

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIKZ

ECOMORF

**De modellering van de Hydro-
dynamica in het intergetijden-
gebied**

SVASEK



Alkyon

Hydraulic Consultancy & Research

00327/1165-A647

November 2000

1	Inleiding	2
2	Stroming.....	2
2.1	Inleiding	2
2.2	Uitkomsten onderzoek Svašek 1999	2
2.3	Stroommetingen Molenplaat	2
2.4	Bepalen van ruwheden uit beddingvormen en hydraulische parameters	3
2.4.1	Algemeen	3
2.4.2	Bodemgeometrie	4
2.4.3	Getijgemiddelde aanpak	5
2.5	Beschrijving geomorfologische kaart	6
2.6	Modelresultaten	7
2.7	Modelresultaten vertaald naar geomorfologische kaart	8
2.7.1	Puntenwolken	8
2.7.2	Klasseverdeling parameters	9
2.8	Hypothese stroming intergetijdengebieden	12
2.9	Ruwheidsveld intergetijdengebied	13
2.9.1	Inleiding	13
2.9.2	Maximum vloed	15
2.9.3	Maximum eb	15
2.9.4	Vergelijking ruwheden uit geomorfologische kaart en ruwheid uit Svašek 1999 op de Slik van Waarde	15
2.10	Uitkomsten faseverschuiving Middelgat en Gat van Ossensisse	15
2.10.1	Inleiding	15
2.10.2	Maximum vloed	16
2.10.3	Maximum eb	16
2.11	Snelheden op site 1 (snelheidsmeting Molenplaat)	16
2.12	Conclusie	16
3	Golven	18
3.1	Inleiding	18
3.2	Golfberekeningen in de Westerschelde	19
3.2.1	Inleiding	19
3.2.2	Bodemtopografie	20

3.2.3	Opzet golfmodelberekeningen	20
3.2.4	Waterstanden in de Westerschelde	21
3.2.5	Wind	21
3.2.6	Golfrandvoorwaarden	21
3.2.7	Statistische analyse golfmodelberekeningen	22
3.2.8	Resultaten	22
3.3	Gevoeligheidsanalyse	23
3.3.1	Inleiding	23
3.3.2	Opzet vereenvoudigd golfmodel	24
3.3.3	Hydrodynamica tijdens een getijcyclus	24
3.3.4	Gevoeligheid bodemligging	25
3.4	Samenvatting en aanbevelingen	25
4	Golf - Stroominteractie	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Aanpassingssnelheid beddingvormen	27
4.3	Overgang naar golfgedreven beddingvormen:	28
4.4	Golf - stroom interactie	29
4.5	Vergelijking bodemsnelheden	30
4.6	Effecten van stroom op golven in de Westerschelde	31
4.6.1	Inleiding	31
4.6.2	Resultaten van periode 1: 3-7 juni 1996.	32
4.6.3	Resultaten van periode 2: 26-27 mei 1996.	33
4.6.4	Discussie	33
4.7	Conclusies en aanbevelingen m.b.t. de interactie tussen golven en stromingen.	34
5	Samenvatting interviews	36
6	Conclusies	39
Bijlage I:	Interviews	1
I	Interview vragen	1
I.A	Verslag interview A. Sieben d.d. 18 september 2000	2
I.A.1	Rivierbedding zomerbed	2
I.A.2	Uiterwaarden:	3

I.A.3	Terugkoppeling naar intergetijdengebieden	3
I.A.4	Relevante literatuur (RIZA onderzoeken)	4
I.B	Verslag interview G. Klopman dd 21 september 2000	4
I.C	Verslag interview M. Dingemans dd 21 september 2000	5
I.D	Interview M. Zijlema	6
I.E	Interview L. van Rijn	8
I.F	Interview R. van Dijk	9
I.G	Interview met H. de Vriend	10

1 Inleiding

In het kader van het project ECOMORF wordt door het Rijkswaterstaat RIKZ onderzoek verricht naar de reproductiekracht van de bestaande modellen binnen RIKZ voor het intergetijdengebied (WAQUA, SWAN en ESTMORF). In dit project wordt ingegaan op de WAQUA en SWAN modellen.

Uit eerder verkennend onderzoek (Svašek, 1999) is gebleken dat de reproductiekracht in het WAQUA 2D model SCALWEST te wensen over laat. Gezien de ontwikkelings- en calibratiegeschiedenis van dit en andere modellen is dat niet verwonderlijk: in het intergetijdengebied waren in het verleden geen metingen beschikbaar, terwijl de berekeningsresultaten in dit gebied niet of nauwelijks invloed hebben op de grootschalige waterbeweging in het estuarium, zoals het opslingeren van de getijgolf en de debietverdeling tussen de hoofdgeulen.

Dit geldt niet voor vragen vanuit beheer en onderzoek t.a.v. het intergetijdengebied zelf. Deze vragen spitsen zich toe op morfodynamische en ecologische onzekerheden en zijn vaak direct gekoppeld aan gemiddelde en / of maximale stroomsnelheden, inundatietijden etc.

Met het oog op deze problematiek is de doelstelling van het project ECOMORF als volgt omschreven:

- 1 Inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid van de reproductie van de hydrodynamica (het verloop en de grootte van de stroomsnelheden en golfcondities in tijd en ruimte) in het intergetijdengebied (WAQUA en SWAN) en morfologische ontwikkelingen (ESTMORF).
- 2 Bekijken welke verbeteringen en / of aanpassingen mogelijk zijn om de reproductie van het intergetijdengebied te verbeteren. De heersende hydrodynamische condities worden goed voorspeld.
- 3 Het doorvoeren van deze verbeteringen.

In het onderhavige rapport worden de resultaten van de eerste stappen in het onderzoek ^{worden} beschreven die ^{moeten} leiden tot de beantwoording van de doelstelling van ECOMORF. Er wordt onderzoek verricht naar de wisselwerking tussen beddingvormen en hydrodynamica op ondiep water (zowel stroom als golven), waarbij de bevindingen worden getoetst aan waargenomen en berekende resultaten in de Westerschelde. Voor een overzicht van de Westerschelde en de benaming van de verschillende gebieden wordt verwezen naar figuur 1.1.

Het onderzoek is door Rijkswaterstaat RIKZ opgedragen aan een samenwerkingsverband van Alkyon en Svašek. Auteurs van dit rapport zijn G. van Banning en G. van Vledder (Alkyon) en A.J. Blik, M.H.P. Jansen en G. Dam (Svašek). Projectbegeleider van het RIKZ is B.A. Kornman. Daarnaast heeft M. Zijlema (RIKZ) een aanzienlijke bijdrage geleverd.

Opzet van het rapport is als volgt: in hoofdstuk 2 en 3 wordt resp. het stroming en golven gedeelte behandeld. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op golf-stroom interactie. Hoofdstuk 5 geeft een samenvatting van de interviews die in het kader van dit onderzoek afgenomen zijn. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies.

2 Stroming

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op het onderdeel stroming. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het 2Dh model SCALWEST van de Westerschelde. Dit model is gebaseerd op WAQUA in SIMONA. Het model omvat de Westerschelde en de Zeeschelde. De bodemgegevens zijn bepaald uit GIS-gegevens en dateren uit 1996. Het model is afgeregeld op waterstanden en debieten in de hoofdgeulen. Het Intergetijdengebied is niet beschouwd tijdens de afregeling, omdat dit voor de grootschalige waterbeweging niet van belang is en omdat hier in eerste instantie niet prioriteit aan gegeven is. Zie voor een verdere beschrijving van het model Svašek (1997).

In Svašek (1999) is gebleken dat het SCALWEST model in het Intergetijdengebied forse afwijkingen laat zien. Het doel van dit hoofdstuk is aan te geven welke oplossingen mogelijk zijn om de reproductie van SCALWEST te verbeteren.

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd: eerst wordt een beknopte samenvatting gegeven van het Svašek onderzoek dat in 1999 is uitgevoerd op slikken in de Westerschelde. Vervolgens zal ingegaan worden op stroommetingen op de Molenplaat. Waarna de aanwezige literatuur op het gebied van hydrodynamica van intergetijdengebieden wordt behandeld. Dan zal een geomorfologische indeling, zoals deze bestaat voor de Westerschelde, gepresenteerd worden. Aan de hand van modelresultaten van SCALWEST zal vervolgens geprobeerd worden om relaties te leggen tussen de geomorfologie en stroomparameters. Ook zal een ruwheid-schatter gepresenteerd worden voor de verschillende gebieden en aan de hand hiervan zal een nieuw ruwheidsveld gemaakt worden voor SCALWEST. Vervolgens zal gekeken worden wat de invloed is van dit nieuwe ruwheidsveld en hoe de snelheden in het intergetijdengebied verbeterd kunnen worden.

2.2 Uitkomsten onderzoek Svašek 1999

In Svašek (1999) is een aantal stroommetingen op slikken vergeleken met modeluitkomsten van SCALWEST. Uit deze analyse is gebleken dat in SCALWEST de eb- en vloednelheden te laag worden berekend met een factor 1.5 tot 2. In twee meetlocaties worden de snelheden wel goed berekend. Vloed- en ebdominantie en dood- en springtijcycli worden goed door het model weergegeven op de slikken. Ebsnelheden worden over het algemeen beter weergegeven dan vloednelheden. Een aantal verschillen tussen de berekende en gemeten stroomsnelheden kunnen gewijd worden aan meetfouten, bv. bij de richtingen. In figuur 2.1 is een voorbeeld gegeven van een meetlocatie op het slik bij Waarde.

Vervolgens is geprobeerd met behulp van een gevoeligheidsonderzoek vast te stellen wat de belangrijkste parameter is die deze afwijking kan verklaren. De parameter die de meeste invloed had bleek de bodemruwheid te wezen. Andere onderzochte parameters waren: bodemhoogte, viscositeit, droogvalprocedure en tijdstap. De invloed daarvan bleek echter ondergeschikt te zijn aan het effect van de bodemruwheid. Ook uit een theoretische beschouwing uit dat rapport tussen verschillende parameters van het model blijkt dat op platen met name de verhangterm en de wrijvingsterm een grote rol spelen in de waterbeweging. De traagheid speelt een minder grote rol.

Aanbevolen werd om met een plaatsafhankelijke ruwheid te rekenen.

2.3 Stroommetingen Molenplaat

In 1996 en 1997 zijn stroommetingen uitgevoerd op de Molenplaat in de Westerschelde (project ECOFLAT). De Molenplaat ligt tussen het Middelgat en de Overloop van Hansweert (zie figuur

2.2). De gebruikte meetlocatie (site 1) bevindt zich op de oever van de secundaire geul langs de Molenplaat die een kortsluitfunctie heeft tussen de twee hoofdgeulen. De meetlocatie is vergeleken met uitkomsten van SCALWEST voor diezelfde periode (3 - 7 juni 1996). De resultaten zijn gepresenteerd in figuur 2.3. De maximale windsnelheid bedraagt ongeveer 5 m/s tijdens deze periode.

Uit de figuur blijkt dat de vloodsnelheden redelijk goed door het model worden gereproduceerd, maar het tijdstip van kenteren op hoogwater en de ebsnelheden wordt niet goed door het model gereproduceerd, net zoals de eb-vloeddominantie.

De snelheden tijdens eb worden te hoog berekend. Dit is in tegenstelling tot Svašek (1999) waar stroomsnelheden van de slikken vergeleken zijn en waar SCALWEST te lage snelheden op de slikken berekende. De hoogte van het meetpunt bedraagt ongeveer NAP-1,0 m.

De afwijking van het model kan mogelijk als volgt verklaard worden: platen liggen tussen twee hoofdgeulen. In de stroming over de plaat wordt in grote mate bepaald door het verhang tussen de twee hoofdgeulen. Dit verhang wordt weer bepaald door het faseverschil tussen de twee geulen. Een kleine fasefout in het model in een bepaalde geul kan al leiden tot een verkeerd verhang en dus verkeerde stroomsnelheden. Dit is mogelijk ook het geval bij de Molenplaat. Het faseverschil op hoogwater (tijdstip van kenteren) kan een indicatie zijn dat er een fasefout in het model zit.

Bij een slik wordt de stroming bepaald door het verhang in de hoofdgeul naast het slik en de ruwheid van het slik bepaald in hoeverre de snelheid 'meegaat' met de hoofdstroom. Dit wezenlijke verschil is mogelijk de oorzaak van het verschil tussen het te hoog berekenen (plaat) en het te laag berekenen (slik) van de ebstroomsnelheden. Op de plaat is vooral het verhang van belang voor het bepalen van de snelheid en op het slik wordt de snelheid vooral bepaald door de ruwheid.

2.4 Bepalen van ruwheden uit beddingvormen en hydraulische parameters

2.4.1 Algemeen

In de literatuur worden 2 sporen beschreven waarlangs bodemruwheidswaarden worden bepaald.

Bij het eerste spoor wordt de bodemruwheid afgeleid uit waargenomen beddingvormen en de korreldiameter. De ruwheid is in deze benadering een functie van de ribbelhoogte en soortgelijke kentallen voor de bodemgeometrie. Dit spoor wordt nader uitgewerkt in paragraaf 2.4.2.

Het tweede spoor legt een koppeling tussen de bodemruwheid en de hydraulische omstandigheden, de waterdiepte en de korreldiameter. De gedachte hierachter is dat de hydraulische belasting een bodemschulpspanning genereert waarop de beddingvorm en dus de ruwheid interactief reageert. Deze benadering kan leiden tot een iteratieve bepaling van de ruwheid en de bijbehorende hydraulische belasting.

In paragraaf 2.4.3 wordt dit verder uitgewerkt voor de situatie waarbij de hydraulische belasting uitsluitend uit een constante stroomsnelheid bestaat.

Situaties met wisselende snelheden (getij) en bij combinatie van stroom en golven komen in latere paragrafen aan de orde.

Door combinatie van de benadering van paragraaf 2.4.2 (ruwheid uit bodemgeometrie) en van paragraaf 2.4.3 (ruwheid uit stroming) is het in principe mogelijk om op basis van een waargenomen beddingvorm (bijvoorbeeld een luchtfoto) een schatting te maken van de heersende stroomsnelheden in het betreffende gebied. In paragraaf 2.5 zal dit worden uitgewerkt voor de geomorfologische kaart van de Westerschelde.

2.4.2 Bodemgeometrie

Van Rijn (1993) geeft een methode om de bodemruwheid af te schatten aan de hand van de korreldiameter en bedvorm:

$$K = k' + k''$$

waarin:

k	: Nikuradse waarde	(m)
k'	: korrelgerelateerde k waarde	(m)
k''	: bedvorm gerelateerde k waarde	(m)

Voor de bepaling van de korrelgerelateerde ruwheid k' volgt uit verschillend onderzoek (Kamp-huis(1974), Lyn (1991)):

$$k' = 3 \text{ tot } 5 d_{90}$$

met d_{90} = korreldiameter waarbinnen 90% van het gewicht van een zandfractie valt.

Hier aangehouden:

$$k' = 3 d_{90}$$

Voor de bepaling van de bedvorm gerelateerde k'' volgt uit Van Rijn (1984):

Voor ribbels:

Volgens Van Rijn zijn ribbels gedefinieerd als bedvormen met een ribbellengte kleiner dan de waterdiepte. Voor de Westerschelde geldt dat de ribbels meestal een lengte hebben van enkele centimeters.

$$k'' = 20 \gamma_r \Delta_r (\Delta_r / \gamma_r)$$

met:

k''	: bedvorm gerelateerde k waarde	(m)
Δ_r	: ribbelhoogte	(m)
λ	: ribbellengte	(m)
γ_r	: ribbelparameter	(= 1)

Voor megaribbels $\lambda \approx 7 h$

$$k'' = 1.1 * 0.7 * \Delta_d (1 - \exp(-25 \Delta_d / \lambda_d))$$

met:

k''	: bedvorm gerelateerde k -waarde	(m)
Δ_d	: megaribbel hoogte	(m)
λ_d	: megaribbel lengte	(m)

De formules zijn gebaseerd op waargenomen data. In de data zit nog een grote spreiding, zodat de formules meer een relatieve dan een absolute indicatie geven van de ruwheden.

2.4.3 Getijgemiddelde aanpak

Er zijn verschillende methodes om op basis van getij geïntegreerde parameters een ruwheid af te schatten. Parameters die o.a. gebruikt worden zijn: waterdiepte, gemiddelde snelheid en verhang.

Engelund en Hansen (1967) stellen voor om de volgende relatie te gebruiken:

$$\tau_{b,c} = \tau_{b,c'} + \tau_{b,c''}$$

waarin:

$$\begin{aligned} \tau_{b,c} &: \text{bodemschuifspanning} && (\text{N/m}^2) \\ \tau_{b,c'} &: \text{korrelgerelateerde bodemschuifspanning} && (\text{N/m}^2) \\ \tau_{b,c''} &: \text{bedvormgerelateerde bodemschuifspanning} && (\text{N/m}^2) \end{aligned}$$

en

$$\begin{aligned} \tau_{b,c} &= \rho g h l \\ \tau_{b,c'} &= \rho g h' l && \text{of} && u_{*,c'} &= (g h' l)^{0,5} \\ \tau_{b,c''} &= \rho g h'' l && \text{of} && u_{*,c''} &= (g h'' l)^{0,5} \end{aligned}$$

waarin:

$$\begin{aligned} \rho &: \text{dichtheid water} && (\text{kg/m}^3) \\ h &: \text{waterdiepte} && (\text{m}) \\ g &: \text{gravitatie versnelling} && (\text{m/s}^2) \\ l &: \text{verval/ energiegradiënt (-)} \\ h' &: \text{korrelgerelateerde diepte} && (\text{m}) \\ h'' &: \text{bedvormgerelateerde diepte} && (\text{m}) \end{aligned}$$

Hierop gebaseerd kan het volgende worden afgeleid:

$$(u_{*,c}/u_{*,c'})^2 = h'/h \quad \text{of} \quad \theta'/\theta = h'/h$$

Waarin θ en θ' gedefinieerd zijn als deeltjes mobiliteitsparameters met als definitie:

$$\theta = h l / (s \cdot 1) d_{50}$$

De deeltjes mobiliteitsparameter is een verhouding tussen de hydrodynamische vloeistof krachten en het gewicht van het deeltje.

Vervolgens wordt er vanuit gegaan dat de getijgemiddelde stroomsnelheid bepaald kan worden volgens deze relatie:

$$u = 2.5 u_{*,c} \ln \left(\frac{12 h'}{2.5 d_{50}} \right)$$

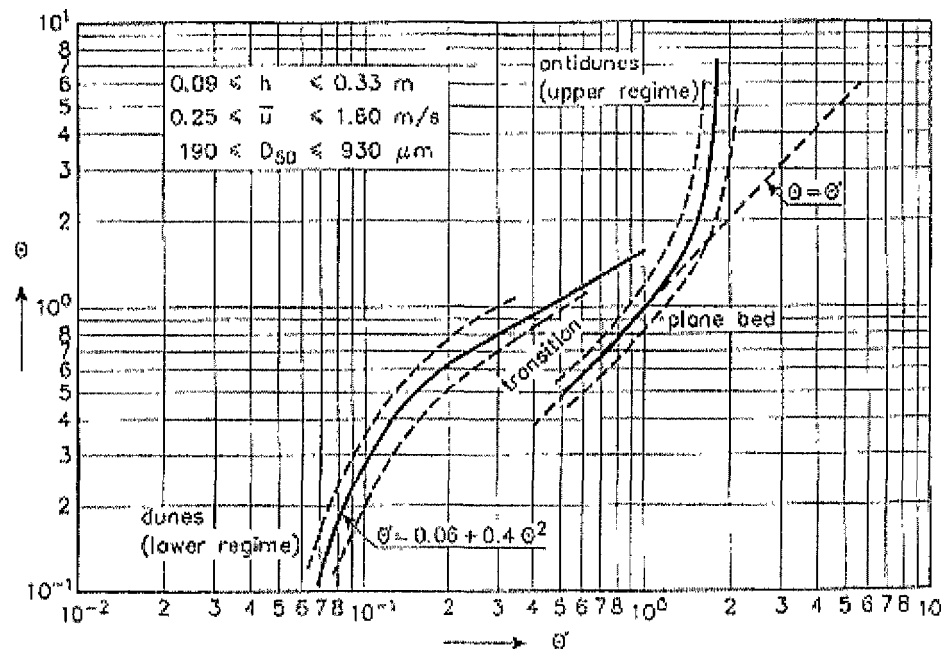
en daaruit volgt de Chézy coëfficiënt door middel van $u = C(hl)^{0,5}$ en $u_{*,c} = (g h' l)^{0,5}$:

$$C = 2.5 g^{0,5} (h'/h)^{0,5} \ln(12 h' / 2.5 d_{50})$$

of

$$C = 2.5 g^{0,5} (\theta'/\theta)^{0,5} \ln(12 h' / 2.5 d_{50})$$

Op basis van veldmetingen zijn vervolgens de θ' en θ bepaald en uitgezet in onderstaand diagram:



Mobility parameters θ' and θ according to Engelund and Hansen (1967)

Twee regimes kunnen worden onderscheiden:

Laag regime: $\theta' = 0,06 + 0,4 \theta^2$ voor $\theta < 0,7$

Hoog regime: $\theta' = \theta$ voor $0,7 < \theta < 1$

$\theta' = (0,3 + 0,7 \theta^{-1,8})^{0,56}$ voor $\theta > 1$

Vervolgens wordt er een iteratieve methode voorgesteld om de Chézy coëfficiënt te schatten.

methodiek:

1. bepaal h' ($\approx 0,33 h$)
2. bereken u'^*,c en θ'
3. bepaal θ uit formules
4. bereken $h' = h^*(\theta'/\theta)$
5. herhaal totdat h' is constant
6. bereken C
7. bereken I uit $u = C(RI)^{0,5}$

Ten opzicht van de andere methodes laat de Van Rijn methode de beste resultaten zien voor veldgegevens. In het vervolg zal dan ook de Van Rijn methode gebruikt worden.

2.5 Beschrijving geomorfologische kaart

Aan de hand van luchtfoto's uit juli 1996 is het intergetijdengebied van de Westerschelde (Vlissingen - grens) ingedeeld in geomorfologische eenheden (Meetkundige dienst, 1997). Dit is een weergave van de getijgedreven morfodynamica en is indirect een maat voor de stroomsnelheid. Aan de hand van deze indeling zal geprobeerd worden per eenheid een ruwheid te bepalen, waarna in SCALWEST zal worden nagegaan of er een correlatie bestaat met de berekende hydraulische omstandigheden.

De volgende indeling is aangehouden:

Morf. Eenheid	Dynamiek	bedvorm	afkorting		oppervlak (ha)	Bedding hoogte (m)	Lengte van de bedding vorm (m)	bijzonderheid
Plaat/Silk (P)	Laag energetisch	vlak	P1a1	zand	1596	< 0,05 m		
			P1a2	slibrijk zand	1228	< 0,05 m		
			P1a3	slibrijk	1594	< 0,05 m		
	Hoog energetisch	gegolfd	P2a		475	< 0,25 m	> 10 m	Golfge-stuurd
		megaribbels	P2b1	2D	985	> 0,25 m	< 25 m	$u_{max} < 0,8 \text{ m/s}$
			P2b2	3D	575	> 0,25 m	< 25 m	$u_{3d} > u_{2d}$
		vlak	P2c		922	< 0,25 m	> 25 m	$u < u_{3d}$
	Ruggen		P3		23			geïsoleerd
	Water		P4		4			
Kreek			K		517			
Hard substraat			H		308			veen
Duin			D		38			Wind-Invloed
Schor			S		2588			begroeid
Totaal					10922			

Tabel 2.1: indeling geomorfologische gebieden volgens Huijs 1995/Terwindt(1986)

De gegevens zijn beschikbaar in ARC/INFO en staan in figuur 2.4

Mondelinge toelichting door Dick de Jong (RIKZ):

- 3D megaribbels hebben een maximum hoogte van 2 m en een gemiddelde hoogte van 1 m;
- 2D megaribbels hebben een maximum hoogte van 1 m en een gemiddelde hoogte van 0,5 m;
- Er is een vrij abrupte overgang in ribbelhoogte: tot 5 cm komt veel voor en daarna pas weer (mega)ribbels van 0,4 a 0,5 meter;
- Op de westelijke koppen van platen (Hoge Platen en Rug van Baarland) komt een gegolfd profiel voor. De hoogte van de ribbels ligt tussen de 15 à 25 cm en de lengte is net zo lang als van megaribbels. De gebieden lijken heel dynamisch, maar dat zijn ze waarschijnlijk niet. Deze gebieden ontstaan waarschijnlijk door golfwerking.
- De overige hoogenergetische profielen ontstaan met name door stroming;
- Duinen liggen niet in de stroomvoerende delen van de Westerschelde. Ze liggen voornamelijk in de luwte, zoals de Sloehaven bij Rammekens (de Kaloot). Voor dit onderzoek zijn ze niet van belang.

In het vervolg van het onderzoek zal gezocht worden naar een relatie tussen stroomparameters uit SCALWEST en de hier gepresenteerde geomorfologische indeling.

2.6 Modelresultaten

Aan de hand van een cyclisch gemaakt getij met een getijcoëfficiënt van 1.08 (bij Vlissingen) is een SCALWEST-berekening gedaan. Hierbij is de ruwheid op de platen en slikken gehalveerd, omdat uit Svašek (1999) gebleken is dat dit een verbetering geeft qua snelheden.

Het getij is cyclisch gemaakt zodoende dat er netto evenveel in als uit de Westerschelde stroomt. De volgende parameters zijn berekend per roosterpunt van het model:

- Maximum stroomsnelheid;
- Gemiddelde stroomsnelheid;
- Maximum stroomsnelheid eb;
- Maximum stroomsnelheid vloed;
- Gemiddelde stroomsnelheid tijdens eb;

- Gemiddelde stroomsnelheid tijdens vloed;
- Aantal minuten van de ebperiode;
- Aantal minuten van de vloedperiode;
- Gemiddelde waterstand;
- Gemiddelde waterdiepte;
- Dominant volume;
- Getijvolume;
- Maximum bodemschuifspanning van het cyclisch getij;
- Gemiddelde bodemschuifspanning over het cyclisch getij.

De maximale stroomsnelheid en de maximale bodemschuifspanning staan in figuur 2.5.

In de volgende paragraaf zullen deze uitkomsten gebruikt worden om relaties te leggen tussen hydraulica en beddingvorm.

2.7 Modelresultaten vertaald naar geomorfologische kaart

2.7.1 Puntenwolken

Aan de hand van de hydraulische parameters uit het SCALWEST-model (zie vorige paragraaf) en de geomorfologische kaart is onderzocht of er een verband te vinden is tussen de hydraulica en de beddingvorm. In de gebruikte modeluitkomsten kunnen zoals bekend fouten zitten, zodoende moeten de resultaten met de nodige voorzichtigheid bekeken worden. Gerekend is met cyclische randvoorwaarden.

In eerste instantie is hiertoe per punt de gemiddelde stroomsnelheid uitgezet tegen de gemiddelde waterdiepte. Deze gemiddelden zijn bepaald over de periode waarin het betreffende punt geïnundeerd is.

Indien alle ondiepe roosterpunten van het model in een figuur worden uitgezet ontstaat één grote puntenwolk. Vervolgens is deze relatie uitgezet voor die punten die volgens de geomorfologische kaart tot dezelfde geomorfologische eenheid behoren.

De resultaten staan in figuur 2.6 t/m 2.12. De grijze punten zijn alle punten van het model. De rode punten zijn de punten van de specifieke geomorfologische eenheid. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen slikken en platen. Een slik wordt hierbij gedefinieerd als een intergetijdgebied dat vast aan de oever ligt. Een plaat is een intergetijdgebied dat omsloten wordt door geulen¹.

In de figuren is ook aangegeven hoe de indeling moet zijn volgens van Rijn (1993). De zwarte doorgetrokken lijnen geven de grenzen ($T=0, 3, 10, 15, 25$) aan waarbinnen de volgende classificering moet vallen:

Transport regime		$1 \leq D_* \leq 10$	$D_* > 10$
Lower	$0 \leq T \leq 3$	Mini-ripples	Dunes
	$3 < T \leq 10$	Mega-ripples and dunes	Dunes
	$10 < T \leq 15$	Dunes	Dunes
Transition	$15 < T \leq 25$	Washed-out dunes, sand waves	
Upper	$T \geq 25, Fr < 0.8$	(symmetrical) sand waves	
	$T \geq 25, Fr \geq 0.8$	Plane bed and/ or anti-dunes	

Tabel 2.2: Classificatie van bed-vormen volgens van Rijn (1993)

¹ De plaat van Baarland is vanwege de ligging als slik gedefinieerd.

Waarin:

$T = (\tau'_{b,c} - \tau_{b,cr}) / \tau_{b,cr}$	= bodemschuifspanningsparameter
$\tau'_{b,c} = \rho g(u/C')^2$	= korrel gerelateerde bodemschuifspanning
ρ	= dichtheid water
g	= zwaartekrachtversnelling
u	= diepte gemiddelde snelheid
$C' = 18 \log(12h/3d_{90})$	= korrel gerelateerde Chézy-coëfficiënt ($d_{90} = 400 \cdot 10^{-6}$ (geschat))
$\tau_{b,cr} = 0.18$	= uit Shields curve, $d_{50} = 200 \cdot 10^{-6}$ (geschat)
$D_* = d_{50}[(s-1)g/u^2]^{1/3}$	= deeltjesdiameter parameter = 5.0 (met $d_{50} = 200 \cdot 10^{-6}$)
$s = \rho_s/\rho$	= relatieve dichtheid (2650/1000)
ν	= kinematische viscositeit coëfficiënt

Deze indeling is opgesteld voor zandige rivieren. Hiermee moet rekening mee worden gehouden.

Alhoewel de spreiding van de puntenwolken groot is kunnen de volgende conclusies uit de figuren getrokken worden:

- Slikken kunnen bij een grote gemiddelde waterdiepte nog lage snelheden (kleiner dan 0.1 m/s) geven. Bij platen is dit veel minder het geval, hier ligt de puntenwolk theoretisch gezien beter. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is dat de bodemligging van platen veel beter gemeten worden (boten kunnen hier nog grotendeels overheen). Verder is bekend dat de bodem van het SCALWEST-model van sommige slikken en schorren niet uit 1996 is, maar een stuk ouder. Een andere verklaring kan zijn dat kombergingsgebieden grotendeels grenzen aan slikken. Dit kunnen kleine gebieden zijn aan de dijk. Het vullen en legen van deze gebieden geschiedt via de slikken. De snelheden in de toegangseulen van deze gebieden wordt dus bepaald door de komberging.
- Enkele soorten platen geven een substantieel hogere stroomsnelheid dan de slikken (hoog gegolfd, hoog dynamische 3d megaribbels).
- In hoogdynamische gebieden zijn de gemiddelde stroomsnelheden hoger dan in laagdynamische gebieden.
- De punten van de megaribbels liggen voor het grootste deel in het mini-ribbels gedeelte. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de stroomsnelheid in een rivier (waar van Rijn mee rekent), niet hetzelfde is als de getijgemiddelde snelheid, waarmee hier gerekend is. Waarschijnlijk ligt de vorm bepalende snelheid ergens tussen de getijgemiddelde snelheid en de maximale snelheid. Mede hierdoor is het vrijwel onmogelijk een uitspraak te doen over hoe SCALWEST presteert in het intergetijdengebied aan de hand van deze theoretische beschouwing.

2.7.2 Klasseverdeling parameters

Op basis van de beschikbare gegevens uit paragraaf 2.5 (geomorfologische kaart) zijn de volgende karakteristieken voor de verschillende geomorfologische gebieden geschat.

Morf. Eenheid	Dynamiek	beddingsvorm	afk.		d ₉₀	Bedding hoogte (m)	Lengte van de bedding vorm (m)	bijzonderheden
Plaat/Silk (P)	Laag energetisch	Vlak	P1a1	Zand	0.000360	0.025	0.13	
			P1a2	slibrijk zand	0.000180	0.02	0.08	
			P1a3	Slibrijk	0.000040	0.01	0.05	
	hoog energetisch	Gegolfd	P2a		0.000400	0.20	15	
		Megaribbels	P2b1	2D	0.000400	0.50	20	
			P2b2	3D	0.000400	1.00	20	
		Vlak	P2c		0.000400	0.05	100	
	ruggen		P3		0.000400	0.05	60	In stroomrichting kleine ribbels
	water		P4		0.000400	0.15	5	gemiddelde waarde aangenomen
Kreek			K		0.000400	0.15	5	gemiddelde waarde aangenomen
Hard substraat			H		0.040000			veen
Duin			D		0.000200			
Schor			S		0.300000			begroeiing

Tabel 2.3: Afmetingen karakteristieke geomorfologische gebieden (in m)

In de literatuur worden de volgende korreldiameters genoemd:

Platen van Ossensisse : $d_{50} = 152 \mu\text{m}$ Israel (1997)

Plaat van Baarland : $d_{90} = 267 \mu\text{m}$ Duijker (1998)

Voor geulen in de Westerschelde wordt vaak $d_{50} = 250 \mu\text{m}$ aangehouden (McClaren (1994), Svašek (1998)).

Voor de korreldiameter is voor zand uitgegaan van een $d_{50} = 150\text{-}250 \mu\text{m}$ en voor slib van een $d_{50} = 20\text{-}30 \mu\text{m}$. Voor slib is daarom gekozen voor een $d_{90} = 40 \mu\text{m}$, voor slibrijk zand een $d_{90} = 180 \mu\text{m}$ en voor zand een $d_{90} = 360\text{-}400 \mu\text{m}$.

Bij de schatting van de ribbelhoogte en lengte is gebruikt gemaakt van de aanvullende informatie van Dick de Jong.

Op basis van de formules zoals gepresenteerd in paragraaf 2.4.2 zijn uit de bovenstaande tabel de volgende ruwheden berekend (hierbij is geen rekening gehouden met de vegetatie):

morf. Eenheid	Dynamiek	Beddingvorm	afk.		k' (m)	k'' (m)	k totaal (m)	Bijzonderheden
Plaat/Silk (P)	Laag energetisch	Vlak	P1a1	Zand	0.0011	0.0191	0.0202	
			P1a2	Slibrijk zand	0.0005	0.0154	0.0159	
			P1a3	Slibrijk	0.0001	0.0076	0.0078	
	Hoog energetisch	Gegolfd	P2a		0.0012	0.0437	0.0449	
		Megaribbels	P2b1	2D	0.0012	0.1789	0.1801	
			P2b2	3D	0.0012	0.5494	0.5506	
		Vlak	P2c		0.0012	0.0005	0.0017	
	Ruggen		P3		0.0012	0.0008	0.0020	
	Water		P4		0.0012	0.0900	0.0912	
Kreek			K		0.0012	0.0900	0.0912	
Hard substraat			H		0.1200		0.1200	Schatting van totale ruwheid
Duin			D		0.0006		0.0006	idem
Schor			S				0.6000	k = 2d ₉₀

Tabel 2.4: Geschatte ruwheden geomorfologische gebieden (in m)

In figuur 2.13 zijn de Nikuradse ruwheden zoals vanuit tabel 2.4 berekend gepresenteerd. Witte gebieden in de figuur zijn de geulen.

In de figuren 2.14 t/m 2.20 is voor alle parameters die in paragraaf 2.6 zijn genoemd het oppervlak tegen de grootte van de parameter uitgezet. Op deze manier is duidelijk te zien welke waarde het meest voorkomt in een bepaald geomorfologisch gebied.

In de titel van de figuren staat de correlatie met de in tabel 2.4 genoemde geschatte ruwheden. Deze zijn ook in onderstaande tabel gepresenteerd.

Parameter	Correlatiecoëfficiënt
Maximum stroomsnelheid	0,51
Maximum stroomsnelheid vloed	0,47
Maximum stroomsnelheid eb	0,38
Gemiddelde stroomsnelheid	0,42
Gemiddelde stroomsnelheid vloed	0,46
Gemiddelde stroomsnelheid eb	0,23
Gemiddelde waterstand	-0,22
Gemiddelde waterdiepte	0,32
Maximum bodemschuifspanning	0,54
Gemiddelde bodemschuifspanning	0,50
$U_{\max}$	0,52
Dominant Volume	0,34
Getijvolume	0,38

Tabel 2.5: Correlatie coëfficiënten (berekend uit de covariantie)

Uit Svašek (1999) is gebleken dat met een gehalveerde ruwheid op ondiepwatergebieden de reproductie van SCALWEST op de slikken verbeterd wordt. Hierom zijn de berekeningen ook uitgevoerd met dit ruwheidsveld. Aangezien dit een eerste benadering is om de reproductie te verbeteren in het intergetijdengebied kan de correlatie tegenvallen. Bovenstaande tabel is dus een eerste schatting van de afhankelijkheid van bepaalde parameters met de geschatte ruwheid.

De berekende correlatiecoëfficiënt is alleen uitgerekend voor de platen en slikken. De waarden voor de overige gebieden (Kreek, Schor, Duin, Hardsubstraat) zijn niet gebruikt.

Hierbij vallen de volgende zaken op:

- Alle correlatiecoëfficiënten zijn laag.
- De maximum stroomsnelheid is een betere schatter dan de gemiddelde snelheid.
- De stroomsnelheid tijdens vloed (vaak het maximum) correleert beter dan de stroomsnelheid tijdens eb.
- De bodemschuifspanningen correleren relatief goed. De maximale bodemschuifspanning is iets beter dan de gemiddelde.
- Het dominant volume en het getijvolume zijn geen goede voorspellers van de bodemruwheden.

Hoewel de methodiek veel onzekerheden en onnauwkeurigheden kent, bijvoorbeeld omdat berekeningsresultaten met een (waarschijnlijk) onjuiste Manningwaarde worden gecorreleerd aan geschatte ruwheden, geeft het toch een goed beeld welke parameters geschikt zouden kunnen zijn om ruwheden in het intergetijdengebied te schatten. De maximum stroomsnelheden, de bodemschuifspanningen en de $u_{\max}$ zijn de parameters die het meeste invloed hebben op de beddingvorm en daarmee op de bodemruwheid.

2.8 Hypothese stroming intergetijdengebieden

Uit de voorgaande paragrafen kan de volgende gedachtenlijn opgesteld worden:

Uitgaande van een eenvoudige benadering voor stroming, $u = C (h t)^{0.5}$, (waarbij traagheid verwaarloosd wordt) zijn er drie belangrijke parameters die de stroomsnelheid bepalen: Chézy-coëfficiënt ($C = h^{1/6}/n$), waterdiepte en verhang.

waarbij:

n : Manningwaarde ($m^{-1/3}s$)

Voor het afregelen van een model in het intergetijdengebied moet aan de hand van bovenstaande parameters onderscheid gemaakt worden tussen drie verschillende soorten gebieden:

- 1 Kombergingsgebieden. Dit zijn gebieden die alleen een bergende functie hebben voor het water en geen stroomvoerende. Voor wat betreft de afregeling kan gezegd worden dat als de reproductie van de *waterstand in de hoofdgeul* direct grenzend aan het kombergingsgebied goed door het model kan worden weergegeven, de waterbeweging in het kombergingsgebied ook goed kan worden weergegeven (afgezien van fouten in de schematisatie). Het gebied zal zich ten allen tijde willen vullen, de afregeling van het model in dat gebied (met name ruwheid) is van minder belang. De waterbeweging wordt gestuurd door het kombergend vermogen van het gebied. Gebieden in de Westerschelde zijn het Land van Saeftinge en hooggelegen schorren.
- 2 Slikken. Slikken zijn gebieden die langs een stroomvoerende (hoofd)geul liggen. Deze gebieden zijn in feite de 'ulterwaarden' van de geul. De snelheden op een slik zijn dan ook afhankelijk van het *verhang in de geul*. In hoeverre de stroming op het slik meestroomt met de hoofdstroom is afhankelijk van de ruwheid op het slik. Dit is ook gebleken in Svašek (1999), waarbij de ruwheid de enige parameter was om de snelheden op slikken te beïnvloeden.
- 3 Platen: Dit zijn gebieden omsloten door geulen, waarbij de stroming over de plaat gegeneerd wordt door het *waterstandsverschil over de plaat*. Dit waterstandsverschil wordt bepaald door de faseverschillen tussen de twee (omliggende) hoofdgeulen. Een groot gedeelte van het getij is er echter geen stroming over de plaat. Voor de gebieden waarvoor dit geldt zouden dan in de categorie 'slik' moeten vallen.
Het SCALWEST model is afgeregeld op waterstanden en debieten waarbij ook gekeken is naar de debieten door de individuele geulen. Vanwege het beperkt aantal metingen hebben geulparen en het intergetijdengebied dezelfde ruwheid gekregen (Manning). Het gevolg hiervan is dat de waterstanden in de hoofdstations wel goed berekend worden, maar dat individuele geulen soms te veel en soms te weinig water kunnen trekken. Hierdoor kunnen de fases van individuele geulen niet geheel kloppen met de werkelijkheid. De kortsluitgeulen zullen dan gebruikt worden om het faseverschil tussen de geulen te compenseren. Hierdoor zal er meer water door de kortsluitgeulen stromen dan in werkelijkheid het geval is. Deze hypothese wordt ondersteund door het feit dat op de gebruikte locatie van de Molenplaat de ebsnelheden in het SCALWEST-model hoger zijn dan de metingen. Bovendien wordt de eb-vloed dominantie niet goed weergegeven door het model op de Molenplaat, terwijl dit bij slikken wel het geval is (paragraaf 2.3). Ook dit is nog een aanwijzing dat er onderscheid gemaakt moet worden tussen platen en slikken, waarbij het verhang over een plaat belangrijker is dan de weerstand.

Het verschil tussen een slik en een plaat zoals boven aangegeven is niet eenduidig. Er zijn ook gedeeltes op platen waarbij de stroming in sterke mate bepaald wordt door alleen de hoofdgeul en dus volgens bovenstaande indeling in de categorie 'slik' moeten vallen.

Deze indeling vereist een oplopende mate van afregeling.

Voor kombergende gebieden is een globale afregeling voldoende. De waterbeweging wordt in sterke mate bepaald door de kombergingsgrafiek.

Bij slikken zijn naast de globale afregeling ook de weerstand op het slik en de bodemligging van belang voor de snelheden aldaar. Dit vereist dus een gedetailleerde afregeling van ruwheden op de slikken. De waterbeweging op platen tenslotte vereist dat naast de globale afregeling en de ruwheden ter plaatse ook de fases tussen de hoofdgeulen kloppen. Een klein faseverschil kan de snelheden over de plaat al beïnvloeden. Dit vereist dus een afregeling van de afzonderlijke geulen. Nu hebben geulparen nog dezelfde ruwheid. Bij deze afregeling zal iedere geul een afzonderlijke ruwheid moeten krijgen, zodanig dat de globale waterbeweging hetzelfde blijft (de waterstanden in de hoofdstations blijven gelijk), maar de waterbeweging in de afzonderlijke geulen verbeterd wordt. Voor deze afregeling is het noodzakelijk dat er voldoende en betrouwbare metingen beschikbaar zijn.

Op basis van de bovenstaande resultaten en de berekeningsresultaten kan een schatting gemaakt worden van de verbetering van het eindresultaat (stroomsnelheid) indien de betreffende parameter nauwkeuriger wordt bepaald.

	Komberging	Slik	Plaat
Manning	0	++	+
Waterdiepte	0/+	++	+
Verhang	0	+	++

Verwachte verbetering indien de parameter nauwkeuriger wordt bepaald

- 0 : geen verbetering
- ++ : geringe verbetering
- ++ : grote verbetering

In de volgende paragrafen zullen de volgende twee punten verder onderzocht worden

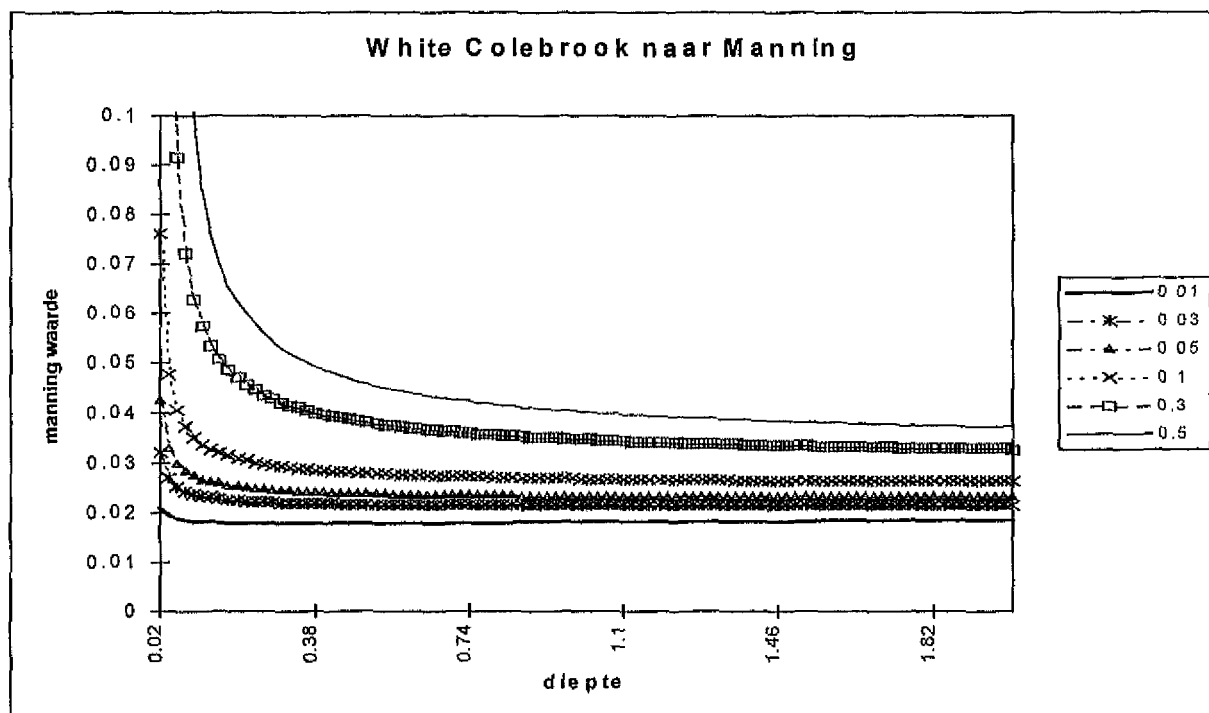
- 1 Pas de ruwheden op het intergetijdengebied aan volgens de berekende waarden in paragraaf 2.7. Bekijk of de snelheden veel veranderen (op de slikken toenemend) in het intergetijdengebied. Hierbij wordt dus de gevoeligheid aangetoond.
- 2 Bepaal de gevoeligheid van de ruwheid van geulparen. Het faseverschil tussen de 2 hoofdgeulen is namelijk verantwoordelijk voor het verhang over een plaat en dus de stroomsnelheid. Maak één geul iets ruwer en één geul iets gladder, maar zodoende dat de oorspronkelijke afregeling (beide geulen dezelfde ruwheid) gehandhaafd blijft. Het verschil in stroomsnelheid op de plaat tussen de basisberekening en de berekening met aangepaste ruwheid is een maat voor de gevoeligheid. Om de invloed van de faseverschuivingen te bepalen wordt de Molenplaat-meting gebruikt uit paragraaf 2.3.

2.9 Ruwheidsveld intergetijdengebied

2.9.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 zijn Nikuradse (k_s) waarden berekend voor het intergetijdengebied. Het model is afgeregeld met behulp van Manning-waarden. Als aanname is aangehouden dat het model moet blijven rekenen met Manning waarden in plaats van Nikuradse-waarden. De k_s -waarden moeten dan omgerekend worden naar Manning-waarden. Hierbij moet een diepte aangehouden worden om van k_s naar Manning om te rekenen.

Dit is uitgezet in de figuur op de volgende bladzijde.



In de figuur is te zien dat op een bepaalde diepte de ruwheid vrijwel niet meer verandert. Voor de omrekening is een diepte van 1 meter aangehouden. In onderstaande tabel staan de berekende waarden:

				d90	hoogte	Lengte	k'	k''	k totaal	Chézy (1m)	Manning
laag		P1a1	Zand	0.000360	0.025	0.13	0.0011	0.0191	0.0202	49.9	0.020
		P1a2	Slibrijk zand	0.000180	0.02	0.08	0.0005	0.0154	0.0159	51.8	0.019
		P1a3	Slibrijk	0.000040	0.01	0.05	0.0001	0.0076	0.0078	57.4	0.017
hoog	Gegolfd	P2a		0.000400	0.2	15	0.0012	0.0437	0.0449	43.7	0.023
	Mega	P2b1	2D	0.000400	0.5	20	0.0012	0.1789	0.1801	32.8	0.030
	Mega	P2b2	3D	0.000400	1	20	0.0012	0.5494	0.5506	24.0	0.041
	Vlak	P2c		0.000400	0.05	100	0.0012	0.0005	0.0017	69.4	0.014
	Ruggen	P3		0.000400	0.05	60	0.0012	0.0008	0.0020	68.0	0.015
	Water	P4		0.000400	0.15	5	0.0012	0.0900	0.0912	38.1	0.026
		K		0.000400	0.15	5	0.0012	0.0900	0.0912	38.1	0.026
		H		0.040000			0.1200		0.1200	36	0.028
		D		0.000200			0.0006		0.0006	77.4	0.013
		S		0.300000					0.6000	23.4	0.043

Tabel 2.6: Schatting ruwheden

Aan de hand van de geomorfologische indeling zoals gepresenteerd in hoofdstuk 2 kan nu een nieuw ruwheidsveld worden gemaakt. Dit is aangegeven in figuur 2.21. Alleen het intergetijdengebied krijgt een andere ruwheid, de oorspronkelijke afregeling van de hoofdgeulen in blokken blijft gehandhaafd.

Met behulp van het nieuwe ruwheidsveld is een berekening gedaan. De resultaten zijn vergeleken met een basisberekening, dat wil zeggen met het oorspronkelijke ruwheidsveld. De snelheden tijdens maximum vloed en eb zijn met elkaar vergeleken. Gekozen is om dezelfde periode te nemen als de meetperiode van de Molenplaat uit paragraaf 2.3 (3 tot 7 juni 1996). In paragraaf 2.11 wordt ingegaan op de vergelijking met de metingen op de Molenplaat.

2.9.2 Maximum vloed

In figuur 2.22 zijn de verschillen tijdens maximum vloedstroming gepresenteerd. Waar de ruwheden groter zijn neemt de snelheid af en omgekeerd. De verschillen liggen in de orde van -0.5 tot 0.25 m/s. Op de slikken worden de snelheden groter. Dit betekent een verbetering met de in Svašek 1999 gevonden resultaten, waar de snelheden op de slikken te laag berekend werden door SCALWEST.

Hoogdynamische gebieden op platen zijn ruwer geschematiseerd in het nieuwe ruwheidsveld. Een duidelijk voorbeeld hiervan is te zien op de plaat van Ossenis, waar aan de westelijke rand van de plaat een ruwe strook is aangebracht. Deze verruwing heeft tot gevolg dat de maximum stroomsnelheden tijdens vloed met 0.5 m/s dalen.

2.9.3 Maximum eb

In figuur 2.23 staan de verschillen tijdens maximum eb. Er is gekozen om hier niet exact de maximale stroomsnelheden te nemen, omdat dan de platen en slikken droogstaan, maar 2 uur ervoor. Het beeld uit figuur 2.23 is hetzelfde als bij maximum vloed, met enkele uitzonderingen daargelaten. De verschillen liggen in dezelfde orde van grootte (tussen -0.5 en 0.25 m/s).

Interessant zou zijn om de puntenwolken uit paragraaf 2.7.1 opnieuw te maken met dit naar verwachting betere ruwheidsveld.

2.9.4 Vergelijking ruwheden uit geomorfologische kaart en ruwheid uit Svašek 1999 op de Slik van Waarde

In Svašek 1999 is het Slik van Waarde 'afgeregeld' op stroommetingen door de ruwheid lokaal aan te passen. Uit dat onderzoek komt naar voren dat de ruwheid op het slik drastisch verlaagd moet worden om realistische stroomsnelheden te reproduceren. Daarbij moet de ruwheid ongeveer 50% verlaagd worden (orde van grootte van de Manning coëfficiënt van 0.01 tot 0.014). Uit de berekende ruwheden van dit onderzoek komt naar voren dat de ruwheid op slikken inderdaad verlaagd wordt. De gebieden op het slik van Waarde vallen in de categorieën hoogdynamisch vlak (manning=0.014) en laag dynamisch slib (manning=0.017). Ten opzichte van de gevonden ruwheden uit het onderzoek van vorig jaar komt de ruwheidschatting redelijk overeen. De gevonden ruwheden geschat aan de hand van de geomorfologische kaart zijn (iets) hoger.

2.10 Uitkomsten faseverschuiving Middelgat en Gat van Ossenis

2.10.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 werd gesteld dat het verhang over een plaat en nevengeul belangrijk is voor de snelheden. Dit verhang over een plaat wordt bepaald door het waterstandsverschil tussen de hoofdgeulen. De ruwheid is mede verantwoordelijk voor het verloop van de getijgolf door de hoofdgeulen. De afregeling van de ruwheden is in het verleden geschiedt op basis van waterstanden in enkele meetstations. Geulparen hebben dan ook dezelfde ruwheid gekregen, terwijl dit in werkelijkheid waarschijnlijk niet het geval is. De hypothese is dat een klein onderling verschil in de ruwheden van geulparen een groot verschil in snelheid geeft op de platen en de nevengeulen, vanwege het kleine verhang over een plaat en vanwege het snelle stijgen en dalen van de waterstand in de Westerschelde.

Deze hypothese wordt getoetst door het Middelgat te vergladden en het Gat van Ossenis te verruwen. Het ruwheidsveld uit de vorige paragraaf dient hiervoor als referentie. De verschillen zullen dan ook ten opzichte van deze berekening worden vergeleken. De ruwheid in de beide geulen is met

0,003 aangepast. Dit is ongeveer een aanpassing van de ruwheid met 10%. Deze aanpassing doet de oorspronkelijke afregeling nog geen grote schade toe. Een grotere ingreep zou de afregeling mogelijk te veel verstoord hebben. Zie figuur 2.24.

2.10.2 Maximum vloed

In figuur 2.25 is te zien dat de maximum vloedstroming in het Middelgat toeneemt en het Gat van Ossenisse afneemt. Dit is wat men logischerwijs mag verwachten door resp. te vergladden en te verruwen. De snelheden over de Molenplaat en door de geul van de Molenplaat veranderen nauwelijks, afgezien van enkele punten. De verhangen over de Molenplaat veranderen dus niet zo veel.

2.10.3 Maximum eb

De verschillen in stroomsnelheid tijdens maximum ebstroming (figuur 2.26) zijn ongeveer dezelfde als bij maximum vloedstroming. Ook hier veranderen de snelheden over de Molenplaat en door de geul van de Molenplaat nauwelijks.

Uit de analyse blijkt dat de snelheden over een plaat nauwelijks veranderen, evenals de waterstanden. Deze ingreep blijkt dus niet te werken op de afregeling van intergetijdengebieden.

2.11 Snelheden op site 1 (snelheidsmeting Molenplaat)

In paragraaf 2.3 zijn stroommetingen vergeleken met SCALWEST resultaten op de Molenplaat. Hieruit blijkt dat de snelheden tijdens vloed redelijk goed gereproduceerd werden, maar dat de ebsnelheden systematisch te hoog berekend worden. Voor de beide runs met een aangepast ruwheidsveld (paragraaf 2.9 en 2.10) is de uitvoer van dit punt ook bekeken. De resultaten zijn te zien in figuur 2.27. Uit de figuur blijkt dat de snelheden tijdens vloed enigszins toenemen (0.05 m/s) ten opzichte van de basisberekening. Tijdens eb veranderen de snelheden nauwelijks. Onderling verschillen de beide berekeningen met een aangepast ruwheidsveld nauwelijks. Dit bleek ook al uit paragraaf 2.10. De reproductie van dit punt wordt dus minder goed ten opzichte van de basisberekening. Het is waarschijnlijk goed mogelijk om met een locale aanpassing van de ruwheid de snelheden te verbeteren. Opvallend is verder dat de eb-vloeddominantie door het gebruik van het nieuwe ruwheidsveld verbeterd wordt. De faseverschillen ten opzichte van de meting zijn niet veranderd. Door lokaal het model af te regelen op de ruwheid kan dit faseverschil waarschijnlijk niet verbeterd worden. In hoofdstuk 4 zal gekeken worden of de afwijkingen (snelheid en fase) mogelijkserwijs door golfwerking verklaard kunnen worden.

2.12 Conclusie

De aanpassing van het ruwheidsveld op basis van de geomorfologische kaart is een eerste aanzet tot een verbetering van de stroomsnelheden in het intergetijdengebied. Uit de vergelijking tussen de basisrun en de run met de nieuwe ruwheden blijkt dat de ruwheid een belangrijke factor is in het intergetijdengebied en dat deze niet genegeerd kan worden. De snelheden in het intergetijdengebied wijzigen fors door toepassing van dit nieuwe ruwheidsveld. Dit nieuwe veld betekent niet dat het intergetijdengebied afgeregeld is. Op de slikken vindt weliswaar een verbetering plaats, maar op de Molenplaat (nog) niet. Indien het SCALWEST-model gebruikt gaat worden voor voorspellingen in het intergetijdengebied zal per locatie het model afgeregeld moeten worden op stroommetingen.

In dit onderzoek is aangetoond dat het ruwheidsveld verantwoordelijk is voor een groot deel van de afwijkingen van het SCALWEST-model in het intergetijdengebied. Door in de ondiepwatergebieden realistische ruwheden (op basis van de geomorfologische kaart) in te voeren wordt naar verwachting

een betere afregeling van het model verkregen. Voor de slikken geldt dit in sterkere mate dan de platen.

Uit het gevoeligheidsonderzoek naar het effect van de ruwheid van de geulen op de stroming op de Molenplaat is gebleken dat dit nog niet eenduidig kan worden vastgesteld.

Het onderzoek heeft geleid tot de volgende aanbevelingen:

1. Werk alle bestaande stroommetingen van de Westerschelde in het intergetijdengebied verder uit en regel SCALWEST hier verder op af.
2. Zet een nieuwe meetcampagne op voor platen die nog niet gemeten zijn of waar de meting onvoldoende is (stroomsnelheid en -richting, wind en golven) onder normale en storm omstandigheden. Gebruik deze metingen ook weer om SCALWEST verder op af te regelen (bv. via het iteratief proces zoals beschreven in paragraaf 2.4.3).
Ook moet de mogelijkheid onderzocht worden om met HF-Radar grotere gebieden te meten.
3. Bekijk ook eens m.b.v. het KUSTSTROOK model de gevoeligheid voor de ruwheden in de Waddenzee. Dit kan heel andere resultaten geven i.v.m. wantij.
4. Integreer de bevindingen m.b.t. ruwheden in de afregeling van SCALWEST met bodem 1999. Een optie is om in plaats van de Manning-formulering de White-Colebrook formulering te gebruiken binnen WAQUA, dit sluit (mogelijk) beter aan bij de ruwheidschatters in het intergetijdengebied.
5. Definieer geldigheidsgebied van ruwheidswaarden in het model; verandert de beddingvorm en/of de effectieve ruwheid tijdens storm, en zo ja, wat heeft dit tot gevolg voor de berekende stormvloedstanden?

3 Golven

3.1 Inleiding

De waterbeweging nabij de bodem van intergetijde gebieden wordt bepaald door zowel de getijstroom als de orbitaalbeweging van de golven. Welke van deze 2 processen het belangrijkste is, hangt van vele factoren af, zoals de fase van het getij, de waterdiepte, windsnelheid en windrichting. De getijbeweging wordt gedreven door de bewegingen van zon en maan en is een continue proces. De wind beïnvloedt ook de waterbeweging. De invloed is op ondiep water groter dan op diep water. Als de wind toeneemt, neemt de invloed van de wind op de waterbeweging toe. Op ondiep water kan die invloed zelfs dominant worden ten opzichte van die van het getij. De golven in intergetijde gebieden, zoals de Westerschelde of de Waddenzee, kunnen niet onbeperkt groeien omdat de streklengte waarover de golven worden opgewekt eindig is, en omdat de maximale golfhoogte beperkt wordt door de waterdiepte.

Golven en stromingen kunnen elkaar beïnvloeden. Deze interactie werkt 2 kanten op. De voortplanting van de golven wordt beïnvloed door de getijstroom en werkt als een refractieterm, waarbij golven van richting kunnen veranderen. Bij tegenstroom kunnen de golven daardoor hoger worden en eventueel breken. Indien golven breken op ondiepere delen dan wordt de gedissipeerde energie omgezet in enerzijds een stroom aandrijvende kracht en anderzijds een waterstandsverhoging (wave setup). De fysische principes van deze interactie zijn in het algemeen goed bekend. De plaats waar deze interacties optreden is lokaal. Daarnaast hebben golven in het algemeen een invloed op de bodemschuifspanning die er voor zorgt dat de weerstand op ondiep water toeneemt.

De getijbeweging heeft vooral invloed op de golven op die plaatsen waar de stroomsnelheid relatief hoog is en waar deze sterk in de ruimte varieert. Aan de andere kant treedt golfdissipatie met name aan de randen van ondieptes op en kan daar de waterbeweging beïnvloeden. Het effect van deze interacties op de waterbeweging nabij de bodem van intergetijde gebieden is niet goed bekend. Daarnaast is tot nu toe weinig aandacht geschonken aan de ruimtelijke uitstraling van deze interacties op de waterbeweging in het midden van de platen/ondieptes. De aandacht heeft altijd meer op diep water gelegen i.v.m. grootschalige getijvoortplanting.

De nauwkeurigheid waarmee de golven kunnen worden voorspeld, hangt sterk af van de nauwkeurigheid waarmee de windsnelheid, richting, en bodemligging bekend zijn. Met name op de ondiepere delen van het intergetijde gebied is de golfhoogte diepte beperkt en sterk afhankelijk van de actuele waterdiepte. Een kleine fout in de bodemligging heeft dan direct gevolgen voor de maximaal te verwachten golfhoogte en orbitaalbeweging nabij de bodem.

In principe is het mogelijk om de waterbeweging ten gevolge van golven en stromingen tot in grote mate van detail te voorspellen voor elke plek in een intergetijde gebied. Op dit moment echter zou een dergelijke benadering met interacties tussen golven en stroom een forse rekeninspanning vergen. Bovendien verandert de bodemligging continue, zeker op microniveau, waardoor de waarde van de rekenresultaten beperkt wordt. Het is daarom veel beter om eerst inzicht te krijgen in de mate waarin de golfbeweging bijdraagt aan de totale waterbeweging nabij de bodem in intergetijde gebieden. Daarnaast is het nuttig om inzicht te krijgen in de onzekerheden in de voorspelling van de golfbeweging. In dat kader kan dan ook aandacht worden besteed aan het effect van stormen op de waterbeweging nabij de bodem in intergetijde gebieden. Het is goed mogelijk dat juist stormen van groot belang zijn voor de bodemfauna en -flora.

Op grond van bovenstaande overwegingen zijn in het kader van dat onderzoek binnen het kader van het ECOMORF de volgende doelen geformuleerd ten aanzien van de invloed van golven op de hydrodynamica nabij de bodem in intergetijde gebieden:

- Inzicht krijgen in de bijdrage van de golfbeweging op de totale waterbeweging nabij de bodem van intergetijde gebieden.

- Het vaststellen van de onzekerheden in de voorspelling van de golfbewegingen op ondiep water en hun effecten op de waterbeweging.
- Inzicht krijgen in het effect van stromingen op de golfcondities en golf-geïnduceerde orbitaalbeweging nabij de bodem.

Om bovengenoemde doelen te bereiken zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- 1 Het uitvoeren van SWAN berekeningen (zonder stroominvloeden) voor de Westerschelde om inzicht te krijgen in de golf- en hydrodynamische condities die kenmerkend zijn voor een periode van een jaar. De SWAN berekeningen zijn aangestuurd op basis van gemeten golfcondities nabij de monding van de Westerschelde, gemeten winden bij Vlissingen en gemeten waterstanden voor een 5-tal stations in de Westerschelde. Tevens is het SWAN model in stationaire mode toegepast.
- 2 Op basis van de uitgevoerde berekeningen, zijn de resultaten statistisch geanalyseerd om inzicht te krijgen in de bijdrage van de golven aan de waterbeweging nabij de bodem en in hoeverre stormen van belang zijn voor deze waterbeweging. Om dit inzichtelijk te maken zijn diverse kentallen gedefinieerd waarvan de ruimtelijke structuur is gevisualiseerd. De kentallen betreffen: golfhoogte, bodemsnelheden, stroomaandrijvende krachten.
- 3 Het uitvoeren van een gevoeligheidsstudie met een sterk vereenvoudigde geometrie om te bepalen wat het effect is van onzekerheden in de bodemligging van platen op de golfcondities.
- 4 Op basis van bovengenoemde activiteiten zal vervolgens worden vastgesteld waar eventueel verbeteringen nodig zijn in het gebruik van numerieke golfmodellen voor de voorspelling van de waterbeweging nabij de bodem in intergetijde gebieden.
- 5 Het uitvoeren van SWAN berekeningen met stroominvloed voor een beperkte periode. De resultaten van deze berekeningen zijn in hoofdstuk 4 beschreven.

In deze studie is het effect van stromingen op de golfcondities slechts voor een beperkte periode meegenomen in de golfmodel berekeningen. Hoewel het in principe mogelijk is om deze voor alle tijdstippen in het jaar 1996 mee te nemen, is daar van afgezien vanwege de enorme rekeninspanning die nodig is om voor een heel jaar stroom- en waterstandsvelden te genereren, en vanwege de extra rekentijd die nodig is om de SWAN berekeningen uit te voeren. Tevens zouden in dat geval de effecten van de wind moeten worden meegenomen om een nauwkeurig beeld te krijgen van het effect van stromingen op de golven. Door uit te gaan van de gemeten waterstanden is dat in de hier gevolgde procedure minder nodig. Het achterwege laten van de golf-stroominteractie voor de hele periode in deze golfmodelberekeningen is een beperking in dit onderzoek. Desondanks is de verwachting dat op grond van de huidige resultaten een eerste indruk zal ontstaan van het effect van golven op de hydrodynamica nabij de bodem in intergetijdegebieden.

In paragraaf 3.2 wordt aandacht besteed aan de hydrodynamica in de hele Westerschelde. Paragraaf 3.3 gaat in op de gevoeligheidsanalyse met een vereenvoudigd model. In dit vereenvoudigde model is het effect van set-up meegenomen. Tenslotte worden in paragraaf 3.4 de resultaten en aanbevelingen van deze studie besproken.

3.2 Golfberekeningen in de Westerschelde

3.2.1 Inleiding

Het doel van de golfberekeningen in de Westerschelde is om inzicht te krijgen in de bijdrage van golven op de hydrodynamica nabij de bodem in intergetijde gebieden. Om dat doel te bereiken, zijn SWAN golfmodel berekeningen uitgevoerd om een indruk te krijgen van de golfcondities gedurende een bepaald jaar. Op grond van de beschikbaarheid van stroom metingen is besloten om het jaar 1996 te kiezen. De golfmodel berekeningen zijn uitgevoerd met het SWAN golven model. Dit model is ontwikkeld door de Technische Universiteit Delft (Booij et al., 1999) en is reeds vele malen

toegepast voor golfberekeningen in de Nederlandse kustwateren voor het verkrijgen van golfrandvoorwaarden voor de Nederlandse zeedijken (Alkyon 1998, 1999).

Om een realistisch beeld te krijgen van de golfcondities in de Westerschelde in het jaar 1996 is het golfmodel aangestuurd met gemeten randvoorwaarden, zoals waterstanden, golven van de Noordzee en wind.

In de volgende sub-paragrafen zal achtereenvolgens aandacht worden besteed aan de gebruikte bodemtopografie, opzet van de golfmodelberekeningen, de waterstanden, de wind en golfrandvoorwaarden aan de Noordzeerand van de Westerschelde. Vervolgens worden de resultaten van de golfmodelberekeningen gepresenteerd.

3.2.2 Bodemtopografie

Voor de SWAN golfmodelberekeningen is gebruik gemaakt van de meest recente bodemtopografie die beschikbaar was voor de Westerschelde. Deze bodem is afkomstig van het RIKZ en is gebaseerd op gedetailleerde lodingen die zijn uitgevoerd in de periode 1990-1997. De digitale bodem is op een 20 m bij 20 m rooster gegeven. Vervolgens is door 'binning' een 200 m bij 200 m bodem gemaakt. Een overzicht van deze bodem is gegeven in figuur 3.1. De basis gegevens zijn dezelfde als degene die gebruikt zijn voor het SCALWEST model

3.2.3 Opzet golfmodelberekeningen

De golfmodelberekeningen zijn uitgevoerd met het SWAN golvenmodel, versie 40.01 op twee rekenroosters. Het grote rekenrooster E3 heeft een maaswijdte van 200 m bij 200 m en is gebruikt om de golfcondities in heel 1996 uit te rekenen. Het detailrekenrooster E4 is genest in rooster E3 en het heeft een maaswijdte van 20 m. Het E4 rooster is gebruikt om het effect van stromingen op de golven te bepalen. Deze resultaten worden in hoofdstuk 4 beschreven. De westelijke grens van dit rooster ligt nabij Vlissingen en de Oostelijke grens van dit rooster ligt bij de grens met België. Een overzicht van de grenzen van dit rekenrooster is gegeven in figuur 3.2. De numerieke kenmerken van dit rooster zijn gegeven in Tabel 3.1. Deze kenmerken zijn ook geldig voor het gebruikte bodemrooster.

Naam	Xo (m)	Yo (m)	α (°)	Lx (m)	Ly (m)	Mx	My
E3	20000	372000	0	56000	18000	280	90
E4	52000	375000	0	6000	12000	120	240

Tabel 3.1: Numerieke kenmerken van SWAN rekenrooster Westerschelde

Hierin zijn XO en YO de oorsprong van het rekenrooster in meters en Parijse coördinaten, α de hoek van de x-as van het rooster, Lx en Ly de lengte van het rooster in x- en y-richting, en Mx en My het aantal rekencellen in x- en y-richting.

Het SWAN model is toegepast met de standaardinstellingen zoals vermeld in de SWAN user manual. Voor het huidige onderzoek zijn de volgende uitvoer variabelen gedefinieerd:

XP	x-coördinaat	(m)
YP	y-coördinaat	(m)
DEP	rekendiepte (bodempligging + waterstand)	(m)
HS	significante golfhoogte	(m)
TMO1	gemiddelde spectrale golfperiode	(s)
RTP	relatieve piekperiode	(s)
DIR	gemiddelde golfrichting	(°)

FORCE	stroom aandrijvende kracht	(N/m ²)
URMS	RMS waarde van bodemsnelheid nabij de bodem	(m/s)

Deze grootheden worden voor elke som uitgevoerd op het SWAN rekenrooster in de vorm van zogenaamde BLOK-files (*.BLK). Een voorbeeld van een SWAN invoerfile is gegeven in Bijlage 3.1.

3.2.4 Waterstanden in de Westerschelde

Om zo realistisch mogelijke SWAN berekeningen te maken, is voor elk tijdstip waarvoor een SWAN berekening is uitgevoerd een ruimtelijk variërend waterstandsveld geconstrueerd. Deze velden zijn geconstrueerd op basis van uurlijkse waterstandsmetingen in 5 stations langs de Westerschelde: Westkapelle, Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath. De locaties van deze meetstations zijn gegeven in figuur 3.2. Vervolgens is voor elk uur in 1996 een ruimtelijk variërend waterstandsveld gecreëerd door toepassing van een 'cubic spline' interpolatie techniek (Press et al., 1986) onder de aanname dat de waterstand in de Westerschelde alleen een variatie vertoont in oost-west richting. Met behulp van een spline interpolatie wordt een langzaam ruimtelijk variërend waterstandsveld gecreëerd.

De steunpunten voor toepassing van de spline interpolatie komen dan overeen met de x-coördinaten van de 5 meetstations. De resultaten van deze interpolatie-techniek zijn vervolgens gegeven op een rooster van 2 km in x-richting. Enkele voorbeelden van de spline interpolatie zijn gegeven in figuur 3.3. Tevens is een animatie beschikbaar, in de vorm van een *.AVI file, met daarin de resultaten van de spline interpolatie voor de eerste 100 tijdstippen van 1996. Deze animatie is gebruikt om te controleren of de spline interpolatie techniek goed heeft gewerkt. Dit bleek inderdaad het geval te zijn.

De gegeneerde ruimtelijk variërende waterstandsvelden zijn weggeschreven in een voor SWAN leesbaar formaat.

3.2.5 Wind

Het SWAN golvenmodel wordt mede aangedreven door wind. Voor deze studie is gebruik gemaakt van uurlijkse windmetingen in Vlissingen. Omwille van de eenvoud is SWAN golfmodelberekeningen een homogeen windveld aangenomen die representatief is voor het hele Westerschelde bekken. In werkelijkheid zullen er echter ruimtelijke variaties in windsnelheid voorkomen als gevolg van verschillen in ruwheid van land en water.

Het maken van een realistischer ruimtelijk variërend windveld zou kennis en informatie vereisen van windmetingen op meerder stations langs de Westerschelde en inzicht in het effect van land/zee overgangen die van invloed zijn op de grenslaag. Dergelijke verfijningen vereisen echter diepgaande studies en berekeningen. Deze passen niet binnen het huidige onderzoek.

Een jaaroverzicht van de gemeten windsnelheden en richtingen is gegeven in figuur 3.4. In deze figuur is te zien dat de hoogste windsnelheid optreedt op 29 augustus 1996. De gemiddeld hoogste windsnelheden worden gevonden rond begin November.

3.2.6 Golftrandvoorwaarden

De Westerschelde staat aan de westzijde bloot aan golven die vanaf de Noordzee het Westerschelde estuarium binnendringen. Deze invloed is vooral merkbaar in het westelijke gedeelte van de Westerschelde. In het oosten van de Westerschelde is deze invloed verwaarloosbaar.

Om de golfdoordringing vanuit de Noordzee zo realistisch mogelijk mee te nemen in de SWAN golfberekeningen, is gebruik gemaakt van Waverider golfmetingen bij een golfmeetstation in de monding van de Westerschelde. Daartoe is het station Wielingen gekozen. De locatie van dit meetstation is gegeven in figuur 3.2. Omdat station WIEL niet precies aan de beginrand ligt van het rekenrooster zijn de rekenresultaten aan de zeekant van het rekenrooster niet representatief, mede door de aanwezigheid van dieptevariaties langs de westelijke rand van het rekenrooster. Door rekening te houden met een inspeellengte van ongeveer 10 km van de golven zullen de golfcondities oostelijke van Vlissingen voldoende bruikbaar zijn voor deze studie.

De resultaten van deze golfmetingen zijn gegeven in de vorm van 1-d spectra en integrale golfparameters zoals de significante golfhoogte (H_s) en piekperiode (T_p). Informatie over de gemeten gemiddelde golfrichting is niet beschikbaar omdat een Waverider daar niet toe in staat is. Voor de SWAN modelberekeningen is het echter nodig om een golfrichting op te geven. Omdat er geen golfrichtingsinformatie gemeten is, is aangenomen dat de gemeten golfrichting overeenkomt met de gemeten windrichting bij Vlissingen. Aldus is voor de SWAN berekeningen de golfrandvoorwaarde langs de Noordzeerand van het SWAN rekenrooster opgegeven in termen van het gemeten 1d frequentiespectrum bij Wielingen en de windrichting bij Vlissingen.

De mate van golfdoordringing van golven vanaf de Noordzee is bepaald door twee SWAN golfberekeningen uit te voeren voor een conditie met en een conditie zonder gemeten golfrandvoorwaarden. Om een representatief beeld te krijgen is gekozen voor een westenwind situatie en gemiddelde waterstand nabij Vlissingen (MSL). De uitgevoerde berekeningen zijn gedaan voor het tijdstip van 30 oktober 1996 10:00 uur waarbij de windrichting 280° N bedraagt, de windsnelheid $7,20$ m/s en een golfrandvoorwaarde met een H_s van $0,91$ m. en een piekperiode van $5,6$ s. Het ruimtelijk beeld van de significante golfhoogte met randvoorwaarde is gegeven in figuur 3.5 en zonder golfrandvoorwaarde in figuur 3.6. Door te kijken naar de verschillen in golfhoogte is uit deze figuren te zien dat de invloed van golfdoordringing vanuit de Noordzee beperkt is tot het westelijkste deel van de Westerschelde (vanaf Breskens). De kleine verschillen in golfhoogte nabij het "verdrongen land van Saeflinge" zijn het gevolg van het verschillende aantal iteraties tussen beide berekeningen en staan los van de mate van golfdoordringing vanuit de Noordzee.

3.2.7 Statistische analyse golfmodelberekeningen

Op grond van de SWAN golfmodelberekeningen zijn voor alle (natte) rekenpunten tijdseries van hydro-dynamische parameters bekend. Een overzicht van deze parameters is reeds gegeven in paragraaf 3.2.3. Op basis van deze resultaten zijn na weging vervolgens de volgende statistische grootheden berekend voor een grootheid X :

$X_{\max}$	de maximale waarde
X_{mean}	de gemiddelde waarde
X_{rms}	de RMS-waarde
X_{std}	de standaard afwijking
$X_{90\%}$	de 90% percentiel, de waarde die in 10% van de tijd overschreden wordt

3.2.8 Resultaten

De resultaten van de SWAN berekeningen zijn gegeven voor het tijdstip met de hoogste windsnelheid (29 augustus 2:00 uur) en voor alle beschikbare tijdstippen in 1996 in de vorm van statistische grootheden.

Een overzicht van de ruimtelijke variatie van golfhoogte H_s , gemiddelde periode T_{m01} , U_{rms} en Force voor tijdstip 29 augustus 1996, 2:00 uur is gegeven in de figuren 3.7 t/m 3.9. Dit tijdstip komt overeen met de grootste gemeten windsnelheid bij Vlissingen, $U_{10} = 19.2$ m/s en een wind-

richting van 265°N (bijna pal Westenwind). Het is dan ook de verwachting dat voor dit tijdstip de grootste golfhoogte, bodemsnelheden en stroom aandrijvende krachten optreden.

In de figuren 3.7 en 3.8 is te zien hoe de golven van de Noordzee doordringen in de Westerschelde. Het effect van deze golven op de bodemsnelheden is te zien in figuur 3.9. Hieruit blijkt dat de hoogste waarden voor de bodemsnelheden (N.B. voor de bodemsnelheden is hier de RMS waarde van de orbitaal snelheid op een zekere minimale hoogte boven de bodem aangehouden) optreden in het westelijk deel van de Westerschelde (waar de golven het hoogst zijn) en langs de randen van de ondieptes. Deze resultaten zijn op zich niet verrassend, maar geven aan dat vooral bij westenwinden de bodemsnelheden in de monding van de Westerschelde hoog kunnen zijn en dat (min of meer onafhankelijk van de windrichting) bij de plaatranden hoge bodemsnelheden door golven optreden. Met name die hoge bodemsnelheden op plaatranden kunnen verantwoordelijk zijn voor morfologische veranderingen in bedding vormen langs deze plaatranden en boven op de platen.

Een indicatie van het effect van golven op het stroomveld is te zien in figuur 3.10 in de vorm van de golf geïnduceerde stroom aandrijvende kracht. In deze figuur is duidelijk te zien dat deze krachten vooral geconcentreerd zijn langs de plaatranden. Dit betekent dat deze krachten vooral invloed kunnen hebben op het stroombeeld langs de platen en in mindere mate op de grootschalige waterbeweging. Het feit dat deze krachten als een smalle ring rond de platen liggen en dat de waterstand varieert, betekent ook dat deze krachten slechts gedurende een korte periode van het getij actief zijn. Alleen op het moment dat de plaat net onderstroomt kunnen deze krachten invloed hebben op het stroombeeld op en langs de platen. Kwantificering van dit effect is helaas niet mogelijk binnen de scope van deze fase van het onderzoek.

De ruimtelijke verdeling van de waarden voor gemiddelde, maximale en standaard-afwijking en de 90% percentiel voor de significante golfhoogte H_s en de U_{rms} zijn gegeven in de figuren 3.11 t/m 3.18. Zij zijn representatief voor de berekeningen die voor elk uur voor het gehele jaar 1996 zijn uitgevoerd. figuur 3.12 laat zien dat de meest extreme golfhoogte in de Westerschelde op individuele punten vrijwel overal (uitgezonderd het oostelijkste deel) overeen komt met het extreme golfbeeld voor 29 augustus (Fig 3.7).

De resultaten laten zien dat de gemiddelde waarden van de golfhoogten en bodemsnelheden in het algemeen vrij laag zijn. Wel zijn er uitschieters tijdens stormcondities. De figuren met de standaardafwijkingen geven aan dat de variaties op de gemiddelde toestand in het algemeen eveneens vrij klein zijn, uitgezonderd het Westelijk deel van de Westerschelde waar de golven vanaf de Noordzee binnendringen. De 90% percentiel waarden geven aan welke golfhoogte respectievelijk welke rms orbitaal snelheid in 10% van de tijd wordt overschreden. Deze waarden dienen vergeleken te worden met soortgelijke resultaten uit het stromingsmodel.

3.3 Gevoeligheidsanalyse

3.3.1 Inleiding

De grootschalige SWAN golfmodelberekeningen geven een aardig overzicht van de hydro-dynamische condities in de Westerschelde voor zowel diep als ondiep water. Om een gedetailleerder beeld te krijgen van de hydro-dynamische condities nabij een ondiepte tijdens een getijcyclus is gebruik gemaakt van een sterk vereenvoudigd model. De ingrediënten van dit vereenvoudigde model zijn:

- 1d benadering
- gebruik 1d optie in SWAN
- geschematiseerd bodemprofiel
- één getijclaus van 25 uur

Met dit vereenvoudigde model zijn vervolgens 151 SWAN berekeningen gemaakt om resultaten te krijgen om de 10 minuten. Deze resultaten bestaan uit de zelfde SWAN uitvoerparameters als gebruikt bij de grootschalige SWAN berekeningen in de Westerschelde.

Vervolgens is op basis van deze berekeningen een schatting gemaakt van de gevoeligheid in bodemligging op de golfmodel resultaten.

3.3.2 Opzet vereenvoudigd golfmodel

Voor het opzetten van het vereenvoudigde golfmodel is een geschematiseerd bodemprofiel gemaakt. Op basis van een aantal steunpunten met een onderlinge afstand van 100 m is met behulp van een 'cubic spline' interpolatie een glad bodemprofiel aangemaakt met een stapgrootte van 10 m. Een overzicht van dit profiel is gegeven in figuur 3.19. In deze figuur zijn de steunpunten met cirkels aangegeven.

De waterstandsvariatie gedurende de getijcyclus van 25 uur is gebaseerd op de eerste volle getijcyclus in 1996. Om deze getijcyclus gedetailleerd te kunnen doorrekenen, zijn de uurlijkse waterstanden geïnterpoleerd naar een 10 minuten interval. Ook deze interpolatie is uitgevoerd met behulp van een 'cubic spline' interpolatie. Het resultaat van deze interpolatie is gegeven in figuur 3.20.

Vervolgens zijn 151 SWAN 1d golfmodelberekeningen uitgevoerd waarbij voor elke berekening de waterstand d.m.v. het SET LEVEL commando is ingevoerd. Vervolgens zijn voor elk rekenpunt integrale golf- en hydro-dynamische grootheden uitgevoerd in tabel-vorm.

3.3.3 Hydrodynamica tijdens een getijcyclus

De resultaten van de SWAN berekeningen zijn voor een aantal tijdstippen gevisualiseerd in de figuren 3.21 t/m 3.23. Het eerste tijdstip komt overeen met het moment dat de plaat net niet onderstroomt. Het tweede tijdstip is voor het moment dat de plaat net is ondergestroomd en het derde tijdstip komt overeen met hoog water. Voor de 3 locaties is vervolgens de tijdvariatie van een aantal golf- en hydro-dynamische parameters gevisualiseerd in de figuren 3.24. t/m 3.26. De eerste locatie ($x=100$) ligt aan het begin van het talud. De tweede locatie ($x=300$ m) ligt aan de rand van de plaat en de derde locatie ligt achterop de plaat ($x=500$ m).

In de figuren 3.21 t/m 3.23 is een beeld gegeven van de hydrodynamische condities die zich voordoen tijdens het onderlopen van een (geschematiseerde) plaat. Deze figuren bevestigen het beeld dat met name langs de wind zijde (loef zijde) van de plaatranden (als deze nog niet geheel ondergelopen is) de grootste bodemsnelheden en golf geïnduceerde stroom aandrijvende krachten optreden. Als de plaat net is ondergelopen, is het beeld vrijwel hetzelfde. In geval de plaat net ondergelopen is kan er tengevolge van de golfwerking nog een groot transport van water over de plaat heen plaatsvinden. Immers door de golf energie dissipatie treedt er aan de windzijde van de plaat een waterstandsverhoging op die zich uit in een stroom over de plaat heen als deze net onderstroomt. Daarnaast zorgen de golven bovenop de plaat als deze ondergestroomd is voor een massa transport van water over de plaat.

Indien de plaat iets verder ondergelopen is blijven de bodemsnelheden vrijwel constant, er vindt weinig of geen energie dissipatie plaats en er is dus ook nauwelijks een verandering in golfhoogte of noch worden er stroom aandrijvende krachten opgewekt.

De tijdsvariatie van de diverse hydrodynamische parameters voor een drietal locaties laat zien dat de golfhoogte sterk afhankelijk is van de waterdiepte, zoals te verwachten was. Vlak na het moment van onderstromen neemt de golfhoogte iets toe door shoaling. De variatie van de bodemsnelheid voor $x = 100$ m (Fig 3.24) laat zien dat na een initiële verhoging van de snelheid, deze weer afneemt als de waterdiepte toeneemt, bij gelijk blijvende golfhoogte. Voor dezelfde locatie geeft het verloop van de fractie brekende golven Q_b aan, dat deze op het moment van laag water ($t = 12:30$ uur) een maximale waarde van 1 heeft, ofwel alle golven breken. Rond hetzelfde tijdstip is ook de stroomaandrijvende kracht maximaal. Voor de locaties verder op de plaat zijn de golfhoogte en bodemsnelheid

gedurende korte tijd groter dan nul. Doordat er nauwelijks een ruimtelijke variatie is van de golfhoogte zijn de bijbehorende krachten verwaarloosbaar. Het beeld voor de twee locaties op de plaat is vrijwel hetzelfde. Deze resultaten geven wederom aan dat de hydrodynamica met name aan de plaatranden grote variaties vertoont.

3.3.4 Gevoeligheid bodemligging

Op basis van de resultaten van de SWAN 1D som voor een getijcyclus is de gevoeligheid van de berekende golfhoogte en bodemsnelheden voor onzekerheden in de bodemligging bepaald. Onzekerheden in de bodemligging zijn equivalent aan onzekerheden in de waterstand. Op deze wijze kunnen SWAN model resultaten voor opeenvolgende tijdstippen gebruikt worden om een schatting te maken van het effect van veranderingen in bodemligging op de golf- en hydro-dynamische grootheden.

Voor het tijdstip van hoogwater is deze gevoeligheid gevisualiseerd in figuur 3.27. Voor het moment dat de plaat net is ondergestroomd is deze gevoeligheid gevisualiseerd in figuur 3.28.

Deze resultaten geven aan dat een onzekerheid in de bodemligging van 5 centimeter nauwelijks effect heeft op de golfhoogte en de bodemsnelheid. Dit geldt voor beide situaties. Een variatie van de bodemligging van 5 centimeter heeft echter wel een groot effect op de fractie brekende golven en de golf geïnduceerde krachten. Deze grote gevoeligheid is het gevolg van een verschuiving van deze grootheden naar een hoger gelegen positie. In absolute zin zijn de effecten echter klein. Op grond van deze resultaten kunnen we concluderen dat onzekerheden in de bodemligging nauwelijks effect hebben op de golf gerelateerde hydrodynamische parameters, maar zorgen voor een verschuiving van deze parameters in het horizontale vlak. Deze onzekerheden hebben (wellicht) meer effect op stroom gerelateerde hydrodynamische grootheden.

3.4 Samenvatting en aanbevelingen

In het golven onderdeel van dit onderzoek is aandacht besteed aan het effect van golven op de hydrodynamica nabij de bodem in intergetijde gebieden. Daartoe zijn enerzijds grootschalige SWAN berekeningen uitgevoerd voor de hele Westerschelde om inzicht te krijgen in de te verwachten condities gedurende een heel jaar. Anderzijds is met een vereenvoudigd detailmodel één getijcyclus doorerekend om inzicht te krijgen in de hydro-dynamische processen die zich afspelen op de plaat en plaatranden in een intergetijde gebied.

De resultaten van deze golvenstudies zijn beperkt bruikbaar voor de voorspelling van hydro-dynamische condities op een bepaalde plaats en een bepaald tijdstip. Dit komt vanwege de diverse aannames en vereenvoudigingen die ten grondslag liggen aan deze berekeningen. Voor de grootschalige SWAN golfmodelberekeningen zijn de volgende aannames en vereenvoudigingen toegepast:

- Geen golf-stroom interactie.
De kwantitatieve afschatting van dit effect is sterk afhankelijk van de grootte van elk van de verschijnselen afzonderlijk. Getuige de resultaten (zie bijv figuur 4.4) is te zien dat zodra het harder waait ($> \text{Bft. 3}$) deze verschijnselen sowieso van belang zijn. Naarmate het harder waait wordt dit effect van meer belang. Echter ook in situaties met sterke stromingen, grootschalige opzet en delning (zeg maar "wind op afstand") kan het effect wel degelijk van belang zijn. In open wateren, zeker bij kusten is de interactie allesoverheersend voor transport en morfologie.
- De waterstand varieert alleen in oost-west richting.
Dit zal kwantitatief slechts een beperkt effect hebben en leiden tot hogere dan wel lagere golven op gebieden die door deze aanpak net dieper dan wel ondieper worden.
- De windsnelheid en windrichting bij Vlissingen is representatief voor de hele Westerschelde.
Deze aanname zal tot gevolg hebben dat effecten van landmassa niet correct worden meegenomen. Dit kan leiden tot sterkere of minder sterke wind en bovendien leiden tot lokale richtingsverandering.

- Instationariteiten in het golfveld zijn buiten beschouwing gelaten.
In de hier gevolgde aanpak is een zogenaamde semi stationaire aanpak gevolgd. Er zijn wel elk uur golfberekeningen gemaakt bij de dan geldende waterstands benadering. In werkelijkheid zal de golf er een geruime tijd overdoen om de afstand van de monding van de Westerschelde tot achterin af te leggen. In deze tijdsperiode (orde enkele uren) veranderen de waterstand en de stroomsterkte. Deze effecten zijn niet meegenomen.
- De golfrichting bij station Wielingen is gelijk aan de windrichting bij Vlissingen.
Ook dit effect is niet meegenomen maar is naar verwachting van geringe invloed, immers hoe verder we op de Westerschelde komen, hoe minder het golfklimaat bepaald wordt door wat er op zee gebeurt en hoe meer door de lokale wind.
- De golfrandvoorwaarde aan de zeewaartse kant van het SWAN rekenrooster is constant langs de rand.
In werkelijkheid is er sprake van een grote diepte variatie langs de zeerand van het SWAN model. De veronderstelling dat de randvoorwaarde hier overal gelijk is, is een gebrekkige aanname, beter zou zijn de gemeten golf naar diep water te vertalen en met behulp van een veel groter SWAN model weer naar de Westerschelde te vertalen. Een dergelijke aanpak zou voorbij gaan aan de oorspronkelijke doelstelling van dit onderzoek.
- Het SWAN golvenmodel is in staat om de golfcondities in een ondiep estuarium goed te voorspellen. Hierbij bestaat met name enige scepsis omtrent de energie dissipatie door brekende golven op relatief steile oevers (1:10). Tevens is bekend dat het SWAN model de golfperiode structureel met ongeveer een 0.75 s onderschat.
- Golfoploop is niet meegenomen. Dat is trouwens niet mogelijk met het type modellen zoals SWAN.
SWAN is een spectraal golven model. er wordt met een aantal representatieve grootheden gewerkt voor het beschrijven van de golfvoortplanting. Golfoploop is een verschijnsel dat zich voornamelijk binnen de golfperiode voordoet en kan als zodanig dus alleen met een model worden bepaald dat de lokale vloeistofbeweging meeneemt.

De meeste van deze aannames en vereenvoudigingen kunnen in principe verbeterd worden door gebruik te maken van meer informatie en completere informatie. Aangezien dat niet haalbaar was binnen het huidige onderzoek is een balans gezocht tussen het effect van onzekerheden in de diverse aannames en de gemaakte vereenvoudigingen. De resultaten kunnen echter wel gebruikt worden om een beeld te krijgen van de statische kenmerken en ruimtelijke patronen van deze hydro-dynamische condities.

Een belangrijke vraag in dit onderzoek is het identificeren van de gebieden waar golf gerelateerde bodemsnelheden belangrijker zijn dan stroom gerelateerde snelheden. Op basis van de berekende 90% percentielen voor Urms kan in principe een vergelijking worden gemaakt met de resultaten van het stroom model. Daarnaast wordt aanbevolen om de invloed van golfstroom interactie nader te bestuderen.

Eind conclusies en aanbevelingen golven gedeelte:

De bodemruwheid is een ondergeschikte parameter in de golfvoortplantings modellen, zeker voor het bepalen van de golfhoogte en naar we nu aannemen ook voor de golfperiode in intergetijdgebieden. Energiedissipatie door breken is veel belangrijker, alsmede aandrijving door wind en opwekking van hogere harmonischen door triad interacties. Dit zijn niet-lineaire interacties tussen paren van drie golfcomponenten die onderling energie uitwisselen.

Het meenemen van de stromingen en waterstanden in de golfmodellering is van fundamenteel belang. Immers door setup komen golven in intergetijdgebieden waar ze zonder setup niet zouden komen. Tevens kunnen de stroomeffecten zorgen voor golfblokkade of golfperiode veranderingen. Deze effecten zijn van belang in intergetijd gebieden. Tenslotte kan de orbitaalsnelheid nabij de bodem zorgen voor het opwerpen van sediment dat weer in zeer korte tijd tot een verandering van de beddingvorm (ribbels, zandgolven, duinen of sheet flow) kan leiden.

4 Golf/Stroominteractie

4.1 Inleiding

In het algemeen moet vooraf gezegd worden dat het bijzonder moeilijk is om iets te zeggen over de interactie tussen stromingen en golven op basis van individuele resultaten van separate golven en stroom modellen. Daarnaast zorgen golven en stromingen gezamenlijk voor het transport van materiaal waardoor de bodem zich aanpast.

Idealiter is er voor de bepaling van de juiste bodemruwheid dan ook eigenlijk een interactief netwerk van golf, stroom, transport en bodemverandering modellen nodig. Daarbij zijn de waterstanden en de stroomsnelheden uit het stroom model van belang voor de golf en transport modellen en zijn de golf geïnduceerde stroomaandrijvende krachten, golfhoogten, golfrichtingen en perloten van belang voor de stroom en transportmodellen. Iteratieve interactie is daarbij noodzakelijk om de verschijnselen op de juiste wijze te kunnen meenemen.

Indien de golfeffecten niet in de stroommodellen zijn meegenomen en de stroomeffecten niet in de golfmodellen, dan blijft de interpretatie erg moeilijk.

Eén van de elementen die daarin een belangrijke rol speelt is de representatieve grootte die voor elk van de hydrodynamische verschijnselen moet worden meegenomen. De golven hebben een typisch statistisch karakter dat sterk afhankelijk is van de locatie en de weersomstandigheden. De stromingen hebben een relatief belangrijke deterministisch bepaalde component die bepaald wordt door de draaiing van de aarde, de zon en de maan en een afhankelijk van de locatie minder belangrijke component die bepaald wordt door de weersomstandigheden.

In deze studie is een pragmatische benadering gevolgd om de invloed van golven en stromingen op de hydrodynamica in de intergetijdengebieden van de Westerschelde te bepalen.

Hieronder wordt eerst ingegaan op de theorie zoals die door vele onderzoekers reeds is gerapporteerd. Vervolgens worden enkele resultaten voor de Westerschelde getoond.

4.2 Aanpassingssnelheid beddingvormen

Platen en slikken in estuaria worden gekenmerkt door snelle en sterke veranderingen van stroomsnelheid, richting en waterdiepte. De bijbehorende beddingvorm is hierdoor mogelijk niet constant in de tijd.

Wijbenga en Klaassen (1983) geven op laboratoriumschaal met waterdiepten van 0,2 à 0,3 m en duinhoogten van ca. 0,1 m aanpassingssnelheden van ongeveer een half uur.

Metingen in de Oosterschelde bij de bouw van de stormvloedkering (Svašek, 1979) laten in de geulen verplaatsingen van duinen van 0,2 à 0,5 m hoog zien die per getij kunnen oplopen tot 3 meter.

De hoogte van de duinen blijft daarbij vrijwel constant, evenals de ribbellengte. De scheefheid past zich vaak wel aan aan de heersende stroomrichting, echter meestal tegen de verwachting in (aangestroomde zijde is het steilste).

In het algemeen kan gesteld worden dat de aanpassingssnelheid een functie is van de heersende sedimenttransport capaciteit. Hoogdynamische platen en slikken zullen zich dus sneller aan veranderende omstandigheden aanpassen dan laagdynamische.

Hoewel niet eenduidig aantoonbaar lijkt het aannemelijk dat de beddingvorm van droogvallende platen en slikken zoals die uit luchtfoto's van drooggevalen gebleden kan worden afgeleid min of meer dezelfde karakteristieken hebben tijdens de inundatiefase.

De karakteristieken van deze beddingvorm worden waarschijnlijk bepaald door een bodemschulfspanning tussen de gemiddelde en maximale waarde in (overeenkomend met de dominante fasen van het sedimenttransport).

4.3 Overgang naar golfgedreven beddingvormen:

In de literatuur worden onder meer de volgende relaties gegeven:

$u^*_{,c}/u^*_{,w} < 0.25$: golfgedreven ribbels

$u_{*,c}/u_{*,w} > 2$: stroming gedreven ribbels

Havinga (1992)

$U_w/u_{*,c} > 10$ golfgedomineerd

$U_w/u_{*,c} < 1$ stroomgedomineerd

Amos en Collins (1978)

Waarin: u^*, c : overall snelheidsgerelateerde bodemschuifspanning snelheid

u^*, w : overall golvengerelateerde bodemschuifspanning snelheid

U_w : maximum orbitaal snelheid

Bij tussengelegen waarden van $u_{*,c}$ / $u_{*,w}$ resp. $U_w/u_{*,c}$ komt de beddingvorm tot stand in een wisselwerking tussen stroom en golven. Zie ook Van Rijn (1993 figuur 5.5.1 hieronder)

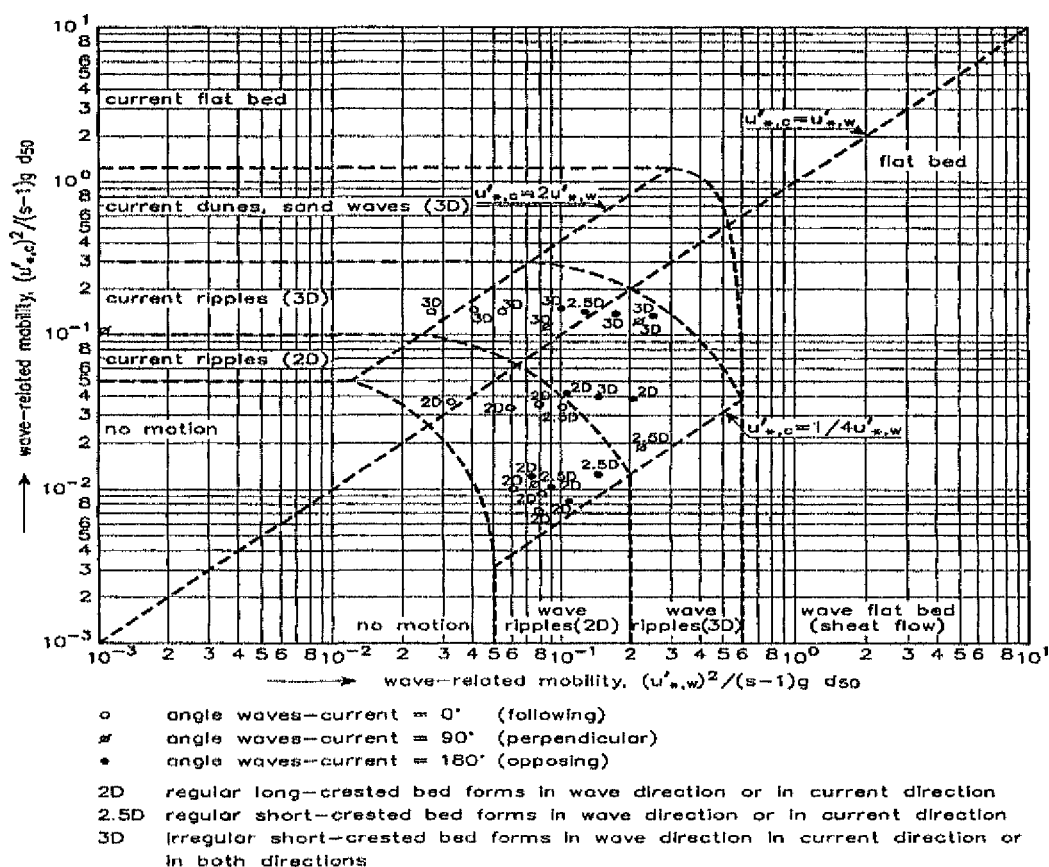


Figure 5.5.1 Bed form classification for current and waves, Van Rijn

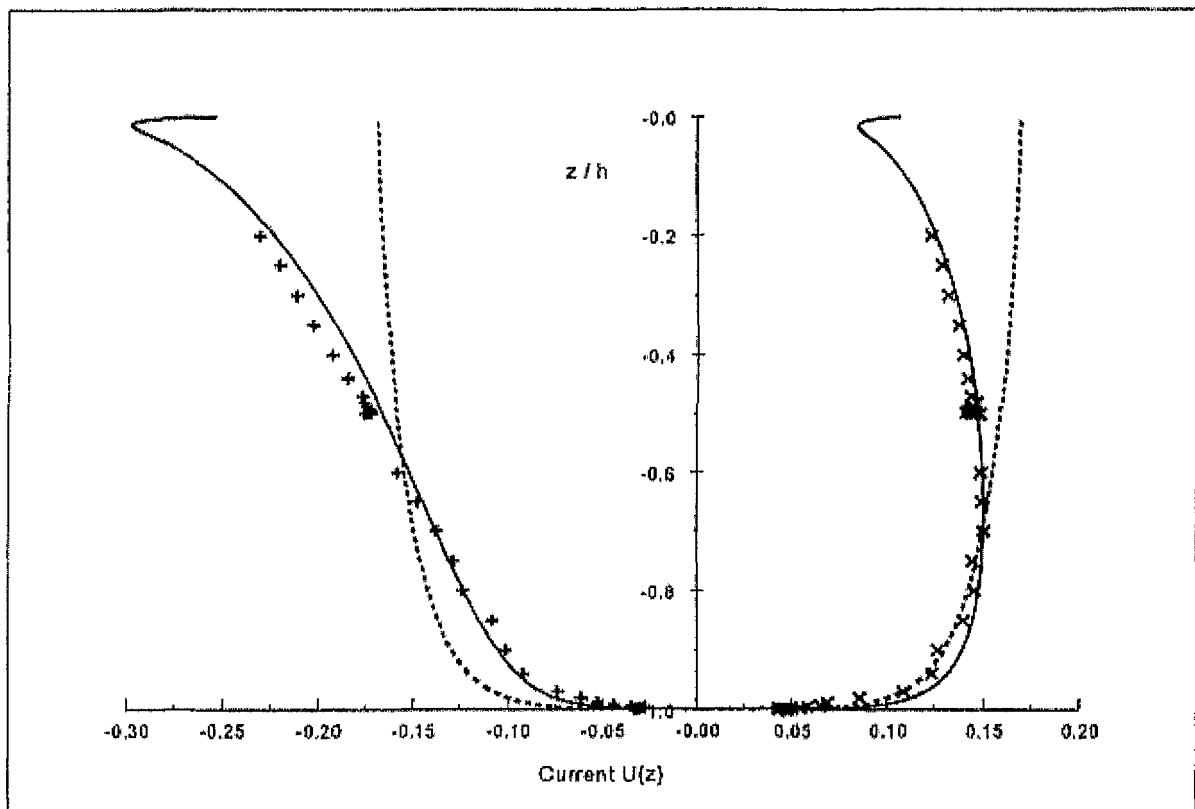
4.4 Golf - stroom interactie

In de literatuur zijn veel theorieën te vinden over de golf - stroom interactie, te beginnen met het fundamentele werk van Bijker (1967 en 1968), gevolgd door (Fredse (1984), Tanaka en Shuto (1981), Asano en Iwagaki (1984) en Myrhaug en Slaattelid (1989)). Soulsby et al. (1993)). en Tanaka en Thu (1994) hebben verschillende modellen met elkaar vergeleken. Experimentele proeven zijn uitgevoerd door Sleath (1990) en Simons et al. (1992).

In het kader van MAST, het Marine Science and Technology Programma van de EU, is de laatste jaren veel extra onderzoek gedaan naar de ontbrekende stukken in de theorie (non-linear waves) en de vertaling van stroom-golf interactie op sedimenttransport. Groeneweg en Klopman (1998), Fredse et al (1999) en Cotton en Stansby (2000) zijn hier voorbeelden van.

Algemeen

Golven en stroming hebben allebei hun eigen snelheidsprofiel en turbulentieprofiel. Gecombineerd ontstaat globaal het volgende profiel (Uit Groeneweg en Klopman (1998)),



Figuur: Stroomsnelheden met volgende en tegengestelde golf op de stroming.

- ... stroming zonder golven
- berekende snelheden bij golf + stroming,
- x en + gemeten snelheden.

Bij golf - stroom interactie treden de volgende verschijnselen op ten opzichte van alleen stroming:

- verlaging van de stroomsnelheden aan de bodem (zowel bij een volgende als tegengestelde stroming) $U_{\text{bodem}} (\text{wave} + \text{current}) < U_{\text{bodem}} (\text{current})$
- toename van de snelheden aan het wateroppervlak bij tegengestelde stroming en afname bij volgende stroming
- het omgekeerde effect bij de stroming op $z/h = -0.9$, net boven de bodem.

De afname van stroomsnelheden vlak boven de bodem wordt veroorzaakt door de opwekking van extra druk en schuifspanning in de grenslaag.

De bodemruwheid k_w die hoort bij de golf-stroming interactie is door de lagere stroomsnelheden veel hoger dan de bodemruwheid k_s die hoort bij stroming alleen ($\pm$ factor 20, afhankelijk van stroming en golven (Fredsoe et al. (1999))

Fredsoe et al. (1999) vond

$$f_{call}/f_{ccur} = 0,673 (u_c/U_m)^{-0,879} + 1$$

waarin:

- f_{call} : frictiecoëfficiënt golf+stroming
- f_{ccur} : frictiecoëfficiënt stroming
- U_c : dieptegemiddelde stroming
- U_m : maximale orbitaalstroming bij de bodem

Tanaka en Thu (1994) hebben een goede klassenverdeling gemaakt op basis van verschillende metingen voor verschillende situaties van golf-stroom interactie. Hierbij bepalen ze een specifiek Reynolds-getal en een interpolatie waarde ζ (afh van U_w , σ en z_0).

Niet-lineaire golven leiden tot een andere ruwheid, afhankelijk van de verhouding H/d , hoger of lager ligt dan de ruwheid van lineaire golven (H/d hoger $\Rightarrow f_w$ groter) (Cotton en Stansby (2000)).

4.5 Vergelijking bodemsnelheden

Voorlopig is er voor gekozen om op basis van bovenstaande literatuuronderzoek en beschikbare resultaten een pragmatische vergelijking te maken tussen de bodem schuifspannings snelheden nabij de bodem. Bij de golven speelt daar het probleem dat er in een spectraal golven model geen rekening wordt gehouden met bodem grenslaag verschijnselen zodat de hoogte waarop de orbitaal snelheid nabij de bodem wordt verondersteld op te treden niet bepaald is. SWAN maakt daarbij gebruik van de lineaire golftheorie. Deze theorie wordt uitvoerig beschreven in het collegedictaat korte golven (Battjes, 1984). In ondiep water ($kh \ll 1$) geldt een blokprofiel voor het verticale snelheidsprofiel met dezelfde maximale snelheden bij bodem en oppervlak, in intermediate water diepten ($kh = \text{orde } 1$) geldt een profiel met een e^{-} macht achtig verloop met nadrukkelijk een snelheid op de bodem ($z = -h$). Bij diep water ($kh \gg 1$) wordt de bodem niet meer gevoeld en is na een e^{-} macht achtig verloop de snelheid bij de bodem 0. Bij de golven speelt tevens het probleem dat, mede door het statistische karakter van de golven niet duidelijk wat nu als een representatieve U_{rms} orbitaal snelheid bij de bodem moet worden gezien. Aan de andere kant speelt datzelfde probleem bij de stromingen in de zin dat niet duidelijk is wat nu als een representatieve bodem schuifspannings snelheid moet worden gezien.

Voor de golven is er voorlopig voor gekozen om de over een heel jaar gemiddelde orbitaal snelheid nabij de bodem te gebruiken. Daarnaast is eveneens gebruik gemaakt van de rms orbitaal snelheid die in 10 % van de gevallen wordt overschreden.

De gevolgde procedure daarbij is dat voor het gehele jaar 1996 elk uur een golf voortplantingsberekening is gemaakt met het model SWAN ten gevolge van de actuele wind en dat de optredende rms orbitaalsnelheden nabij de bodem zijn na bewerkt.

Voor de stromingen is er voorlopig voor gekozen om de maximale bodem schuifspannings snelheid bij een karakteristiek morfologisch getij te gebruiken. Voor dit morfologische getij is gekozen voor een met een factor 1.08 opgeblazen gemiddelde getijsituatie. Overigens is daarbij in elk punt het maximum genomen dat op basis van 10 minuten reeksen beschikbaar is. Tenslotte zijn om een

vergelijking te kunnen maken de resultaten van het stroom model naar de resultaten van het golven model rooster geïnterpoleerd.

Figuur 4.1 geeft de maximale stroomsnelheid gedurende een karakteristiek morfologisch getij (1.08 maal gemiddeld getij) op dezelfde schaal als de gemiddelde rms orbitaal snelheid ten gevolge van golven, zoals gepresenteerd in figuur 3.13.

Figuur 4.2 geeft de maximale bodem schuifspannings snelheid onder invloed van stromingen gedurende een karakteristiek morfologisch getij (1.08 maal gemiddeld getij) op dezelfde schaal als de gemiddelde rms orbitaal snelheid ten gevolge van golven, zoals gepresenteerd in figuur 3.13.

Figuur 4.3 laat de verhouding zien tussen de over 1996 gemiddelde rms orbitaal snelheden ten gevolge van golven en de maximale tijdens een karakteristiek getij optredende bodemschuifspannings snelheid ten gevolge van stromingen.

Uit de figuur kan het volgende worden opgemaakt:

- in de diepere delen van de Westerschelde is er sprake van stroomdominantie;
- in de zeer ondiepe delen van de Westerschelde (slechts af en toe onderstromend) is er sprake van golf dominantie; met name ook op de hoge platen;
- er zijn intergetijdegebieden, ook het Oostelijk deel van de Westerschelde waar sprake is van wisselwerking tussen stroming en golven.

Overigens is de golfdominantie op de zeer ondiepe gebieden verklaarbaar uit de wijze waarop de schuifspanningen zijn gerealiseerd. Immers voor de Urms snelheden zijn ook de wat extremere waterstanden meegenomen die in 1996 zijn opgetreden. Daarbij zijn ook gebieden die tijdens het geselecteerde karakteristieke getij niet onderlopen, maar permanent droog blijven.

Figuur 4.4 laat de verhouding zien tussen de in 1996 optredende 90% percentiel rms orbitaal snelheden ten gevolge van golven en de maximale tijdens een karakteristiek getij optredende bodemschuifspannings snelheid ten gevolge van stromingen. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de resultaten tot op zekere hoogte vergelijkbaar zijn met de resultaten uit figuur 4.3 met dien verstande dat de gebieden waarin er sprake is van wisselwerkingen tussen stroming en golven groter worden, zoals mocht worden verwacht.

Naar aanleiding van deze resultaten is in fase 2 in meer detail gekeken naar de verdeling van golf- en stroomgedomineerde gebieden op een specifieke plaats in de Westerschelde.

4.6 Effecten van stroom op golven in de Westerschelde

4.6.1 Inleiding

Om het effect van stromingen op golven in de Westerschelde te onderzoeken zijn resultaten van SCALWEST stromingsberekeningen gebruikt in SWAN golfmodelberekeningen voor 2 perioden in 1996. De eerste periode loopt van 3 juni 1996 12:00 uur tot 7 juni 1996 12:00 uur. Deze periode komt overeen met de periode waarvoor op de Molenplaat 1-dimensionale stroommetingen zijn uitgevoerd. De maximale windsnelheid in deze periode bedraagt 6.50 m/s met een richting van 343° en de gemiddelde windsnelheid bedraagt ongeveer 2 m/s. Doordat in deze periode lage windsnelheden optreden, zullen de golven niet hoog zijn waardoor de door golven veroorzaakte bodemsnelheden niet merkbaar zullen zijn. Om deze reden is een tweede periode uitgezocht met hogere windsnelheden, en waarvoor SCALWEST stromingsberekeningen beschikbaar waren. Deze tweede periode loopt van 25 mei 1996 12:00 tot 27 mei 1996 24:00. De maximale windsnelheid in deze periode bedraagt 11.30 m/s met een richting van 244°.

De resultaten van het SCALWEST stromingsmodel zijn niet direct bruikbaar in het SWAN golvenmodel omdat zij verschillende rekenroosters gebruiken. Het SCALWEST gebruikt een kromlijng rooster terwijl

het SWAN een regelmatig rechthoekig rooster gebruikt. Om die reden zijn de berekende stroomsnelheids- en waterstandsvelden geconverteerd naar het SWAN rooster door middel van bi-lineaire interpolatie in de snelheidscomponenten.

Om het effect van stromingen op golven te analyseren zijn 3 series SWAN berekeningen uitgevoerd voor de 2 genoemde meetperiodes. Serie 1 is op basis van de gemeten wind bij Vlissingen, gemeten golfrandvoorwaarden bij station Wielingen en de berekende waterstandsvelden. Serie 2 omvat ook de berekende stroomvelden. Serie 3 omvat bovendien de set-up optie van het SWAN model. Met deze laatste optie wordt een eenvoudige benadering toegepast om het effect van golf-gedreven stromingen op de waterstand mee te nemen.

De resultaten van de verschillende soorten SWAN berekeningen zijn vervolgens geanalyseerd door de berekende velden van significante golfhoogte en bodemsnelheid van elkaar af te trekken zodat een ruimtelijk beeld verkregen wordt van het effect van stromingen op de golven en de bodemsnelheden.

Om het effect van stromingen op golven te analyseren is het nodig dat het hard stroomt en dat er golven zijn. Een overzicht van de berekende waterstanden bij Hansweert en Terneuzen is gegeven in de figuur 4.5 en 4.6. Op basis van deze criteria zijn in de eerste periode 2 tijdstippen gekozen. Het eerste tijdstip in deze periode 4 juni 1996, 7:00 uur en komt overeen met vloed. De windsnelheid bedraagt 5.40 met een richting van 241°. Het tweede tijdstip is 6 juni 1996, 15:00 uur en komt overeen met een eb-stroom. De windsnelheid bedraagt 6.50 m/s met een richting van 343°.

In de tweede periode is alleen het tijdstip 26 juni 1996, 13:00 uur gekozen. Dit tijdstip komt overeen met eb, de windsnelheid bedraagt 9.1 m/s en de windrichting is 241°. Voor deze tweede periode is geen tijdstip met vloed gekozen omdat het effect van golf-stroom interactie maximaal is bij eb, overeenkomend met tegen-stroom.

4.6.2 Resultaten van periode 1: 3-7 juni 1996.

De berekende ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte voor de eb-situatie op 4 juni 1996, 7:00 uur is gegeven in de figuur 4.7 voor de situatie zonder stroom en stroom. Figuur 4.7 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen in significante golfhoogte voor de situatie met stroom en zonder stroom. Figuur 4.7 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen voor de situatie met stroom en set-up, en de situatie zonder stroom. In figuur 4.7 is duidelijk te zien dat de ebstroom een behoorlijk effect heeft op zowel de golfhoogte als de golfrichting. Door de effecten van stroomrefractie draait de golfrichting naar de geul toe waardoor daar de golfhoogte toeneemt. Tevens blijkt uit deze figuur dat het meenemen van set-up in de SWAN berekening weinig effect heeft in vergelijking met de situatie met alleen stroom.

De berekende ruimtelijke variatie van de bodemsnelheden voor de eb-situatie op 4 juni 1996, 7:00 uur is gegeven in figuur 4.8 voor de situatie zonder stroom en stroom. Figuur 4.8 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen in bodemsnelheden voor de situatie met stroom en zonder stroom. Figuur 4.8 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen voor de situatie met stroom en set-up, en de situatie zonder stroom.

De berekende ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte voor de eb-situatie op 6 juni 1996, 15:00 uur is gegeven in figuur 4.9 voor de situatie zonder stroom en met stroom. Figuur 4.9 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen in significante golfhoogte voor de situatie met stroom en zonder stroom. Figuur 4.9 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen voor de situatie met stroom en set-up, en de situatie zonder stroom.

De berekende ruimtelijke variatie van de bodemsnelheden voor de vloed-situatie op 6 juni 1996, 15:00 uur is gegeven in figuur 4.10 voor de situatie zonder stroom en met stroom. Figuur 4.10 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen in bodemsnelheden voor de situatie met stroom

en zonder stroom. Figuur 4.10 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen voor de situatie met stroom en set-up, en de situatie zonder stroom.

4.6.3 Resultaten van periode 2: 26-27 mei 1996.

De berekende ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte voor de eb-situatie op 26 mei 1996, 13:00 uur is gegeven in figuur 4.11 voor de situatie zonder stroom en met stroom. Figuur 4.11 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen in significante golfhoogte voor de situatie met stroom en zonder stroom. Figuur 4.11 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen voor de situatie met stroom en set-up, en de situatie zonder stroom.

De berekende ruimtelijke variatie van de bodemsnelheden voor de eb-situatie op 6 juni 1996, 15:00 uur is gegeven in figuur 4.12 voor de situatie zonder stroom en met stroom. Figuur 4.12 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen in bodemsnelheden voor de situatie met stroom en zonder stroom. Figuur 4.12 toont ook de ruimtelijke variatie van de verschillen voor de situatie met stroom en set-up, en de situatie zonder stroom.

Het effect van stromingen op de golfhoogten en bodemsnelheden is daarnaast geïllustreerd in de figuren 4.13 en 4.14 in de vorm van tijdreeksen. De resultaten zijn gevisualiseerd voor 2 locaties, een ten zuidoosten van de Molenplaat en een aan de rand van de Molenplaat, en voor 2 periodes. De eerste periode is die van 3-7 juni 1996, waarvoor ook metingen op de Molenplaat beschikbaar zijn. De tweede periode is van 26 tot en met 27 mei 1996, met hogere windsnelheden en golven. De doorgetrokken lijnen zijn voor het geval zonder stromingen, de onderbroken lijnen zijn voor de gevallen met stroom en stroom met set-up.

4.6.4 Discussie

De resultaten van de SWAN berekeningen met stroom geven aan dat het effect van golf-stroom interacties goed merkbaar is voor zowel condities met lage windsnelheden als met hogere windsnelheden. Deze effecten spelen natuurlijk alleen een rol tijdens eb of vloed en niet tijdens de kenteringen. Uit de figuren met de verschillen in golfhoogten is goed te zien dat het effect van stroom op de golfcondities vooral merkbaar is in de geulen en dat de uitstraling van de golf-stroom interacties gering is. Opvallend is dat bij de eb-situaties de golfhoogte toeneemt in de geulen en afneemt in de ondiepe delen. Het meenemen van de set-up in SWAN heeft voor de gepresenteerde gevallen weinig effect. Door de effecten van stroomrefractie veranderen de golfrichtingen, waardoor de ruimtelijke verdeling van de golfhoogte verandert.

Hieruit kan echter niet de conclusie worden getrokken dat de set-up geen rol speelt. Dit komt doordat de in SWAN gebruikte methode om set-up uit te rekenen, gebruik maakt van een benadering die niet goed werkt in open gebieden, zoals rondom ondieptes in de Westerschelde. Om set-up goed te kunnen uitrekenen, is een volledig gekoppeld golf-stroom interactie model nodig. Pas na het uitvoeren van dergelijke berekeningen kunnen onderbouwde conclusies getrokken worden over het belang van set-up in de Westerschelde.

Voor de eerste periode met lage windsnelheden zijn de bodemsnelheden erg laag. Analyse van de verschilplaatjes laten zien dat het effect van stromingen (via het golfveld) op de bodemsnelheden erg klein is. Voor de tweede periode zijn deze effecten wel merkbaar, omdat daar de golfhoogte groter zijn. Zoals verwacht zijn de verschillen verwaarloosbaar in de geulen en merkbaar langs de plaatranden.

4.7 Conclusies en aanbevelingen m.b.t. de interactie tussen golven en stromingen.

Golven zorgen voor een schuifspanningsverhoging in stromingsmodellen. Alleen in het geval er vrijwel geen wind of golven zijn speelt dat effect niet. Het effect wordt groter naarmate men dichter in de buurt van de monding van de Westerschelde komt. Of wel het effect wordt belangrijker indien een intergetijde gebied meer open staat voor golfinvloed. Bij lage windsnelheden zijn de golven klein. Desondanks is het effect van stromingen op de golven dan goed merkbaar, omdat met name korte golven worden geblokkeerd. Het effect op de bodemsnelheden is bij deze lage windsnelheden echter gering. Bij hogere windsnelheden is het effect van stromingen op het golfveld merkbaar op zowel de golfcondities als de bodemsnelheden.

Idealiter is voor een goede bepaling van de bodemruwheid in stromingsmodellen, met name in intergetijdegebieden, de twee zijdlige golf-stroom interactie (bij voorkeur iteratief) van essentieel belang.

Slechts in die gevallen waar het nauwelijks waait of de golven niet breken (b.v. de lijzijde van platen) speelt dit effect niet. Zodra de golven gaan breken kan dat aanleiding geven tot een veranderende beddingvorm en bodemruwheid. Brekende golven drijven een golfgedreven stroming aan, zorgen voor een setup en zorgen voor een Stokes drift die weer aanleiding geeft tot een netto verplaatsing van water. Dit laatste effect is minder van belang in vergelijking met de andere effecten.

Met name in geval het harder waait, zoals tijdens stormen is het meenemen van iteratieve twee zijdlige golf-stroom interactie van fundamenteel belang voor het effect op de bodemsnelheden. Ook als het weinig waait kunnen met name langs de plaatranden golf-stroom interacties lokaal van belang zijn.

Aanbevelingen:

Voor een goede evaluatie van de effecten van golven en stromingen in intergetijde gebieden is het noodzakelijk simultane metingen van golven stromingen en wind te hebben. Daarbij zijn metingen van een situatie met enige wind essentieel (let op ook de golfvoortplantingsrichting en de richting van de stroming moeten gemeten worden). Bij het bepalen van de meetlocaties is het van belang ook plaatsen te selecteren waar het effect van golf-stroom interactie duidelijk merkbaar is op zowel de golven als de bodemsnelheden.

Het verdient aanbeveling daarna dergelijke situaties in grotere mate van detail door te rekenen met iteratieve twee-zijdlige golf-stroom interactie, door gebruik te maken van een gekoppeld systeem van golf- en stroom modellen. In een later stadium zou zelfs hierop aansluitend nog naar een gekoppeld bodemveranderings en transport model kunnen worden gekeken. Het volledig iteratief meenemen van de golf-stroom interactie vergt meer rekeninspanning, en dient daarom te worden beperkt tot een of enkele wat kortere perioden. Voor het bepalen van de gevoeligheid en het belang hiervan verdient het aanbeveling nog even in de Westerschelde door te gaan. Het verdient daarnaast aanbeveling dergelijk onderzoek te doen in het b.v. het Wadden gebied, maar eveneens op de rechte Hollandse Kust, waar de invloed van golven zelfs in de meeste gevallen overheersend is. Om het effect en het belang van de interactie tussen golven en stroommodellen tijdens stormen te kunnen aantonen is het aan te bevelen te kijken naar een gebied waar dit naar verwachting van overwegend belang is, zoals in de monding van het Haringvliet rond de Hinderplaat. Daar speelt bijvoorbeeld het massatransport over de Hinderplaat ten gevolge van set-up en overslaande golven tijdens het onderlopen een significante rol.

Door RIKZ Den Haag is in 1997 verificatiestudie uitgevoerd om de geschiktheid van SWAN in de Westerschelde uit te testen (Andorka, 1997). Deze studie is uitgevoerd voor enkele stormperiodes met westelijke winden en windsnelheden tot 22 m/s. Op grond van vergelijkingen tussen metingen en golfmodel resultaten in het westelijk deel van de Westerschelde (tot en met Terneuzen), is geconstateerd dat SWAN het goed doet met betrekking tot de voorspelling van de significante golfhoogte, maar dat de golfperiode structureel met ongeveer een 1/2 seconde wordt onderschat. Nadere studies

om dit probleem op te lossen worden momenteel uitgevoerd. Het meenemen van stroom in SWAN berekeningen gaat goed voor eenvoudige geïdealiseerde toepassingen. Een verificatie van SWAN met stroom in gecompliceerde veldsituaties, zoals de Westerschelde, moet echter nog worden uitgevoerd. Wel kan gesteld worden dat de wezenlijke effecten redelijk goed gemodelleerd worden. De huidige studie kan als basis kunnen dienen voor nadere verificatie studies ten aanzien van het gebruik van SWAN met stroomeffecten in de Westerschelde.

5 Samenvatting interviews

In het kader van dit project zijn een aantal interviews afgenomen en vragenlijsten rondgestuurd. In dit hoofdstuk worden eerst de vragen gegeven en daarna een samenvatting van de gegeven antwoorden. Er zijn in het totaal 7 mensen geïnterviewd. De volledige Interviews staan in bijlage 1.

1. Zou u zichzelf kenschetsen als een fysicus (A), modelontwikkelaar (B) of als een modelbouwer / afregelaar (C) ?
Ligt u aandachtsgebied met name bij de golfmodellering, bij de stroommodellering of bij beide?

Uit de antwoorden op deze vraag blijken van de 7 mensen die geïnterviewd zijn, 5 zichzelf te kenschetsen als fysicus, 5 als modelontwikkelaar en 3 als modelbouwer/afregelaar. Er mochten meerdere antwoorden worden ingevuld.

Het accent van de geïnterviewden ligt bij de stroommodellering.

Voor de fysici (A):

2. Wat zijn volgens u de dominante factoren bij de totstandkoming van beddingvormen op ondiep water in een getij gedomineerd estuarium zoals b.v. de Westerschelde, met een duidelijk ontwikkeld getij?

In een getijgedomineerd estuarium is de stroomsnelheid nabij de bodem is van groot belang. Bij stormcondities zullen de golven hun invloed laten gelden en dan met name in ondiepe gebieden. In het westelijk deel van de Westerschelde treedt dit eerder op dan in het oostelijk gedeelte. De belangrijkste factoren die daarnaast worden genoemd zijn: waterdiepte, korreldiameter (bodemsamenstelling; slibgehalte; biochemische processen o.a. cementering en uitdroging), geul/plaat interactie en reststroom patronen.

3. Welke aanpassingssnelheden zijn te verwachten in de beddingvormen van droogvallende gebieden in estuaria? Veranderd volgens u in deze gebieden de bodemruwheid binnen een getij? En tijdens een storm?

De asymmetrie van beddingvormen verandert gedurende een getij. Het is onduidelijk of de hoogte en lengte van de beddingvormen eveneens tijdens een getij veranderen. Tijdens storm verlopen alle processen sneller en zijn er wel veranderingen in de beddingvormen gedurende een getijcyclus te verwachten. De beddingvormen kunnen dan verdwijnen en er kan sheeflow optreden. Tijdens een doodtij/springtij cyclus is bekend dat er eveneens variaties in de beddingvormen kunnen optreden. Bij springtij is er sprake van een verhoging van de beddingvorm en bij doodtij van een verlaging. Bij rivieren kunnen de bodemvormen zich zeer snel aanpassen als gevolg van de hoge stroomsnelheden bij hoge afvoer.

Voor de Modelontwikkelaars (B):

4. In hoeverre wordt er in de numerieke benadering en de gemodelleerde fysica van de modellen die u mede heeft ontwikkeld specifiek rekening gehouden met de hydrodynamica in intergetijdgebieden (b.v. droogvallen, bodemwrijving, breken, golfoploop, set-up, aandrijving door golven, erosie en sedimentatie etcetera.)

In stromingsmodellen is droogvallen en onderlopen geen probleem dankzij robuuste droogvalprocedures. Dankzij het sigma-rooster in verticale zin is ook in 3D de verschuivende waterlijn geen probleem. In golfmodellen wordt stationair gerekend en speelt droogvallen dus geen rol. In de stromingsmodellen van Rijkswaterstaat wordt momenteel bij de bepaling van de ruwheid tijdens de berekening nog geen rekening gehouden met de invloed van golven of bodemvormen. Het is de

verwachting dat de getij gedreven stroming in Intergetijdengebieden door aanpassing van de bodem-ruwheid en roosterverfijning redelijk goed te bepalen is (onder normale omstandigheden).

De bodemwrijving wordt in stromingsmodellen via Chézy, Manning of White-Colebrook formuleringen gekoppeld aan de locale waterdiepte en snelheid. Via de parametrisaties van Soulsby en anderen kunnen diverse golf-stroominteractiemodellen worden gebruikt om de invloed van golven op de schuifspanning weer te geven. In stromingsmodellen is de ruwheid nu nog een (mogelijk ruimtelijk variërende) invoerparameter. Gewerkt wordt aan het inbouwen van alluviale ruwheidsvoorspellers.

Breken van golven kan worden meegenomen in golvenmodellen zoals HISWA of SWAN. Golfploop wordt hierin, gezien het spectrale karakter van deze golven modellen niet meegenomen. Het breken van golven leidt tot dissipatie van energie (radiation stress gradiënten) die als aandrijvende krachten in de stromingsmodule van Delft3D kunnen worden meegenomen en daar golf set-up en golfgedreven stromingen aandrijven. De massaflux door golven leidt tot een additioneel netto transport van water en dus tot een aanpassing van de stromingen, hetgeen eveneens in de stromingsmodule van Delft3D in 2DH of 3D kan worden meegenomen. In het laatste geval wordt ook de turbulentie-modellering aangepast.

Erosie en sedimentatie kan in Delft3D zowel in 2DH/quasi-3D als volledig 3D worden berekend, ook in intergetijdengebieden, en met terugkoppeling van de bodemveranderingen naar de stromingen en golven modellen.

5. (en 6). Als u een indruk zou moeten geven van de geschiktheid en de nauwkeurigheid van de gemodelleerde fysische processen en de toegepaste numerieke benadering in tijd en ruimte, heeft u dan het idee dat er essentiële fysische processen zijn die niet in het model zijn meegenomen, dan wel numerieke benaderingen zijn toegepast die minder geldig zijn voor intergetijdengebieden? Indien dat het geval is, zou u dan kunnen aangeven op welk terrein van fysica en numerieke benadering de onnauwkeurigheid zich voordoet dan wel waar het model eigenlijk niet geschikt is?

Onderstaande processen zijn de belangrijkste die genoemd zijn:

- De modellering van de bodemvormen en daarmee de samenhangende ruwheid voor zowel de golf- als stroommodellering;
- De golf-stroom interactie (wave-blocking), dit is ook belangrijk in de Ooster- en Westerschelde;
- De modellering van windgroei in golfmodellen / winddrag formulering in stroommodellen;
- Golfbreken is in SWAN kort door de bocht gemodelleerd;
- De opwoeling van sediment door golven;
- Geul/plaat interactie: Er is in 2DH en 3D modellen nog weinig onderzoek verricht naar de nauwkeurigheid van de modellen. Volgen empirisch gevonden relaties ook uit de modelresultaten? Rond gebieden met grote bodemgradiënten dient naar verwachting 3D gerekend te worden vanwege de secundaire stroming.

Voor de Modelbouwer/afregelaar (C):

7. In hoeverre heeft u bij de afregeling van het door u gebouwde model (de door u gebouwde applicatie) rekening gehouden met de specifieke karakteristieken van de hydrodynamica in intergetijdengebieden?

Ten aanzien van de volgende zaken dient een nauwkeurige toets/afweging gemaakt te worden bij de bouw van een model:

- Resolutie rooster (de fijnheid van het rooster)
- Modellering overlaten
- Droogvalprocedure/ droogval criteria

8. Zo ja, welke specifieke aanpassingen heeft u gedaan om een betere representatie van de hydrodynamica op ondiep water te bewerkstelligen?

Omdat de globale waterbeweging niet of nauwelijks wordt beïnvloed door de waterbeweging in intergetijdengebieden is in het verleden nauwelijks gekeken naar een betere representatie van de stromingshydrodynamica in droogvallende gebieden. Er wordt wel een verschillende ruwheid toegepast voor platen en geulen. Binnen WAQUA kan domeindecompositie worden toegepast, waardoor meer detail in interesse gebieden kan worden aangebracht.

9. Heeft u bij de afregeling van de door u gebouwde / toegepaste modellen ooit een vergelijking gemaakt met metingen in het intergetijdengebied?

Er is voor de stroommodellen zelden een vergelijking gemaakt met metingen in het intergetijdengebied. Voor de golfmodellering zijn een aantal verificaties uitgevoerd die geresulteerd hebben in verbeteringen.

Vanuit de rivieren komt de aanbeveling om met een multibeam methode de bodem rond een plaat of een slik op te meten, gecombineerd met snelheidsmetingen.

6 Conclusies

Binnen Rijkswaterstaat worden waterbewegingsmodellen ontwikkeld voor beheersproblemen en beleidsvragen. De stromingsmodellen zijn afgeregeld op de waterstanden en debieten in de geulen. De waterbeweging in het intergetijdengebied heeft slechts een beperkte invloed op de waterbeweging in de geulen en is daarom niet verder afgeregeld. Echter, om de beheersproblemen en beleidsvragen te kunnen aanpakken is een goede reproductie in het intergetijdengebied wel nodig. Daarnaast is het onbekend in hoeverre golven van invloed zijn op de reproductie van stromingsmodellen en in hoeverre de golfbeweging bijdraagt aan de bodemsnelheden. De problemen en vragen spelen op verschillende terreinen:

- Ecologie: het voorspellen van de effecten van veranderingen in het fysisch-morfologisch systeem voor het ecosysteem en het maken van ecotopen kaarten
- Morfologie: het evalueren van effecten van ingrepen op het intergetijdengebied zoals bijvoorbeeld de uitwisseling van sediment tussen het intergetijdengebied en de geul.
- Veiligheidsvraagstukken: bij een maatgevende hoogwaterstand reageert de waterbeweging anders dan onder normale omstandigheden, omdat het gehele intergetijdengebied onder water staat. Het intergetijdengebied kan dan grote invloed krijgen op de hoogwaterstand.

Bij het RIKZ is binnen het project ECOMORF een studie gestart naar de reproductiekracht van bestaande modellen in het intergetijdengebied. De studie heeft als doel:

1. Inzicht krijgen in de reproductie van waterbewegingsmodellen die in gebruik zijn bij het RIKZ.
2. Inzicht krijgen in de mogelijkheden en aanpassingen om de reproductie te optimaliseren.
3. Het doorvoeren van deze verbeteringen.

Het hier gerapporteerde onderzoek moet gezien worden als een eerste stap om de doelstellingen van de studie te bereiken. Het onderzoek heeft zich daarom nu beperkt tot de WAQUA en de SWAN modellen van de Westerschelde.

Conclusies ten aanzien van stromingen

Ten aanzien van de doelstelling van de studie kunnen de volgende conclusies over de reproductie van de stroming gegeven worden:

1. Op de slikken is de reproductie van het SCALWEST-model slecht. Hierbij zijn de stroomsnelheden op verschillende locaties vergeleken met modeluitkomsten (Svašek 1999). Ook een meting op een plaat is vergeleken met het SCALWEST-model. Hieruit komt naar voren dat het model de meting redelijk reproduceert.
2. Een aanpassing van de bodemruwheid in het intergetijdengebied lijkt de sleutel tot verbetering van de reproductie van het stromingsmodel.
3. Op basis van veldinformatie (geomorfologische kaart) is een nieuw ruwheidsveld in SCALWEST ingebracht dat een positief effect heeft op de reproductie van de stroomsnelheid op de slikken. De resultaten op de plaat geven geen verbetering te zien.

Aanbevelingen ten aanzien van stromingen

Er is een goede kans dat de reproductie van het stromingsmodel geoptimaliseerd kan worden. Daarvoor moeten de volgende stappen gezet worden:

- Alle bestaande ondiep water metingen van de Westerschelde verder uitwerken en vergelijken met SCALWEST. Regel op basis van deze uitkomsten het ruwheidsveld verder af.
- Implementeer het nieuwe ruwheidsveld in het SCALWEST-model. Hierbij moet gekeken worden of dit eventueel via de White-Colebrook formulering gedaan kan worden, omdat dit (mogelijk) beter aansluit bij de ruwheidschatters in het intergetijdengebied.

Geadviseerd wordt het KUSTSTROOK-model en dan met name het Waddengebied nader te onderzoeken. De kennis opgedaan met dit onderzoek kan mogelijk ook gebruikt worden om het 'Waddenmodel' te optimaliseren.

Conclusies ten aanzien van golven:

Ten aanzien van de doelstelling van de studie is het lastig om uitspraken te doen over de reproductiekracht van golfvoortplantingsmodellen in de Intergetijdengebieden in de Westerschelde omdat er in dit project geen metingen in deze gebieden beschikbaar waren.

Desondanks kunnen op grond van door RIKZ uitgevoerde studies de volgende uitspraken gedaan worden over de reproductie van het SWAN model in de Westerschelde:

1. De significante golfhoogte wordt over het algemeen goed voorspelt.
2. De gemiddelde golfperiode wordt in het algemeen onderschat met ongeveer een ½ s.
3. Stroomeffecten worden in het SWAN model goed meegenomen voor eenvoudige situaties. Voor gecompliceerde situaties, zoals de Westerschelde, zijn vooralsnog geen gegevens beschikbaar om kwantitatieve uitspraken te kunnen doen over de reproduceerbaarheid.

Op grond van de ervaringen in deze studie worden de volgende conclusies gegeven:

De bodemruwheid is een ondergeschikte parameter in de golfvoortplantingsmodellen, zeker voor het bepalen van de golfhoogte en naar we nu aannemen ook voor de golfperiode in Intergetijdengebieden. Energiedissipatie door breken is veel belangrijker.

Conclusies ten aanzien van golf-stroom interacties:

Het meenemen van de stromingen en waterstanden in de golfmodellering is van fundamenteel belang, omdat deze zorgen voor golfblokkade en / of golfperiode veranderingen. Daarnaast kunnen door setup golven in Intergetijdengebieden op plaatsen komen waar ze zonder setup niet zouden komen. De wijze waarop de setup in SWAN is gemodelleerd, is echter te beperkt om daarover kwantitatieve uitspraken te doen.

Golven zorgen voor een schuifspanningsverhoging in stromingsmodellen. Alleen in het geval er vrijwel geen wind of golven zijn speelt dat effect niet.

Met name in geval het harder waait, zoals tijdens stormen is het meenemen van iteratieve twee zijdig golf-stroom interactie van fundamenteel belang voor het effect op de bodemsnelheden. Ook als het weinig waait kunnen met name langs de plaatranden golf-stroom interacties lokaal van belang zijn.

Aanbevelingen ten aanzien van golven en golf-stroom interacties:

Voer een nieuwe meetcampagne uit voor platen en slikken die nog niet gemeten zijn waarbij zowel stroming als golven worden gemeten.

Voer voor een dergelijke situatie waarbij enige golven optreden een gecombineerde modellering van golven en stromingen uit waarbij twee zijdig iteratieve golf-stroom interactie wordt meegenomen.

Literatuurlijst

- Andorka, Gál, J.H., 1997: Betrouwbaarheid golfmodellen HISWA en SWAN in de Westerschelde, RIKZ/OS-97.112.
- Alkyon, 1998: Golfberekeningen Oosterschelde, Rapport A246, G.Ph. van Vledder en G. Hartsulker.
- Alkyon, 1999: SWAN golfberekeningen in de Westerschelde voor 6 windklassen. Rapport A384, G.Ph. van Vledder.
- Asano, T., Iwagaki, Y., 1984, Bottom turbulent boundary layer in wave-current co-existing systems, Proc. 19th Int. Conf. Coast. Eng. ASCE, New York, pp 2397-2413
- Battjes, J.A. (1984) Lecture notes prepared for the International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft 1984.
- Bijker, E.W. (1967) Some considerations about scales for Coastal Models with Movable Bed ; Dissertation, Delft University of Technology.
- Bijker, E.W. (1968) Littoral drift as a function of waves and current; Delft Hydraulics Laboratory publication number 58, 1969. Also in Proceedings of the 11th Coastal Engineering Conference, London, 1968.
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999: A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J. Geoph. Research C4, 104, 7649-7666.
- Dingemans W., Water wave propagation over uneven bottoms, Advanced Series on Ocean Engineering - Vol. 13 (2 parts), World Scientific Publishing Co., ISBN 981-02-3993-9, 1997 Singapore.
- Duijker, J.M.C., 1998, Vestiging van het Nonnetje op de Plaat van Baarland, Een verkennende modelstudie, IMAU, R98-12
- Fredsøe, J., 1984, Turbulent boundary layer in wave-current motion, J.Hydraul. Eng. ASCE 110, 1103-1120
- Groeneweg, J. en Klopman, G., 1998, Changes of the mean velocity profiles in the combined wave-current motion described in a GLM formulation.
- Havinga, 1992, Sediment transport in Non-breaking Waves under an angle with a Current. Dep. of Coastal Engineering , TUD
- Huils, S., 1995, Geomorfologische ontwikkeling van het intergetijdegebied in de Westerschelde 1935-1989, IMAU, R95-3
- Israel, C.G., 1997, Modellering van het sedimenttransport over de Plaat van Ossensse in de Westerschelde, afstudeerrapport, TU-Delft
- Jansen, M.H.P., 1998, Validatie TRISCAL en aanzet sedimenttransport, t.b.v. Project Verdieping, Rapportage Activiteit C, Ingenieursbureau Svašek BV.
- McLaren, P. en Powys, R.I.L., 1994, Patterns of sedimenttransport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde, Geosea Consulting Cambridge
- Myrhaug, D. en Slaattelid, O.H., 1989, Combined wave and current boundary layer model for fixed rough seabed. Ocean Eng., 16(2): 1797-1808
- Nasner, H, 1974, Über das Verhalten von Transportkorpen im Tidegebiet. Mittellungen Franzius Institut, Heft 40, TU Hannover
- Parez E., Handfielding database Morfologische veldmetingen, Rijkswaterstaat RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS/2000.820X, Middelburg, april 2000
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling, 1986: Numerical Recipes, The art of Scientific Computing. Cambridge University Press. 818 pp.
- Rijkswaterstaat, Meetkundige dienst, 1997, Toelichting bij de Geomorfologische kartering van de Westerschelde 1996, op basis van false-colour luchtfoto's 1:10000, MDGAT-97.52
- Rijn, L.C. van, 1993, Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas.
- Simons, R.R., Grass, T.J., Tehran, M.M., 1994. Bottom shear stress in the boundary layers under waves and currents crossing at right angles. Proc. 23rd Int. Conf.Coast. Eng. ASCE, New York, pp.604-617
- Sleath, J.F.A., 1990, Velocities and bed friction in combined flows. Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. ASCE, New York, pp. 450-463

- Soulsby, R.L., Hamm, L., Klopman, G., Myrhaug, D., Simons, R.R. en Thomas, G.P., 1993, Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coast. Eng.*, 21: 41-69
- Svašek, 1979, Onderzoek Cunet Stormvloedkering Oosterschelde, rapport 233.
- Svašek, 1998, Validatie TRISCAL en aanzet sedimenttransport, t.b.v. Project Verdieping, Rapportage Activiteit C, Rapport 1011.
- Svašek, 1999, Het SCALWEST-model in het Intergetijdengebied, een eerste verkenning naar de afwijkingen tussen het model en veldmetingen. Rapport 1115.
- Svašek, 2000, De relatie tussen de bodemgeometrie en de veiligheid in de Westerschelde. Rapport 1153.
- Tanaka, H., Shuto, N., 1981 Friction coefficient for a wave-current coexistent system. *Coast. Eng. Jpn.*, 24; 105-128
- Tanaka, H., Thu, A., 1994, Full range equation of friction coefficient and phase difference in a wave-current boundary layer. *Coast. Eng.*, 22: 237-254
- Terwind, J en Brouwer, M. 1986, The behaviour of intertidal sandwaves during neap-spring tide cycles and the relevance for paleoflow reconstructions, *Sedimentology*, 1986, 33, p 1-31
- Witteveen en Bos, Waterbeweging en morfologie van slikken in de Westerschelde, RW537.2, 1998

Lijst van figuren

- 1.1 Overzicht Westerschelde; Benaming van de verschillende gebieden
- 2.1 Voorbeeld van vergelijking model-meting op slik uit Svašek 1999
- 2.2 Ligging van de Molenplaat
- 2.3 Vergelijking SCALWEST met metingen op de Molenplaat
- 2.4 Geomorfologische kaart 1996
- 2.5 Max. Stroomsnelheden / Max. Bodemschuifspanning SCALWEST
- 2.6 t/m 2.12 Verhouding $U_{\text{gem}}/\text{gem. diepte}$
- 2.13 Geschatte bodemruwheden op basis van geomorfologische kaart 1996
- 2.14 Oppervlak vs. Maximum stroomsnelheid & Max. stroomsnelheid vloed
- 2.15 Oppervlak vs. Max. stroomsnelheid eb & Gemiddelde stroomsnelheid
- 2.16 Oppervlak vs. Gemiddelde stroomsnelheid vloed & Gemiddelde stroomsnelheid eb
- 2.17 Oppervlak vs. Gemiddelde waterstand & Gemiddelde waterdiepte
- 2.18 Oppervlak vs. Maximum bodemschuifspanning & Gemiddelde bodemschuifspanning
- 2.19 Oppervlak vs. Max. U_{ster} & Dominant volume
- 2.20 Oppervlak vs. Getijvolume
- 2.21 Nieuwe ruwheden SCALWEST
- 2.22 Verschil stroomsnelheden max. vloed met nieuw ruwheidsveld
- 2.23 Verschil stroomsnelheden max. eb met nieuw ruwheidsveld
- 2.24 Ruwheden fases Middelgat en Gat van Ossensisse
- 2.25 Verschil stroomsnelheden max. vloed
- 2.26 Verschil stroomsnelheden max. eb
- 2.27 Vergelijking stroomsnelheden Molenplaat.
- 3.1 Bodemtopografie Westerschelde
- 3.2 SWAN rekenrooster en locatie waterstandsmetingen en locatie meetstation Wielingen.
- 3.3 Voorbeelden van de 'cubic spline' interpolatietechniek voor waterstanden
- 3.4 Uurlijkse variatie van windsnelheid en windrichting bij Vlissingen
- 3.5 Isolijnen van significante golfhoogte (m) voor 30 oktober 1996, 10:00 uur met golfrand-voorwaarde
- 3.6 Isolijnen van significante golfhoogte (m) voor 30 oktober 1996, 10:00 uur zonder golfrandvoorwaarde
- 3.7 Ruimtelijke variatie van significante golfhoogte H_s voor 29 augustus 1996, 2:00 uur.
- 3.8 Ruimtelijke variatie van gemiddelde golfperiode T_{m01} voor 29 augustus 1996, 2:00 uur.
- 3.9 Ruimtelijke variatie van U_{rms} voor 29 augustus 1996, 2:00 uur.
- 3.10 Ruimtelijke variatie van golf - geïnduceerde stroom aandrijvende kracht voor 29 augustus 1996, 2:00 uur.
- 3.11 Ruimtelijke variatie van gemiddelde significante golfhoogte
- 3.12 Ruimtelijke variatie van maximale significante golfhoogte
- 3.13 Ruimtelijke variatie van standaardafwijking significante golfhoogte
- 3.14 Ruimtelijke variatie van 90% percentiel van significante golfhoogte
- 3.15 Ruimtelijke variatie van gemiddelde bodemsnelheid
- 3.16 Ruimtelijke variatie van maximale bodemsnelheid
- 3.17 Ruimtelijke variatie van standaardafwijking bodemsnelheid
- 3.18 Ruimtelijke variatie van 90% percentiel van bodemsnelheid
- 3.19 Bodemprofiel van geschematiseerde bodem
- 3.20 Tijdvariatie waterstand gedurende één getijcyclus
- 3.21 Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters tijdens laag water
- 3.22 Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters tijdens middelhoog water
- 3.23 Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters tijdens hoog water
- 3.24 Tijdvariatie hydro-dynamische parameters voor locatie $x = 100$ m
- 3.25 Tijdvariatie hydro-dynamische parameters voor locatie $x = 300$ m
- 3.26 Tijdvariatie hydro-dynamische parameters voor locatie $x = 500$ m

- 3.27 Gevoeligheid hydro-dynamische parameters bij hoog water
- 3.28 Gevoeligheid hydro-dynamische parameters bij middelhoog water

- 4.1 Isolijnen van maximale snelheid U_{max} gedurende een karakteristiek morfologisch getij
- 4.2 Isolijnen van maximale bodem schuifspannings snelheid U^* gedurende een karakteristiek morfologisch getij
- 4.3 Isolijnen van de verhouding tussen gemiddelde U_{rms} en maximale U^*
- 4.4 Isolijnen van de verhouding tussen 90% percentiel U_{rms} en maximale U^*
- 4.5 Waterstanden, Hansweert en Terneuzen voor de periode 4 juni tot en met 7 juni 1996
- 4.6 Waterstanden, Hansweert en Terneuzen voor de periode 25 mei t/m 27 mei 1996
- 4.7 Isolijnen van significante golfhoogte voor 4 juni 1996, 7:00 uur, voor de situatie zonder stroom, met stroom, en het effect van stroom en stroom met setup, weergegeven als verschillen.
- 4.8 Isolijnen van bodemsnelheid voor 4 juni 1996, 7:00 uur, voor de situatie zonder stroom, met stroom, en het effect van stroom en stroom met setup, weergegeven als verschillen.
- 4.9 Isolijnen van significante golfhoogte voor 6 juni 1996, 15:00 uur, voor de situatie zonder stroom, met stroom, en het effect van stroom en stroom met setup, weergegeven als verschillen.
- 4.10 Isolijnen van bodemsnelheid voor 6 juni 1996, 15:00 uur, voor de situatie zonder stroom, met stroom, en het effect van stroom en stroom met setup, weergegeven als verschillen.
- 4.11 Isolijnen van significante golfhoogte voor 26 mei 1996, 13:00 uur, voor de situatie zonder stroom, met stroom, en het effect van stroom en stroom met setup, weergegeven als verschillen.
- 4.12 Isolijnen van bodemsnelheid voor 26 mei 1996, 13:00 uur, voor de situatie zonder stroom, met stroom, en het effect van stroom en stroom met setup, weergegeven als verschillen.
- 4.13 Invloed van stroom (---) en set-up (-.-.) op H_s en U_{rms} voor periode 1; 3 juni 12:00 – 7 juni 12:00, 1996 locaties $x = 55000$ m, $y = 377650$ m en $x = 55000$ m, $y = 378000$ m.
- 4.14 Invloed van stroom (---) en set-up (-.-.) op H_s en U_{rms} voor periode 1; 3 juni 12:00 – 7 juni 12:00, 1996 locaties $x = 55000$ m, $y = 377650$ m en $x = 55000$ m, $y = 378000$ m.

Bijlage I: Interviews

In het kader van dit onderzoek zijn een aantal interviews afgenomen en vragenlijsten rondgestuurd. Onderstaande Interviewvragen zijn daarbij gebruikt:

I Interview-vragen

In het kader van het project ECOMORF wordt door Rijkswaterstaat RIKZ onderzoek verricht naar de reproductiekracht van bestaande RIKZ modellen (WAQUA en SWAN) in het Intergetijdengebied. Bestaande modellen zijn afgeregeld op waterstanden en debieten in grotere geulen, d.w.z. op de waterbeweging in de hoofdgeulen van een watersysteem. Onduidelijk is in welke mate deze modellen de waterbeweging in de ondiepere gebieden en met name ook in het Intergetijdengebied, correct reproduceren.

Het samenwerkingsverband Svašek / Alkyon doet in opdracht van het RIKZ onderzoek naar de nauwkeurigheid van deze reproductie van de hydrodynamica (het verloop en de grootte van de stroomsnelheden en golfcondities nabij de bodem in tijd en ruimte) in het Intergetijdengebied. Dat is ook van belang voor de ecologische gevolgen van deze hydrodynamica.

Om een beter inzicht te krijgen naar deze reproductie kracht is voorgesteld interviews te houden bij verschillende deskundigen op dit gebied. U bent een van de deskundigen waaraan wij graag onderstaande vragen willen voorleggen. U kunt per email antwoorden of de antwoorden in dit memo toevoegen:

Interview vragen ten behoeve van ECOMORF:

De vraag naar de reproductienauwkeurigheid van mathematische modellen op ondiep water in intergetijdengebieden is relatief nieuw.

2. Zou u zichzelf kenschetsen als een fysisch (A), modelontwikkelaar (B) of als een modelbouwer / afregelaar (C) ?
Ligt u aandachtsgebied met name bij de golfmodellering, bij de stroommodellering of bij beide?

Voor de fysici (A):

4. Wat zijn volgens u de dominante factoren bij de totstandkoming van beddingvormen op ondiep water in een getij gedomineerd estuarium zoals b.v. de Westerschelde, met een duidelijk ontwikkeld getij?
5. Welke aanpassingssnelheden zijn te verwachten in de beddingvormen van droogvallende gebieden in estuaria? Veranderd volgens u in deze gebieden de bodemruwheid binnen een getij? En tijdens een storm?

Voor de Modelontwikkelaars (B):

6. In hoeverre wordt er in de numerieke benadering en de gemodelleerde fysica van de modellen die u mede heeft ontwikkeld specifiek rekening gehouden met de hydrodynamica in Intergetijdgebieden (b.v. droogvallen, bodemwrijving, breken, golfoploop, set-up, aandrijving door golven, erosie en sedimentatie etcetera.)
7. Als u een indruk zou moeten geven van de geschiktheid en de nauwkeurigheid van de gemodelleerde fysische processen en de toegepaste numerieke benadering in tijd en ruimte, heeft u dan

het idee dat er essentiële fysische processen zijn die niet in het model zijn meegenomen, dan wel numerieke benaderingen zijn toegepast die minder geldig zijn voor intergetijdengebieden?

8. Indien dat het geval is, zou u dan kunnen aangeven op welk terrein van fysica en numerieke benadering de onnauwkeurigheid zich voordoet dan wel waar het model eigenlijk niet geschikt is?

Voor de Modelbouwer/afregelaar (C):

9. In hoeverre heeft u bij de afregeling van het door u gebouwde model (de door u gebouwde applicatie) rekening gehouden met de specifieke karakteristieken van de hydrodynamica in intergetijdengebieden?
10. Zo ja, welke specifieke aanpassingen heeft u gedaan om een betere representatie van de hydrodynamica op ondiep water te bewerkstelligen?
11. Heeft u bij de afregeling van de door u gebouwde / toegepaste modellen ooit een vergelijking gemaakt met metingen in het intergetijdengebied?

Voor Allen

12. Heeft u nog andere suggesties voor de verbetering van de modellering van de hydrodynamica op ondiep water, dan wel andere suggesties?

De antwoorden op deze vragenlijst zullen als Bijlagen worden toegevoegd aan het eindrapport van deze studie. De schriftelijke weergave zal u ter beoordeling worden voorgelegd alvorens deze in het rapport verschijnt.

Indien u belangstelling heeft voor een exemplaar van het rapport, dan zouden wij u willen vragen contact op te nemen met de heer B. Kornman van het RIKZ in Middelburg, die u een dergelijk rapport na afloop van de studie kan toesturen.

De antwoorden zullen tevens worden gebruikt om eventueel resterende leemten in kennis te identificeren en aanbevelingen te doen om deze leemten in kennis verder te verkleinen.

I.A Verslag interview A. Sieben d.d. 18 september 2000

Arjan Sieben is werkzaam bij het RIZA en doet onderzoek naar rivieren. Hij is nauw betrokken bij riviermodellering in WAQUA en bij onderzoek naar sedimenttransport in rivieren.

I.A.1 Rivierbedding zomerbed

Riviermodellen worden op de volgende manier afgeregeld:

- De ruwheld van een uiterwaard wordt gebaseerd op een identificatie van de begroeiing (vegetatietype zoals bos, gras, struiken, riet, etc.) lijnelementen (heggen en lanen), kaden en kribben (overlaten). Voor de onderscheiden vegetatietypen zijn k-waarden (nikradse [m]) gedefinieerd welke zijn gebaseerd op standaard getallen en formuleringen. In enkele formuleringen komen hydraulische variabelen (zoals de diepte voor). Dergelijke impliciete formuleringen vergen een iteratieve numerieke oplossing van de k-waarden.
- Vervolgens worden de ruwheden van het zomerbed iteratief bepaald zodanig dat gemeten waterstanden van verschillende stations tijdens een hoogwater goed worden berekend. Voor de hoogwater voorspelmodellen dienen de hoogwaters van 1993 en 1995 meestal als calibratie resp. verificatie meting (zowel 1D als 2D). Voor de calibratie van het zomerbed wordt de ruwhelds-

waarde per rivierstuk bepaald met een te optimaliseren diepte en/of afvoerafhankelijke vergelijking (analogie met duinvorming). De calibratie is rekenintensief en zoveel mogelijk geautomatiseerd. Voor de afvoerverdeling uiterwaard/zomerbed bestaat vooralsnog geen calibratie.

De iteratieve methode voor het bepalen van de ruwheid in het zomerbed lijkt op de manier van afregelen zoals dit ook in de Westerschelde is gebeurd. Ook hier is een semi-1d benadering toegepast.

Er zijn dus 2 manieren om ruwheden te bepalen

- 1 Vanuit de literatuur/experimenten worden ruwheden bepaald op basis van duin/ribbel/sediment/gewaskarakteristieken;
- 2 De ruwheden worden zo afgeregeld dat gemeten waterstanden goed berekend worden.

In de Westerschelde is dus alleen methode 2 toegepast.

Voor voldoende langzame afvoervariaties geldt dat de duinhoogtes toenemen naarmate de afvoer groter is. De relatie tussen Chézy en afvoer loopt overigens niet vanzelfsprekend via de duinen (invloed ribbels, invloed bodemmateriaal (afpleistering), etc.).

Tijdens hoogwater zijn in de tijd multibeam opnames gemaakt van de Waal, Wilbers (1997). Hier zijn duidelijk duinen op te zien die verschuiven in de tijd. Er is sprake van hysteresis, dat wil zeggen dat de duinkarakteristieken afhangen van de voorgeschiedenis van de rivierafvoer. Bij sommige gestuwde stukken van de Maas kunnen duinen van een hoogwater blijven liggen. De volgende hoogwatergolf is dan dus afhankelijk van de vorige. Verder speelt in de duinvorming in de Grindmaas de gradatie van het sediment (opbreken en vormen van de pleisterlaag) een grote rol.

In de Rijn takken neemt de duinhoogte weer af na een hoogwater. Echter, het komt genoeg voor dat bij een snelle val van de afvoer duintoppen t.b.v. de scheepvaart moeten worden weggebaggerd.

Enkele afmetingen van duinen in rivieren zijn:

- Midden-Waal (zand), hoge duinen: 60 m lang, 1 meter hoog.
- Bovenrijn (vrijwel grind): lage duinen.

Kleine ribbels op de duinen zijn hoogstwaarschijnlijk belangrijker voor de ruwheid dan de duinen zelf. Dit is gebaseerd op de grotere steilheid van ribbels (zie ook de Wilbers rapporten en de experimentele analyse naar samengestelde bodemvormen)

Ontgrondingskuilen bij kribkoppen (zoals zichtbaar in de multibeam data) kunnen voor wat betreft steilheid ook een grote bijdrage aan de ruwheid vormen.

1.A.2 Uiterwaarden:

Bij Ewijk is een stuk oever van de rivier verlaagd. Vervolgens is er een hoogwater over heen geweest. Na het hoogwater zijn er nog duinen herkenbaar, die ontstaan zijn tijdens de hoogwatergolf. Dit betekent dat er sprake was van sediment transport over de Ewijkse Plaat.

Er zijn ook metingen uitgevoerd in uiterwaarden. Uit de vergelijking tussen WAQUA en de metingen bleek dat de snelheden onderschat werden. Dit zou mogelijk aan de ruwheid ter plaatse kunnen liggen, maar ook heel goed aan het (te kleine) debiet dat de uiterwaard binnen stroomt. Dit zou dan weer kunnen duiden op een fout in de schematisatie.

1.A.3 Terugkoppeling naar intergetijdengebieden

Vanuit de bestaande kennis uit de rivieren kunnen de volgende aanbevelingen gedaan worden voor wat betreft de stroommodellering in intergetijdengebieden:

In de rivieren worden de ruwheden van het winterbed actief bepaald, dat wil zeggen dat aan de hand van karakteristieken van het winterbed de ruwheden bepaald worden.

Alhoewel dit in de riviermodellering al jaren wordt toegepast is dit in estuaria nog nooit gedaan. Voor wat de intergetijdengebieden betreft zou dat kunnen door aan de hand van geomorfologische kaarten ruwheden toe te kennen aan de verschillende intergetijdengebieden.

Een andere vraag is of de geomorfologische indeling van eenheden bepalend is voor de ruwheid (ter vergelijking: de duinen in de Waal, 60m lang en 1 meter hoog, zijn qua ruwheid mogelijk ondergeschikt aan de kleine ribbels op de duinen zelf) en of de duin- en ribbelhoogtes (en dus ruwheden) niet tijdens een getij veranderen. Ook hysteresis-effecten (na een storm) zijn niet goed bekend in estuaria. Wat dat betreft is nog veel onduidelijk.

Een suggestie is om met een multibeam methode (Wilbers 1997) eenzelfde analyse uit te voeren naar de bodenvormen. De stap naar ruwheid zou op basis van stroomsnelheidsmetingen (gedurende een representatieve periode) in combinatie met de inverse ruwheidsmodellering misschien mogelijk zijn. Door de gevonden model-ruwheden (op basis van dieptegemiddelde stroomsnelheden) dan te matchen met gemeten bodenvormen (multibeam data) kan wellicht een relatie met voorspelkracht (ruwheidsvoorspeller) worden gelegd.

Niet aan de orde is geweest een tijdsvariatie in ruwheid t.g.v. ecologische interactie (seizoensinvloeden vegetatie), schematisering (ruimtelijke & tijdsmiddeling) of het behandelen van onzekerheden in de ruwheid.

I.A.4 Relevante literatuur (RIZA onderzoeken)

- Julien, P.Y., 2000, Bed resistance to flow of the Bovenrijn-Waal rivers during the 1998 flood. WL/Delft Hydraulics, verslag Q2691.
- Tuong Lai, N., 1998, Bedforms in the Waal river, Characterization and Hydraulic Roughness. M.Sc.Thesis H.E. 024, IHE Delft.
- Wilbers, A.W.E., 1997, Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken, verwerking van gegevens bij Druten en de Pannerdensch kop met DT2D. Netherlands Centre for Geo-ecological Research.
- Wilbers, A.W.E., 1998, Bodemtransport en duinontwikkeling, tijdens afvoergolven in de Bovenrijn en Waal. Netherlands Centre for Geo-ecological Research.
- Wilbers, A.W.E., 1999, Bodemtransport en duinontwikkeling in de Rijntakken, bodempeilen hoogwater november 1998. Netherlands Centre for Geo-ecological Research.
- Wijbenga, J.A., 1991, Analyse Prototype-metingen (niet-) permanente ruwheid. WL/Delft Hydraulics, verslag Q1302.

I.B Verslag interview G. Klopman dd 21 september 2000

G. Klopman is werkzaam als private consultant onder de naam Albatros Flow Research, in het Geomatika Park te Marknesse.

In antwoord op het vragenformulier zoals dat is toegevoegd in de Bijlage, geeft G. Klopman de volgende antwoorden:

- 1 Als fysicus (A), met gebruikmaking van zelf ontwikkelde onderzoeksmodellen. Mijn aandachtsgebieden liggen zowel bij de golven, de stroming alsmede de golf-stroom-interactie.

- 2 Kleinschalige beddingvormen op ondiep water worden zowel door de stroming als (brekende) golven bepaald. Uiteraard kan ook de aanwezigheid van cohesieve fracties een grote rol spelen bij de totstandkoming van beddingvormen.
- 3 In principe zijn de aanpassingssnelheden zeer snel, en kan binnen de getijcyclus de bodemruwheid variëren. Tijdens hoogwater in stormcondities kunnen de beddingvormen verdwijnen en kan sheetflow optreden.
10. Een belangrijk punt is "wave blocking". In een complex gebied met geulen en droogvallende platen zijn voortdurend situaties aanwezig waarbij de golven geheel of gedeeltelijk geblokkeerd worden door tegenstroom. Dit wordt op dit moment niet goed gemodelleerd in modellen als SWAN.

Formules die beddingvormen en de daaraan gerelateerde bodemruwheid voorspellen, zijn afgeregeld voor oftewel alleen stroming, dan wel (bijna) alleen golven. Voor dit soort toepassingen in intergetijdgebieden is een grote behoefte aan formules die de beddingvormen en bodemruwheid kunnen voorspellen in gecombineerde golf-stroom-condities.

In ondiepe delen met relatief hoge golven is een belangrijk deel van het massa- en momentum-transport van de gemiddelde waterbeweging gerelateerd aan golf-geïnduceerd massa- en momentum-transport. Het is belangrijk dat in dit soort situaties in een model als WAQUA niet alleen golf-stralingsdruk wordt meegenomen, maar ook golf-geïnduceerd massa-transport in de massa-behoudsvergelijking en golf-geïnduceerde bijdragen aan de convectieve termen in de momentumvergelijkingen.

Er dient voldoende vaak in de getijcyclus informatie-uitwisseling plaats te vinden tussen het gemiddelde waterbewegingsmodel en het golfmodel. Om dit te bewerkstelligen verdient het voorkeur een geïntegreerd modellenstelsel te gebruiken waarin beide modellen simultaan en geïntegreerd draaien. Ook een tijdsafhankelijke variant van SWAN verdient voor dit soort sterk tijd- en ruimte-variërende toepassingen de voorkeur.

I.C Verslag interview M. Dingemans dd 21 september 2000

M. Dingemans is werkzaam als specialist op het gebied van golven voor het Waterloopkundig Laboratorium te Delft.

In antwoord op de gestelde vragen (zie Bijlage) geeft M. Dingemans de volgende antwoorden:

- 1 Ik zie mezelf als fysicus/modelbouwer (A/B) met af en toe een beetje afregelaar (validatie/verificatie van modellen, C).
- 2 In een getij-geïnduceerd gebied zijn de aanwezige beddingvormen uiteraard een gevolg van de werkingen van het getij. Dat wil niet zeggen dat alle benodigde fysische processen t.g.v. het getij in de stromingsprogramma's zijn meegenomen.
- 3 De bodemruwheid is een gevolg van de simultane werking van stroom en golven. Omdat wat betreft de golven we onderscheid moeten maken tussen de diverse mate van turbulentie en stroomvormen (bijv. *sheet flow*, of het regime waarin ripples gevormd worden), betekent dat dat er afhankelijk van de omstandigheden geheel andere waarden voor bodemwrijving genomen moeten worden. Deze omstandigheden veranderen tijdens de getijcyclus. In de huidige modellen wordt met één wrijvingsparameter (wel afhankelijk van plaats) gewerkt. Dus tijdens een getij verandert de bodemwrijving.
Omdat een storm gepaard gaat met verandering van waterstand, verandert alleen hierdoor al de bodemwrijving. Omdat een storm ook aanleiding geeft tot hogere (deels lokaal opgewekte) golven, verandert de bodemwrijving ook door een ander golfklimaat.
- 4 In de golfmodellen die nu in gebruik zijn wordt rekening gehouden met bodemwrijving, breken en worden de golf-aandrijvende krachten berekend, die weer aan een stromingsmodel

overgedragen worden. Golfoploop is een lokaal fenomeen, dat alleen met lokale modellen kan worden bepaald en geen onderdeel is van een grootschaliger golfmodel.

De effecten van setup op het golf-gedrag wordt niet verdisconteerd in de golfmodellen, behalve in de eenvoudigste vorm. Dit is omdat dit alleen gemodelleerd kan worden in een iteratieve wijze (het model moet minstens twee maal gedraaid worden). In het later gedraaide stroommodel kan set-up wel eenvoudig worden meegenomen, maar dat gebeurt nog niet, voor zover mij bekend is. In elk geval zit het effect van set-up niet verwerkt in de aandrijvende krachten voor de golf-gedreven stromingen.

Wat betreft droogvallen, wordt dit effect in golfmodellen niet volledig meegenomen. Bijvoorbeeld bij lokaal opgewekte golven door wind wordt geen rekening gehouden met droogvallen. Ook bij bijna-droogvallen wordt niet overgeschakeld naar de dan relevante fysische processen en andere setting van parameters.

- 5 In intergetijde gebieden zijn de volgende processen anders te formuleren dan in open kust gebieden.
 - Golf - stroom wisselwerking. Veel grotere ambient currents komen hier voor. Een andere schaling is vereist in de golf-programma's Wave-blocking komt regelmatig voor in de zeegaten en ook in de Wester- en Oosterschelde, ook vanwege de veel kortere golven.
 - Windgroei door wind- dit verloopt anders in ondiep water dan in wat dieper water.
 - Het golfbreken is nogal kort door de bocht gemodelleerd, speciaal met betrekking tot breken op stellheid.
- 6 Zie punt 5.
- 9 Een aantal verificatie studies is uitgevoerd, die geresulteerd hebben in verbeteringen. Recentelijk heb ik een review van het programma SWAN gegeven; een aantal van de aanbevelingen uit deze studie zijn en worden uitgevoerd.
- 10 Nieuwe ontwikkelingen van golfhoogteverdelingen op ondiep water dienen hoognodig in breker formuleringen verdisconteerd te worden.
Nieuwe ontwikkelingen met betrekking tot secundaire stromingen, zodanig dat de effecten hiervan in een grootschaliger stromingsmodel via analytisch uit te rekenen Reynoldse spanningen kunnen worden meegenomen, verdienen de aandacht.

M. Dingemans zou graag een exemplaar van het rapport ontvangen.

I.D Interview M. Zijlema

Marcel Zijlema ziet zichzelf voornamelijk als numericus (valt onder categorie B) en zijn aandachtsgebied ligt voornamelijk bij de (numerieke) modellering van de ondiepwaterstromingen, hoewel hij steeds meer interesse heeft voor de golfmodellering.

De hydrodynamica in intergetijdegebieden wordt vooral gedictieerd door de kleinschalige fysische processen waarbij bodemruwheid en golf-stroom interactie de voornaamste rollen spelen. Ook dient er rekening gehouden te worden met niet-hydrostatische effecten. Deze genoemde aspecten zijn m.i. de belangrijkste aandachtspunten voor de numerieke modellering van de hydrodynamica op ondiep water.

De in WAQUA/TRIWAQ geïmplementeerde ruwheidsformules met de bijbehorende coëfficiënten (Chézy, Manning en White-Colebrook) zijn slechts van toepassing voor louter (ge-)tijdstromingsberekeningen zonder dat er rekening wordt gehouden met golven en complexe bodemvormen en hun onderlinge interactie. Dit geldt eveneens voor de windformulering. Op basis van een parametrisatie zouden dergelijke effecten in de ruwheidsformules kunnen worden verdisconteerd. Dit probleem verdient beslist de aandacht. Echter, pragmatisch gesproken kan men de stroming-bodem interactie in de intergetijdegebieden redelijk nauwkeurig reproduceren door middel van het afregelen met de beschikbare ruwheidsformules, mits het rooster fijn genoeg is.

Een ander punt van aandacht is de simulatie van de vervorming van golven over een complexe bodem en onder invloed van een getijstroming met variërende waterstand. De huidige WAQUA/TRIWAQ programmatuur biedt evenwel geen mogelijkheid voor een dergelijke simulatie, maar technisch gesproken is het wel haalbaar. Casulli, Stelling, Uittenbogaard en de ondergetekende hebben ieder hun eigen instrumentarium c.q. techniek hiervoor ontwikkeld en succesvol getest voor korte golven en lokale lozingen. De essenties van deze zogenaamde niet-hydrostatische aanpak zijn de toevoeging van verticale versnellingen en de oplossing van de hydrodynamische druk volgens de Poisson vergelijking. Met deze techniek is het aldus mogelijk om de (getij)stroming, golfvoortplanting, turbulentie en hun onderlinge interacties te beschrijven. Alleen golfbreken is een probleem apart welke de nodige fysisch nauwkeurige modellering vereist. Dit is overigens een langlopend onderzoek waar voornamelijk de Boussinesq-modelleers hun tanden in zetten.

1.E Interview L. van Rijn

Professor L. van Rijn is werkzaam als hoogleraar aan de Rijksuniversiteit Utrecht en daarnaast deeltijdmedewerker bij het Waterloopkundig Laboratorium in Delft.

1. $A + B + C$; een aantal mensen hebben bijgedragen aan de antwoorden.
Ligt u aandachtsgebied met name bij de golfmodellering, bij de stroommodellering of bij beide?
bij de Stroom- en transportmodellering
2. stroomsnelheid, golfhoogte, waterdiepte, korreldiameter (bodemsamenstelling; slibgehalte; biochemische processen o.a. cementering en uitdroging)
Het voorkomen van beddingvormen in zandige omstandigheden kan worden afgelezen in stabiliteitsdiagrammen (als functie van mobiliteit betrokken op de korreldiameter; voordeel van deze diagrammen is bovendien dat totale schuifspanning niet gevraagd wordt en dat is makkelijk in een getijsituatie). De hoogte en lengte ontwikkeling van de beddingvormen is onduidelijk in getijgebieden. Er zijn geen studies gezien waarin duidelijke relaties van geometrie parameters met hydraulische condities worden gemeld. In ieder geval gaat de relatie die voor rivieren wel eens wordt geopperd dat duinen toenemen in hoogte (en dus ook in lengte) bij toenemende waterdiepte in getijgebieden absoluut niet op. Over het algemeen zal de maximale beddingvormlengte gelijk zijn aan de maximale waterdiepte boven de plaat (orde 2 tot 5 m), De maximale hoogte is van de orde van 0.5 m. Soms zijn er zeer hoge duinen (1 tot 2 m) mogelijk in condities met een zeer dominante langdurige en sterke vloed of eb stroom. De indruk is dat de grootte van duinen in getijgebieden mede afhankelijk is van het vertragen of versnellen van de stroom. De meeste (grote) duinen op platen worden gevormd door de vloedbeweging die expanderend en vertragend de plaat opstroomt. Op luchtfoto's is dit heel fraai te zien. Het was destijds opvallend dat in de bouwputten Schaar en voor het sluiscomplex in de Philipsdam zoveel sedimentaire structuren te zien waren die moeten worden toegeschreven aan grote duinen. Dit wijst ook op de vorming van grote duinen in vertraginggebieden, waar immers netto sedimentatie optreedt die later in de bouwputten te zien was.
3. Binnen een springtij doodtij cyclus is er duidelijk sprake van verhoging van de duinen rond springtij en verlaging rond doodtij. Ook kan er sprake zijn van aanzetten naar 3D karakter rond springtij. Hierover is niet veel bekend en nog minder over gepubliceerd. Uit analyse van sedimentaire structuren blijkt dat er een hoogteverlies van de beddingvormen is van orde grootte 1 tot 2 decimeters rond doodtij t.o.v. de springtij situatie. Er zijn wel wat gegevens van de verandering van dag op dag, maar er is nooit een poging gedaan om hieraan aanpassingssnelheden te ontleenen. Dat zal ook lastig zijn, omdat niet bekend is wat de evenwichtsdimensies van de duinen zijn als functie van hydraulische grootheden. Bovendien wordt de ontwikkeling van dag op dag ook beïnvloed door golfwerking (aftopping duinen). Kleine duinen die op de rand van hun bestaansrecht balanceren vlakken rond doodtij uit tot een zwak golvend reliëf Tijdens storm kunnen op het westen geëxponeerde plaatdelen hun bedekking van duinen geheel of gedeeltelijk kwijtraken. Dit geldt zeker voor de hoogste plaatdelen waar duinen zich nog vormen. Aangezien op het westen georiënteerde delen tevens op de vloed georiënteerd zijn, zijn dit bij uitsteking de plaatsen waar duinen worden aangetroffen en waar ze dus ook tijdens storm verwijderd kunnen worden. Het ruwheids aspect van duinen in intergetijdegebieden is een onderschat aspect, dat nodig aandacht behoeft.

Literatuur over bodemruwheid op platen:

- 1) Van den Berg et al., 1995. Hydraulic roughness of tidal channels bedforms, westerscheide estuary. Spec. publications int. Ass. Sediment, Vol 24, 19-32
- 2) Afstudeerverslag, ca 1990, Fys. geografie, Univ. van Utrecht, via J.J. Terwindt Tel 033-4618039

- 4 In Delft3D is droogvallen en onderlopen een integraal onderdeel van het systeem. De FLOW module is (evenals WAQUA) uitgerust met robuuste droogvalprocedures. Dankzij het sigma-rooster in verticale zin is ook in 3D de verschuivende waterlijn geen probleem.

De bodemwrijving wordt via Chézy, Manning of White-Colebrook formuleringen gekoppeld aan de lokale waterdiepte en snelheid. Via de parametrisaties van Soulsby kunnen diverse golf-stroominteractiemodellen worden gebruikt om de invloed van golven op de schuifspanning weer te geven. De ruwheid is nu nog een (mogelijk ruimtelijk variërende) invoerparameter. Gewerkt wordt aan het inbouwen van alluviale ruwheidsvoorspellers.

Breken van golven, wordt weergegeven in de golvenmodule, die gebruik maakt van HISWA of SWAN, naar keuze. Golfoploop wordt hierin niet weergegeven. Het breken van golven leidt tot radiation stress gradiënten die als aandrijvende krachten in Delft3D kunnen worden meegenomen en daar set-up en golfgedreven stromingen aandrijven. De massaflux door golven leidt tot een additionele aanpassing van de stromingen, die 2DH of 3D kan worden weergegeven. In het laatste geval wordt ook de turbulentiemodellering aangepast.

Erosie en sedimentatie kan zowel in 2DH/quasi-3D als volledig 3D worden berekend, ook in intergetijdengebieden, en met terugkoppeling van de bodemveranderingen naar de waterbeweging en golven.

- 5 De modellering van de bodemvormen en daarmee samenhangende ruwheid voor golven en stroming is een belangrijk aspect dat aandacht verdient. De lokale bodemruwheidsverandering wordt dus niet meegenomen in Delft2/3D modellen. Daarnaast is het gezamenlijk modelleren van zand en slib en hun interacties qua bodemsamenstelling en erodeerbaarheid een punt dat veel onderzoek zal vereisen. De effecten van slib en andere processen (cementering/uitdroging, enz.) op de kritieke bodemschuifspanning van zand wordt nu niet meegenomen. Voor lange-termijn morfologische berekeningen wordt sinds kort ook een benaderende module, Delft3D-RAM, ingezet. Deze lijkt vooralsnog minder geschikt voor intergetijdengebieden, doordat de methode uitgaat van getij- of zelfs jaargemiddelde transporten.
- 6 Zie boven. Er is nog weinig onderzoek gedaan naar de nauwkeurigheid van de weergave van geulplaatinteracties in 2DH, laat staan 3D modellering. Nodig is, te onderzoeken of empirisch gevonden relaties ook vanzelf volgen uit een aggregatie van 2DH of 3D modelresultaten.
- 7 zie boven, soms in enige mate.
- 8 Bij stromingsmodellen wordt soms een verschillende ruwheid toegepast op platen en in geulen. Vaak is dit echter niet nodig om een goede weergave van de waterbeweging in de geulen te krijgen. Er worden vrijwel nooit snelheden gemeten boven platen. Er zijn aanwijzingen dat de golfhoogte-afname boven ondiepe platen wordt overschat door gangbare dissipatiemodellen zoals Battjes & Janssen.
Dit soort zaken zijn alleen zinvol als het doel van de berekening is gericht op ondiep water.
9. Zelden.
10. neen; belangrijkste punten zijn boven genoemd

I.F Interview R. van Dijk

R. van Dijk werkt bij Rijkswaterstaat RIKZ als modelbouwer / afregelaar met veel langjarige praktische ervaring op het gebied van stromingsmodellen.

- 1 modelbouwer / afregelaar met als aandachtsgebied stromingen
- 7 ten aanzien van de volgende zaken dient een nauwkeurige toets / afweging gemaakt te worden:
 - resolutie rooster in vergelijking met karakteristieke prototype
 - modellering overlaten
 - droogvalprocedure / droogval criteria
 - karakteristiek vertikaal
- 8 introductie turbulente modellen (horizontaal / vertikaal) introductie domeindecompositie (horizontaal / vertikaal)
- 9 voor zover beschikbaar wordt alle referentie materiaal gebruikt
- 10 met name optimalisatie windschuifspanningsformulering

I.G Interview met H. de Vriend

Professor H. de Vriend is werkzaam als deeltijd hoogleraar aan de Universiteiten van Delft en Twente en tevens deeltijdmedewerker bij het Waterloopkundig Laboratorium in Delft.

- 1 Fysicus en een beetje modelontwikkelaar
- 2 Kleinschalige beddingvormen, zoals ribbels en duinen: bodemsamenstelling (zand/slib verhouding), bodemschuifspanning (op welk moment t.o.v. het moment van droogvallen is echter onduidelijk)
Grotere beddingvormen (banken, platen, geulen): getijbeweging, inclusief reststromingspatroon
- 3 De bodemruwheid verandert, alleen al omdat de asymmetrie van beddingvormen tijdens het getij verandert, zoals uit de gelaagdheid van duinen (megaribbels) blijkt. Of de belangrijkste parameters, de hoogte en de golflengte van de beddingvormen, tijdens een getij veranderen is een andere vraag.
Bij storm komt er meer sediment in beweging en zullen alle morfologische processen sneller verlopen, dus ook de vervorming van bodemribbels. Met name in het intergetijdegebied zijn er dan variaties over de getijperiode te verwachten.
- 4 Er bestaan bij WL momenteel modellen waarin het onderlopen en droogvallen van intergetijdegebieden volledig dynamisch wordt meegenomen, d.w.z. dat er voor die gebieden bewegings- en continuïteitsvergelijkingen worden opgelost. Korte golf effecten zitten hier bij mijn weten echter nog niet in. Wel is dit type waterbewegingsmodel gekoppeld aan sedimenttransport- en morfologie-modulen.
- 5 Als het breed geaccepteerde beeld dat het getij platen opbouwt en golven ze weer afbreken klopt, moeten opwoeling van sediment door (vooral in het estuarium opgewekte) golven in de modellen worden meegenomen om ooit tot een dynamische evenwichtstoestand te kunnen komen.
In de omgeving van stelde plaatranden zal waarschijnlijk 3D gerekend moeten worden, i.v.m. de daar optredende secundaire stromingen.
- 6 Zie boven.
- 10 Een enquête is m.i. niet het aangewezen middel om de geldigheid, c.q. de tekortkomingen van modellen vast te stellen. Dat zou zo ongeveer neerkomen op het houden van een stem-

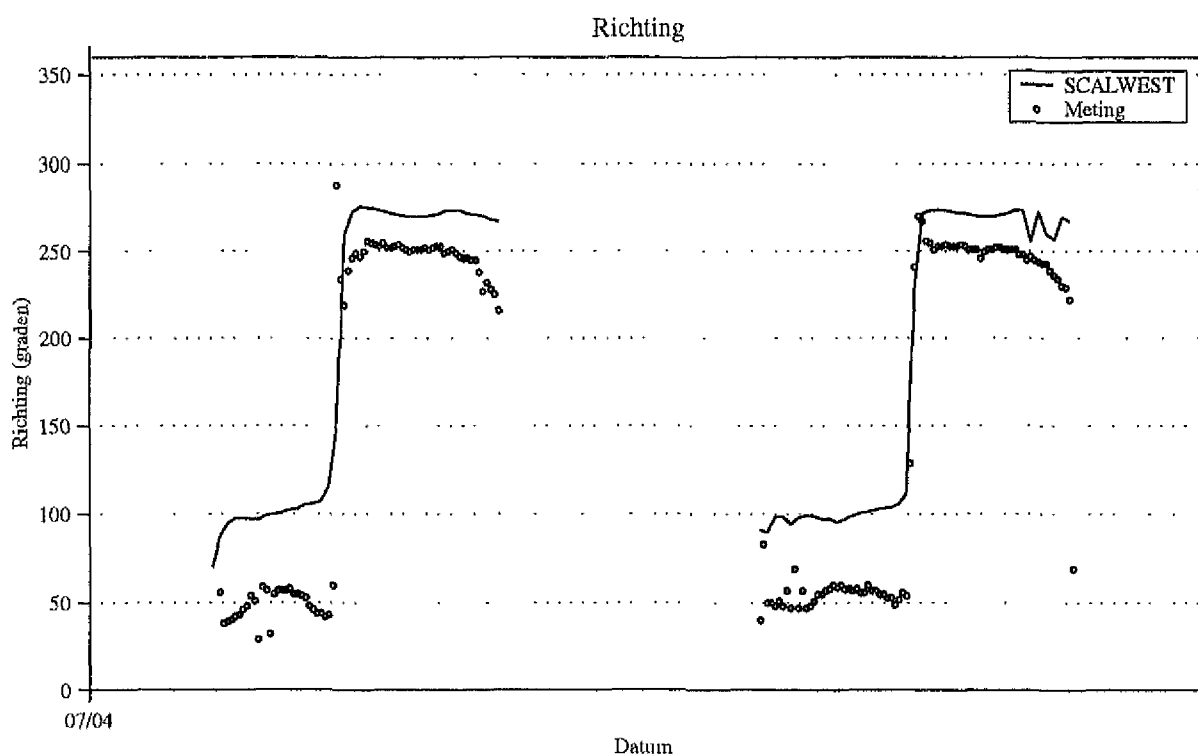
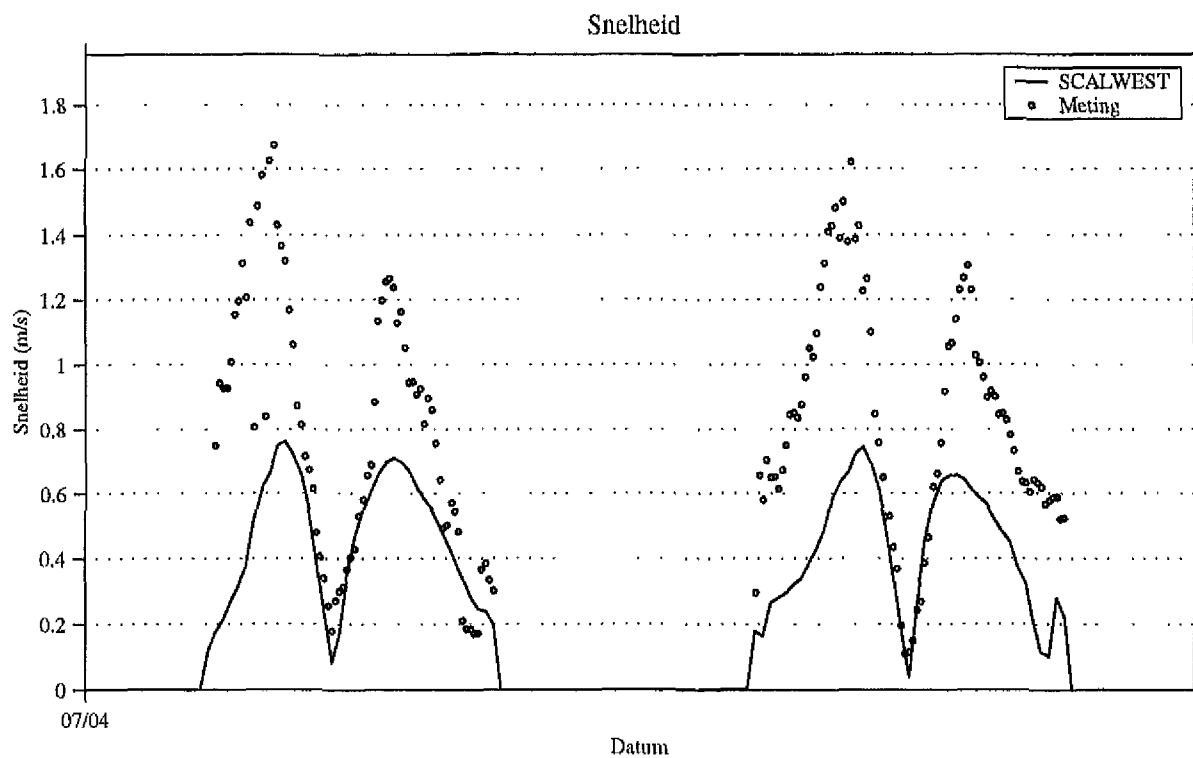
ming over de vraag of een en een twee is. Hoogstens kan de enquête dienen als middel voor het genereren van ideeën over wat er allemaal nog aan de modellen mankeert en wat daarvan misschien de oorzaken zouden kunnen zijn.

Bijlage 3.1

```

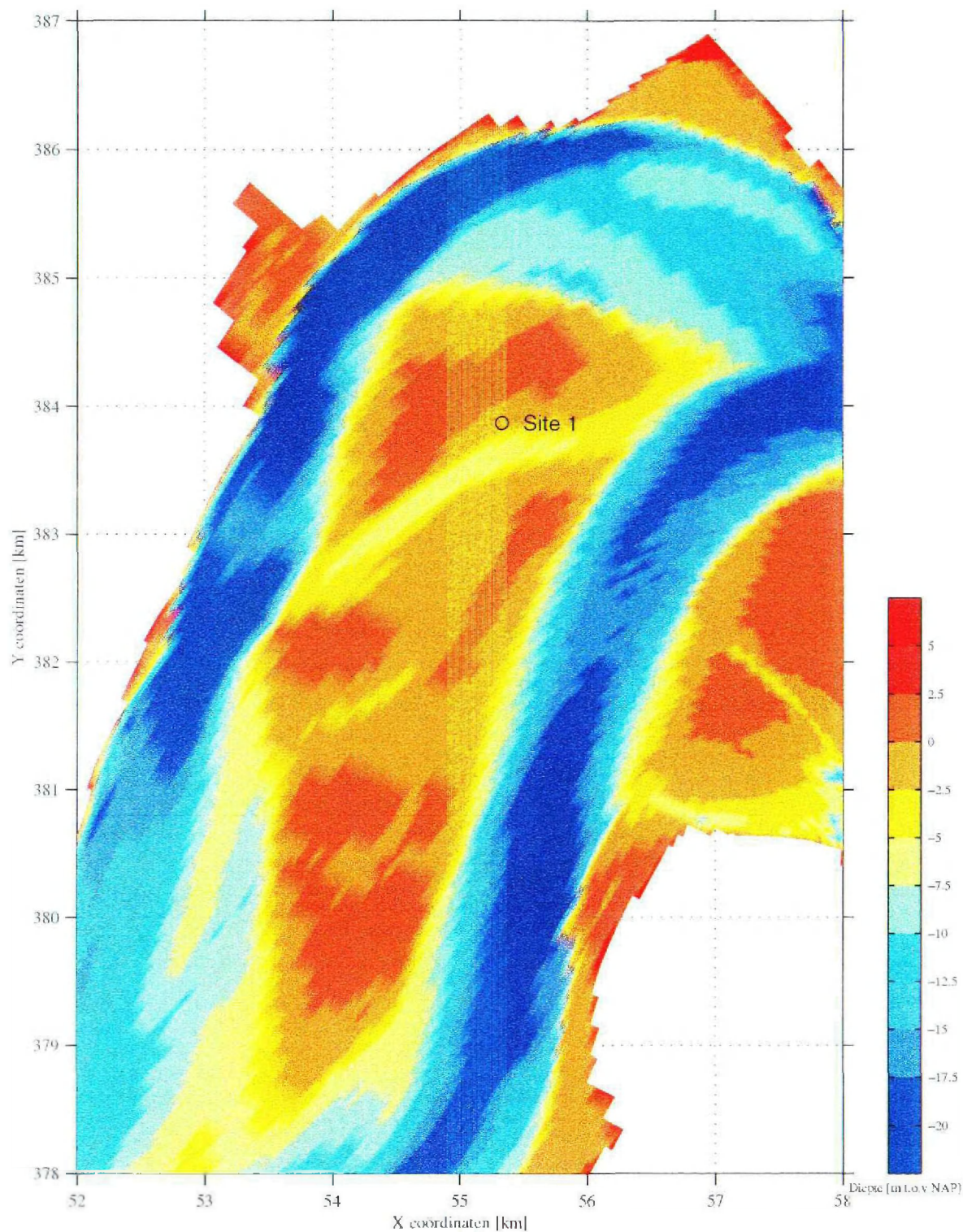
$
$
$ SWAN input file generated by ECO_SWAN 1.2 # 16 September
$ Date: 2000/9/16
$
$   ALKYON Hydraulic Consultancy & Research
$   A647  SWAN Westerschelde
$
PROJ  'ALKYON' 'A647' 'Ecomorf Westerschelde'
$
MODE STATIONARY
$
CGRID REGULAR 20000. 372000. 0.00 56000. 18000. 280 90 &
      CIRCLE 36 0.03 0.8 30
INP BOTTOM 20000. 372000. .00 280 90 200.0 200.0 EXC -99.00
READ BOTTOM 1 'BOTTOM\e3.BOT' 3 0 FREE
INP WLEV 20000. 370000. .00 30 6 2000.0 5000.0
READ WLEV 1 'WLEVEL\LEV0000.DAT' 3 0 FREE
$
$ specify wave boundary condition
$
BOUNDSPEC SEGMENT IJ 0 35 0 90 50 90 CONSTANT FILE 'BSPEC\E3H0000.SP1'
$
WIND 3.3 178.0
GEN3 KOMEN
BREAK 1. 0.73
FRIC JONSWAP
TRIAD
NUM ACCUR 0.03 0.03 0.3 97. 8
OUTPUT QUANTITY PER 'Tm-10' 'Tm-10' POWER=0
$*****
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000XP.BLK' LAY-OUT 1 XP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000YP.BLK' LAY-OUT 1 YP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000DE.BLK' LAY-OUT 1 DEP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000HS.BLK' LAY-OUT 1 HS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000TM.BLK' LAY-OUT 1 PER
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000T1.BLK' LAY-OUT 1 TM01
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000TP.BLK' LAY-OUT 1 RTP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000DI.BLK' LAY-OUT 1 DIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000FF.BLK' LAY-OUT 1 FORCE
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000UR.BLK' LAY-OUT 1 URMS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000QB.BLK' LAY-OUT 1 QB
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000DS.BLK' LAY-OUT 1 DISSIP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000FC.BLK' LAY-OUT 1 FRCOEF
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000SP.BLK' LAY-OUT 1 DSPR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000DH.BLK' LAY-OUT 1 DHSIG
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'e3h0000DT.BLK' LAY-OUT 1 DTM01
$
POOL
COMPUTE
STOP

```

Voorbeeld van vergelijking modelmeting op slik uit Svasek 1999
 Meetlocatie Waarde Oost, meetpunt 2

Figuur 2.1



Ligging Molenplaat

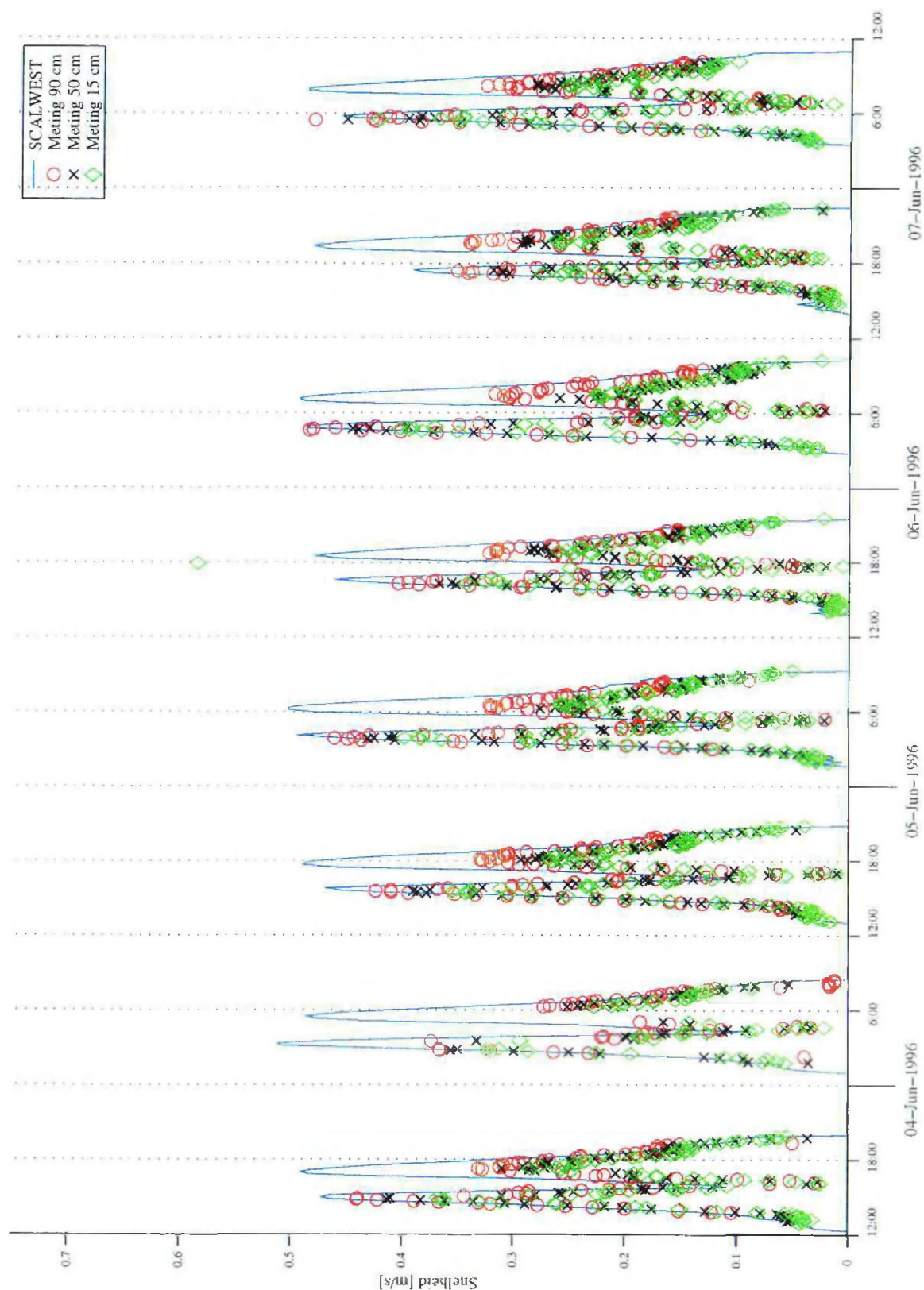
Figuur 2.2

ECOMORF

1165/A647

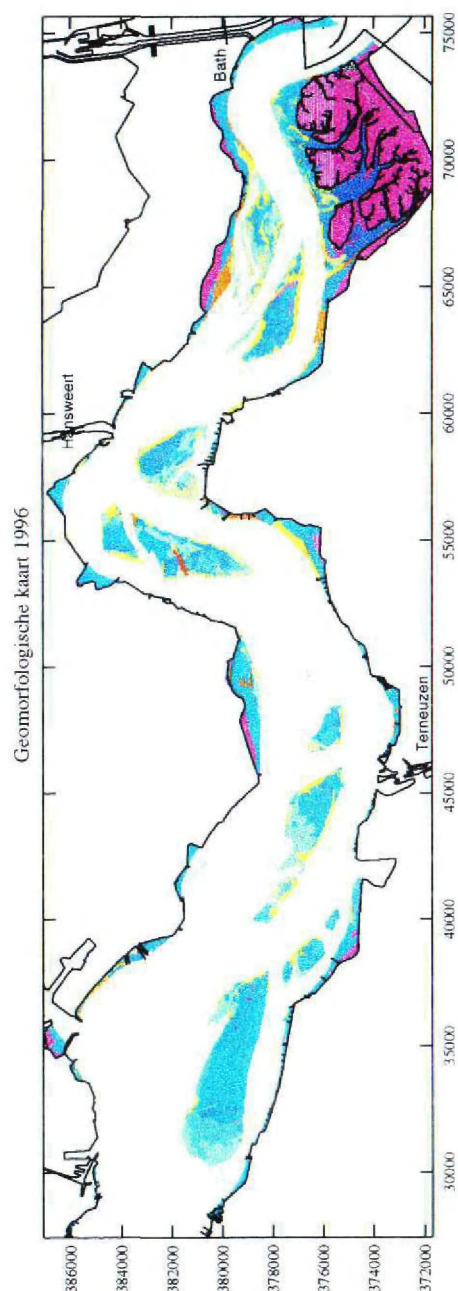
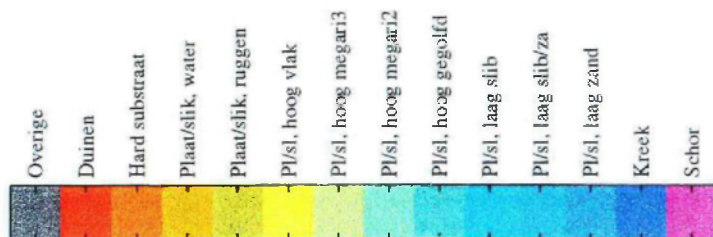
Alkyon

SVASEK



Vergelijking SCALWEST met stroommetingen
Molenplaat, site 1, meetpunt 3

Figuur 2.3



Geomorfologische kaart 1996
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

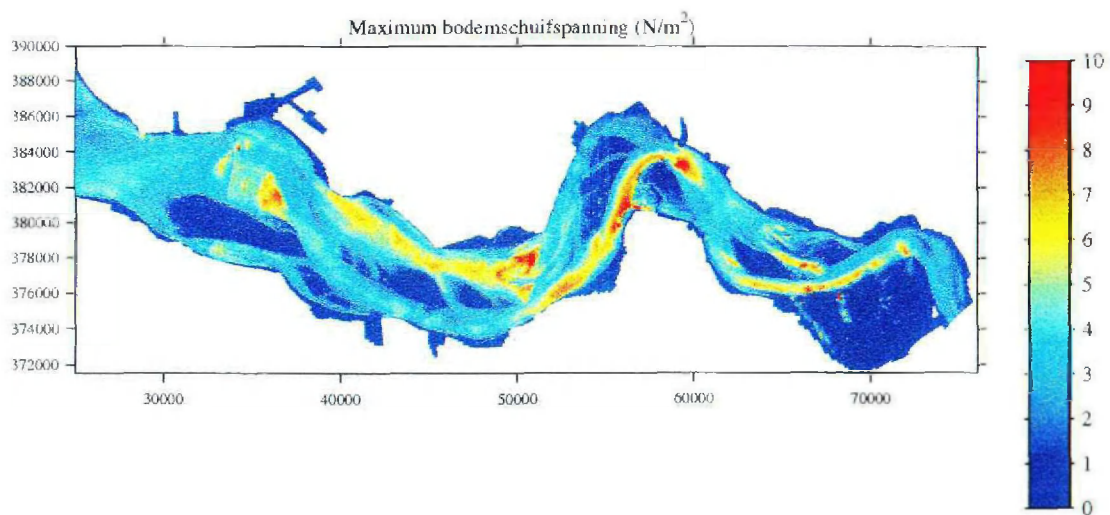
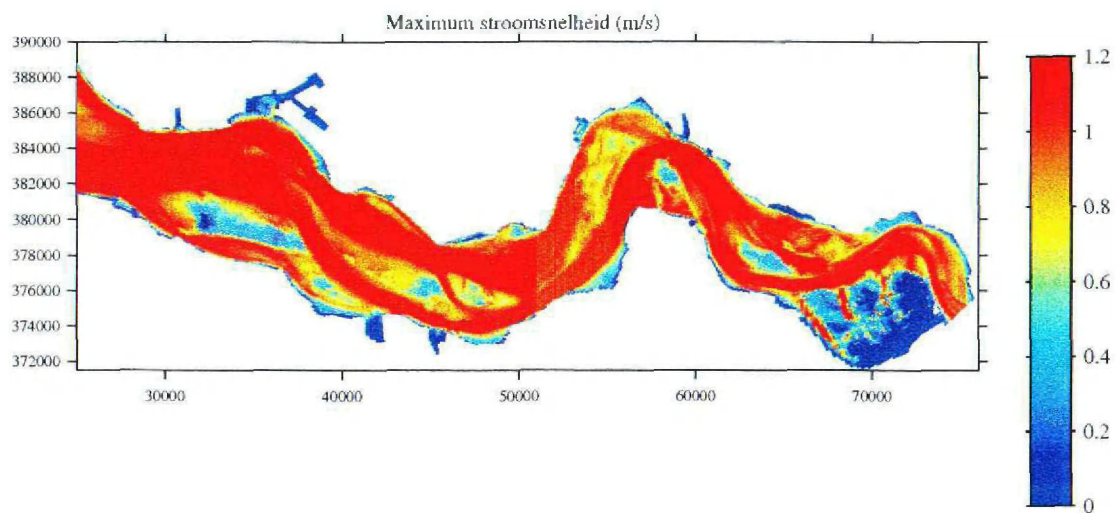
ECOMORF

1165/A647

Figuur 2.4

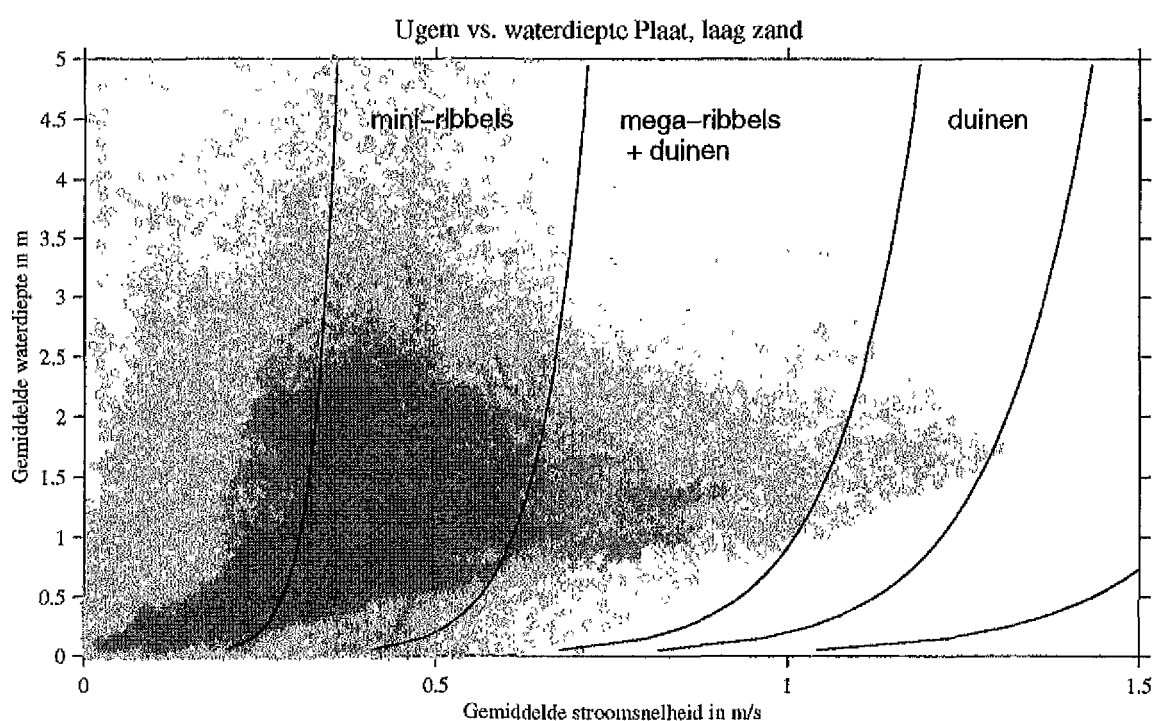
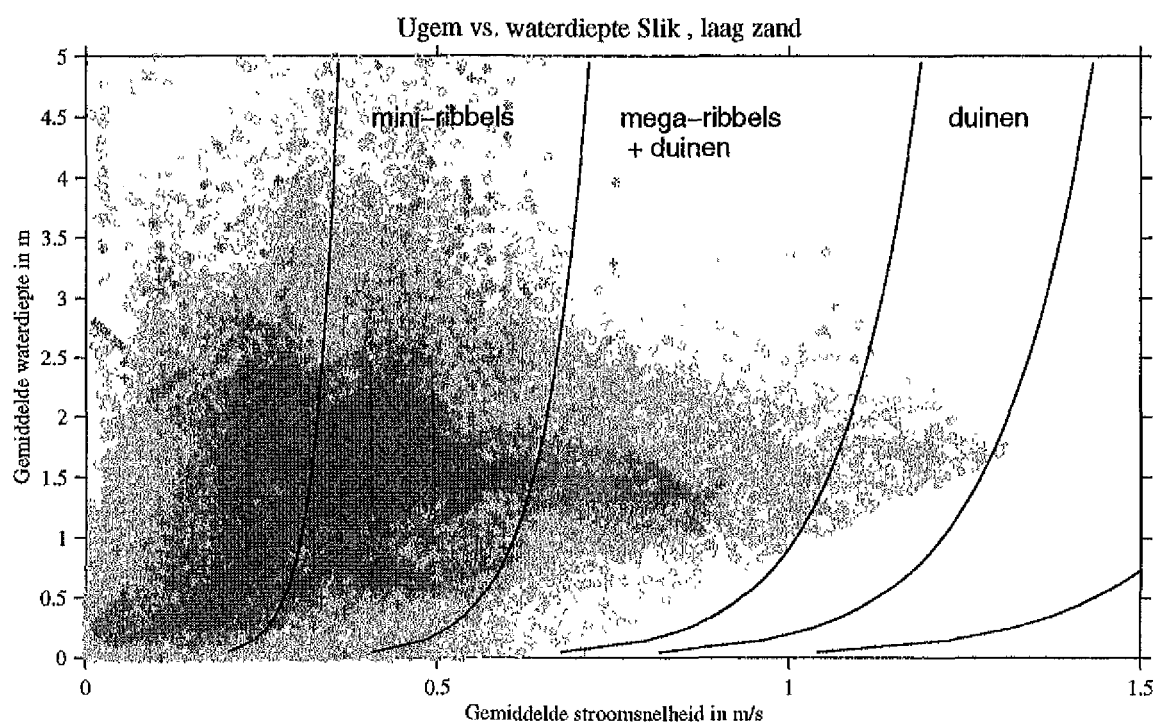
Alkyon

SVASEK



Max. stroomsnelheden en max. bodemschuifspanning
Berekeningen SCALWEST met cyclisch getij

Figuur 2.5



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

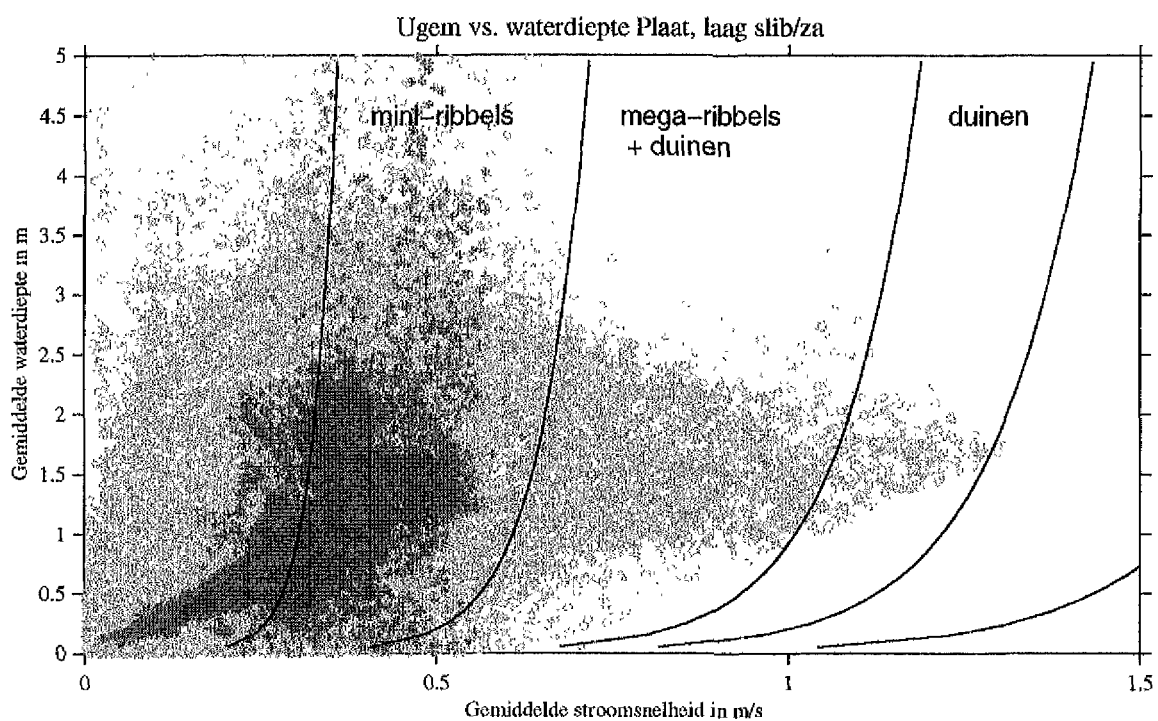
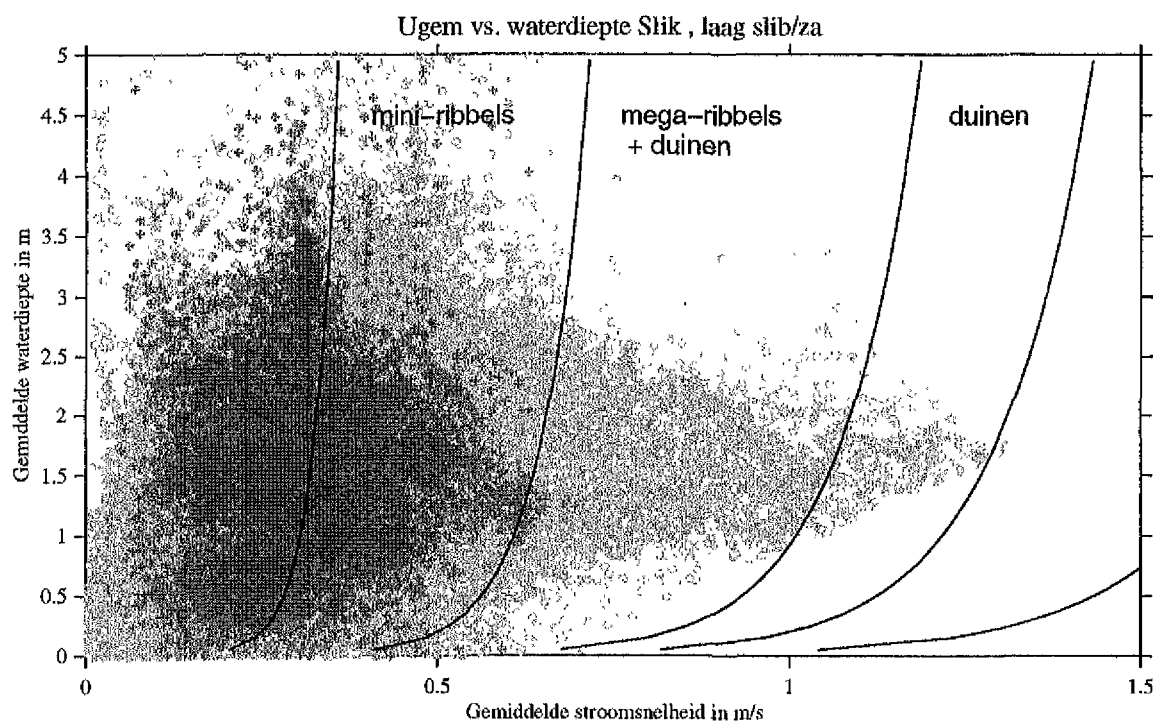
ECOMORF

1165/A647

Figuur 2.6

 Alkyon

 SVASEK



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

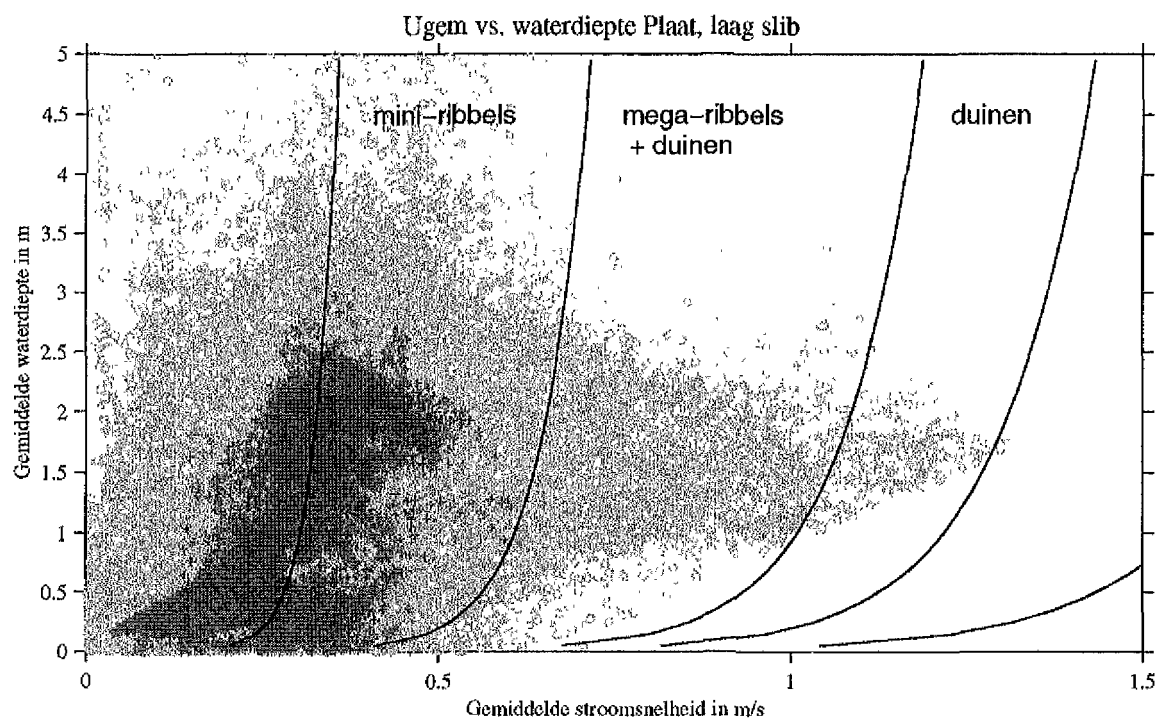
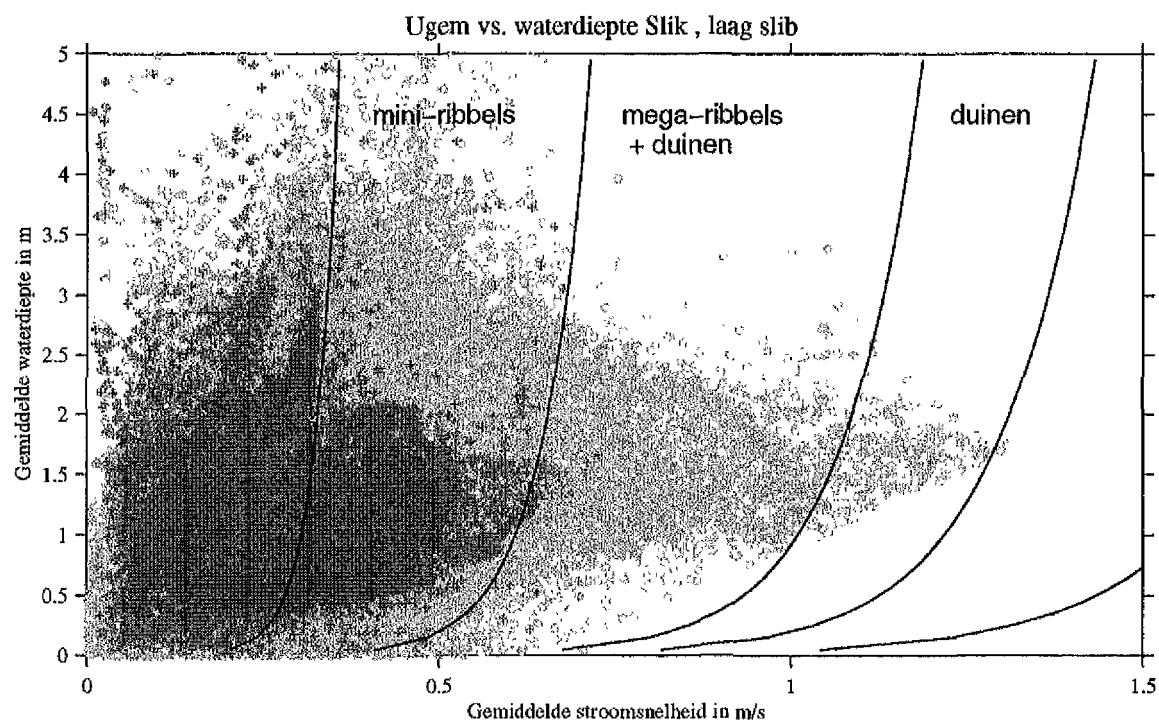
ECOMORF

1165/A647

Figuur 2.7

Alkyon

SVASEK



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

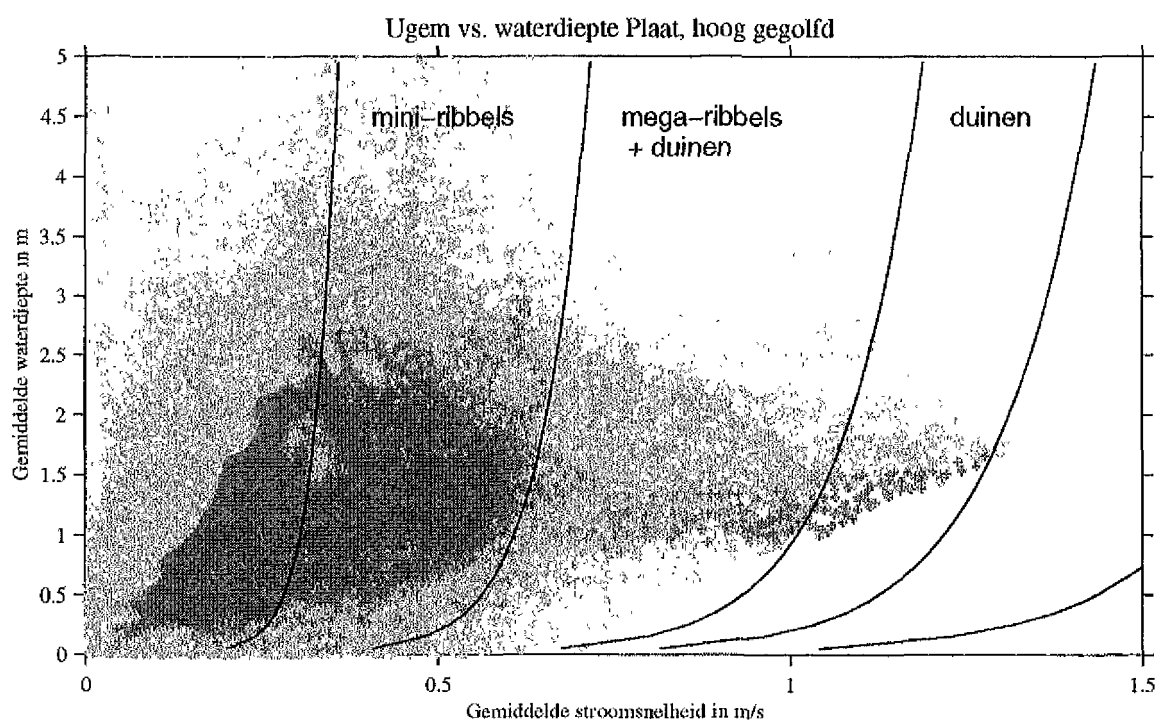
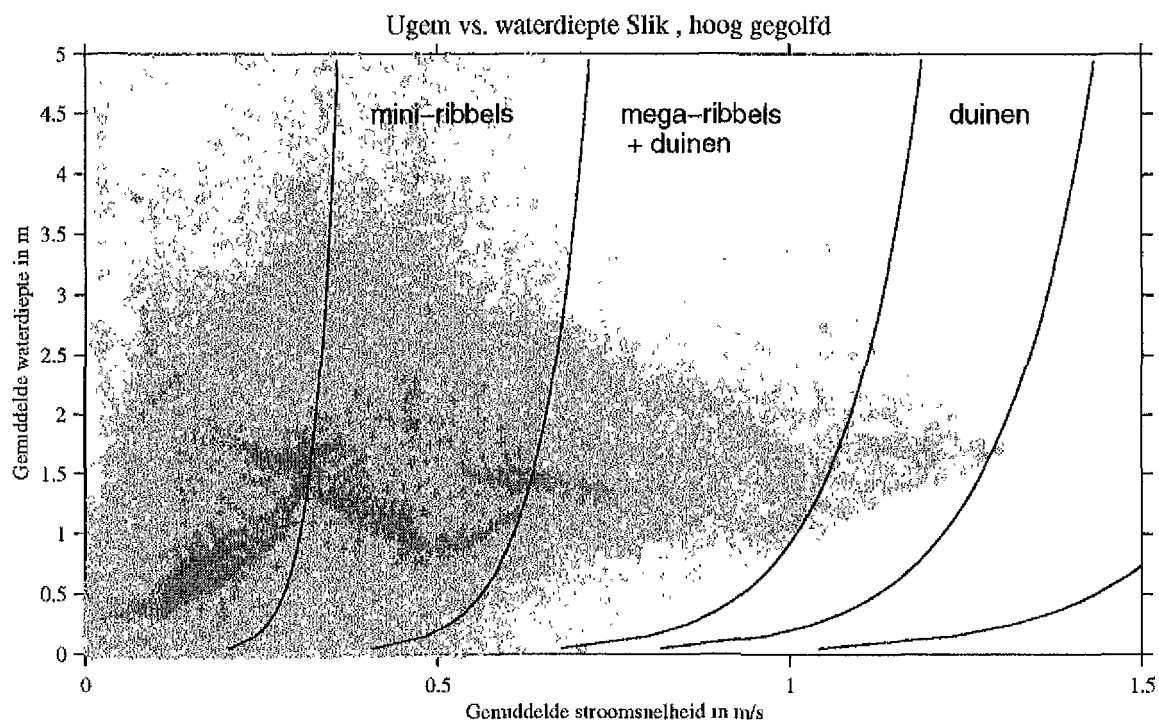
Figuur 2.8

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

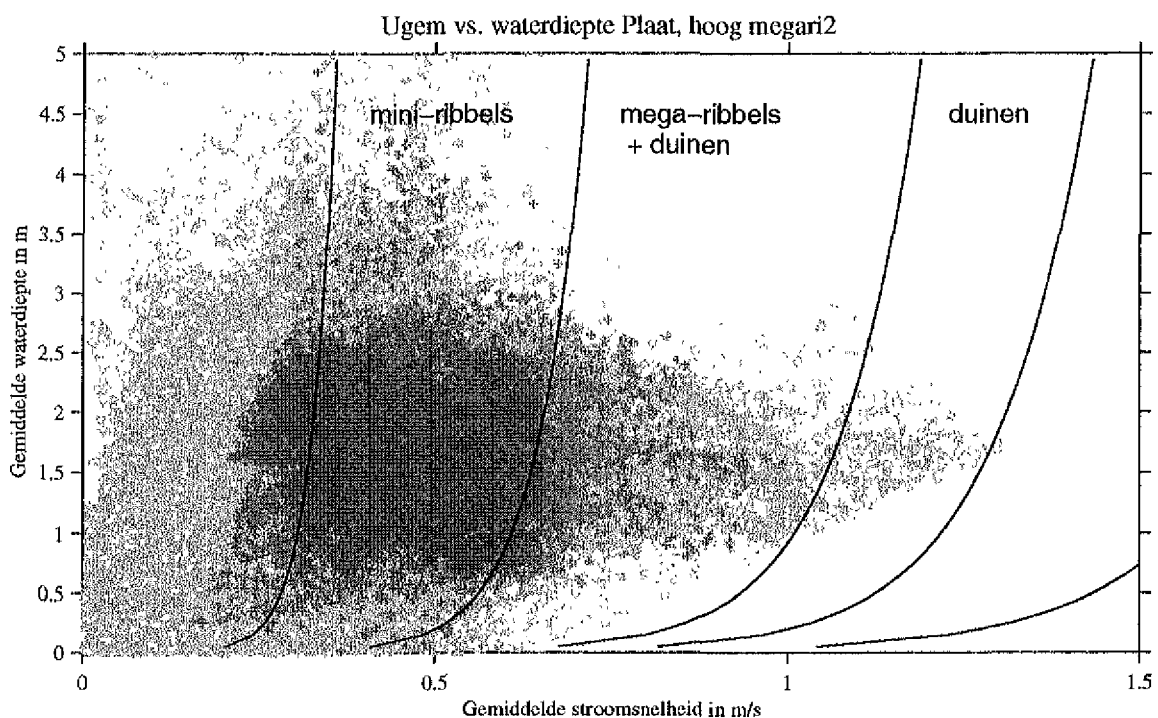
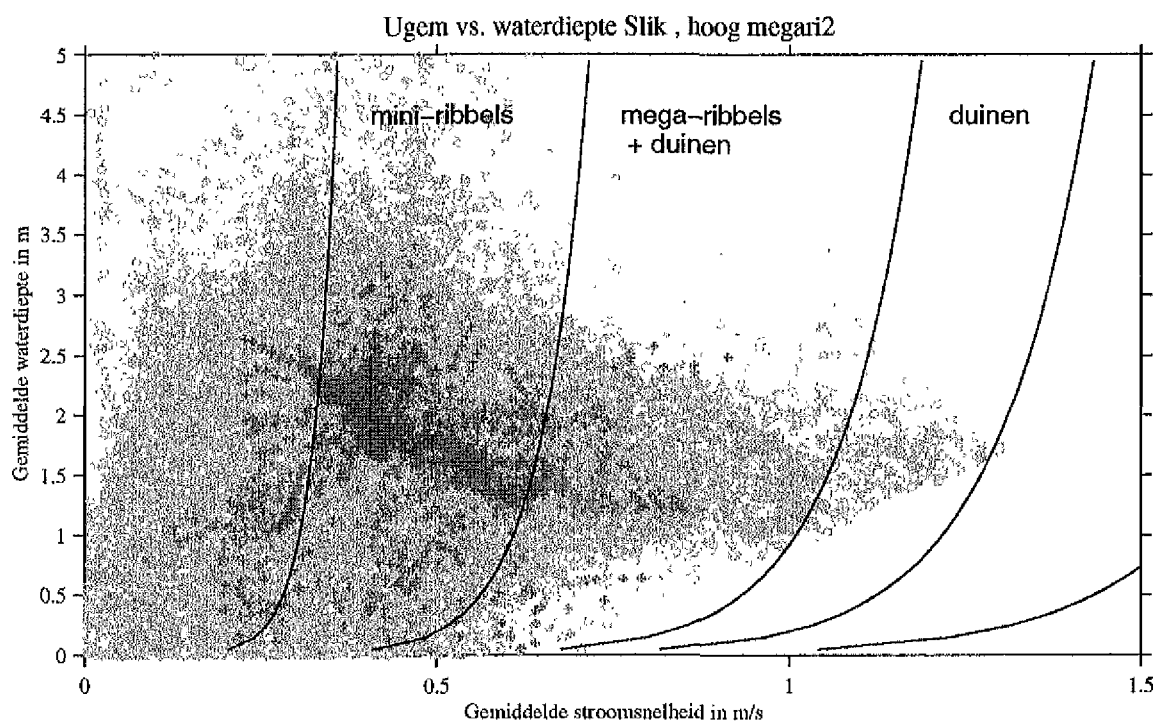
ECOMORF

1165/A647

Figuur 2.9

Alkyon

SVASEK



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

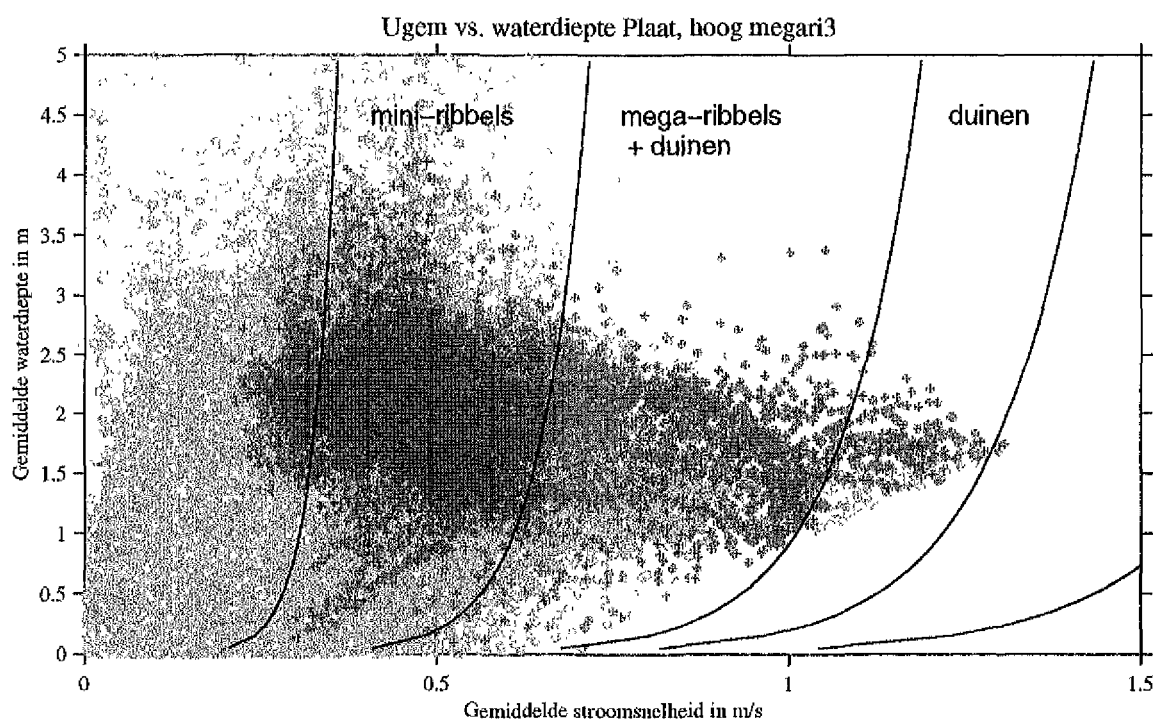
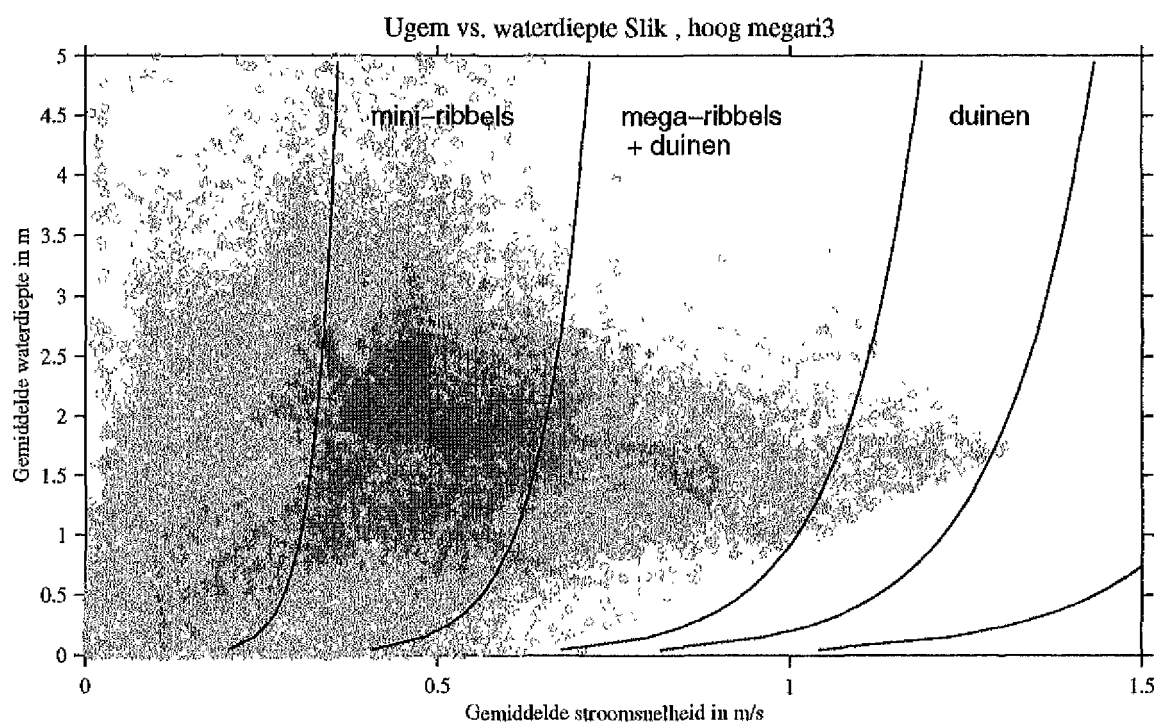
ECOMORF

1165/A647

Figuur 2.10

Alkyon

SVASEK



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

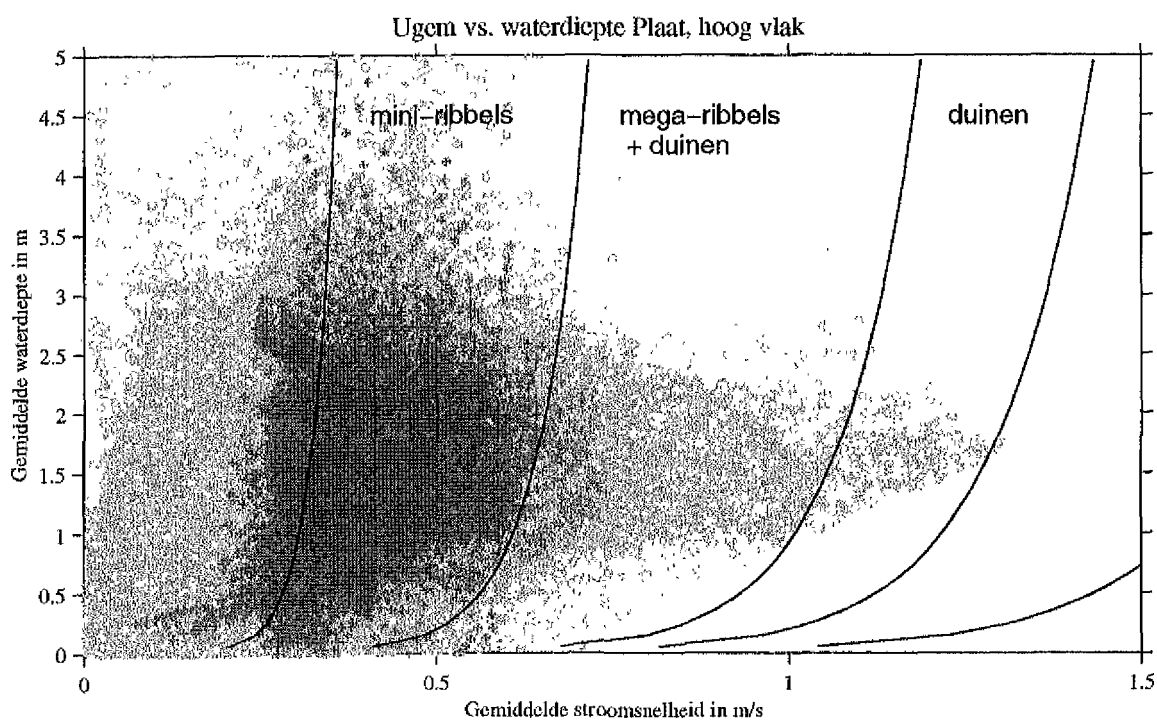
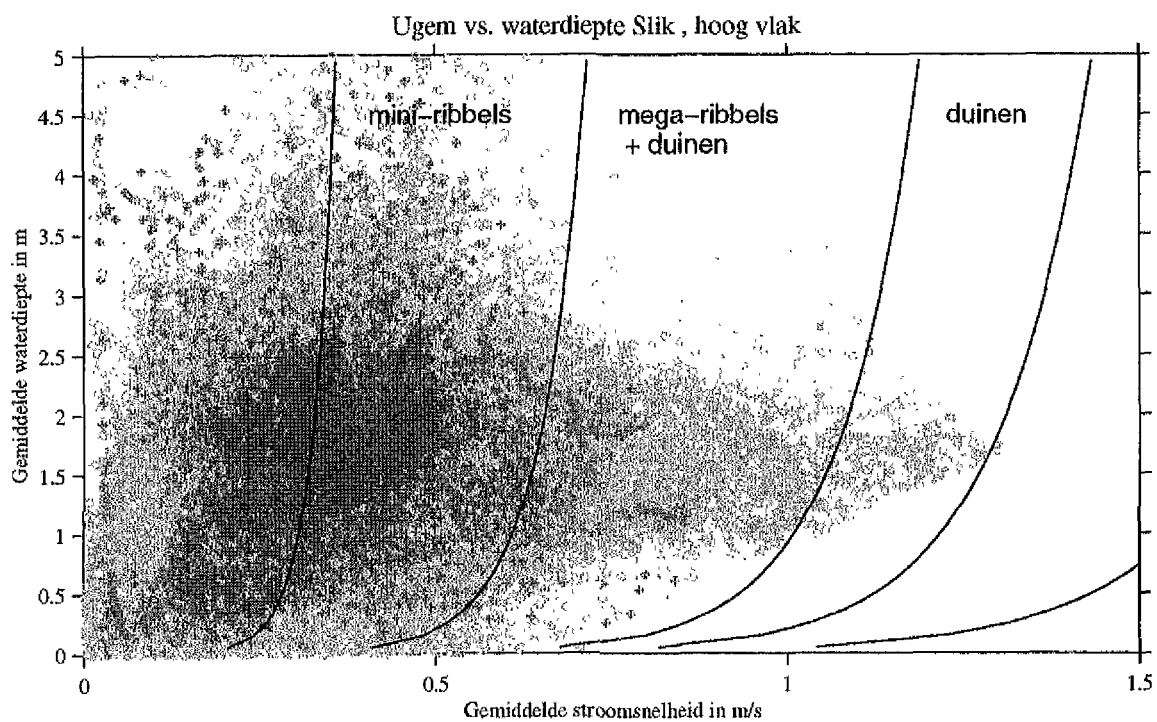
Figuur 2.11

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Verhouding Ugem/gem. diepte

Berekeningen SCALWEST Ecomorf

o = alle punten intergetijdengebied, + = punten geselecteerd gebied

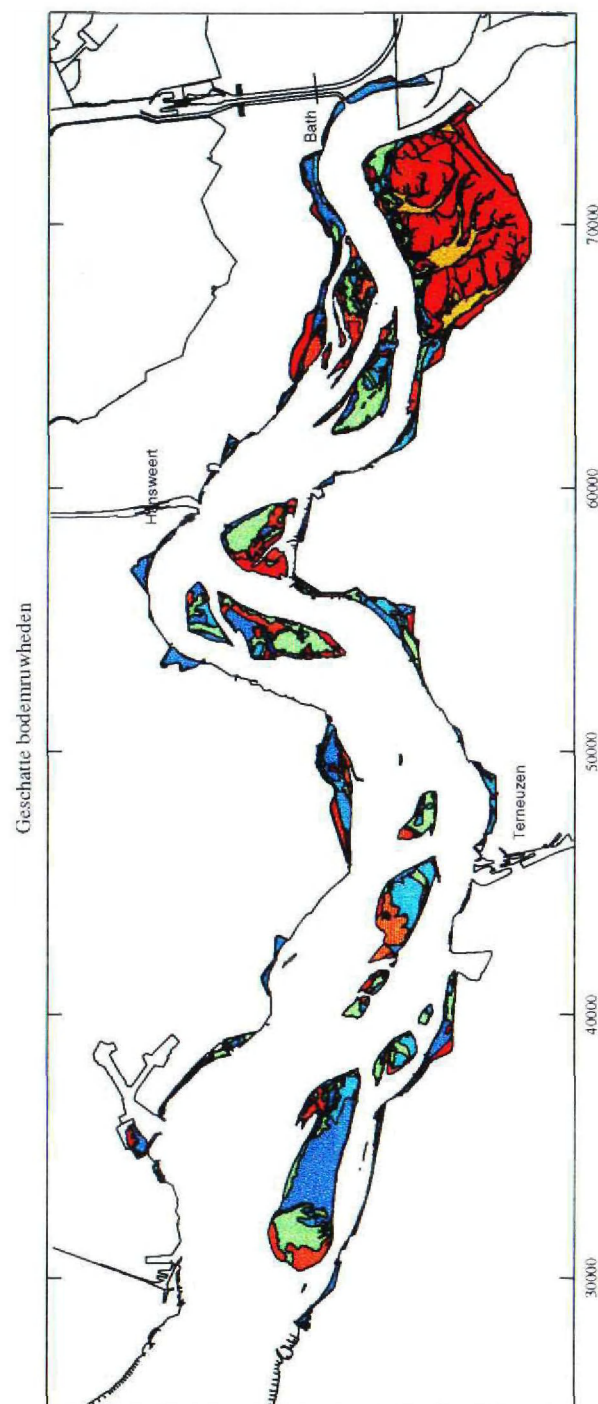
Figuur 2.12

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



bodemruwheden [m]

Geschatte bodemruwheden op basis van geomorf.kaart 1996
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

Figuur 2.13

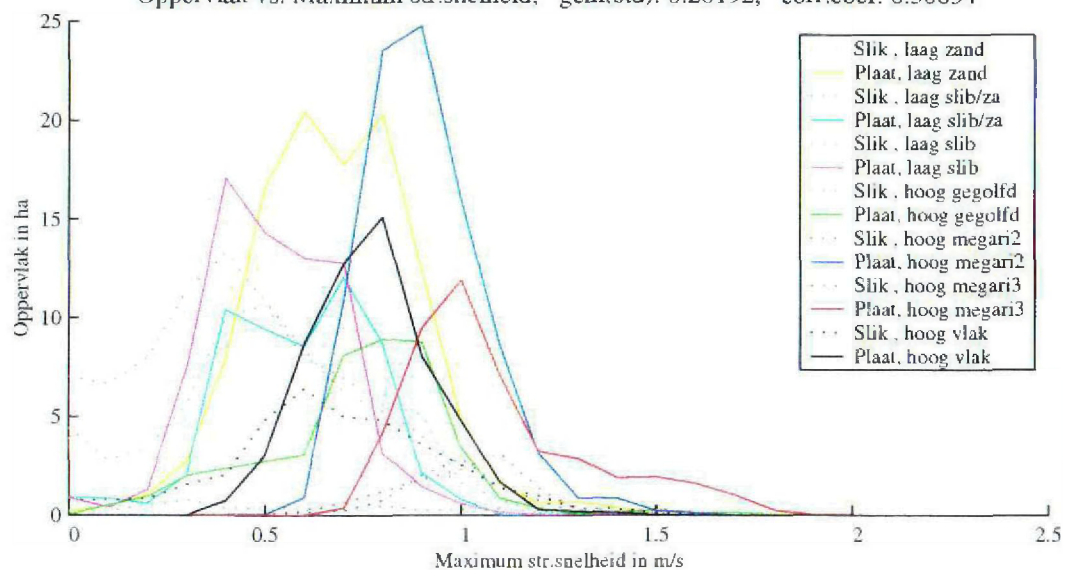
ECOMORF

1165/A647

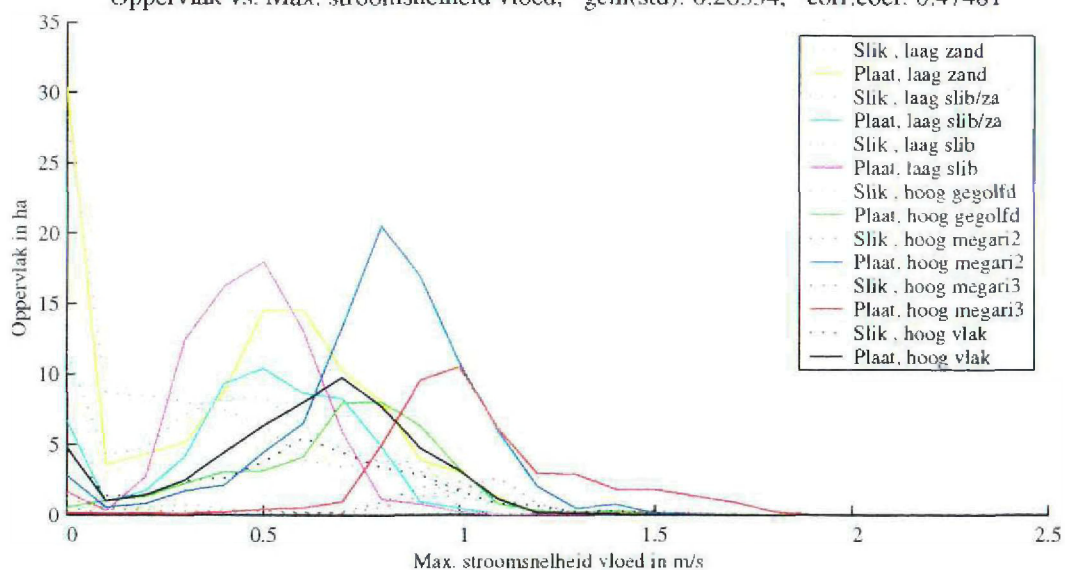
Alkyon

SVASEK

Oppervlak vs. Maximum str.snelheid, gem(std): 0.20192, corr.coef: 0.50634



Oppervlak vs. Max. stroomsnelheid vloed, gem(std): 0.26334, corr.coef: 0.47481



Oppervlak vs. Maximum str.snelheid
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

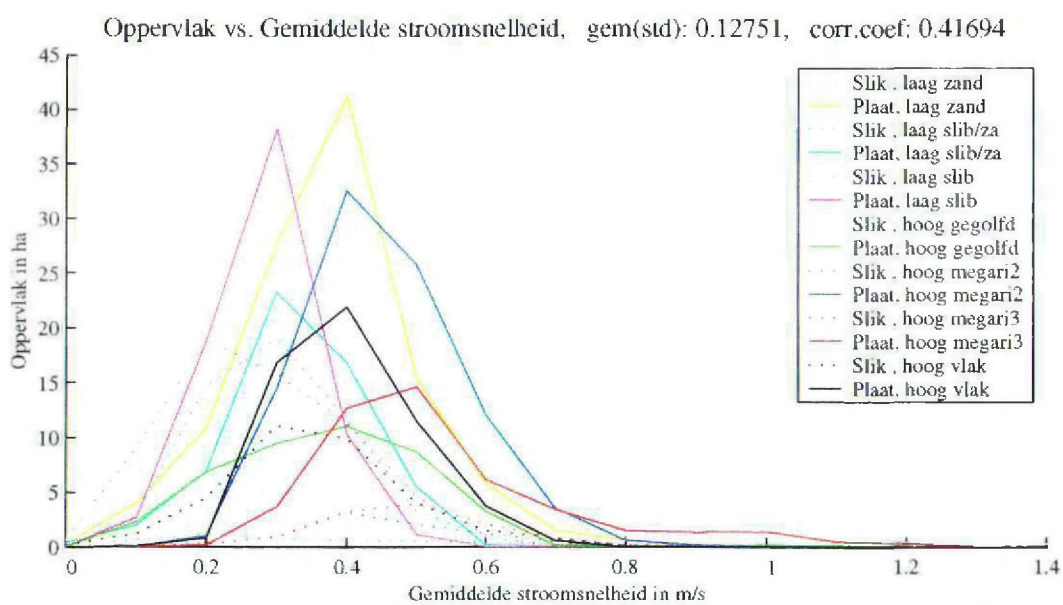
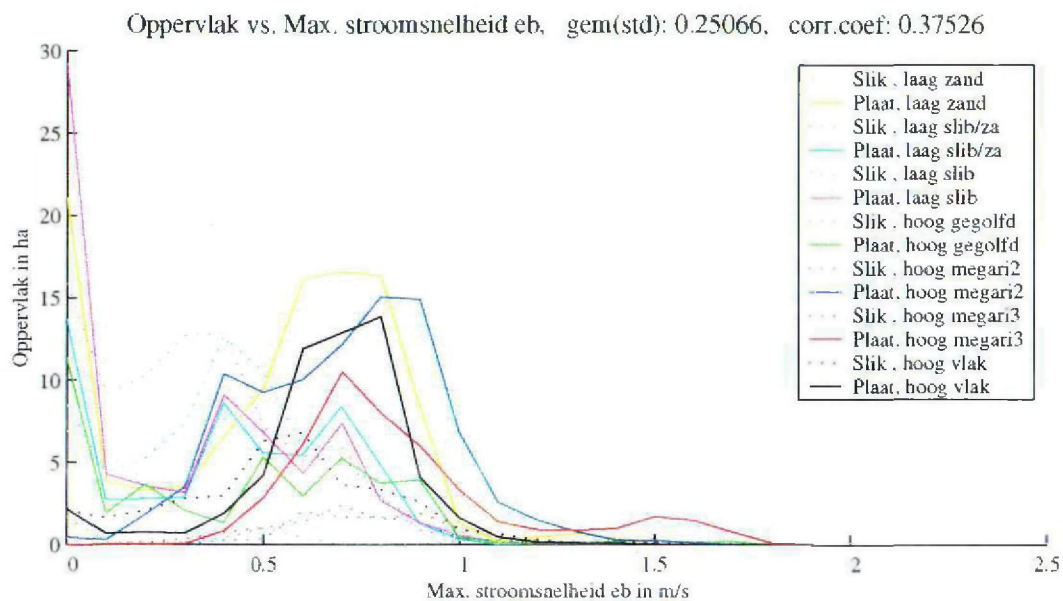
Figuur 2.14

ECOMORF

1165/A647

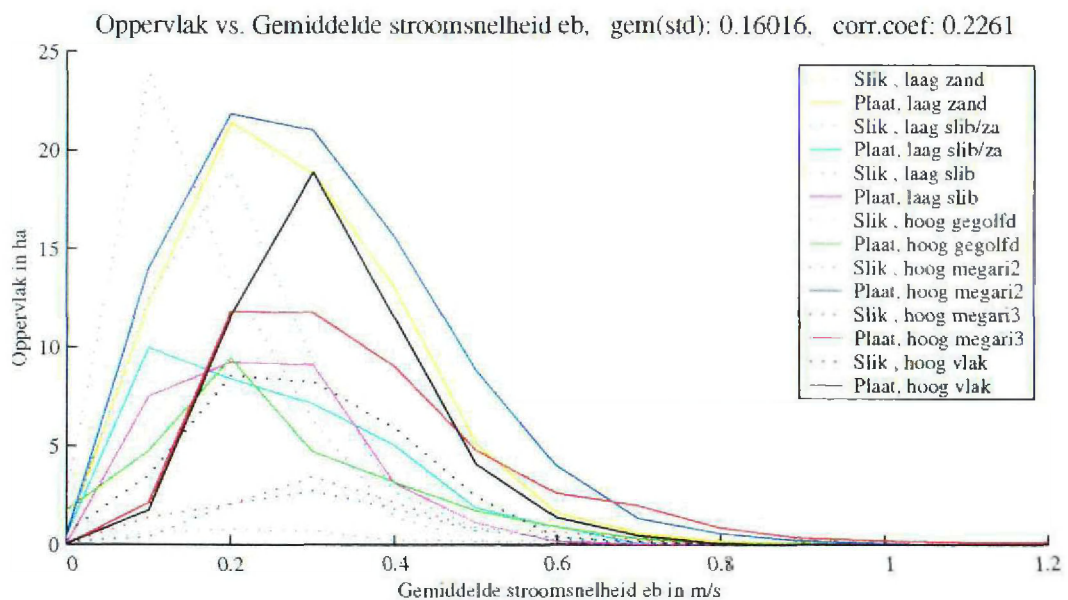
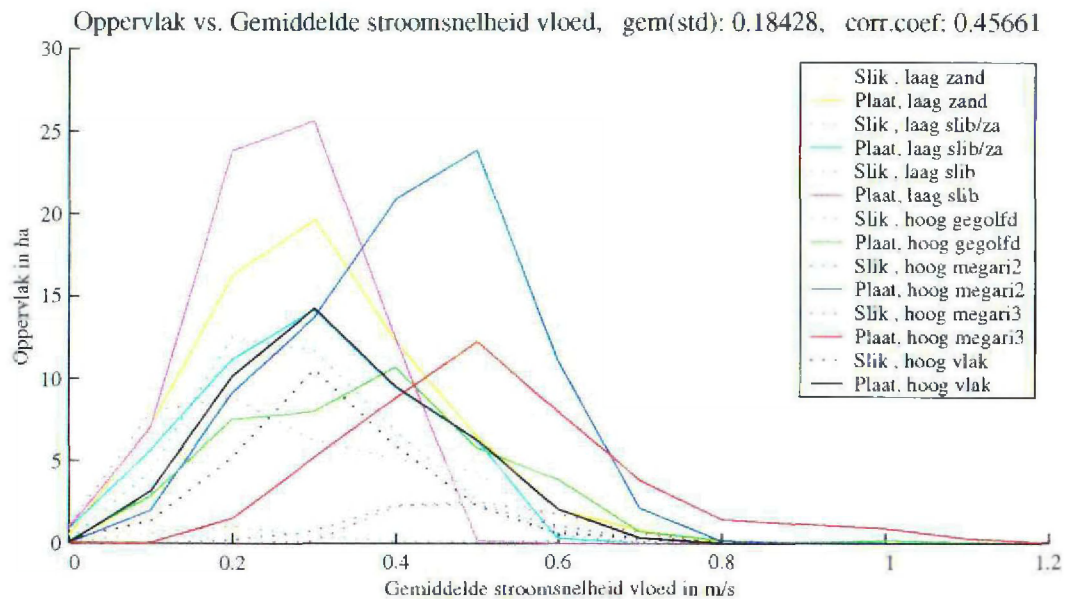
Alkyon

SVASEK



Oppervlak vs. Max. stroomsnelheid eb
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

Figuur 2.15



Oppervlak vs. Gemiddelde stroomsnelheid vloed
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

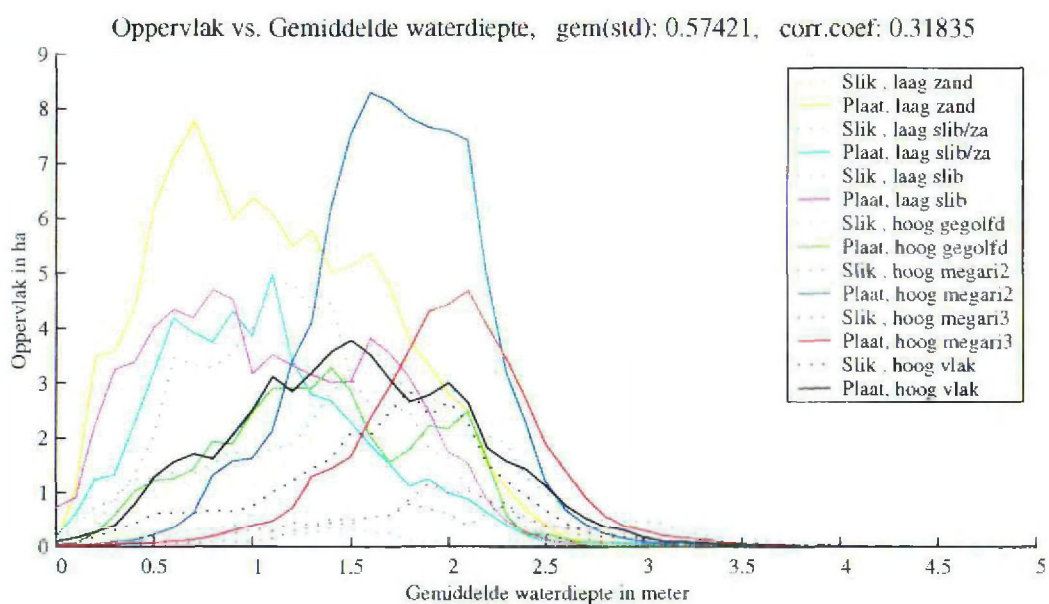
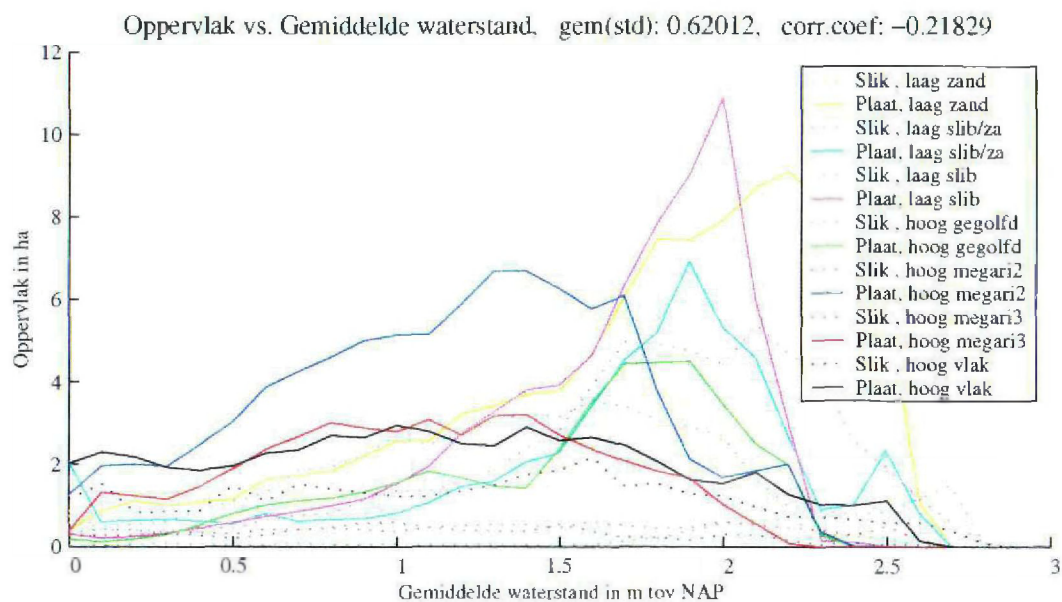
Figuur 2.16

ECOMORF

1165/A647

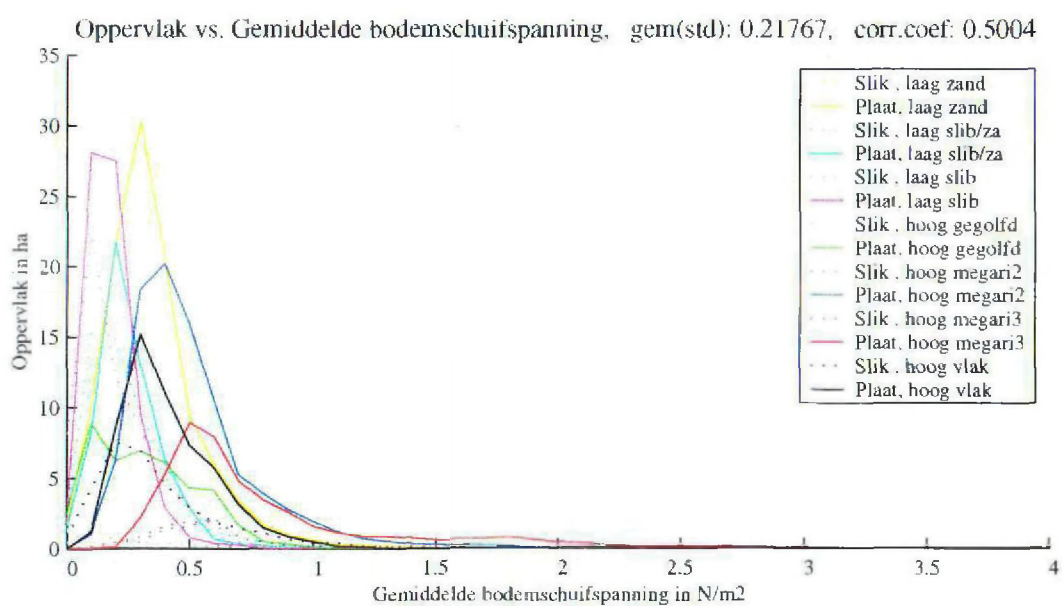
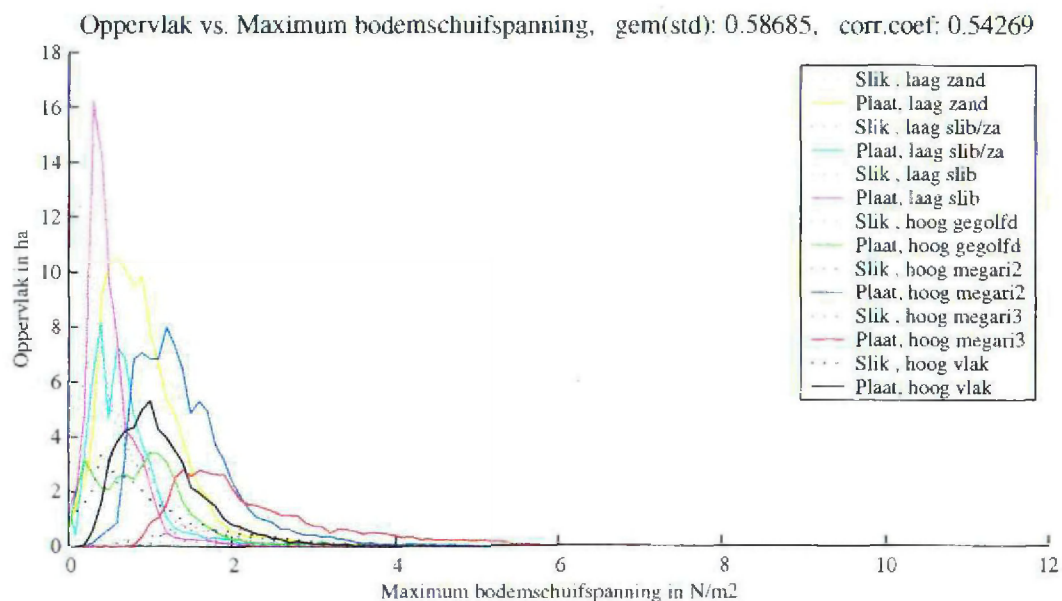
Alkyon

SVASEK



Oppervlak vs. Gemiddelde waterstand
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

Figuur 2.17



Oppervlak vs. Maximum bodemschuifspanning
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

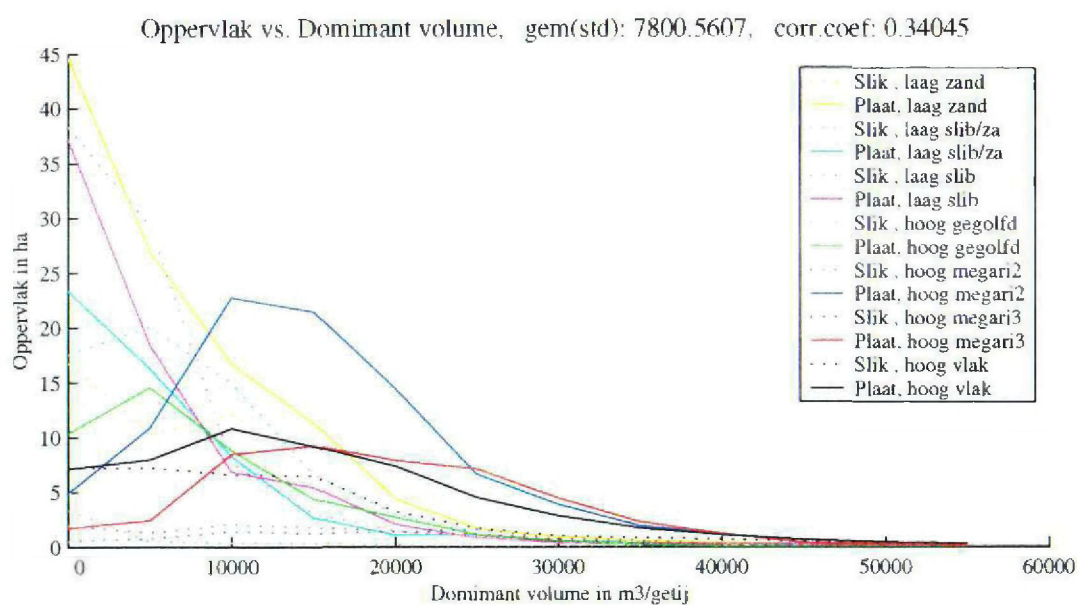
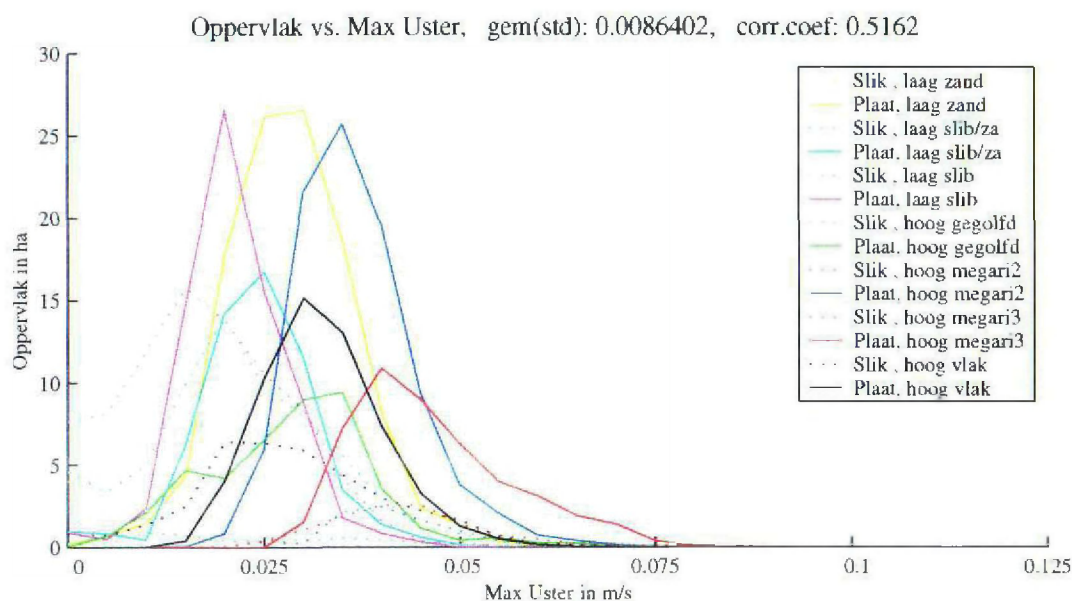
Figuur 2.18

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Oppervlak vs. Max Uster
Berekeningen SCALWEST ECOMORF

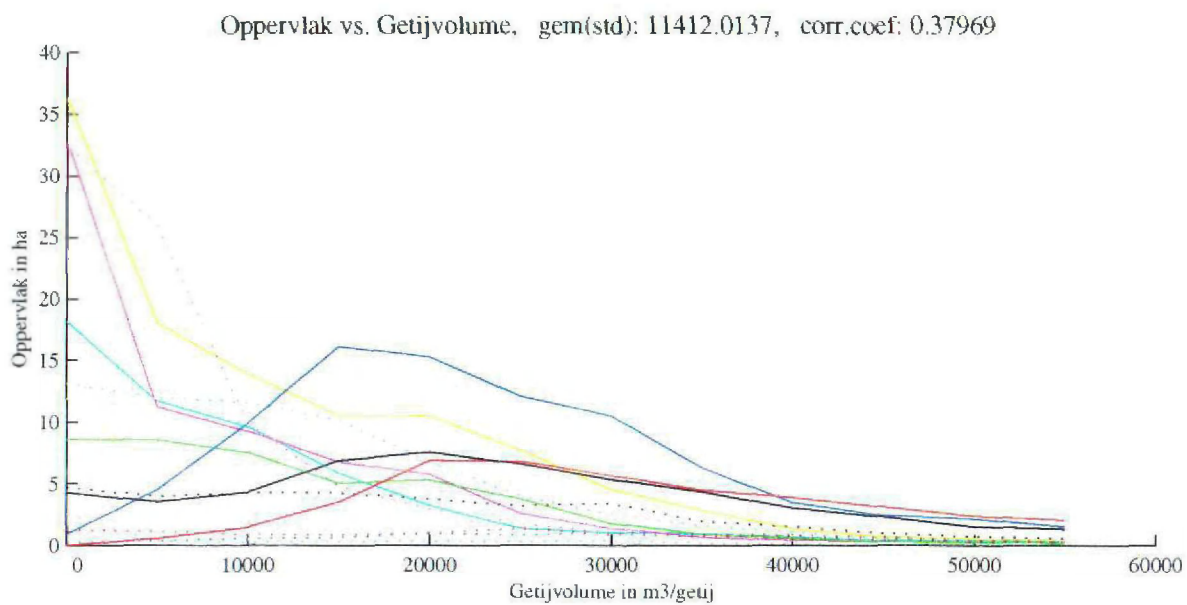
Figuur 2.19

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Berekeningen SCALWEST ECOMORF

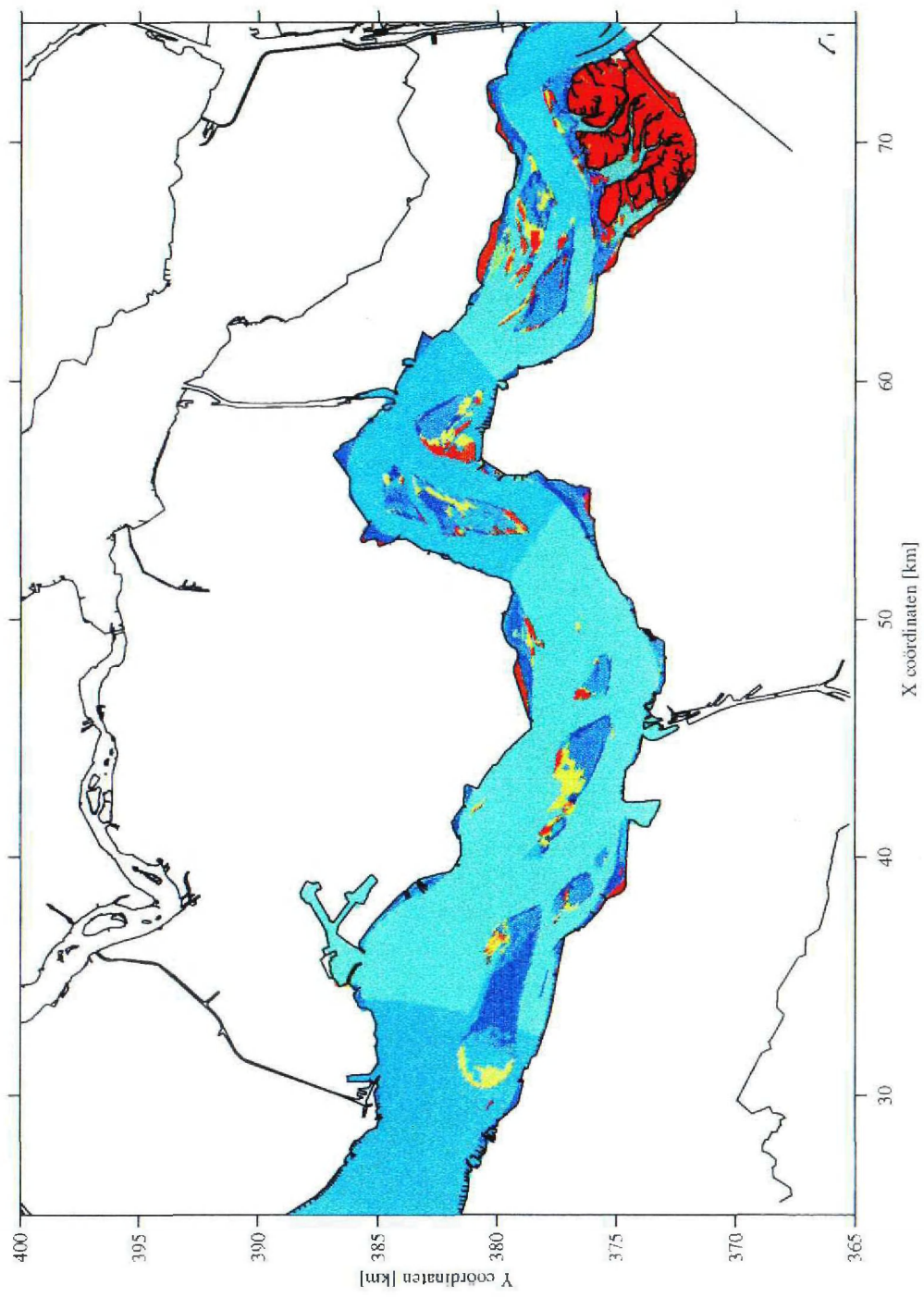
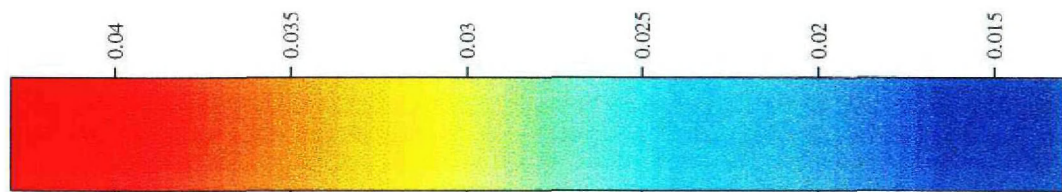
Figuur 2.20

ECOMORF

1165/A647

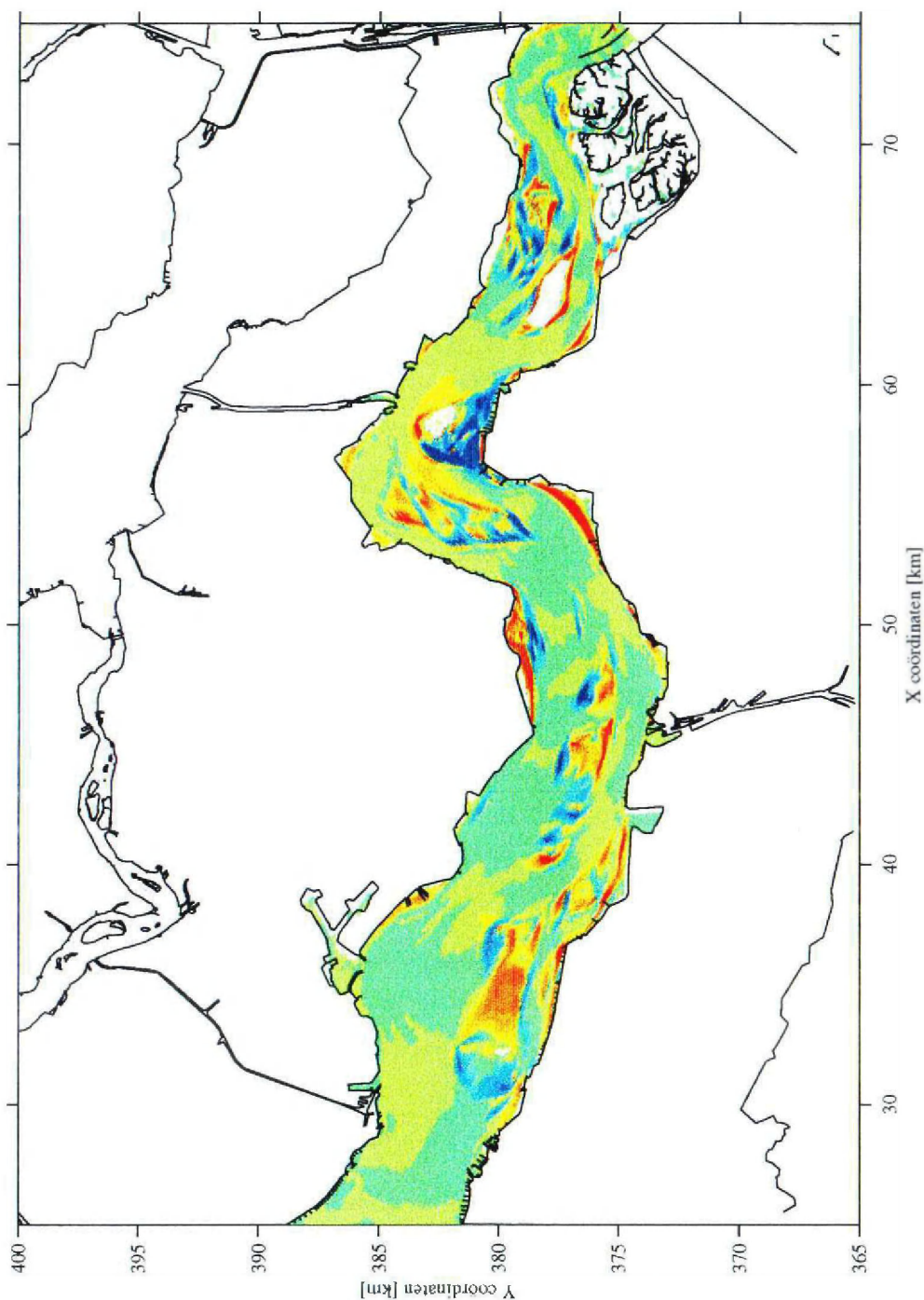
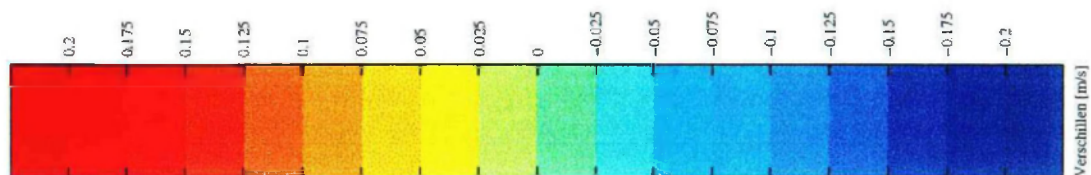
Alkyon

SVASEK



Ruwheden SCALWEST (Manning)
 Ruwheden intergetijdengebied berekend a.d.h.v. luchtfoto's

Figuur 2.21



Verschillen stroomsnelheden SCALWEST
tussen basisrun en run met nieuwe ruwheden in intergetijdengebied
Maximum vloedstroming

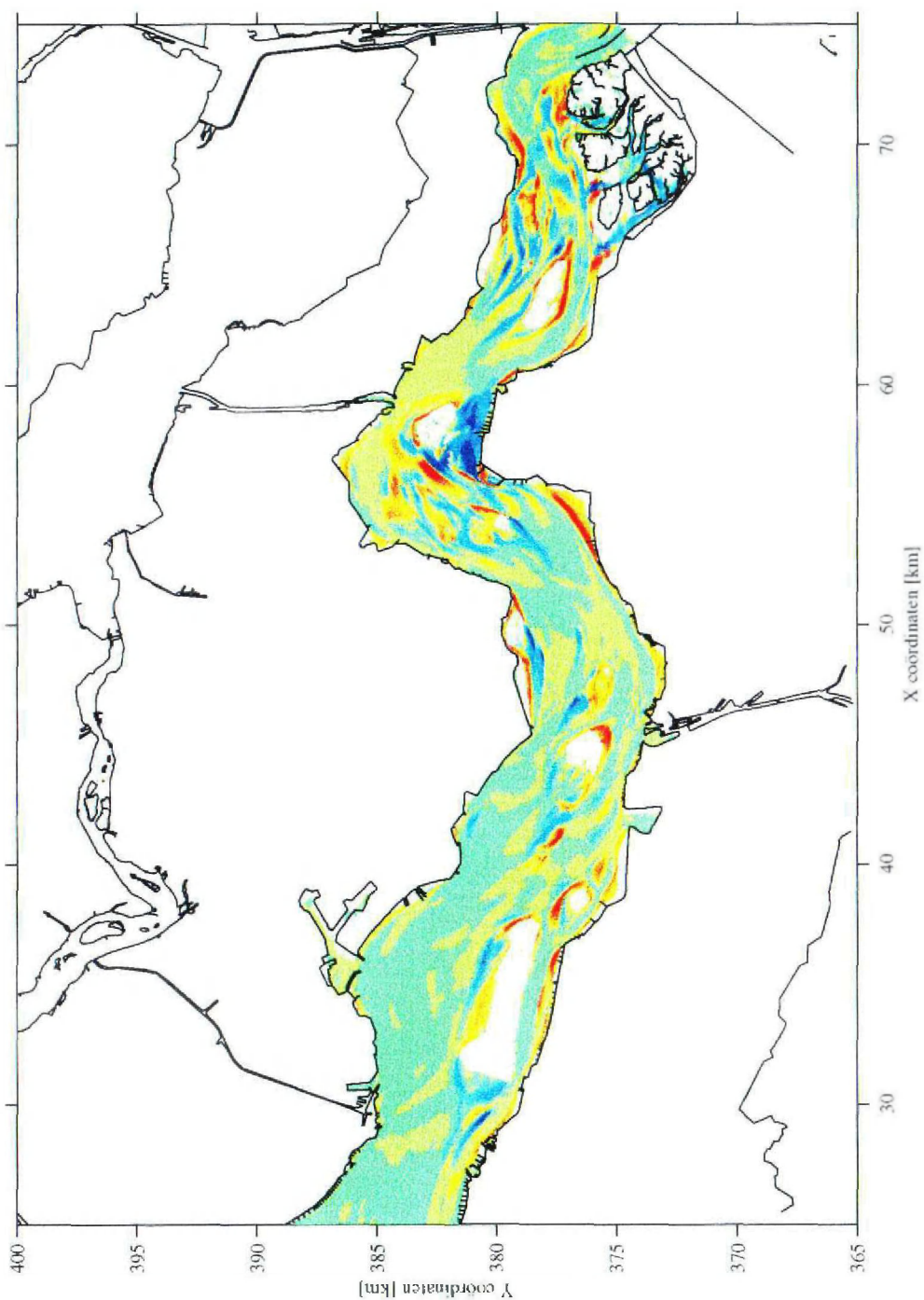
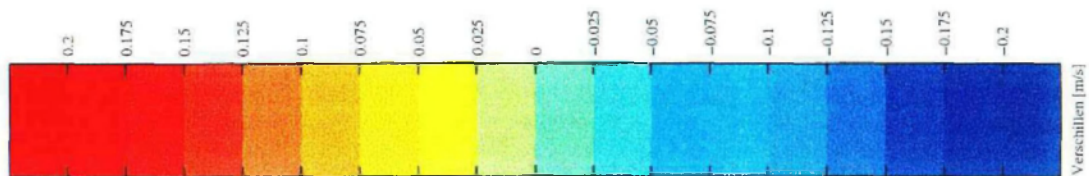
Figuur 2.22

ECOMORF

1165/A647

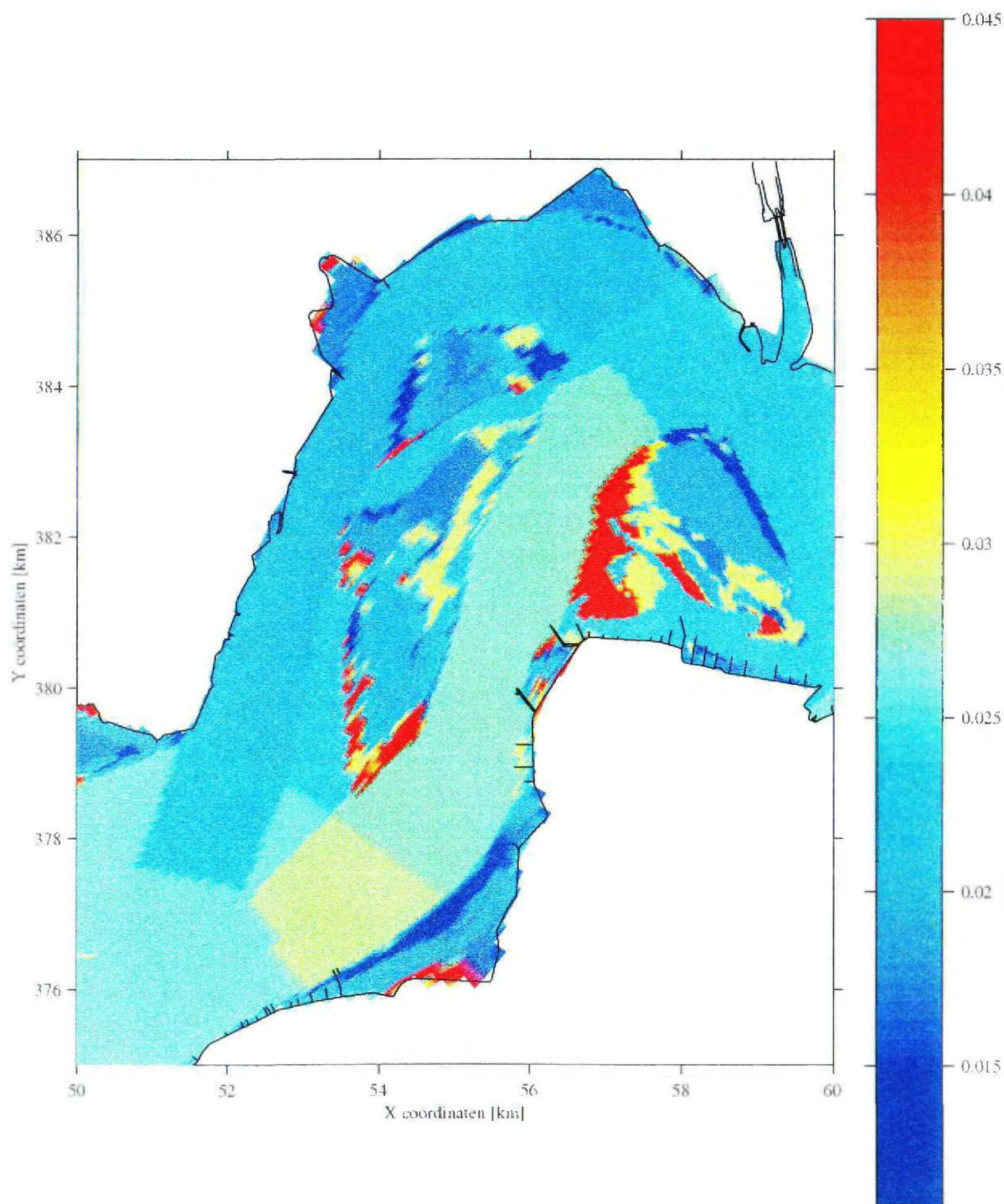
Alkyon

SVASEK



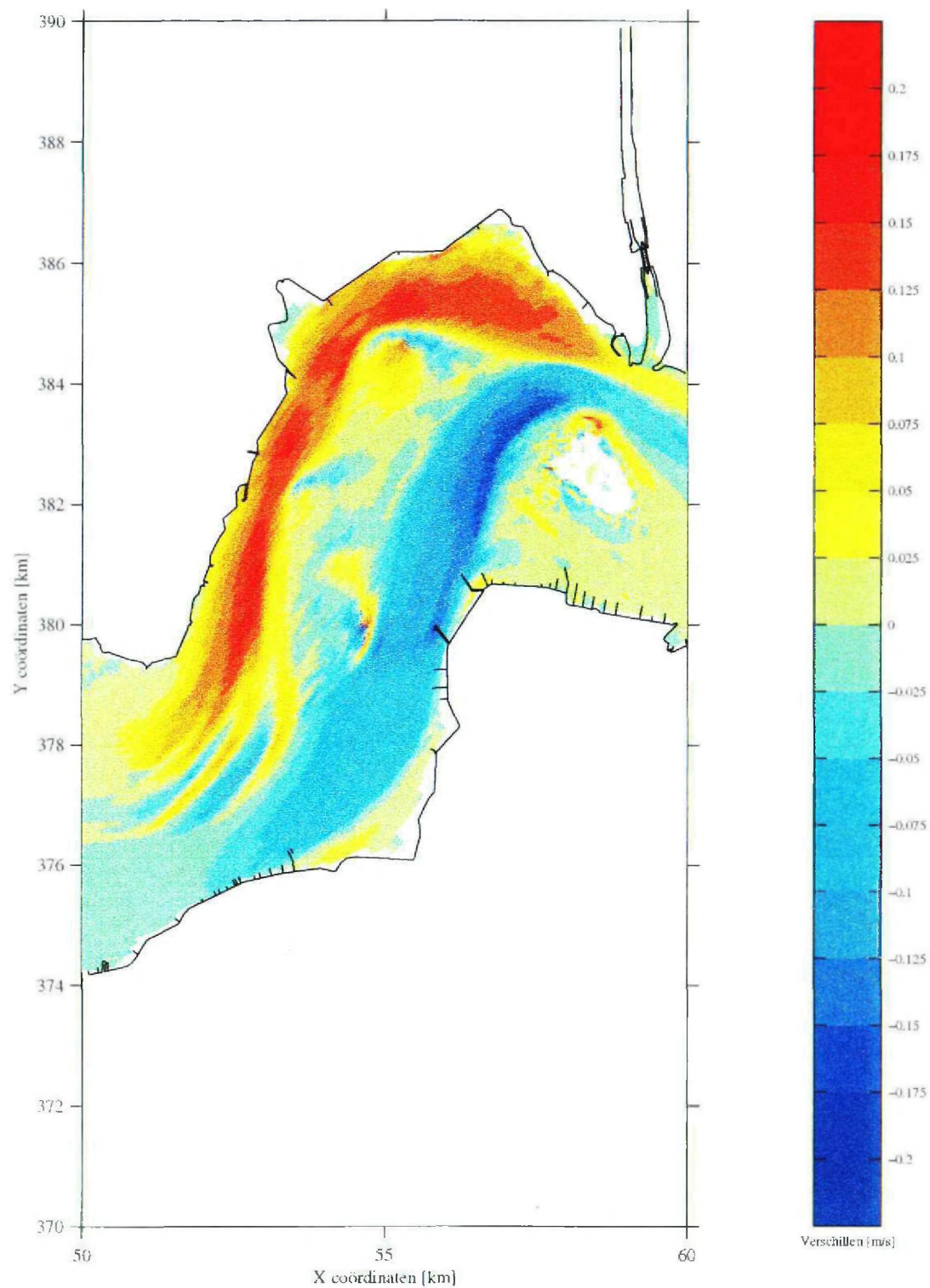
Verschillen stroomsnelheden SCALWEST
tussen basisrun en run met nieuwe ruwheden in intergetijdengebied
Maximum ebstroming

Figuur 2.23



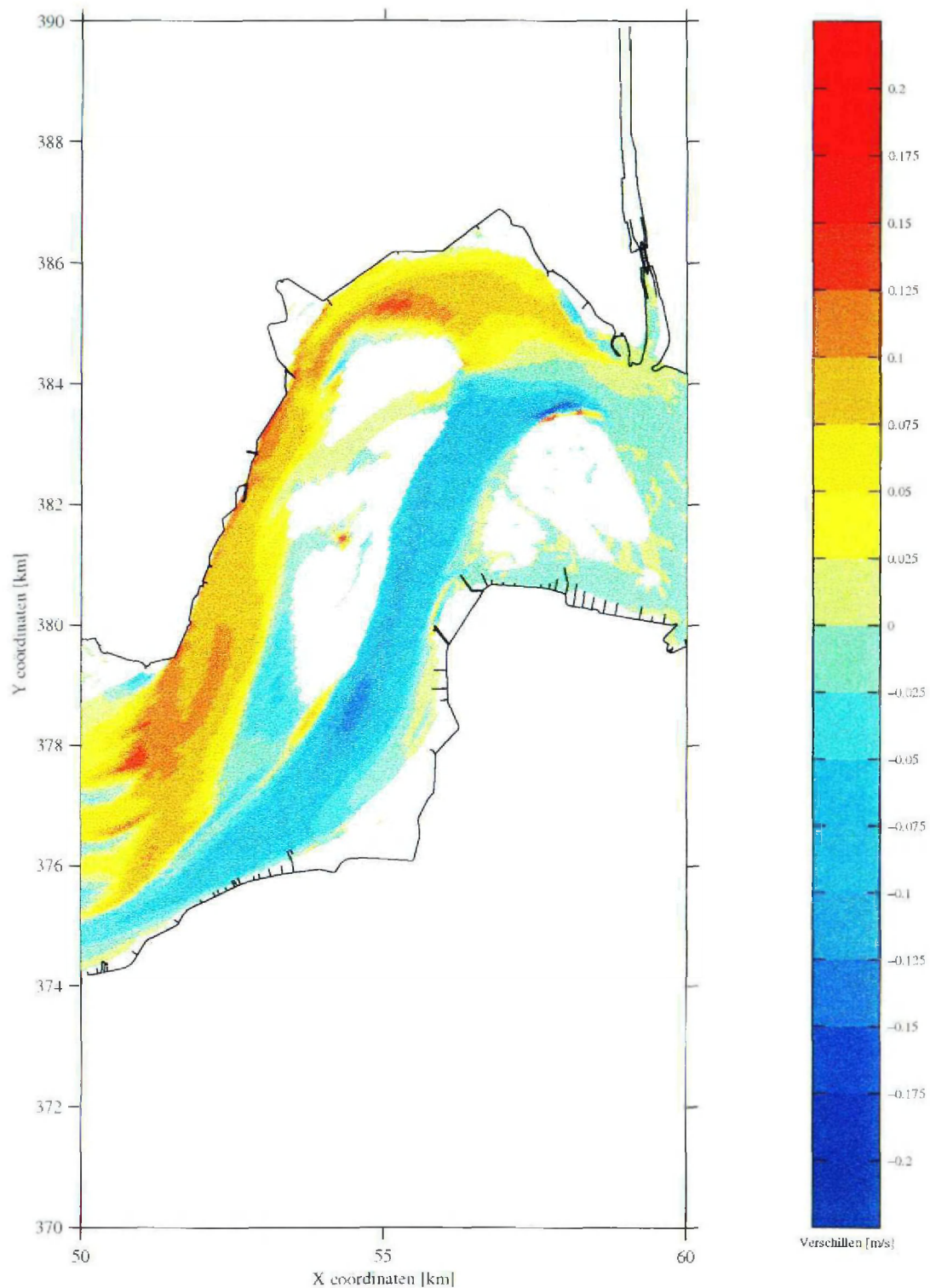
Ruwheden SCALWEST (Manning)
Middelgat gladder, Gat van Ossensisse ruwer

Figuur 2.24



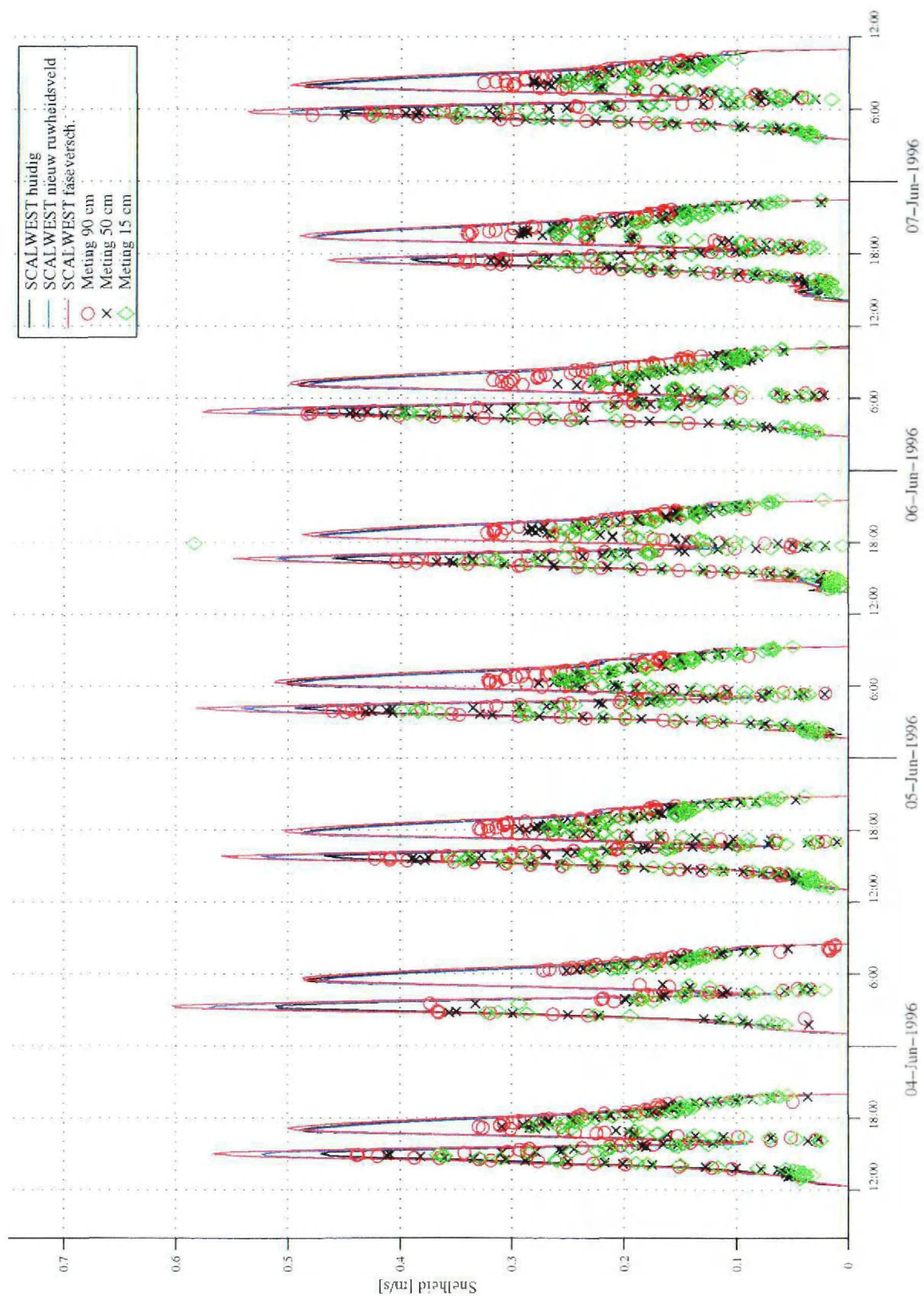
Verschillen stroomsnelheden SCALWEST
 met Middelgat gladder en Gat van Ossensisse ruwer
 Maximum vloedstroming

Figuur 2.25



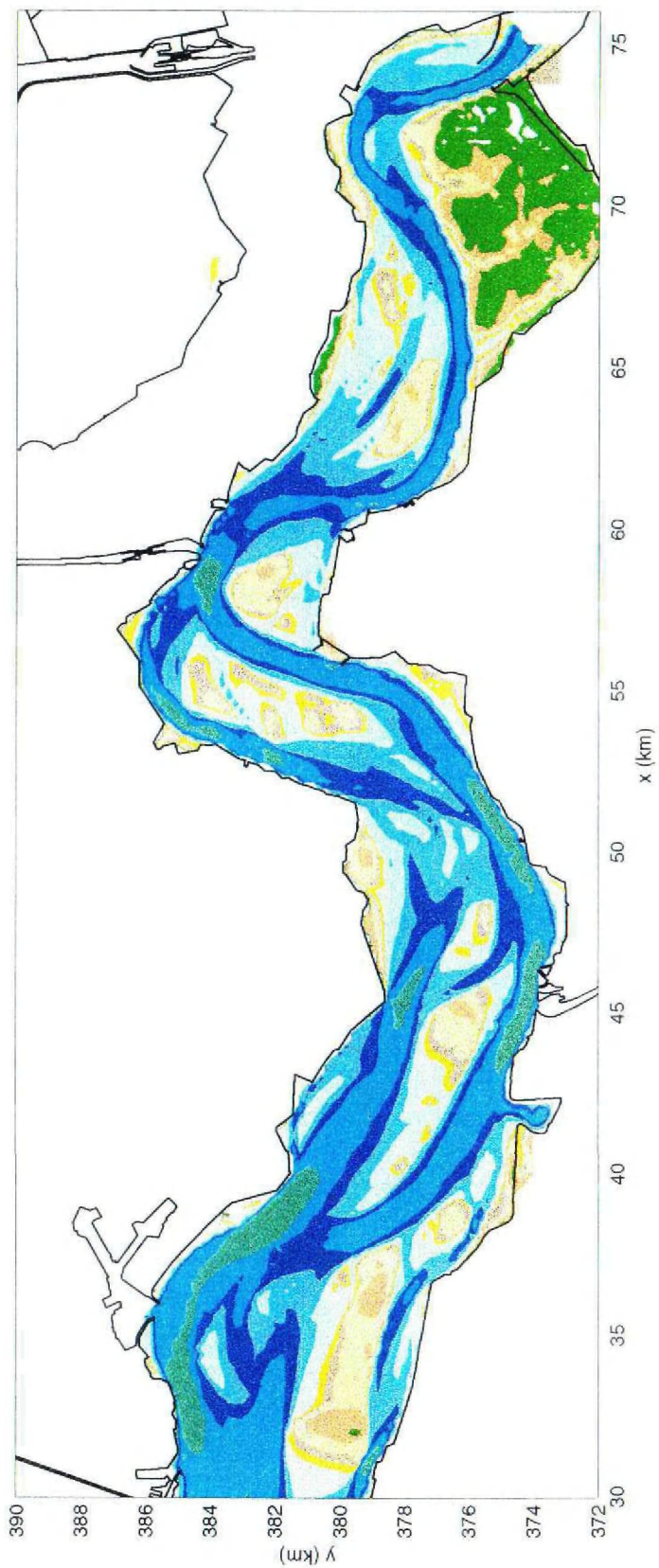
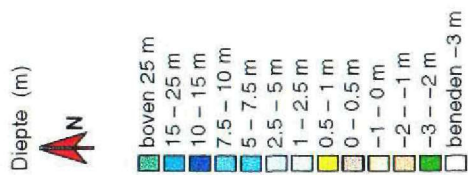
Verschillen stroomsnelheden SCALWEST
met Middelgat gladder en Gat van Ossensisse ruwer
Maximum ebstroming

Figuur 2.26



Vergelijking SCALWEST met stroommetingen
Molenplaat, site 1, meetpunt 3

Figuur 2.27



Bodemligging Westerschelde (diepte in meters t.o.v. NAP)
Rekenrooster E3

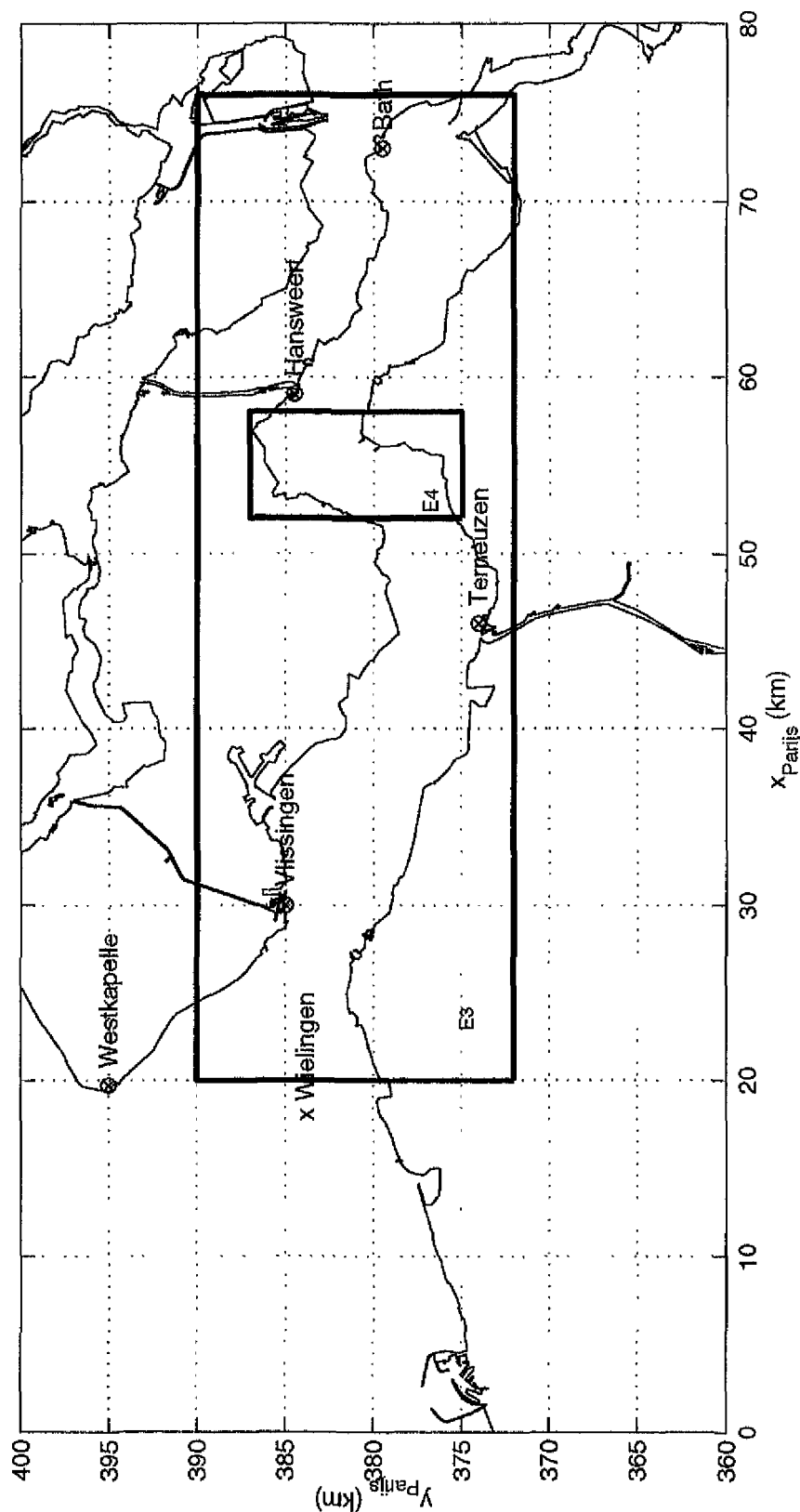
Fig. 3.1

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Rekenrooster voor Westerschelde en Molenplaat en lokatie
station Wieringen en lokaties waterstandsmetingen
Resolutie bodem en rekenrooster 200 m en detail 50 m

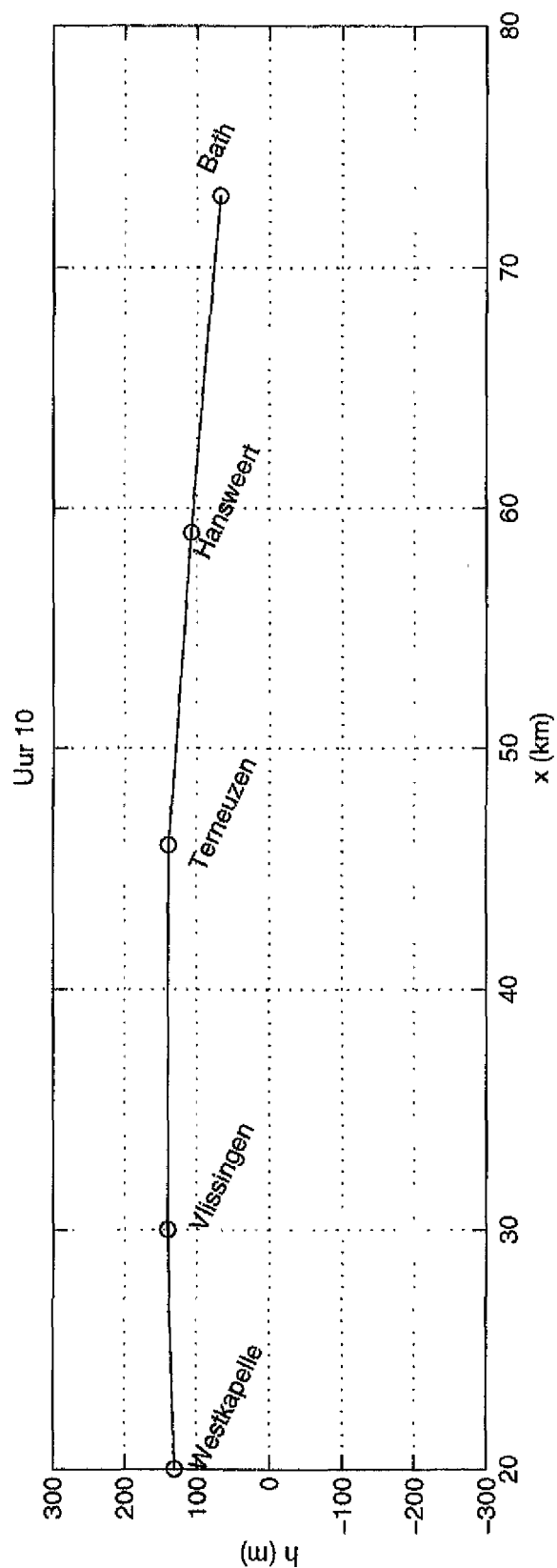
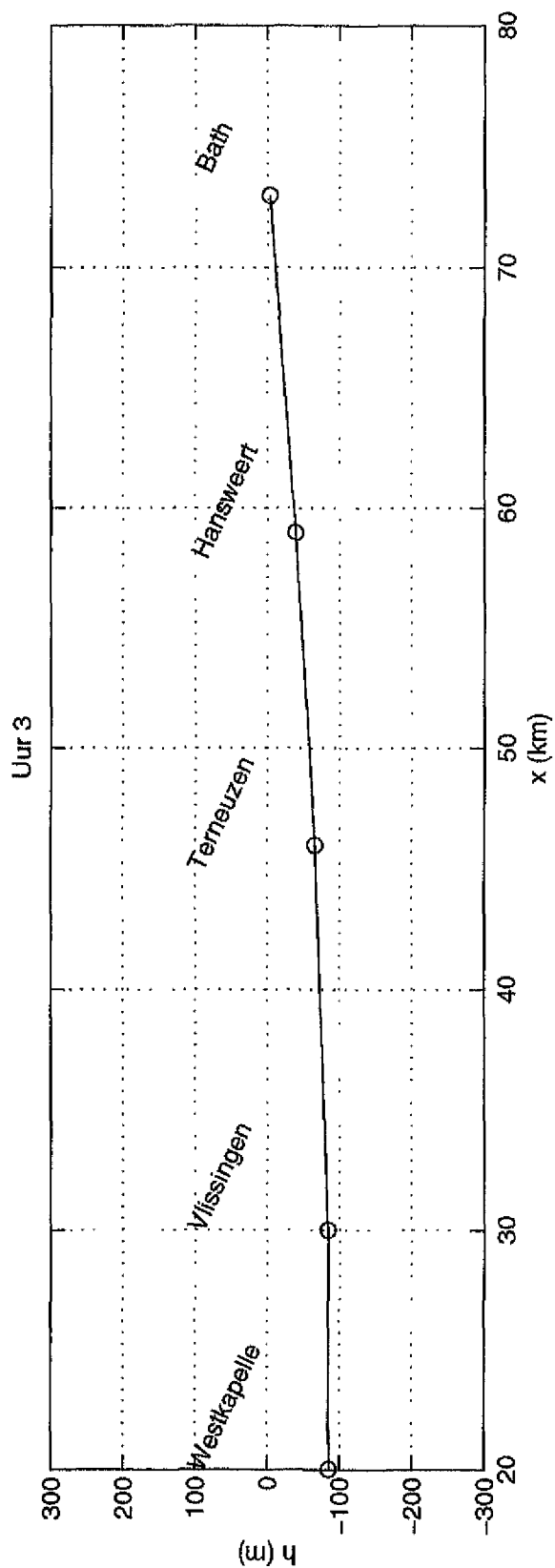
Fig. 3.2

ECOMORF

1165/A647

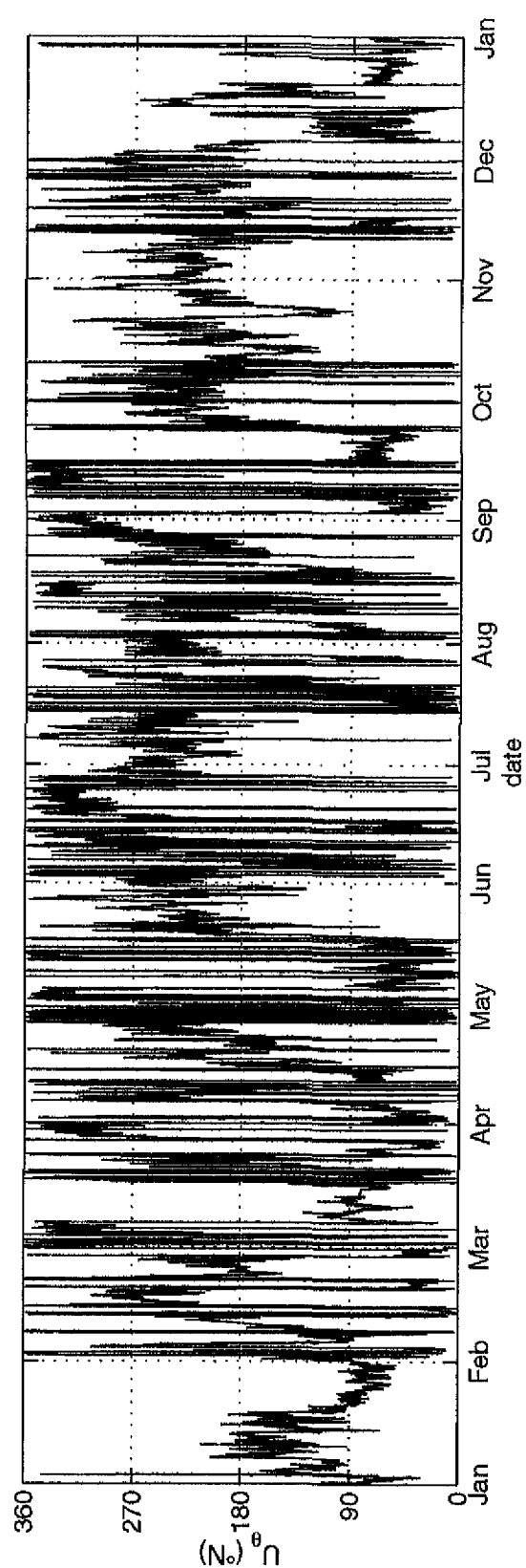
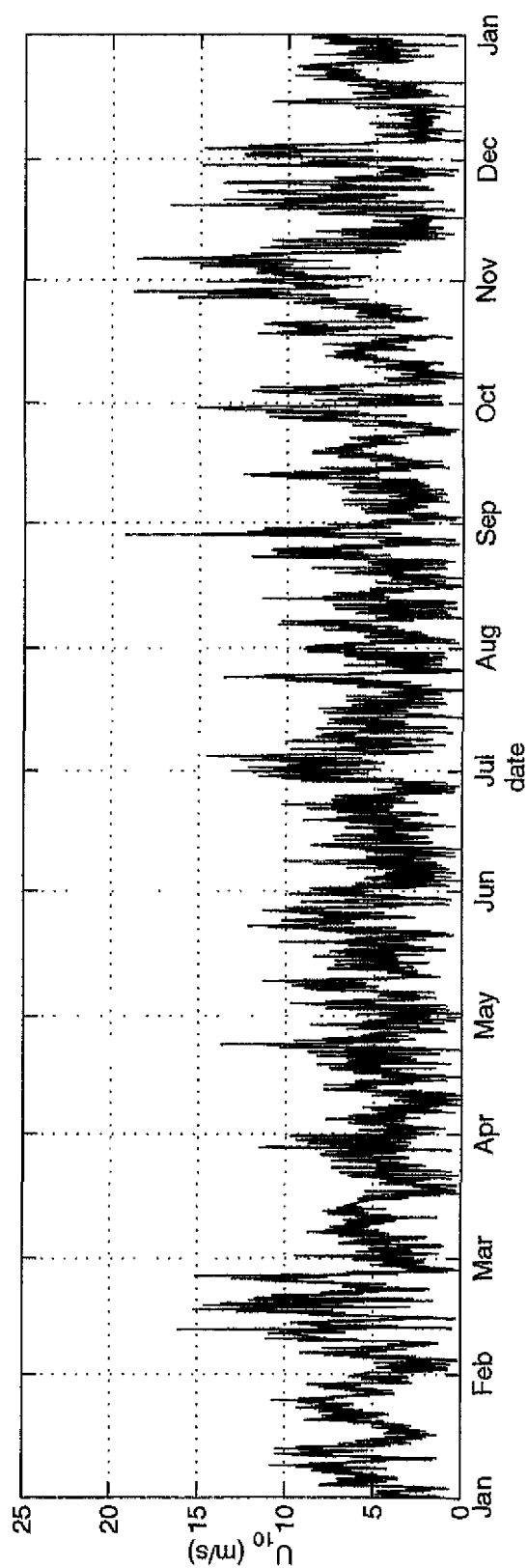
Alkyon

SVASEK



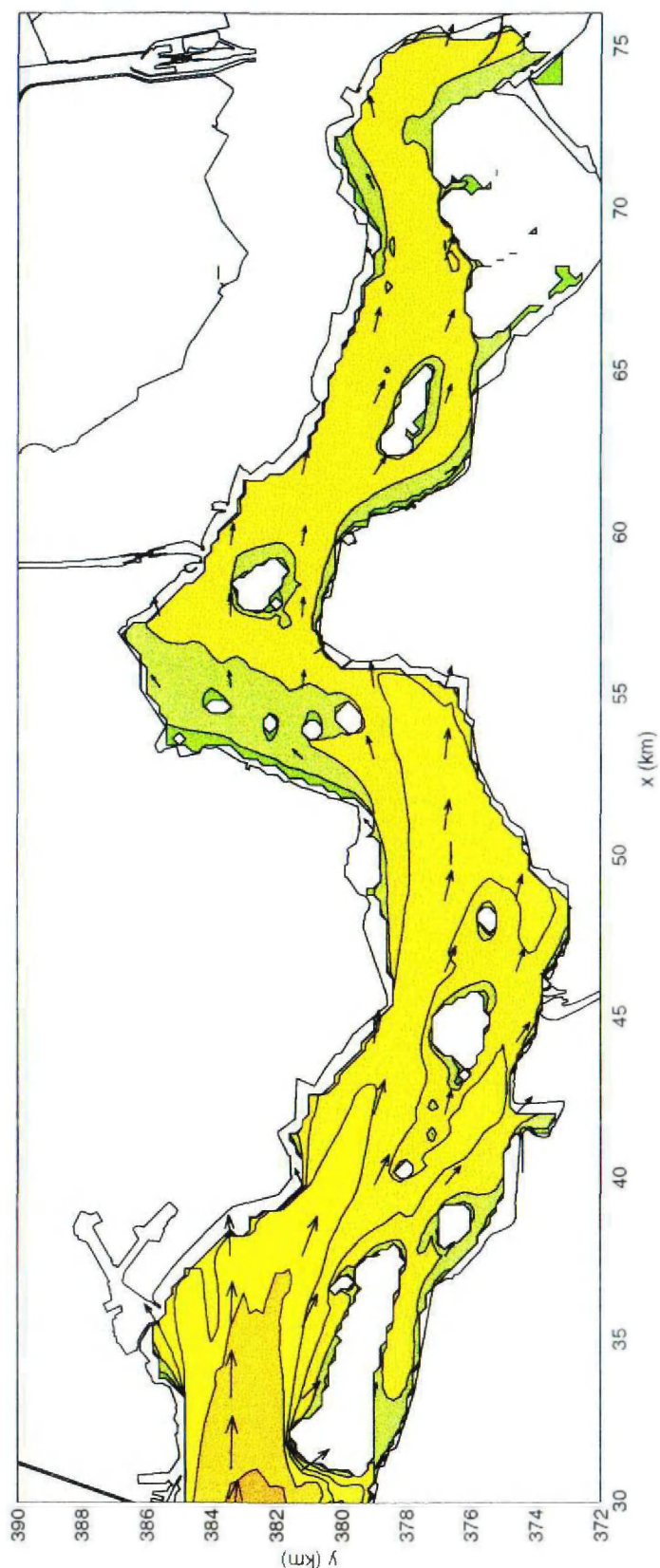
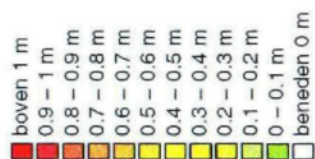
Voorbeeld van cubic spline interpolatietechniek
voor de bepaling van ruimtelijke verdeling waterstanden

Fig. 3.3



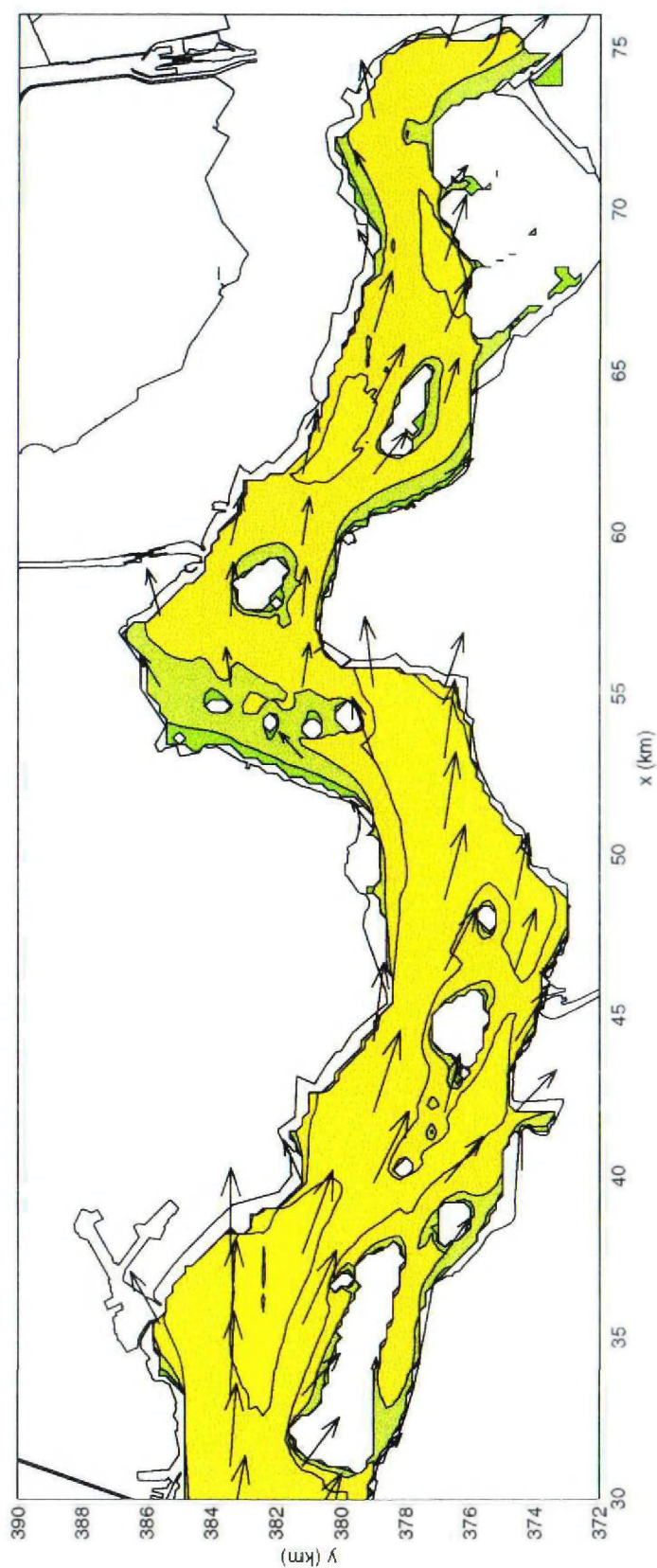
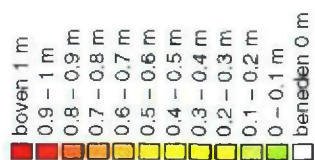
Uurlijkse variatie windsnelheid en
windrichting bij Vlissingen in 1996

Fig. 3.4

Significante
golfhoogte H_s (m)

Isolijnen van significante golfhoogte (m)
voor 30 oktober 1996, 10:00
met golfrandvoorwaarden

Fig. 3.5

Significante
golfhoogte H_s (m)

Isolijnen van significante golfhoogte (m)
voor 30 oktober 1996, 10:00
zonder golfrandvoorwaarden

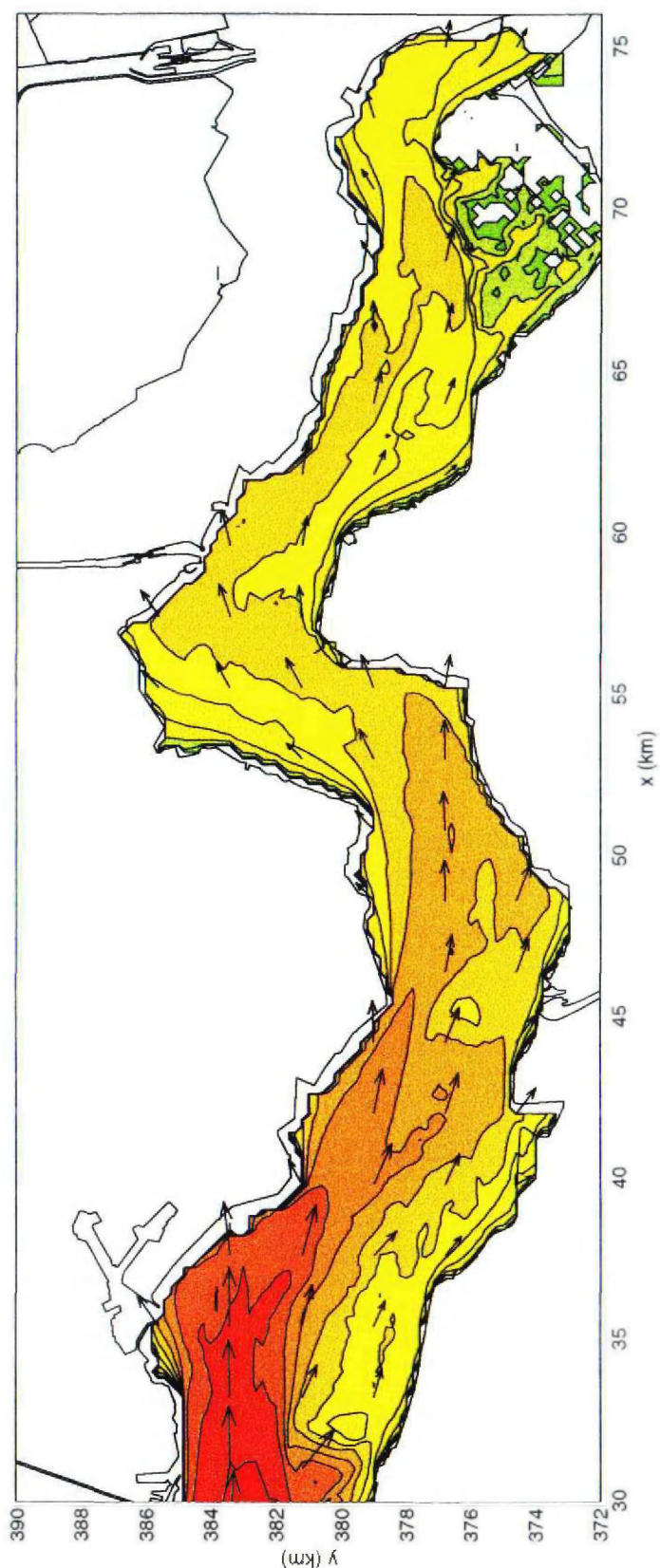
Fig. 3.6

ECOMORF

1165/A647

Significante
golfhoogte H_s (m)

- boven 2 m
- 1.8 – 2 m
- 1.6 – 1.8 m
- 1.4 – 1.6 m
- 1.2 – 1.4 m
- 1 – 1.2 m
- 0.8 – 1 m
- 0.6 – 0.8 m
- 0.4 – 0.6 m
- 0.2 – 0.4 m
- 0 – 0.2 m
- beneden 0 m

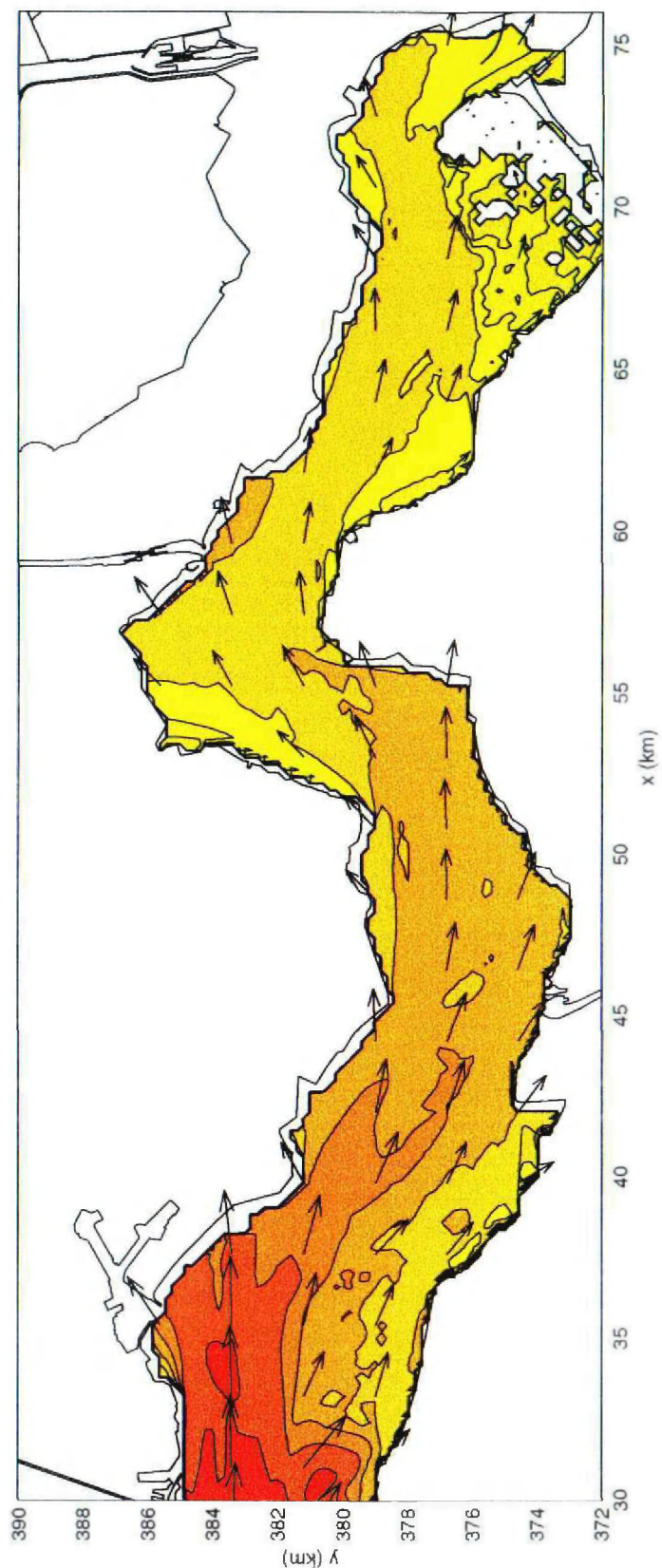
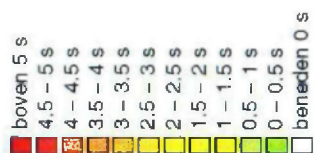


Isolijnen van significante golfhoogte (m)
voor 29 augustus 1996, 2:00 uur

Fig. 3.7

ECOMORF

1165/A647

Gemiddelde golfperiode T_{m01} (s)

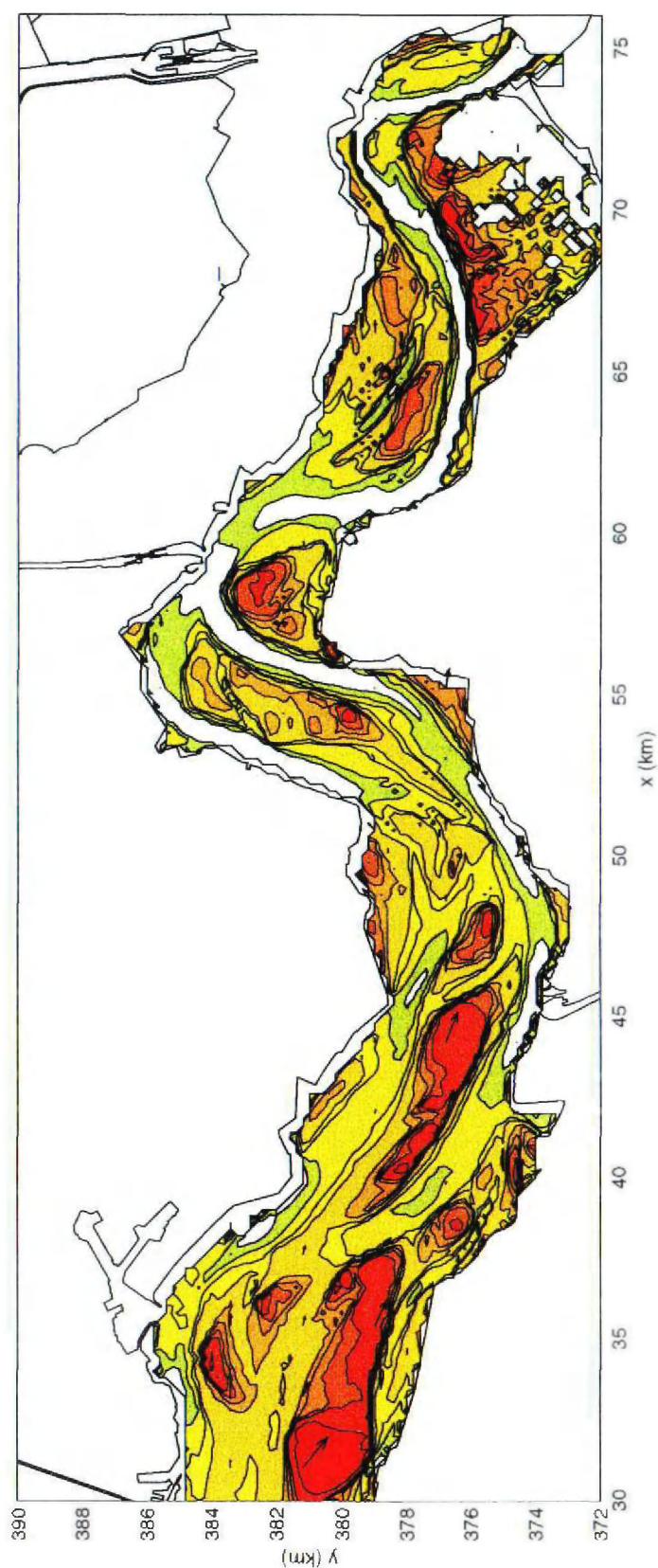
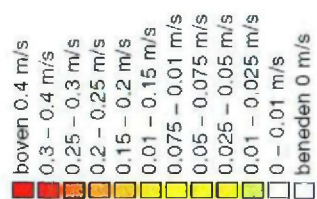
Isoliijnen van gemiddelde golfperiode T_{m01} (s)
 voor 29 augustus 1996, 2:00 uur

Fig. 3.8

ECOMORF

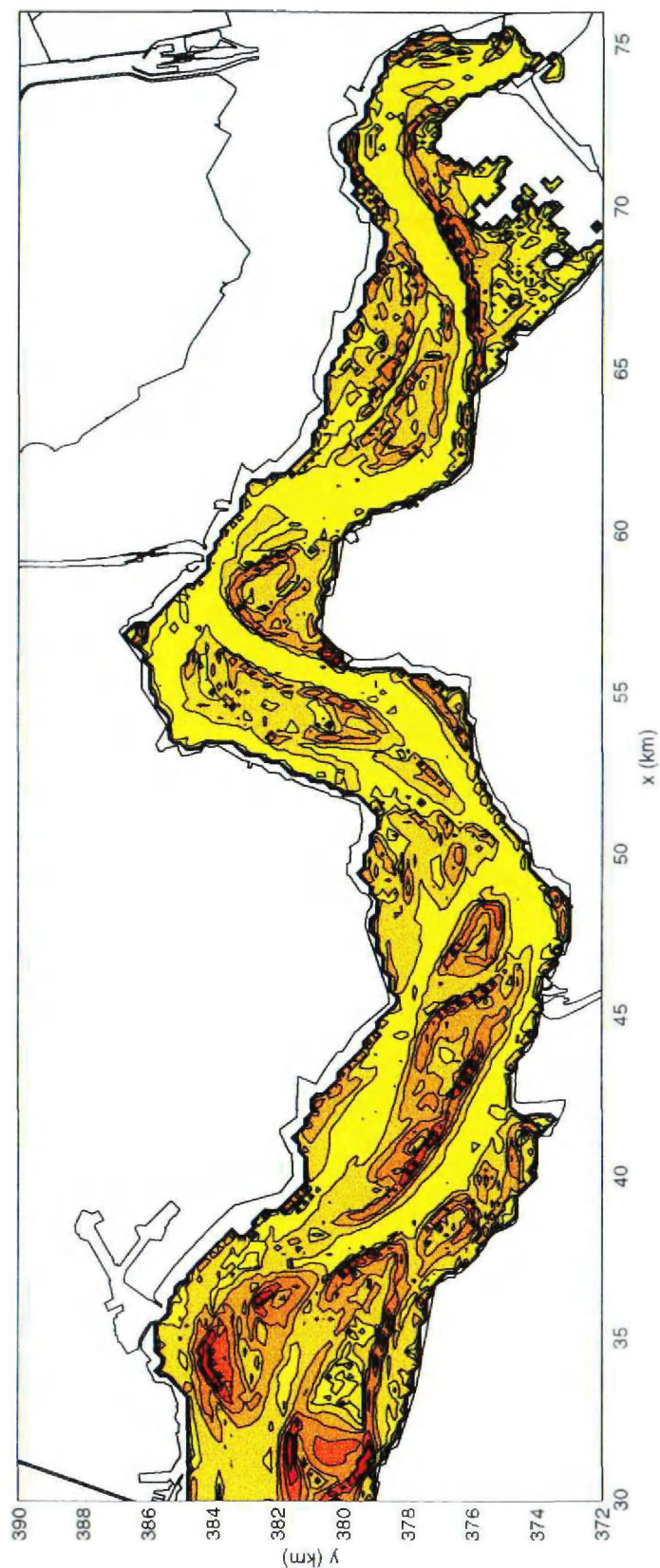
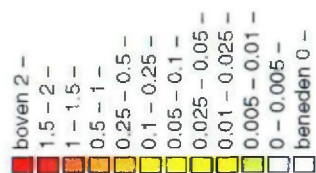
1165/A647

RMS bodemsnelheid U_{rms}
(m/s)



Isolijnen van RMS bodemsnelheid U_{rms}
voor 29 augustus 1996, 2:00 uur

Fig. 3.9

Golf gedreven kracht (N/m^2)

Isolijnen van golfgedreven krachten F
voor 29 augustus 1996, 2:00 uur

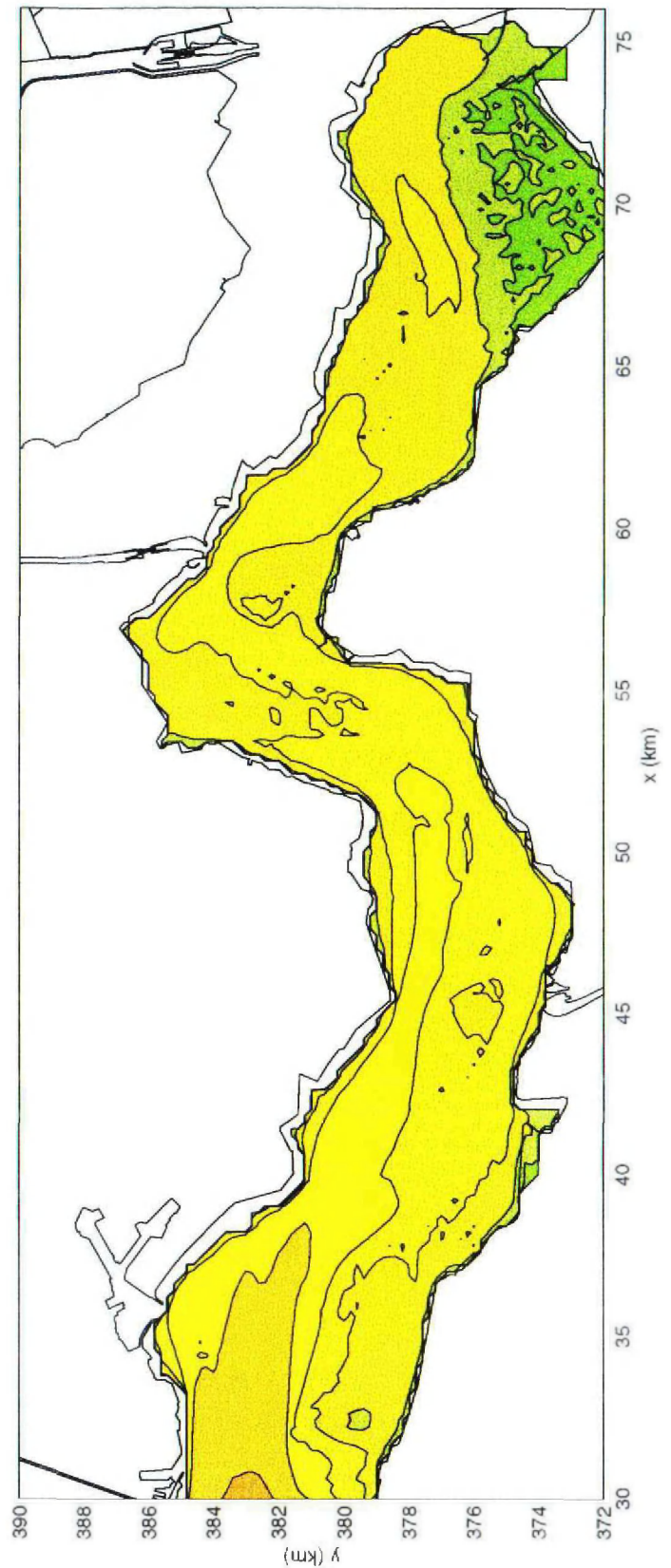
Fig. 3.10

ECOMORF

1165/A647

Significante
golfhoogte H_s (m)

- boven 0.5 m
- 0.45 – 0.5 m
- 0.4 – 0.45 m
- 0.35 – 0.4 m
- 0.3 – 0.35 m
- 0.25 – 0.3 m
- 0.2 – 0.25 m
- 0.15 – 0.2 m
- 0.1 – 0.15 m
- 0.05 – 0.1 m
- 0 – 0.05 m
- beneden 0 m

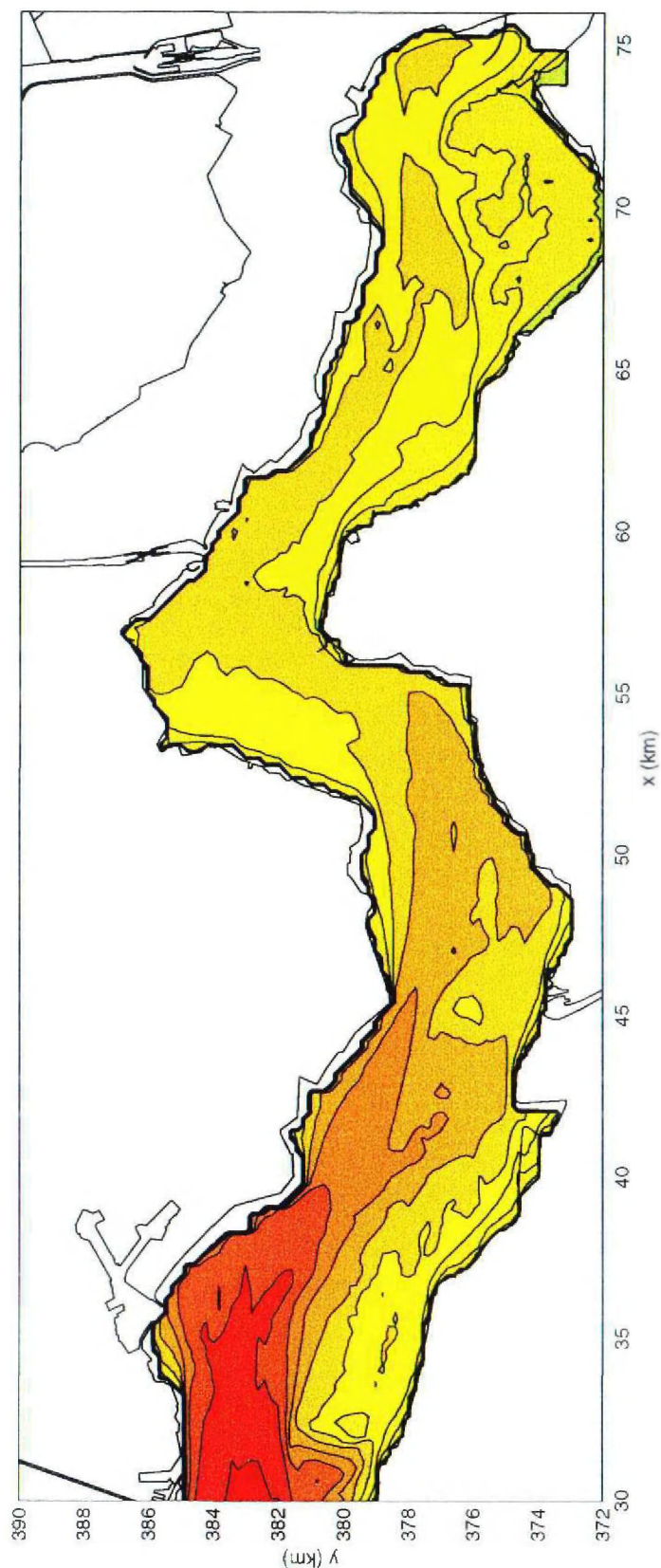
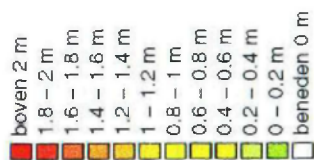


Isolijnen van significante golfhoogte (m)
gemiddelde waarde op basis van alle waarden in 1996

Fig. 3.11

ECOMORF

1165/A647

Significante
golfhoogte H_s (m)

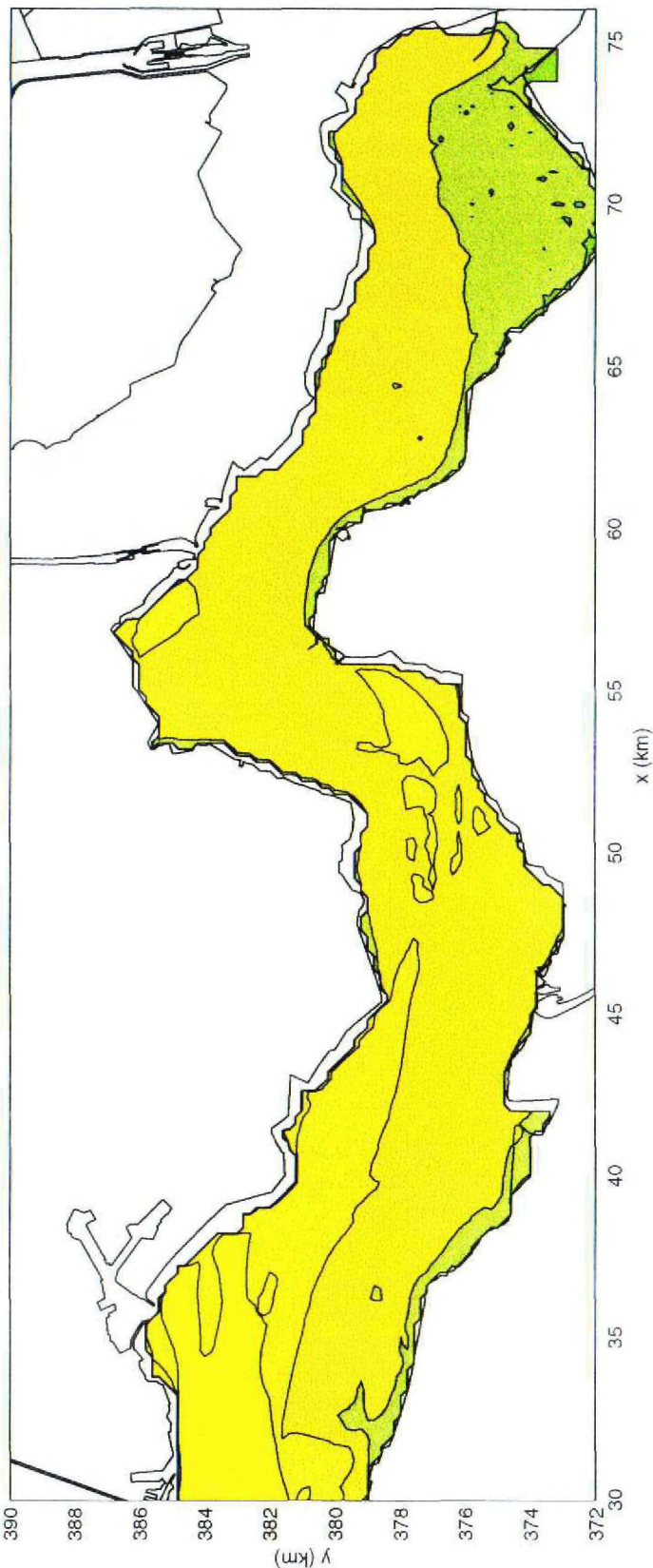
Isolijnen van significante golfhoogte (m)
maximale waarde op basis van alle waarden in 1996

Fig. 3.12

Significante
golfhoogte H_s (m)

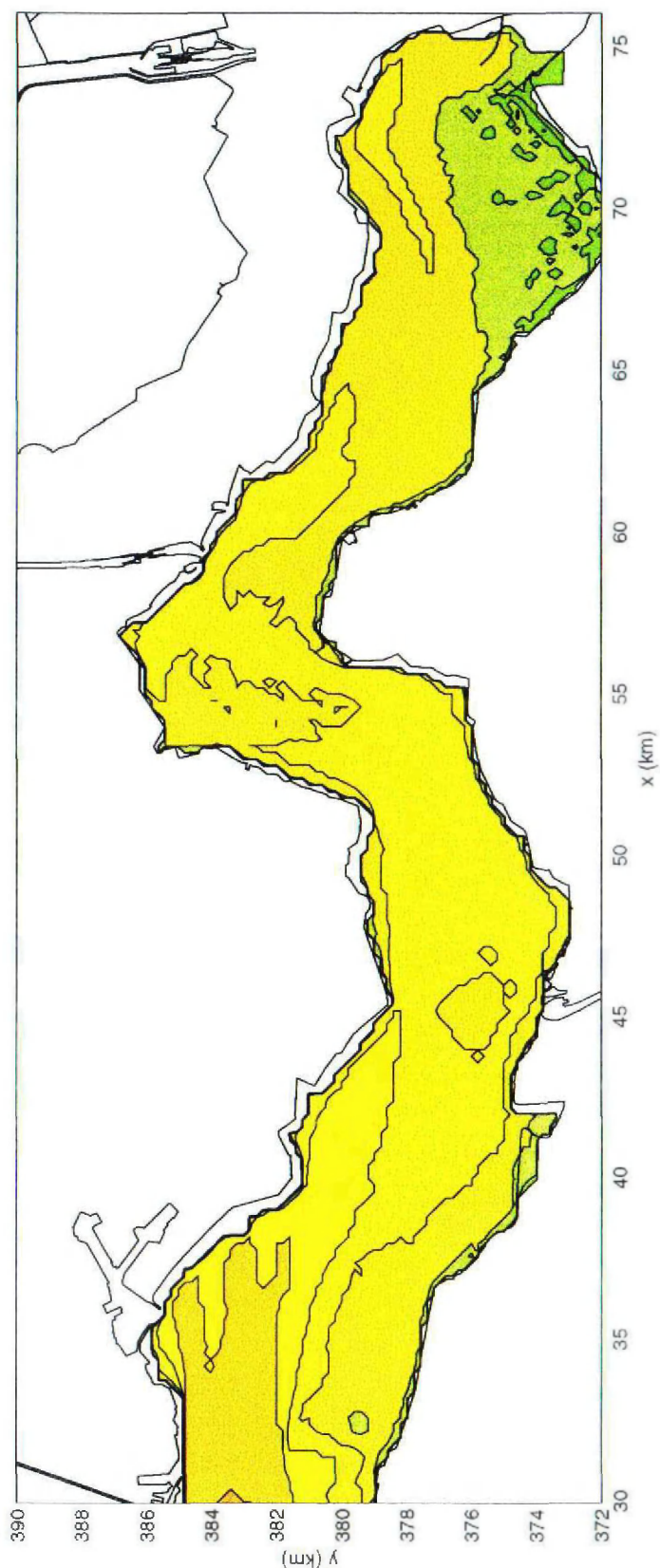
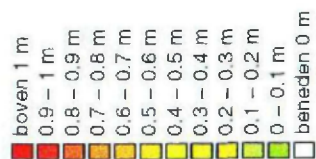


- boven 0.5 m
- 0.45 – 0.5 m
- 0.4 – 0.45 m
- 0.35 – 0.4 m
- 0.3 – 0.35 m
- 0.25 – 0.3 m
- 0.2 – 0.25 m
- 0.15 – 0.2 m
- 0.1 – 0.15 m
- 0.05 – 0.1 m
- 0 – 0.05 m
- beneden 0 m



Isoliijnen van significante golfhoogte (m)
standaardafwijking op basis van alle waarden in 1996
situatie met stroom en setup

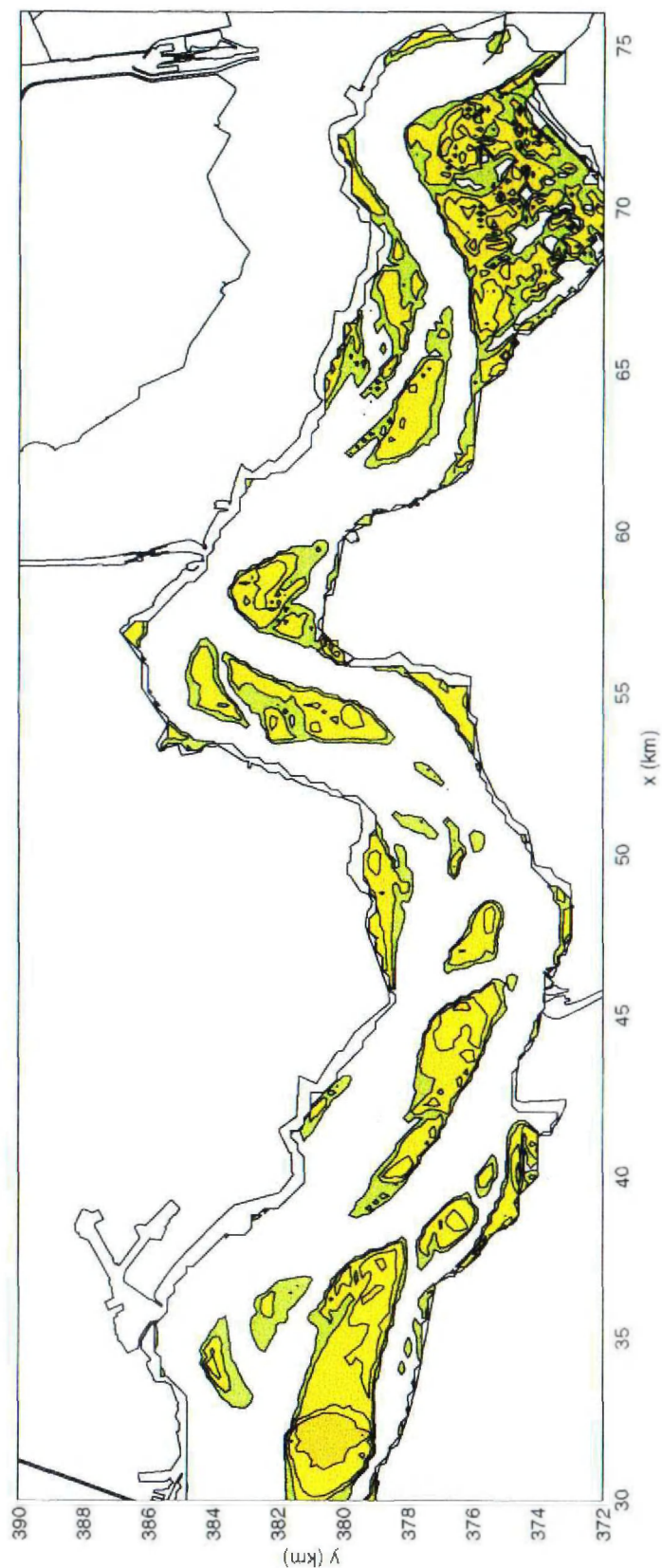
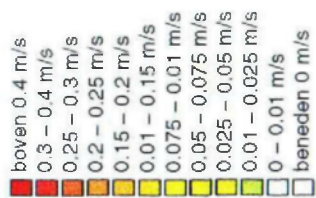
Fig. 3.13

Significante
golfhoogte H_s (m)

Isolijnen van significante golfhoogte (m)
90% percentiel op basis van alle waarden in 1996

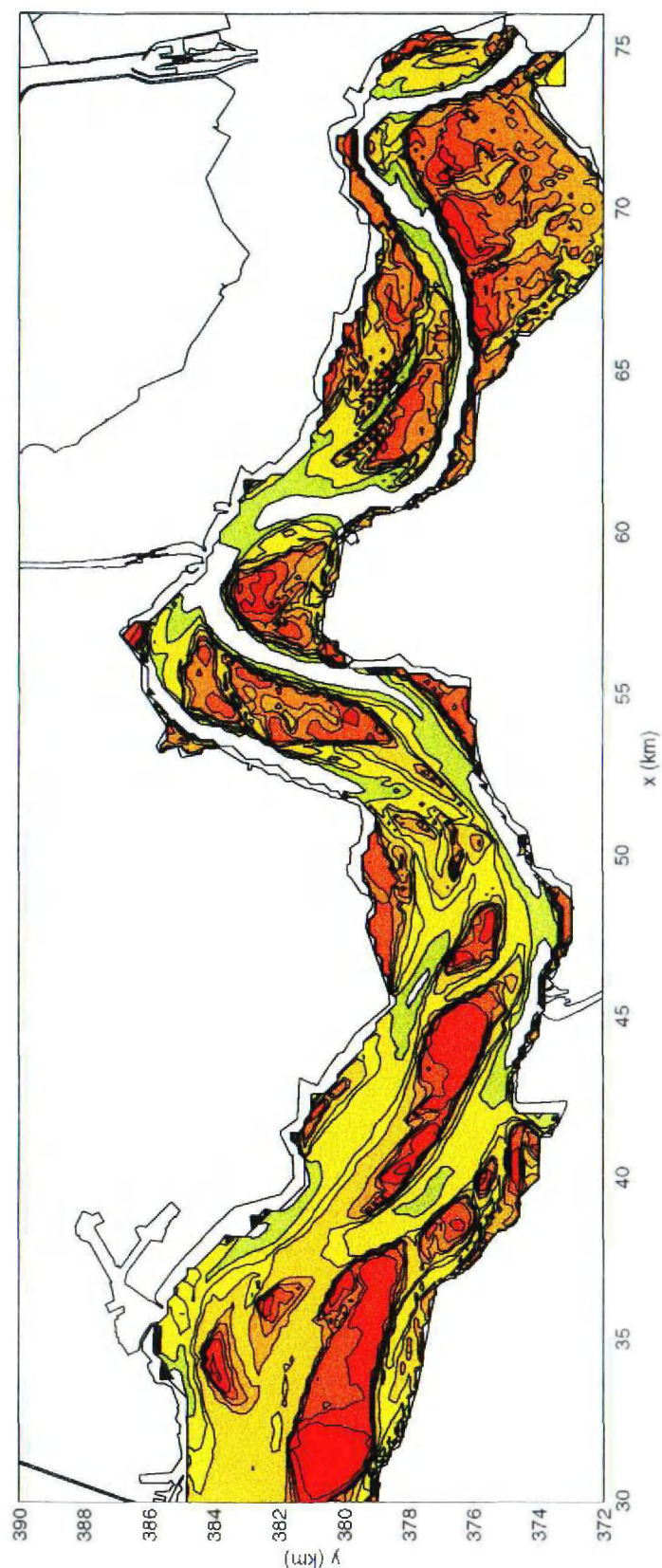
Fig. 3.14

RMS bodemsnelheid
(m/s)



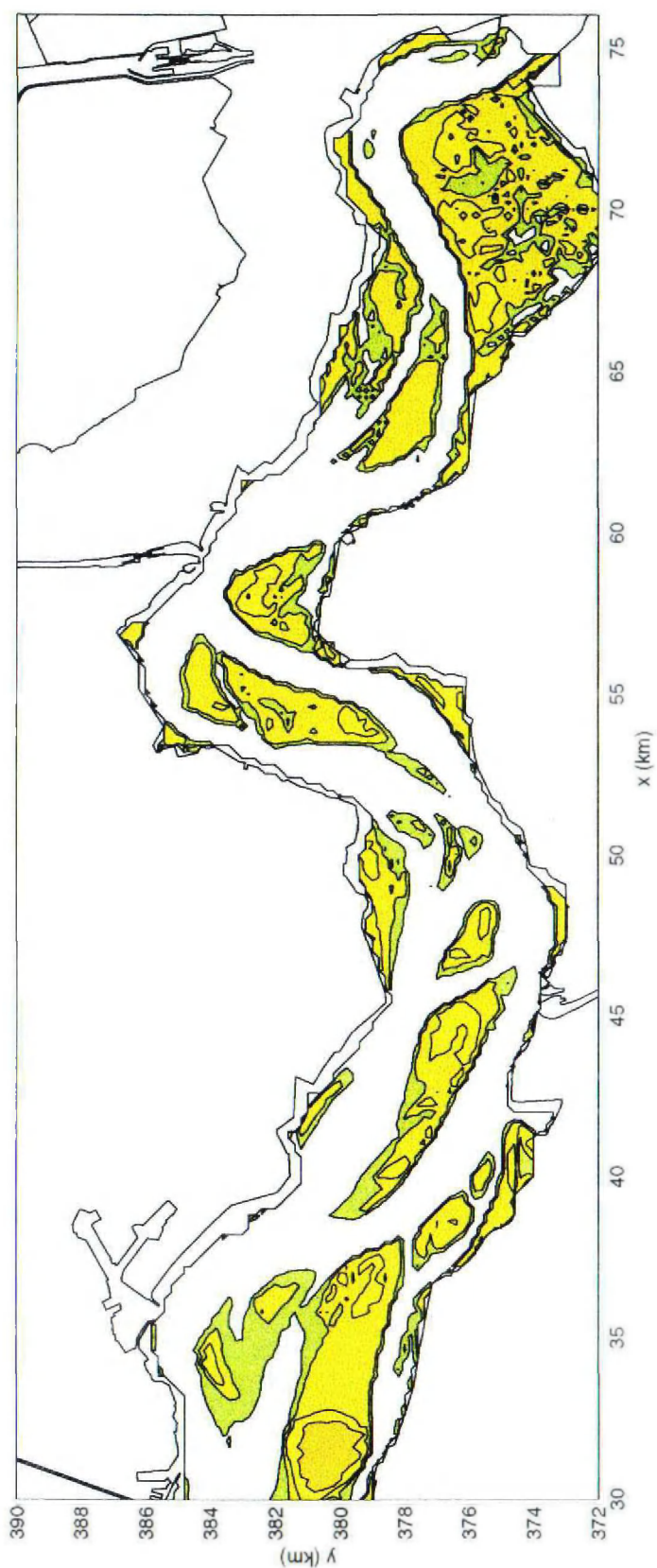
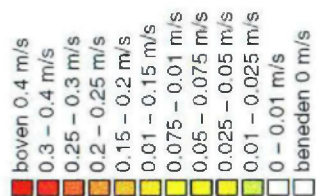
Isolijnen van RMS bodemsnelheid U_{rms}
gemiddelde waarde op basis van alle waarden in 1996

Fig. 3.15

RMS bodemsnelheid
 U_{rms} (m/s)

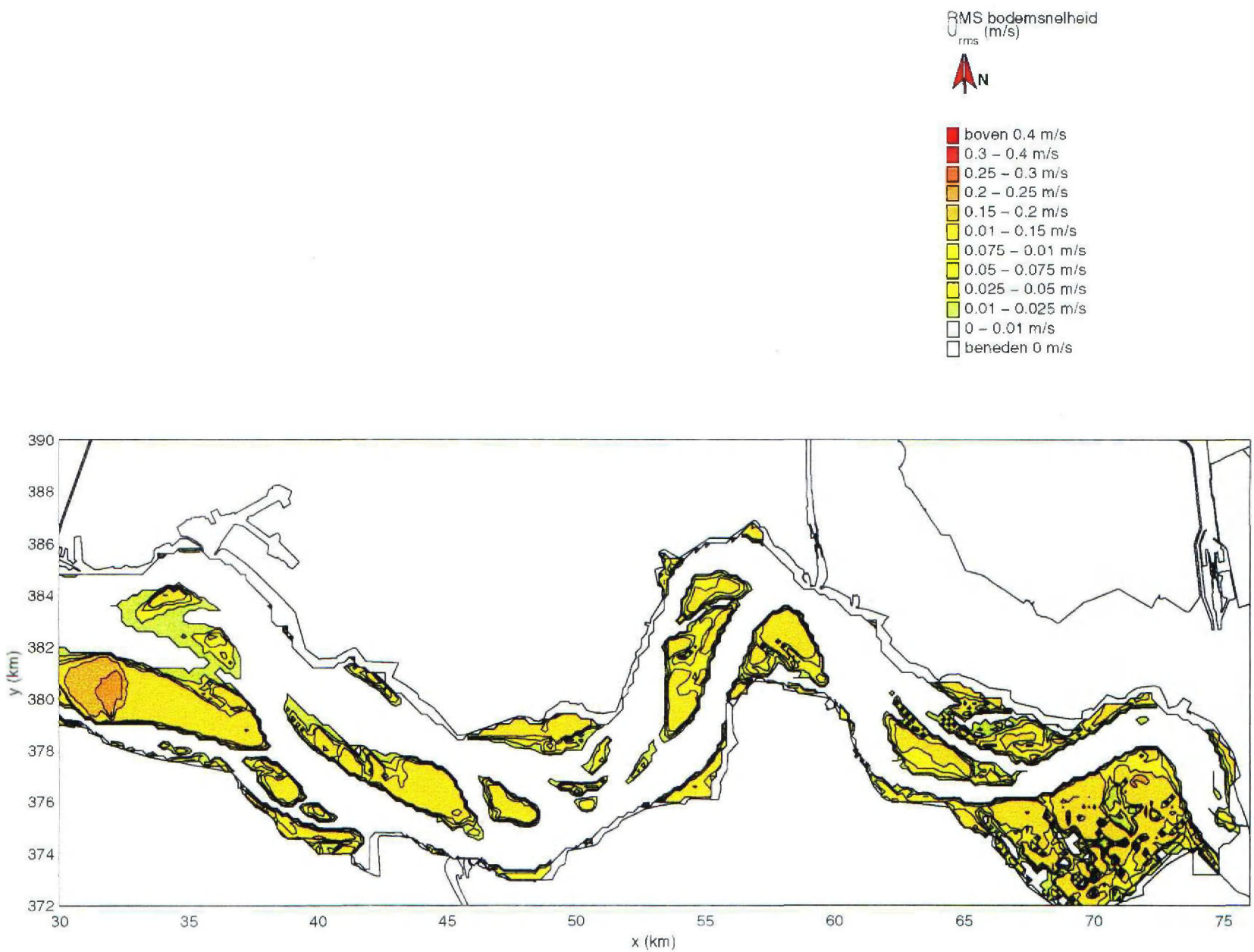
Isolijnen van RMS bodemsnelheid U_{rms}
maximale waarde op basis van alle waarden in 1996

Fig. 3.16

RMS bodemsnelheid
 U_{rms} (m/s)

Isolijnen van RMS bodemsnelheid U_{rms}
standaardafwijking op basis van alle waarden in 1996
situatie met stroom en setup

Fig. 3.17



Isoliijnen van RMS bodemsnelheid U_{rms}
90% percentiel op basis van alle waarden in 1996

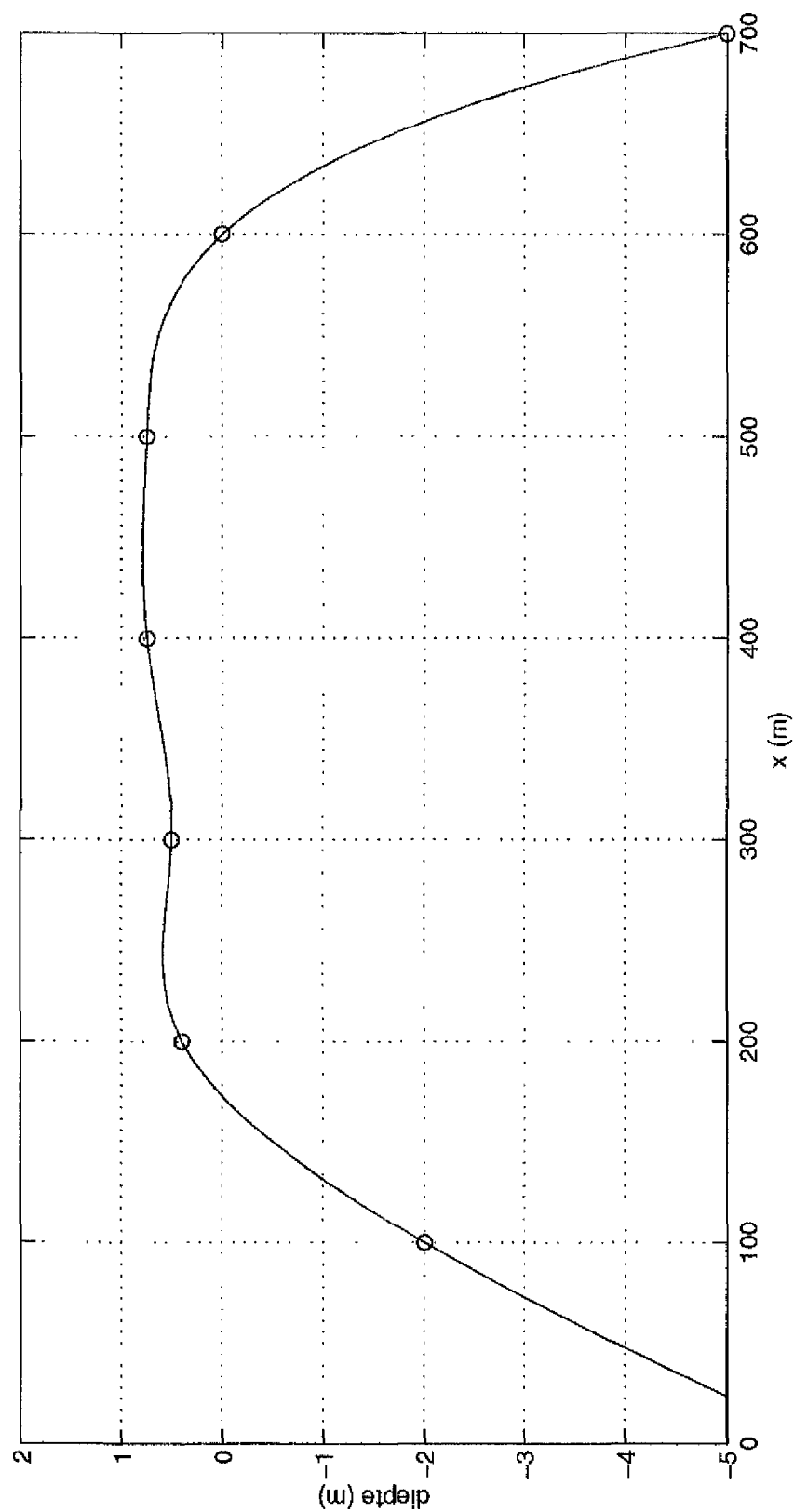
ECOMORF

1165/A647

AIKyon

Fig. 3.18

SVASEK



Geschematiseerd bodemprofiel voor SWAN 1D berekeningen
Steunpunten zijn aangegeven met circels

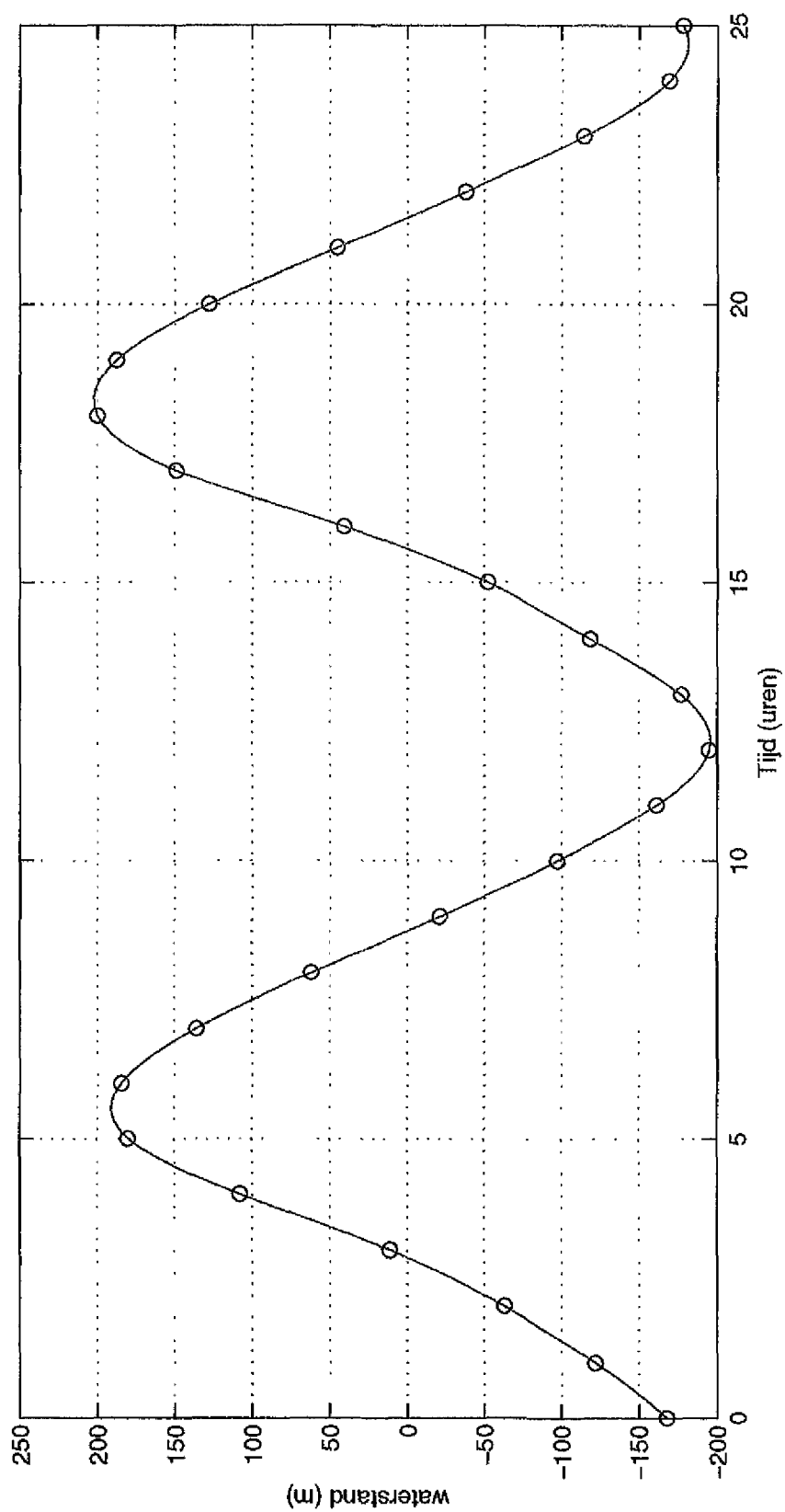
Fig. 3.19

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Waterstandsverloop gedurende 1 getijcyclus
 Uurlijkse meetpunten zijn aangegeven met circels

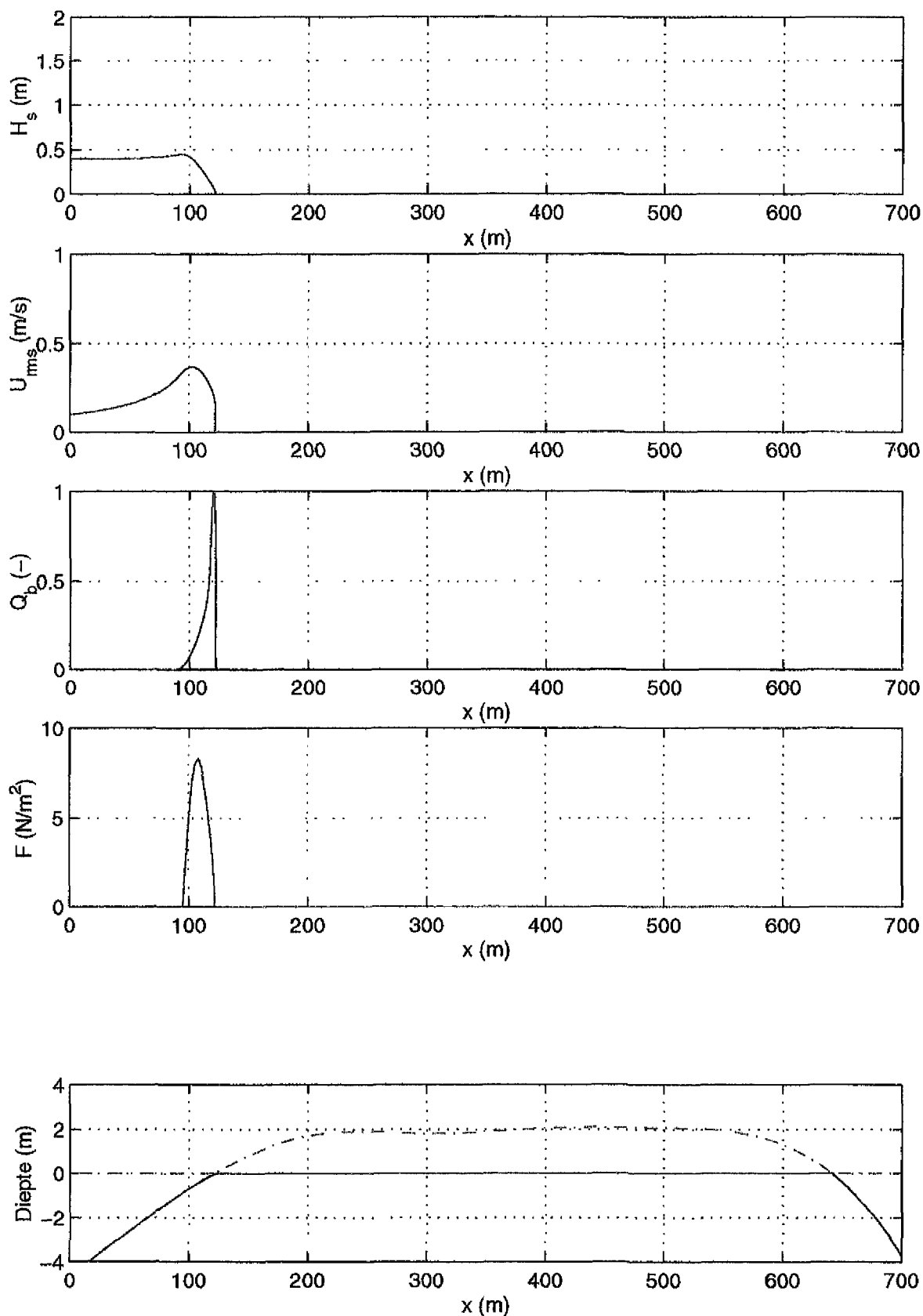
Fig. 3.20

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters
voor uur 1

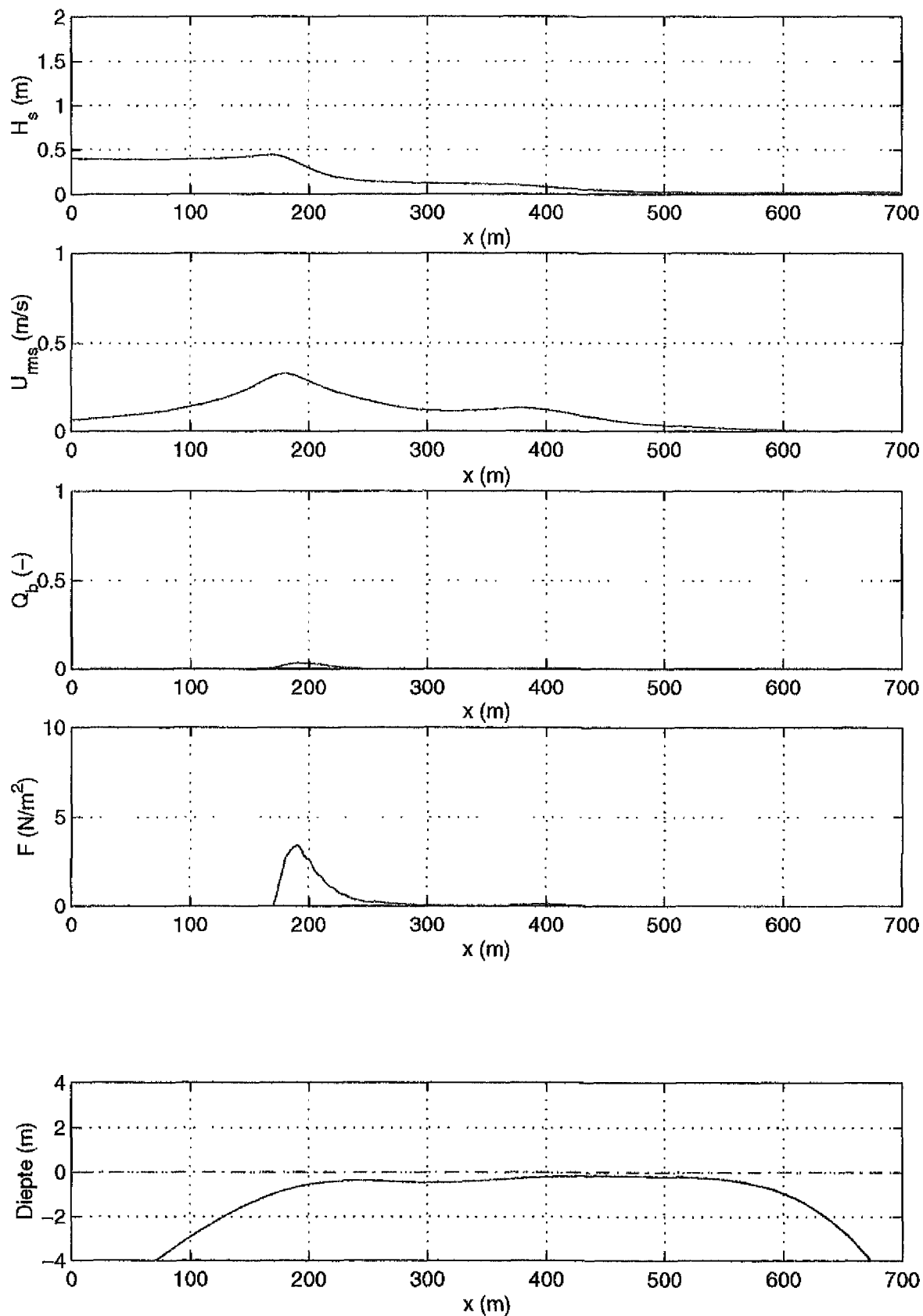
Fig. 3.21

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters
voor uur 4

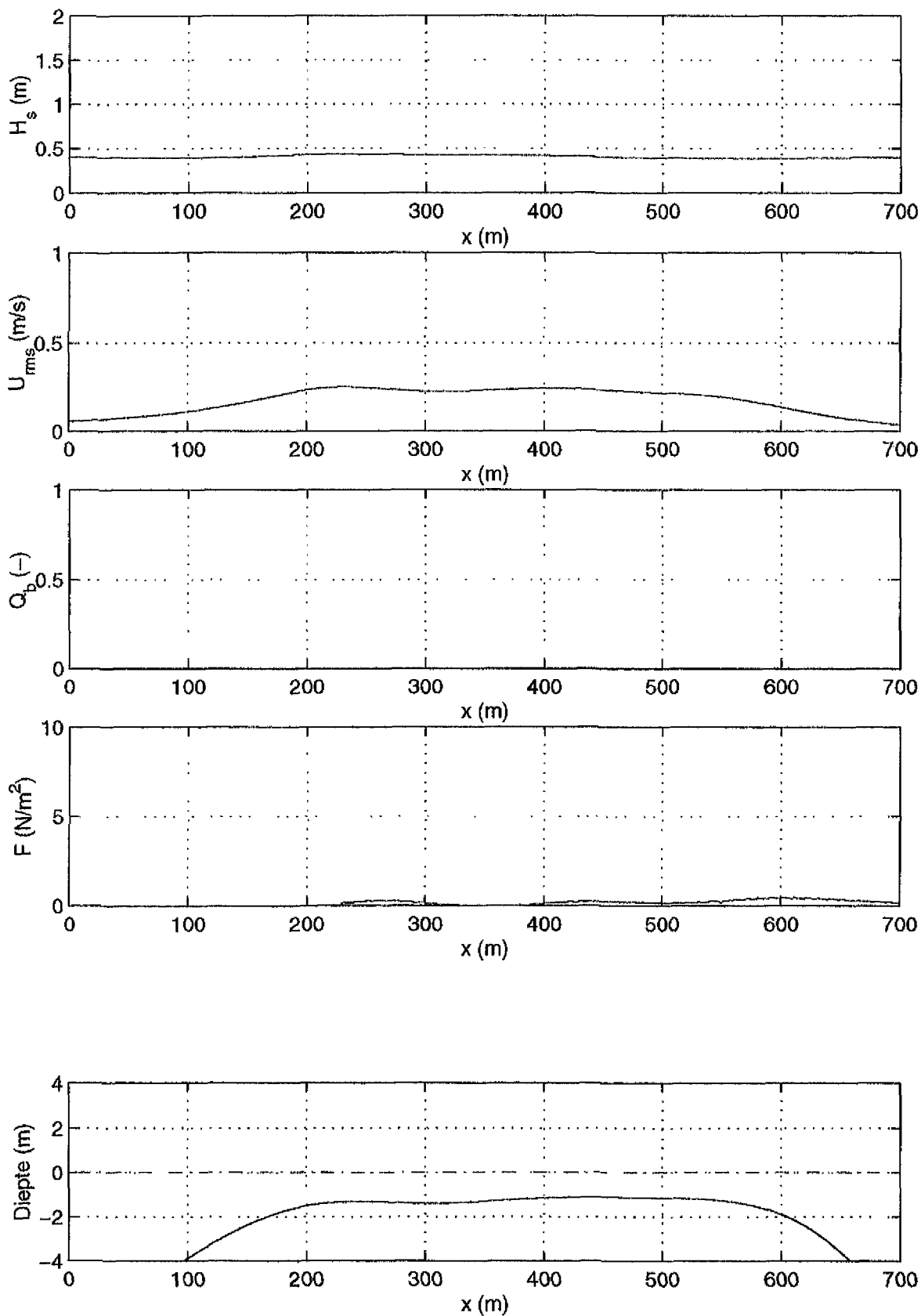
Fig. 3.22

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters
voor uur 6

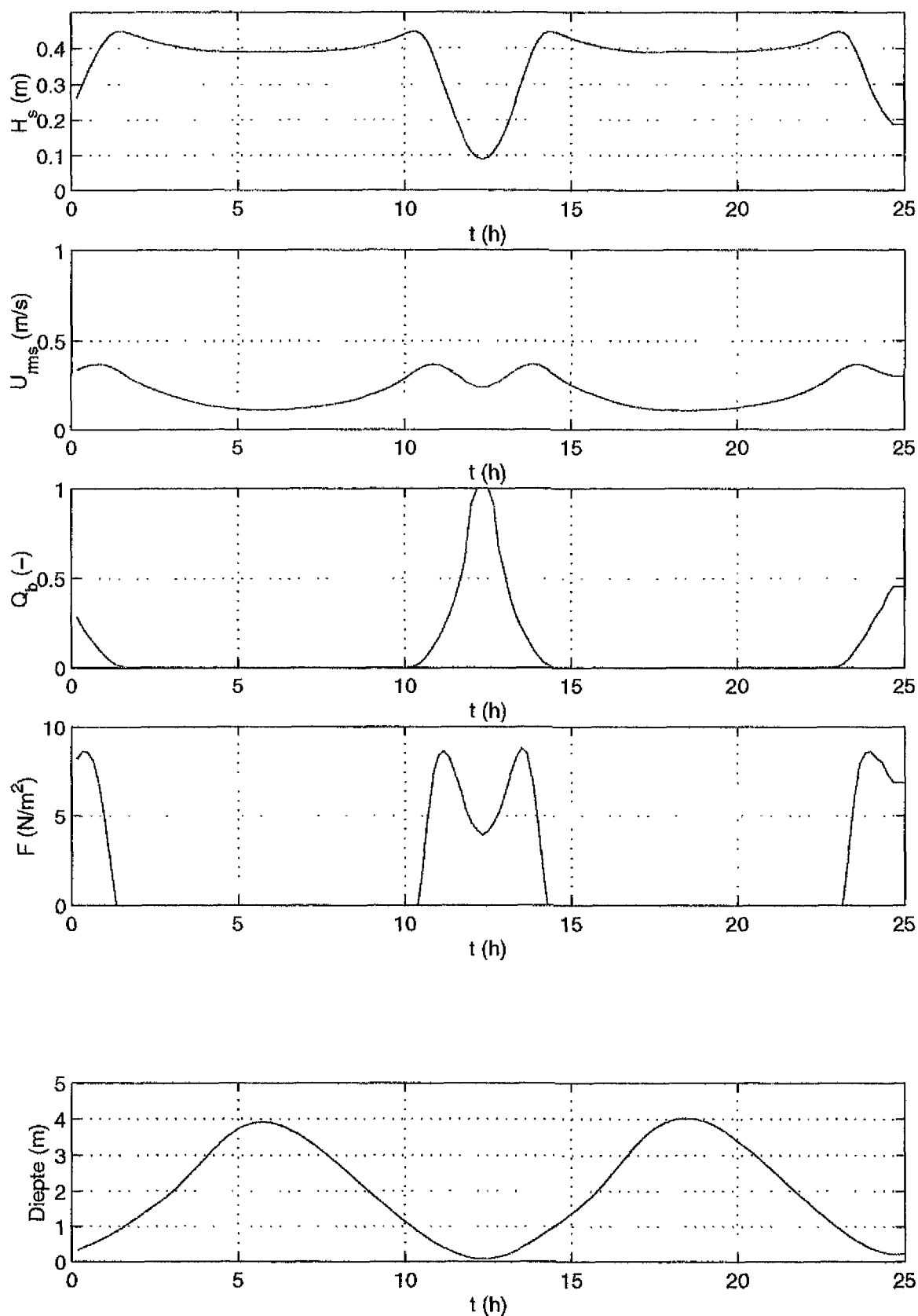
Fig. 3.23

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Tijdvariatie hydro-dynamische parameters
voor locatie $x=100$ (m)

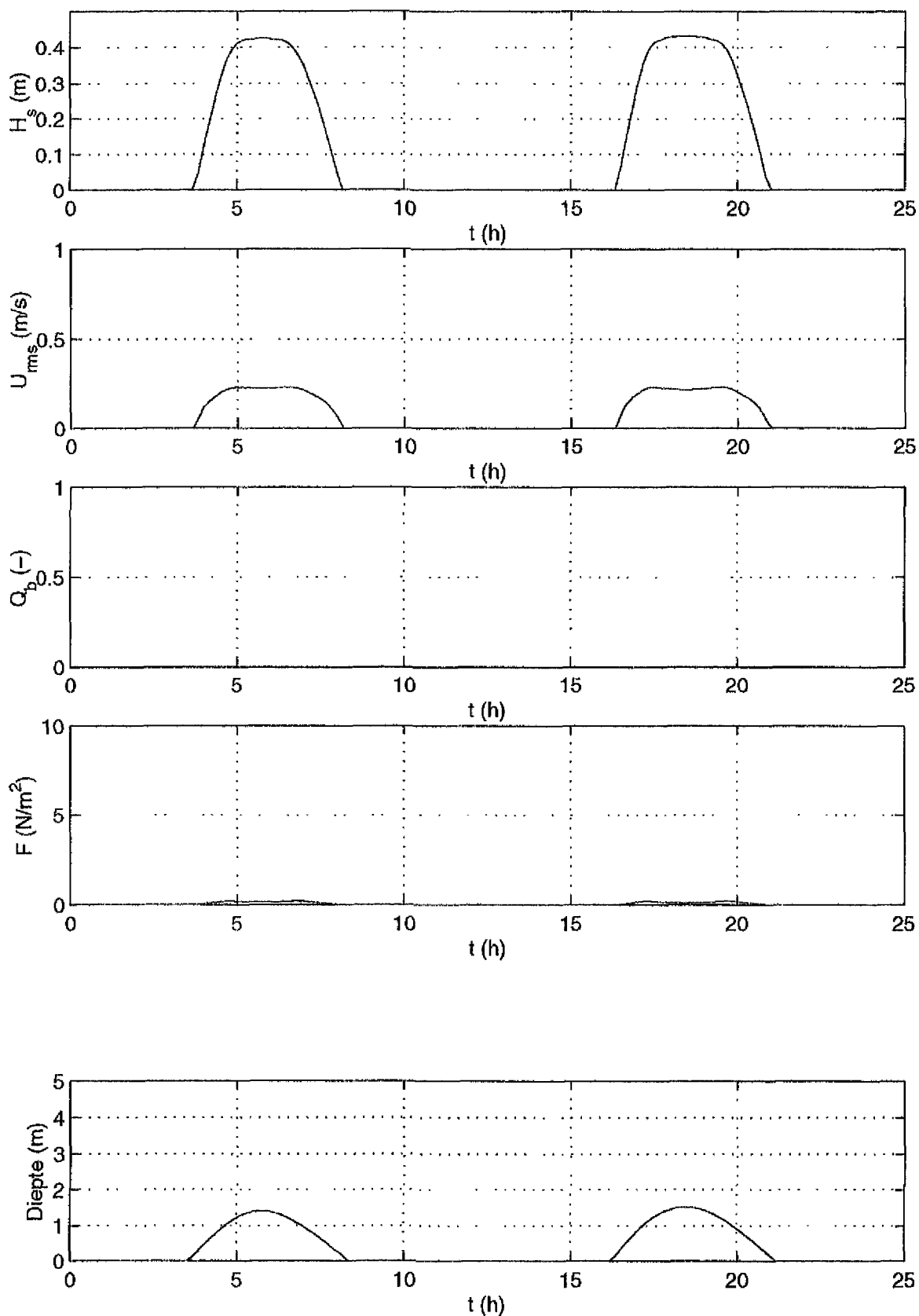
Fig. 3.24

ECOMORF

1165/A647

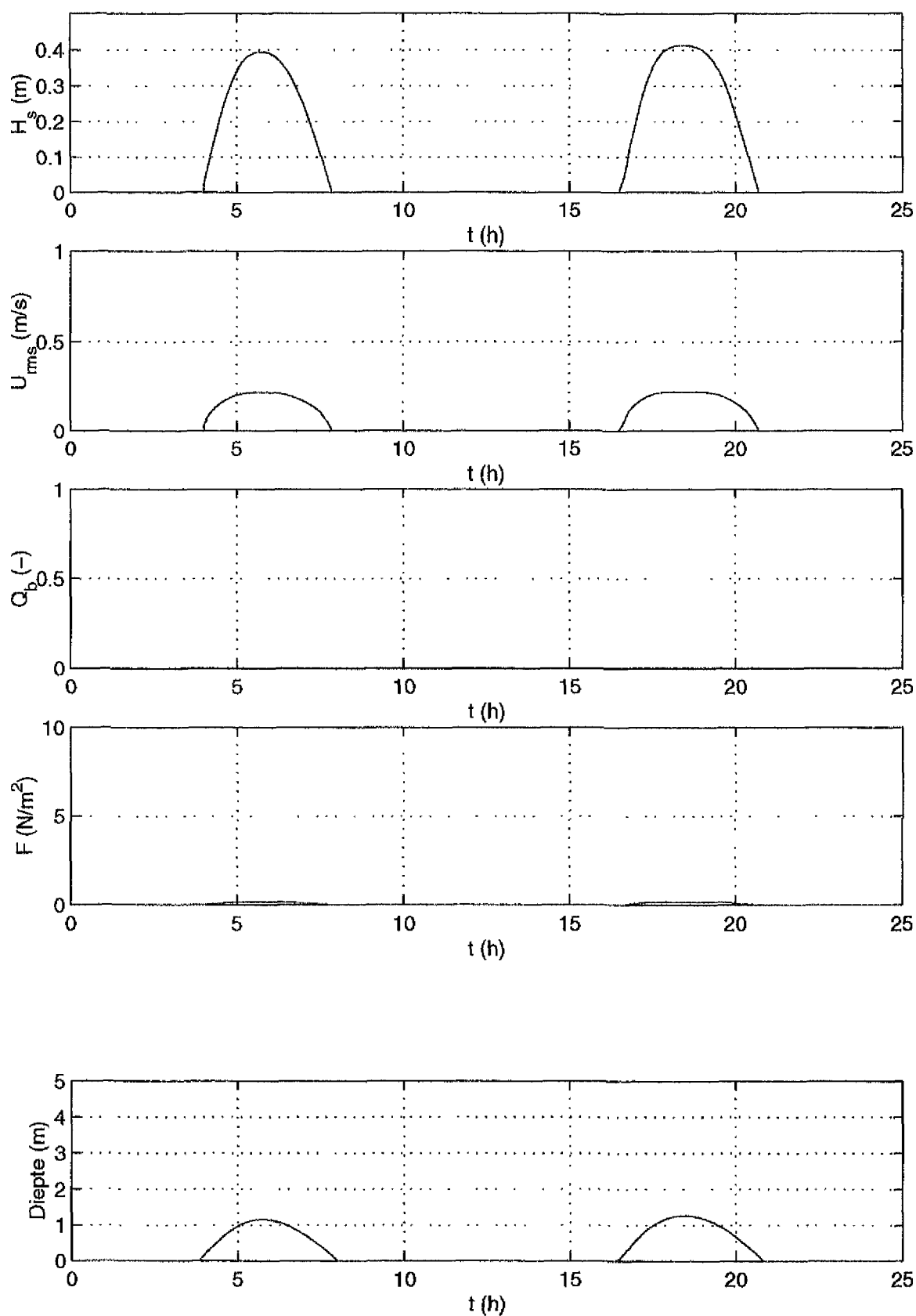
Alkyon

SVASEK



Tijdvariatie hydro-dynamische parameters
voor locatie $x=300$ (m)

Fig. 3.25



Tijdvariatie hydro-dynamische parameters
voor locatie $x=500$ (m)

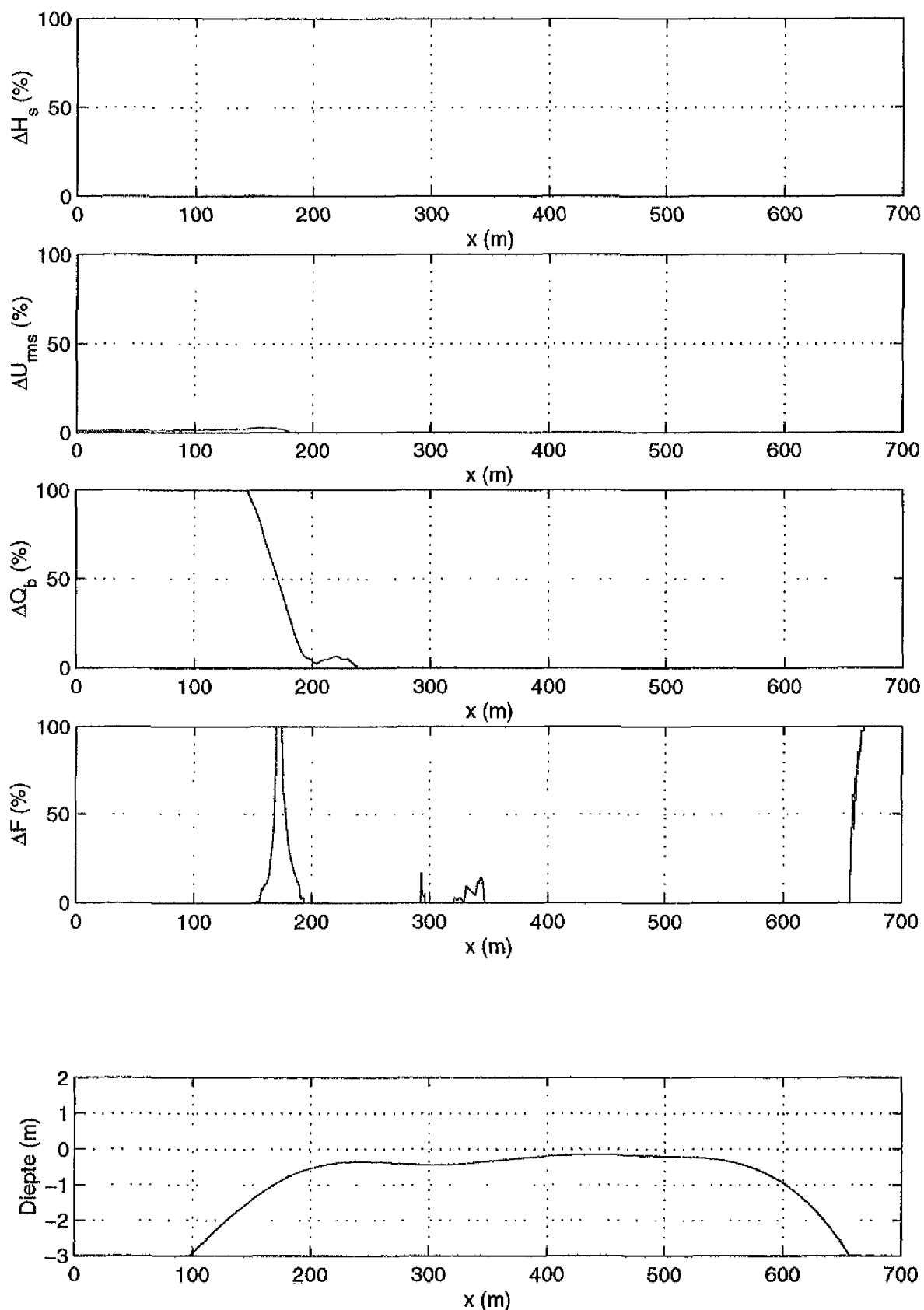
Fig. 3.26

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK



Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters

voor uur 4

Gevoeligheid voor onzekerheden in bodem $\Delta d = 0.05$ m

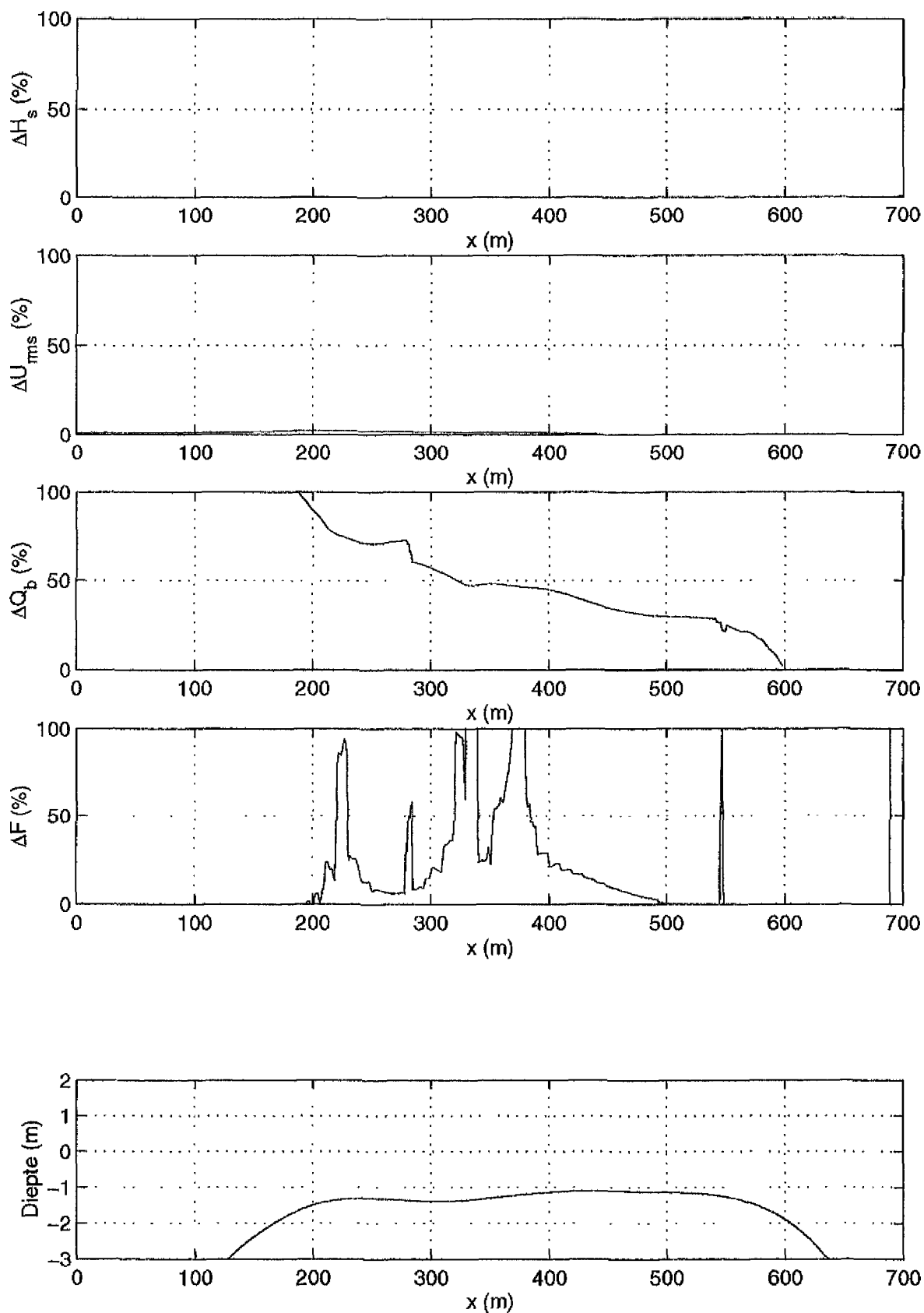
ECOMORF

1165/A647

Fig. 3.27

Alkyon

SVASEK



Ruimtelijke variatie hydro-dynamische parameters

voor uur 6

Gevoeligheid voor onzekerheden in bodem $\Delta d = 0.05$ m

Fig. 3.28

ECOMORF

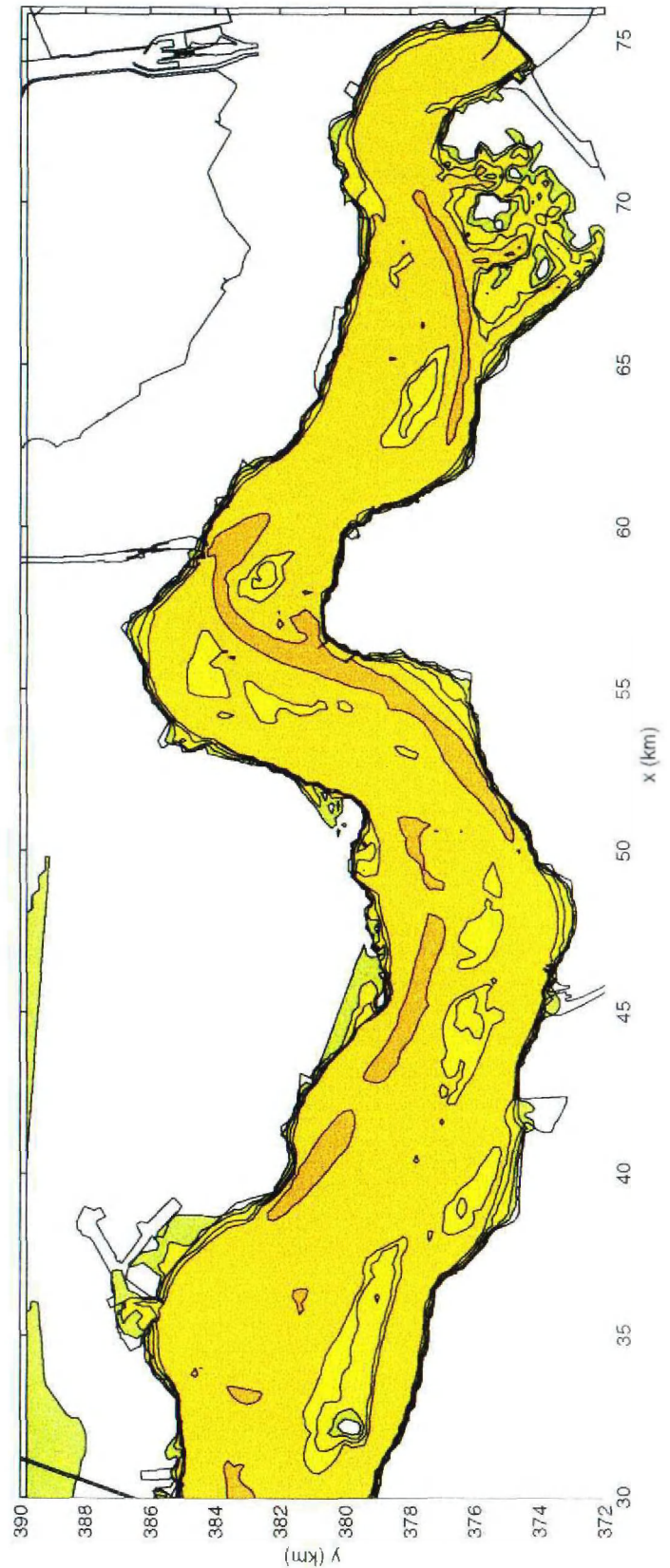
1165/A647

Alkyon

SVASEK

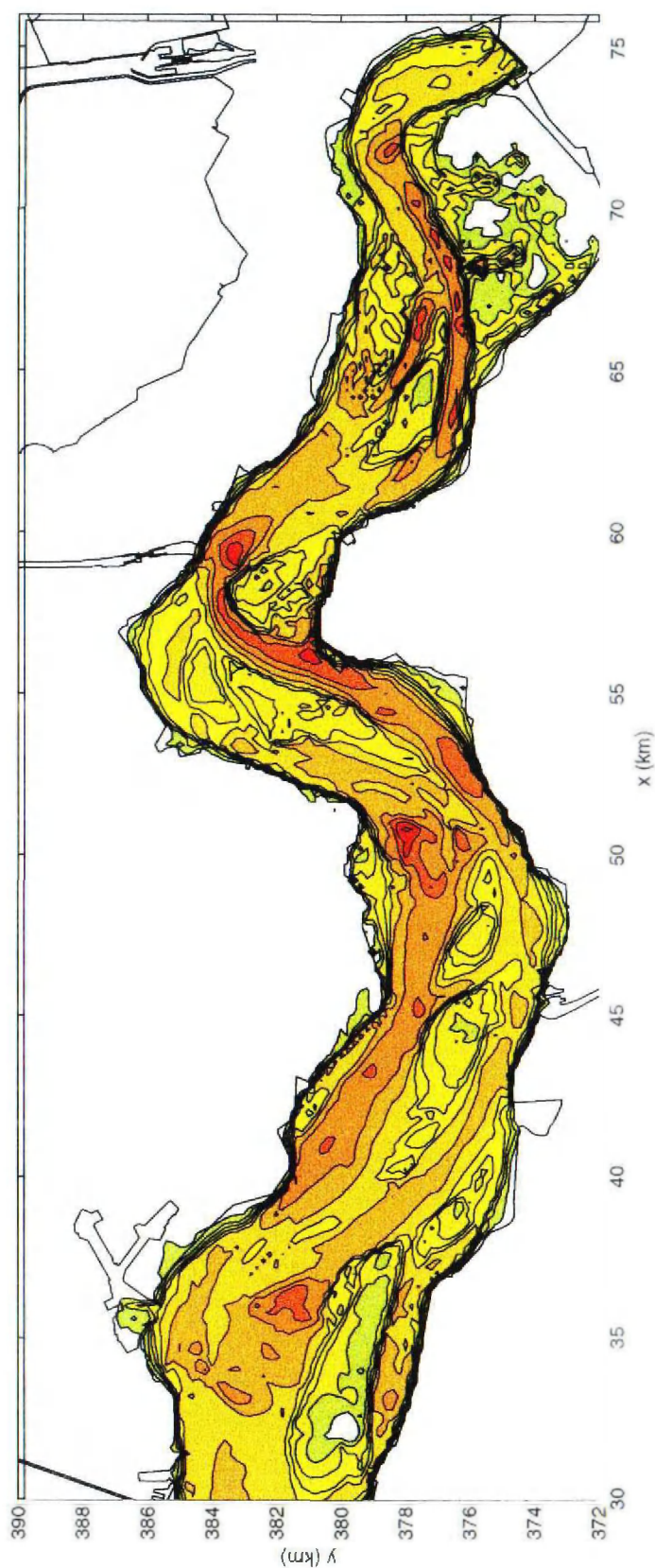
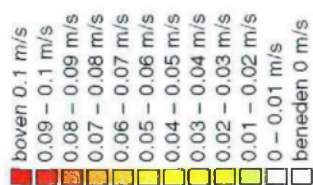
Maximale snelheid $U_{\max}$ (m/s)

- boven 4 m/s
- 3 – 4 m/s
- 2.5 – 3 m/s
- 2 – 2.5 m/s
- 1.5 – 2 m/s
- 0.1 – 1.5 m/s
- 0.75 – 0.1 m/s
- 0.5 – 0.75 m/s
- 0.25 – 0.5 m/s
- 0.1 – 0.25 m/s
- 0 – 0.1 m/s
- beneden 0 m/s



Isoliijnen van maximale snelheid $U_{\max}$
gedurende een karakteristiek morfologisch getij

Fig. 4.1

Bodem schuifspanningssnelheid U_s (m/s)

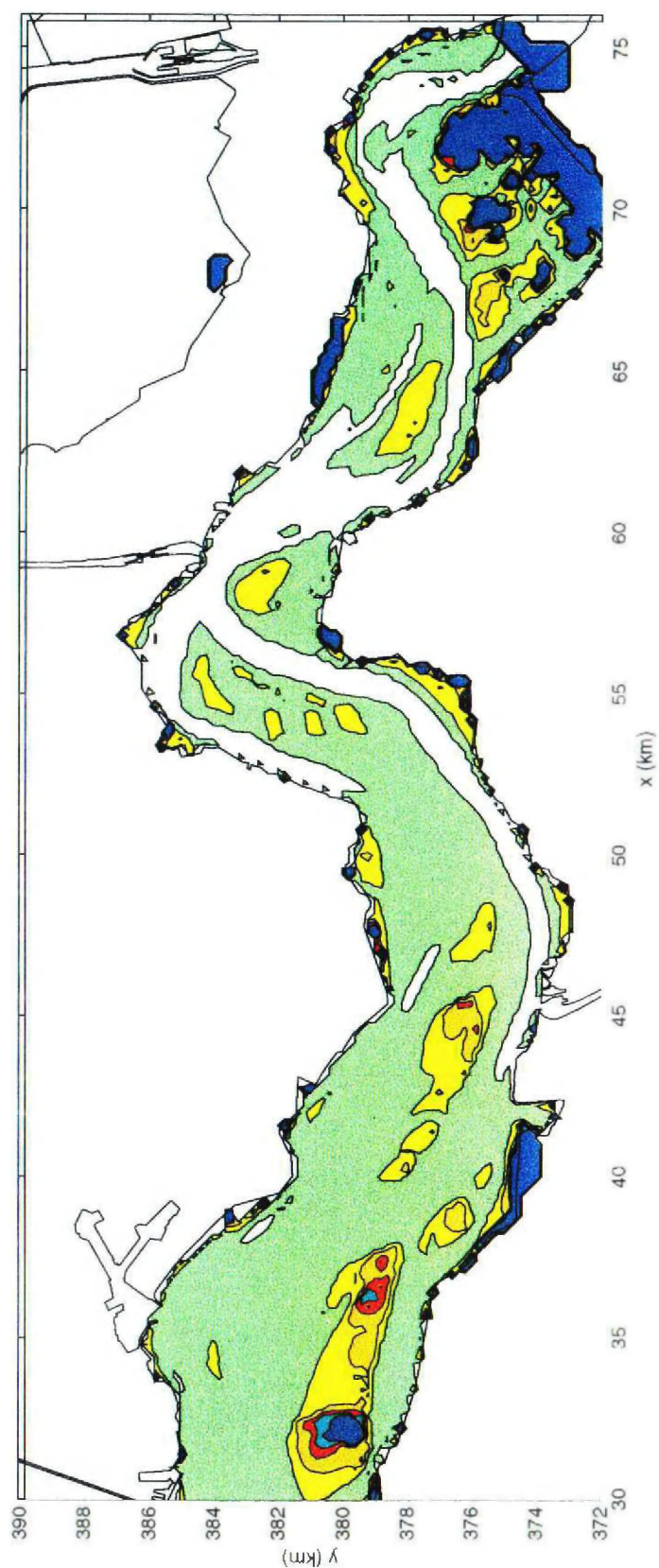
Isolijnen van maximale bodemschuifspanningssnelheid U_s ,
gedurende een karakteristiek morfologisch getij

Fig. 4.2

gemiddelde U_{rms} / maximale U_{*} (-)



- boven 9 -
 7 - 9 -
 5 - 7 -
 3 - 5 -
 1 - 3 -
 0.01 - 1 -
 beneden 0.01 -



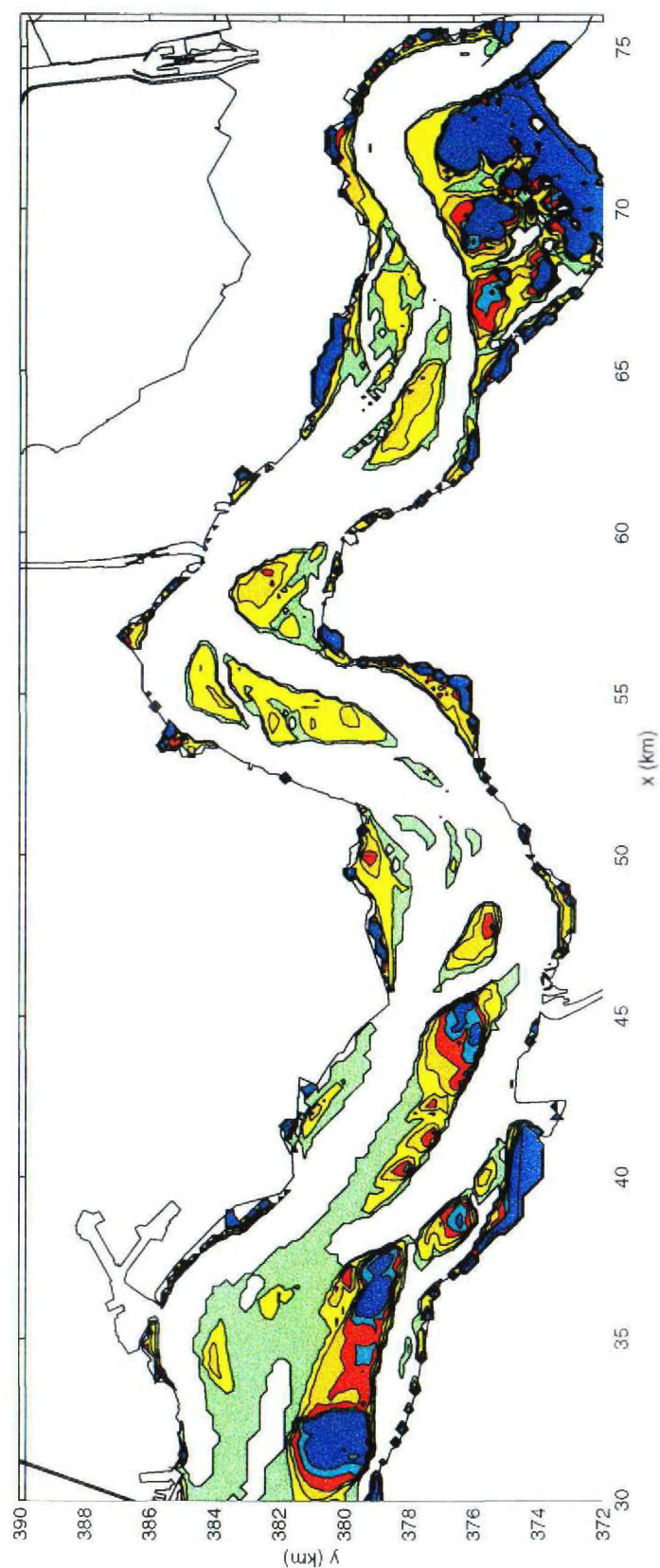
Isolijnen van verhouding tussen gemiddelde U_{rms}
en maximale U_{*}

Fig. 4.3

90% percentiel U_{rms} / maximale U_s (-)

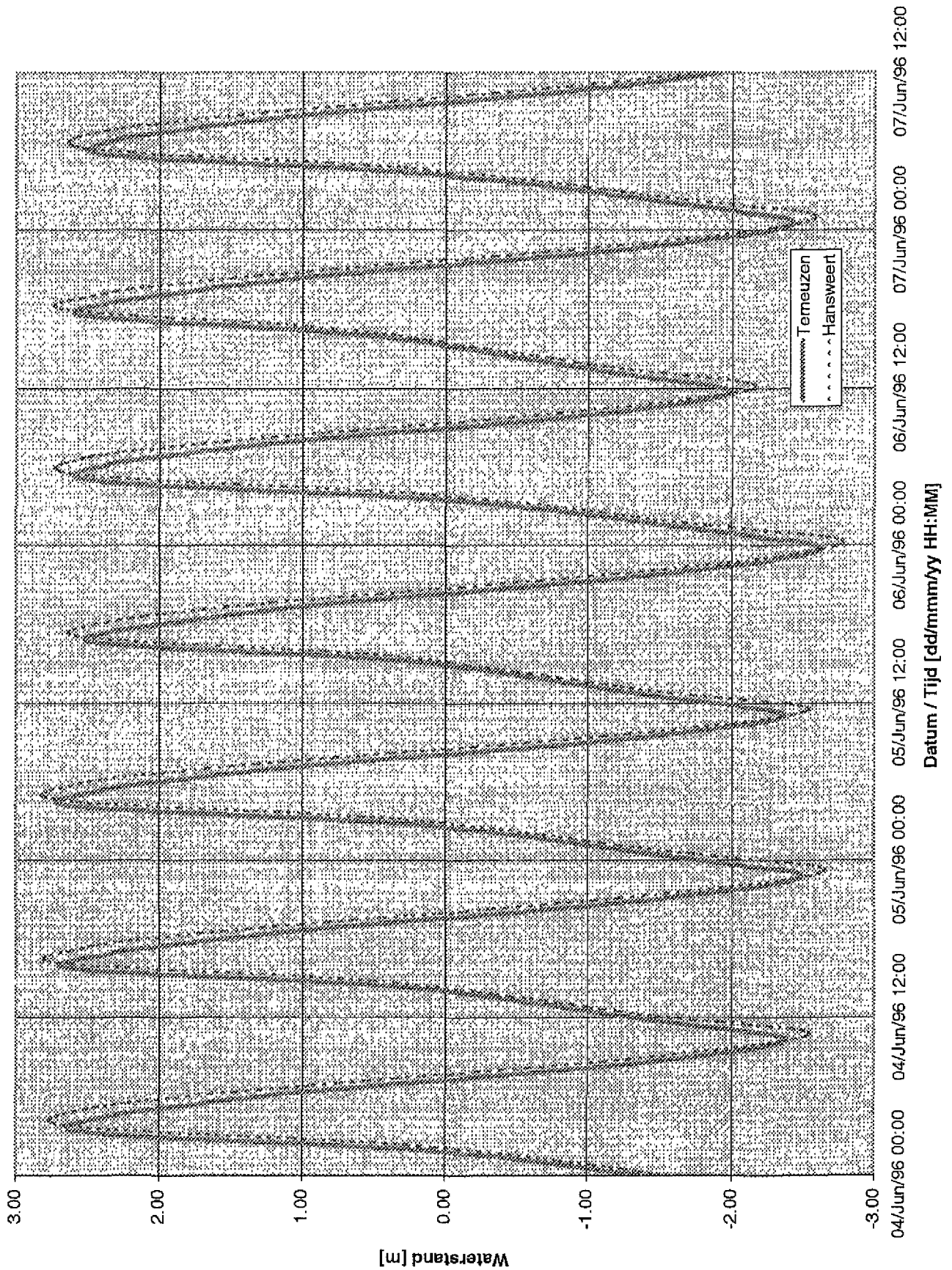


- boven 9 -
- 7 - 9 -
- 5 - 7 -
- 3 - 5 -
- 1 - 3 -
- 0.01 - 1 -
- beneden 0.01 -



Isolijnen van verhouding tussen 90% percentiel U_{rms}
en maximale U_s

Fig. 4.4



Waterstanden Hansweert en Terneuzen

Periode 4 juni tot en met 7 juni 1996

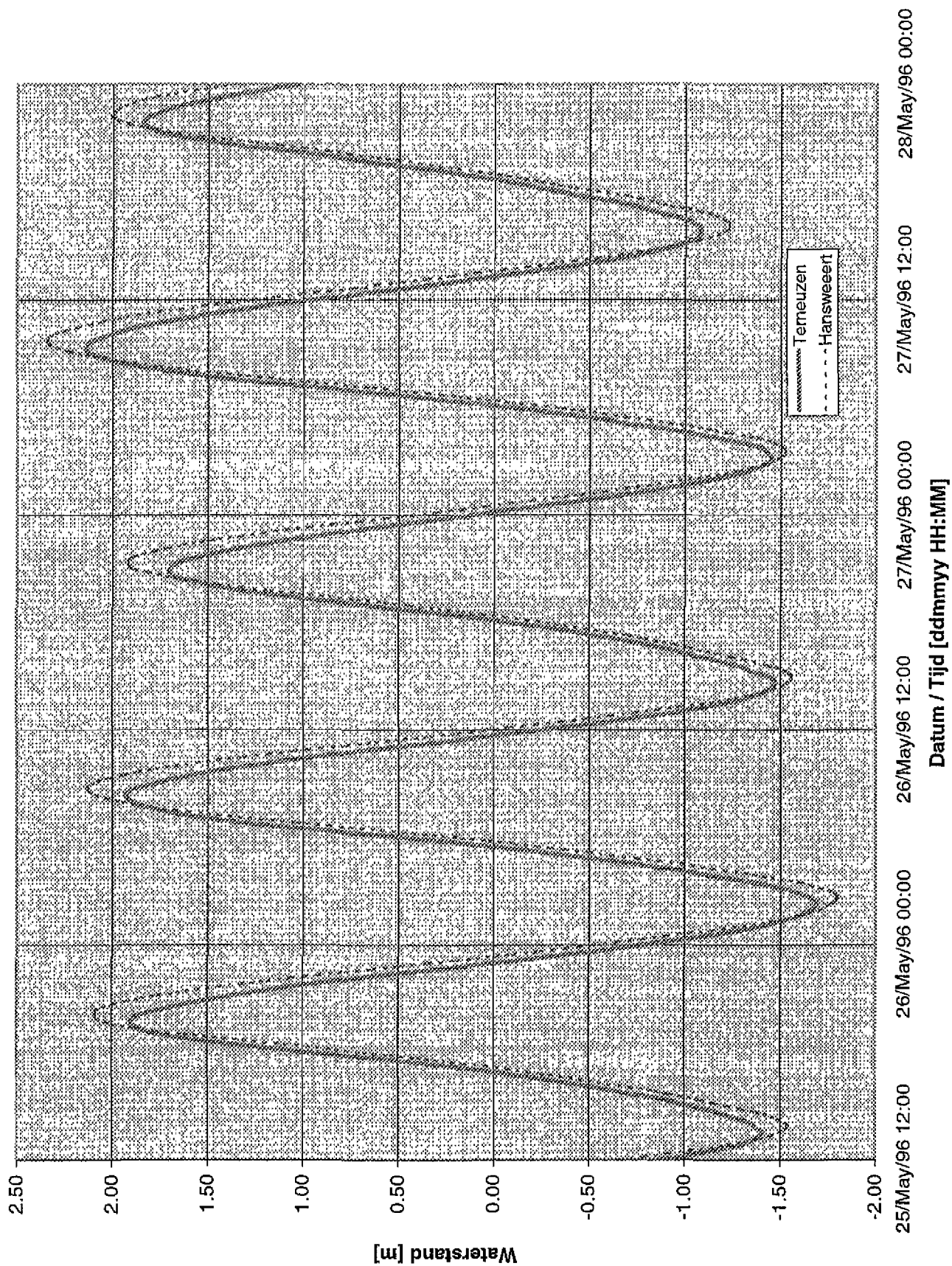
Fig 4.5

Alkyon

SVASEK

ECOMORF

1165/A647



Waterstanden Hansweert en Terneuzen
Periode 25 mei tot en met 27 mei 1996

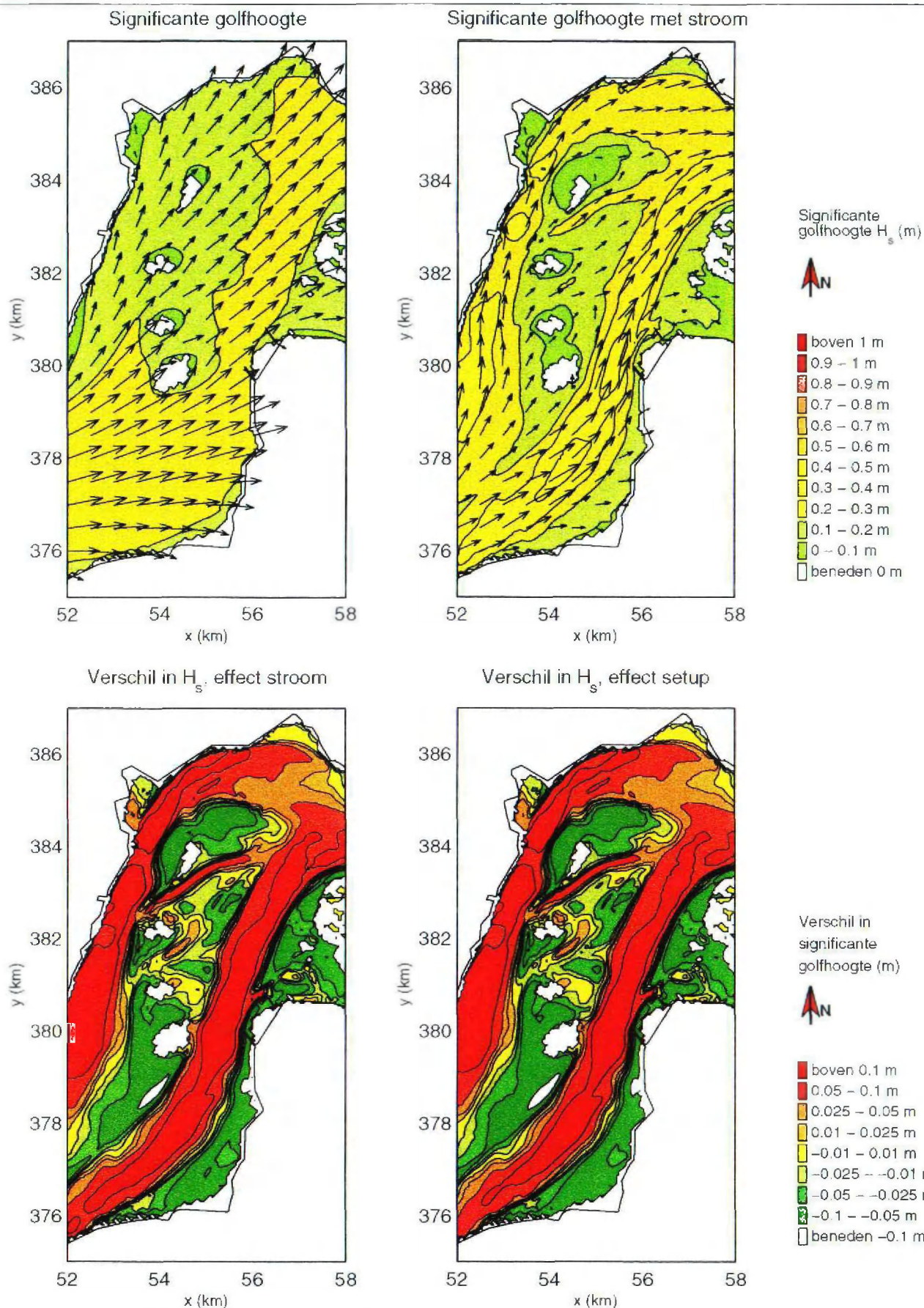
Fig 4.6

ECOMORF

1165/A647

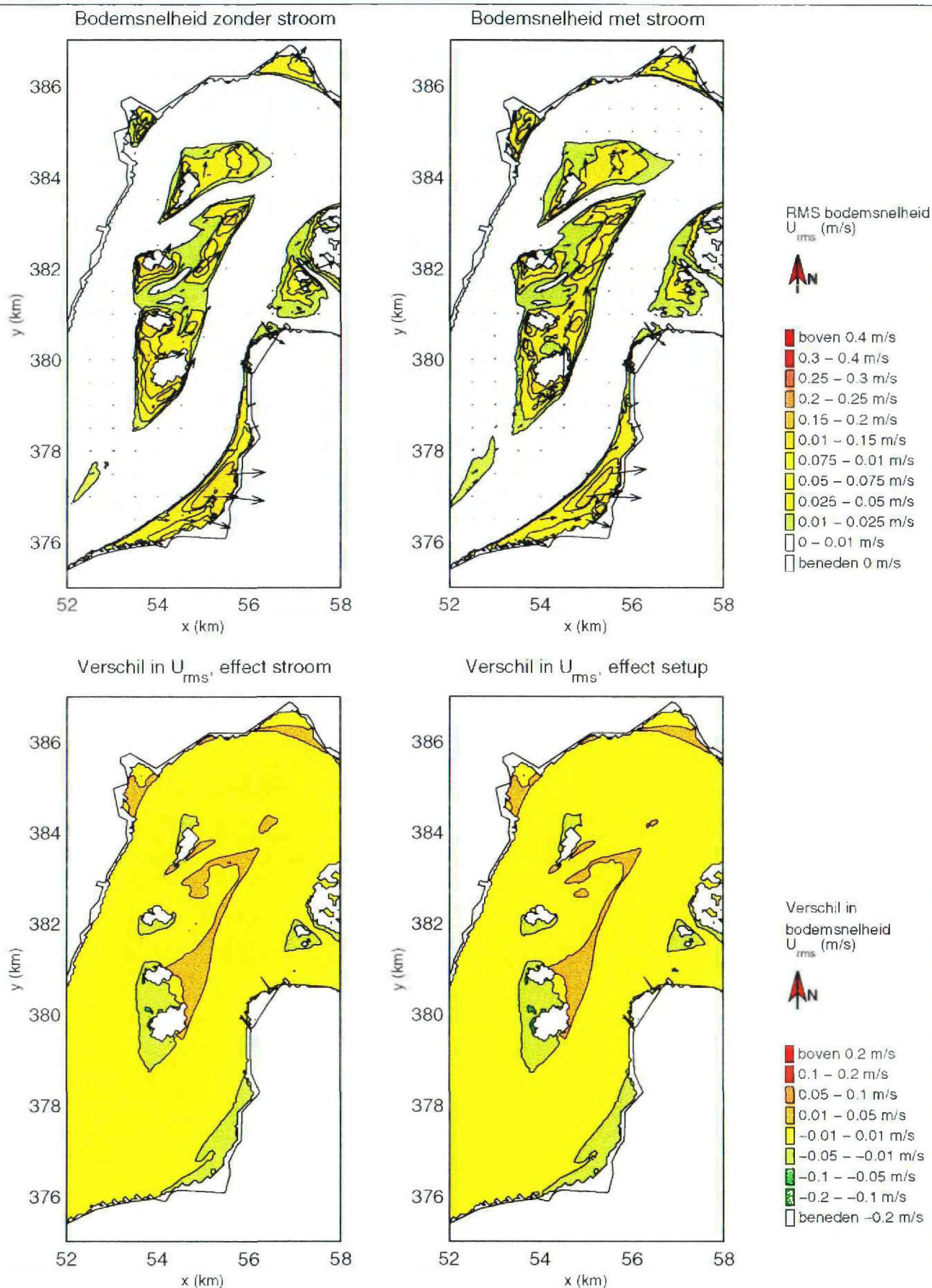
Alkyon

SVASEK



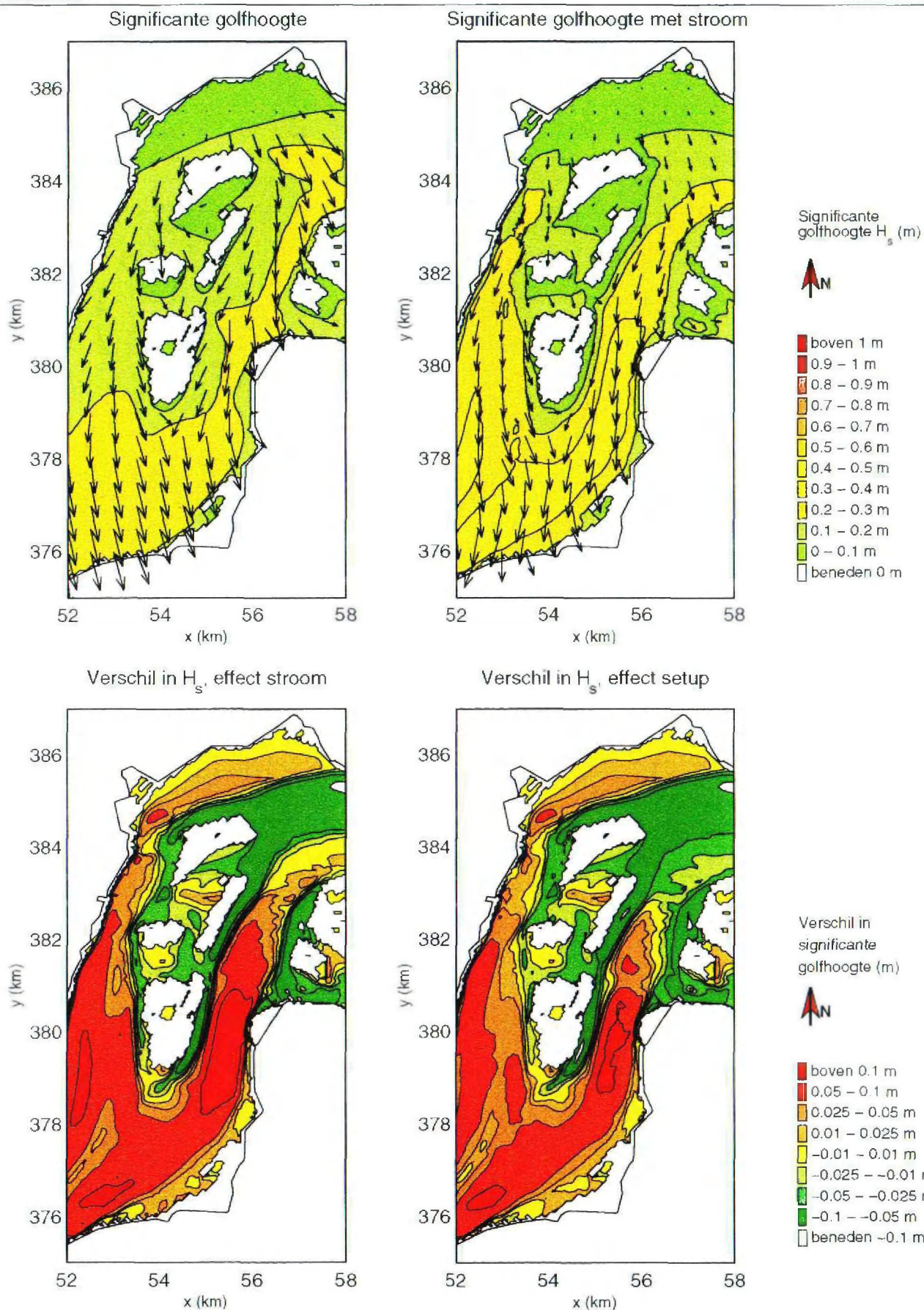
Isolijnen van significante golfhoogte H_s (m) en verschillen
voor 4 juni 1996, 7:00 uur, eb situatie
Verschillen: (stroom-zonder) en (setup - zonder)

Fig. 4.7



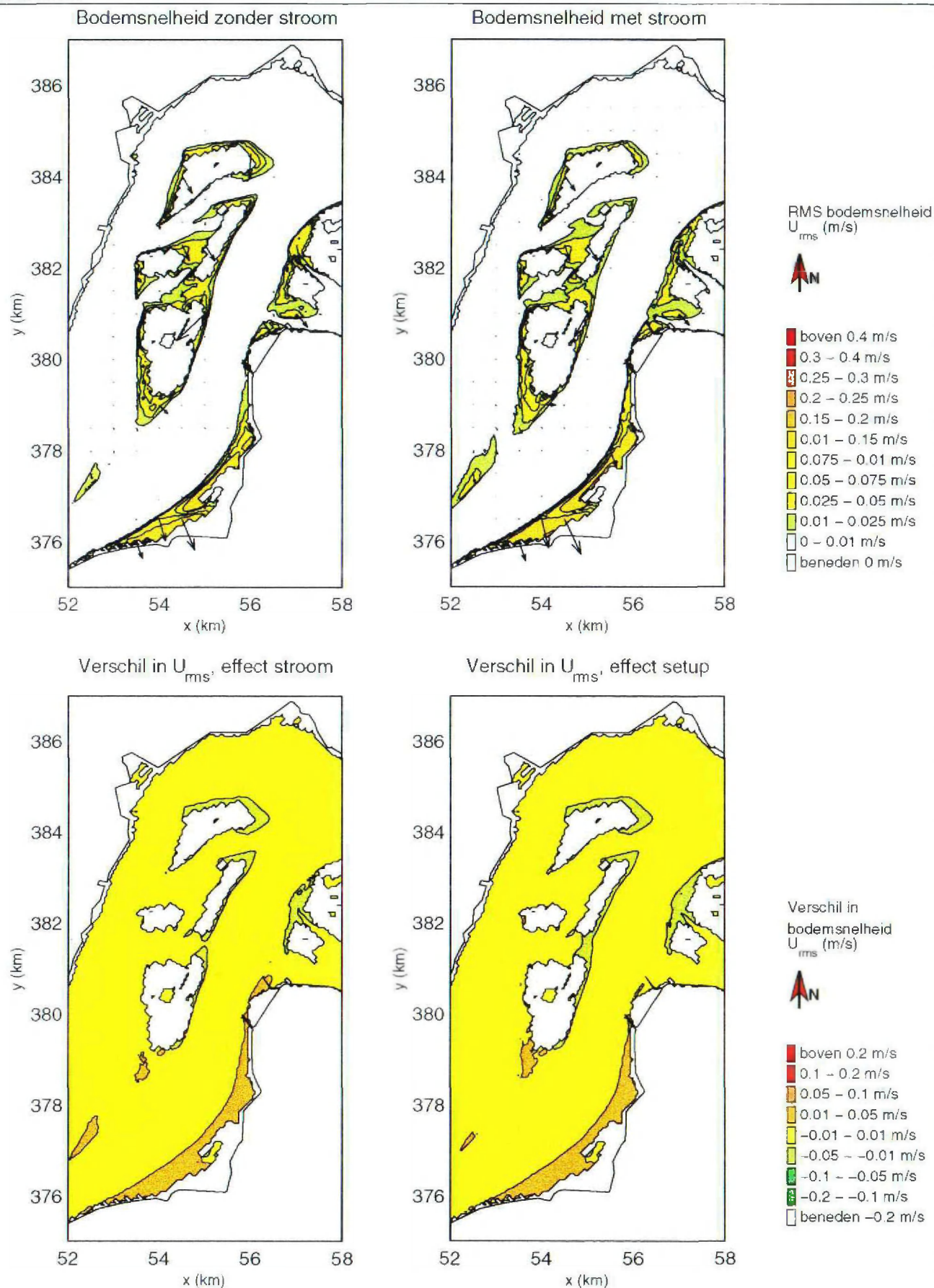
Isolijnen van bodemsnelheid U_{rms} (m/s) en verschillen
 voor 4 juni 1996, 7:00 uur, eb situatie
 Verschillen: (stroom-zonder) en (setup - zonder)

Fig. 4.8



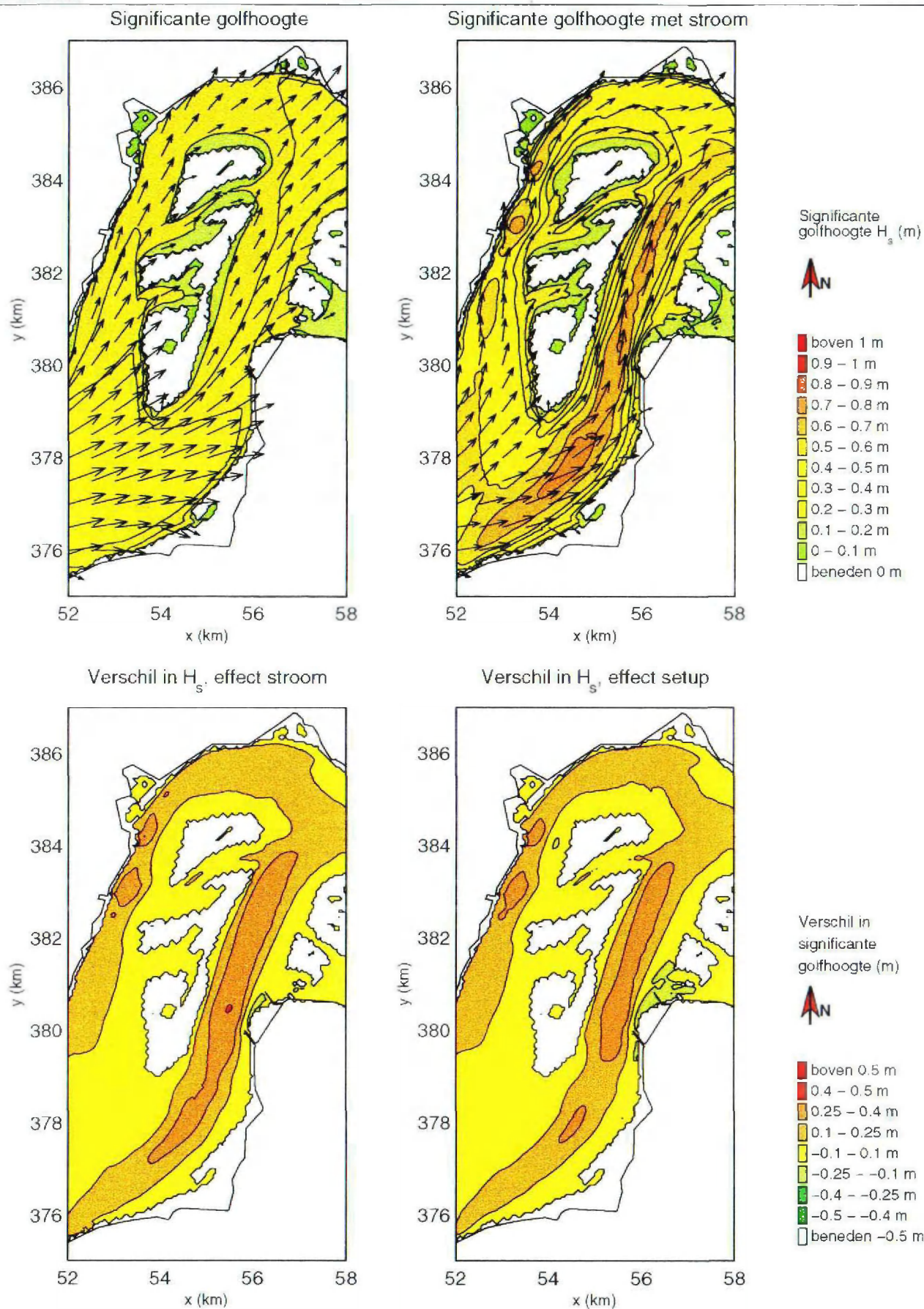
Isoliijnen van significante golfhoogte H_s (m) en verschillen
 voor 6 juni 1996, 15:00 uur, vloed situatie
 Verschillen: (stroom – zonder) en (setup – zonder)

Fig. 4.9



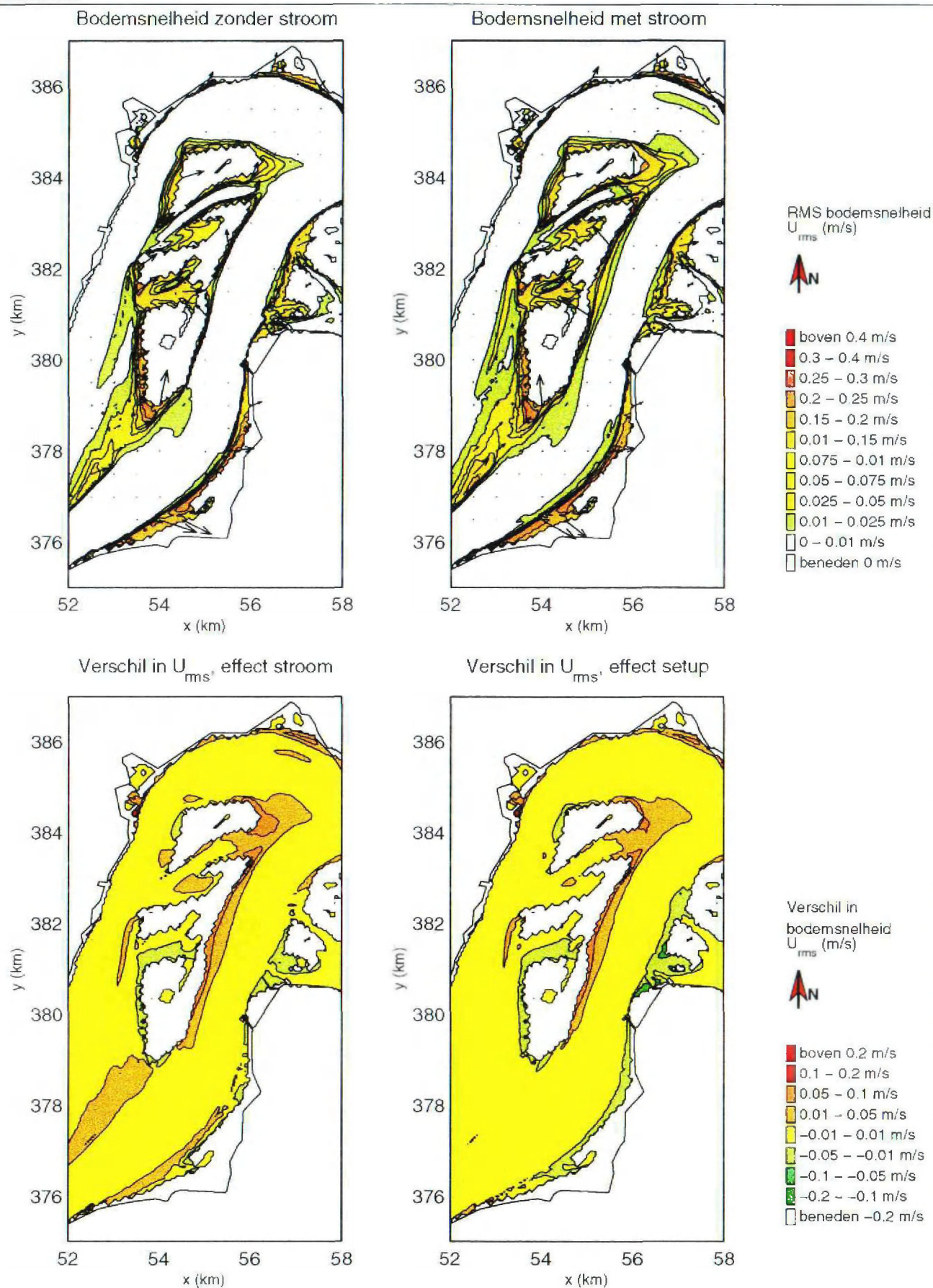
Isoliijnen van bodemsnelheid U_{rms} (m/s) en verschillen
 voor 6 juni 1996, 15:00 uur, vloed situatie
 Verschillen: (stroom – zonder) en (setup – zonder)

Fig. 4.10



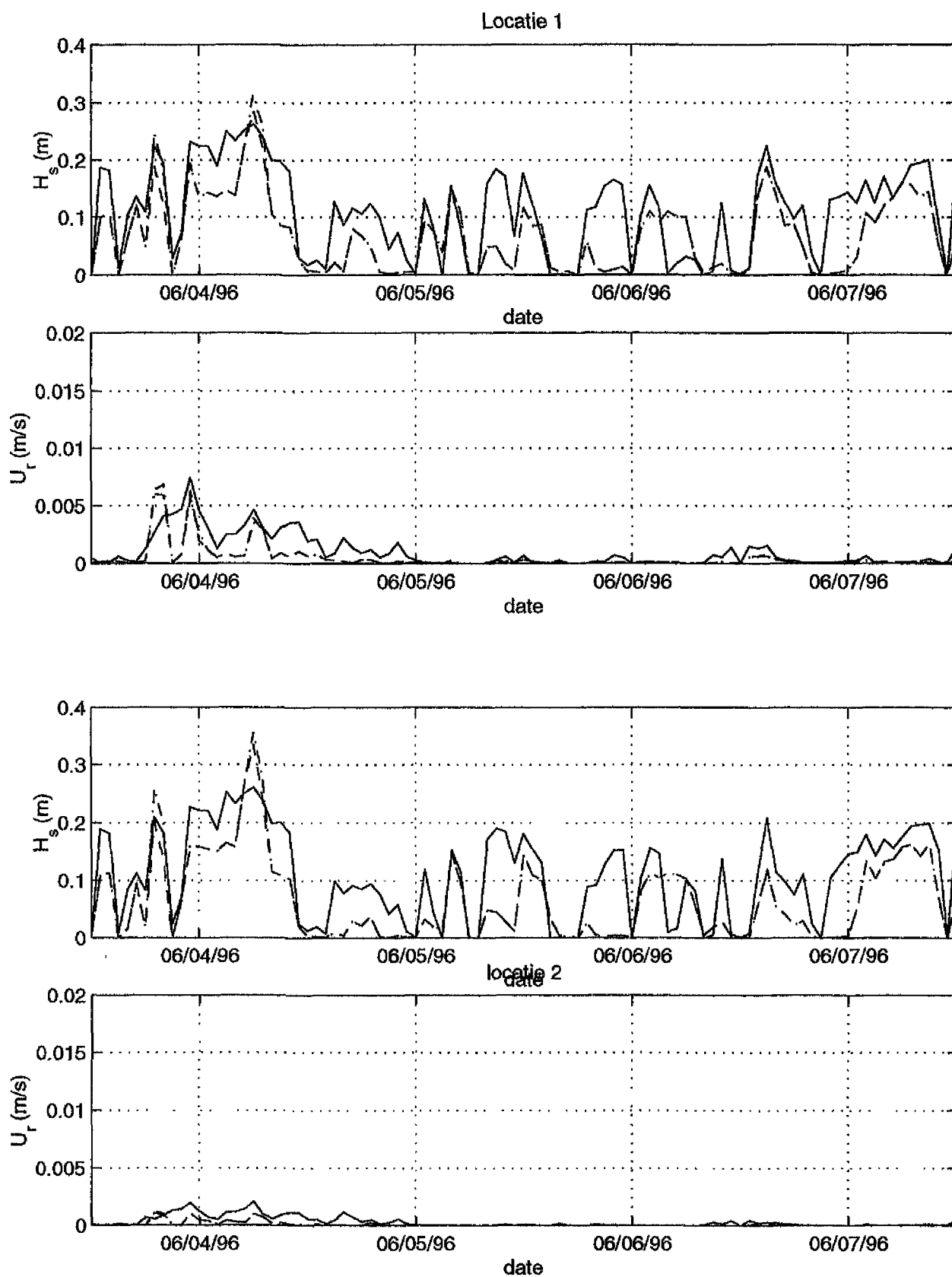
Isolijnen van significante golfhoogte H_s (m) en verschillen
 voor 26 mei 1996, 13:00 uur, eb situatie
 Verschillen: (stroom-zonder) en (setup - zonder)

Fig. 4.11



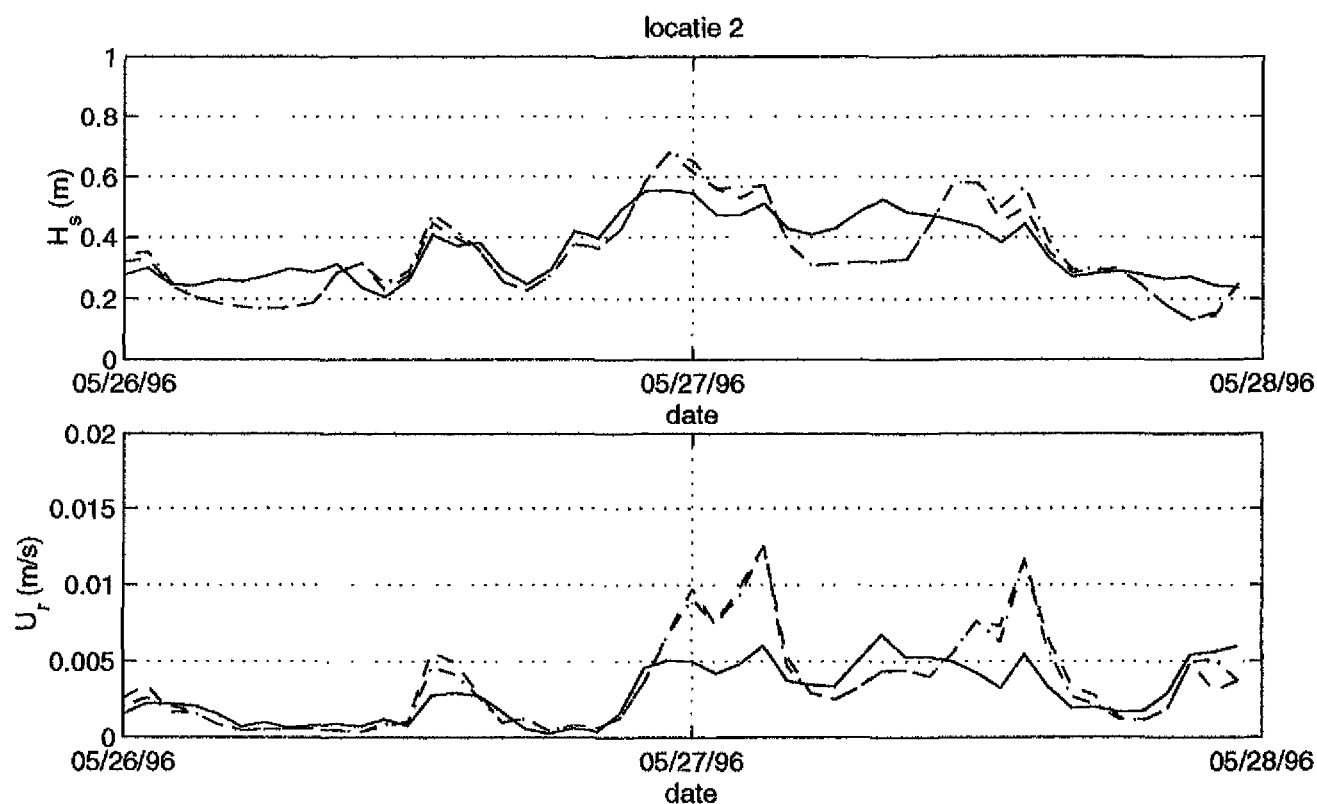
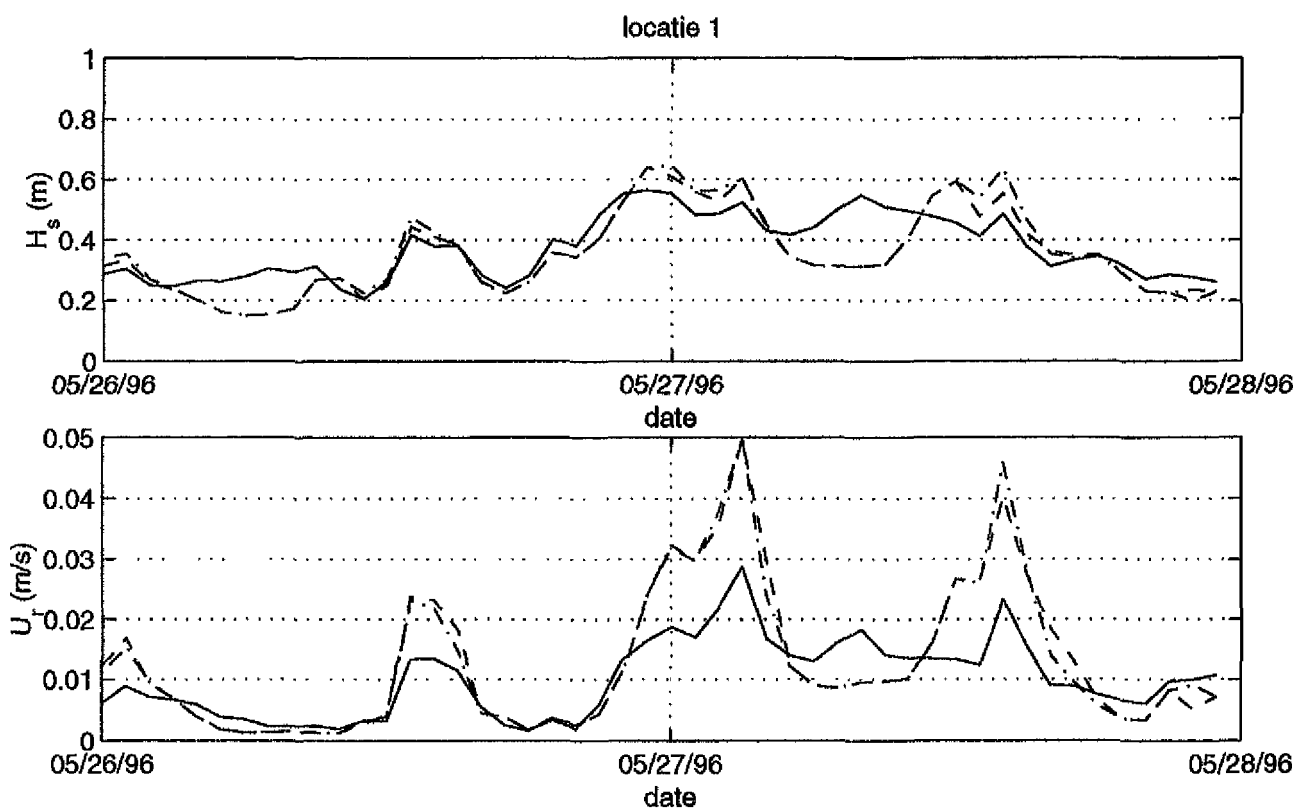
Isoliijnen van bodemsnelheid U_{rms} (m/s) en verschillen
 voor 26 mei 1996, 13:00 uur, eb situatie
 Verschillen: (stroom–zonder) en (setup – zonder)

Fig. 4.12



Invloed van stroom (--) en set-up (—) op H_s en U_{rms}
 voor periode 1, 3 juni 12:00 – 7 juni 12:00, 1996
 lokaties $x=55000$ m, $y=377650$ m en $x=55000$ m, $y=378000$ m

Fig. 4.13



Invloed van stroom (—) en set-up (---) op H_s en U_{rms}
 voor periode 2, 26 mei 0.00 uur – 27 mei 24:00 1996
 lokaties $x=55000$ m, $y=377650$ m en $x=55000$ m, $y=378000$ m

Fig. 4.14

ECOMORF

1165/A647

Alkyon

SVASEK