

*Interactie tussen de  
Containerkaai Noord  
en de toegangseul  
Zandvliet - Berendrecht*

*Hydraulisch -  
sedimentologisch  
onderzoek*

*Eindrapport*



---

MINISTERIE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP  
DEPARTEMENT LEEFMILIEU EN INFRASTRUCTUUR  
ADMINISTRATIE WATERINFRASTRUCTUUR EN ZEEWEZEN  
ANTWERPSE ZEEHAVENDIENST

INTERACTIE TUSSEN DE CONTAINERKAAI NOORD  
EN DE  
TOEGANGSGEUL ZANDVLIET-BERENDRECHT

Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek

Eindrapport

Oktober 1993

76505

---

STUDIECONSORTIUM IMDC - WLB

Wilrijkstraat 37-45 B2140 Antwerpen - België

Tel : +32.3.271.00.16 Fax : +32.3.235.67.11 Telex : 71849 IMDC



# INTERACTIE TUSSEN DE CONTAINERKAAI NOORD EN DE TOEGANGSGEUL ZANDVLIET-BERENDRECHT

## Eindrapport

<b>1.</b>	<b>DE OPDRACHT</b>	<b>1</b>
1.1.	Het globale studieprogramma voor de noordelijke containerkaai	1
1.2.	De specifieke opdracht van het studieconsortium	2
1.3.	Overzicht van de deelrapporten	3
<b>2.</b>	<b>METHODOLOGIE EN MODELLEN</b>	<b>5</b>
2.1.	Methodologie en doel van het onderzoek	5
2.2.	Algemene beschrijving van de wateruitwisseling met de toegangsgeul	5
2.3.	Beschrijving van het 3D hydraulisch model	6
2.3.1.	Beschrijving van het model	6
2.3.2.	Beschrijving van het Scheldemodel	7
2.3.3.	Beschrijving van de gegevens en de calibratie	7
2.4.	Beschrijving van het 3D slibtransportmodel	9
2.4.1.	Beschrijving van het model	9
2.4.2.	Beschrijving van de erosie- en sedimentatiekarakteristieken van het slib	10
2.4.3.	Calibratie van het model	12
<b>3.</b>	<b>UITGEVOERDE SIMULATIES</b>	<b>14</b>
3.1.	Definitie en beperkingen van de simulaties	14
3.2.	Beschrijving van de simulaties	14
<b>4.</b>	<b>RESULTATEN VAN HET MODELONDERZOEK</b>	<b>16</b>
4.1.	Hydraulica	16
4.1.1.	Het stromingspatroon in de toegangsgeul	16
4.1.2.	De vorm van de snelheidsverticalen	17
4.1.3.	De wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de rivier	18
4.1.4.	De invloed van de noordelijke containerkaai	19

<b>4.2. Saliniteit</b> .....	20
4.2.1. Inleiding .....	20
4.2.2. Horizontale saliniteitsgradiënt .....	20
4.2.3. Saliniteitsgradiënt in een dwarssectie .....	21
4.2.4. Verticale saliniteitsgradiënt .....	21
<b>4.3. Slib</b> .....	22
4.3.1. Sedimentatie van slib .....	22
4.3.2. Invloed van de noordelijke containerkaai .....	24
<b>5. SAMENVATTING EN AANBEVELINGEN</b> .....	26
5.1. Samenvatting .....	26
5.2. Aanbevelingen .....	27
<b>LITERATUURLIJST</b> .....	30



**LIJST van FIGUREN**

- 2.1 Bathymetrie mathematisch model - Huidige Toestand.
- 2.2 Ligging van de meetpunten van 27/9/90 en 4/10/90.
- 2.3 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten snelheden in de meetpunten 4/10/90.
- 2.4 Vaarroute ADCP meting, toegangsgedul Zandvliet-Berendrechtsluis.
- 2.5 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten snelheden (ADCP) 5 uur voor HW in een dwarssectie van de toegangsgedul naar de Zandvliet- en Berendrechtsluis.
- 2.6 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten snelheden (ADCP) 1 uur na HW in een dwarssectie van de toegangsgedul naar de Zandvliet- en Berendrechtsluis.
- 2.7 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten slobconcentratie in de meetpunten van 4/10/90.
  
- 3.1 Bathymetrie mathematisch model Alternatief 9.
  
- 4.1 Berekend stromingspatroon (HT-springtij hoge saliniteit) in de toegangsgedul tijdens vloed (2 uur voor HW).
- 4.2 Berekend stromingspatroon (HT-springtij hoge saliniteit) in de toegangsgedul tijdens eb (4 uur na HW).
- 4.3 Berekende snelheidsverticalen (HT-springtij hoge saliniteit) in meetpunt 1 (meting 4/10/90) tijdens maximale eb, maximale vloed en kentering.
- 4.4 Berekende verticale saliniteitsverschillen (HT-springtij hoge saliniteit) in de toegangsgedul.
- 4.5-6 Berekende saliniteitsverdeling (HT-springtij hoge saliniteit) omstreeks maximale saliniteit (2 uur na HW).
- 4.7-8 Berekende saliniteitsverdeling (HT-springtij hoge saliniteit) omstreeks minimale saliniteit (5 uur voor HW).
- 4.9 Berekende (HT-springtij hoge saliniteit) maximale bodemschuifspanningen.
- 4.10 Berekende (HT-springtij hoge saliniteit) sedimentatie van slob tijdens één getijcyclus.
- 4.11 Berekende (A9-springtij hoge saliniteit) sedimentatie van slob tijdens één getijcyclus.

**LIJST van TABELLEN**

- 2.1 HT-springtij hoge saliniteit. Berekende en gemeten snelheden tijdens maximale eb- en vloedstroming (meetpunten van 4/10/90).
- 4.1 Kwalitatief (HT-springtij hoge saliniteit) overzicht van de stroming in een dwarssectie van de toegangsgeul.
- 4.2 Wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de rivier.
- 4.3 Saliniteitsmeting 1979, maandelijks gemiddelde waarden.
- 4.4 Berekende sedimentatie van slib per getij en per jaar in vier gebieden.



## INTERACTIE TUSSEN DE CONTAINERKAAI NOORD EN DE TOEGANGSGEUL ZANDVLIET-BERENDRECHT

### Eindrapport

#### 1. DE OPDRACHT

##### 1.1. Het globale studieprogramma voor de noordelijke containerkaai

Op 25 mei 1989 werd tijdens een coördinatievergadering te Brussel een studieprogramma opgesteld voor een containerkaai ten noorden van het sluiscomplex Zandvliet-Berendrecht. Hiernaar verwijzend gaf de Directeur-generaal van de Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen op 6 juli 1989 aan het Waterbouwkundig Laboratorium (W.L.B.) de opdracht om, in overleg met de Dienst Ontwikkeling Linker Scheldeoever (D.O.L.S.O.) en de Antwerpse Zeehavendienst (A.Z.), de nodige initiatieven te nemen voor het uitvoeren van:

- een hydraulisch-morfologisch onderzoek op fysisch en/of mathematisch model;
- een vaarsimulatiestudie.

Op 25 augustus 1989 werden te Borgerhout tussen A.Z., D.O.L.S.O. en W.L.B. de volgende actiepunten besproken :

- meetcampagnes en waarnemingen in situ: voorjaar 1990;
- oriënterend hydraulisch onderzoek op het Schelde-overzichtsmodel (Mod.300): 3 tot 5 varianten te onderzoeken in 1990;
- detail hydraulisch en morfologisch onderzoek (zand- en slibtransport) op fysisch model van Noord Ballastplaat tot Doel op grote schaal (vanaf medio 1990) en op mathematisch hydraulisch zandtransport- en slibtransportmodel (inschakelen van het studiebureau International Marine and Dredging Consultants N.V. onder vorm van studieconsortium I.M.D.C. - W.L.B.);
- scheepsmanoeuvresimulatieproeven: voorbereiding voorjaar 1990 en eigenlijke proeven medio 1990.

De proeven inzake het oriënterend hydraulisch onderzoek (invloed inzake getijvoortplanting en stroombeelden) op het Schelde-overzichtsmodel (Mod. 481/1) startten in juni 1990 en werden gerapporteerd in december 1990.

De simulatieproeven omtrent de scheepsmanoeuvrbaarheid in verband met de bouw van een containerterminal ten noorden van de Zandvlietsluis (Mod.481/2) werden, gezien de behoefte aan bijkomende gegevens en de nodige beschikbaarheid van rivierloodsen, pas uitgevoerd in november 1991-februari 1992 en de definitieve rapportering volgde in mei 1992.

De samenwerkingsovereenkomst tussen I.M.D.C. en W.L.B., tot vorming van een studieconsortium in het kader van de uitvoering van een hydraulisch en sedimentologisch onderzoek nabij het sluisencomplex Berendrecht-Zandvliet en de in uitvoering zijnde en geplande containerkaaien, werd op 17 april 1991 door beide partijen ondertekend.

## 1.2. De specifieke opdracht van het studieconsortium

In het kader van het globale studieprogramma van de Containerkaai Noord werd op 14/10/91 door de Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, aan het studieconsortium International Marine and Dredging Consultants N.V. - Waterbouwkundig Laboratorium de opdracht verleend om het hogergenoemde hydraulisch-sedimentologisch onderzoek uit te voeren. IMDC werd belast met de studie met behulp van mathematische modellen, terwijl het Waterbouwkundig Laboratorium de fysische modellering realiseerde.

Dit onderzoek beoogde enerzijds een inzicht te verschaffen in het morfologisch proces dat zich afspeelt in de Beneden Zeeschelde in de omgeving van het sluisencomplex Zandvliet-Berendrecht, de bijzonderste aanlooproute tot de Antwerpse Zeehaven. Anderzijds diende de meest gunstige lay-out te worden bepaald voor een nieuwe containerkaai ten noorden van het sluisencomplex, zodat een veilige verkeersafwikkeling en een minimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken kunnen nagestreefd worden. In dit verband bestond het laatste onderdeel van het onderzoek erin een gedetailleerde studie uit te voeren van de stroming in de toegangsgeul Zandvliet-Berendrecht en de invloed na te gaan van de bouw van een containerkaai op dit stromingspatroon.

In voorbereiding op deze studie werd op 20 maart 1991 door het Havenbedrijf van de Stad Antwerpen aan I.M.D.C. de opdracht verleend om een hydraulisch onderzoek uit te voeren met behulp van mathematische modellen voor drie verschillende lay-outs van de kaai. Tussen 17/03/92 en november 92 werd door de Antwerpse Zeehavendienst aan het studieconsortium I.M.D.C.-W.L.B. een bijkomend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek gevraagd voor enkele nieuwe



lay-outs van de geplande containerkaai noord zijnde alternatief 4 t.e.m. 10.

Voor twee situaties (huidige toestand en alternatief 9) werd nagegaan wat de effecten van een stormtij zijn op de stromingen en het sedimenttransport.

Tevens werden ten behoeve van de MER-studie voor drie situaties (huidige toestand, alternatief 5 en 9) bijkomende hydraulische en sedimentologische simulaties gevraagd met een verfijnd rooster op de Ballastplaat.

In het eindrapport betreffende de noordelijke containerkaai werd een samenvatting gegeven van de mathematische basissimulaties beschreven in het eindrapport hydraulica (opgesteld in opdracht van het Havenbedrijf van de stad Antwerpen) en de deelrapporten 5 (hydraulica), 6 (slib), 7 (zand), 8 (storm) en 10 (MER). Daarnaast werden de resultaten van het onderzoek op het fysisch model (Model 481/4-1, 481/4-2) samengevat.

In dit eindrapport worden de resultaten gebundeld van studie inzake de toegangsgeul van Zandvliet-Berendrecht waarin het stromingspatroon in de toegangsgeul werd onderzocht, gekoppeld aan een analyse van de wateruitwisseling tussen de Schelde en de toegangsgeul en waarin tenslotte de aanslibbing in de toegangsgeul werd berekend. In het laatste deel van dit onderzoek werd nagegaan in welke mate de bouw van een noordelijke containerkaai het stromingspatroon en de aanslibbing in de toegangsgeul wijzigt.

### 1.3. Overzicht van de deelrapporten

De deelrapporten die tot nu toe werden opgesteld in het kader van de studie zijn:

- Deelrapport 1 : Stroom- en Sedimentmeting 27/09/90. (twee delen).
- Deelrapport 2 : Stroom- en Sedimentmeting 04/10/90. (twee delen).
- Deelrapport 3 : Zout- en Temperatuurmeting in de Toegangsgeul van de Zandvlietsluis op 27/09/90 en 04/10/90.
- Deelrapport 4 : Langdurige Stroom- en Sedimentmeting van 27/09/90 tot 18/03/91.
- Deelrapport 5 : Hydraulisch Onderzoek - Bijkomende Simulaties.

- Deelrapport 6 : Morfologisch Onderzoek - Slib.
- Deelrapport 7 : Morfologisch Onderzoek - Zand.
- Deelrapport 8 : Hydraulisch en Morfologisch Onderzoek - Stormtij.
- Deelrapport 9 : Stroom- en Sedimentmeting van 13/06/91.
- Deelrapport 10 : Hydraulisch en Morfologisch Onderzoek - Simulaties 'MER'.
- Mod. 481/4-1 : Containerterminal ten noorden van de Zandvlietsluis, Hydraulisch onderzoek op fysisch model.
- Mod. 481/4-2 : Containerterminal ten noorden van de Zandvlietsluis, Sedimentologisch onderzoek op fysisch model.
- Eindrapport : Containerterminal ten Noorden van de Zandvlietsluis. Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek.
- Deelrapport 11 : Hydraulisch Onderzoek - Toegangsgeul Zandvliet- en Berendrechtsluis.
- Deelrapport 12 : Morfologisch Onderzoek Slib-Toegangsgeul Zandvliet- en Berendrechtsluis.



## 2. METHODOLOGIE EN MODELLEN

### 2.1. Methodologie en doel van het onderzoek

De bouw van een containerkaai ten noorden van de toegangsgemaal naar de sluisen van Zandvliet en Berendrecht heeft ontegensprekelijk invloed op het stromingspatroon en op het sediment regime in de directe omgeving, zoals bleek tijdens het eerste deel van het onderzoek. Het doel van het gedetailleerd hydraulisch en sedimentologisch onderzoek kan bijgevolg als volgt worden samengevat :

1. een gedetailleerd inzicht verwerven van de stromingen en de saliniteitsverdeling in de toegangsgemaal voor de huidige toestand (zonder noordelijke containerkaai);
2. nagaan in welke mate het stromingspatroon in de toegangsgemaal wordt beïnvloed door de kaai;
3. een kwalitatief en zo mogelijk kwantitatief inzicht geven betreffende de te verwachten wijzigingen inzake slibafzettingen in de toegangsgemaal.

Om aan deze doelstellingen te kunnen beantwoorden werd geopteerd voor het gebruik van de nodige 3-dimensionale mathematische modellen. Deze mathematische modellen laten toe om met de inzet van beperkte, weliswaar hoogtechnologische, middelen de invloed van diverse omgevingsfactoren vlot te kunnen vergelijken. Daarnaast en niet in het minst laten de mathematische modellen toe om slibtransporten en densiteitsstromingen te simuleren, wat in een fysisch model zeer ingewikkeld is.

In onderstaand overzicht worden de verschillende modellen beschreven die voor het onderzoek werden gebruikt. Eerst wordt een algemene beschrijving gegeven van de wateruitwisseling tussen de Schelde en de toegangsgemaal.

### 2.2. Algemene beschrijving van de wateruitwisseling met de toegangsgemaal

Bij de wateruitwisseling tussen de Schelde en de toegangsgemaal spelen verschillende fenomenen een rol. De vier belangrijkste hiervan zijn :

1. de getijwerking, waardoor de toegangsgemaal gevuld en geleegd wordt.
2. een horizontale neer aan de ingang van de toegangsgemaal, aangedreven door de stroming op de Schelde.
3. een dichtheidsstroom tengevolge van het verschil in saliniteit tussen de rivier en de toegangsgemaal. Deze uitwisseling wordt uiteraard ook mede bepaald

door de versassing van schepen.

4. effecten van de verticale kaaimuren in de toegangsgeul, waardoor de horizontale stroming afgebogen wordt naar onder of boven. Daardoor ontstaat een verticale neer.

Ontegensprekelijk is ook de configuratie van de toegangsgeul ten opzichte van de langstrekkende getijstroom bepalend. Tenslotte wordt erop gewezen dat tijdens de vloed de stroming over de Plaat van Doel trekt, terwijl tijdens eb de stroming de vaargeul volgt.

## 2.3. Beschrijving van het 3D hydraulisch model

### 2.3.1. Beschrijving van het model

De stroming in de toegangsgeul is complex en uitgesproken driedimensionaal. Om deze stroming te kunnen simuleren werd geopteerd voor een driedimensionale benadering, waarbij de stroming en het transport van zout gelijktijdig worden beschouwd. De hydraulische simulaties werden uitgevoerd met een driedimensionaal eindig differentie model, waaraan een transportmodel gekoppeld werd. Het gecombineerde 3D stromings- en transportmodel is gebaseerd op de behoudsvergelijkingen voor massa, momentum en zout, rekening houdend met het drijfvermogen, de dichtheitsstromingen en de onderdrukking van verticale turbulente menging door gelaagdheid. Dit laatste is essentieel om een verticale saliniteitsgradiënt te kunnen vormen. Het model veronderstelt dat de druk hydrostatisch is, wat voor deze toepassing zeker geldig is.

De vergelijkingen die door het model opgelost worden, zijn:

1. de continuïteitsvergelijking voor het watervolume,
2. het behoud van momentum in de x en de y-richting,
3. de hydrostatische vergelijking,
4. de continuïteitsvergelijking voor zout.

Het horizontale rooster is equidistant en rechthoekig. De verticale structuur wordt bekomen door meerdere horizontale vlakken boven elkaar te leggen. Op elke tijdstap worden de horizontale termen voor elke laag in de vergelijkingen expliciet opgelost terwijl de verticale advectie en diffusie termen impliciet opgelost worden.

Er wordt verondersteld dat de dichtheid een lineaire functie is van de saliniteit. Het model gebruikt een 'mixing length' formulering voor turbulentie.



### 2.3.2. Beschrijving van het Scheldemodel

Het 3D Scheldemodel omvat een deel van de Schelde van ongeveer 8.5 km lengte, afwaarts begrensd ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens, opwaarts ter hoogte van Doel. Voor het Scheldemodel werden vier lagen geïmplementeerd, elk van 3.0 m dikte. Daar waar de waterdiepte groter is dan 12 m (t.o.v. referentie, i.c. TAW) heeft de onderste laag een dikte die vanaf 9m tot aan de bodem reikt. Op minder diepe plaatsen worden de onderste lagen stelselmatig uitgeschakeld indien zij dunner worden dan de laagdikte, de nieuwe bodemlaag vergroot dan om de juiste diepte te behouden. De dikte van de bovenlaag verandert met het getij. De relatief grove verticale resolutie is voldoende voor rivieren zoals de Schelde, waar er geen scherp gedefinieerde grens tussen zoet en zout water bestaat.

De bathymetrie van de Schelde werd overgenomen uit het 2D model (10). Een weergave van de bathymetrie is te vinden in figuur 2.1. Het eindig differentie-rooster werd zodanig opgesteld dat de zuidelijke containerkaai parallel is met de y-as van het model.

### 2.3.3. Beschrijving van de gegevens en de calibratie

De getijgegevens van de getijposten Bath, Prosperpolder, Zandvlietsluis en Liefkenshoek (voor de meetdagen en voor de periode 1971-1980) werden gebruikt voor de 2D simulatie. De resultaten hiervan werden op hun beurt gebruikt als randvoorwaarde voor het 3D model. Met betrekking tot snelheden en waterstanden werd voor het hydraulisch onderzoek gebruik gemaakt van de 13-uurs stroom- en sedimentmetingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet op 27/09/90 (8) en 4/10/90 (9), de diverse metingen in de toegangsgeul bij de in dienstneming van de Berendrechtsluis in april 1989 (7) en de snelheidsmetingen in de toegangsgeul met behulp van de ADCP (d.i. een akoestische snelheidsmeter) in april 1993 (2).

Naast de nodige hydraulische gegevens, dienen aan het model saliniteitsrandvoorwaarden te worden opgelegd. Uit langdurige metingen door de Antwerpse Zeehavendienst (1) werd een karakteristieke langsgradiënt afgeleid, die voor hoge saliniteit ongeveer 0.45 ppt/km bedraagt en voor lage saliniteit 0.20 ppt/km.

De calibratie van het 3D model gebeurde door het springtij van 4/10/90 te simuleren. Gedurende het calibratieproces werden diverse simulaties uitgevoerd



om de waarde van de bodemruwheid en de horizontale diffusiecoëfficiënt te bepalen. Hiervoor werden uiteindelijk de waarden van respectievelijk 0.05 m en 5 m<sup>2</sup>/s weerhouden, waarbij er een goede overeenkomst tussen de metingen en de berekeningen werd bekomen. Om een kwantitatieve vergelijking te maken tussen de metingen en de berekeningen werden de volgende elementen beschouwd : de waterstanden, de snelheidsverdeling in de Schelde en de snelheidsverdeling in de toegangsgeul.

1. De waterstanden worden in het model weergegeven met een afwijking die kleiner is dan 0.05 m.

2. De snelheden op de Schelde werden vergeleken met de meetpunten van 4/10/90, waarbij gedurende een volledig getij, in een dwarsraai ter hoogte van de noordelijke containerkaai snelheidsprofielen werden opgemeten. De positie van de meetpunten is weergegeven in figuur 2.2. Uit deze vergelijking (zie figuur 2.3 en tabel 2.1) blijkt dat de gemeten gemiddelde snelheid goed overeenstemt met snelheid in de 3 bovenste lagen van het model. Daarnaast blijkt dat het snelheidsprofiel tijdens vloed afwijkt van het klassieke snelheidsprofiel : de maximale snelheid treedt niet op aan de oppervlakte, wat duidelijk wijst op de aanwezigheid van een saliniteitsgradiënt. Uit deze vergelijking mag besloten worden dat het model de stroming in de Schelde goed weergeeft.

3. De snelheden in de toegangsgeul werden geanalyseerd op basis van de metingen met de akoestische snelheidsmeter (ADCP). Dit instrument laat toe om al varende de snelheidsverdeling over een volledige dwarssectie op te meten. Een dergelijke meting werd uitgevoerd aan de ingang van de toegangsgeul (zie figuur 2.4). Aangezien op deze meetdagen de getijomstandigheden en de saliniteitsvoorwaarden verschilden van de calibratieomstandigheden, is een gedetailleerde vergelijking onmogelijk. Bovendien wordt erop gewezen dat de verticale resolutie van het model slechts uit 4 lagen bestaat, terwijl door de ADCP metingen werden uitgevoerd elke 0.5 m. Daardoor wordt de verticale snelheidsstructuur in het model ruwer weergegeven. Ter illustratie worden in figuren 2.5 en 2.6 de situaties 5 uur voor en 1 uur na hoogwater weergegeven. De eerste situatie is typisch voor het uitstromen van water naar de Schelde via de bodem, terwijl de toegangsgeul gevuld wordt via de bovenlaag. De tweede situatie is kenmerkend voor het instromen van zouter water van de Schelde naar de sluisen via de bodem, terwijl er water uitstroomt via de bovenlaag. Gezien de bovengenoemde beperkingen tonen deze uren aan dat de stroming in de beschouwde dwarssectie zowel kwalitatief al kwantitatief goed gereproduceerd worden door het model.



Teneinde na te gaan of het model betrouwbare resultaten levert bij andere randvoorwaarden, werd het doortij van 27/09/90 gesimuleerd als validatieberekening (met de parameters bekomen door calibratie). Uit de vergelijking tussen de gemeten en berekende waarden voor waterstanden en snelheden blijkt dat het model de metingen voldoende nauwkeurig weergeeft en dat de gekozen modelparameters als valabel kunnen beschouwd worden voor verdere simulaties.

Tabel 2.1 Huidige Toestand - Springtij 4/10/90 (hoge saliniteit). Berekende en gemeten snelheden tijdens maximale eb- en vloedstroming in de meetpunten van 4/10/90.

snelheid (m/s)	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7
<b>max eb</b>							
laag 1 (boven)	1.08	0.93	0.66	0.51	0.46	1.01	0.89
laag 2	1.03	0.86	0.18	0.09	-	0.96	0.89
laag 3	0.93	0.75	-	-	-	0.80	0.39
laag 4 (onder)	0.77	0.31	-	-	-	0.29	-
meting	0.93	0.78	0.63	0.68	0.57	1.03	0.83
<b>max vloed</b>							
laag 1 (boven)	0.40	0.93	1.26	1.26	0.99	0.64	1.08
laag 2	0.57	1.00	0.29	0.26	-	0.73	0.97
laag 3	0.60	0.87	-	-	-	0.82	0.44
laag 4 (onder)	0.36	0.34	-	-	-	0.33	-
meting	0.46	0.79	0.91	1.16	1.19	0.63	0.89

## 2.4. Beschrijving van het 3D slibtransportmodel

### 2.4.1. Beschrijving van het model

Het slibtransport werd berekend met een driedimensionaal model. Het model lost de tijdsafhankelijke convectie-diffusie vergelijking op, die analoog is als deze voor het transport van zout. Er zijn evenwel twee termen toegevoegd, met name deze die de erosie en de sedimentatie van het slib beschrijven. Een expliciete eindige differentie methode wordt gebruikt om de vergelijking op te lossen. De advectieve termen worden benaderd met een zogenoemde opwaartse differentie. De vergelijking wordt gediscretiseerd op een rechthoekig rooster.

#### 2.4.2. Beschrijving van de erosie- en sedimentatiekarakteristieken van het slib

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van de erosie- en afzettingskarakteristieken van het slib in het studiegebied. Het transport van slib wordt bepaald door het uitzakken van slib onder invloed van de zwaartekracht en door afzetting en erosie ervan onder invloed van de plaatselijke bodemschuifspanningswaarde. Het volledig proces van transport, afzetting en erosie van slib is een complex fenomeen omwille van het cohesief karakter van dit sediment. Voor een uitvoerige procesbeschrijving wordt verwezen naar Mehta et al. (13), die de nadruk legt op een aantal basisprocessen en de karakterisatie hiervan vanuit een praktisch waterbouwkundig oogpunt (flocculatie, uitzakken, afzetting, opwerpen, in suspensie komen en consolideren).

##### **Het uitzakken van slib**

Het uitzakken van slib beschrijft de beweging van de partikels onder invloed van zwaartekracht, visceuse schuifspanning en interactie tussen partikels onderling. Meestal wordt de 'valsnelheid' omschreven in rusttoestand en als tijds-onafhankelijk (aggregatie wordt dus niet beschouwd). Zowel marien als rivierslib vertonen een breed gamma van valsnelheden. Voor een bepaald sediment zijn de belangrijkste factoren die de valsnelheid bepalen de sedimentconcentratie, de saliniteit en het snelheidsveld.

Algemeen kan worden gesteld dat de valsnelheid stijgt bij toenemende slibconcentratie tot waarden tussen 5000 en 10000 mg/l. Boven deze grens wordt het uitzakken gehinderd, omdat het sediment dan een continue structuur vormt waardoor het poriënwater slechts langzaam opwaarts kan ontsnappen. De valsnelheid neemt toe bij stijgende saliniteit tot zoutwaarden van 10 ppt. Bij hogere waarden speelt het zoutgehalte enkel een rol voor de montmorilloniet fractie, welke verwaarloosbaar klein is voor de Schelde.

Voor de Schelde werd door Manni (12) gesteld dat de valsnelheid van de slibvlokken niet groter is dan 0.3 mm/s, dit in tegenstelling met de in situ proeven met de Owen-tube in de toegangseul naar de Kallosluis, waar valsnelheden tussen 0.1 en 1.5 mm/s werden gemeten (6). Mulder en Udink (14) rekenen met een valsnelheid in de Westerschelde van 2 mm/s, gebaseerd op indicaties uit metingen. In het model werd deze waarde geïmplementeerd.

##### **Sedimentatie**

Hoewel slibvlokken continu uitzakken, houdt dit niet noodzakelijk in dat de slibvlokken worden afgezet op de bodem. Indien de snelheid van het water en



de daaruit voortvloeiende bodemschuifspanning te groot is zal het afzetten van slibvlokken verhinderd worden. Niettemin bestaat er een grenswaarde voor de bodemschuifspanning, waaronder vlokken zich kunnen hechten aan de bodem, de kritische bodemschuifspanning voor depositie genoemd. Krone (11) stelde dat de waarschijnlijkheid dat vlokken zich hechten aan de bodem lineair varieert tussen 0 en 1 als de bodemschuifspanning afneemt van de kritische waarde naar nul :

$$S = w' c \quad (2.1)$$

met

$$w' = w \left( 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right) \quad (2.2)$$

waarin

- S : de bronterm voor sedimentatie [kg/m<sup>2</sup>s],
- c : de slibconcentratie [kg/m<sup>3</sup>],
- w : de valsnelheid van het slib [m/s],
- $\tau_{cd}$  : de kritische bodemschuifspanning voor sedimentatie [Pa].

De waarde van  $\tau_{cd}$  is afhankelijk van het soort sediment dat beschouwd wordt en kan bepaald worden uit een depositietest in een cirkelvormig kanaal. Bij gebrek aan reële gegevens geeft Delo (4) als grootte-orde voor de kritische bodemschuifspanning voor depositie :

$$0.06 \text{ Pa} < \tau_{cd} < 0.10 \text{ Pa} \quad (2.3)$$

Voor de Schelde werd een waarde bepaald  $\tau_{cd} = 0.07 \text{ Pa}$  (5) en  $\tau_{cd} = 0.2 \text{ Pa}$  (14). Deze laatste werd weerhouden na calibratie.

### Erosie

Erosie van slib wordt gedefinieerd als de som van de processen die maken dat afgezette deeltjes getransporteerd kunnen worden (20). Van zodra de deeltjes gemobiliseerd zijn, kunnen deze gedurende een lange tijdspanne en een grote afstand getransporteerd worden wegens hun geringe valsnelheid. Erosie van cohesief materiaal is afhankelijk van de cohesieve banden tussen de partikels en van de veranderingen die kunnen optreden in de sedimentstructuren.

De bodemschuifspanning is de voornaamste stromingskarakteristiek die het opwerpen van slibdeeltjes beheerst. De weerstand tegen opwerpen is

afhankelijk van onder meer de sedimentsamenstelling, de eigenschappen van het poriënwater (saliniteit, Sodium Adsorption Ratio, pH en temperatuur), de wijze waarop het bodemsediment is afgezet en de consolidatiegraad. Globaal kunnen 3 types van erosie worden onderscheiden (13):

1. oppervlakte erosie, waarbij de slibvlokken op successieve wijze in suspensie komen,
2. massa erosie, waarbij grote gedeelten van de bodem losgerukt worden als gevolg van hoge bodemschuifspanningen (een typisch verschijnsel in gebieden met hoge getijsnelheden),
3. opwervelen van een stationaire slibsuspensie, waarbij 'fluid mud' aan hoge snelheden in de waterkolom geresuspendeerd wordt.

De mate waarin slib geërodeerd wordt, is afhankelijk van de bodemschuifspanning en de kritische bodemschuifspanning voor erosie. Algemeen mag worden aangenomen dat de erosiesnelheid (rate of erosion) onafhankelijk is van de sedimentconcentratie in de eroderende stroming (15). Partheniades (16) formuleerde een lineair verband tussen erosie en erosiesnelheid :

$$E = M \left( \frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

waarin

- M : de erosiesnelheidsconstante [kg/m<sup>2</sup>s],  
 E : de bronterm voor erosie [kg/m<sup>2</sup>s],  
 $\tau_{ce}$  : de kritische schuifspanning voor erosie [Pa].

Later onderzoek wijst eerder op een formulering waarbij  $M/\tau_{ce}$  constant is (4), (17) en een waarde heeft van  $\pm 0.002$  s/m.

Voor de Schelde werden de volgende waarden gevonden (14):

$$5 \cdot 10^{-5} < M < 7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s} \quad (2.5)$$

#### 2.4.3. Calibratie van het model

Een moeilijkheid bij de calibratie van het model was het gebrek aan metingen. Meer bepaald bleek het uiterst moeilijk om de hoeveelheid en de plaats van slibafzettingen in het bestudeerde gebied te kwantificeren. De slibafzetting in



de toegangsgeul van Zandvliet-Berendrecht wordt niet permanent gemeten omwille van de drukke scheepvaart. Omwille van de scheepvaart wordt permanent gebaggerd met niet conventionele technieken, waarbij het slib verplaatst wordt naar de Schelde.

Concrete sedimentatiegegevens dienen bijgevolg afgeleid te worden uit b.v. gegevens van de Kallosluis. In de toegangsgeul tot de Kallosluis is de gemiddelde dagelijkse sedimentatie ongeveer 1.4cm. Over de hele oppervlakte betekent dit dan een sedimentatie van 4000 m<sup>3</sup> per dag. Jaarlijks wordt er dan ongeveer 1.5 miljoen m<sup>3</sup> slib afgezet (22). Omdat de oppervlakte van de toegangsgeul naar de Kallosluis (29 ha) van dezelfde grootte is als deze van de Zandvliet- en Berendrechtsluis (35.2 ha) kan worden aangenomen dat daar de sedimentatie ook van dezelfde grootte orde is.

Tijdens de baggerwerken voor de bouw van de Berendrechtsluis werd een slibvang uitgegraven met een maximale diepte van 21.5 m TAW. Tussen 23/3/87 en 13/2/89 werden regelmatig peilingen uitgevoerd. De sedimentatie van slib concentreerde zich vooral in de slibvang. In de slibvang werd een afzettingssnelheid van 4 tot 6 cm per dag met extrema tot 25 cm per dag gemeten. In de rest van de toegangsgeul was de sedimentatie geringer, i.e. 1 tot 2 cm per dag. Indien aangenomen wordt dat de gemiddelde sedimentatie in de toegangsgeul overeenstemt met de waarden gemeten buiten de slibvang dan bedraagt de dagelijkse sedimentatie 3500 tot 7500 m<sup>3</sup>. Tijdens één jaar sedimenteert er dan tussen 1.3 en 2.6 miljoen m<sup>3</sup> slib. Bij een densiteit van 1.15 t/m<sup>3</sup> zijn deze cijfers gelijk aan een sedimentatie van 2.4 tot 4.9 kg/m<sup>2</sup> *per dag*.

Om toch een mogelijkheid te hebben om het model te controleren werd de berekende slibconcentratie vergeleken met meetwaarden tijdens diverse 13-uursmetingen. Uit deze vergelijking (zie figuur 2.7) blijkt dat de berekende slibconcentratie dezelfde grootte orde heeft als de gemeten waarden. Meer in detail kan worden gesteld dat aan de oppervlakte de slibconcentratie wordt overschat door het model en aan de bodem wordt onderschat. Dit heeft uiteraard te maken met de beperkte resolutie van het model, dat het slibtransport slechts in 4 lagen simuleert, terwijl tijdens de metingen in 8 punten over de verticaal werd gemeten tot op 0.5 m boven de bodem. Belangrijker dan deze lokale verschillen is evenwel dat de gemiddelde slibconcentratie over de verticaal goed wordt weergegeven door het model.

### 3. UITGEVOERDE SIMULATIES

#### 3.1. Definitie en beperkingen van de simulaties

Voor het uitvoeren van de simulaties met de mathematische modellen werd geopteerd om meerdere getijcycli te berekenen, zodat elke invloed van de beginvoorwaarden geëlimineerd is. Voor elke berekening werd de gepaste bodemschematisatie opgesteld, daarnaast werden een snelheidsrandvoorwaarde (aan de opwaartse rand) en een waterstandstandsrandvoorwaarde. Voor de simulaties met het slibtransportmodel werden de berekende waterstanden en snelheden in elk knooppunt gebruikt, samen met de opgelegde slibconcentratie tijdens eb (ter hoogte van Doel) en vloed (t.h.v. de Belgisch-Nederlandse grens).

Er wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de tijvoortplanting niet noemenswaardig zal gewijzigd worden door de bouw van de containerkaai noord, wat gerechtvaardigd is op basis van het oriënterend onderzoek (23).

Ook de invloed van het volledige verdiepingsprogramma (19) op het hydraulisch en morfologisch regime van de Schelde werd niet in rekening gebracht. Dit betekent dat de randvoorwaarden zowel voor het hydraulisch als voor het slibtransport ongewijzigd blijven (zoals in de huidige toestand). Het onderzoek naar de invloed van het verdiepingsprogramma, of naar het bergen van slib vergt een uitbreiding van het studie- en modelgebied tot het volledig getijgebied van de Schelde, wat buiten het bestek van de opdracht lag.

#### 3.2. Beschrijving van de simulaties

Tijdens de studie werden diverse simulaties uitgevoerd met een verschillend karakter :

1. Vooreerst werd de **huidige toestand** van de Schelde gesimuleerd als uitgangspunt voor verdere vergelijkingen : deze simulatie gebeurde voor **springtij** en bij **hoge saliniteitswaarden** op de Schelde. De getijamplitude bedroeg 5.42 m, de horizontale saliniteitsgradiënt bedroeg 0.40 ppt/km.
2. vervolgens werd de **huidige toestand** gesimuleerd bij **doodtij** en eveneens bij **hoge saliniteit**. De getijamplitude bedroeg 3.91 m.



3. verder de huidige toestand bij springtij en lage saliniteit, de horizontale saliniteitsgradiënt bedroeg 0.20 ppt/km.
4. de huidige toestand bij springtij zonder saliniteit.
5. en tenslotte de toestand na het bouwen van de noordelijke containerkaai en het verdiepen van de vaargeul tot -13.3 m GLLWS. Hiertoe werd uit de verschillende alternatieve inplantingen van de kaaimuur **alternatief 9** gesimuleerd. Deze simulatie gebeurde bij **springtij** en **hoge saliniteit**. De bodemligging voor deze simulatie kan als volgt worden omschreven. Over een breedte van 80 m werd de vaargeul over de volledige lengte van de kaaimuur verdiept tot -14.0 m GLLWS. Tevens werd de diepte in de vaargeul aangepast volgens plan C3.526 van de Antwerpse Zeehavendienst. Gezien het groot aantal mogelijke combinaties voor de inplanting van de zwaaicirkels werd gekozen voor een verdieping van de vaargeul tot -13.3 m GLLWS afwaarts van de zwaaicirkel ter hoogte van het licht van Ouden Doel (opwaarts de containerkaai zuid). Naar opwaarts toe werd vanaf de Drempel van Frederik tot de zwaaicirkel ter hoogte van de containerkaai west nog geen verdieping ingebouwd. Volgende zwaaicirkels werden beschouwd:
  - afwaarts de containerkaai noord:  $x = 14100$  m,  $y = 227125$  m en  $r = 300$  m,
  - ter hoogte van de toegangsgeul naar de Zandvliet- en Berendrechtssluis:  $x = 14300$  m,  $y = 226310$  m en  $r = 300$  m,
  - opwaarts van de containerkaai zuid:  $x = 143800$  m,  $y = 224400$  m en  $r = 250$  m.

In figuur 3.1 is de bathymetrie en geometrie volgens alternatief 9 weer-gegeven.

#### 4. RESULTATEN VAN HET MODELONDERZOEK

##### 4.1. Hydraulica

##### 4.1.1. Het stromingspatroon in de toegangsgeul

Het gebruik van het mathematisch stromingsmodel laat toe de lokale en ogenblikkelijke informatie die vergaard wordt tijdens stroommetingen uit te breiden tot een globaal stroombeeld in de toegangsgeul en de directe omgeving van de noordelijke containerkaai. De kwalitatieve beschrijving van het stromingspatroon in de toegangsgeul kan als volgt worden samengevat :

- **begin van de vloed (5-4 uur voor HW)**  
Het water stroomt de toegangsgeul binnen in de bovenlaag. De saliniteit in de toegangsgeul is nog laag. Het zoutere water uit de toegangsgeul stroomt aan de bodem terug naar de rivier.
- **rest van de vloed (3 uur voor HW - HW)**  
Omstreeks 3 uur voor HW heeft het zoutere water, afkomstig uit de zee de toegangsgeul bereikt, daardoor keert de stroming om. Het zoutere water stroomt de toegangsgeul binnen langs de bodem en het zoetere water verlaat de toegangsgeul in de bovenlaag in noordelijke richting. Van zodra het uitstromend water de rivier bereikt heeft, wordt het meegevoerd naar opwaarts.
- **begin van de eb (1-2 uur na HW)**  
De saliniteit bereikt nu haar maximum in de rivier. In de toegangsgeul is echter nog zoetere water aanwezig. Een neer ontstaat over bijna heel de waterkolom, draaiend in uurwijzerzin. De grootste instroming gebeurt aan de bodem. Het water wordt nu in een spiraalvormige beweging naar de oppervlakte getransporteerd, waar het de toegangsgeul verlaat.
- **rest van de eb (3-6 uur na HW)**  
De neer in uurwijzerzin blijft behouden, doch de spiraalvormige beweging keert zich om. Zoetere water wordt via een neerwaartse beweging naar de bodem getransporteerd. Het zoutere water in de onderlaag verlaat de toegangsgeul.



Het typisch stromingspatroon tijdens vloed (2 uur voor HW) en tijdens eb (4 uur na HW) is weergegeven de figuren 4.1 en 4.2. Een samenvatting van de stroming in een dwarssectie van de toegangseul (zie figuur 2.4) is weergegeven in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kwalitatief overzicht van de stroming in de toegangseul (uit = naar Schelde, in = naar sluizen, ? = geen eenduidige richting).

Tijd t.o.v. HW	Zuid		Noord	
	boven	onder	boven	onder
5 voor	in	uit	in	in
4 voor	in	uit	in	?
3 voor	uit	uit	uit	uit
2 voor	uit	in	uit	in
1 voor	uit	in	uit	in
0	uit	in	uit	in
1 na	uit	in	uit	in
2 na	uit	?	uit	in
3 na	uit	uit	?	in
4 na	uit	uit	in	in
5 na	uit	uit	in	in
6 na	?	uit	in	in

De stroming in de toegangseul blijft onder alle getijomstandigheden klein: zowel bij springtij als bij doortij, bij hoge of bij lage saliniteit blijven de snelheden beperkt tot 0.2 tot 0.3 m/s. Dit betekent dat het water dat de toegangseul binnenkomt of verlaat nooit snel genoeg stroomt om erosie van slib te kunnen veroorzaken. Bij lage saliniteitswaarden daalt de snelheid in de toegangseul met 5% tot 10% t.o.v. de situatie met hoge saliniteit. Bij afwezigheid van een saliniteitsgradiënt is de stroming in het grootste deel van de toegangseul verwaarloosbaar klein tijdens vloed. Tijdens eb zijn de snelheden groter ( $\pm 0.1$  m/s) ten gevolge van de aanwezigheid van een neer.

#### 4.1.2. De vorm van de snelheidsverticalen

Op de Schelde wijkt de vorm van de snelheidsverticalen af van het theoretisch logaritmisch profiel. Tijdens vloed treedt de maximale snelheid niet op aan het oppervlak, aangezien de longitudinale zoutgradiënt een tegenovergestelde invloed heeft als de getijstroming. Tijdens eb daarentegen versterkt de zoutgradiënt de getijstroming, waardoor het snelheidsprofiel voller wordt. Ter illustratie worden in figuur 4.3 de snelheidsverticalen uitgetekend bij maximale eb en vloed. Aanvullend wordt ook geïllustreerd hoe tijdens kentering de stroming in 2 tegengestelde richtingen gaat.

In de toegangsgeul is de structuur van de snelheidsverticalen complexer. De aanwezigheid van een neer, gecombineerd met de wateruitwisseling ten gevolge van dichtheitsverschillen maakt dat in de toegangsgeul de stroming in de boven- en de onderlaag meestal in tegenovergestelde richting staat. De dikte van deze lagen is niet eenduidig definieerbaar, maar verandert in de loop van het getij. De stroming bij afwezigheid van een saliniteitsgradiënt is nagenoeg constant over de verticaal zodat er geen tweelagen stroming meer optreedt.

#### 4.1.3. De wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de rivier

Zoals hoger gezegd, wordt de wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de Schelde veroorzaakt door :

1. de vulling en lediging door het getij,
2. een neer die ontstaat door de langstreckende stroming in de Schelde,
3. dichtheitsstromingen die veroorzaakt worden door de zoutverschillen in de Schelde gedurende het getij,
4. randeffecten (kaaimuren).

Door het instromend en uitstromend debiet door de meetraai aan de ingang van de toegangsgeul te integreren over een getij werd het totaal volume instromend water berekend. Een vergelijking met het getijvolume laat toe om na te gaan in welke mate de horizontale wateruitwisseling, als gecombineerd effect van neervorming en dichtheitsstroming, de dominerende factor is.

Tijdens springtij bedroeg de wateruitwisseling als gevolg van het getij (komberging)  $1.88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  en bij doodtij  $1.40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , terwijl de totale wateruitwisseling (komberging + horizontale uitwisseling) ongeveer  $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  bedraagt. In tabel 4.2 wordt de wateruitwisseling samengevat voor de



verschillende omstandigheden. Hieruit kunnen volgende conclusies worden getrokken :

1. De totale wateruitwisseling (neer en saliniteit) is een factor 10 tot 12 groter dan de verticale (komberging). Vroegere analyses voor de toegangsgeul van de Zandvlietsluis gaven een verhouding aan van 20 tot 25.
2. De grootte van de horizontale saliniteitsgradiënt heeft een invloed op de totale wateruitwisseling. Bij een lagere saliniteit is de uitwisseling van water tussen de toegangsgeul en de rivier met ongeveer 16% en zonder saliniteit met ongeveer 50% verminderd t.o.v. de toestand bij een hoge saliniteit.
3. De densiteitseffecten veroorzaakt door de aanwezigheid van een horizontale saliniteitsgradiënt spelen een voorname rol bij de wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de rivier.
4. De saliniteit heeft een grotere invloed dan de verschillen in getij. Zo is bij doortij met een hoge saliniteit de wateruitwisseling groter dan bij springtij met een lage saliniteit.
5. Door de bouw van de containerkaai gaat er  $\pm 6\%$  meer water de toegangsgeul binnenstromen.
6. De gemiddelde hoeveelheid water (overeenkomend met halftij) in de toegangsgeul tijdens springtij bedraagt ongeveer 5.5 miljoen m<sup>3</sup> en tijdens doortij ongeveer 5.2 miljoen m<sup>3</sup>. Dit betekent dat tijdens één springtijcyclus bij een hoge saliniteit het water 3.6 keer 'ververst' wordt. Tijdens één springtijcyclus bij een lage saliniteit is dit 3.0 keer en tijdens één doortijcyclus bij een hoge saliniteit 3.3 keer. Tijdens één springtijcyclus zonder saliniteit wordt het water slechts 1.7 keer ververst.

Tabel 4.2 Wateruitwisseling (in miljoen m<sup>3</sup>) tussen de toegangsgeul en de rivier tengevolge van verticale (komberging) en horizontale (neer en saliniteit) waterbewegingen (HT: huidige toestand, A9: alternatief 9 containerkaai noord, totaal = komberging + horizontaal).

Simulatie	Komberging	Totaal
HT: springtij hoge saliniteit	1.88	19.89
HT: doortij hoge saliniteit	1.40	17.15
HT: springtij lage saliniteit	1.88	16.65
HT: springtij geen saliniteit	1.88	9.35
A9: springtij hoge saliniteit	1.88	20.99

#### 4.1.4. De invloed van de noordelijke containerkaai

De resultaten van het 3D modelonderzoek bevestigen deze van het 2D hydraulisch onderzoek : door de bouw van de containerkaai wijzigt het stroombeeld over de volledige breedte. Meer specifiek blijkt dat in een smalle zone langsheen de containerkaai de snelheid vergroot, terwijl over de rest van de breedte de snelheid afneemt. Ook in de toegangsgeul is het effect merkbaar. Uit de berekeningen blijkt dat vooral in het noordelijk deel van de toegangsgeul tijdens de vloed (vanaf ongeveer 2 uur voor HW) het water gemakkelijker de toegangsgeul binnenstroomt. Dit is plausibel omwille van de verdieping van de vaargeul enerzijds en de geleiding naar de toegangsgeul toe door de containerkaai. Het globale stroombeeld zoals beschreven in § 4.1.1. wordt door de bouw van de containerkaai niet gewijzigd.

Met betrekking tot de wateruitwisseling kan worden gesteld dat de bouw van de containerkaai aanleiding geeft tot een toename van de wateruitwisseling met ongeveer 6%.

## 4.2. Saliniteit

### 4.2.1. Inleiding

De Schelde wordt beschouwd als een goed gemengd tot gedeeltelijk gestratificeerd estuarium. Het zoutgehalte in de rivier is variabel, de twee belangrijkste factoren zijn enerzijds het getij en anderzijds de bovenafvoer van de rivier. Grote bovendebieten treden op in de winter. Tijdens de zomer is het bovendebiet geringer en dringt het zout dus verder de rivier binnen. Wegens de optredende faseverschuiving in de seizoensgebonden variaties zijn de hoge zoutwaarden waarneembaar in de herfst, terwijl lage zoutwaarden op het einde van de winter en begin van de lente optreden.

De variatie van saliniteit tijdens een getij en het gemiddeld verschil in saliniteit tussen oppervlakte en bodem zijn maximaal in het gebied tussen Bath en Doel.

### 4.2.2. Horizontale saliniteitsgradiënt

De horizontale saliniteitsgradiënt tussen Bath en Doel is grootte orde 0.25 g/l Cl per kilometer ( $\pm 0.45$  ppt/km).



In tabel 4.3 wordt een overzicht van de metingen van 1979 gegeven. De saliniteit en de horizontale saliniteitsgradiënt variëren met de seizoenen. Tijdens hoge saliniteitswaarden is de saliniteitsgradiënt tussen Prosperpolder en Liefkenshoek (ongeveer de uitgestrektheid van het model) ongeveer 0.48 ppt/km, terwijl tijdens lage saliniteiten de gradiënt afneemt tot  $\pm 0.20$  ppt/km. Uit deze metingen is het niet mogelijk de horizontale gradiënt nauwkeurig te bepalen, gezien de variaties in het zoutgehalte over een dwarssectie. De boven genoemde waarden voor de saliniteitsgradiënt moeten daarom als benaderingen beschouwd worden.

Tabel 4.3 Saliniteitsmetingen 1979, maandelijks gemiddelde waarden. (Pp = Prosperpolder, Lh = Liefkenshoek, Aw = Antwerpen,  $\Delta$  = horizontale saliniteitsgradiënt)

	Pp [ppt]	Lh [ppt]	Aw [ppt]	$\Delta(Pp-Lh)$ [ppt/km]	$\Delta(Lh-Aw)$ [ppt/km]
jan	10.84	8.13	2.89	0.38	0.37
feb	7.41	5.42	1.63	0.28	0.26
mar	5.96	3.61	1.26	0.33	0.16
apr	7.23	4.70	1.99	0.36	0.19
mei	8.13	5.96	2.17	0.30	0.26
jun	9.76	7.05	2.53	0.38	0.31
jul	13.73	10.84	4.70	0.41	0.30
aug	15.72	12.65	5.96	0.43	0.46
sep	17.52	14.09	7.77	0.48	0.44
okt	18.79	15.54	8.49	0.46	0.49
nov	16.26	12.65	5.42	0.51	0.50
dec	10.30	7.59	2.53	0.38	0.35
jaar	11.74	9.03	3.97	0.38	0.35

#### 4.2.3. Saliniteitsgradiënt in een dwarssectie

Ter hoogte van Prosperpolder kan de saliniteitsgradiënt in een dwarssectie oplopen tot 1 g/l Cl (1.8 ppt). Uitzonderlijk zijn waarden tot 1.5 g/l (2.7 ppt) gemeten, zie (1).

#### 4.2.4. Verticale saliniteitsgradiënt

De verticale saliniteitsgradiënt in de rivier is meestal klein en beperkt tot  $\pm 0.5$  g/l Cl ( $\pm 1$  ppt) uitgezonderd tijdens saliniteitsmaximum (2 uur na kentering hoogwater), de waarden kunnen dan oplopen tot 1.5 g/l Cl (2.7 ppt).

In de toegangsgeul is altijd een duidelijke verticale saliniteitsgradiënt aanwezig. Het verschil in zoutgehalte tussen oppervlakte en bodem is min of meer constant, enkel tijdens kentering laagwater neemt het verschil af, zie (7). Het saliniteitsverschil tussen oppervlakte en bodem bedraagt ongeveer het dubbele van deze in de Schelde en loopt aan de zuidzijde van de toegangsgeul op tot 1.5 ppt en aan de noordzijde tot 1.15 ppt. In figuur 4.4 worden de saliniteitsverschillen duidelijk geïllustreerd. Uit de figuur blijkt ook dat tijdens eb er nog nauwelijks sprake is van gelaagdheid aan de noordzijde van de toegangsgeul.

Zowel de horizontale, de verticale als de gradiënt in de dwarssectie kunnen teruggevonden in de simulaties. In de figuren 4.5-4.8 wordt de zoutverdeling weergegeven op het moment van maximale en minimale saliniteit, dit is respectievelijk ongeveer 2 uur na HW en 5 uur voor HW. Op het moment van maximale saliniteit kan de invloed van het leegstromen van de toegangsgeul via de bovenlaag mooi teruggevonden worden in de "zoet-waterlens" die zich uitstrekt tot aan de leidam van de Ballastplaat. In de toegangsgeul is op dat moment de zoutconcentratie het kleinst in de bovenlaag en het grootst in de onderlaag (laag 4). Omstreeks de ebkentering, d.i. het moment van lage saliniteit blijkt dat het water in de toegangsgeul hetzelfde zoutgehalte heeft als in de Schelde, voor wat betreft de bovenlaag (waar water instroomt), terwijl in de onderlaag de saliniteit in de toegangsgeul beduidend groter is als op de Schelde. Tenslotte wordt er nog even op gewezen dat in deze uren de verschillende lagen in de Schelde een gelijke arcering hebben op een bepaalde plaats, wat illustreert dat de verticale gradiënt gering is, terwijl dit in de toegangsgeul geenszins het geval is.



### 4.3. Slib

#### 4.3.1. Sedimentatie van slib

Zoals uit de beschrijving van het slibtransportmodel blijkt, is de sedimentatie en/of de erosie het gevolg van de heersende stroming. Bij schuifspanningen kleiner dan de kritische waarde kunnen de slibvlokken zich hechten aan de bodem en treedt sedimentatie op. Indien de schuifspanning groter is dan de kritische schuifspanning voor erosie worden de reeds afgezette slibdeeltjes terug in suspensie gebracht. Door een analyse van de schuifspanningen kan een eerste prognose worden gemaakt over de zones waar sedimentatie en/of erosie zal optreden. In figuur 4.9 worden de maximaal optredende schuifspanningen tijdens het springtij van 4/10/90 voorgesteld. Uit de figuur blijkt dat de maximale schuifspanningen in de toegangsecul altijd kleiner zijn dan 0.2 Pa (de kritische waarde) zodat op die plaats nooit erosie zal optreden. Al het slib dat in de toegangsecul wordt afgezet blijft op de bodem liggen : resuspensie door de stroming is uitgesloten.

De sedimentatie grijpt vooral plaats langsheen de oevers, op de Plaat van Doel, in de Schaar van Ouden Doel, op de Drempel van Zandvliet en in de toegangsecul naar de Zandvliet en Berendrechtsluis, zoals geïllustreerd wordt in figuur 4.10. Het is vooral in de toegangsecul dat de slibsedimentatie het grootst is (van 2 tot meer dan 2.5 kg/m<sup>2</sup> per getij). Dit getal stemt qua grootte-orde goed overeen met de gemeten sedimentatie in de toegangsecul die 2.4 tot 4.9 kg/m<sup>2</sup> per dag bedroeg (7).

Tijdens doottij zijn de snelheden in de Schelde kleiner dan tijdens een springtij. Daardoor zullen ook de schuifspanningen kleiner worden. Dit laat vermoeden dat daardoor een grotere kans tot slibafzetting bestaat in de rivier en een geringere kans tot resuspensie. De analyse van de sedimentatie van slib geeft dit ook aan : er is meer sedimentatie in de rivier tijdens doottij. Zowel op de Plaat van Doel en in de Schaar van Ouden Doel als op de Drempel van Zandvliet verhoogt de sedimentatie t.o.v. de toestand tijdens springtij.

In de toegangsecul vermindert de sedimentatie van slib daarentegen. De oorzaak hiervan is vermoedelijk tweevoudig. Ten eerste doordat er meer slib in de rivier sedimenteert, bevat het water dat de toegangsecul binnenstroomt minder slib in suspensie en kan er dus ook minder afgezet worden. Ten tweede omdat de uitwisseling van water tussen de rivier en de toegangsecul kleiner is tijdens doottij dan tijdens springtij zodat de totale hoeveelheid slib die de toegangsecul binnenstroomt vermindert.

De invloed van de saliniteit op de afzetting van slib in de toegangsgeul en in het gebied van de Drempel van Zandvliet is gering.

Om een kwantitatieve analyse van de sedimentatie mogelijk te maken, wordt even ingegaan op de hoeveelheid slib die afgezet wordt in een aantal gebieden :

1. Toegangsgeul naar de Zandvliet- en Berendrechtsluis,
2. Drempel van Zandvliet,
3. Plaat van Doel en Schaar van Ouden Doel,
4. Vaarwater zuidelijke containerkaai.

Deze analyse heeft vooral tot doel de procentuele wijzigingen vast te stellen tussen de verschillende toestanden, eerder dan de absolute sedimentatiehoeveelheden te interpreteren. Dit betekent dat vooral aandacht geschonken aan de relatieve toename of afname van de hoeveelheid aanslibbing in bepaalde gebieden, eerder dan aan de exacte hoeveelheid afgezet slib. Om een schatting mogelijk te maken van de afgezette hoeveelheid slib, diende een hypothese te worden gesteld betreffende de in situ densiteit van het slib. Aangezien het gaat om "recent afgezet slib", maar ook om een inschatting te kunnen maken van de lange termijn afzetting (gemiddeld over een jaar), werd gerekend met een densiteit van 1.15 kg/l, zoals voor het 2D model, wat overeenstemt met een densiteit van 244 kg droge stof per m<sup>3</sup>.

In tabel 4.4 worden de resultaten van de verschillende simulaties samengebracht. Deze resultaten illustreren de mate waarin saliniteit en getijamplitude invloed hebben in de verschillende zones :

- in de toegangsgeul is de sedimentatie ongeveer 30% lager tijdens doortij dan tijdens springtij, terwijl er op de Drempel van Zandvliet juist meer afzetting is tijdens doortij dan bij springtij ( $\pm 50\%$ ).
- een vermindering van de saliniteit in de Schelde heeft zowel in de Schelde als in de toegangsgeul een geringe invloed op de sedimentatie ( $< 5\%$ ).
- in de simulatie zonder saliniteit is de afzetting in de toegangsgeul ongeveer 50% en op de Drempel van Zandvliet ongeveer 25% lager dan in de simulatie met een hoge saliniteitsgradiënt. Op de Plaat van Doel en ter hoogte van de zuidelijke containerkaai zijn de veranderingen inzake sedimentatie verwaarloosbaar.
- de berekende afzetting in de toegangsgeul schommelt tussen 1.6 (1.1 zonder



saliniteit) en 2.5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, of 550 (385 zonder saliniteit) tot 880 ton droge stof per getij. Deze getallen vallen binnen de marges die uit de beperkte metingen in situ volgen, nl. 1.3 tot 2.6 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.

#### 4.3.2. Invloed van de noordelijke containerkaai

In de zone voor de noordelijke containerkaai neemt de maximale bodemschuifspanning af, wat aanvaardbaar is aangezien er een vaargeulverdieping voorzien is en er lokaal een verruiming is van het dwarsprofiel over een breedte van 80m voor de kaai. Dit reflecteert zich in een verhoogde afzetting van slib op de Drempel van Zandvliet, zoals blijkt uit figuur 4.11. Omwille van de verdieping van de vaargeul is er ook een toename van de wateraanvoer naar de toegangsgeul, waardoor er meer slib wordt aangevoerd.

Ten gevolge van de bouw van een noordelijke containerkaai neemt de sedimentatie dus toe in het beschouwde gebied. De grootste toename in sedimentatie situeert zich op de Drempel van Zandvliet en meer bepaald langsheen de kaaimuur (+26% tot +34% t.o.v. de huidige toestand springtij). In de toegangsgeul is er een toename van de sedimentatie tijdens springtij met ongeveer 10%. Globaal betekent dit een toename met  $\pm 15\%$  voor het hele gebied van de Drempel van Zandvliet en de toegangsgeul. Dit cijfer ligt lager dan de vroegere inschatting met het 2D model.

Tabel 4.4 Sedimentatie van slib per getij en per jaar in vier gebieden (droge densiteit = 244 kg/m<sup>3</sup>) en % verschil met de simulatie 'springtij - hoge saliniteit'

TOEGANGSGEUL (1)			
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar	t/getij	%
springtij hoge saliniteit	2.29	799	-
doodtij hoge saliniteit	1.62	564	-29
springtij lage saliniteit	2.33	813	+2
springtij geen saliniteit	1.10	385	-52
containerkaai noord A9	2.49	869	+9
DREMPEL VAN ZANDVLIET (2)			
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar	t/getij	%
springtij hoge saliniteit	1.16	405	-
doodtij hoge saliniteit	1.76	614	+49
springtij lage saliniteit	1.17	407	+0
springtij geen saliniteit	0.90	313	-23
containerkaai noord A9	1.47	511	+26
PLAAT VAN DOEL (3)			
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar	t/getij	%
springtij hoge saliniteit	1.28	446	-
doodtij hoge saliniteit	2.28	794	+78
springtij lage saliniteit	1.31	455	+2
springtij geen saliniteit	1.29	448	0
containerkaai noord A9	1.33	464	+4
ZUIDELIJKE CONTAINERKAAI (4)			
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar	t/getij	%
springtij hoge saliniteit	1.34	467	-
doodtij hoge saliniteit	2.49	867	+86
springtij lage saliniteit	1.35	470	+6
springtij geen saliniteit	1.29	451	-3
containerkaai noord A9	1.43	498	+7



## 5. SAMENVATTING EN AANBEVELINGEN

### 5.1. Samenvatting

In het kader van het globale studieprogramma van de Containerkaai Noord werd op 14/10/91 door de Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, aan het studieconsortium International Marine and Dredging Consultants N.V. - Waterbouwkundig Laboratorium de opdracht verleend om het hogergenoemde hydraulisch-sedimentologisch onderzoek uit te voeren. Dit onderzoek beoogde de meest gunstige lay-out te bepalen voor een nieuwe containerkaai ten noorden van het sluizencomplex Zandvliet-Berendrecht, zodat een veilige verkeersafwikkeling en een minimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken konden bekomen worden. In dit verband bestond het laatste onderdeel van het onderzoek erin een gedetailleerde studie uit te voeren van de stroming in de toegangsgeul Zandvliet-Berendrecht en de invloed na te gaan van de bouw van een containerkaai op dit stromingspatroon en het ermee verband houdend sedimentatieproces van slib.

Aangezien dit eindrapport als dusdanig een samenvatting is van het volledig onderzoek over de interactie tussen de toegangsgeul Zandvliet-Berendrecht en de noordelijke containerkaai, worden de concrete besluiten niet meer herhaald. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 4, waar ondermeer volgende onderzoeksresultaten beschreven worden :

1. het stromingspatroon in de toegangsgeul, dat kan worden opgesplitst in 4 karakteristieke perioden;
2. de vorm van de snelheidsverticalen in de Schelde en de toegangsgeul;
3. de wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de Schelde, waarbij aandacht wordt geschonken aan de getijwerking enerzijds en de horizontale wateruitwisseling anderzijds die een factor 10 tot 12 groter is;
4. de salinitietkarakteristieken in het beschouwde gebied;
5. de sedimentatie van slib in de toegangsgeul die ongeveer 700 ton droge stof per getij bedraagt;
6. de invloed van de noordelijke containerkaai op het stromingspatroon en de slibafzetting in de toegangsgeul, welke voor de wateruitwisseling een toename geeft met  $\pm 6\%$ , en inzake slibafzetting een vermeerdering geeft van ongeveer 10%.

Om tot deze resultaten te komen werd gebruik gemaakt van mathematische modellen. Meer specifiek werd een 3-dimensionaal hydrodynamisch model op punt gezet vanaf de Belgisch-Nederlandse grens tot Doel, dat toelaat om naast de getijwerking ook dichtheitsstromingen onder invloed van variërende zoutgehalten te simuleren. De berekeningsresultaten van dit model werden vervolgens gebruikt als basisgegevens voor een 3D simulatiemodel van het slibtransport, de sedimentatie en de erosie van slib. Om tot betrouwbare prognoses te komen, werden de modellen geïjkt door een grondige vergelijking van de rekenresultaten met beschikbare meetgegevens in de Schelde.

## 5.2. Aanbevelingen

Om de onzekerheidsmarge met betrekking tot de aanslibbing in de toegangsgeul te kunnen verkleinen en om de prognoses met betrekking tot de invloed van de noordelijke containerkaai na te kunnen gaan, lijkt het aangewezen bijkomende gegevens te verzamelen met behulp van aanvullende metingen. Deze metingen omvatten zowel veldmetingen in de Schelde en de toegangsgeul, als onderzoek in het laboratorium. Na het uitvoeren van de nodige metingen kunnen de modelparameters worden geactualiseerd, en dienen nieuwe validatiesimulaties met de mathematische modellen te worden uitgevoerd. Zonder limitatief te zijn, kunnen volgende in situ metingen worden aanbevolen :

1. Opvolgen van de aanslibbing in de toegangsgeul in de huidige toestand, tijdens de bouw van de containerkaai en na de afwerking van de containerterminal. Deze metingen dienen te worden uitgevoerd met een regelmatige frequentie, zodat verschilkaarten kunnen worden opgesteld. De meetfrequentie dient te worden opgevoerd in periodes waarin er geen onderhoudsbaggerwerken plaatsvinden.
2. Het opvolgen van het consolidatieproces in de toegangsgeul door het uitvoeren van continue dichtheitsmetingen.
3. Opvolgen van de aanslibbing in de ruime omgeving van de noordelijke containerkaai in de huidige toestand, tijdens de bouw van de containerkaai en na de afwerking van de containerterminal. Deze metingen laten ondermeer toe de invloed van de containerkaai na te gaan in de Schaar van Ouden Doel, op de Ballastplaat en in het vaarwater rond de Drempel van Zandvliet.



4. Het karakteriseren van de onderwaterbodem in de omgeving van Zandvliet en meer algemeen in de Beneden Zeeschelde. Dit houdt in dat op een regelmatig rooster via monsternamen de slib- en zandpercentages in de bodem worden bepaald, gekoppeld aan een granulometrische verdeling en een fysico-chemische karakterisatie. Dit moet toelaten om de onderwaterbodem gedifferentieerd te beschrijven in het model ten opzichte van de huidige uniforme karakterisatie.
5. Het monitoren van de slibconcentratie, de saliniteit en de snelheid in een aantal vaste meetpunten langs de Schelde. Dit moet toelaten de evolutie van de slibconcentratie te volgen in functie van de algemene ontwikkelingen in het Scheldebekken en de bouw van de containerkaai in het bijzonder en in functie van de bovenafvoer en de daaraan gekoppelde zout/zoet langsgradiënt in de Zeeschelde.
6. Het bepalen van de slibfluxen naar de toegangsgeul en in een aantal karakteristieke dwarssecties. Dit moet toelaten het beeld van het stromingspatroon zoals dit momenteel gekend is, uit te breiden tot een beeld van de slibbewegingen in het onderzoeksgebied. Gezien de invloed van getijamplitude en de saliniteit zijn diverse meetcampagnes vereist.
7. Het bepalen van de bodemruwheid, waarbij de hoogte van de zandrippels wordt opgemeten, eventueel aangevuld met een evaluatie van de variabiliteit van de rippels in functie van het getij.

Het laboratoriumonderzoek dient zich ondermeer toe te spitsen op :

1. Het nader analyseren van het flocculatiegedrag van de slibpartikels, met aandacht voor de invloed van de saliniteit, de turbulentie en de slibconcentratie op de valsnelheid.
2. Het bepalen van de erosie- en sedimentatiekarakteristieken van het slib. Hierbij dient ondermeer de invloed van de consolidatiegraad te worden geanalyseerd alsook de invloed van de aanwezigheid van een zand/slibmengsel als bodemmateriaal, overeenkomstig de hogervermelde karakterisatie van het bodemsediment. Dergelijke proeven kunnen ondermeer worden uitgevoerd met behulp van een carouselproef.

Het spreekt voor zichzelf dat het op punt stellen van het laboratoriumonderzoek, het uitvoeren van de in situ metingen en het verfijnen van de mathematische

modellen geen doel op zich zijn. Elk van deze onderzoeken levert een specifieke bijdrage tot het doorgronden van het slibtransport in de zone van het turbiditeitsmaximum in de Zeeschelde en tot het karakteriseren van het aanslibbingsmechanisme van de toegangseul Zandvliet-Berendrecht. Uiteraard kan de verworven know-how worden gebruikt bij het evalueren van maatregelen die de aanslibbingsnelheid kunnen verminderen of bij het zoeken naar efficiënte methoden voor de onderhoudsbaggerwerken.

Vervolgens kunnen de verworven kennis en de opgezette modellen worden gebruikt om tot een globaal beheer van het estuarium te komen, waarbij de diverse functies van de rivier worden gerespecteerd. Tenslotte, en niet in het minst kunnen de lokale onderzoeksprocedures en de gebruikte modellen worden ingezet voor de analyse van de aanslibbingsproblematiek in andere toegangseulen.



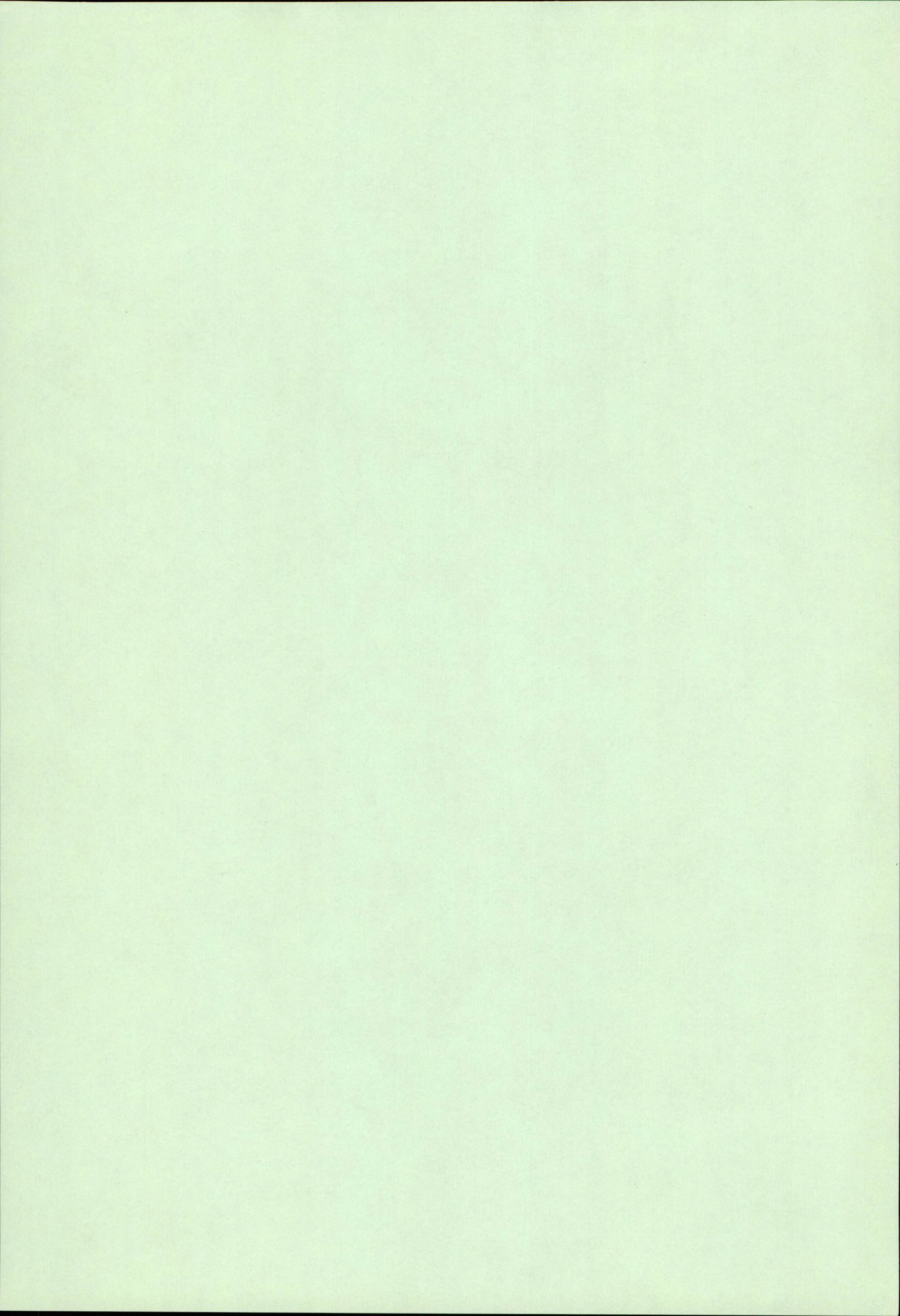
---

**LITERATUURLIJST**

- (1) Antwerpse Zeehavendienst (1981). Zeeschelde Chloridegehalte 1979. Verslag Nr. 81/13.
- (2) Antwerpse Zeehavendienst (1993). Metingen met een ADCP in een dwarssectie ter hoogte van de toegangsgeul van de Zandvliet- en Berendrechtsluis.
- (3) Claessens J. en J.Marain (1988). Access Channel to the Kallo Lock, Research of Alternating Dredging Methods. KVIV, 9<sup>th</sup> Int. Harbour Congress. pp.4.189-4.200.
- (4) Delo, A. (1988). Estuarine Muds Manual. Hydraulics Research Wallingford, SR 164.
- (5) Hydraulics Research Wallingford (1980). River Scheldt Surge Barrier - Study of Estuarine Sediments. Report No. Ex 928.
- (6) I.M.D.C. (1988). Optimalisatie van de Onderhoudsbaggerwerken in de Toegangsgeul naar de Kallosluis - Mathematisch Model SLIBTRANS. Rapport Nr. 906-88.01.02.
- (7) I.M.D.C. (1990). Toegangsgeul Zandvliet-Berendrechtsluis. Meetcampagne t.b.v. de Baggerwerken. Eindrapport.
- (8) I.M.D.C. (1991). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek, Deelrapport 1, Stroom- en Sedimentmeting 27/09/90. Nr. 1166-92.01.02.
- (9) I.M.D.C. (1991). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek, Deelrapport 2, Stroom- en Sedimentmeting 04/10/90. Nr. 1166-92.01.04.
- (10) I.M.D.C. (1991). Containerkaai Noord - Hydraulisch Onderzoek, Eindrapport. Rapport Nr. 1146-91.12.08.
- (11) Krone, R.B. (1962). Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarine Shoaling Processes. Tech. Report Hydr. Laboratory, University of California, Berkeley California.

- 
- (12) Manni, R.J. (1986). Slibtransport en Slibbalans in de Westerschelde. Reeks Westerscheldestudies, Rapport Nr. 4, Rijkswaterstaat - Vlissingen.
- (13) Mehta, A.J., E.J. Hayter, W.R. Parker, R.B. Krone and A.M. Teeter (1989). Cohesive Sediment Transport. I Process Description and II Applications. ASCE J. Hydr. Eng., Vol 115, No. 8, 1076-1112.
- (14) Mulder, H.P.J. and C. Udink (1990). Modelling of Cohesive Sediment Transport. A Case Study: The Western Scheldt Estuary. Int. Conf. on Coastal Engineering, 2-6 July 1990.
- (15) Odd, N. and M. Owen (1972). A Two-Layer Model of Mud in the Thames Estuary. Proc. of the Institution of Civil Eng., Paper 7517S.
- (16) Partheniades, E. (1962). A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water, PhD Thesis, University of California.
- (17) Puls, W. (1984). Erosion Characteristics of Estuarine Muds. Hydraulics Research Wallingford, IT 265.
- (18) Sas, M. en J.Claessens (1988). The Impact of Flow Pattern and Sediment Transport on Maintenance Dredging in the Kallo Access Channel, 9<sup>th</sup> Int. Harbour Congress. pp.4.111-4.120.
- (19) Technische Scheldecocomissie (1984). Verdieping Westerschelde - Studierapport - Programma 48'/43'. Middelburg, Antwerpen.
- (20) Teeter, A.M. (1992). Erosion of Cohesive Dredged Material in Open-Water Disposal Sites. DRP-1-07. US Army Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- (21) Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (1971). De Aanslibbing en de Aanzanding van de Toegangsgeul tot de Zeesluis van Zandvliet, Mod. 277.
- (22) Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (1983). Toegangsgeul Zeesluis Kallo, Evolutie van het Bodempeil Periode 1/6/82 - 1/8/83, MOD 302/3-1.
- (23) Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (1990). Containerterminal ten Noorden van de Zandvlietsluis, Oriënterend Modelonderzoek. Mod. 481/1.





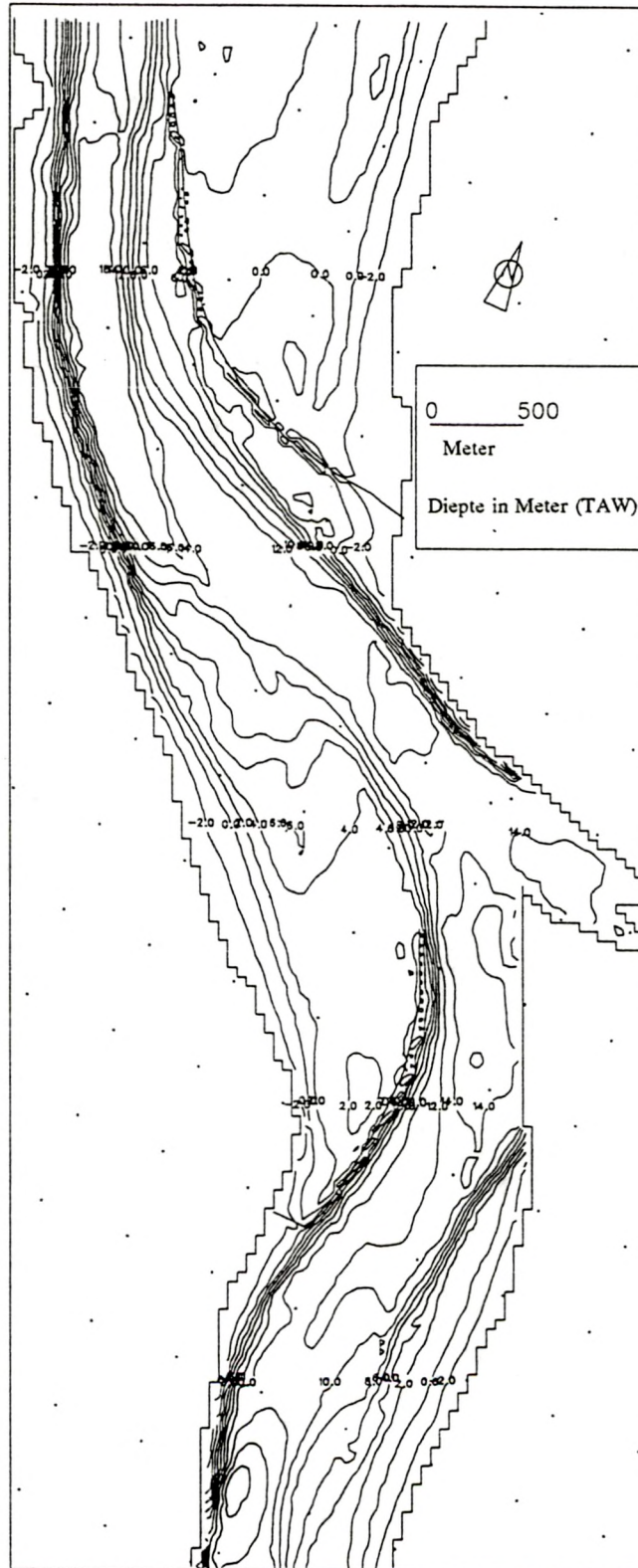


## LIJST van FIGUREN

- 2.1 Bathymetrie mathematisch model - Huidige Toestand.
- 2.2 Ligging van de meetpunten van 27/9/90 en 4/10/90.
- 2.3 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten snelheden in de meetpunten 4/10/90.
- 2.4 Vaarroute ADCP meting, toegangsgemaal Zandvliet-Berendrechtshuis.
- 2.5 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten snelheden (ADCP) 5 uur voor HW in een dwarssectie van de toegangsgemaal naar de Zandvliet- en Berendrechtshuis.
- 2.6 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten snelheden (ADCP) 1 uur na HW in een dwarssectie van de toegangsgemaal naar de Zandvliet- en Berendrechtshuis.
- 2.7 Vergelijking berekende (HT-springtij hoge saliniteit) en gemeten slibconcentratie in de meetpunten van 4/10/90.
  
- 3.1 Bathymetrie mathematisch model Alternatief 9.
  
- 4.1 Berekend stromingspatroon (HT-springtij hoge saliniteit) in de toegangsgemaal tijdens vloed (2 uur voor HW).
- 4.2 Berekend stromingspatroon (HT-springtij hoge saliniteit) in de toegangsgemaal tijdens eb (4 uur na HW).
- 4.3 Berekende snelheidsverticalen (HT-springtij hoge saliniteit) in meetpunt 1 (meting 4/10/90) tijdens maximale eb, maximale vloed en kentering.
- 4.4 Berekende verticale saliniteitsverschillen (HT-springtij hoge saliniteit) in de toegangsgemaal.
- 4.5-6 Berekende saliniteitsverdeling (HT-springtij hoge saliniteit) omstreeks maximale saliniteit (2 uur na HW).
- 4.7-8 Berekende saliniteitsverdeling (HT-springtij hoge saliniteit) omstreeks minimale saliniteit (5 uur voor HW).
- 4.9 Berekende (HT-springtij hoge saliniteit) maximale bodemschuifspanningen.
- 4.10 Berekende (HT-springtij hoge saliniteit) sedimentatie van slib tijdens één getijdencyclus.
- 4.11 Berekende (A9-springtij hoge saliniteit) sedimentatie van slib tijdens één getijdencyclus.



# Huidige Toestand Bathymetrie (m TAW)

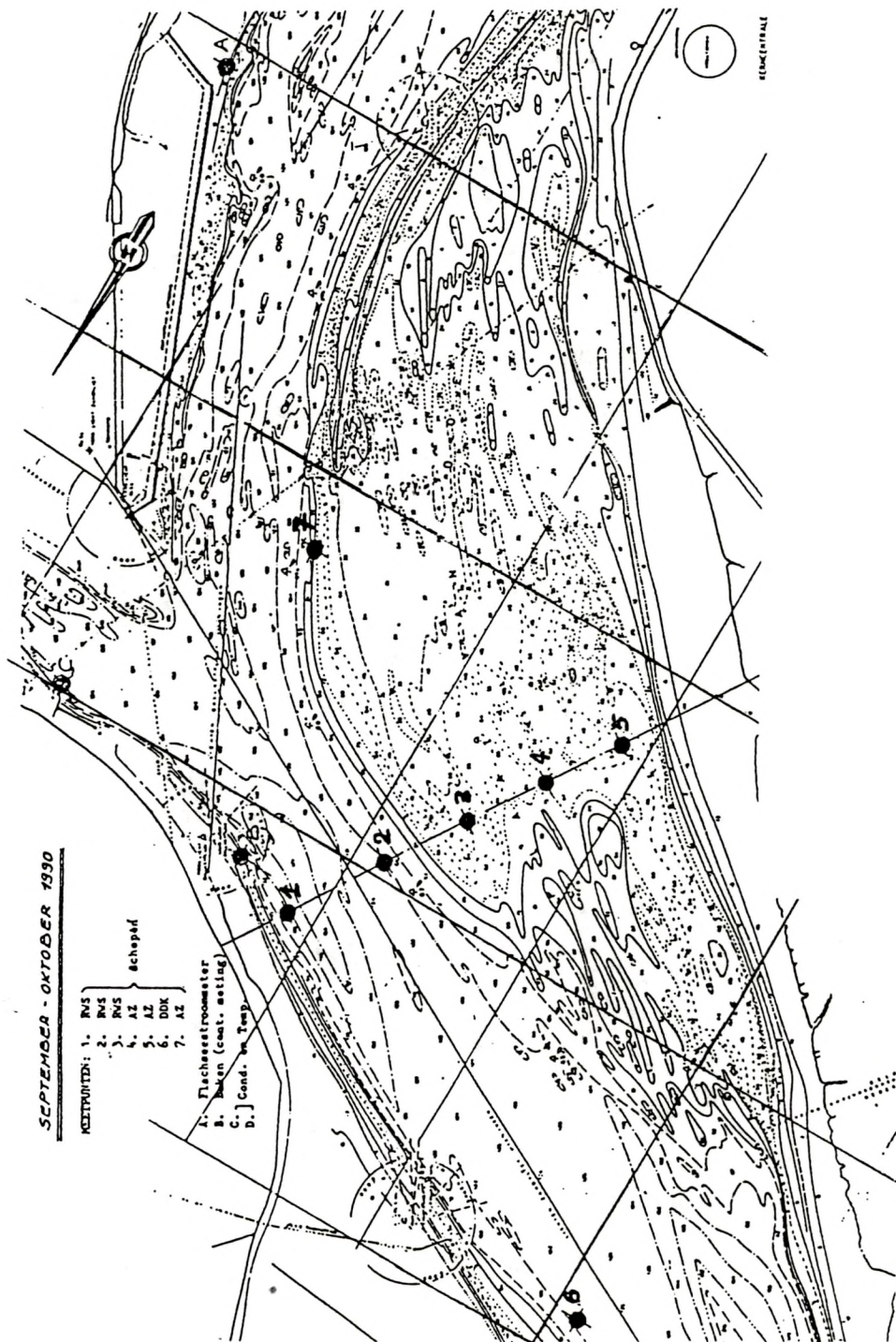


CONSORTIUM



Figuur 2.1

Ligging Meetpunten 27/9/90 en 4/10/90



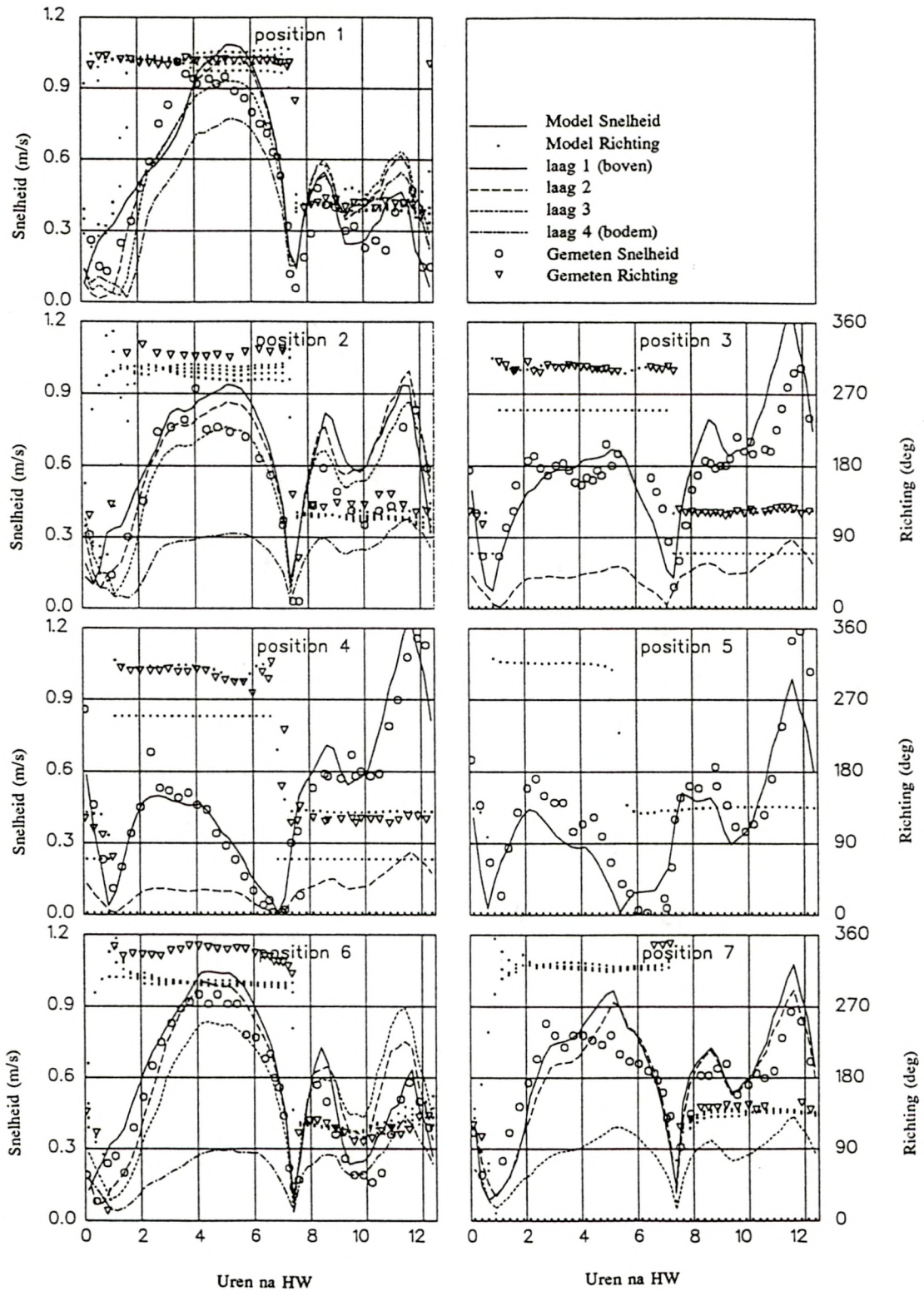
CONSORTIUM



Figuur 2.2



Huidige Toestand - Springtij 4/10/90  
 Snelheid in de meetpunten van 4/10/90  
 Vergelijking met metingen

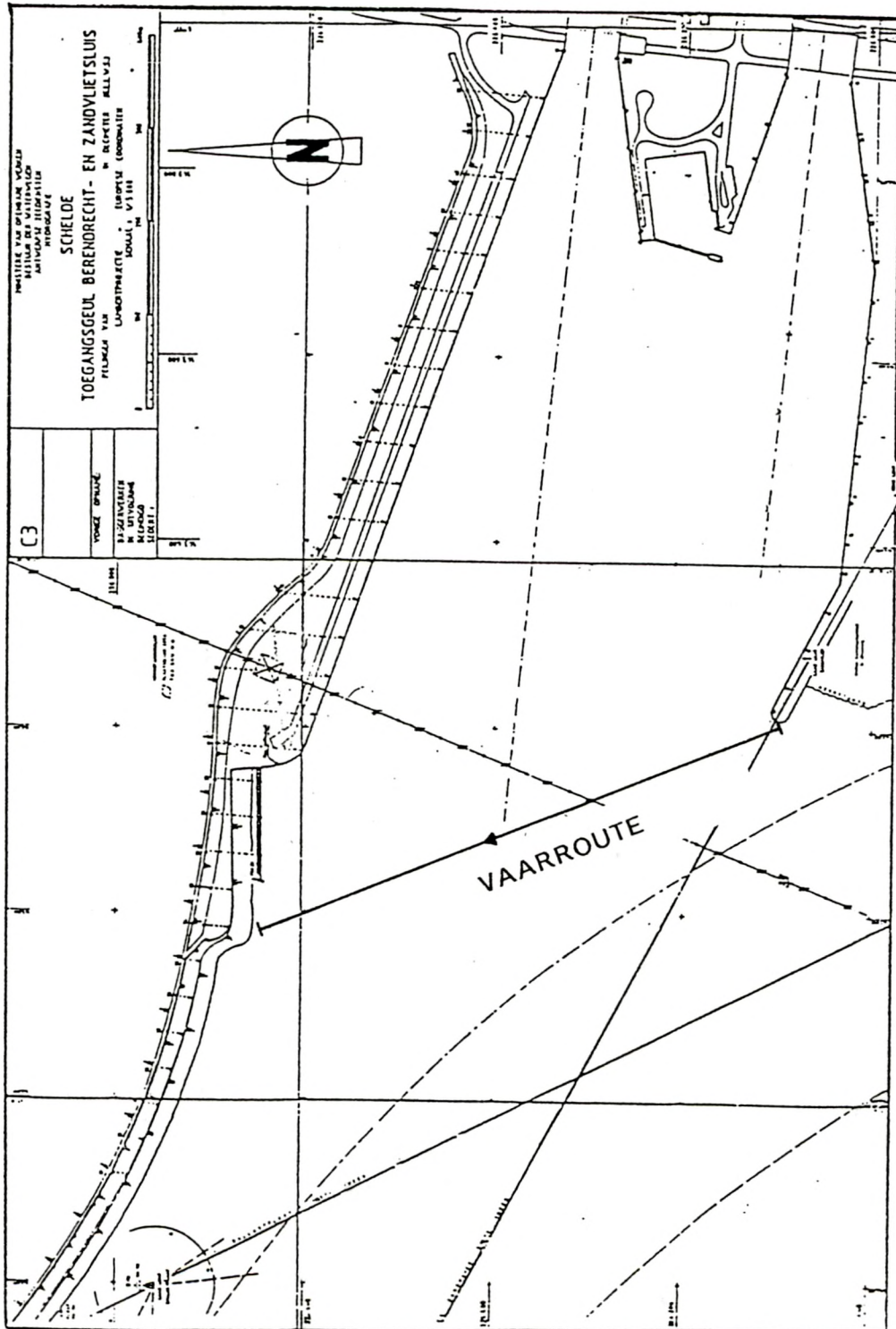


CONSORTIUM



Figuur 2.3

# CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK



CONSORTIUM



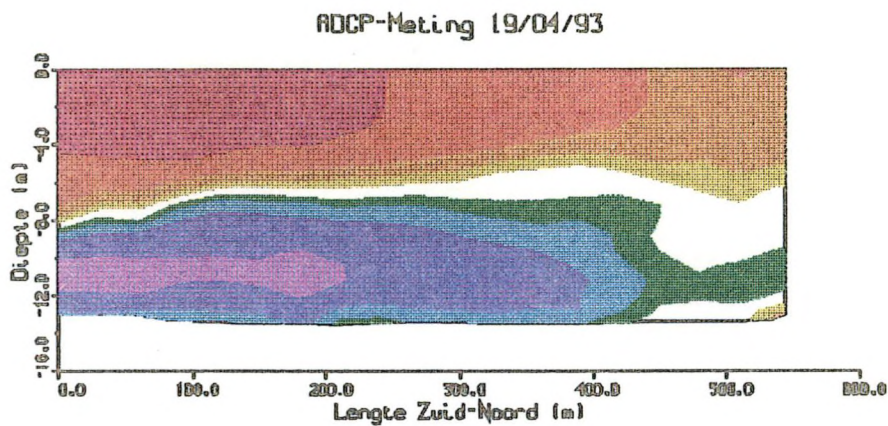
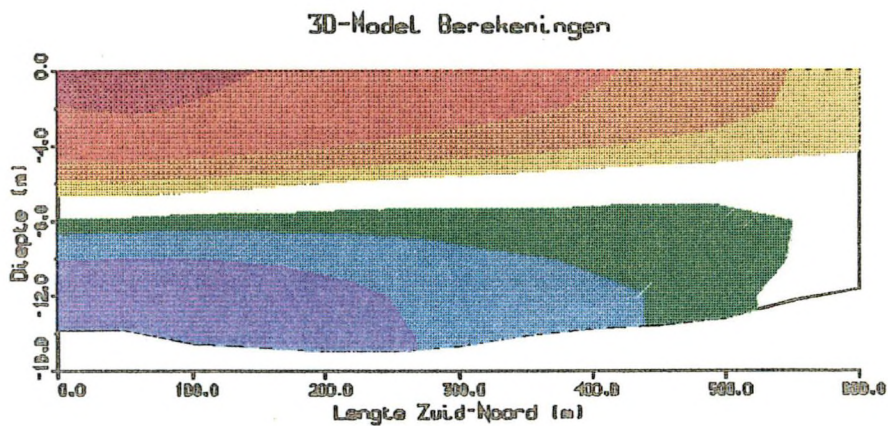
Figuur 2.4



# CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

## TOEGANGSGEUL ZANDVLIET-BERENDRECHT

Tijd: omstreeks 5.0h voor HW



Snelheden in cm/s

Doet-Hoest Snelheid (+ naar Sluizen, - naar Schelde)

<p>█ &lt; -20.0</p> <p>█ -20.0 : -10.0</p> <p>█ -10.0 : -5.0</p> <p>█ -5.0 : -2.0</p> <p>█ -2.0 : 2.0</p>	<p>█ 2.0 : 5.0</p> <p>█ 5.0 : 10.0</p> <p>█ 10.0 : 20.0</p> <p>█ &gt; 20.0</p>
---	--



CONSORTIUM

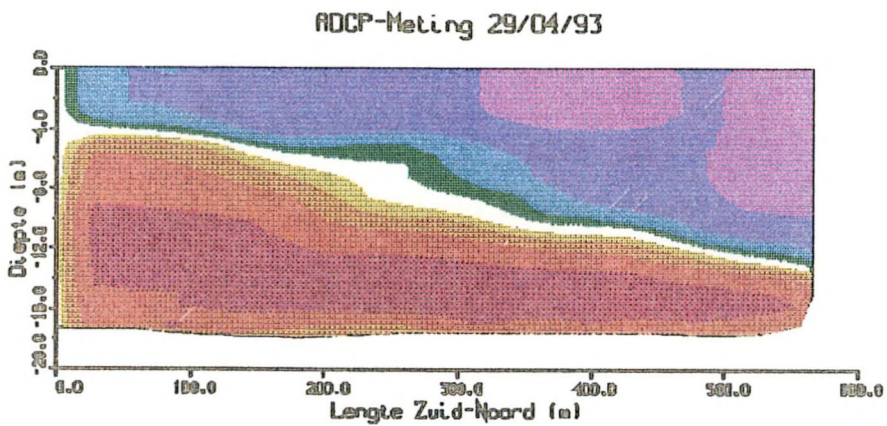
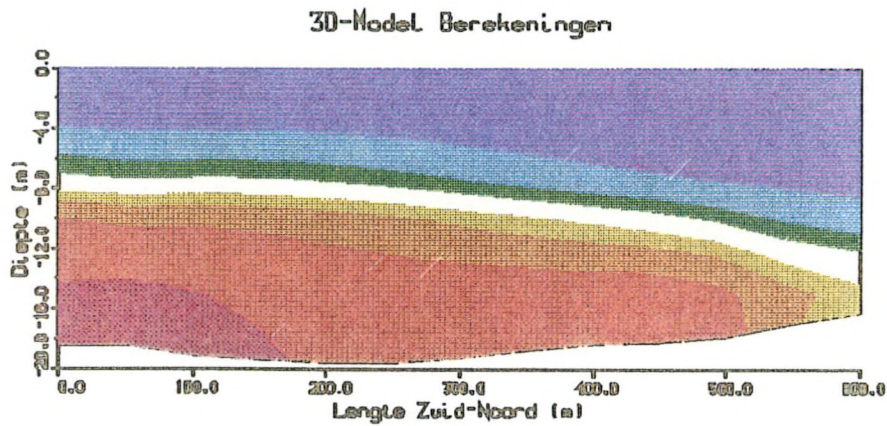


Figuur 2.5

# CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

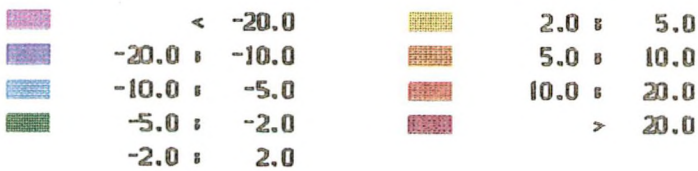
## TOEGANGSGEUL ZANDVLIET-BERENDRECHT

Tijd: omstreeks 1.0h na HW



Snelheden in cm/s

Oost-West Snelheid (+ naar Sluizen, - naar Schelde)



CONSORTIUM

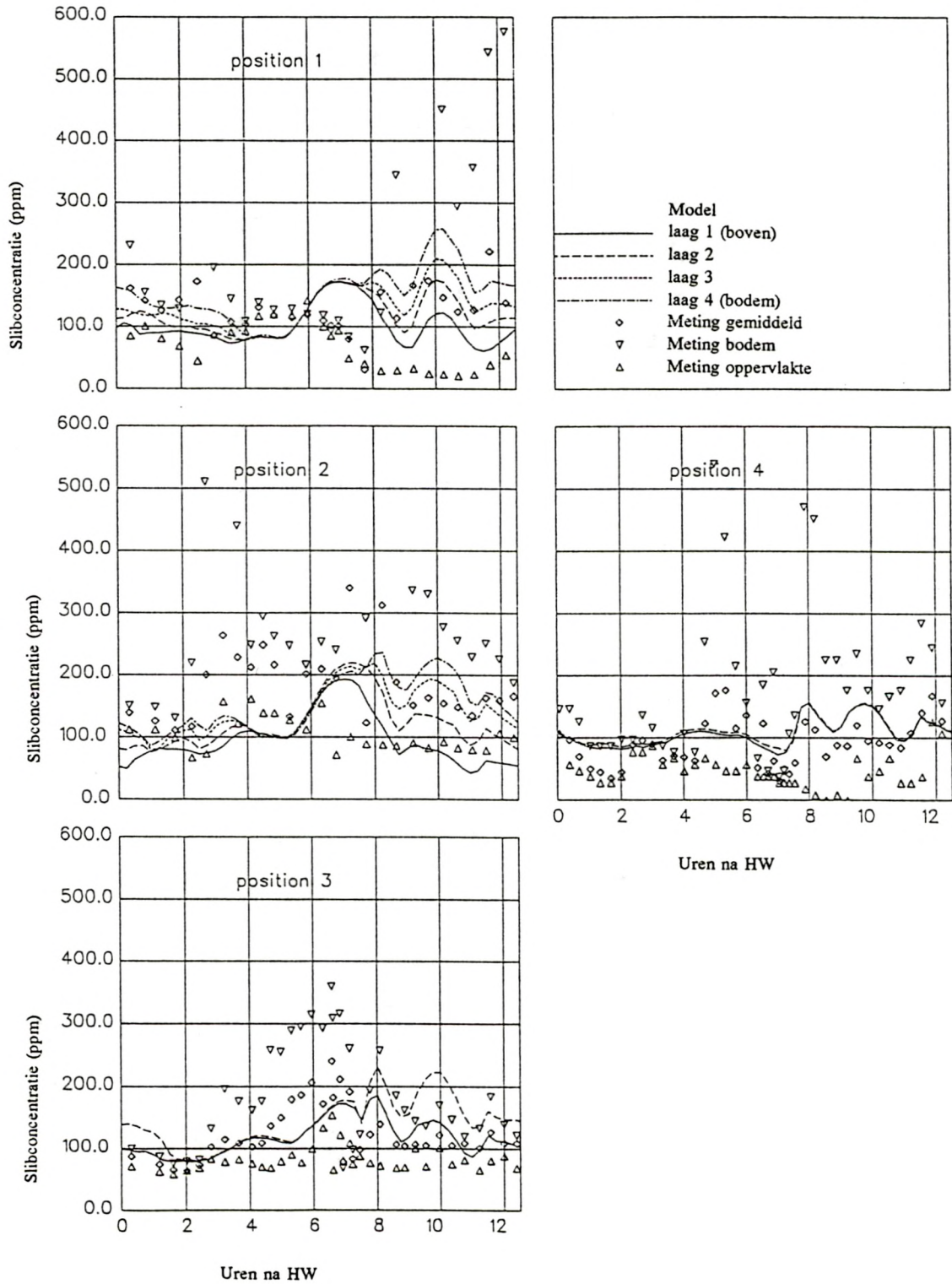


Figuur 2.6



# CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Huidige Toestand: Springtij 4/10/90 - Hoge Saliniteit  
 Slibconcentratie (ppm) in meetpunten 1-4 van 4/10/90  
 Vergelijking met metingen

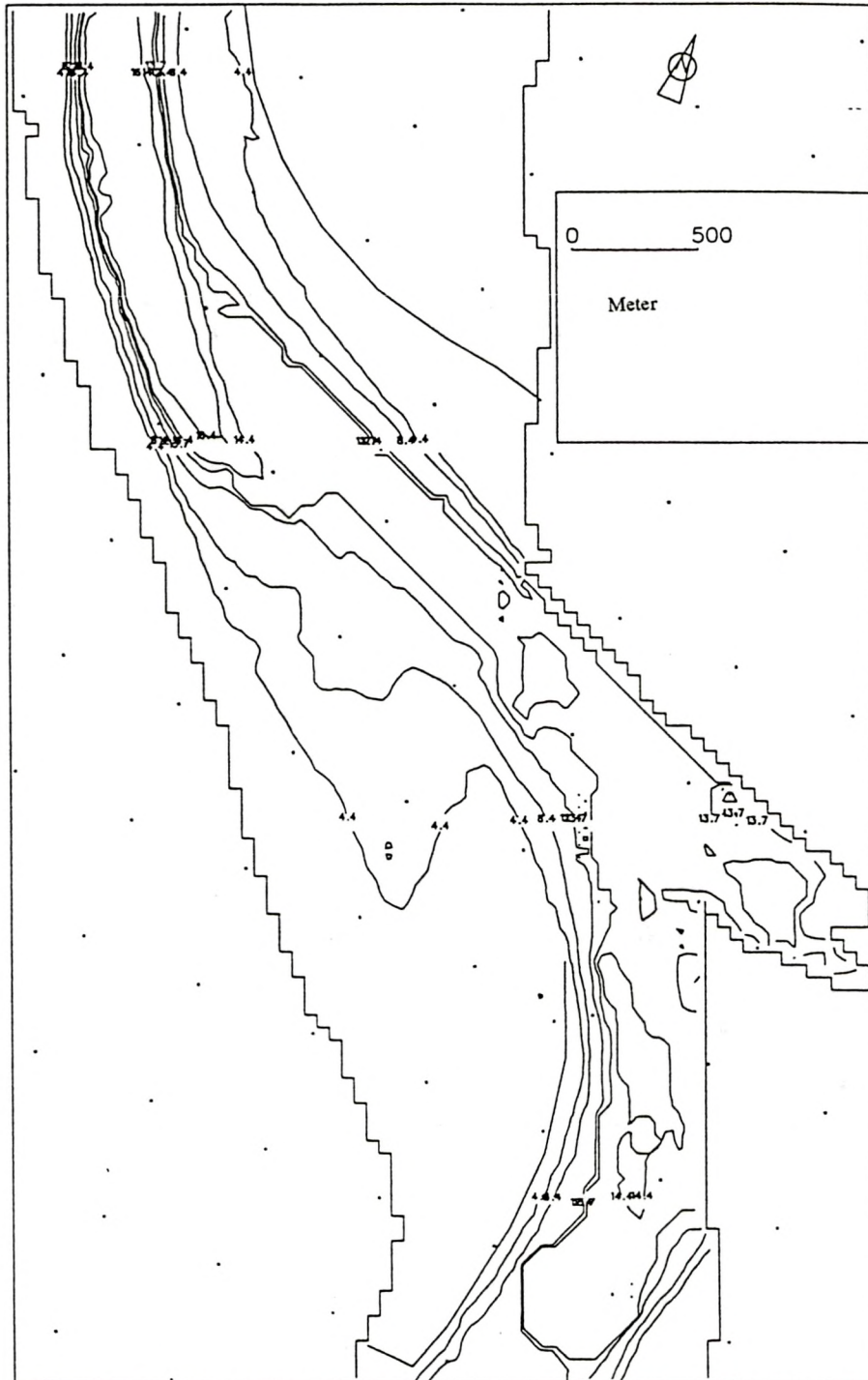


CONSORTIUM



Figuur 2.7

### Alternatief 9 Bathymetrie (m TAW)



CONSORTIUM

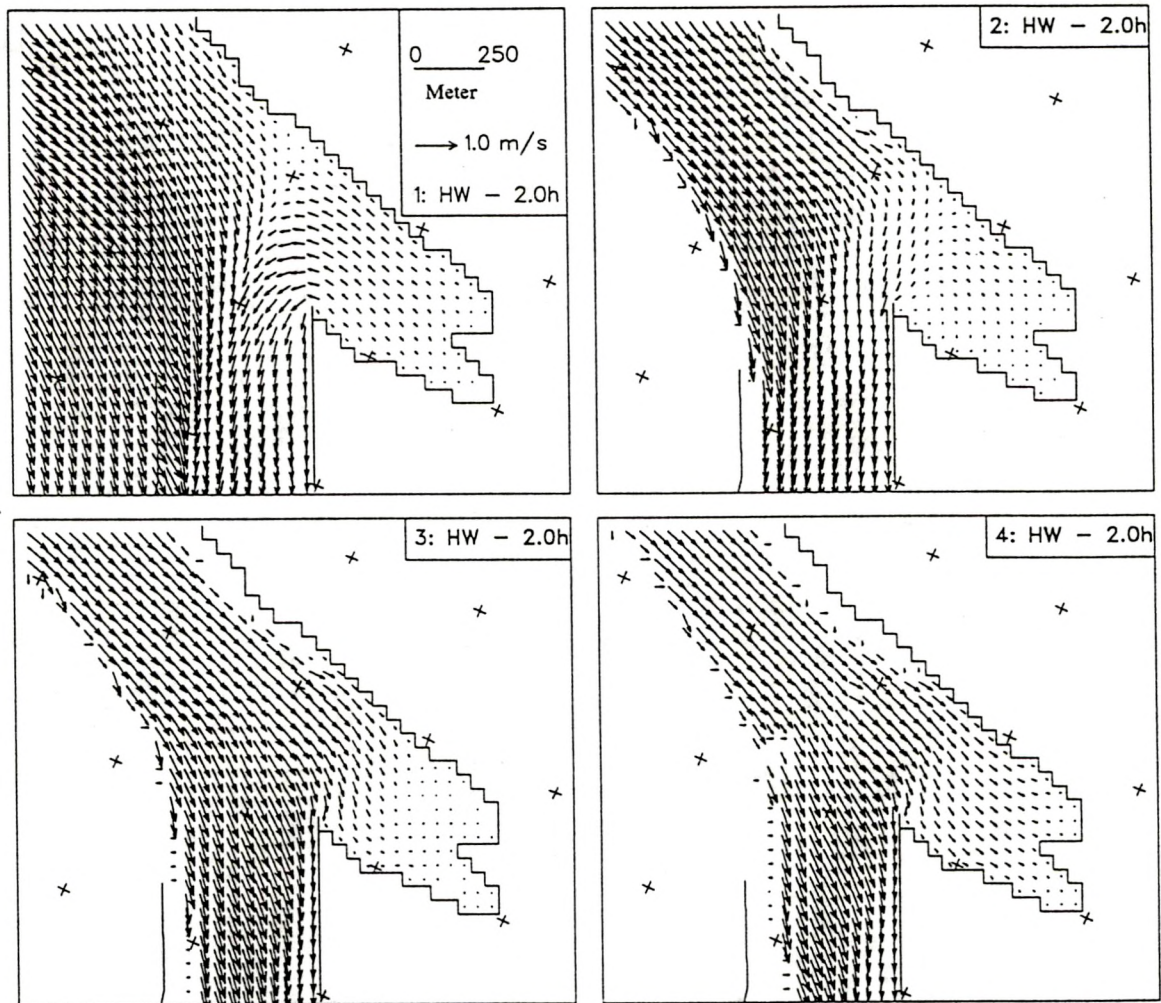


Figuur 3.1



Huidige Toestand - Springtij 4/10/90

Stroming in de toegangseul - 2 uur voor HW

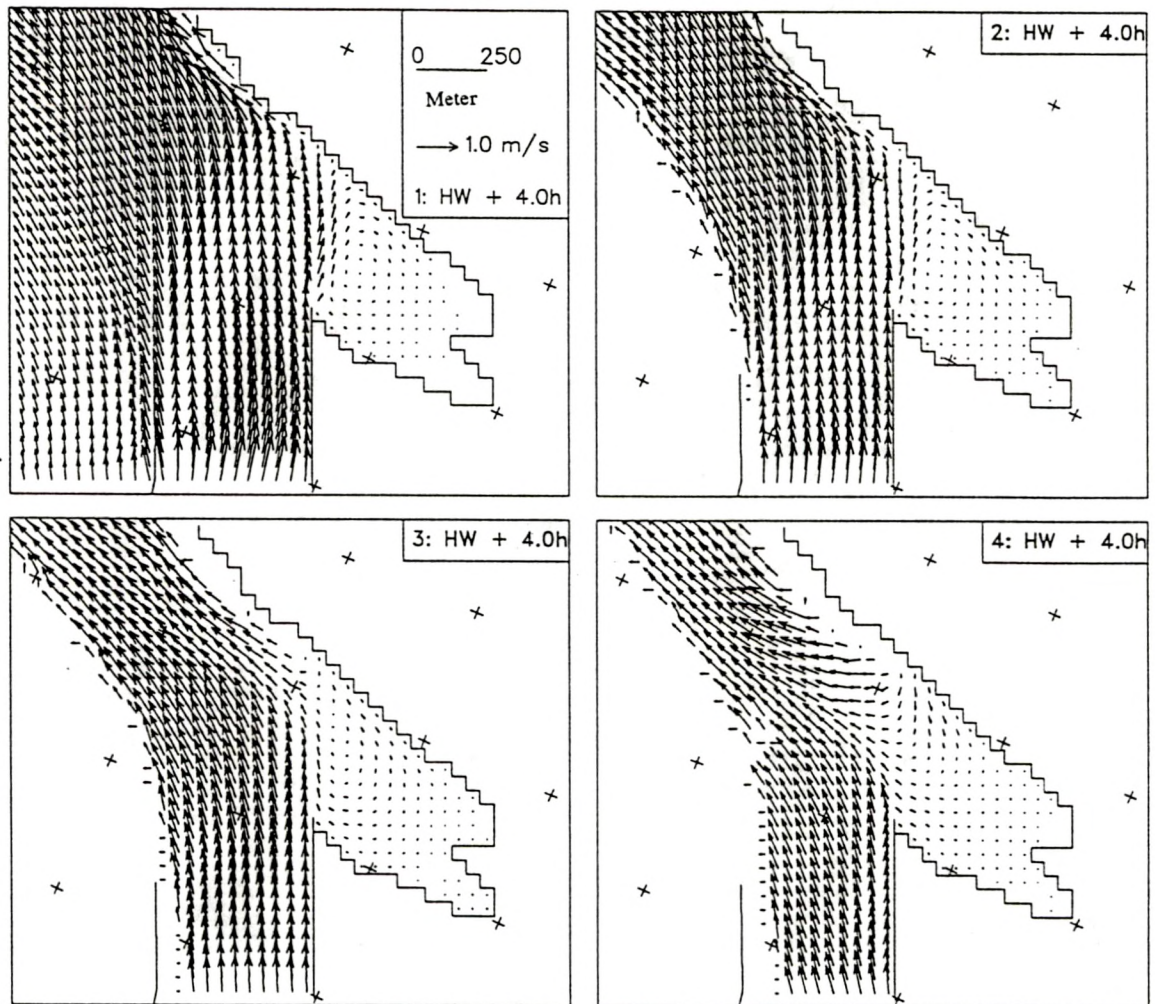


CONSORTIUM



Figuur 4.1

Huidige Toestand - Springtij 4/10/90  
Stroming in de toegangsecul - 4 uur na HW



CONSORTIUM

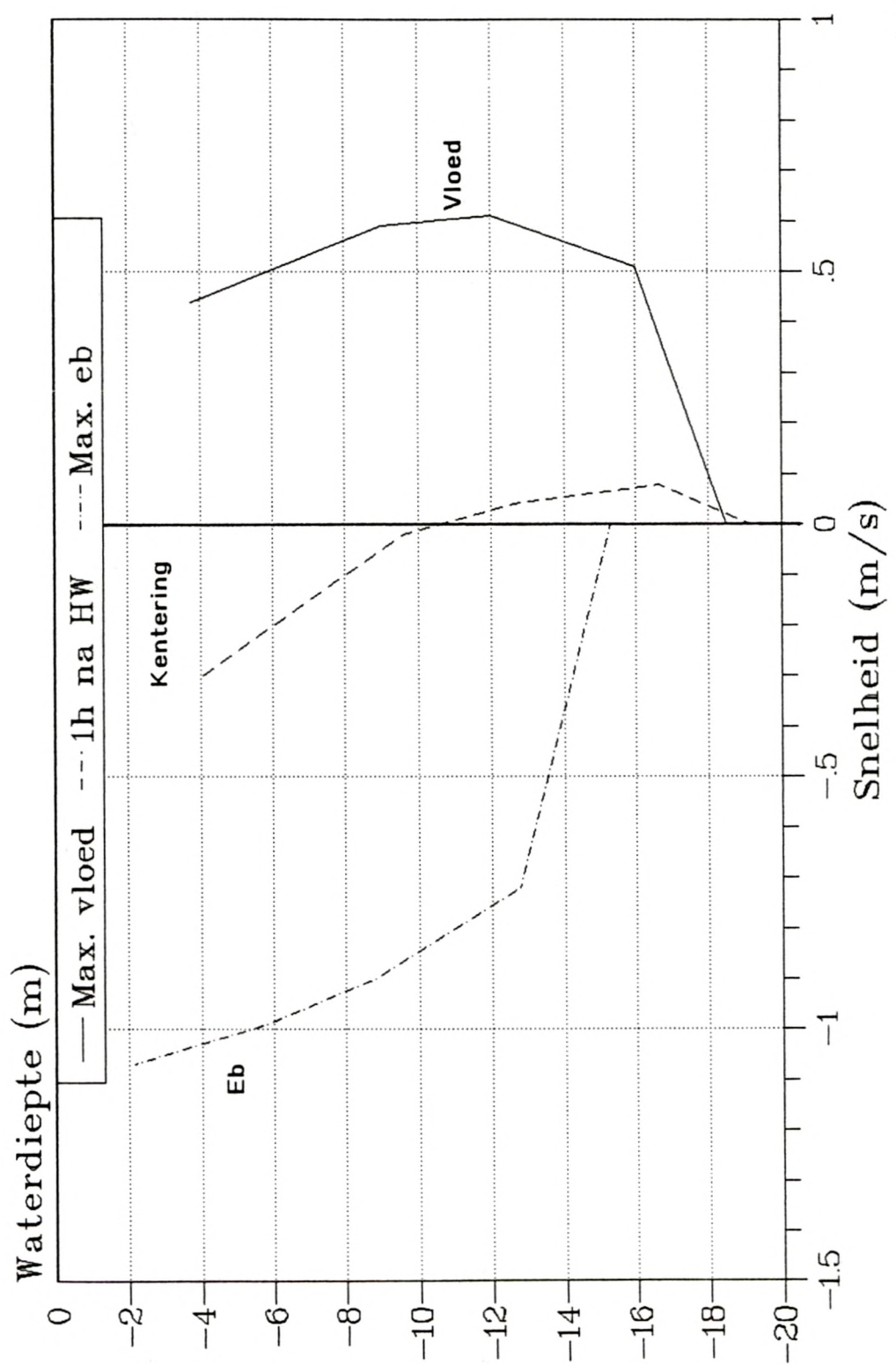


Figuur 4.2



Springtij 4/10/90 – Hoge Saliniteit  
3D Model Berekeningen

Snelheidsverticale in Meetpunt 1 (Meting 4/10/90)

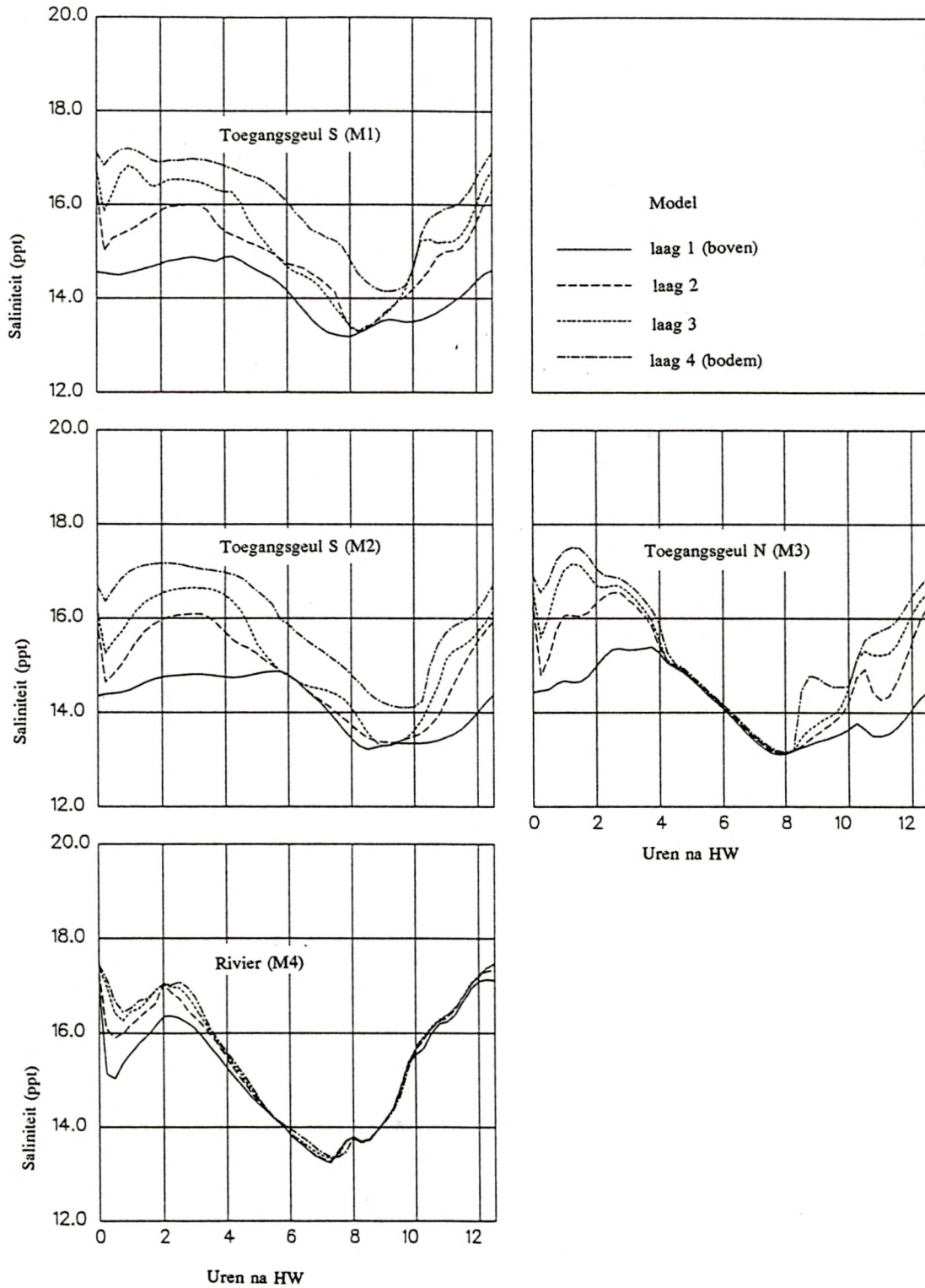


CONSORTIUM



Figuur 4.3

Huidige Toestand - Springtij 4/10/90  
 Saliniteit (ppt) in meetpunten van 4/4/89



CONSORTIUM

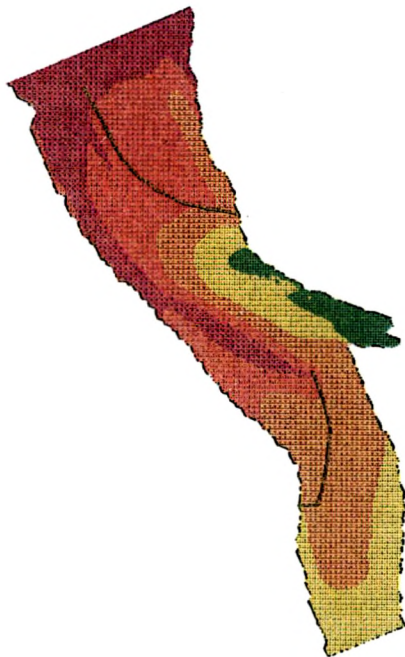


Figuur 4.4



HUIDIGE TOESTAND - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT  
Omstreeks Maximum Saliniteit (2h na HW)

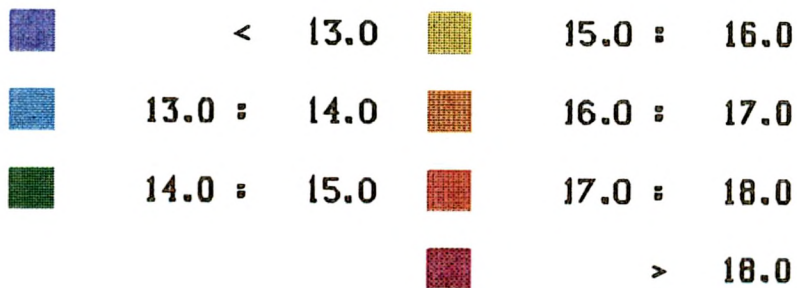
Loog 1 (boven)



Loog 2



Saliniteit in ppt



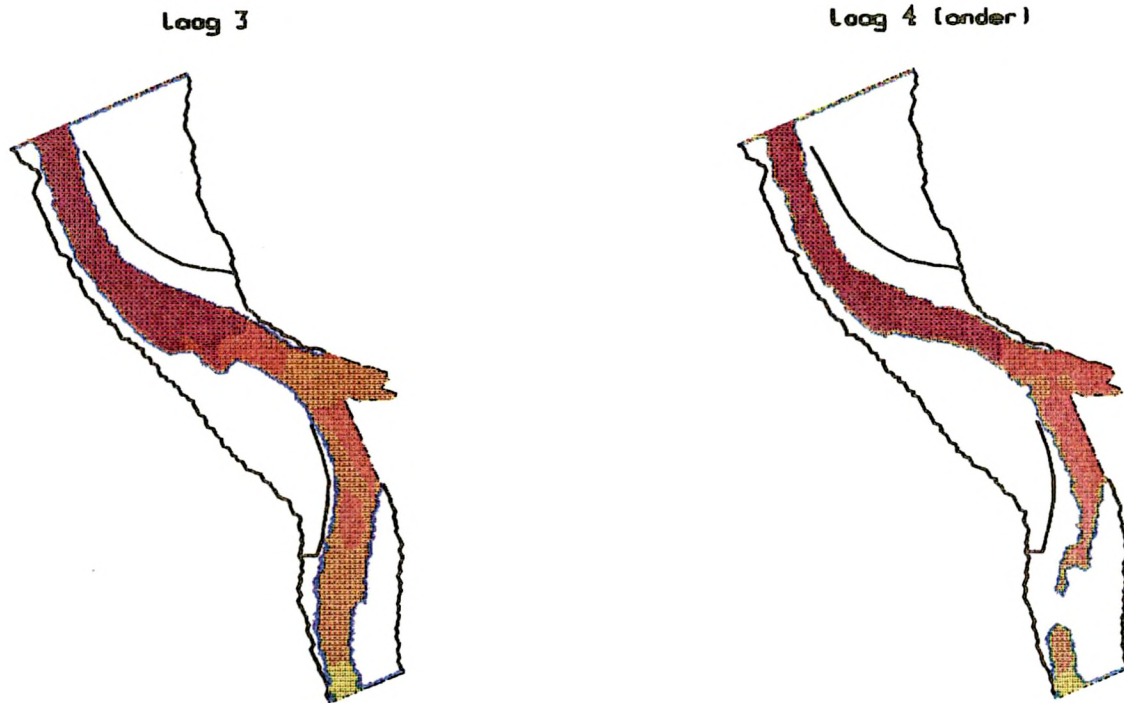
CONSORTIUM



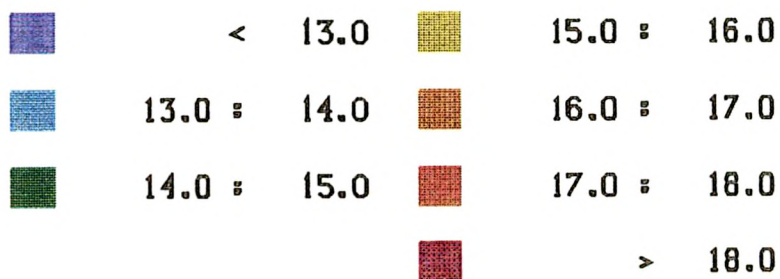
Figuur 4.5

# CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

## HUIDIGE TOESTAND - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT Omstreeks Maximum Saliniteit (2h na HW)



Saliniteit in ppt



CONSORTIUM



Figuur 4.6

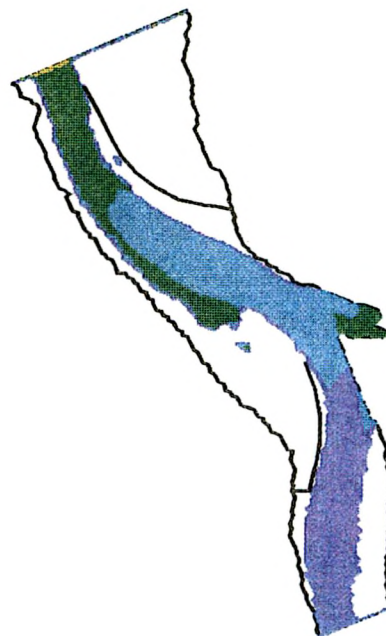


HUIDIGE TOESTAND - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT  
 Omstreeks Minimum Saliniteit (5h voor HW)

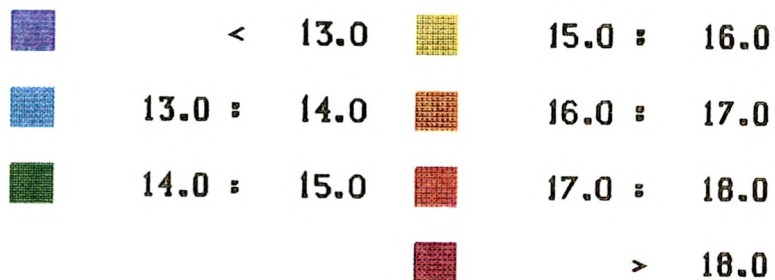
Laag 1 (boven)



Laag 2

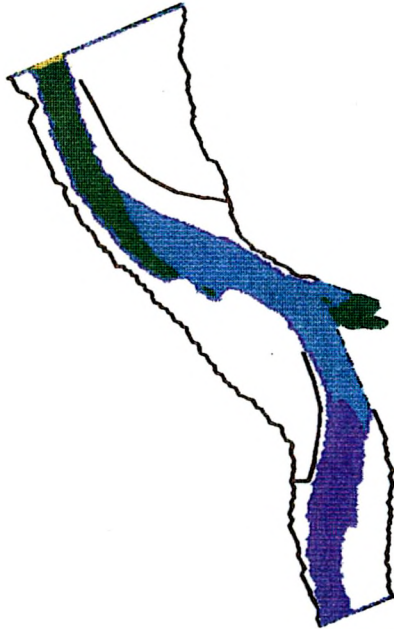


Saliniteit in ppt



HUIDIGE TOESTAND - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT  
 Omstreeks Minimum Saliniteit (5h voor HW)

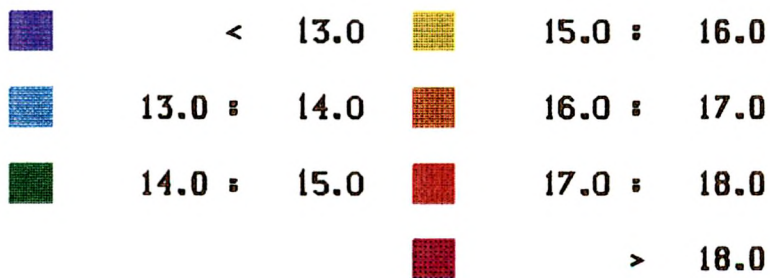
Loog 3



Loog 4 (onder)



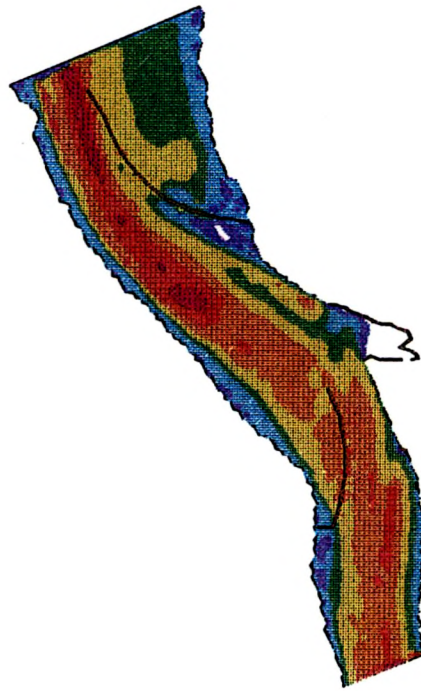
Saliniteit in ppt













HUIDIGE TOESTAND - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT

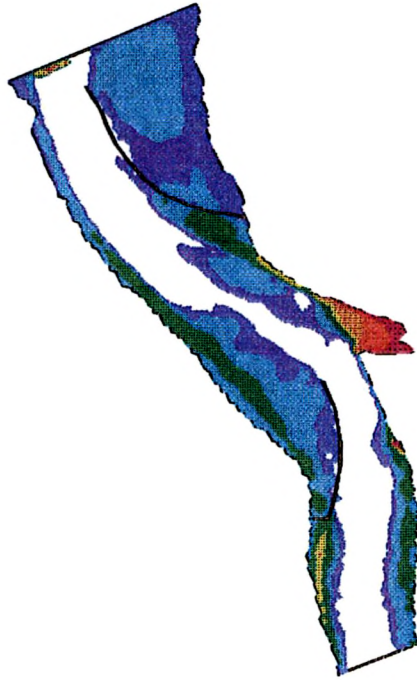
Maximale Bodemschuifspanning



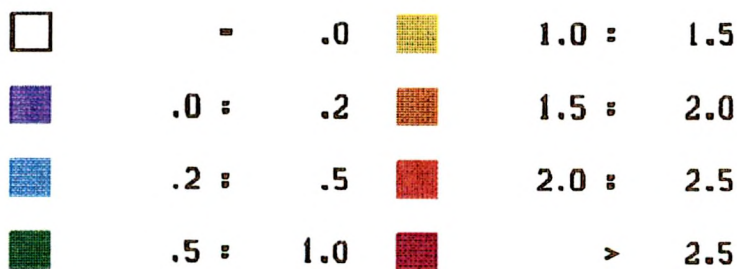
Bodemschuifspanning (Pa)

	<	.2		1.0 :	1.5
	.2 :	.4		1.5 :	2.0
	.4 :	.7		2.0 :	2.5
	.7 :	1.0		>	2.5

HUIDIGE TOESTAND - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT  
Sedimentatie van Slib per Getij



Sedimentatie in kg/m<sup>2</sup>



CONSORTIUM



Figuur 4.10











ALTERNATIEF 9 - SPRINGTIJ HOGE SALINITEIT

Sedimentatie van Slib per Getij



Sedimentatie in  $\text{kg/m}^2$

	<	.0		1.0 :	1.5
	.0 :	.2		1.5 :	2.0
	.2 :	.5		2.0 :	2.5
	.5 :	1.0		>	2.5



CONSORTIUM



Figuur 4.11

