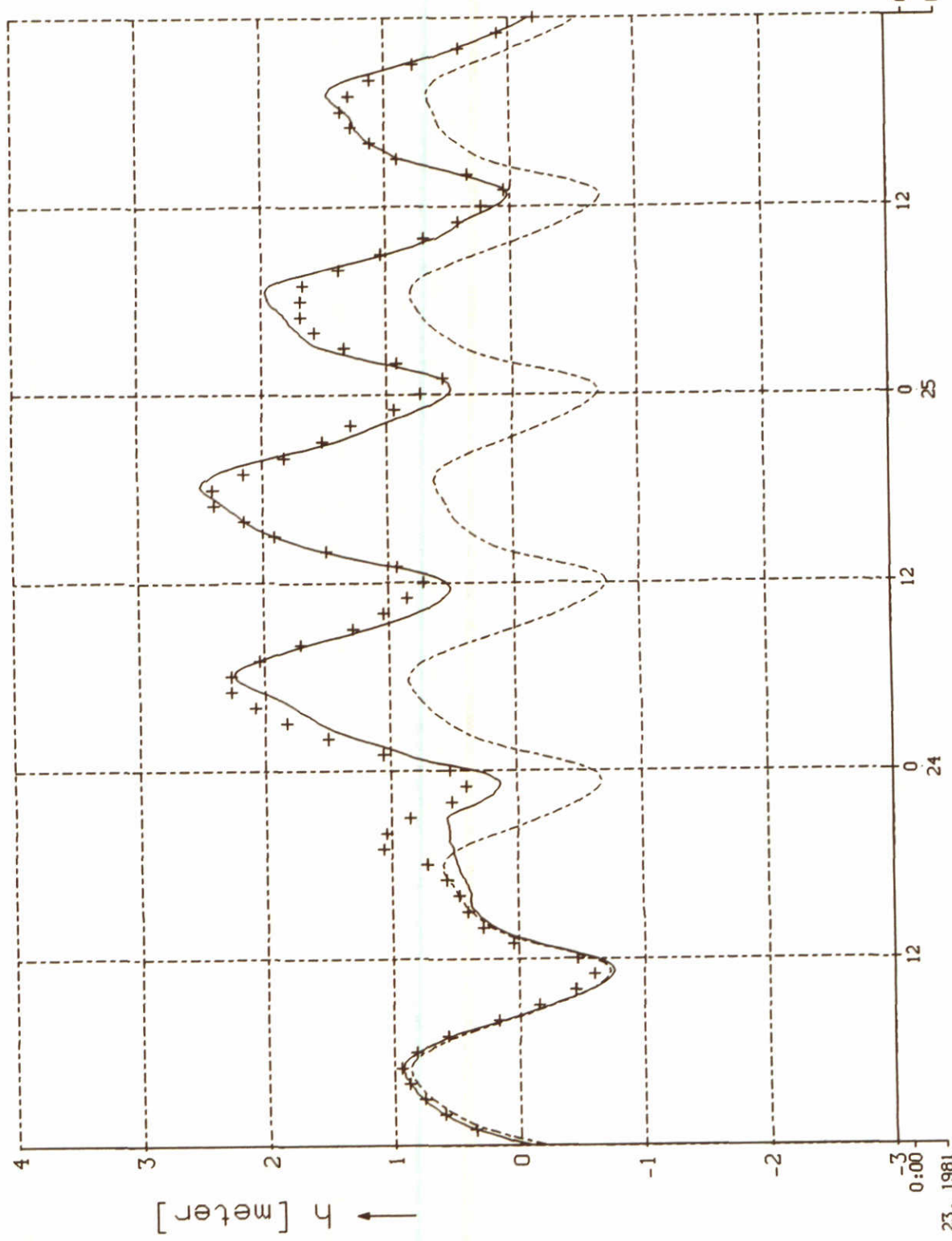
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Den Helder

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 6.3

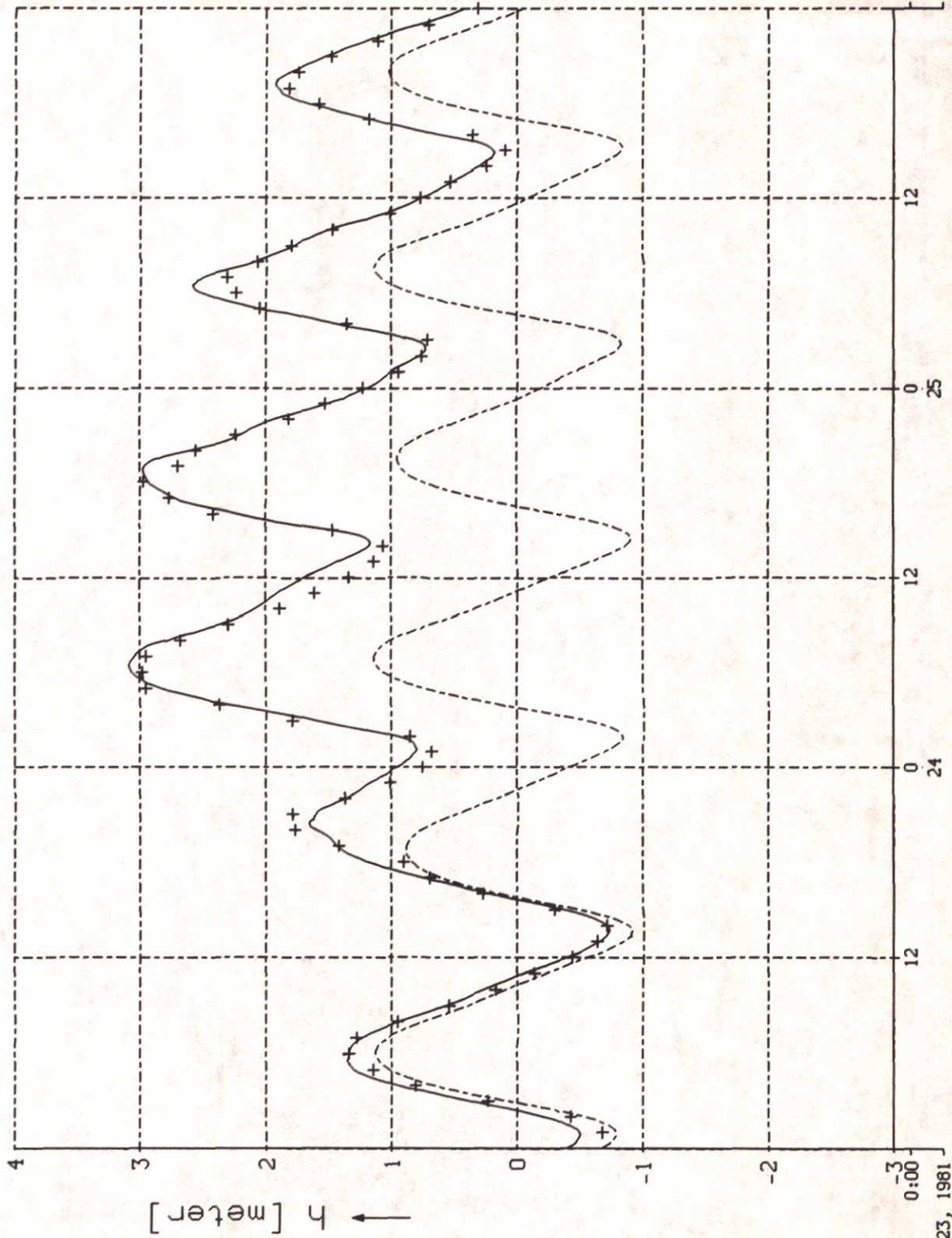


0:00  
Nov 26, 1981

0:00  
Nov 23, 1981

ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981		nov. 1981	
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Oude Schild		ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS		Z-530	Fig. 6.4





0:00  
Nov 26, 1981

0:00  
Nov 23, 1981

ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

nov.1981

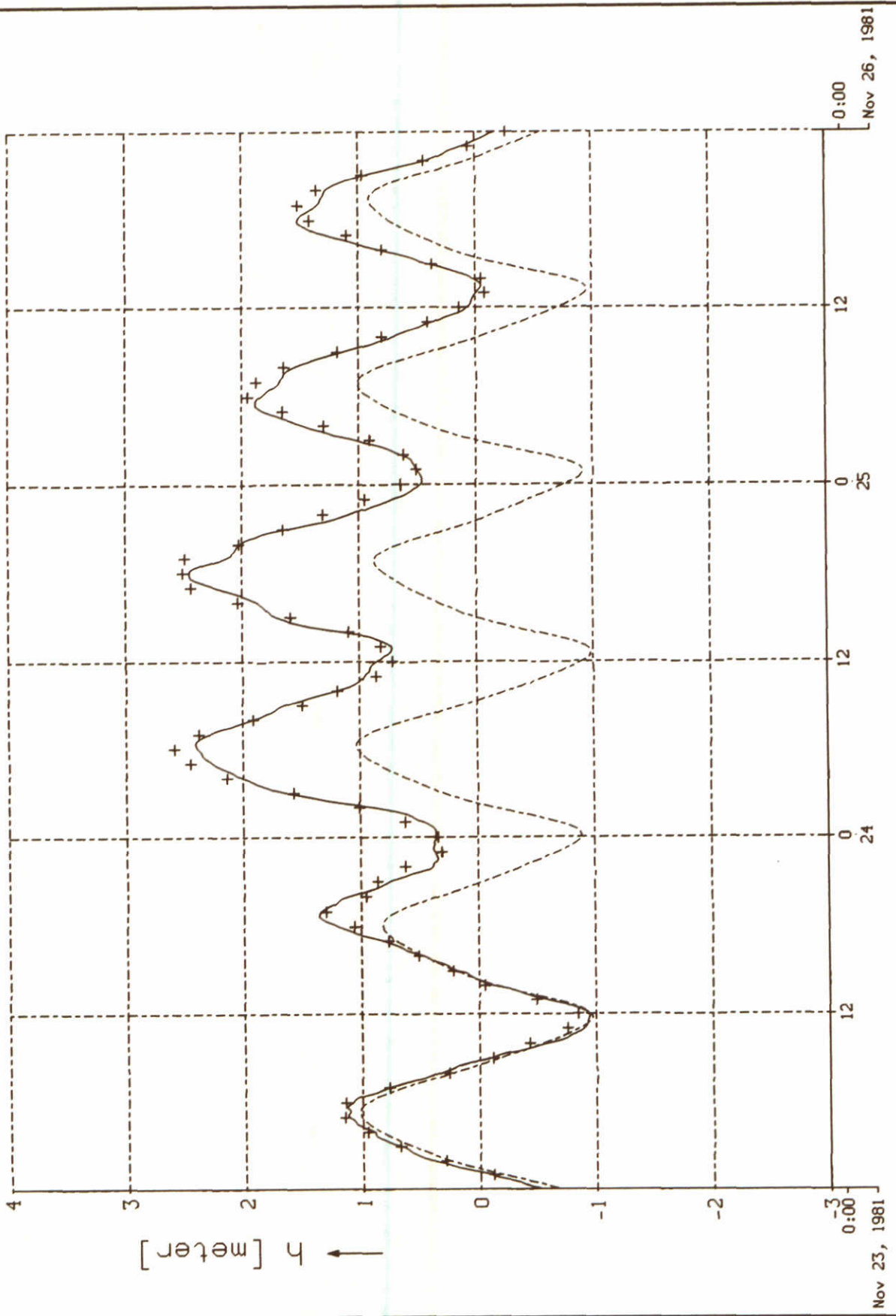
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Harlingen

ZUNOWAK

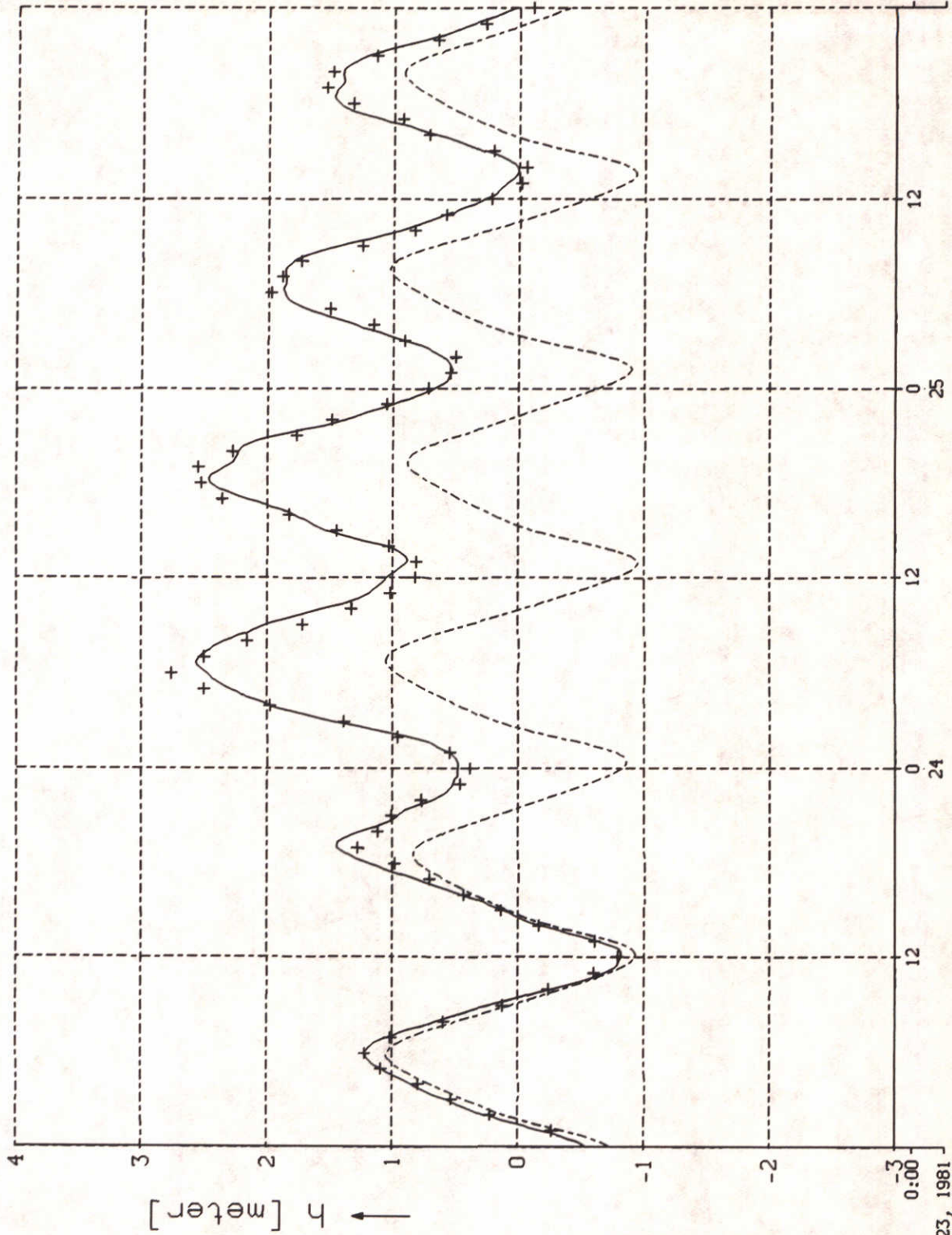
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.6.5



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981		nov.1981
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Vlieland Haven	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.6.6



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

observations (+) and ZUNOWAK predict. at W. Terschelling

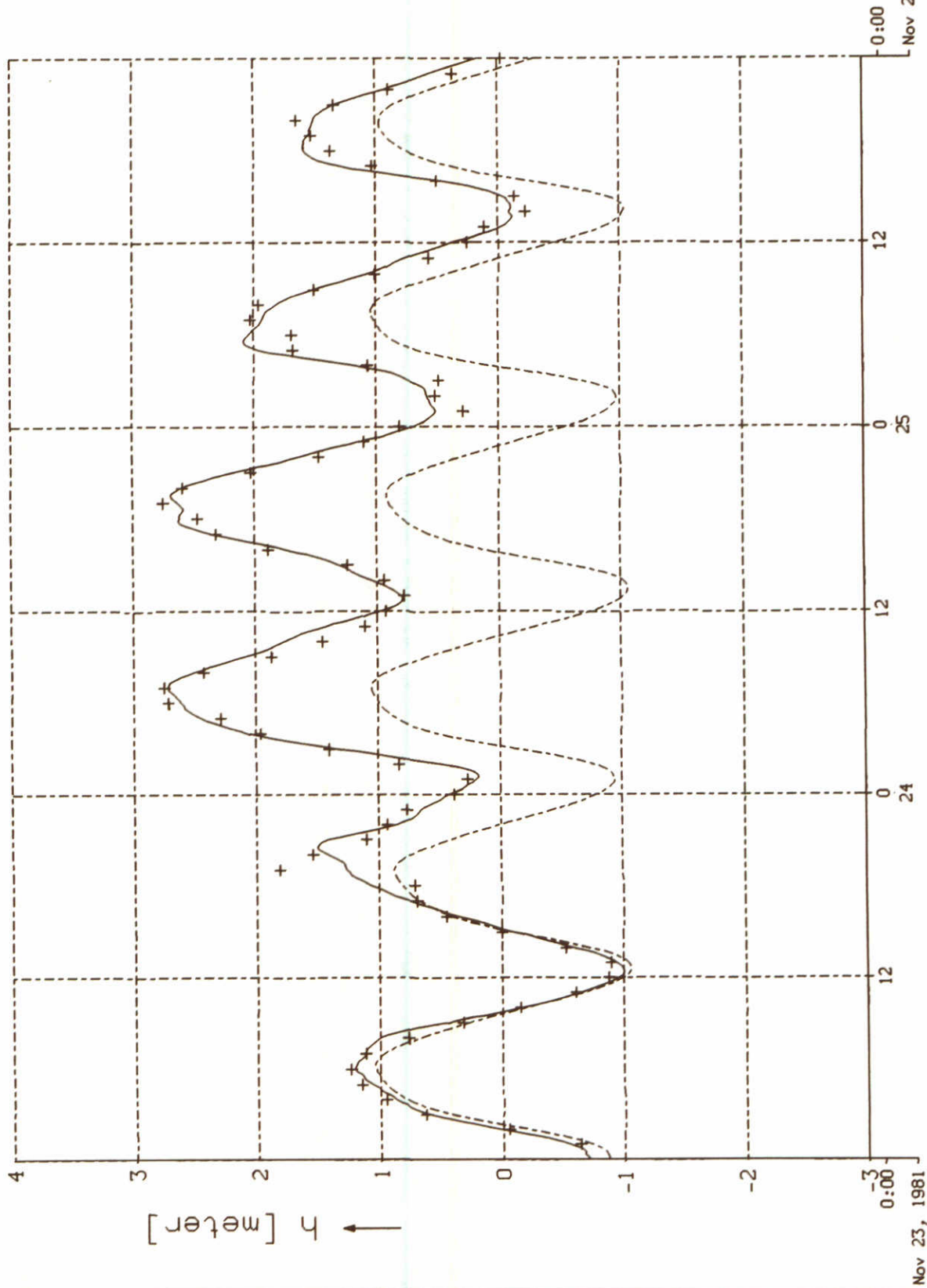
DELFT HYDRAULICS

ZUNOWAK

Z-530

nov.1981

Fig.6.7



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

observations (+) and ZUNOWAK predict. at Wierumergronden

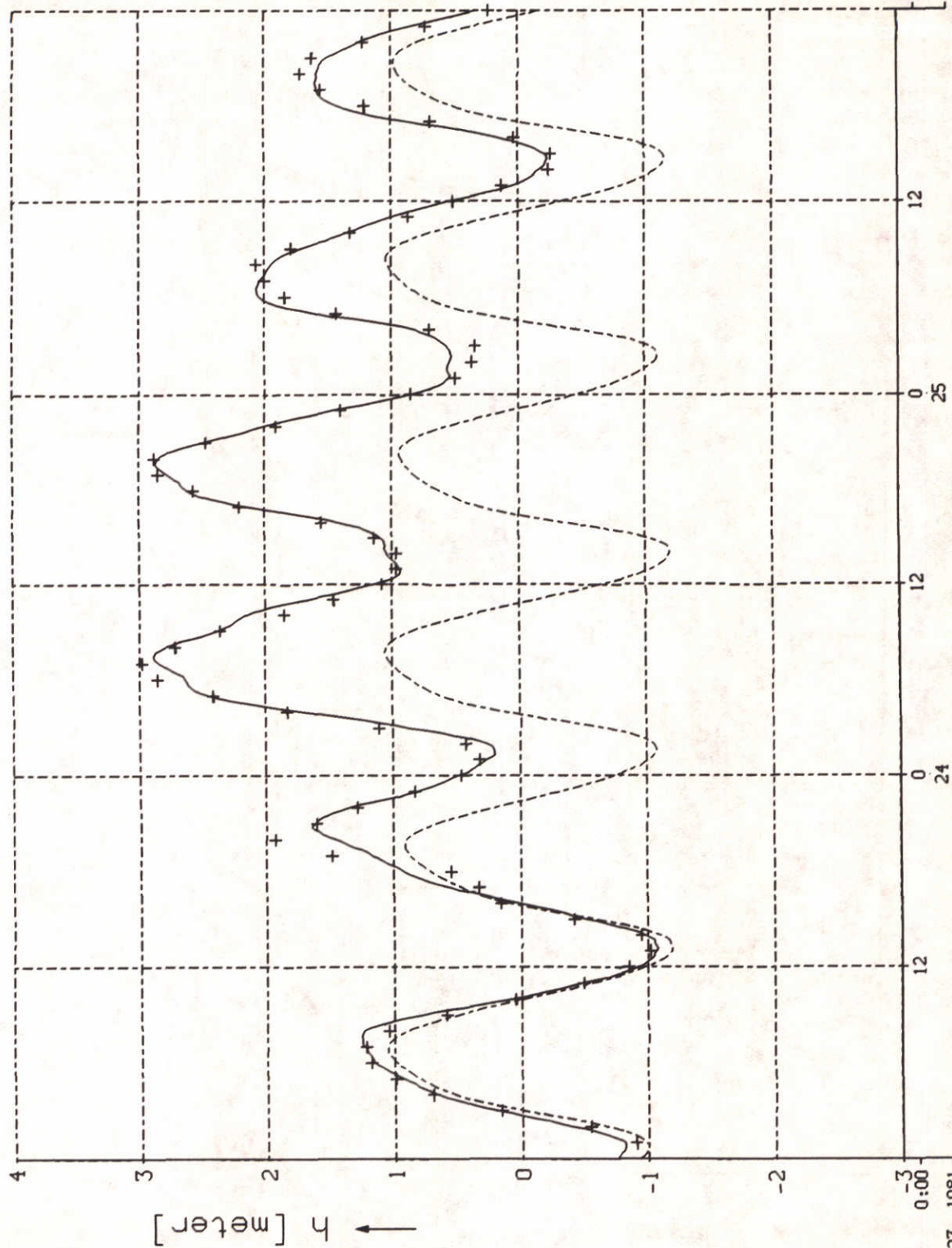
DELFT HYDRAULICS

nov.1981

ZUNOWAK

Z-530

Fig.6.8



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

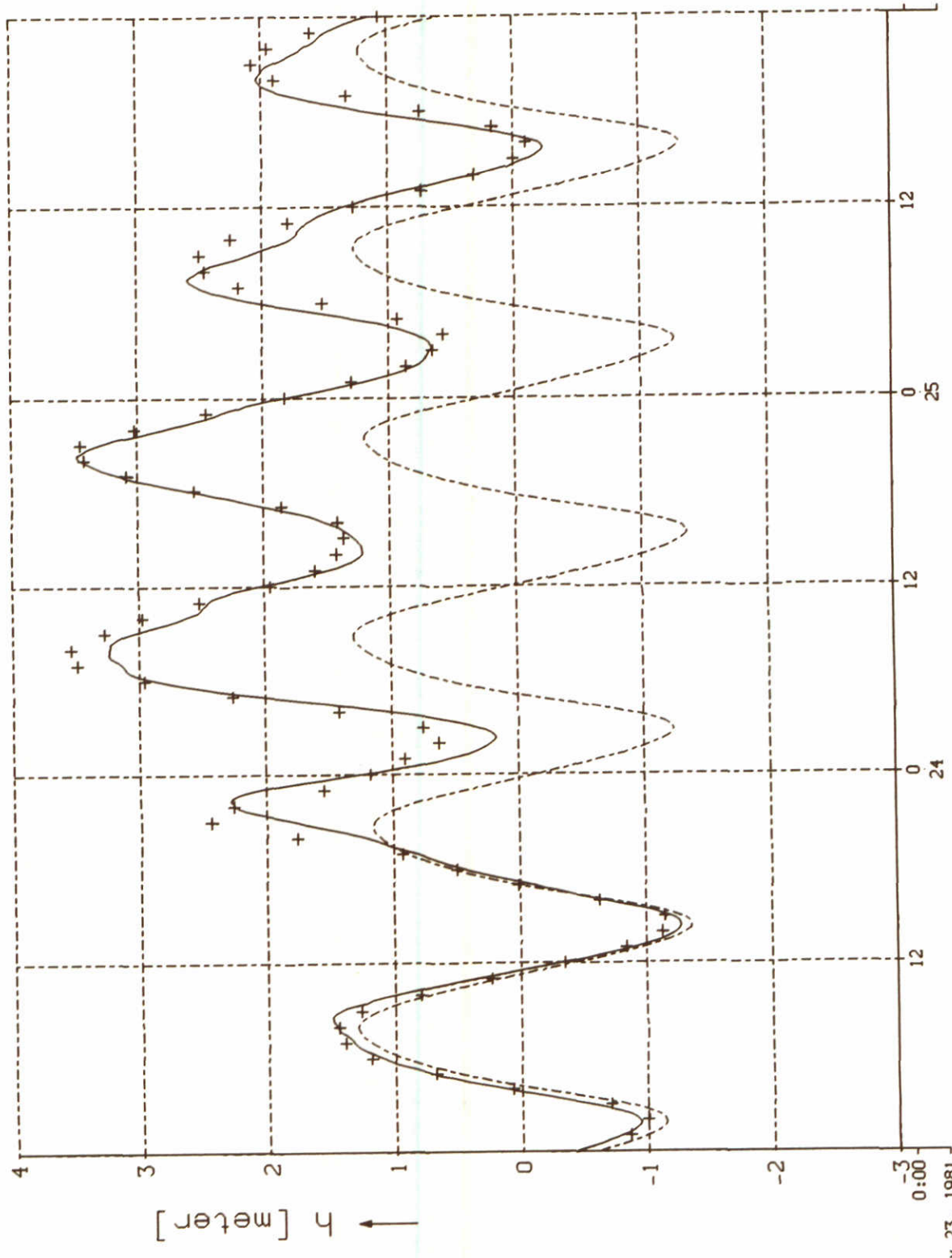
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Huibertgat

ZUNOWAK

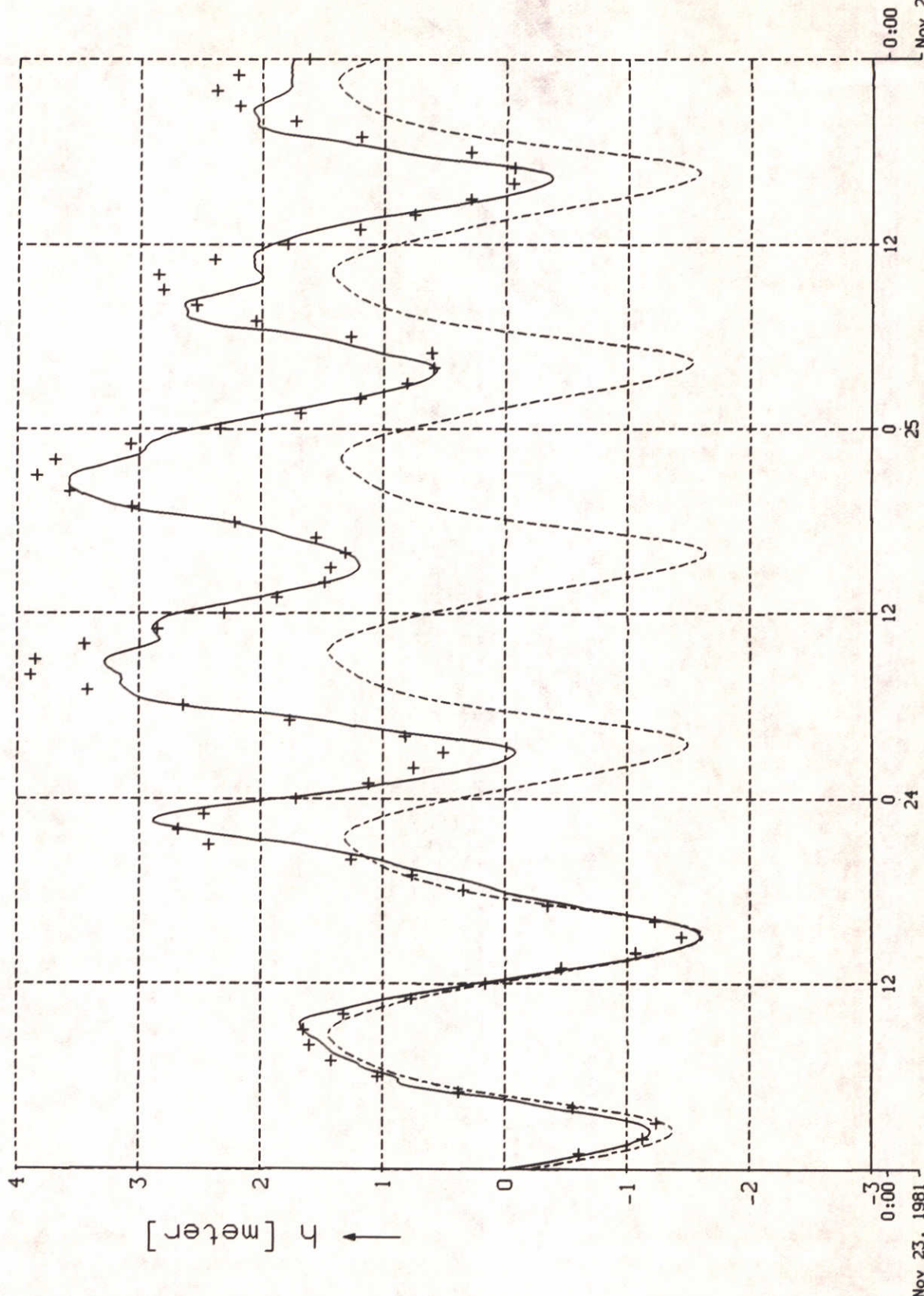
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 6.9



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981		nov.1981
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Eemshaven	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.6.10



ZUNOWAK-Cd optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

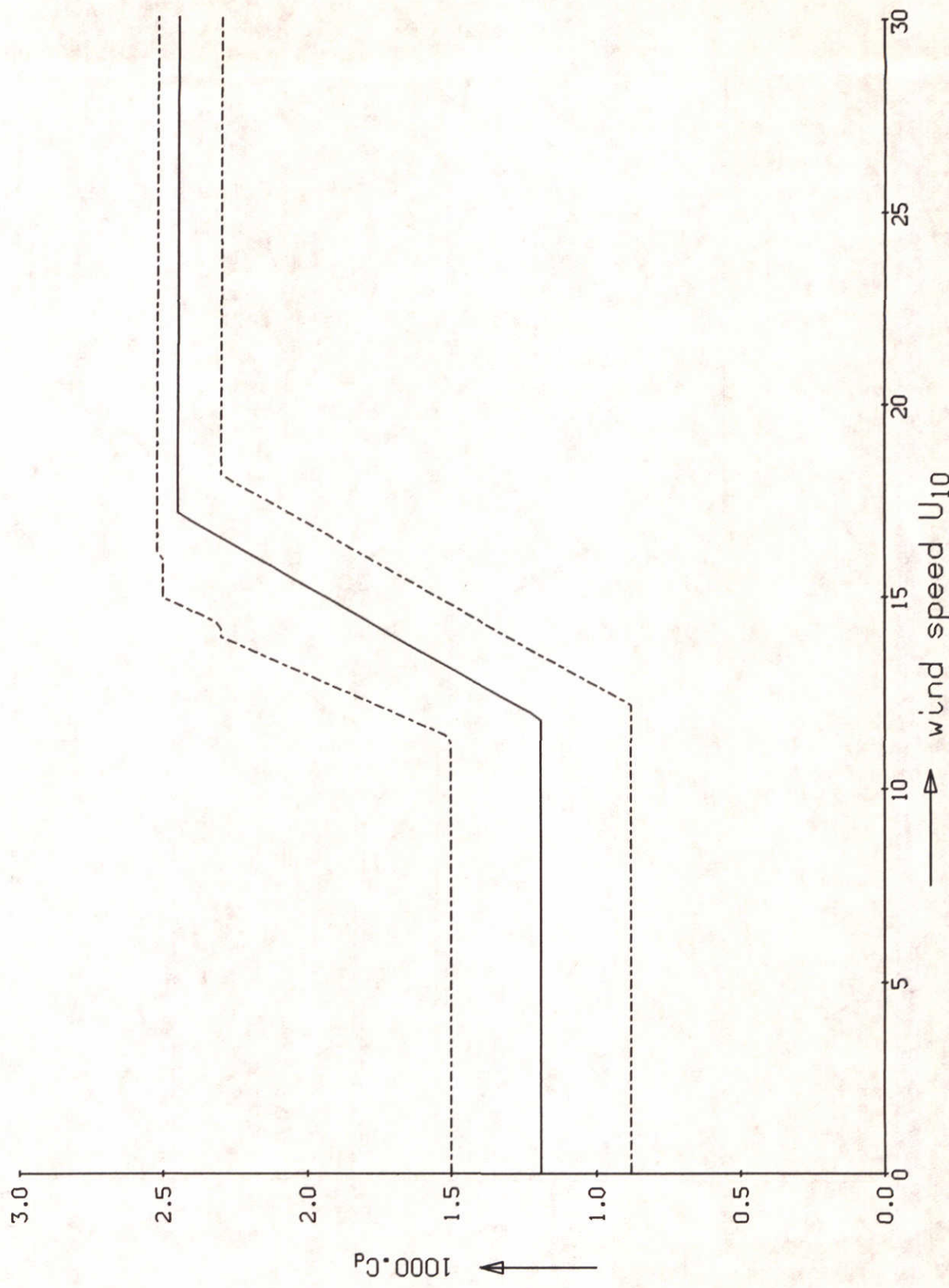
observations (+) and ZUNOWAK predict. at Delfzijl

ZUNOWAK

DELFT HYDRAULICS

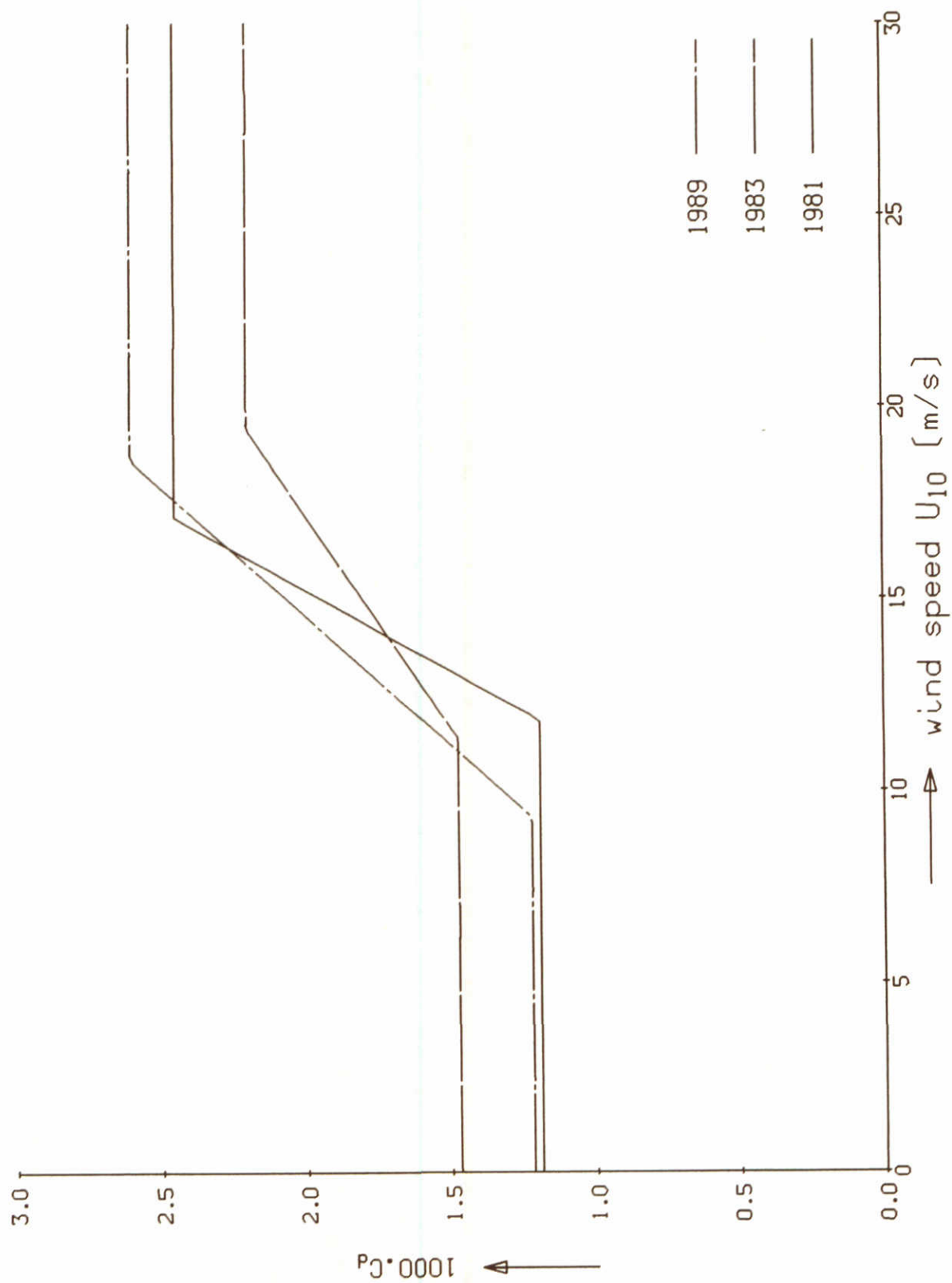
Z-530

Fig. 6.11

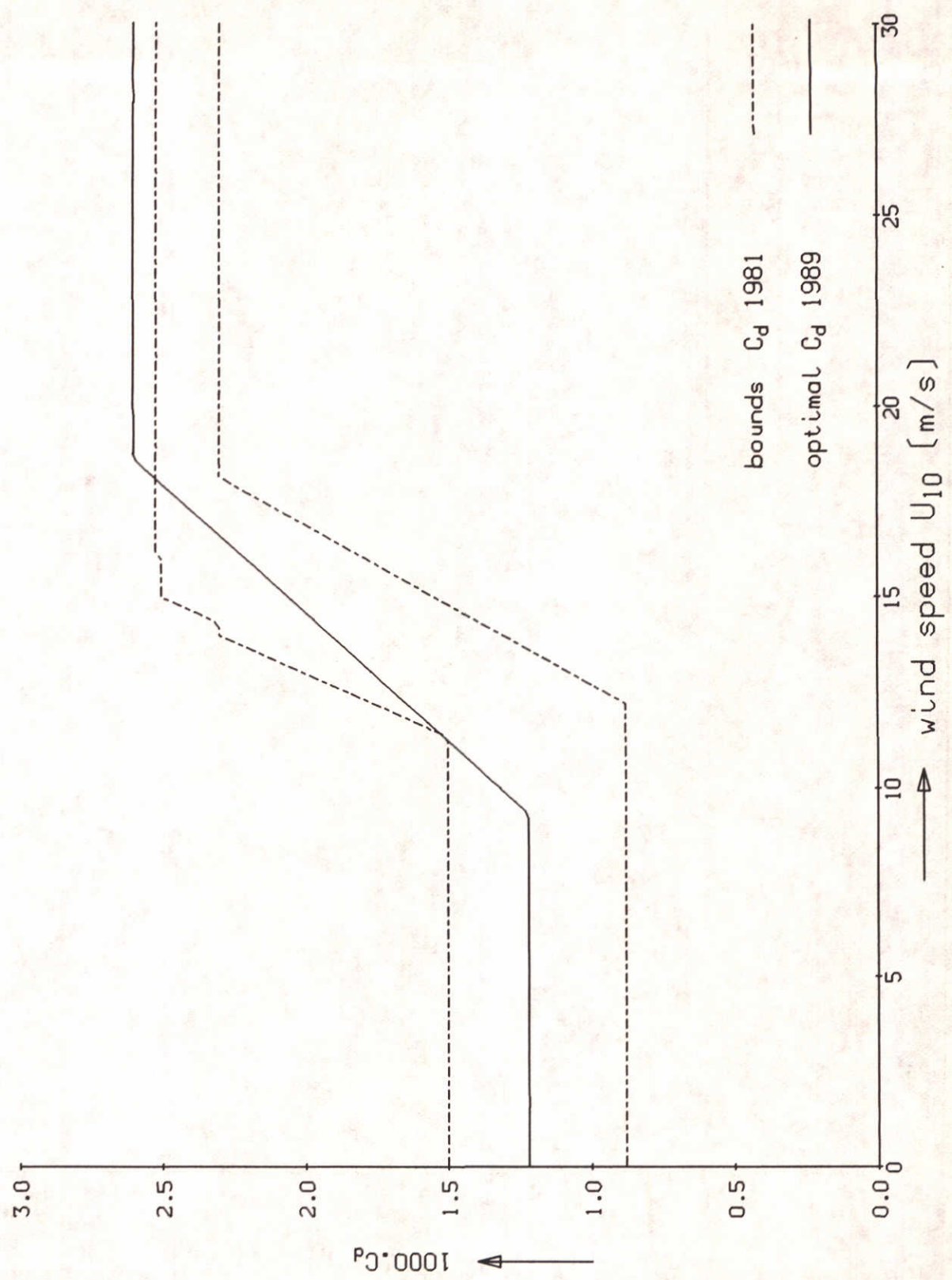


wind stress coefficient in ZUNOWAK model during november-1981-storm	ZUNOWAK	
	Z0530	A4
DELFT HYDRAULICS	5%	Fig.7

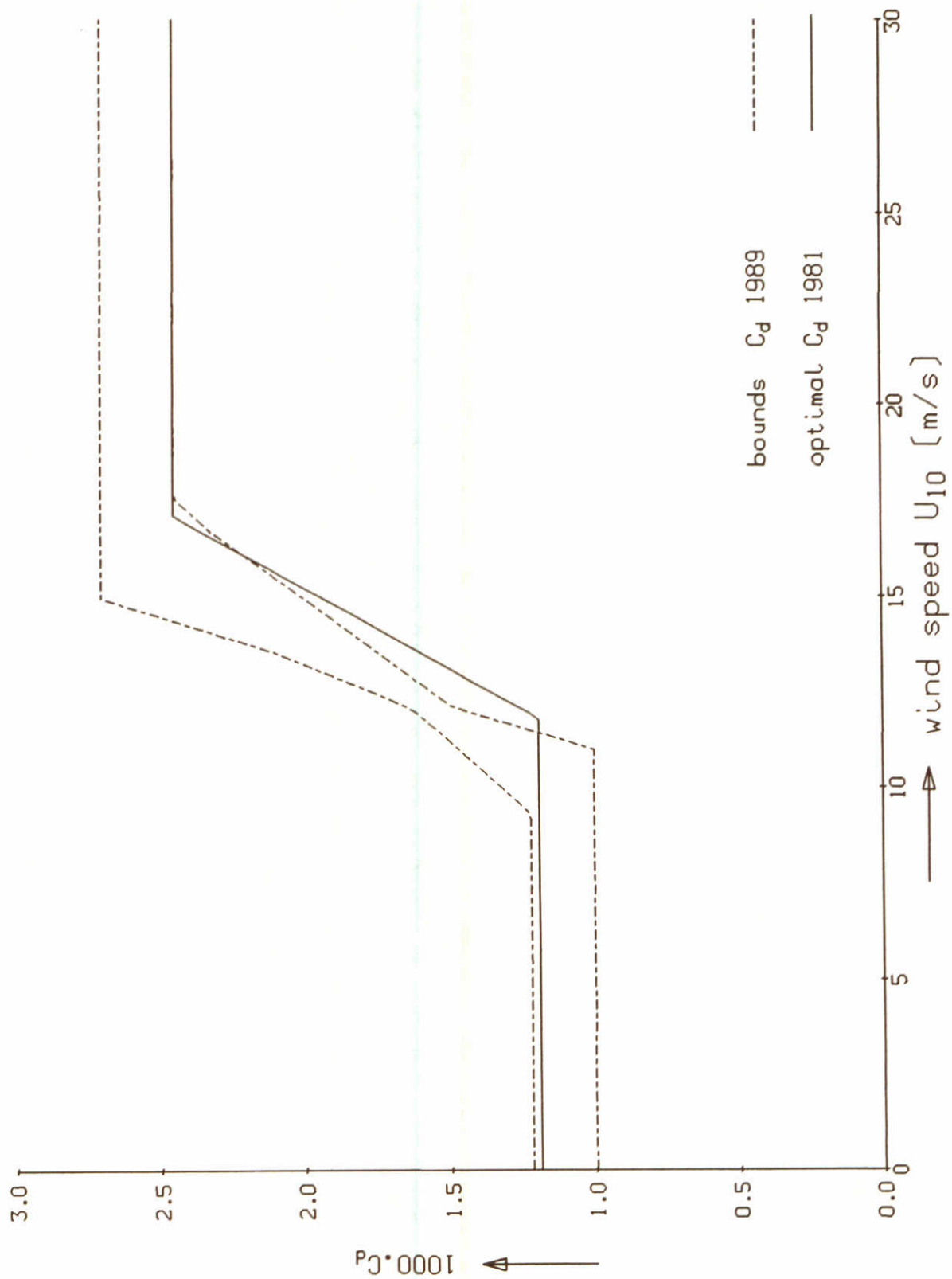




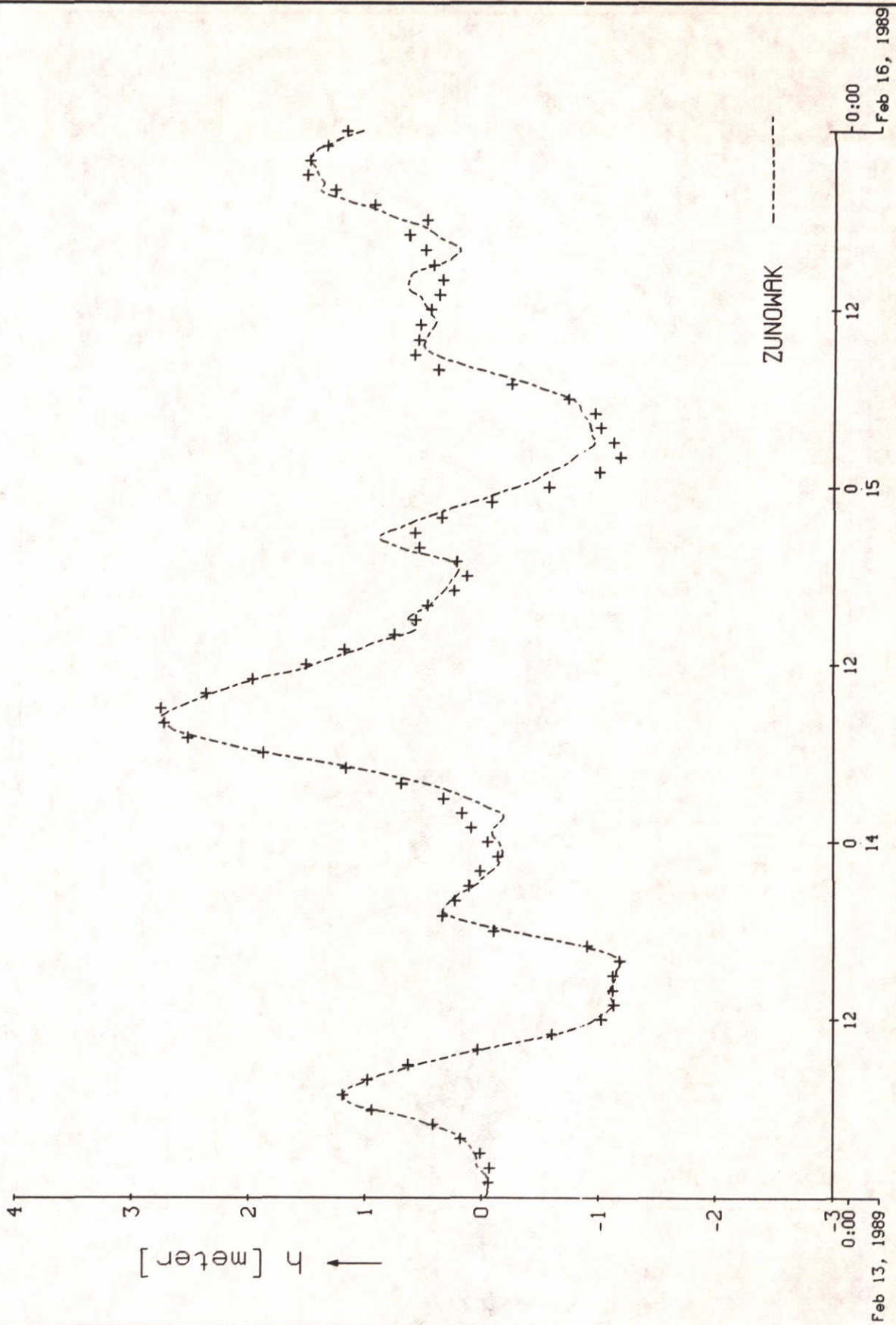
wind stress coefficient in ZUNOWAK-model		'81/'83/'89
$C_d$ of '81, '83 and '89 storm	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.8



wind stress coefficient in ZUNOWAK-model	5%	81, 89
$C_d$ 's of 1981 and 1989 storm	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.9



wind stress coefficient in ZUNOWAK-model $C_d$ 's of 1981 and 1989 storm	5%	81, 89
	ZUNOWAK	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.10



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

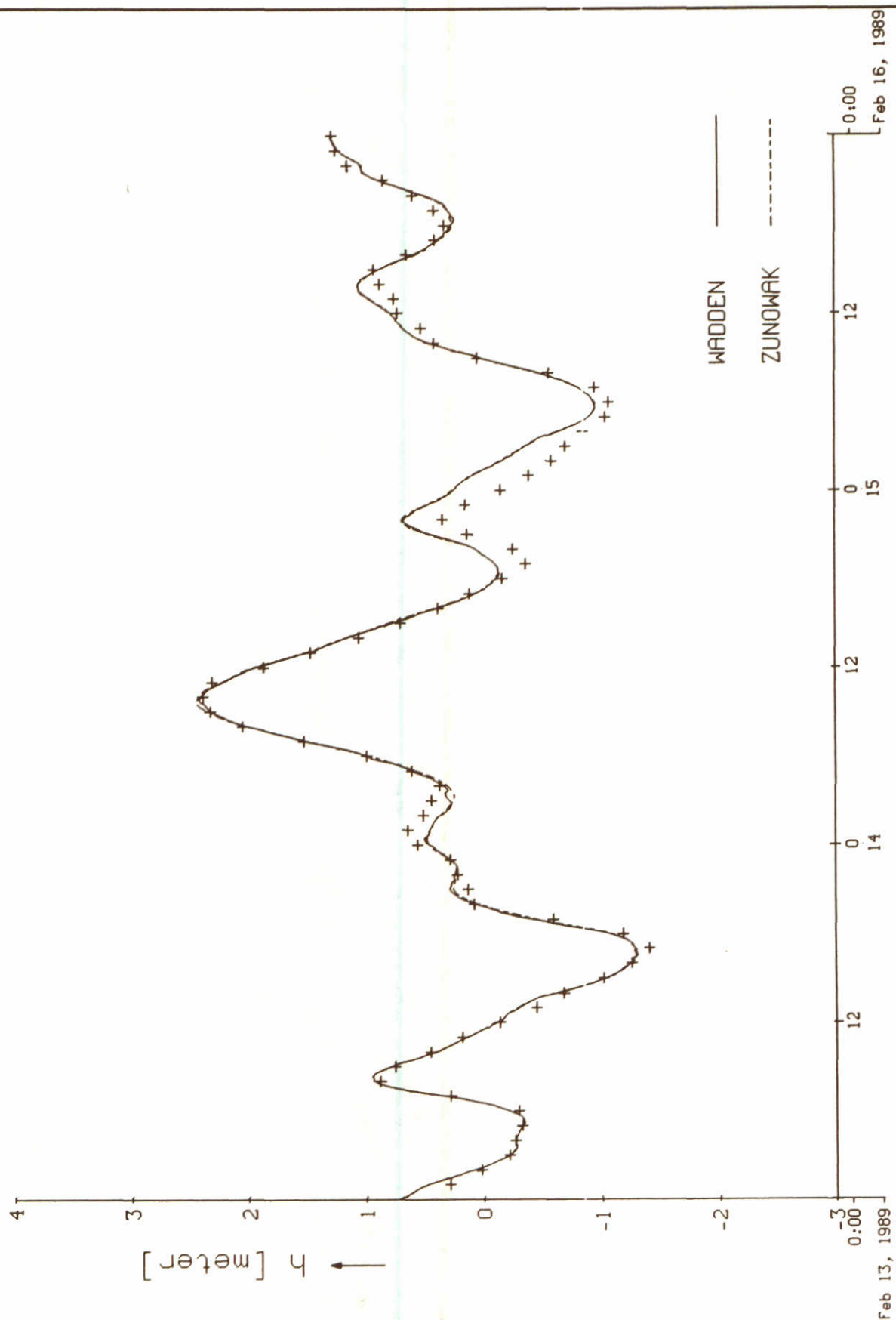
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Hoek v. Holland

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 11.1



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb.1989

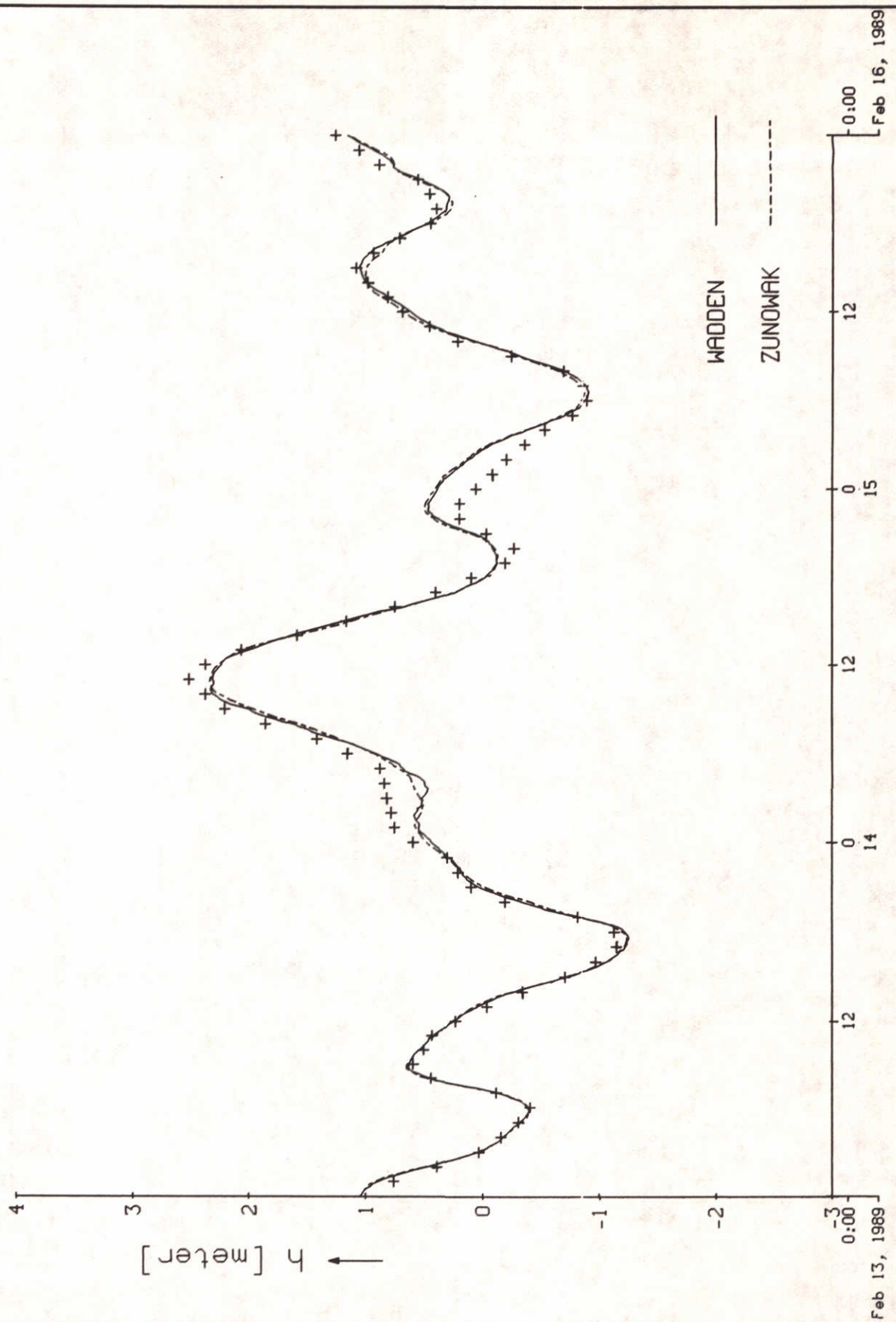
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Petten

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.11.2



$C_D$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

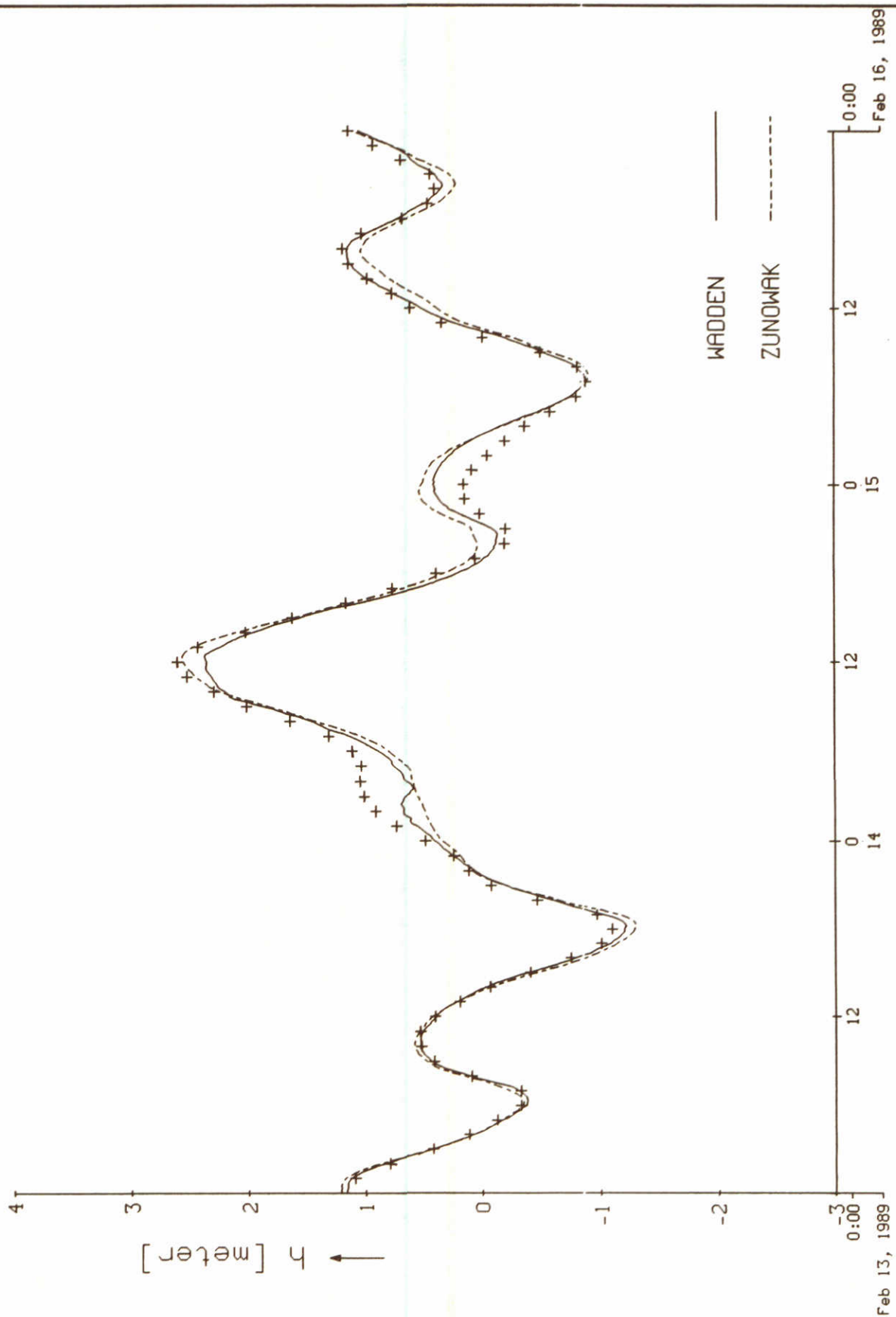
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Den Helcer

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 11.3



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb.1989

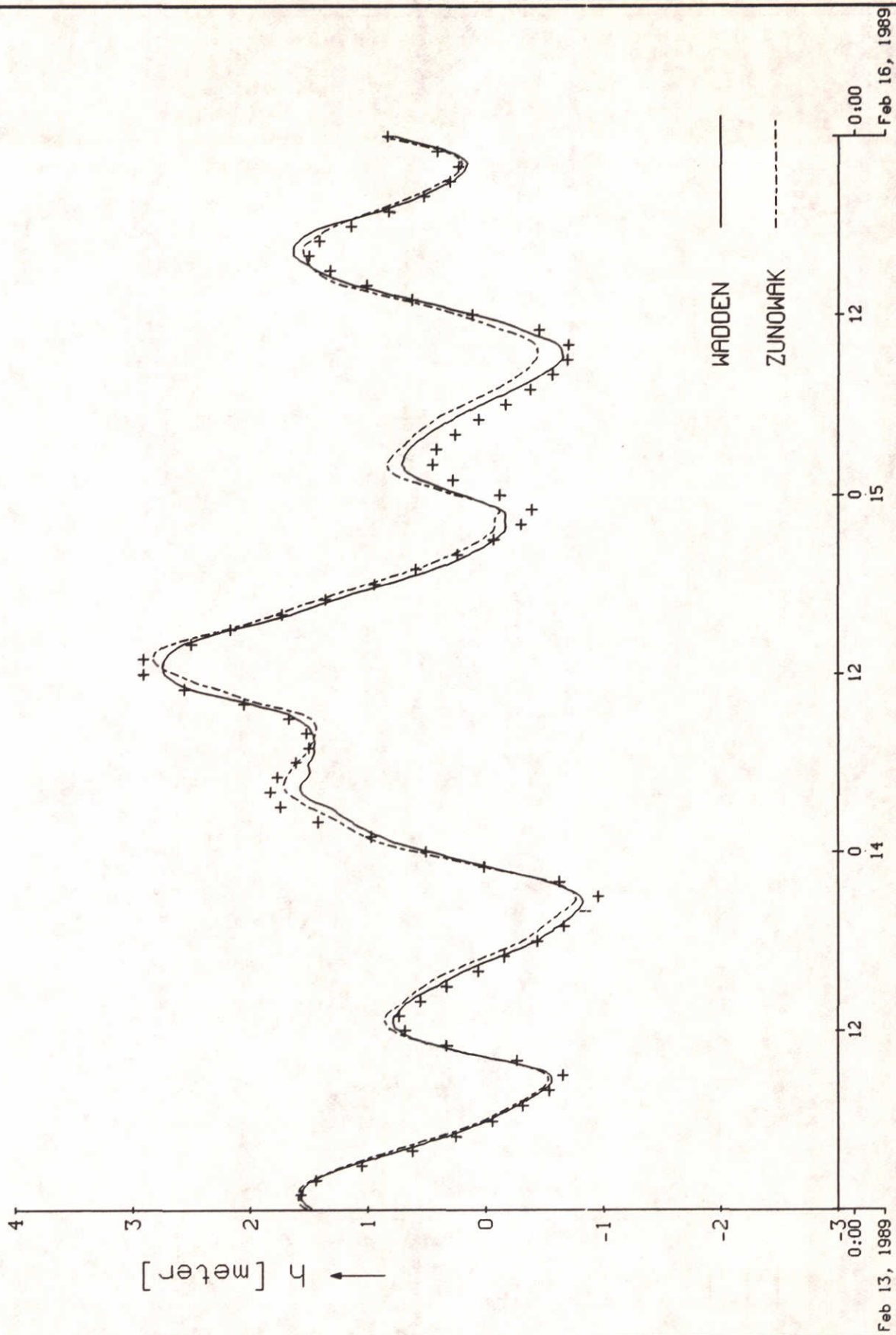
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Oude Sch.la

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.11.4



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Harlingen

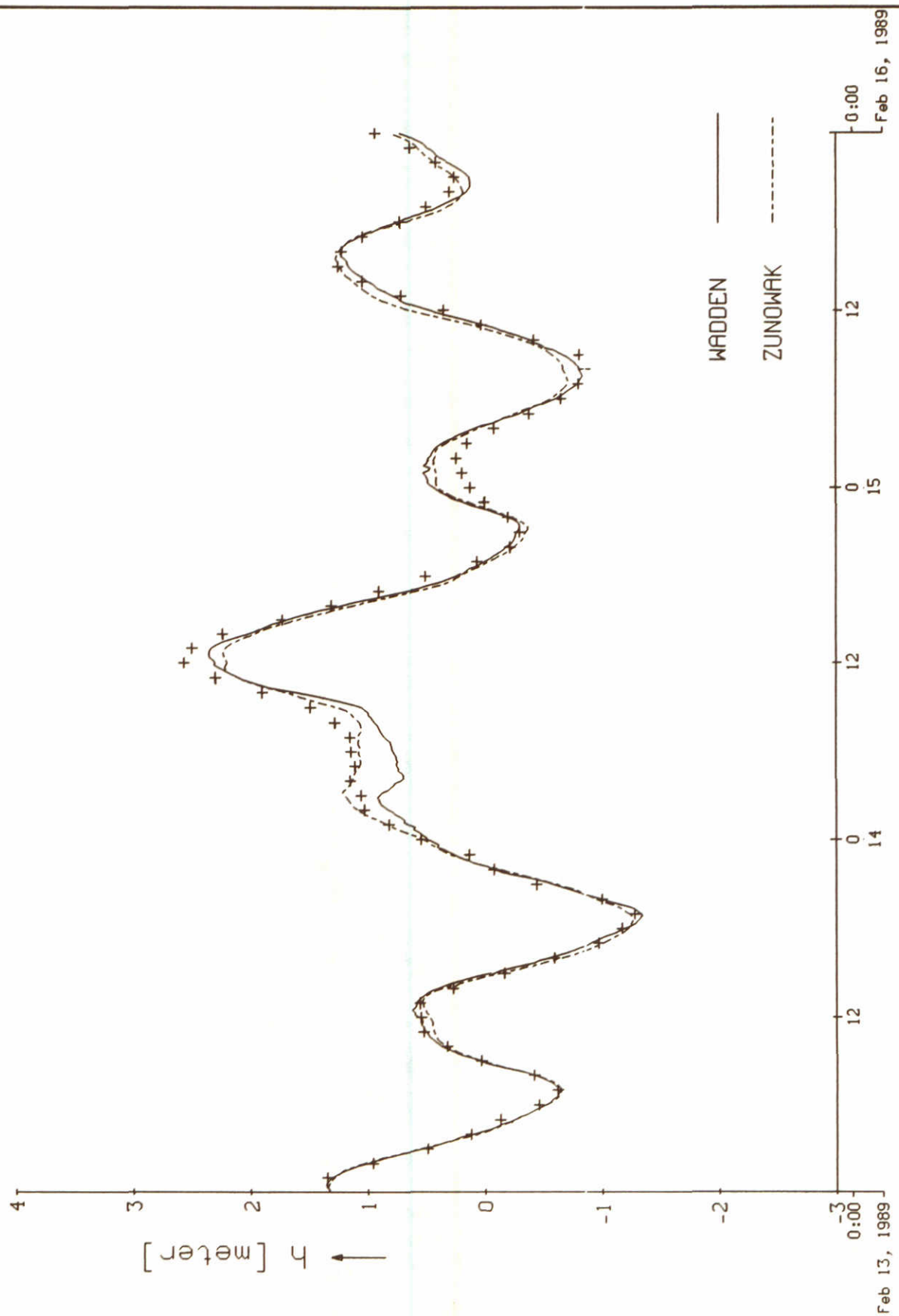
ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 11.5





$C_D$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

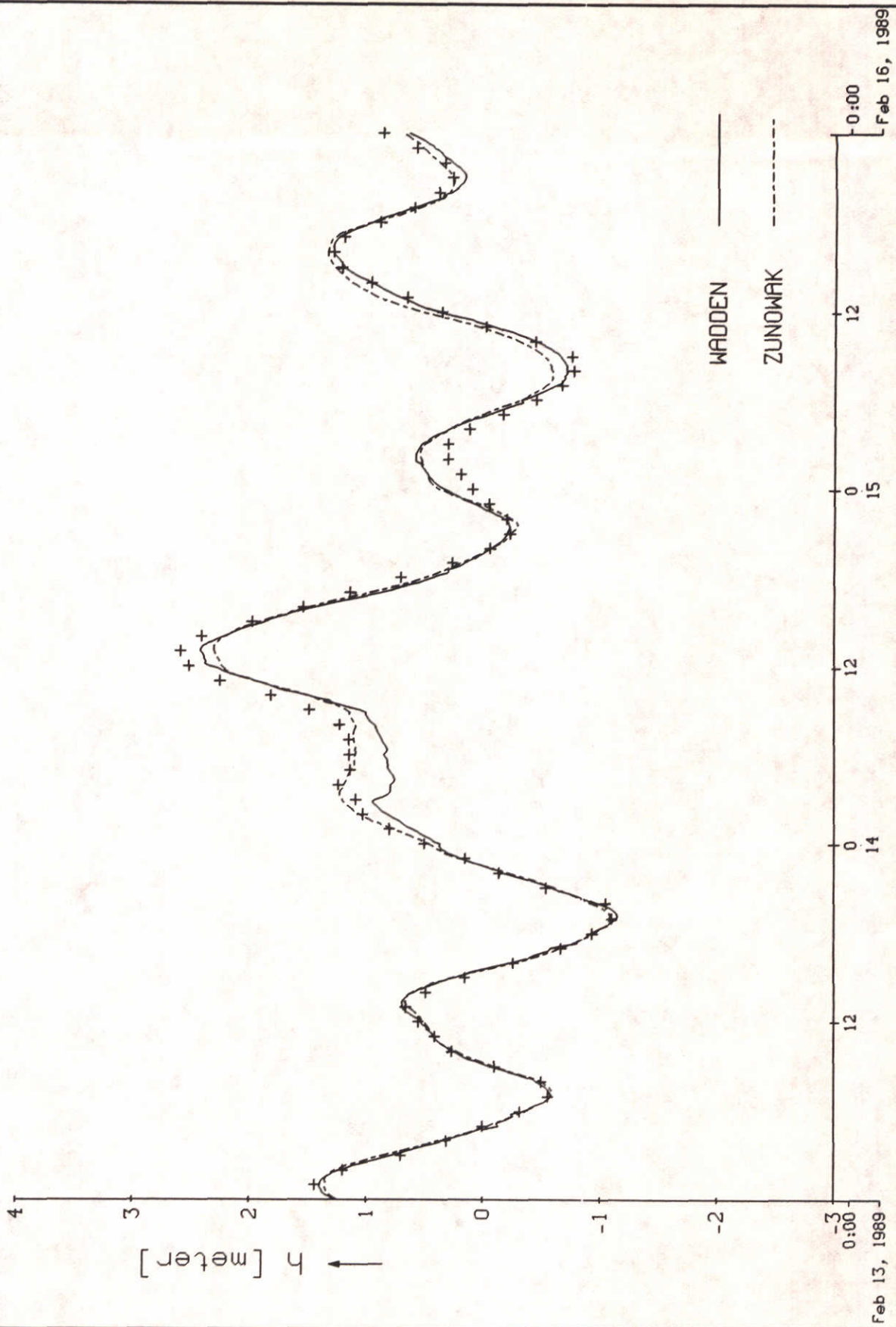
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Vlieland Haven

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 11.6



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb.1989

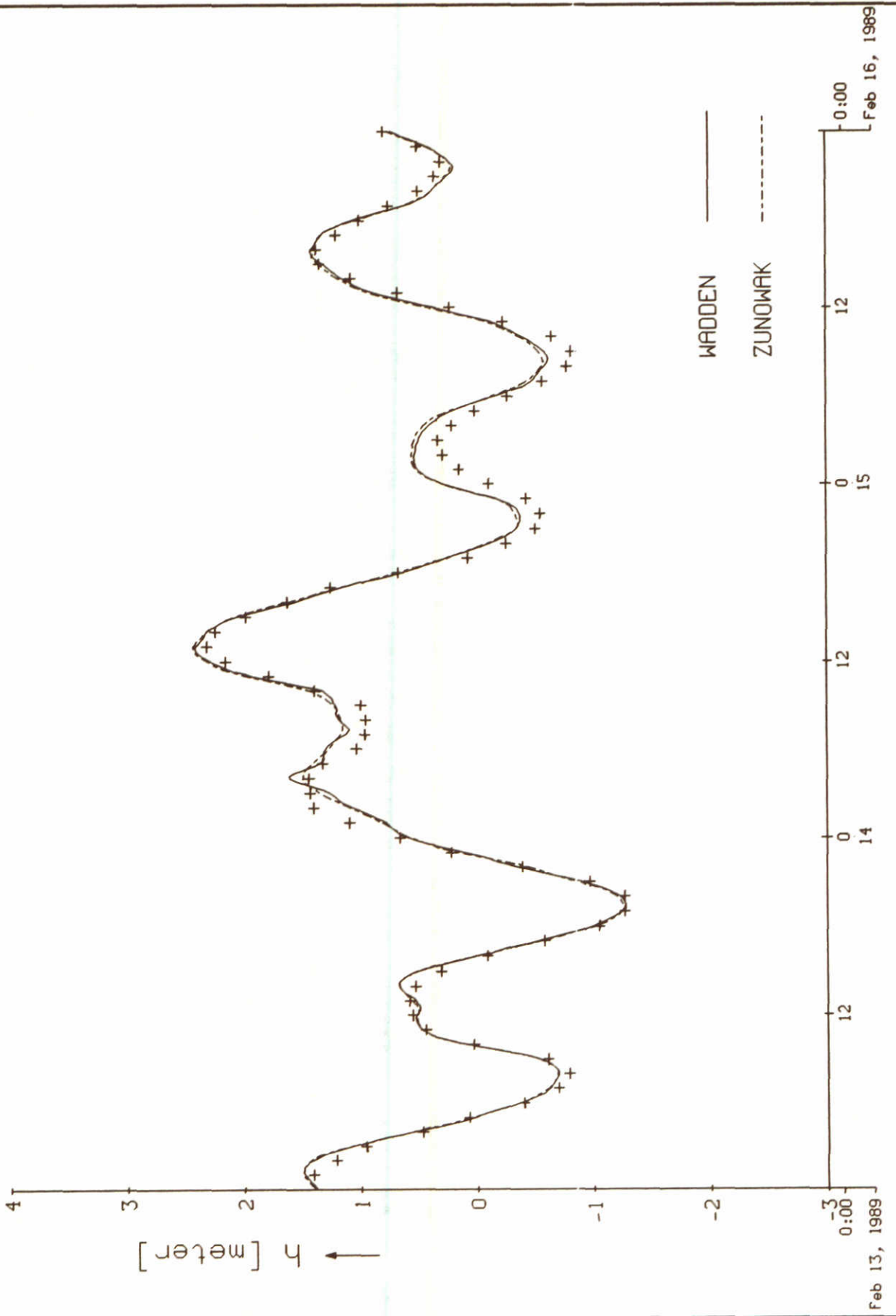
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at W. Terschelling

ZUNOWAK / WADDEN

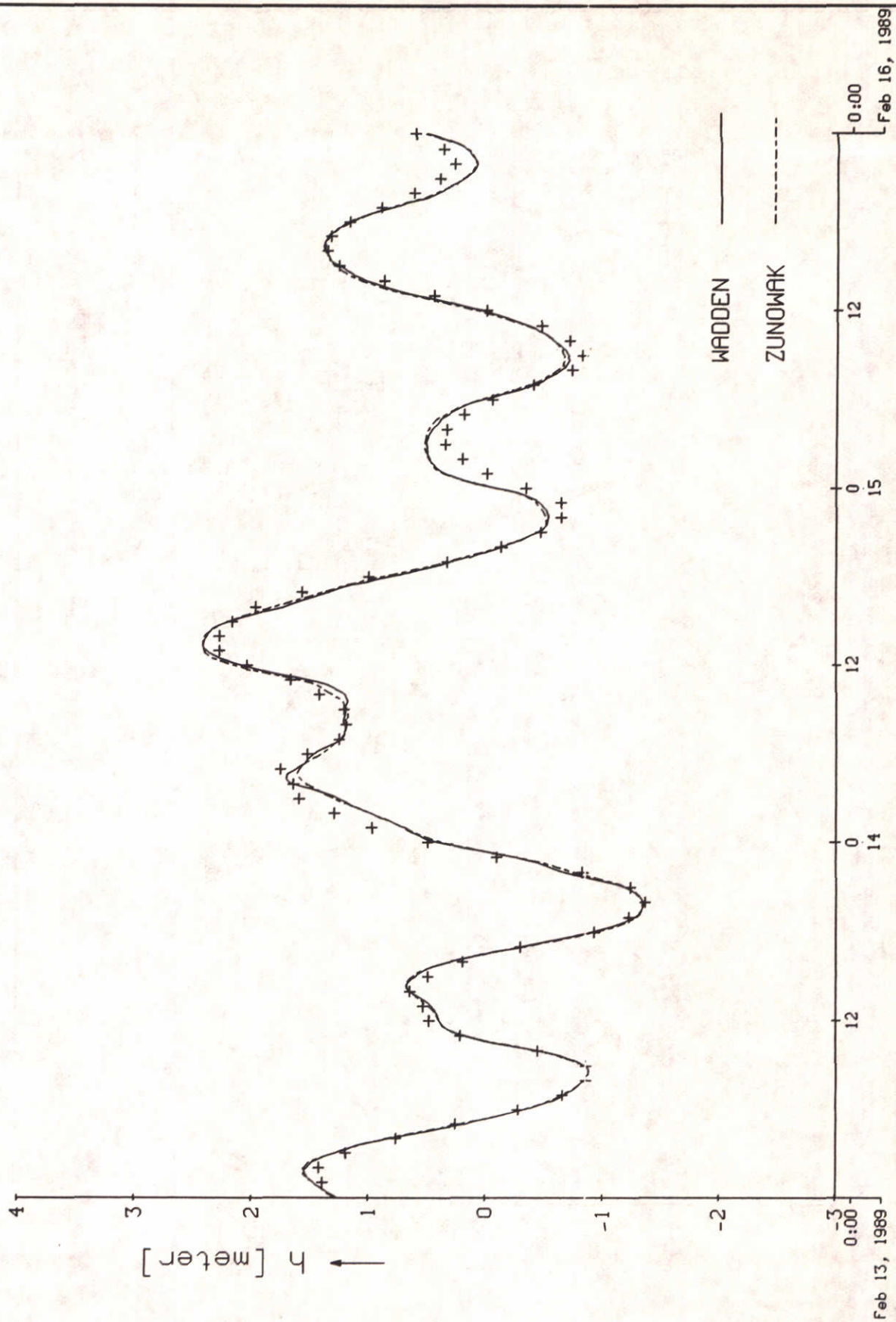
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.11.7



C <sub>d</sub> optimization; febr. 13-15, 1989	feb. 1989	
	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig. 11.8



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

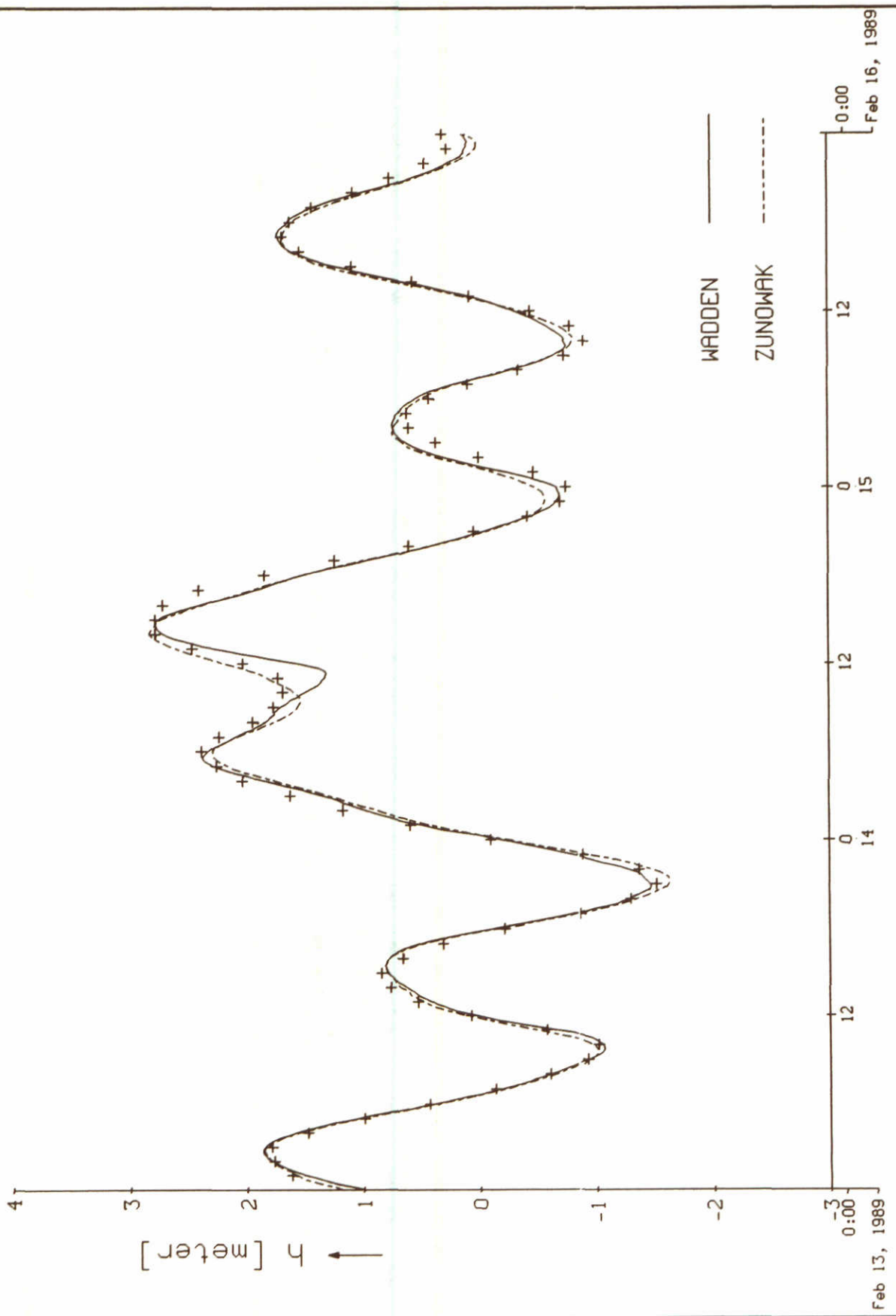
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Huibertgat

ZUNOWAK / WADDEN

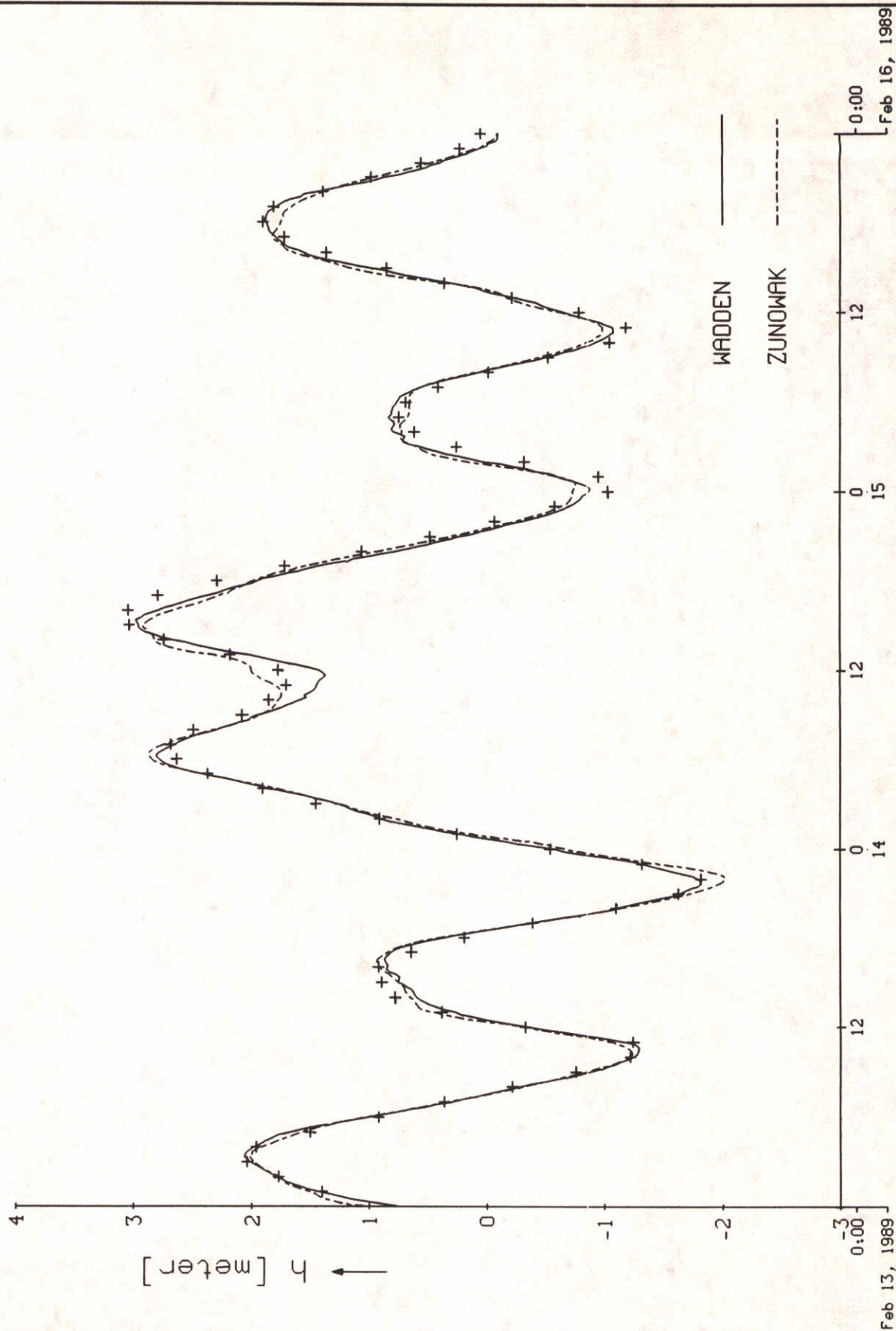
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 11.9



$C_d$ optimization; febr. 13-15, 1989		feb.1989
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Eemshaven	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.11.10



$C_d$  optimization; febr. 13-15, 1989

feb. 1989

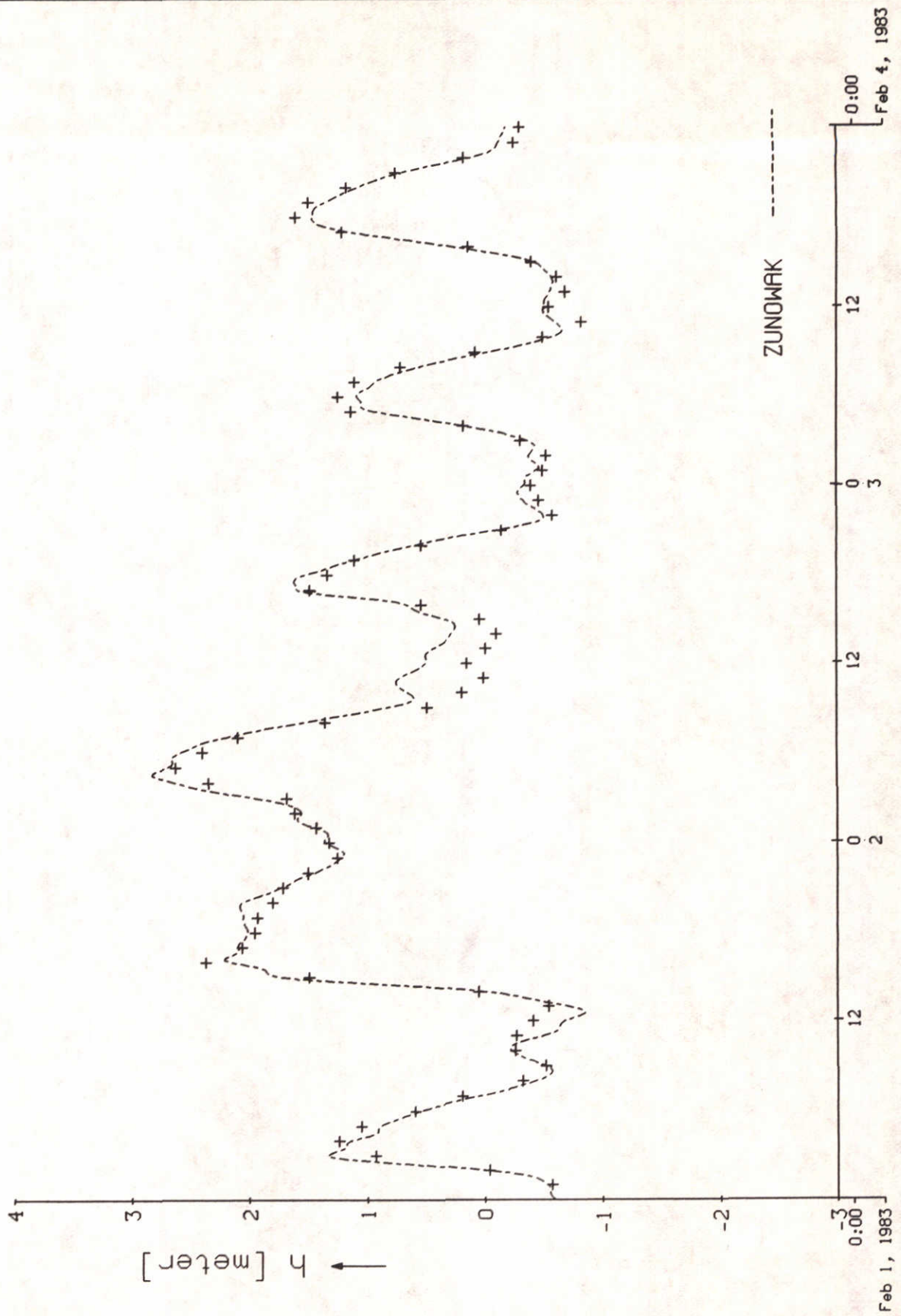
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Delfzijl

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 11.11



$C_d$  optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

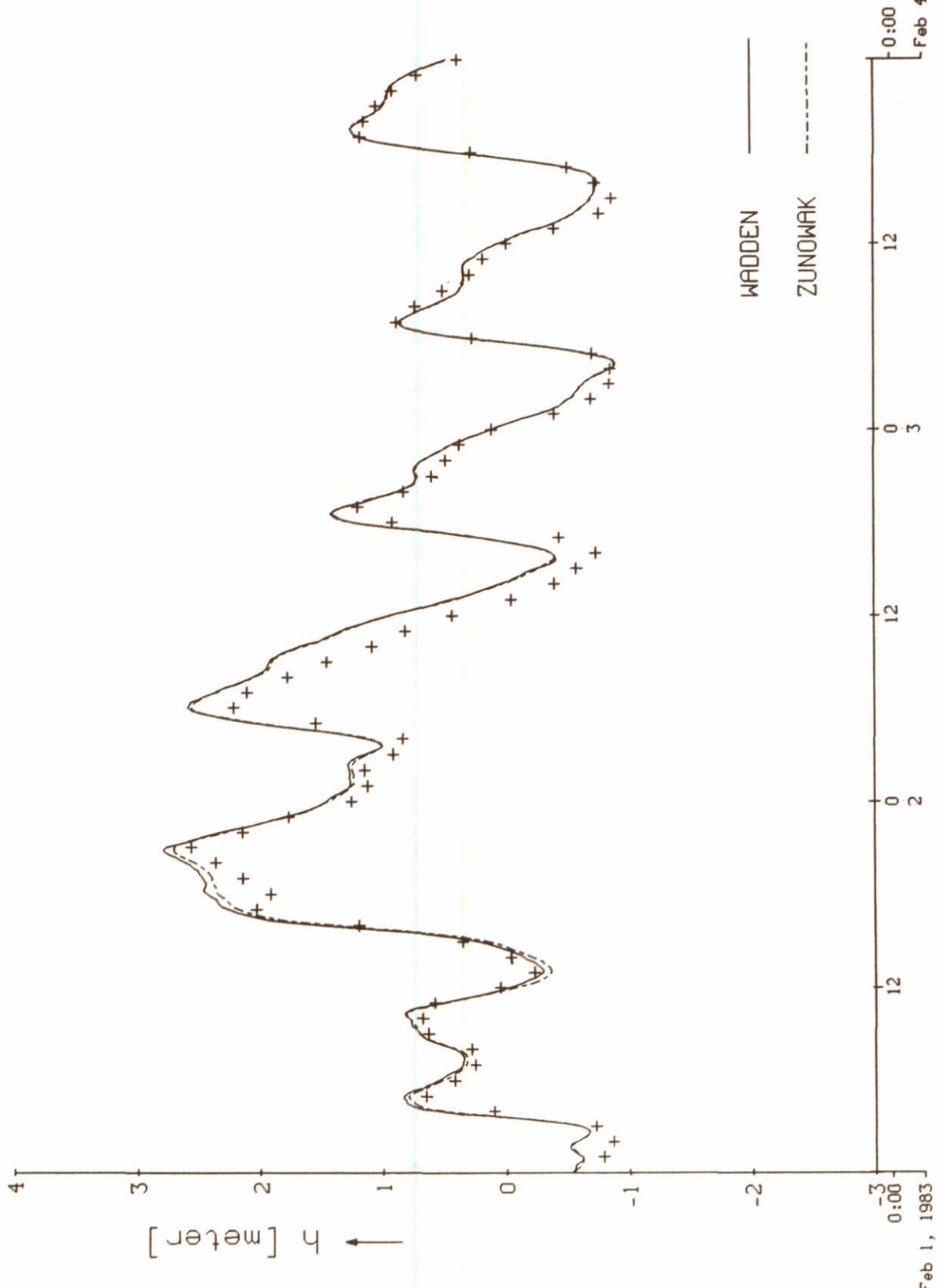
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Hoek v. Holland

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

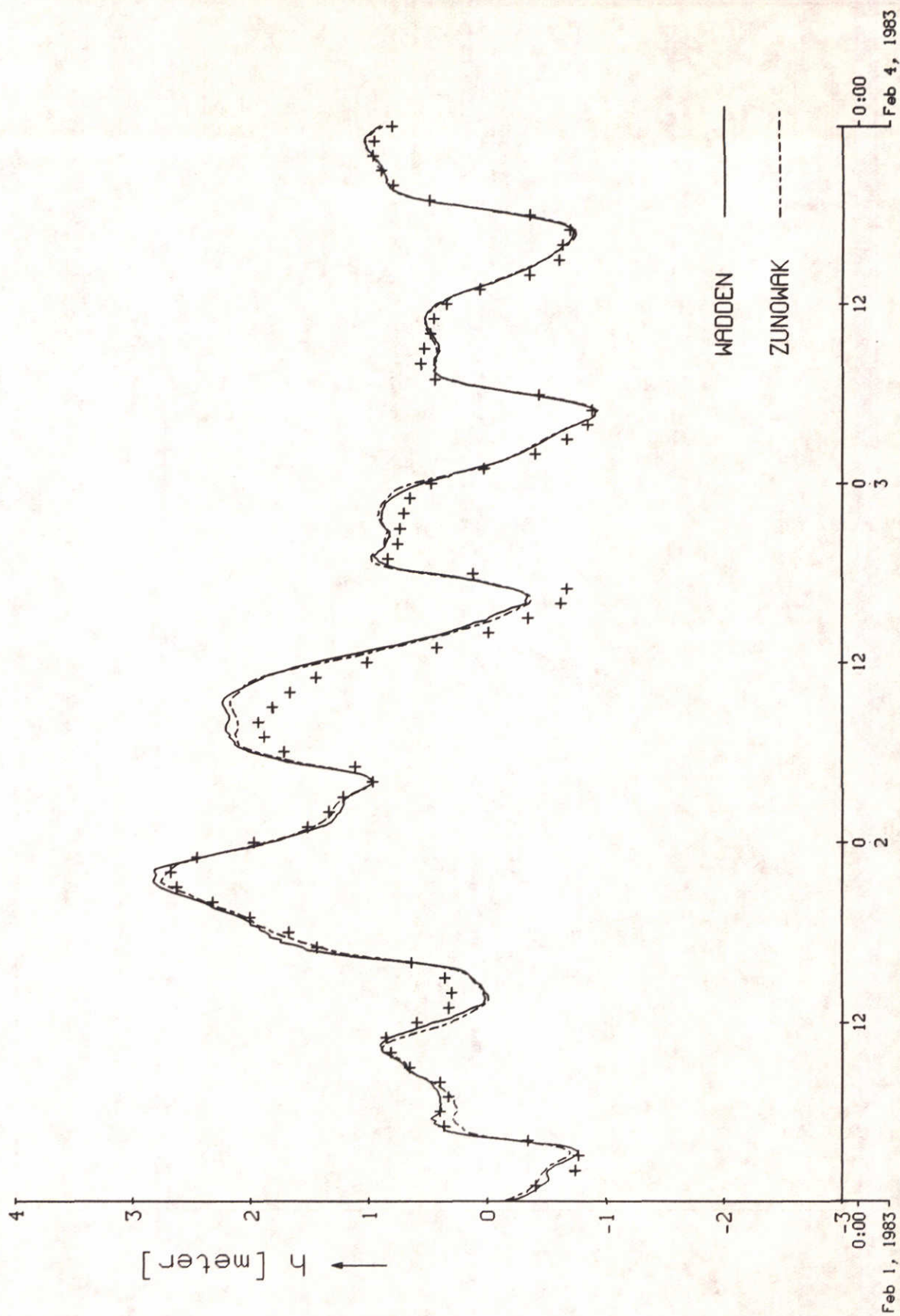
Z-530

Fig.12.1



C <sub>d</sub> optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Petten	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.12.2





$C_D$  optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

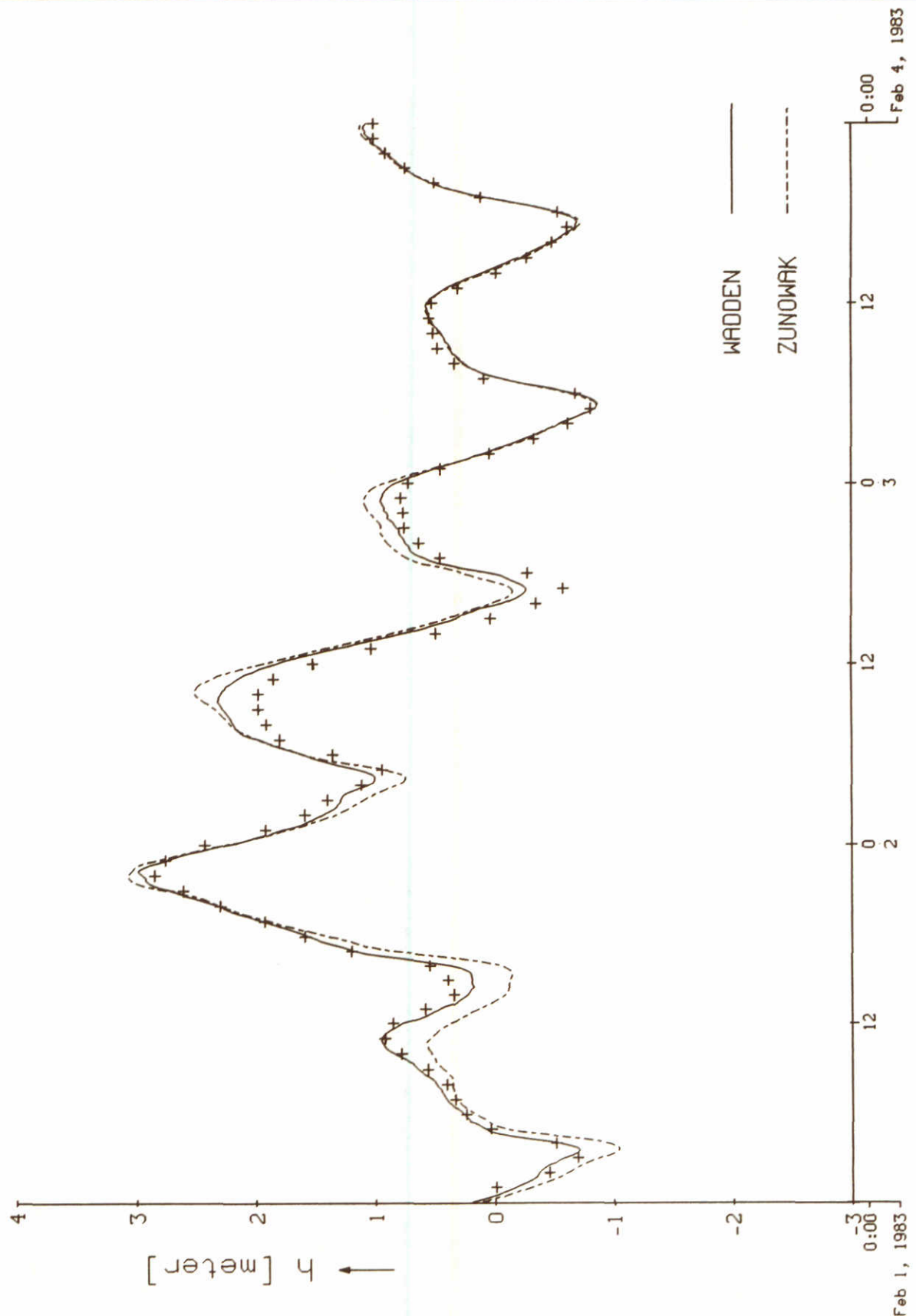
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Den Helder

ZUNOWAK / WADDEN

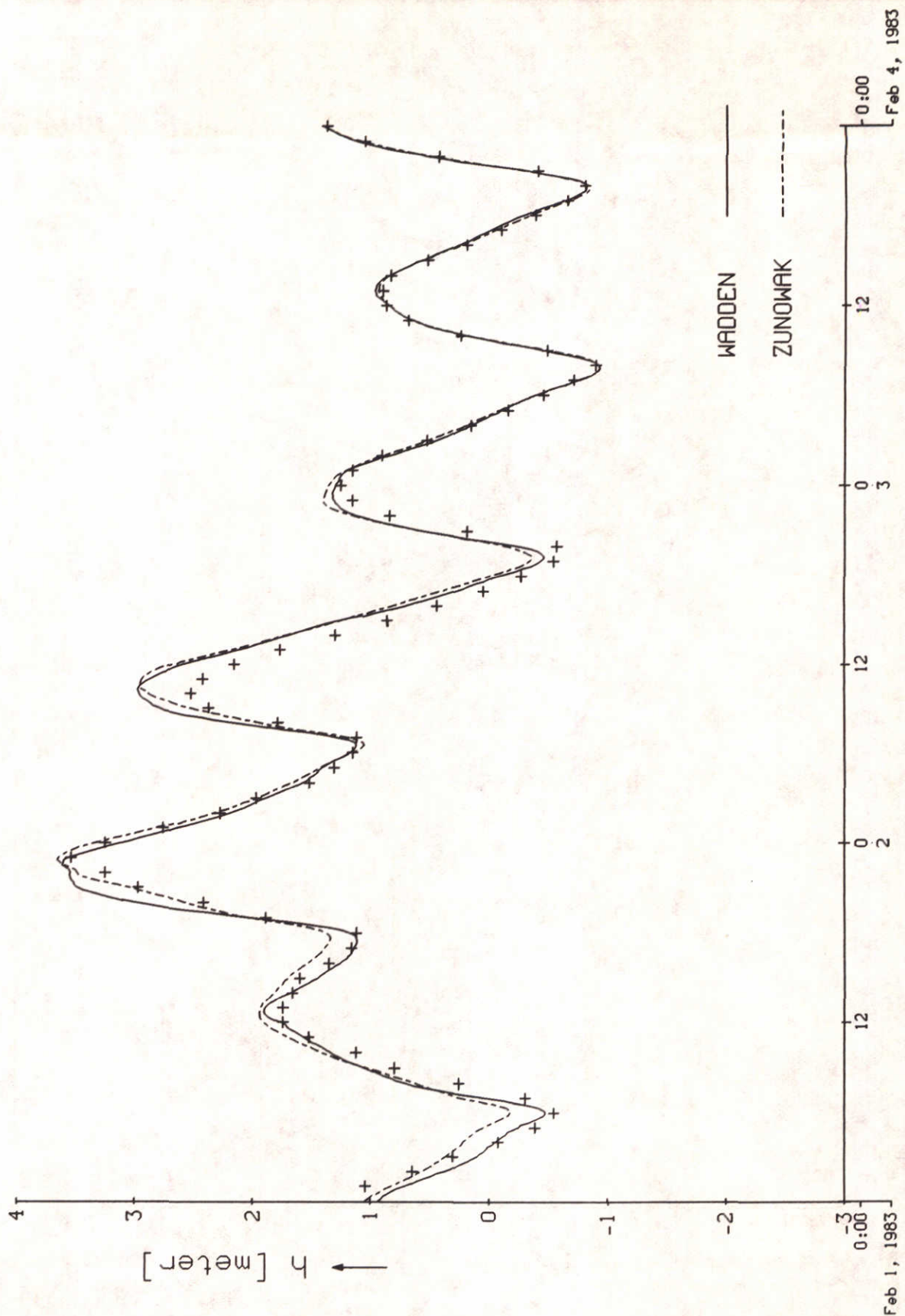
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 12.3



C <sub>d</sub> optimization; febr. 01-03, 1983	feb.1983	
	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.12.4



$C_d$  optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

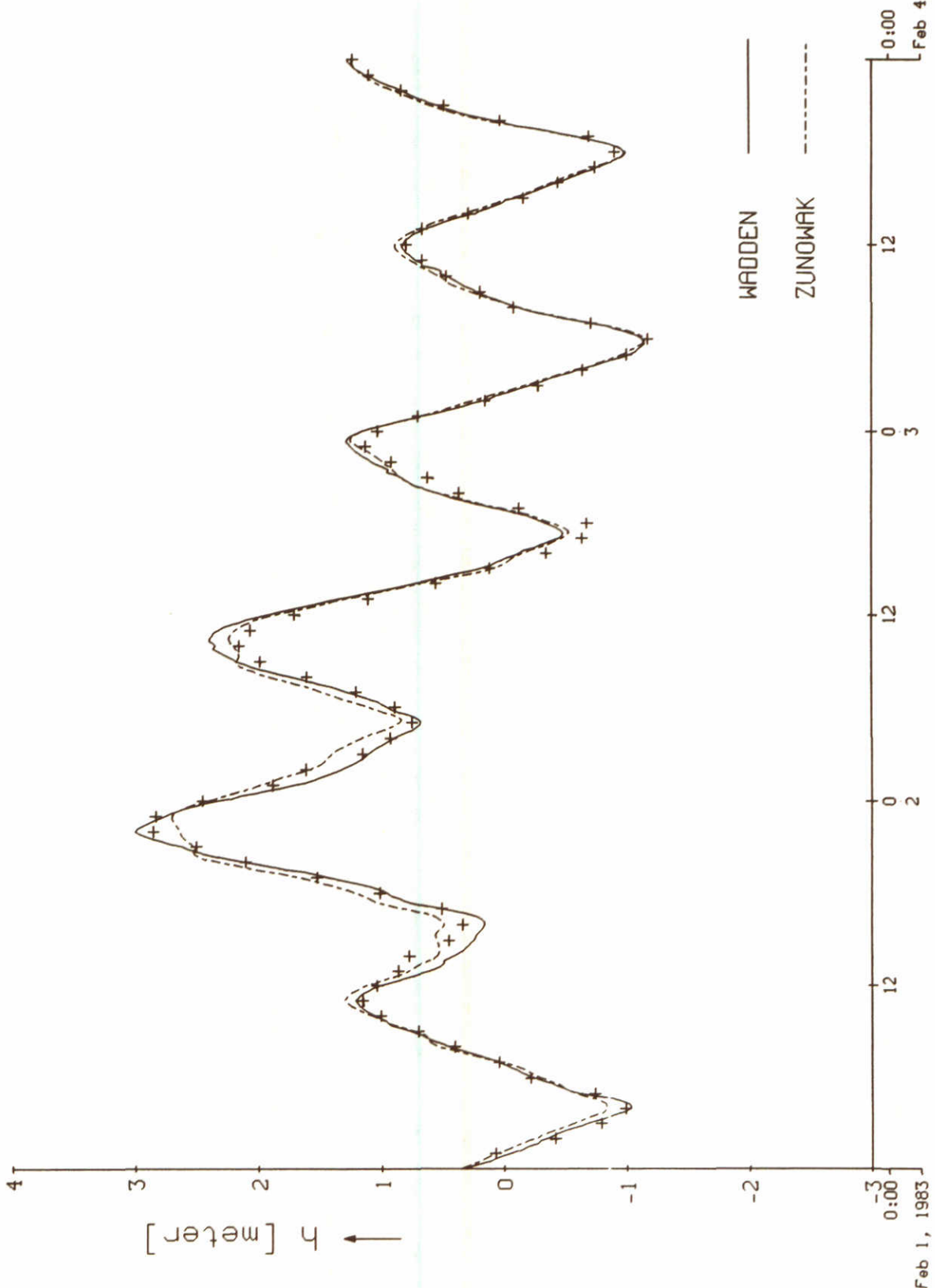
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Harlingen

ZUNOWAK / WADDEN

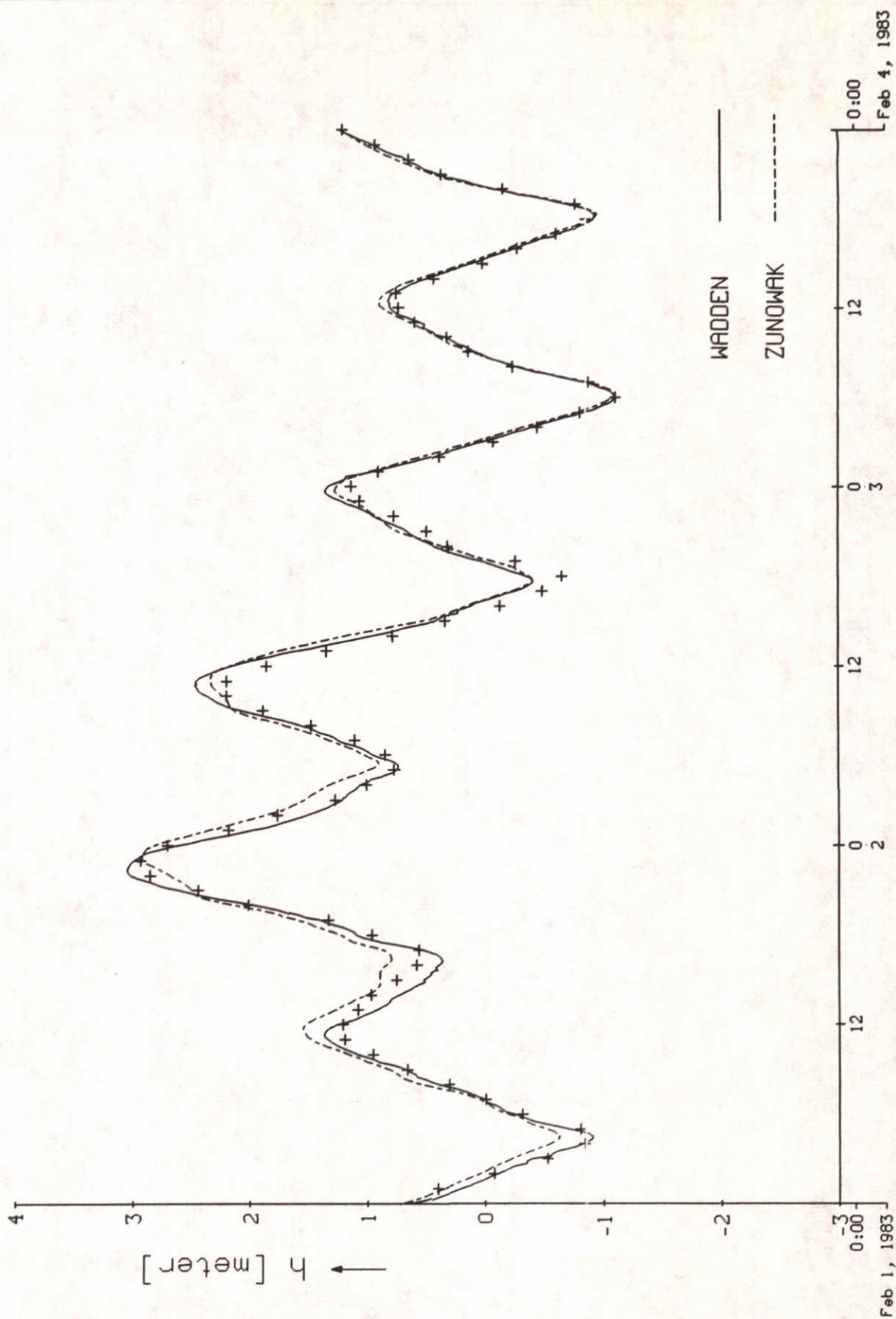
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 12.5



$C_d$ optimization; febr. 01-03, 1983		feb. 1983
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Vlieland Haven	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig. 12.6



$C_d$  optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

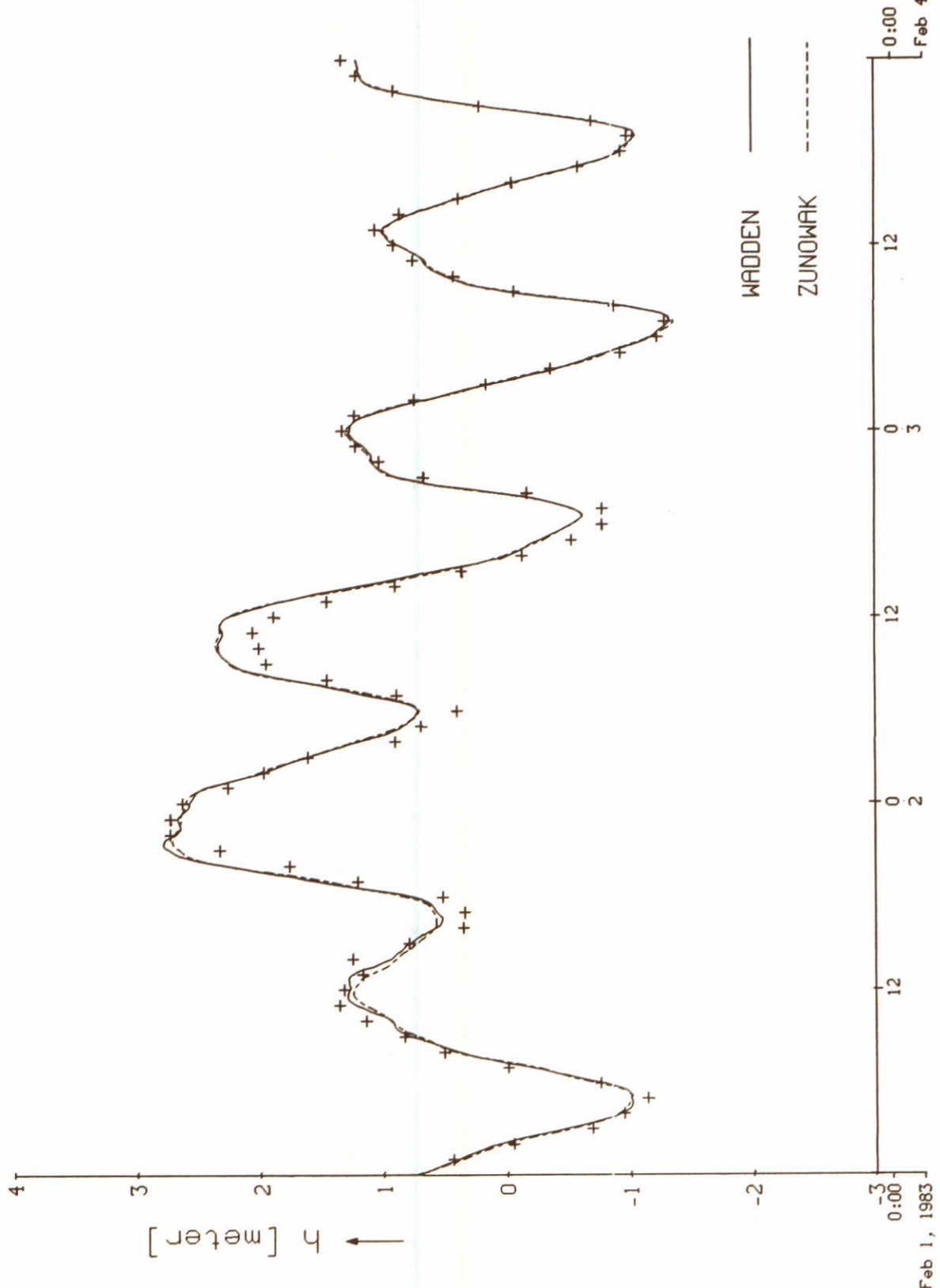
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at W. Terschelling

ZUNOWAK / WADDEN

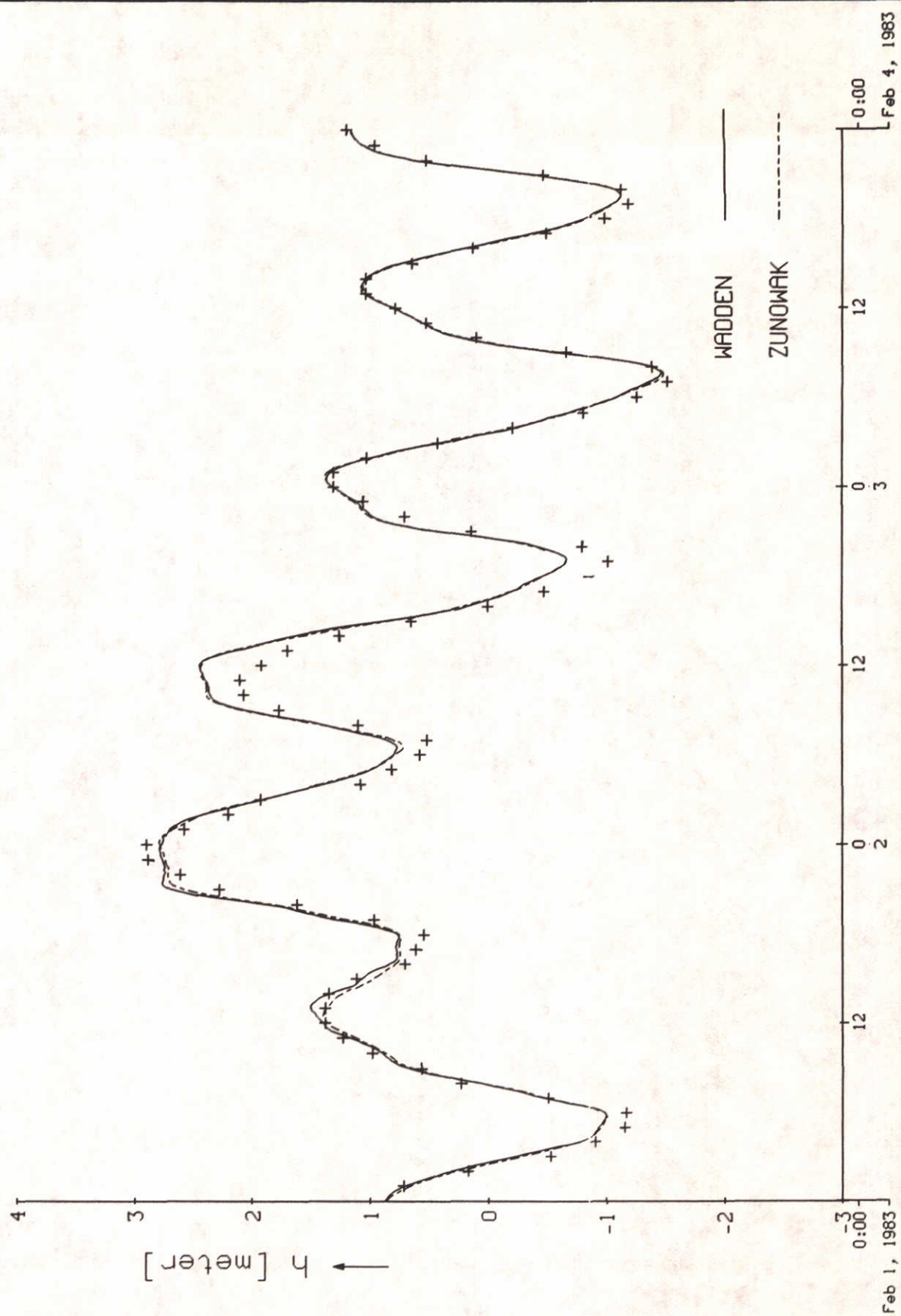
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 12.7



$C_D$ optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Wierumergronden	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.12.8



$C_d$  optimization; febr. 01-03, 1983

feb. 1983

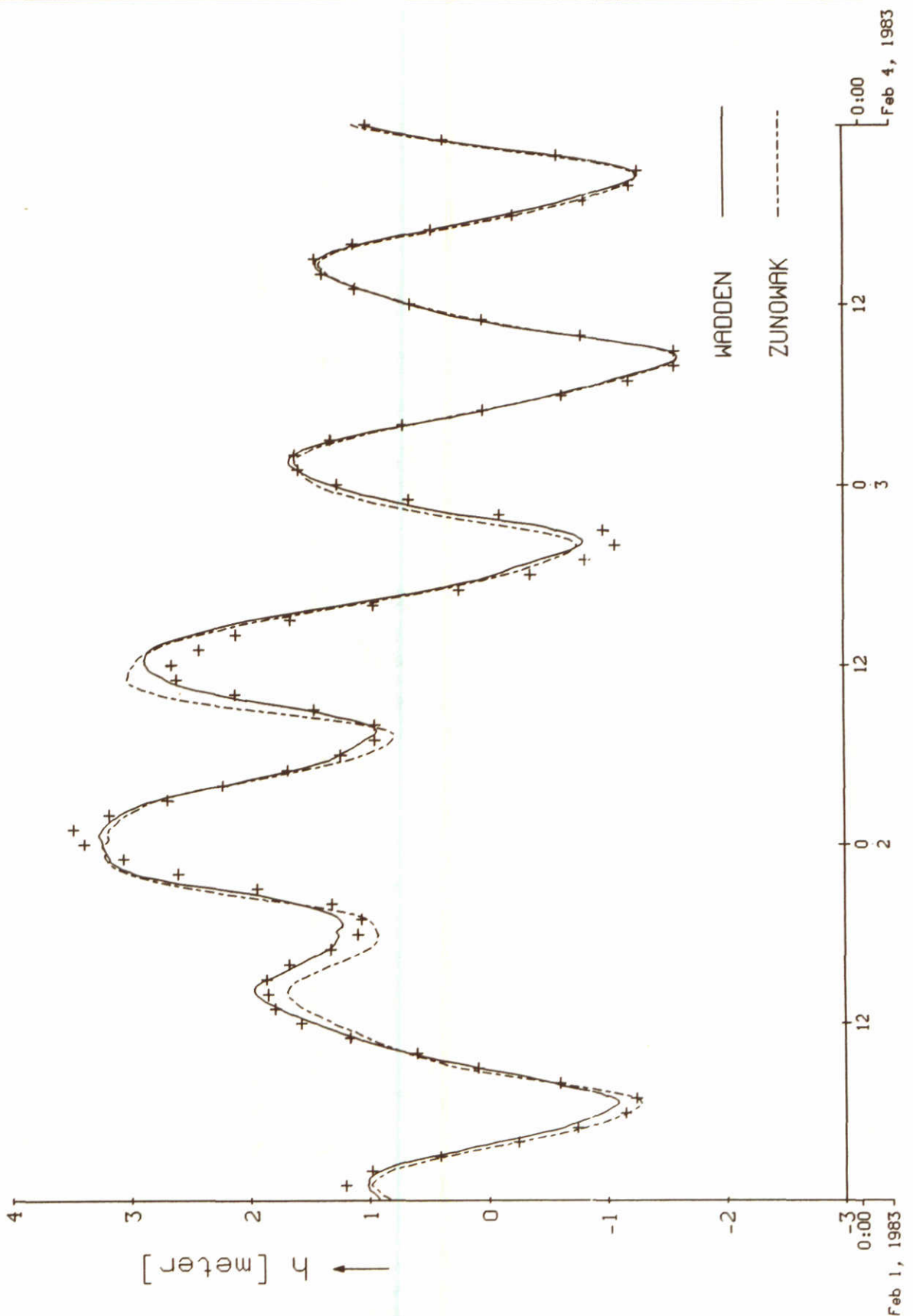
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Huibertgat

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

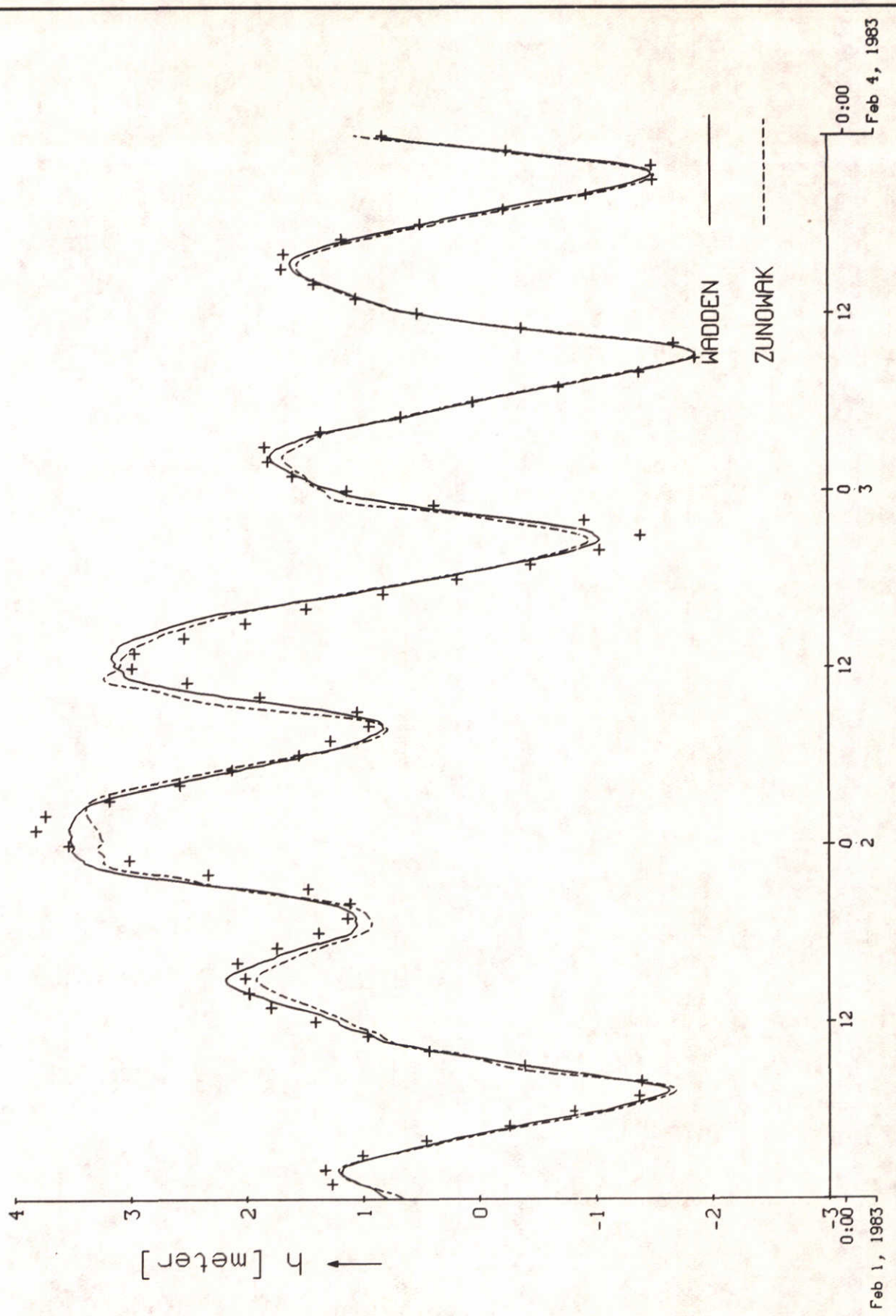
Z-530

Fig. 12.9

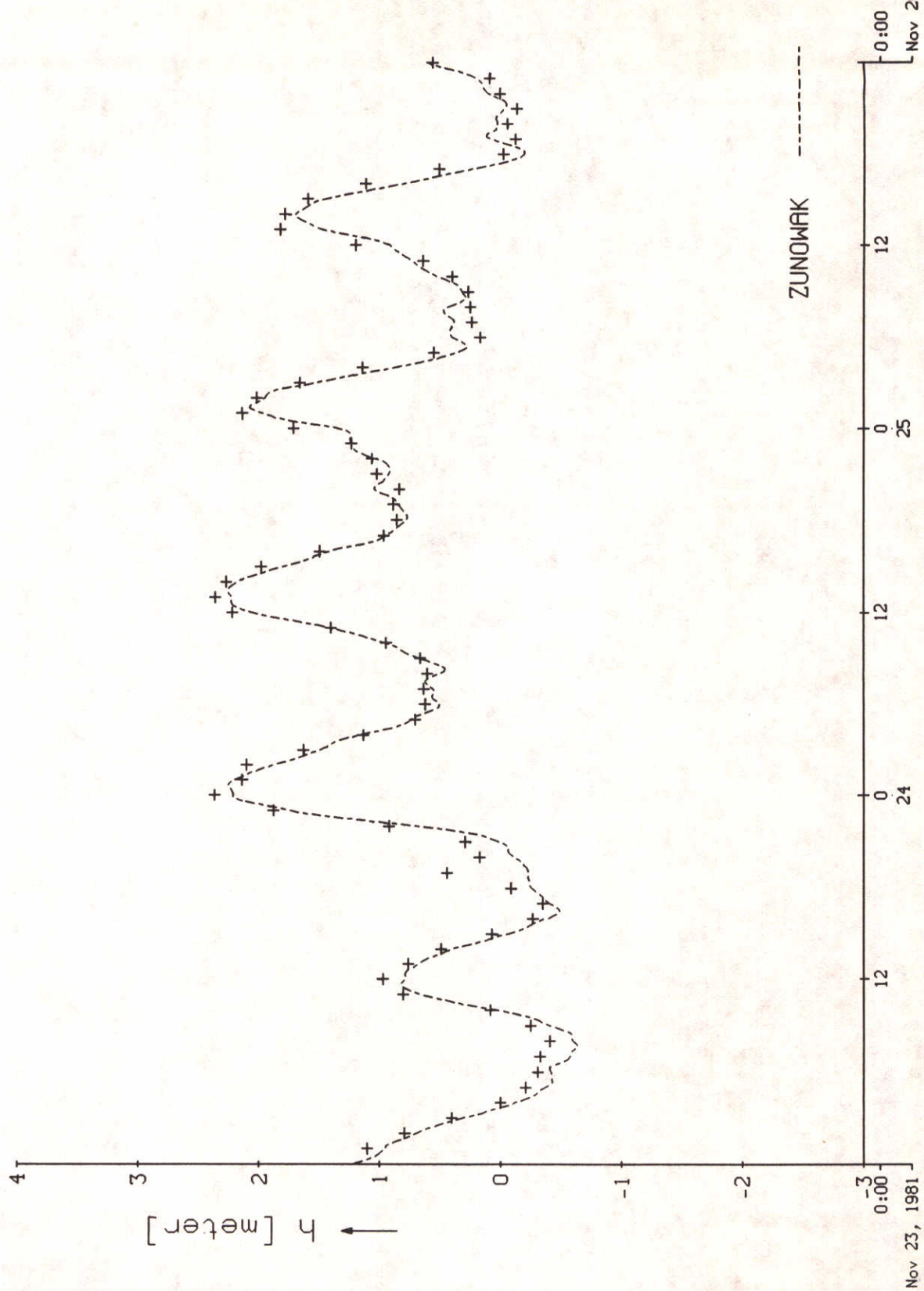


C <sub>d</sub> optimization; febr. 01-03, 1983	feb. 1983	
	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig. 12.10

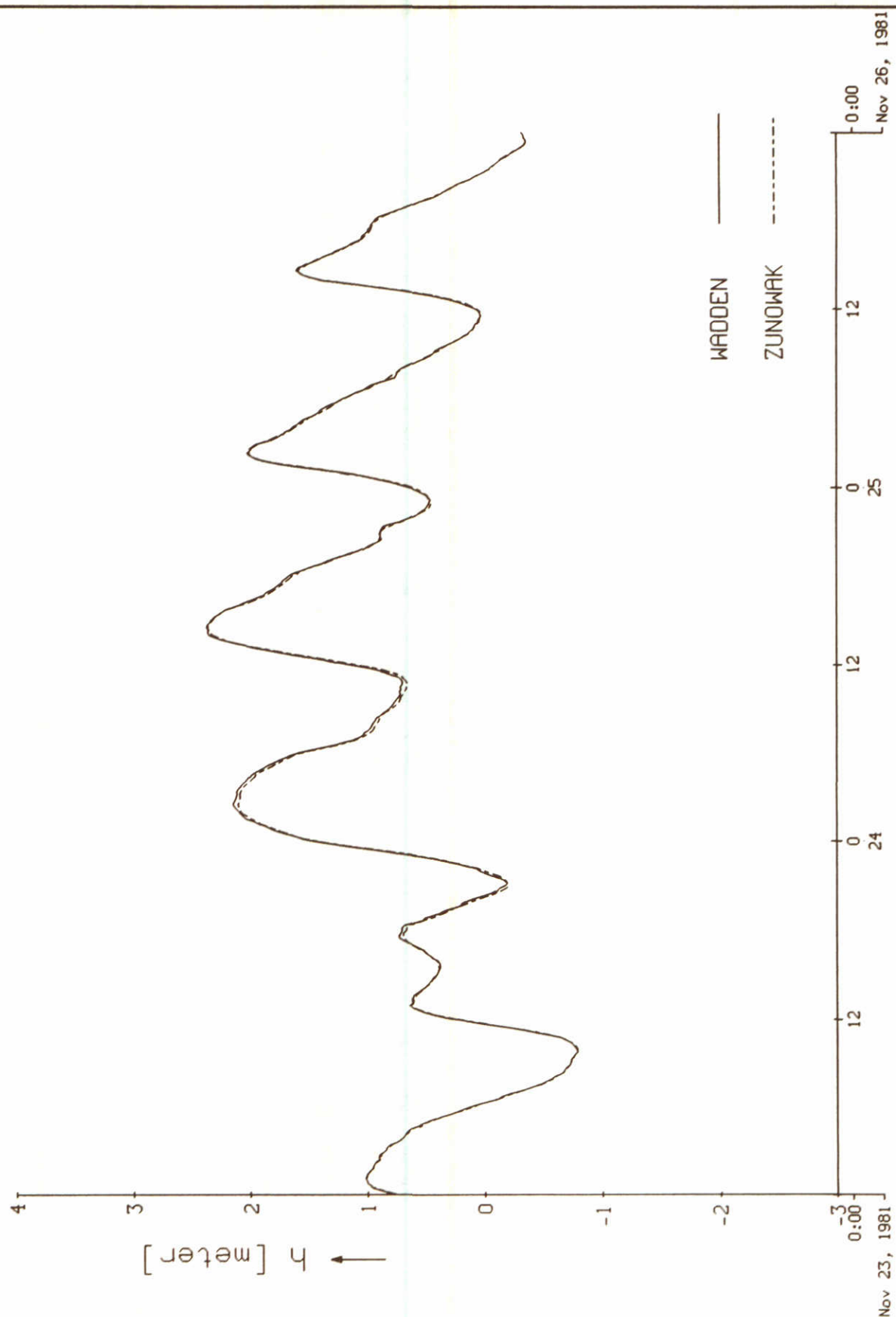




C <sub>d</sub> optimization; febr. 01-03, 1983		feb.1983
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Delfzijl	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.12.11



$C_D$ optimization; nov. 23-25, 1981		nov. 1981
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Hoek v. Holland	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.13.1



$C_d$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

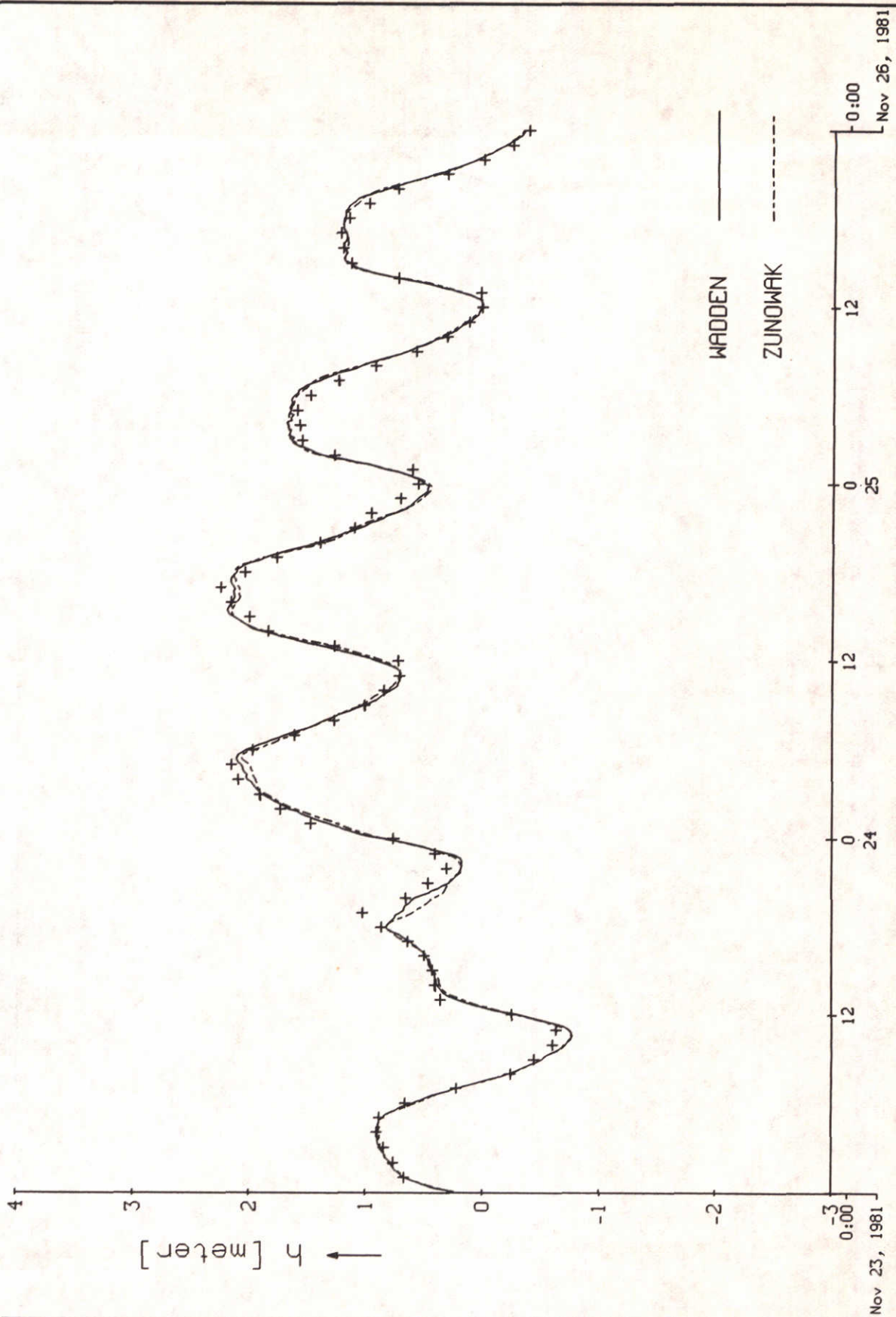
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Petten

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.13.2



$C_d$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

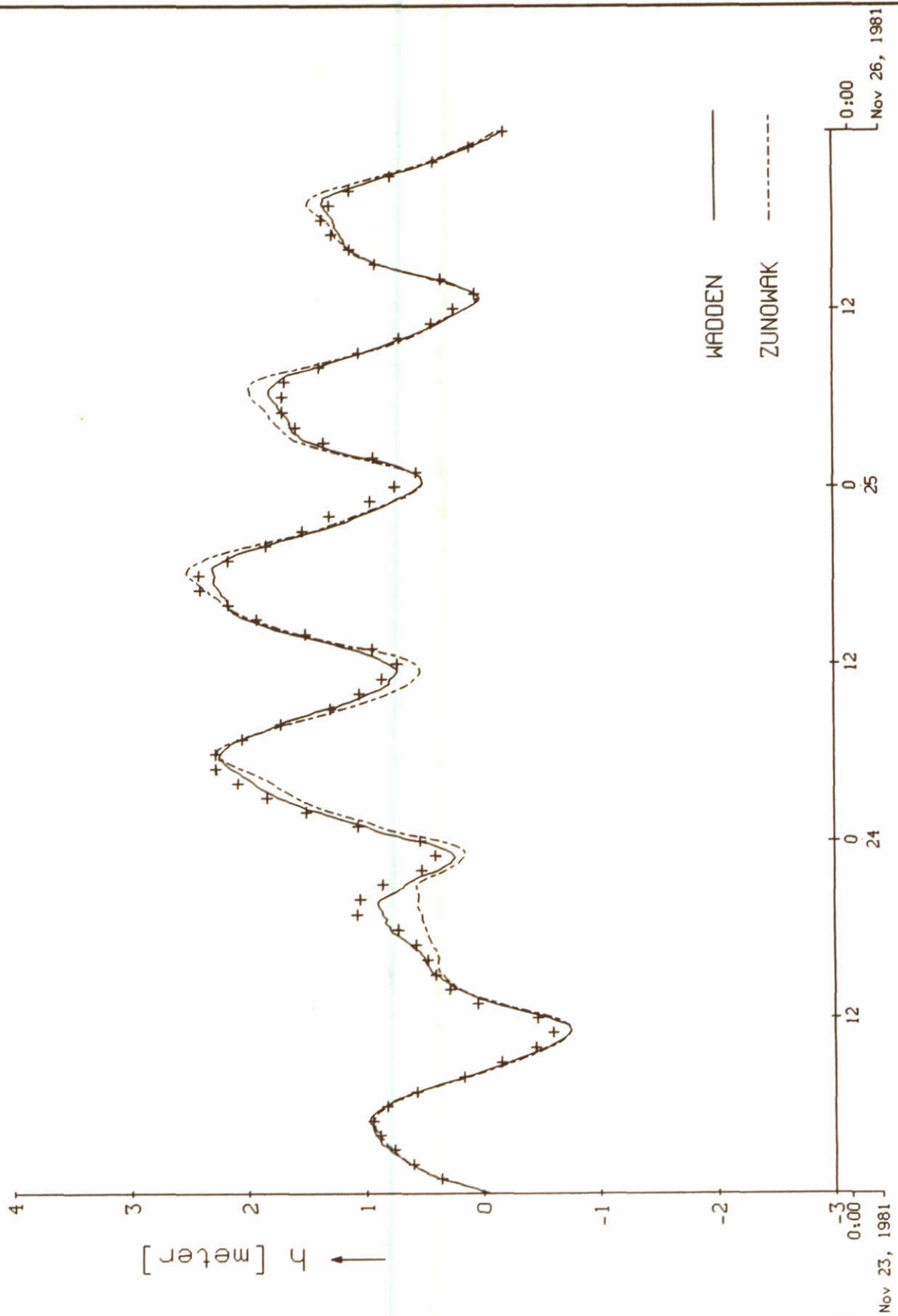
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Den Helder

ZUNOWAK / WADDEN

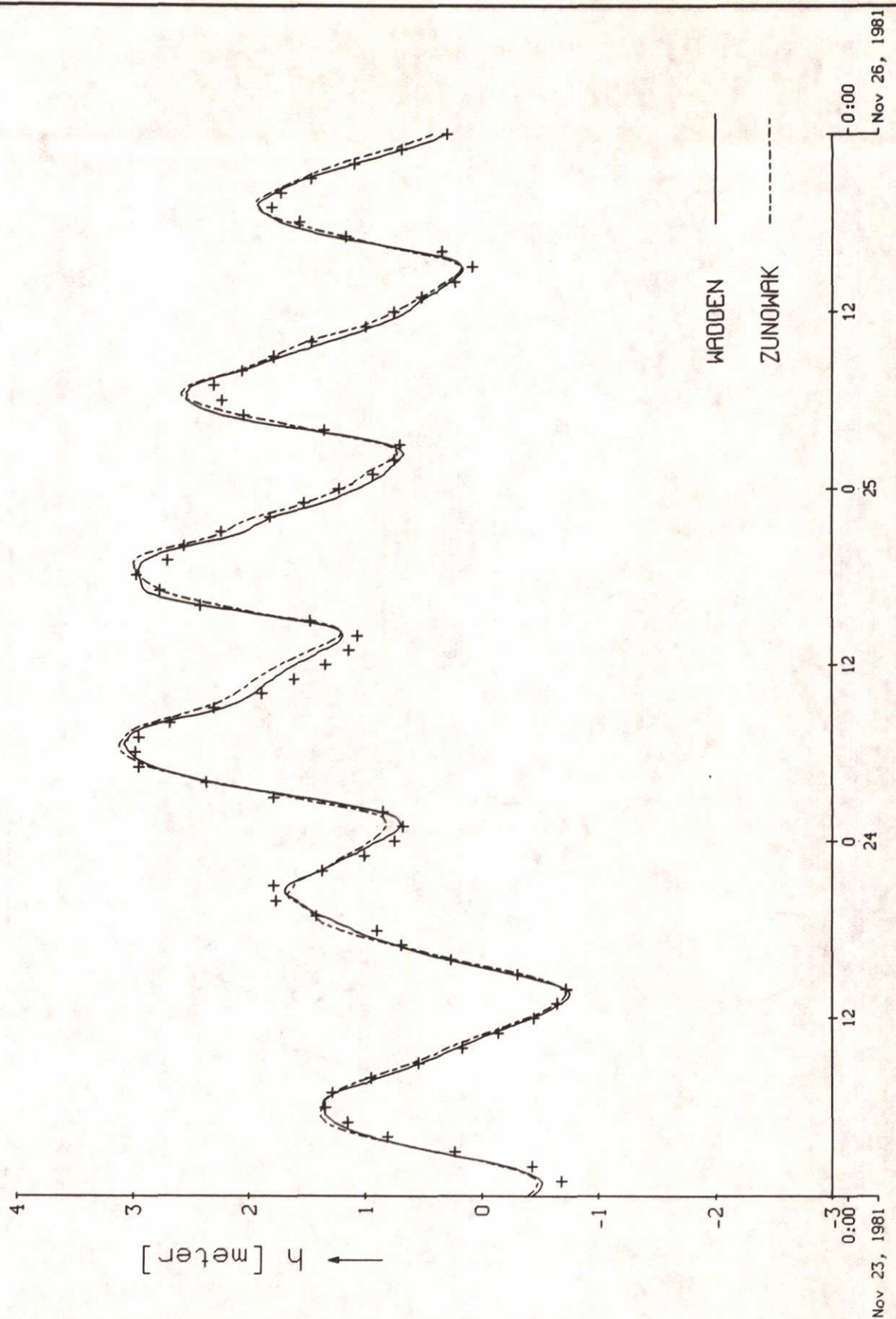
DELFT HYDRAULICS

Z-530

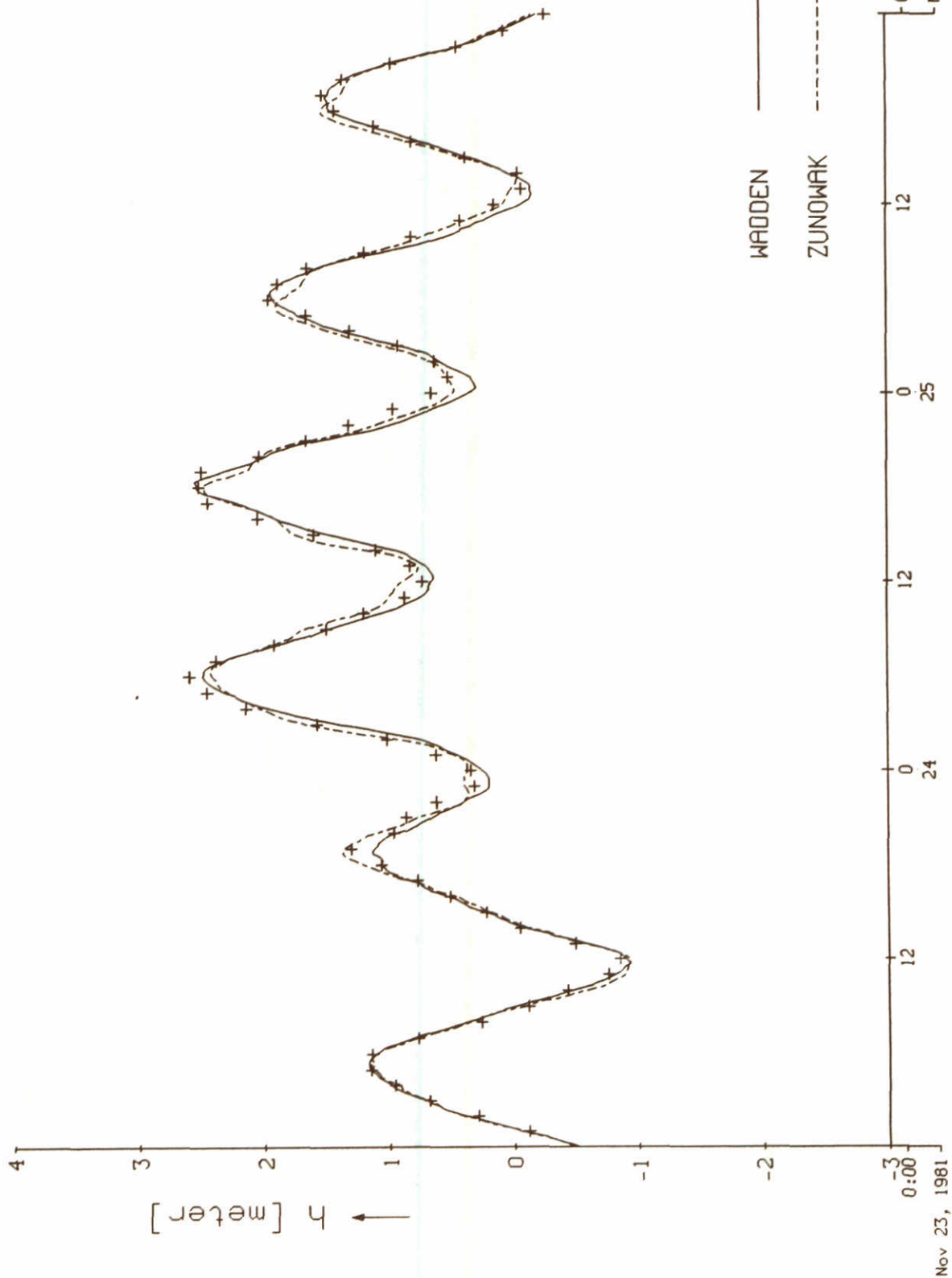
Fig. 13.3



C <sub>d</sub> optimization; nov. 23-25, 1981 observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Oude Schild		nov. 1981
	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig. 13.4



$C_d$ optimization; nov. 23-25, 1981		nov. 1981
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Harlingen	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.13.5



$C_d$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

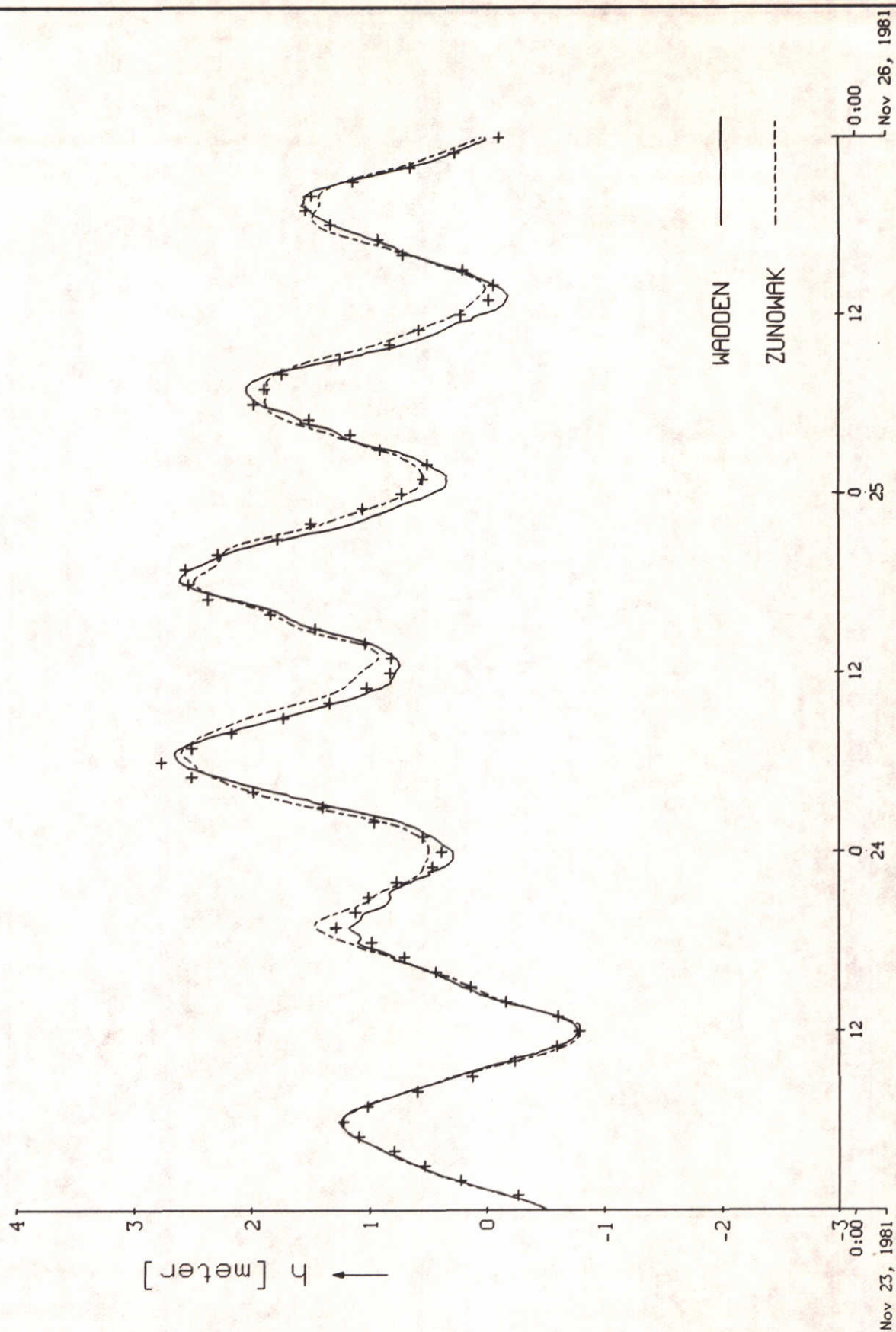
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Vlieland Haven

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 13.6



$C_d$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at W. Terschelling

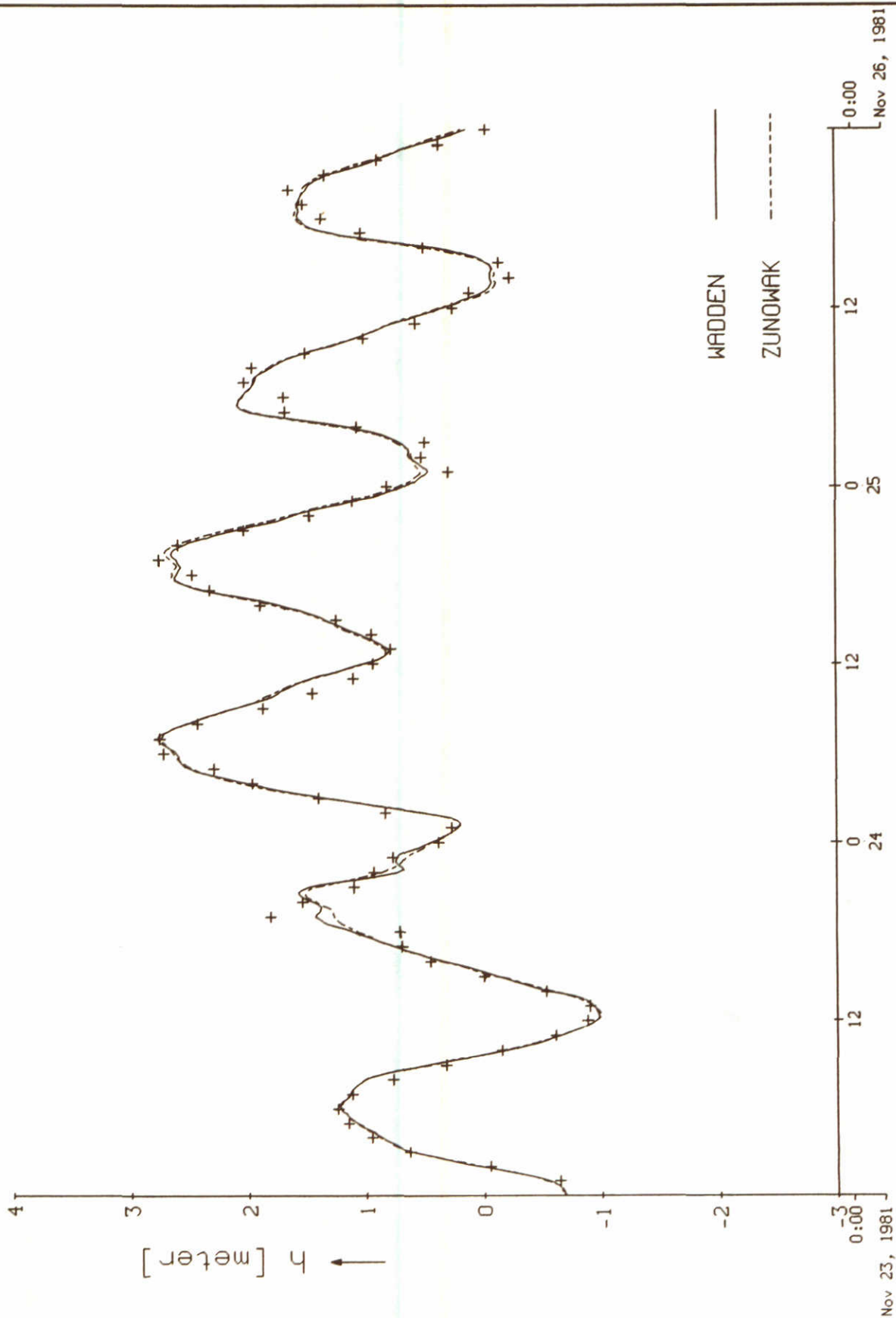
ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.13.7





$C_d$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

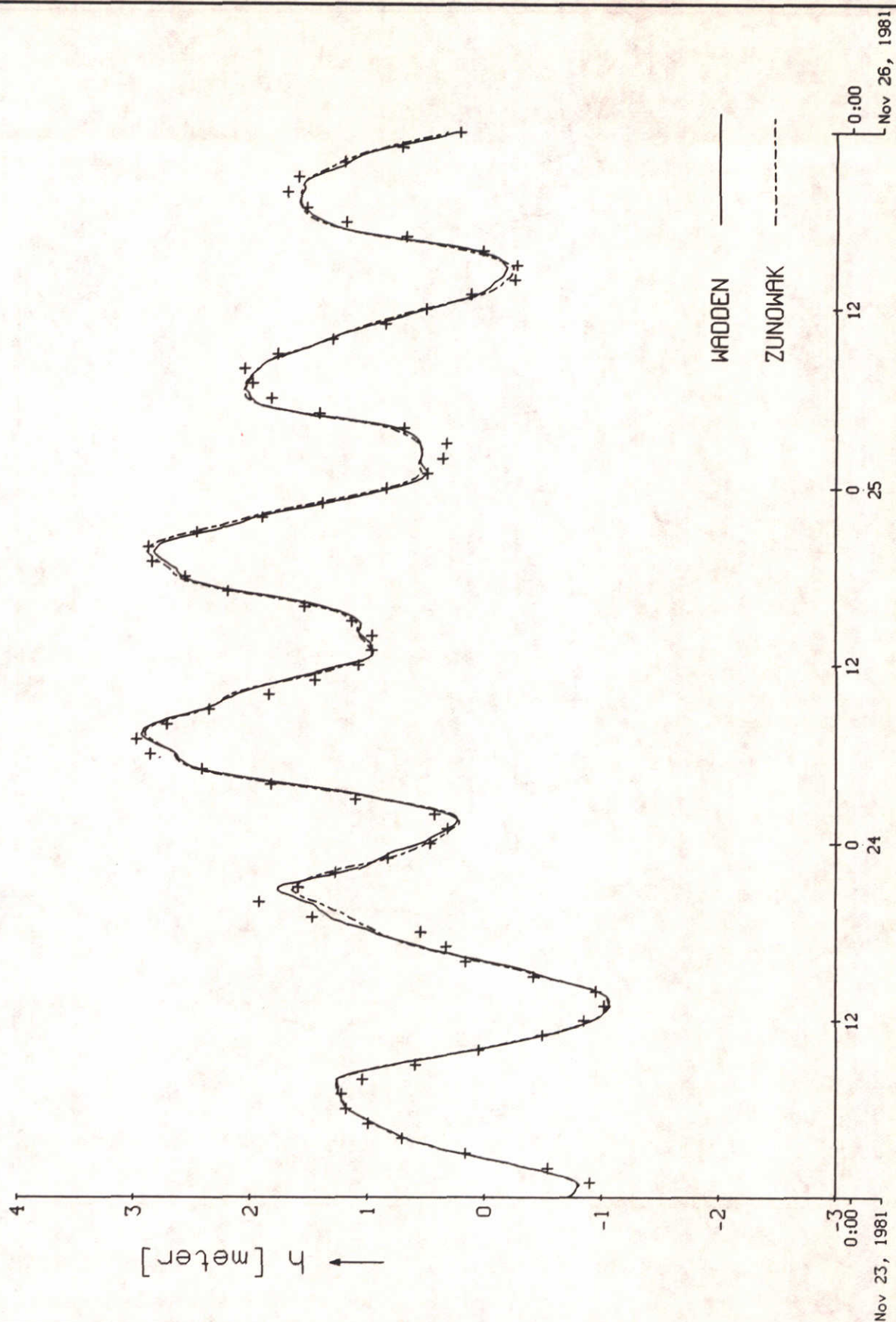
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Wierumergronden

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 13.8



$C_D$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

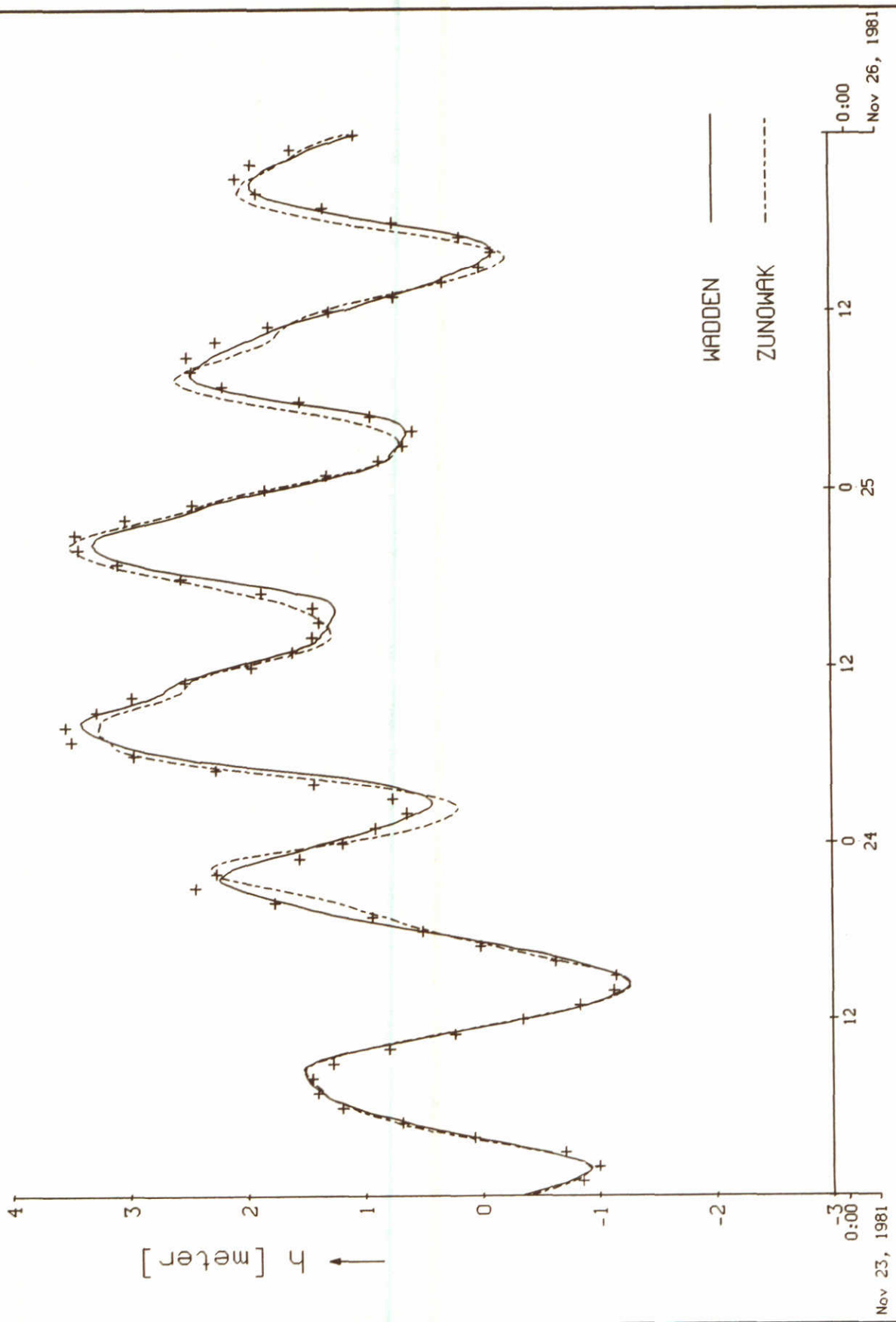
observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Huibertgat

ZUNOWAK / WADDEN

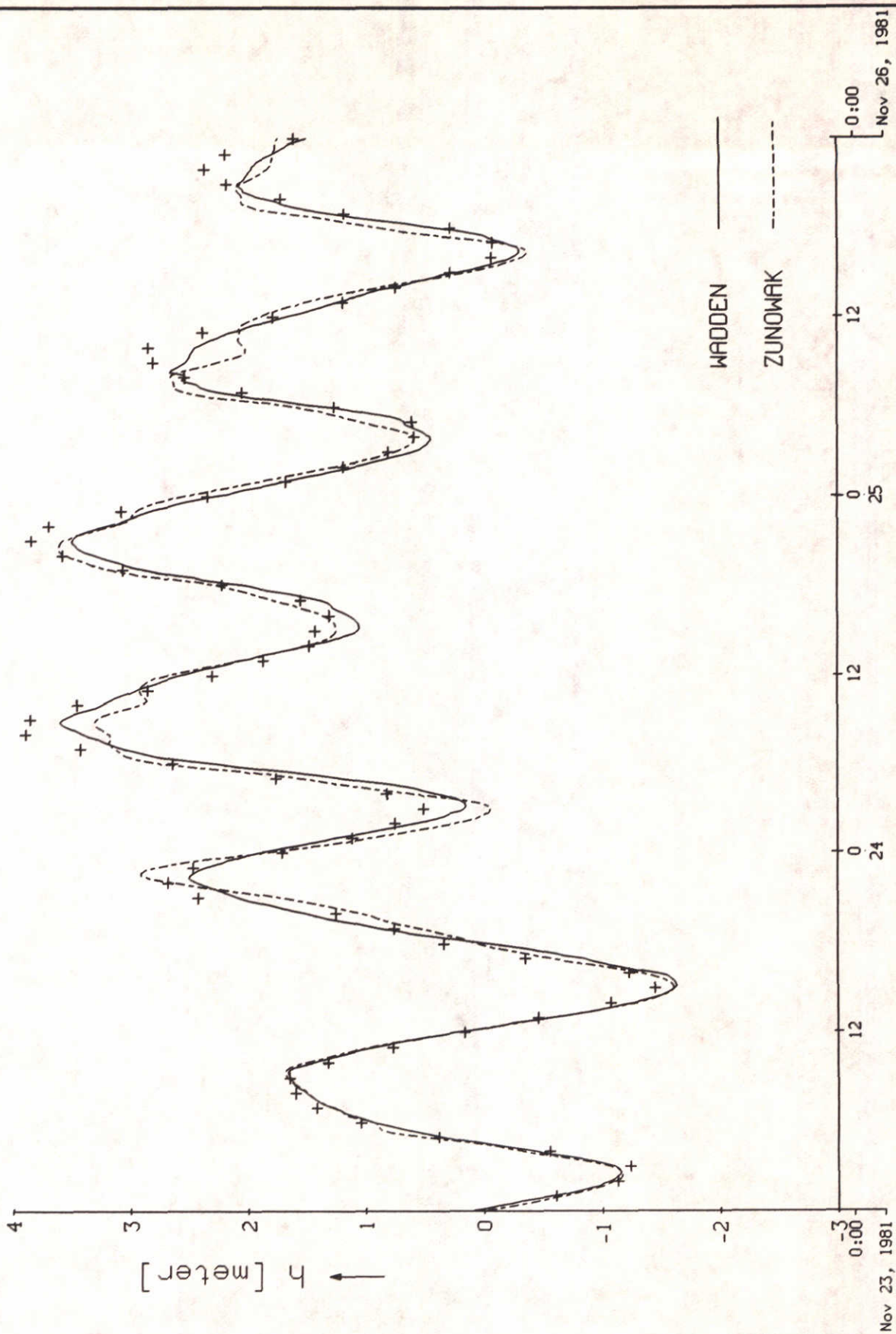
DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig. 13.9



C <sub>d</sub> optimization; febr. 23-25, 1981	nov.1981	
	ZUNOWAK / WADDEN	
DELFT HYDRAULICS	Z-530	Fig.13.10



$C_d$  optimization; nov. 23-25, 1981

nov. 1981

observations (+) and ZUNOWAK, WADDEN predict. at Delfzijl

ZUNOWAK / WADDEN

DELFT HYDRAULICS

Z-530

Fig.13.11



waterproefkundig laboratorium | wv

**hoofdkantoor**  
**Rotterdamseweg 185**  
**postbus 177**  
**2600 MH Delft**  
**telefoon (015) 56 93 53**  
**telefax (015) 61 96 74**  
**telex 38176 hydnl**

**locatie 'De Voorst'**  
**Voorsterweg 28, Marknesse**  
**postbus 152**  
**8300 AD Emmeloord**  
**telefoon (05274) 29 22**  
**telefax (05274) 35 73**  
**telex 42290 hylvo-nl**

