

*Containerterminal ten
Noorden van de
Zandvlietsluis*

*Hydraulisch -
sedimentologisch
onderzoek*

Eindrapport

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

CONTAINERKAAI NOORD
Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek

Eindrapport

Juni 1993

STUDIECONSORTIUM IMDC - WLB

Wilrijkstraat 37-45 B2140 Antwerpen - België

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



Containerkaai Noord Eindrapport

1.	DE OPDRACHT	1
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
2.	METHODOLOGIE EN MODELLEN	4
2.1.	Methodologie en doel van het onderzoek	4
2.2.	Beschrijving van het hydraulisch model FINEL	5
2.2.1.	Beschrijving van het model	5
2.2.2.	Beschrijving van de bathymetrie	5
2.2.3.	Beschrijving van de hydraulische gegevens en de calibratie	6
2.3.	Beschrijving van het slibtransportmodel TRASIL	7
2.3.1.	Beschrijving van het model	7
2.3.2.	Beschrijving van de erosie- en sedimentatiekarakteristieken van het slib	7
2.3.3.	Calibratie van het model	10
2.4.	Beschrijving van het zandtransportmodel FINTRA	12
2.4.1.	Beschrijving van het model	12
2.4.2.	Beschrijving van de zandtransportkarakteristieken	13
2.4.3.	Calibratie van het model	15
2.5.	Beschrijving van het fysisch model	16
2.5.1.	Beschrijving van het hydraulisch model	16
2.5.2.	Beschrijving van het morfologisch model	17
3.	UITGEVOERDE SIMULATIES	19
3.1.	Definitie en beperkingen van de simulaties	19
3.2.	Beschrijving van de simulaties	20
4.	RESULTATEN VAN HET MODELONDERZOEK	23
4.1.	Hydraulica	23
4.1.1.	Huidige toestand (HT)	23
4.1.2.	Toestand 1981 - "Put van Doel" (PD)	23

4.1.3.	Verdieping van de vaargeul tot -13.3m GLLWS	24
4.1.4.	Simulaties met containerkaai	24
4.1.5.	Simulaties ten behoeve van het MER	29
4.1.6.	Simulaties gedurende stormtij	29
4.2.	Slib	30
4.2.1.	Huidige toestand (HT)	30
4.2.2.	Toestand 1981 - "Put van Doel" (PD)	31
4.2.3.	Verdieping van de vaargeul tot -13.3m GLLWS	31
4.2.4.	Situaties met containerkaai	31
4.2.5.	Simulaties ten behoeve van het MER	34
4.2.6.	Simulaties gedurende stormtij	34
4.3.	Zand	35
4.3.1.	Huidige toestand (HT)	35
4.3.2.	Toestand 1981 - "Put van Doel" (PD)	36
4.3.3.	Verdieping van de vaargeul tot -13.3m GLLWS	36
4.3.4.	Situaties met containerkaai	36
4.3.5.	Simulaties ten behoeve van het MER	38
4.3.6.	Simulaties gedurende stormtij	38
5.	BESLUITEN	39
	LITERATUURLIJST	42

LIJST van FIGUREN

- 2.1 Schelde, grenzen van het mathematisch model.
- 2.2 Bathymetrie mathematisch model - Huidige Toestand.
- 2.3 Calibratie. Vergelijking berekende snelheden met metingen van 4/10/90.
- 2.4 Validatie. Vergelijking berekende snelheden met metingen van 27/9/90.
- 2.5 Bathymetrie fysisch model en ligging meetpunten van 4/10/90 en 27/9/90.

- 3.1 Bathymetrie mathematisch model: -13.3m GLLWS, PD en A1.
- 3.2 Inplanting van de zwaaicirkels.
- 3.3-3.5 Inplantingen van de kaaimuren.

- 4.1 Snelheidsvectoren (HT) tijdens maximale vloed- en ebstroming, mathematisch model.
- 4.2 Verschilkaart snelheid (maximale ebstroming) tussen HT en -13.3m GLLWS en PD, mathematisch model.
- 4.3 Verschilkaart snelheid (maximale ebstroming) tussen HT en A1, A2, A3, A4 en A5, mathematisch model.
- 4.4 Verschilkaart snelheid (maximale ebstroming) tussen HT en A6, A7, A8, A9 en A10, mathematisch model.
- 4.5 Verschilkaart snelheid (maximale vloedstroming) tussen HT en -13.3m GLLWS en PD, mathematisch model.
- 4.6 Verschilkaart snelheid (maximale vloedstroming) tussen HT en A1, A2, A3, A4 en A5, mathematisch model.
- 4.7 Verschilkaart snelheid (maximale vloedstroming) tussen HT en A6, A7, A8, A9 en A10, mathematisch model.
- 4.8 Snelheidsbeeld (HT) tijdens maximale vloed- en ebstroming, fysisch model.
- 4.9 Verschilkaart snelheid (eb) tussen HT en -13.3m GLLWS, fysisch model.
- 4.10 Verschilkaart snelheid (eb) tussen HT en A9, fysisch model.
- 4.11 Verschilkaart snelheid (vloed) tussen HT en -13.3m GLLWS, fysisch model.
- 4.12 Verschilkaart snelheid (vloed) tussen HT en A9, fysisch model.
- 4.13 Waterstanden te Bath voor de storm van 27 en 28/2/90.
- 4.14 Berekende waterstand en snelheid tijdens storm vergeleken met de resultaten van een morfologische getij berekening, mathematisch model.
- 4.15 Sedimentatie slib in g/m² per getij: HT, mathematisch model.
- 4.16 Sedimentatie slib in mm/getij: HT, -13.3m GLLWS en A9, mathematisch model.
- 4.17 Erosie zand in mm/getij: HT, -13.3M GLLWS en A9, mathematisch model.
- 4.18 Sedimentatie zand in mm/getij: HT, -13.3M GLLWS en A9, mathematisch model.

LIJST van TABELLEN

- 2.1 Korrelverdeling Drempel van Zandvliet.
- 2.2 Bodemvormen op enkele plaatsen in de Zeeschelde.

- 3.1 Coördinaten van de kaaimuren.

- 4.1 Vergelijking snelheden in meetpunten 1, 2 en 3 (% t.o.v. de huidige toestand), mathematisch model.
- 4.2 Vergelijking snelheden langsheen CK-Noord, mathematisch model.4.2
- 4.3 Vergelijking snelheden langsheen CK-Noord en CK-Zuid, mathematisch model.
- 4.4 Sedimentatie van slib. Pessimistische schatting (in ton/getij en % verschil t.o.v. HT), mathematisch model.
- 4.5 Sedimentatie van slib. Optimistische schatting (in ton/getij en % verschil t.o.v. HT), mathematisch model.
- 4.6 Erosie en sedimentatie van zand in m³/getij en % verschil t.o.v. HT, mathematisch model.
- 4.7 Som erosie en sedimentatie zand in m³/getij en % verschil t.o.v. HT, mathematisch model.

Containerkaai Noord 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 sluisencomplex 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 scheepsmanoeverbaarheid in verband met de bouw van een containerterminal ten noorden van de Zandvlietluis (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 IMDC en W.L.B., tot vorming van een studieconsortium in het kader van de uitvoering van een hydraulisch en sedimentologisch onderzoek nabij het sluizencomplex 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 sluizencomplex 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 sluienscomplex, zodat een veilige verkeersafwikkeling en een minimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken kunnen nagestreefd worden.

In voorbereiding op deze studie werd op 20 maart 1991 door het Havenbedrijf van de Stad Antwerpen aan IMDC 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 IMDC-WLB een bijkomend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek gevraagd voor enkele nieuwe lay-outs van de geplande containerkaai noord zijnde alternatief 4 t.e.m. 10.

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 dit eindrapport betreffende de noordelijke containerkaai wordt 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 worden de resultaten van het onderzoek op het fysisch model (Model 481/4-1, 481/4-2) gebundeld. In een later stadium van de studie zal verder aandacht worden besteed aan de aanslibbing in de toegangseu van Zandvliet-Berendrecht en aan de bouw van een westelijke containerkaai.

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 Toegangseu 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.

2. METHODOLOGIE EN MODELLEN

2.1. Methodologie en doel van het onderzoek

De bouw van een containerkaai ten noorden van de toegangsgeul 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 oriënterend onderzoek op fysisch model. Het doel van het uitgebreid hydraulisch en sedimentologisch onderzoek kan bijgevolg als volgt worden samengevat :

1. inzicht verschaffen over de invloed van de kaai op het tijregime en de tijvoortplanting
2. gegevens leveren inzake de invloed van de kaai op het algemeen stroombeeld in de ruime omgeving, zodat deze gewijzigde snelheden kunnen gebruikt worden voor ondermeer het nautisch onderzoek
3. nagaan in welke mate het stromingspatroon in de toegangsgeul wordt beïnvloed door de kaai
4. een kwalitatief en zo mogelijk kwantitatief inzicht geven betreffende de te verwachten wijzigingen inzake slib- en zandafzettingen en/of erosie in het studiegebied
5. het vergelijken van diverse alternatieven voor de inplanting van de kaai (variatie in lengte, oriëntatie, knikpunt, enz.), zodat de selectie van een meest geschikte lay-out mogelijk is
6. het bestuderen van de vormgeving van de koppen van de kaai op het zeer lokale stromingspatroon

Om aan deze doelstellingen te kunnen beantwoorden werd geopteerd voor zowel de bouw van een fysisch model, als voor het gebruik van een serie mathematische modellen. Het fysisch model leent zich uitstekend tot het uitvoeren van hydraulisch onderzoek, met specifieke aandacht voor de vormgeving van de kaai. Inzake sedimenttransport geeft het fysisch model hoofdzakelijk een kwalitatief beeld van het zandtransport. De mathematische modellen laten toe om met de inzet van beperkte, weliswaar hoogtechnologische, middelen diverse alternatieven vlot te kunnen vergelijken, bovendien laten de mathematische modellen toe om slibtransporten te simuleren, wat in een fysisch model zeer ingewikkeld is.

In onderstaand overzicht worden de verschillende modellen beschreven die voor het onderzoek werden gebruikt.

2.2. Beschrijving van het hydraulisch model FINEL

2.2.1. Beschrijving van het model

De hydraulische simulaties werden uitgevoerd met het tweedimensionaal eindige elementen model FINEL dat ook werd gebruikt tijdens de studie van de bagger- en afzinkoperaties van de Liefkenshoektunnel. Het model lost de Navier-Stokes vergelijkingen (ondiep-watervergelijkingen) op en berekent waterstanden en dieptegemiddelde snelheden. De vergelijkingen worden omgezet in een stelsel van gewone differentiaalvergelijkingen. Het model bezit de mogelijkheid om het droogvallen van gebieden te simuleren bij lage waterstanden.

2.2.2. Beschrijving van de bathymetrie

De bathymetrie van de Schelde werd gedigitaliseerd vanaf het bakken Meestooft tot aan een raai ter hoogte van Bath. Op deze wijze zijn de beide grenzen voldoende ver van de containerkaaien (noord en west) verwijderd, zodat de randvoorwaarden het hydraulisch regime in het studiegebied niet meer beïnvloeden, zie figuur 2.1. De bodemligging werd afgelezen van de volgende sectiekaarten van de Antwerpse Zeehavendienst, Afdeling Hydrografie, zie figuur 2.2:

- Bath/Saeftinge maart 1990 no. C3.137,
- Saeftinge/Doel juni 1990 no. C3.245,
- Doel/Filip juni 1990 no. C3.246.

De diepten (t.o.v. GLLWS) werden herleid naar TAW. De leidammen op de Plaat van Doel en de Ballastplaat werden ingevoerd op basis van de algemene beschrijving in het Studierapport Verdieping Westerschelde - Programma 48'/43' (22) en de ontwerp- en controle plannen van de Antwerpse Zeehavendienst (C3.4120, 4120B, 4120C, 4120D, 6595D). Aanvullende dieptelijnen werden ontleend aan detailplannen betreffende

- de toegangsgemaal Zandvliet-Berendrecht
- de Drempel van Zandvliet
- het Vaarwater van Oudendijk
- de Drempel van Frederik
- de Drempel van Lillo

Een weergave van de bathymetrie is te vinden in figuur 2.2. Het eindige elementenrooster werd zodanig opgesteld dat de fijnste mazen gesitueerd zijn ter hoogte van de kaaien, terwijl de gebieden waar enkel de berging van belang is, met een grof rooster werden weergegeven.

2.2.3. Beschrijving van de hydraulische gegevens en de calibratie

De getijgegevens voor de getijposten Bath, Prosperpolder, Zandvlietsluis en Liefkenshoek (voor de meetdagen en voor de periode 1971-1980) werden gebruikt. 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 (11) en 4/10/90 (12).

Op basis van de opgemaakte bodemschematisatie (het elementenrooster), een waterstandsrandvoorwaarde (afwaarts), een snelheidsrandvoorwaarde (opwaarts) en een aantal parameterwaarden (wrijving, viscositeit, Coriolisparameter, droogvalwaarden en tijdstap) kunnen simulaties worden uitgevoerd. Hiertoe dient evenwel eerst een calibratie van het model uitgevoerd te worden. Dit gebeurt door de rekenresultaten te vergelijken met metingen. Voor de snelheden is gebruik gemaakt van de resultaten van de stroom- en sedimentmeting tijdens het springtij van 04/10/90 in een raai dwars op de Schelde ter hoogte van de containerkaai noord. Na calibratie werden de volgende parameterwaarden weerhouden:

- Manning coëfficiënt $n = 0.02 \text{ sm}^{-1/3}$ (op de leidammen $n = 0.06 \text{ sm}^{-1/3}$),
- Smoothing (viscositeit) van 40 (lokaal 7),
- Coriolis factor $f = 0.00011 \text{ s}^{-1}$,
- Droogvalwaarden van 0.05 en 0.03 m,
- tijdstap = 1s.

In figuur 2.4 zijn de berekende snelheden na calibratie vergeleken met de metingen van 4/10/90. Teneinde na te gaan of het model betrouwbare resultaten levert bij andere randvoorwaarden, werd het doottij 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, zie figuur 2.4.

2.3. Beschrijving van het slibtransportmodel TRASIL

2.3.1. Beschrijving van het model

De slibtransportberekeningen werden uitgevoerd met het tweedimensionaal model TRASIL. Het model lost de dieptegemiddelde tijdsafhankelijke convectie-diffusie vergelijking op. De partiële differentiaalvergelijking die het model oplost, is de mathematische vertaling van de wet van behoud van massa voor het slib. De variabelen in deze vergelijking zijn:

- c : de dieptegemiddelde slib-concentratie,
- h : de waterdiepte,
- U : de dieptegemiddelde snelheidsvector.

De twee laatste grootheden moeten op ieder tijdstip t en op elke plaats (x,y) gegeven zijn. Voor deze toepassing worden zij gehaald uit de berekeningen met het hydraulisch model FINEL. De partiële differentiaalvergelijking bevat de advectieve (of convectieve) termen, verantwoordelijk voor het transport van het slib en de diffusieve termen. Andere termen berekenen de sedimentatie- en erosieprocessen en de weergave van lokale bronnen.

De vergelijking wordt opgelost in een Lagrange stelsel, de verspreiding van het slib in functie van de tijd gebeurt met een substap techniek.

2.3.2. 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 proces-beschrijving wordt verwezen naar Mehta et al. (16), die de nadruk legt op een aantal basisprocessen en de karakterisatie hiervan vanuit een praktisch waterbouwkundig oogpunt (flocculatie, uitzakken, afzetting, opwervelen, 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 (15) gesteld dat de valsnelheid van de slibvlokken niet groter is dan 0.3mm/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 1.5mm/s werden gemeten (7). Mulder en Udink (17) rekenen met een valsnelheid in de Westerschelde van 2mm/s, gebaseerd op indicaties uit metingen. Voor TRASIL 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 (14) 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 [$\text{kg/m}^2\text{s}$],
- c : de slibconcentratie [kg/m^3],
- w : de valsnelheid van het slib [m/s],
- τ_{cd} : de kritische bodemschuifspanning voor sedimentatie [Pa].

De waarde van τ_{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 (3) 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 $\tau_{cd} = 0.2 \text{ Pa}$ (17). 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 (23). 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 opwervelen van slibdeeltjes beheerst. De weerstand tegen opwervelen 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 (16):

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 (18). Partheniades (19) 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 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
- E : de bronterm voor erosie [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
- τ_{ce} : de kritische schuifspanning voor erosie [Pa].

Later onderzoek wijst eerder op een formulering waarbij M/τ_{ce} constant is (3), (20) en een waarde heeft van $\pm 0.002\text{s}/\text{m}$.

Voor de Schelde werden de volgende waarden gevonden (17):

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

2.3.3. 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. Daarom werden op basis van vroegere studies en uit de hogervermelde literatuurgegevens twee sets van parameterwaarden weerhouden, een "pessimistische (p)" en een "optimistische (o)":

- randvoorwaarde: tijdens eb 200mg/l opwaarts, tijdens vloed 100mg/l afwaarts (p + o),
- erosiesnelheidsconstante (M): 0.05g/m²s (p) en 0.2g/m²s (o),
- kritische erosieschuifspanning: 0.4Pa (p + o),
- kritische sedimentatieschuifspanning: 0.2Pa (p + o),
- valsnelheid: 2mm/s (p + o).

Onder "pessimistische" schatting dient te worden verstaan dat de afzetting van slib maximaal ingeschat wordt, wat leidt tot een maximale en dus pessimistische schatting van de onderhoudsbaggerwerken. De optimistische schatting veronder-

stelt dat slib, eens dat het sedimenteert, gemakkelijk opnieuw in suspensie kan komen, zodat de blijvende afzetting minimaal is.

2.4. Beschrijving van het zandtransportmodel FINTRA

2.4.1. Beschrijving van het model

De zandberekeningen werden uitgevoerd met het zandtransportcapaciteitenmodel FINTRA. Uitgaande van de waterstands- en snelheidsvelden, berekend met het hydraulisch model FINEL, worden transportcapaciteiten berekend in elk knooppunt. Hieruit wordt per roostercel een sedimentbalans opgesteld, waaruit erosie of sedimentatie berekend kan worden. Erosie en sedimentatie zijn een gevolg van verschillen in transportcapaciteiten en dus niet noodzakelijk het gevolg van de grootte ervan. Gesommeerd over de tijd geeft dit de erosie of sedimentatie per beschouwde periode (volledig getij, eb of vloed). De transporten worden berekend met de formule van Engelund en Hansen. Dit is een "total load" formule. Er wordt bijgevolg geen onderscheid gemaakt tussen bodem- en suspensietransport. Het voordeel van deze formule t.o.v. andere is dat:

- de formule onder zeer veel omstandigheden één van de betrouwbaarste is, zie b.v. (24) en (29).
- de in de formule gebruikte ijkingsconstanten hebben een breed geldigheidsgebied.
- de formule simpel is en dus weinig CPU-tijd kost in computerberekeningen.

Voor grote stroomsnelheden ($> 1.5\text{m/s}$) overschat deze formule het zandtransport, zie Voogt et al. (25), wat voor deze studie niet van toepassing is, gezien de maximale stroomsnelheden ter hoogte van de containerkaai ongeveer 1m/s bedragen.

In zijn algemene vorm luidt de formule van Engelund en Hansen (4) als volgt:

$$f \Phi = 0.1 \Theta^{5/2} \quad (2.6)$$

met

$$f = 2/gC^2 \quad (2.7)$$

de weerstandscoefficiënt,

$$\Phi = \frac{T}{\sqrt{\Delta} g d^2} \quad (2.8)$$

de transportparameter en

$$\Theta = \frac{V^2}{C^2 \Delta d} = \frac{V^{*2}}{\Delta g d} \quad (2.9)$$

de stromingsparameter.

Waarbij

- C : Chézy coëfficiënt [$m^{0.5}/s$],
 T : sedimenttransport in volume vaste stof [m^2/s],
 d : equivalente boldiameter [m],
 V : gemiddelde stroomsnelheid [m/s],
 V* : schuifspanningssnelheid [m/s],
 Δ : $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$,
 ρ_s : densiteit van het sediment [kg/m^3],
 ρ_w : densiteit van water [kg/m^3].

De zandtransportformule van Engelund en Hansen is dus afhankelijk van het poriëngehalte (orde 0.4) de verticaalgemiddelde snelheid, het relatief dichtheidsverschil tussen het sediment en water (1.65 voor zand), de weerstandscoefficiënt en de equivalente boldiameter. Gebruikelijk is de weerstandscoefficiënt te bepalen volgens $C = 18 \log(12h/k_n)$ met k_n de ruwheidswaarde volgens Nikuradse. Voor de equivalente boldiameter wordt de mediane korreldiameter van het sediment gebruikt (d_{50}).

2.4.2. Beschrijving van de zandtransportkarakteristieken

Om tot een zo realistisch mogelijke inschatting te kunnen komen van het zandtransport en de bodemveranderingen in het studiegebied, dienen eerst de verschillende parameters begroot te worden die het fysisch proces karakteriseren. Op basis van een literatuuronderzoek werd nagegaan in welke mate de bodemgesteldheid, de bodemruwheid en de korreldiameter in het studiegebied kunnen beschreven worden.

Bodemgesteldheid en korreldiameter

De Scheldebodem in de omgeving van de containerkaai kan als volgt beschreven worden (8) :

- het sediment in de Schelde bestaat uit zand, slib en klei. Het slib is geconsolideerd of vloeibaar (dichtheid kleiner dan 1200 kg/m^3).
- de containerkaai zelf wordt gesitueerd in een zone met klei en vloeibaar slib.

De vaargeul is hoofdzakelijk zandachtig tot zand en slib, zie figuur 2.2 uit (2).

Door de Antwerpse Zeehavendienst werden op de Drempel van Zandvliet in januari 1985 diverse monsters genomen (8). Gemiddeld bedraagt de D_{50} ongeveer 130μ ($D_{25} = 105\mu$, $D_{75} = 160\mu$ en $D_{90} = 170\mu$). Enkel het monster dat genomen werd onder de rechteroever langs de geplande containerkaai, is veel fijner ($D_{50} = 100\mu$) en heeft een aanzienlijk percentage (ongeveer 35%) materiaal fijner dan 63μ .

In (10) wordt een overzicht gegeven van de resultaten van de monsters genomen na 1985 op de drempels van de Zeeschelde vanaf de Drempel van Krankeloon tot aan de Drempel van Zandvliet. Hieruit blijkt dat het zand in het modelgebied kan gekarakteriseerd worden door een gemiddelde D_{50} van ongeveer 130μ .

In (13) worden de resultaten van de bodemonsters op de Drempel van Zandvliet wat meer uitgesplitst, zoals weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Korrelverdeling sedimenten Drempel van Zandvliet.

Fracties (%) / Plaats	< 2 μ	< 20 μ	< 63 μ	< 120 μ
Drempel van Zandvliet				
- gemiddeld bodemonster	-	7	12	23
- gemiddeld beunmonster	7	14	25	62
- bodem rechteroever	-	34	54	64
- bodem vaargeul	-	2	4	16
Toegangsgeul Zandvlietluis				
- gemiddeld bodemonster	39	68	89	100

Ruwheden

Het is van groot belang om de bodemruwheid zo nauwkeurig mogelijk in te schatten. Voor rivieren is er veelal een evenwicht tussen de stroming en de bedvorm, waarbij de ruwheid vrij eenvoudig kan worden vastgesteld. Voor getijgebieden bemerkt men een duidelijke naijling van het zandtransport en de bedvorm ten opzichte van de stroming. Daardoor wordt de ruwheid bepaald door diverse factoren : de grootte van de pieksnelheid, de aard van de snelheidsvariaties (dV/dt) en de vorm van het snelheidsverloop in de tijd.

Uit diverse rapporten werden voor het studiegebied ruwheidswaarden afgeleid:

- Voor de Liefkenshoektunnel werd gerekend met een verschillende waarden voor de ruwheid tijdens eb ($k_n = 0.05\text{m}$) en vloed ($k_n = 0.01\text{m}$) (9).
- De zandribbelatlas voor de Westerschelde (21) geeft bodemvariaties van 0-75 cm ter hoogte van de Drempel van Bath.
- Wartel (26) geeft voor een aantal locaties in het modelgebied de amplitude van de bodemvormen :

Tabel 2.2 Bodemvormen op enkele plaatsen in de Zeeschelde (26).

Plaats	Amplitude [m]	Golflengte [m]
Saaftinghe	0.12	6.0
Ketelplaat	0.50	3.0
Strekdam (Doel)	0.50-0.60	-
Ballastplaat	> 1.0	-

- Voor de Wester- en Oosterschelde worden verder waarden gegeven voor k_n die variëren tussen 0.25 en 0.55m (25).

2.4.3. Calibratie van het model

De modelresultaten werden vergeleken met gegevens over de wekelijkse gemiddelde sedimentatie op de Drempel van Zandvliet (6). De initiële inschatting van de parameters gebeurde op basis van de bovenstaande gegevens.

- porositeit: 42%,
- maatgevende korreldiameter: gemiddelde waarde 130μ , spreiding tussen 110μ en 150μ ,
- ruwheid: gemiddelde waarde 0.1m, spreiding tussen 0.01m en 0.5m.

Omwille van de spreiding op de beschouwde parameterwaarden werd een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd. Wanneer de transportberekening met $D_{50} = 130\mu$ en een bodemruwheid van 0.10m bij een morfologisch getij als basisberekening wordt beschouwd, varieert de erosie met 60% tot 200%.

2.5. Beschrijving van het fysisch model

2.5.1. Beschrijving van het hydraulisch model

Voor de fysische modelstudie van de containerkaai noord werd in het Waterbouwkundig Laboratorium een model gebouwd met als begrenzingen het afwaartse uiteinde van de leidam over de Ballastplaat enerzijds en twee kilometer opwaarts Liefkenshoek anderzijds. De bodemconfiguratie van dit model komt overeen met de toestand opgemeten in de maanden juni en juli van 1990 en is bijgevolg gelijk aan de bathymetrie die werd ingebouwd in het hydraulisch model FINEL, zie figuur 2.5.

Het model is geen getijmodel. Dit impliceert dat alleen een aantal discrete fasen van het getij in permanente stroming gesimuleerd kunnen worden. De horizontale en verticale schalen van het model zijn respectievelijk:

- $n_h = 6/1000$,
- $n_v = 1/64$.

Uit de Froude-schaalwetten voor een vertrokken model met vaste bodem kan dan het volgende afgeleid worden:

$$\text{- Snelheidsschaal} \quad : \quad n_v = \sqrt{n_v} = 1/8 \quad (2.10)$$

$$\text{- Tijdschaal} \quad : \quad n_t = \frac{n_h}{\sqrt{n_v}} = 1/20.83 \quad (2.11)$$

$$\text{- Debietschaal} \quad : \quad n_Q = n_v^{3/2} \cdot n_h = 1/85333.33 \quad (2.12)$$

Voor de calibratie van het model werd gebruik gemaakt van de gemeten snelheden tijdens de stroom- en sedimentmeting van 04/10/90. In het bijzonder werd voor de 5 meetpunten in de dwarsraai een vergelijking gemaakt tussen de snelheden in situ en deze in het model. De gekozen tijdstippen bij maximale vloedstroom en maximale ebstroom zijn :

- voor de maximum vloedstroom
 - tijd : 1h05 voor HW
 - waterstand : 5.08m GLLWS
 - debiet : 14600 m³/s

- voor de maximum ebstroom

tijd : 2h50 na HW
 waterstand : 3.68m GLLWS
 debiet : 10500 m³/s

2.5.2. Beschrijving van het morfologisch model

Voor het morfologisch onderzoek, werd een deel van de vaste bodem van het model vervangen door een beweegbare bodem. De schaalwetten voor een geometrisch vertrokken model met vaste bodem (Froude en gelijke relatieve ruwheid) en deze voor een model met beweegbare bodem (Shields en Reynolds) leiden tot een stelsel van vier vergelijkingen met vijf onbekende schalen.

$$\text{Froude} : \boxed{n_v = \sqrt{n_h}} \quad (2.13)$$

$$\text{Ruwheid} : \boxed{n_d = \frac{n_v^4}{n_h^3}} \quad (2.14)$$

$$\text{Shields} : \boxed{\frac{n_v^2}{n_h} = n_{\Delta\rho} n_d} \quad (2.15)$$

$$\text{Reynolds} : \boxed{n_v n_d = \sqrt{n_h}} \quad (2.16)$$

De vijf onbekenden zijn n_h , n_v , n_d en $n_{\Delta\rho}$. Eén van deze parameters kan dus in theorie vrij gekozen worden. Aangezien voor het hydraulisch model reeds twee schalen gekozen werden ($n_h = 6/1000$ en $n_v = 1/64$), dienen nog 3 schalen gekozen te worden. Rekening houdend met de beschikbare materialen in het laboratorium, werd uiteindelijk gekozen voor kunstparelmoer (nacre). Dit resulteert in de volgende modelschalen :

- $n_d = 0.42/0.1314 = 3.196$
- $n_{\Delta\rho} = 0.13$
- $n_v = 1/8$
- $n_t = 0.048$
- $n_{qs} = 2.084$
- $n_{ts} = 0.000145$

De beweegbare bodem werd ingebracht in de zone voor de containerkaai noord namelijk in de vaargeul vanaf de afwaartse kop van de zuidelijke containerkaai tot de strekdam van de Ballastplaat (figuur 2.5).

Dit impliceerde tevens dat niet alle alternatieven die in het hydraulisch onderzoek gesimuleerd zijn ook in het morfologisch onderzoek gesimuleerd werden.

Daar dit materiaal alleen "het transport van zand simuleert" en niet het slib, kunnen er ook alleen conclusies getrokken worden in verband met het zandtransport, en niet over het slibtransport.

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 een specifieke bodemschematisatie opgesteld, daarnaast werden een snelheidsrandvoorwaarde (aan de opwaartse rand) en een waterstandstandsvoorwaarde (ter hoogte van Bath) opgelegd. 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 Meestoof) en vloed (t.h.v. Bath).

Het hydraulisch onderzoek dient als basis voor de morfologische studie. Dit heeft een dubbele implicatie op de simulaties. Het getij moet cyclisch zijn, zodat het slibtransport berekend kan worden gedurende een aantal identieke getijcycli. Bovendien moet het getij representatief zijn voor het gemiddeld sedimenttransport in de Schelde. Het getij dat gekozen werd is een zogezegd morfologisch getij met een amplitude van 1.06 keer de gemiddelde getijamplitude.

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 (28).

Ook de invloed van het volledige verdiepingsprogramma (22) op het hydraulisch en morfologisch regime van de Schelde werd niet in rekening gebracht. Dit betekent dat de randvoorwaarden te Bath en Meestoof, 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.

Verder wordt erop gewezen dat in deze fase van het onderzoek geen rekening wordt gehouden met de invloed van de saliniteitswijzigingen op de snelheden. Dit houdt ondermeer in dat de uitwisseling van water tussen de toegangseul en de rivier als gevolg van dichtheitsverschillen voorlopig niet in rekening wordt gebracht.

De kaaimuur bestaat uit een verticale ondoorlaatbare muur.

3.2. Beschrijving van de simulaties

Tijdens de studie werden diverse simulaties uitgevoerd met een verschillend karakter : referentiesimulaties, een controlesimulatie en verschillende inplantingen van de containerkaai.

1. Vooreerst werd de huidige toestand van de Schelde gesimuleerd als uitgangspunt voor verdere vergelijkingen.
2. Daarnaast werd de toestand in 1981 bekeken, die grondig verschilt van de huidige situatie, doordat de zuidelijke containerkaai en de toegangsheul naar de Berendrechtshuis nog niet bestonden. Bovendien lag de Drempel van Zandvliet gemiddeld dieper dan in de huidige toestand en was er in de Schaar van Doel een verdieping gebaggerd, vandaar de benaming "Put van Doel", zie figuur 3.1 (niet onderzocht op fysisch model).
3. Aangezien reeds beslist werd om een verdieping van de vaargeul uit te voeren, ongeacht de bouw van een noordelijke containerkaai, werd een simulatie uitgevoerd waarbij de vaargeul werd verdiept tot 13.3m GLLWS, overeenkomstig het plan C3.526 van de Antwerpse Zeehavendienst. Deze verdieping strekt zich uit vanaf de Belgisch-Nederlandse grens tot de Drempel van Frederik, zie figuur 3.1.
4. Tenslotte werden 10 alternatieve inplantingen van de containerkaai vergeleken. Voor elk van de alternatieven werd langsheen de kaaimuur een lokale verdieping voorzien tot -14.0m GLLWS en dit over een breedte van 80m en over de volledige lengte van de kaai. Voor alternatief 1 is de bathymetrie ter hoogte van de containerkaai weergegeven in figuur 3.1.

Vanuit nautisch oogpunt werden zwaaicirkels voorzien ter hoogte van de containerkaaien noord en zuid. Daartoe werd lokaal de vaargeul verbreed en de bodem verdiept in een gebied met een straal van 250 tot 300m :

- afwaarts de containerkaai noord: $x = 141000$, $y = 227125$, $r = 300\text{m}$ (cirkel C2 in figuur 3.2).
- ter hoogte van de toegangsheul naar de Zandvliet- en Berendrechtshuis: $x = 143000$, $y = 226310$, $r = 300\text{m}$ (cirkel C4 in figuur 3.2).
- opwaarts de containerkaai zuid: $x = 143380$, $y = 224440$, $r = 250\text{m}$ (cirkel C6 in figuur 3.2).

De tien alternatieve inplantingen van de containerkaai noord hebben lengtes

die variëren van 1000m tot 2400m en verschillen hoofdzakelijk door hun oriëntatie en de als dan niet aanwezigheid van een knikpunt.

- **Alternatief 1 (A1)** : een rechte kaai van 1200m.
- **Alternatief 2 (A2)** : een kaai bestaande uit 2 segmenten van elk 600m en met knik.
- **Alternatief 3 (A3)** : een rechte kaai van 1800m met dezelfde oriëntatie als A1.
- **Alternatief 4 (A4)** : een kaai bestaande uit 2 segmenten van respectievelijk 300m en 900m.
- **Alternatief 5 (A5)** : een kaai bestaande uit 2 segmenten van respectievelijk 350m en 1000m.
- **Alternatief 6 (A6)** : een rechte kaai van 1000m.
- **Alternatief 7 (A7)** : een rechte kaai van 2400m met dezelfde oriëntatie als A1.
- **Alternatief 8 (A8)** : een rechte kaai van 1000m met dezelfde oriëntatie als A1.
- **Alternatief 9 (A9)** : een rechte kaai van 1200m met het eindpunt meer in het vaarwater dan A1.
- **Alternatief 10 (A10)** : een rechte kaai van 1200m met het eindpunt gelegen tussen dat van A1 en A9.

De coördinaten van de begin-, knik- en eindpunten zijn samengebracht in tabel 3.1, terwijl de inplantingen zijn weergegeven in figuren 3.3, 3.4 en 3.5.

Zowel in het fysisch model als voor de mathematische modellering werd uitgegaan van een gesloten kaaimuur. De keuze van de bouwwijze van de kaaimuur viel integraal buiten het bestek van deze studie en gebeurde op basis van bouwtechnische en economische overwegingen. Wel mag worden aangenomen dat de diverse gesloten structuren op het vlak van vormgeving weinig invloed zullen hebben op de stroming langsheen de kaai.

Van de bovengenoemde situaties werden op het fysisch model drie toestanden niet onderzocht (A2, A4 en A6), aangezien de resultaten van het mathematisch model, of praktische overwegingen inzake exploitatie van de kaai in de loop van het onderzoek reeds hadden uitgewezen dat deze alternatieven niet zouden weerhouden worden.

Tabel 3.1 Coördinaten [m] van de kaaimuren.

Simulatie	Beginpunt	Knikpunt	Eindpunt
A1:1200m	x = 143159.2 y = 226587.9	- -	x = 142100.0 y = 227059.2
A2:2x600m	x = 143159.2 y = 226587.9	x = 142589 y = 226751	x = 142077.1 y = 227028.3
A3:1800m	x = 143159.2 y = 226587.9	- -	x = 141562.9 y = 227300.1
A4:300 + 900m	x = 143150.0 y = 226670.0	x = 142855 y = 226678	x = 142077.1 y = 227028.3
A5:350 + 1000m	x = 143160.8 y = 226640.7	x = 142813 y = 226683	x = 141907.1 y = 227106.0
A6:1000m	x = 143170.2 y = 226600.0	- -	x = 142233.1 y = 226936.0
A7:2400m	x = 143159.2 y = 226587.9	- -	x = 140970.0 y = 227560.0
A8:1000m	x = 143159.2 y = 226587.9	- -	x = 142233.4 y = 226999.1
A9:1200m	x = 143159.2 y = 226587.9	- -	x = 142077.1 y = 227028.3
A10:1200m	x = 143159.2 y = 226587.9	- -	x = 142091.7 y = 227048.7

5. Aanvullend werd de sedimentatie berekend in het **Groot Buitenschoor** voor de alternatieven A5 en A9. Deze simulaties vormden een basisgegevens voor het opstellen van het milieu effect rapport.
6. Tenslotte werd met behulp van de mathematisch modellen nagegaan hoe tijdens **stormcondities** de noordelijke containerkaai het hydraulisch en morfologisch regime in de onmiddellijke omgeving beïnvloedt. Hiertoe werden de waargenomen waterstanden tijdens de stormperiode van 26 februari tot 2 maart 1990 gebruikt (1). Tijdens deze serie opeenvolgende westerstormen werd het stormpeil (7m + TAW) 4 maal overschreden. De simulaties werden uitgevoerd voor alternatief 9, een rechtlijnige kaai van 1200m, die zo ver mogelijk naar het vaarwater is ingepland.

4. RESULTATEN VAN HET MODELONDERZOEK

4.1. Hydraulica

4.1.1. Huidige toestand (HT)

De stroming in de huidige toestand geldt als referentie voor de vergelijking van de verschillende alternatieven. Samenvattend kan worden gesteld dat de vloedstroom uitgesmeerd is over de hele breedte van de rivier. De ebstroom daarentegen concentreert zich voornamelijk in de vaargeul, zie figuur 4.1. Tijdens eb zijn de snelheden op de Plaat van Doel dan ook gering (grootte orde 30 tot 40 cm/s). Neervorming treedt op in de toegangsgedul van de Zandvliet- en Berendrechtsluis en aan het opwaartse gedeelte van de leidammen van de Ballastplaat en de Plaat van Doel. Er wordt op gewezen dat de snelheden in de toegangsgedul niet volledig in overeenstemming zijn met de natuur, aangezien de invloed van de zoutindringing niet beschouwd werd.

De debietsverdeling vertoont tijdens vloed, in tegenstelling met de snelheidsverdeling een maximum in de vaargeul, dit houdt in dat het meeste water de vaargeul volgt ook al zijn de snelheden even groot als op de plaat. Tijdens de eb daarentegen is het debiet over de leidam van Doel gering.

4.1.2. Toestand 1981 - "Put van Doel" (PD)

De toestand 1981 dient als validatie voor het slibtransportmodel TRASIL. De zuidelijke containerkaai was toen nog niet gebouwd evenmin als de Berendrechtsluis. In de Schaar van Ouden Doel was een put gebaggerd en bovendien lag de Drempel van Zandvliet gemiddeld dieper dan in de huidige toestand.

Gezien de diepere ligging van de drempel en de vaargeul is het plausibel dat de snelheden, zowel tijdens eb als vloed kleiner zijn dan in de huidige situatie, zie verschilkaart snelheid met huidige toestand in figuren 4.2 en 4.5. Daarentegen blijkt dat door de bouw van de zuidelijke containerkaai er een significante snelheidstoename is ontstaan ter hoogte van deze kaai.

4.1.3. Verdieping van de vaargeul tot -13.3m GLLWS

Met deze simulatie kan de invloed van een verdieping van de vaargeul los van de inplanting van de containerkaai noord onderzocht worden. Uit de simulatie blijkt dat het globale stromingspatroon weinig gewijzigd wordt : in de vaargeul ter hoogte van de geplande containerkaai verhoogt de snelheid lichtjes tijdens vloed en vermindert enigermate tijdens eb, zie figuren 4.2 en 4.5. Meer in het vaarwater en op de Plaat van Doel vermindert de snelheid en dit zowel voor vloed als eb.

4.1.4. Simulaties met containerkaai

De veranderingen in het stroombeeld veroorzaakt door de bouw van de containerkaai noord zijn gering en analoog voor alle alternatieven, enkel de relatieve toe- of afnamen in snelheid verschillen naargelang het alternatief. Door de bouw van de containerkaai noord en de daarmee gepaard gaande wijzigingen in de bodemligging, inclusief het verdiepingsprogramma van de vaargeul wordt de stroming meer herverdeeld over de hele breedte van de rivier. Globaal leidt dit tot volgend stroombeeld :

1. In de vaargeul ter hoogte van de containerkaai noord verminderen de snelheden t.o.v. de huidige toestand en dit zowel tijdens eb als tijdens vloed (grootte-orde 5 à 10 cm/s). Ook op de Plaat van Doel nemen de snelheden af, vooral langsheen de rand van de plaat, langsheen de noordelijke containerkaai daarentegen is er een snelheidstoename. De snelheidsveranderingen zijn groter tijdens eb dan tijdens vloed.
2. Omwille van de verdieping van de vaargeul zal de ebstroom in sterkere mate de rechter oever volgen, vandaar de lokale toename van de snelheid ter hoogte van de kaai.
3. Een langere kaaimuur beïnvloedt het snelheidspatroon sterker dan een kortere.
4. Een kaaimuur die zoveel mogelijk naar het vaarwater ligt, wijzigt het stroombeeld minder dan één die meer naar de oever toe gelegen is.
5. De snelheden langs de noordelijke containerkaai zijn beduidend kleiner dan deze langs de zuidelijke kaai.
6. De snelheden langsheen de zuidelijke kaai worden slechts in geringe mate gewijzigd door de bouw van de noordelijke kaai.

Een vergelijking van de snelheden voor de verschillende inplantingen van de kaaimuur wordt in figuren 4.3, 4.4, 4.6 en 4.7 en in het volgend overzicht

gegeven. In tabel 4.1 zijn de maximale snelheden bij vloed en eb samen met de procentuele verschillen t.o.v. de huidige toestand weergegeven voor drie meetpunten ter hoogte van de kaai. De ligging van de meetpunten is te zien in figuur 2.5. In tabel 4.2 zijn de maximale eb- en vloednelheden langsheen de containerkaai noord samengebracht terwijl in tabel 4.3 dezelfde grootheden weergegeven worden langsheen de zuidelijke containerkaai.

Dezelfde resultaten werden bekomen in het fysisch model, waarbij evenwel enkel de situaties bij maximale eb- en vloedstroom werden beschouwd. In figuur 4.8 wordt het snelheidsbeeld tijdens eb en vloed voor het fysisch model weergegeven. Uit figuren 4.9 en 4.10 blijkt dat er tijdens eb een snelheidsafname is (t.o.v. de huidige toestand) in de vaargeul langsheen de rand van de Plaat van Doel en afwaarts van de containerkaai. Langsheen de kaai zelf is er een snelheidstoename ter hoogte van het huidige baken van Zuid Ballast. Het vloedbeeld is minder uitgesproken (zie figuren 4.11 en 4.12) : over het gehele studiegebied is er geen zone waar de snelheid significant toeneemt of afneemt.

Tabel 4.1. Vergelijking snelheden in meetpunten 1, 2 en 3 (% t.o.v. huidige toestand), mathematisch model.

Simulatie	MP1		MP2		MP3	
Maximale vloed ­ snelheid	m/s	%	m/s	%	m/s	%
Huidige Toestand	0.52		1.00		1.09	
-13.3m GLLWS	0.54	+4	1.01	+1	1.07	-2
"Put Doel"	0.44	-19	0.97	-3	1.03	-5
A8 (1000m)	0.65	+25	0.96	-4	1.02	-7
A1 (1200m)	0.63	+21	0.96	-4	1.04	-5
A3 (1800m)	0.71	+37	0.93	-7	1.00	-9
A7 (2400m)	0.74	+42	0.90	-10	0.95	-15
A2 (2x600m)	0.67	+28	0.99	-1	1.05	-4
A4 (300m + 900m)	0.58	+12	0.98	-2	1.05	-4
A5 (350m + 1000m)	0.66	+27	0.97	-3	1.04	-5
A6 (1000m)	0.61	+17	1.00	0	1.06	-3
A9 (1200m)	0.61	+17	0.98	-2	1.06	-3
A10 (1200m)	0.62	+19	0.97	-3	1.04	-3
Maximale ebs ­ snelheid	m/s	%	m/s	%	m/s	%
Huidige Toestand	0.54		0.86		0.73	
-13.3m GLLWS	0.55	+2	0.85	-1	0.72	-1
"Put van Doel"	0.52	-4	0.84	-2	0.70	-4
A8 (1000m)	0.67	+24	0.75	-15	0.64	-14
A1 (1200m)	0.66	+22	0.75	-15	0.65	-12
A3 (1800m)	0.69	+28	0.72	-19	0.62	-18
A7 (2400m)	0.71	+31	0.72	-19	0.60	-22
A2 (2x600m)	0.70	+29	0.80	-8	0.68	-7
A4 (300 + 900m)	0.64	+19	0.78	-10	0.67	-9
A5 (350 + 1000m)	0.72	+33	0.76	-13	0.65	-12
A6 (1000m)	0.68	+26	0.80	-8	0.69	-6
A9 (1200m)	0.67	+24	0.78	-10	0.67	-9
A10 (1200m)	0.67	+24	0.76	-13	0.65	-12

Tabel 4.2. Vergelijking snelheden langsheen CK-Noord, mathematisch model.

Simulatie	Afstand langsheen de kade			
	0m	600m	1200m	1800m
Maximale vloodsnelheid	m/s	m/s	m/s	m/s
Huidige Toestand	0.05	0.19	0.32	0.47
-13.3m GLLWS	0.04	0.18	0.33	0.45
"Put Doel"	0.02	0.18	0.33	0.46
A8 (1000m)	0.15	0.49	0.44	0.48
A1 (1200m)	0.15	0.48	0.29	0.48
A3 (1800m)	0.17	0.58	0.64	0.43
A7 (2400m)	0.18	0.63	0.74	0.76
A2 (2x600m)	0.12	0.61	0.40	0.47
A4 (300m + 900m)	0.07	0.47	0.22	0.44
A5 (350m + 1000m)	0.13	0.57	0.54	0.45
A6 (1000m)	0.13	0.47	0.37	0.47
A9 (1200m)	0.14	0.45	0.28	0.45
A10 (1200m)	0.15	0.47	0.35	0.40
Maximale ebsnelheid	m/s	m/s	m/s	m/s
Huidige Toestand	0.02	0.24	0.31	0.44
-13.3m GLLWS	0.02	0.22	0.31	0.42
"Put van Doel"	0.03	0.21	0.33	0.44
A8 (1000m)	0.09	0.58	0.48	0.45
A1 (1200m)	0.09	0.59	0.37	0.45
A3 (1800m)	0.09	0.62	0.71	0.52
A7 (2400m)	0.10	0.61	0.72	0.75
A2 (2x600m)	0.06	0.67	0.45	0.44
A4 (300m + 900m)	0.03	0.57	0.29	0.39
A5 (350m + 1000m)	0.08	0.64	0.67	0.47
A6 (1000m)	0.09	0.57	0.44	0.44
A9 (1200m)	0.09	0.61	0.38	0.39
A10 (1200m)	0.09	0.61	0.47	0.42

Tabel 4.3. Vergelijking snelheden langsheen CK-Noord en CK-Zuid, mathematisch model.

Simulatie	CK-Noord 600m	CK-Zuid	Vaarwater CK- Zuid
Maximale vloed­snelheid	m/s	m/s	m/s
Huidige Toestand	0.19	0.99	1.07
-13.3m GLLWS	0.18	0.99	1.07
"Put Doel"	0.18	0.85	1.19
A8 (1000m)	0.49	0.99	1.07
A1 (1200m)	0.48	0.99	1.08
A3 (1800m)	0.58	0.99	1.07
A7 (2400m)	0.63	0.99	1.07
A2 (2x600m)	0.61	0.99	1.06
A4 (300m + 900m)	0.47	0.98	1.06
A5 (350m + 1000m)	0.57	0.99	1.06
A6 (1000m)	0.47	0.99	1.06
A9 (1200m)	0.45	0.99	1.06
A10 (1200m)	0.47	0.99	1.06
Maximale ebs­snelheid	m/s	m/s	m/s
Huidige Toestand	0.24	0.99	1.01
-13.3m GLLWS	0.22	0.98	1.00
"Put van Doel"	0.21	0.88	1.23
A8 (1000m)	0.58	0.97	0.99
A1 (1200m)	0.59	0.97	0.99
A3 (1800m)	0.62	0.97	0.99
A7 (2400m)	0.61	0.98	1.00
A2 (2x600m)	0.67	0.97	0.99
A4 (300m + 900m)	0.57	0.97	0.99
A5 (350m + 1000m)	0.64	0.97	0.99
A6 (1000m)	0.57	0.97	0.99
A9 (1200m)	0.61	0.97	0.99
A10 (1200m)	0.61	0.97	0.99

4.1.5. Simulaties ten behoeve van het MER

In deze simulaties werd nagegaan in welke mate het stromingspatroon wijzigt ter hoogte van de Ballastplaat en in het Groot Buitenschoor als gevolg van de bouw van een noordelijke containerkaai. De simulaties voor alternatieven A5 en A9 geven aan dat het stromingspatroon nauwelijks wijzigingen ondergaat.

4.1.6. Simulaties gedurende stormtij

Het gesimuleerde stormtij bestaat uit vier getijden waarbij het laatste aansluit bij het eerste, zodat een cyclisch getij bekomen wordt. De randvoorwaarden werden afgeleid uit de geregistreerde waterstanden te Bath en uit de resultaten van het 1D hydrodynamisch model van het Waterbouwkundig Laboratorium voor wat betreft de debieten te Meestoof (figuur 4.13). De snelheidswijzigingen ten gevolge van een stormtij zijn groot (figuur 4.14). Door de hoge waterstanden is de ebstroming meer verdeeld over de volledige breedte van de Schelde. Het water stroomt immers gemakkelijker over de leidammen, zodat de snelheden op de Ballastplaat en op de Plaat van Doel sterk toenemen. De invloed van de bouw van de containerkaai is gering tijdens stormtij.

4.2. Slib

4.2.1. Huidige toestand (HT)

Het slibtransportmodel TRASIL werd gebruikt om na te gaan in welke mate de afzetting van slib zal wijzigen in het studiegebied als gevolg van de bouw van een containerkaai. Daarbij werd vooral aandacht geschonken aan de relatieve toename of afname van de hoeveelheid aanslibbing in bepaalde gebieden, eerder dan aan de exacte hoeveelheid afgezet slib. Voor elke simulatie werd het slibtransport gedurende 10 identieke getijden berekend. 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 hoger vermeld werden ook telkens 2 berekeningen uitgevoerd zodat een pessimistische en een optimistische schatting van de slibafzetting kon bepaald worden, waarbij respectievelijk de vermoedelijk maximale en minimale slibafzetting beschouwd werden. Met de pessimistische schatting wordt een aanslibbing berekend van nagenoeg 600 ton per getij in de omgeving van de toegangseuil van de Zandvliet - en de Berendrechtsluis, wat overeenkomt met een volume van 1.4 miljoen m³ per jaar. In deze zone wordt in de werkelijkheid ook een grote aanslibbing geconstateerd. Vergeleken met de in situ gemeten aanslibbing in de toegangseuil naar de Kallosluis, die 1.5 miljoen m³ per jaar bedraagt, lijkt dit een betrouwbaar cijfer.

De sedimentatiegebieden in het modelgebied (figuur 4.15) zijn gesitueerd langs de rechteroever ter hoogte van Bath, tegenover de Ballastleidendam aan de linkeroever, verder langs de geplande containerkaai noord, op de leidendam van de Plaat van Doel, langs de linkeroever gaande van de Plaat van Doel tot aan de opwaartse modelrand en in de toegangseuil tot de Boudewijn- en Van Cauwe-laertsluis.

Uitgedrukt in een sliblaagdikte die afgezet wordt per getij, betekent dit tot maximaal 0.75cm slibafzetting langs de geplande containerterminal noord en op de Plaat van Doel en in de Schaar van Ouden Doel (figuur 4.16). Hierbij wordt uitgegaan van een in situ densiteit van 1.15 kg/l. In de vaargeul is er slechts een geringe, bijna te verwaarlozen sedimentatie. Deze resultaten komen goed overeen met de kwalitatieve beschrijvingen van de bodemgesteldheid in de Schelde, zoals beschreven in hoofdstuk 2, en waarin gewezen wordt op de aanwezigheid van een sliblens langsheen de noordelijke containerkaai en een zandachtige bodem in de vaargeul.

Er wordt op gewezen dat er geen slib wordt afgezet in de toegangseul tot de sluisen van Zandvliet en Berendrecht. De oorzaak hiervan is van numerieke en fysische aard. Zoals reeds beschreven rekent het model met deeltjes. Deze deeltjes verplaatsen zich via stroomlijnen, in de toegangseul is de concentratie aan stroomlijnen gering, zodat er daar weinig of geen deeltjes passeren. Een andere reden heeft betrekking op het feit dat het slibmodel met dieptegemiddelde grootheden rekent en dus geen rekening kan houden met de zoet/zout effecten over een verticaal (tweelagenstroming). In een latere fase van het onderzoek zal de wateruitwisseling tussen de Schelde en de toegangseul worden geanalyseerd en gesimuleerd met behulp van een 3D model.

4.2.2. Toestand 1981 - "Put van Doel" (PD)

In deze situatie zonder zuidelijke containerkaai en met enkel de toegangseul naar de Zandvlietssluis is er een grotere slibafzetting dan in de huidige toestand. Deze toename situeert zich vooral in de Schaar en op de Plaat van Doel, waar toen een put gebaggerd was. In de vaargeul langsheen de geplande containerkaai zijn de veranderingen t.o.v. de huidige toestand klein.

4.2.3. Verdieping van de vaargeul tot -13.3m GLLWS

Deze simulatie laat toe de invloed van de verdieping van de vaargeul te beschouwen, los van de bouw van de containerkaai. Globaal kan worden gesteld dat de sedimentatiezones nauwelijks wijzigen ten opzichte van de huidige toestand, zie figuur 4.16. De sedimentatie neemt in het beschouwde gebied toe met ongeveer 10%. De grootste toename van aanslibbing is gesitueerd in het vaarwater langsheen de gepland containerkaai, waar een toename met 20% tot 30% werd berekend. Deze toename is logisch aangezien de dwarssectie ter plaatse nu reeds beduidend groter is dan de sectie van de vaargeul op- en afwaarts en deze sectie door de vaargeulverdieping nogmaals vergroot wordt.

4.2.4. Situaties met containerkaai

De veranderingen inzake slibsedimentatie door de bouw van een containerkaai zijn analoog voor alle alternatieven, in figuur 4.16 wordt de sedimentatie voor alternatief 9 weergegeven. Er treedt een verhoging op van de afzetting met ongeveer 50%. Deze is hoofdzakelijk gesitueerd langsheen de containerkaai

noord (en de toegangseul naar de sluizen) en op de Plaat en Schaar van Doel. De verschillen die optreden in de slibafzetting zijn te wijten aan de oriëntatie van de kaaimuur, de lengte en de geometrie (al dan niet een knikpunt). Meer specifiek kunnen volgende vaststellingen worden gemaakt.

1. Bij een langere kaaimuur vergroot de slibafzetting meer dan bij een kortere en dit zowel op de Plaat en Schaar van Doel als in het vaarwater langs de containerkaai. Zo neemt de slibafzetting langs de kaai toe met respectievelijk 56% tot 85% t.o.v. de huidige toestand als de lengte van de kaaimuur verlengd wordt van 1000m tot 2400m.
2. Een kaaimuur die meer naar het vaarwater toe gelegen is, is gunstiger wat slibafzetting betreft dan één die meer oeverwaarts gelegen is. Dit is duidelijk vast te stellen bij een vergelijking van de alternatieven 1, 10 en 9 die even lang zijn (1200 m), maar die steeds meer naar het vaarwater toe liggen. De sedimentatie t.o.v. de huidige toestand neemt toe met respectievelijk 62%, 55% en 49%.
3. Een kaaimuur die beter de dieptelijnen volgt en dus minder de geometrie van de Schelde verstoort, heeft een kleinere sedimentatie tot gevolg dan één die rechtlijnig is.

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende berekeningen, werden 3 karakteristieke zones gedefinieerd, nl. :

- 1 : Plaat van Doel en Schaar van Ouden Doel,
- 2 : Vaarwater containerkaai noord,
- 3 : Vaarwater containerkaai zuid en strekdam van Doel.

In deze zones werd de totale hoeveelheid afgezet slib berekend en voor de diverse alternatieven vergeleken met de huidige toestand, zie tabel 4.4 en 4.5.

Tabel 4.4 Sedimentatie van slib. Pessimistische schatting (in ton/getij en % verschil t.o.v. de Huidige Toestand), mathematisch model.

Simulatie	Totaal		Plaat van Doel (1)		Vaargeul CKN(2)		Vaargeul CKZ(3)	
	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%
HT	2347	-	807	-	596	-	945	-
"Put Doel"	3188	+ 36	1303	+ 62	656	+ 10	1229	+ 30
-13.3m GLLWS	2557	+ 9	895	+ 11	728	+ 22	934	-1
A8:1000m	3229	+ 38	1197	+ 48	931	+ 56	1101	+ 17
A1:1200m	3252	+ 39	1151	+ 43	967	+ 62	1133	+ 20
A3:1800m	3448	+ 47	1259	+ 56	1060	+ 78	1129	+ 20
A7:2400m	3576	+ 52	1403	+ 74	1101	+ 85	1072	+ 14
A2:2x600m	2962	+ 26	1222	+ 51	811	+ 36	929	-2
A4:300 + 900m	3144	+ 34	1152	+ 43	875	+ 47	1117	+ 18
A5:350 + 1000m	3019	+ 29	1213	+ 50	888	+ 49	919	-3
A6:1000m	3116	+ 33	1086	+ 35	874	+ 47	1156	+ 22
A9:1200m	3089	+ 32	1111	+ 38	887	+ 49	1090	+ 15
A10:1200m	3161	+ 35	1140	+ 41	925	+ 55	1096	+ 16

Tabel 4.5 Sedimentatie van slib. Optimistische schatting (in ton/getij en % verschil t.o.v. de Huidige Toestand), mathematisch model.

Simulatie	Totaal		Plaat van Doel (1)		Vaargeul CKN (2)		Vaargeul CKZ (3)	
	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%
HT	1273	-	97	-	343	-	833	-
"Put Doel"	1585	+ 25	253	+ 162	322	-6	1010	+ 21
-13.3m GLLWS	1359	+ 7	115	+ 19	442	+ 29	802	-4
A8:1000m	1801	+ 42	288	+ 198	529	+ 54	985	+ 18
A1:1200m	1839	+ 44	282	+ 192	581	+ 69	976	+ 17
A3:1800m	1933	+ 52	335	+ 246	621	+ 81	978	+ 17
A7:2400m	1989	+ 56	444	+ 359	634	+ 85	911	+ 9
A2:2x600m	1584	+ 24	316	+ 227	475	+ 38	793	-5
A4:300 + 900m	1760	+ 38	242	+ 150	519	+ 51	999	+ 20
A5:350 + 1000m	1671	+ 31	314	+ 225	494	+ 44	863	+ 4
A6:1000m	1763	+ 36	234	+ 142	536	+ 56	994	+ 19
A9:1200m	1719	+ 35	226	+ 133	501	+ 46	993	+ 19
A10:1200m	1777	+ 40	256	+ 163	544	+ 59	979	+ 17

4.2.5. Simulaties ten behoeve van het MER

De verfijnde simulaties ten behoeve van het Milieu-effect-Rapport geven aan dat er weinig slib wordt afgezet op de Ballastplaat en het Groot Buitenschoor. De slibafzetting vergroot weliswaar door de bouw van een containerkaai : de sedimentatie bedraagt ongeveer 0.15 mm per getij. De toename is gedeeltelijk te wijten aan een verplaatsing van de slibafzetting van de Appelzak naar de Ballastplaat.

Ook de slibhoeveelheid die wordt afgezet in het gebied tussen de leidam van de Ballastplaat en het afwaartse uiteinde van de kaaimuur zal toenemen.

4.2.6. Simulaties gedurende stormtij

Tijdens stormtij wordt het slibtransport en daardoor ook de slibafzetting sterk gewijzigd. Stormtijen treden evenwel niet frequent op en hebben dus op jaarbasis geen uitgesproken impact op de slibhuishouding in de Schelde. Niettemin is het belangrijk om de invloed ervan lokaal en tijdelijk te kunnen begroten.

De voornaamste gevolgen van een stormtij zijn:

1. De slibsedimentatie neemt af tijdens een storm in het gebied ter hoogte van de containerkaai. De afname is vooral gelokaliseerd op de Plaat van Doel en in de Schaar van Ouden Doel. In het gebied onmiddellijk voor de containerkaai is de vermindering in sedimentatie minder uitgesproken.
2. De afzetting van slib langsheen de containerkaai zal meer naar de toegangsgeul toe verschoven worden, zodat verwacht kan worden dat er ten gevolge van een stormtij meer slib in de toegangsgeul zal afgezet worden.
3. De verschillen tussen de huidige toestand en alternatief 9 zijn analoog voor stormtij en morfologisch getij. Dit houdt in dat door de bouw van een containerkaai de slibafzetting verhoogt met ongeveer 50%.
4. Door de grotere snelheden die optreden tijdens stormtij zal een deel van het slib dat reeds afgezet werd, terug in suspensie komen. De erosie van slib treedt voornamelijk op in de vaargeul, op de Plaat van Doel en in de Schaar van Ouden Doel.

4.3. Zand

4.3.1. Huidige toestand (HT)

Het zandtransport in de omgeving van de noordelijke containerkaai werd geanalyseerd met behulp van zowel het fysisch als een mathematisch model (FINTRA). Op deze wijze kon worden nagegaan in welke mate de verschillende alternatieven een invloed hebben op de sedimentatie en de erosie van zand en kon de vergelijking worden gemaakt met de huidige toestand.

De getijrandvoorwaarden en de daaruit voortkomende stromingen zijn zodanig gekozen dat ze representatief zijn voor het gemiddeld zandtransport in de Schelde. Wel wordt erop gewezen dat het onderzoek vooral gericht was op een onderlinge vergelijking van de verschillende toestanden, zodat voor elk van de situaties een "zo goed mogelijke schatting van erosie en sedimentatie" werd bepaald, rekening houdend met de beperkte hoeveelheid beschikbare gegevens voor de calibratie van het zandtransport. Verder wordt eraan herinnerd dat de invloed van het volledig verdiepingsprogramma in de Schelde op het hydraulisch en morfologisch regime niet in rekening werd gebracht.

Vroegere analyses van de sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Zandvliet (6) toonden een gemiddelde wekelijkse sedimentatie van 3cm in de vaargeul, wat overeenkomt met een sedimentatie van 2.1mm per getij bij aanname van 40% holle ruimten. Op de Drempel van Zandvliet bedraagt de gemiddelde sedimentatie 3 tot 5cm per getij. In termen van onderhoudsbaggerwerken kan worden gesteld dat jaarlijks ongeveer 1.2 miljoen m³ gebaggerd wordt op de Drempel van Zandvliet (10).

De resultaten van de enkele simulaties waaronder de huidige toestand zijn weergegeven in figuren 4.17 en 4.18.

Uit de resultaten van de berekening voor de huidige toestand blijkt de sterk afwisselende erosie en sedimentatie ter hoogte van Bath en Meestoof, dit is een gevolg van de invloed van de randen van het model. Verder worden plausibele resultaten bekomen, nl. sedimentatie op de drempel van Zandvliet en erosie in de Schaar van Doel.

Tevens geven de berekeningen aan dat het gebied langsheen de zuidelijke containerkaai onderhevig is aan erosie.

4.3.2. Toestand 1981 - "Put van Doel" (PD)

De berekeningen voor de toestand "Put van Doel" geven een verhoging van de sedimentatie in het vaarwater (1 tot 7 mm/getij) wat aanvaardbaar is, aangezien de vaargeul in die periode dieper uitgebaggerd was, wat aanleiding geeft tot verhoogde sedimentatie.

4.3.3. Verdieping van de vaargeul tot -13.3m GLLWS

Uit de berekening blijkt dat ten gevolge van de verdieping van de vaargeul de netto sedimentatie op de Drempel van Zandvliet toeneemt met ongeveer 5%. Dit fenomeen stemt overeen met vroegere waarnemingen door de Antwerpse Zeehavendienst, zie figuren 4.17 en 4.18.

4.3.4. Situaties met containerkaai

Om een vergelijking van de verschillende alternatieve inplantingen van de containerkaai te kunnen maken, werden zes zones gedefinieerd :

- 1 : gebied vanaf de afwaartse rand tot aan de Drempel van Zandvliet,
- 2 : Drempel van Zandvliet,
- 3 : Plaat van Doel en Schaar van Ouden Doel,
- 4 : gebied vanaf de Drempel van Zandvliet tot de opwaartse rand van het model,
- 5 : strekdam van de Ballastplaat,
- 6 : strekdam van Doel.

Uit de vergelijking van de erosie en de sedimentatie in de verschillende zones blijkt dat de alternatieven aanleiding geven tot gelijkaardige wijzigingen in het zandtransport, zie als voorbeeld alternatief 9 in figuren 4.17 en 4.18. Voor de Drempel van Zandvliet en de Plaat van Doel en in de Schaar van Ouden Doel verminderen zowel de erosie als de sedimentatie. Op de Drempel van Zandvliet daalt de sedimentatie met ongeveer 12%, terwijl de erosie met ongeveer 15% afneemt. Bijgevolg mag verwacht worden dat de netto sedimentatie op de Drempel van Zandvliet niet sterk zal beïnvloed worden door de bouw van de noordelijke containerkaai. In tabel 4.6 is de erosie en de sedimentatie in de zes zones voor de tien alternatieven weergegeven, daarnaast wordt in tabel 4.7 voor 3 alternatieven de netto sedimentatie samengevat.

Uit het fysisch modelonderzoek blijkt daarenboven dat er sedimentatie optreedt

langsheen de rand van de Plaat van Doel. De verschuiving van de 13m dieptelijn naar het vaarwater toe strekt zich uit over de gehele lengte van de containerkaai.

Naast de aangehaalde globale erosie en sedimentatiewaarden wijst het onderzoek zowel in het fysisch als in het mathematisch model op een tendens tot lokale erosie langsheen en afwaarts de noordelijke kaaimuur. De erosie doet zich voor de alternatieven 9 en 10 voor op ongeveer dezelfde plaats, dit wil zeggen dichter bij de kaai voor alternatief 9 dan voor alternatief 10.

Tabel 4.6 Erosie en sedimentatie van zand in m³/getij en % verschil t.o.v. HT (definitie zones, zie tekst), mathematisch model.

ZONE / EROSIE	totaal		1		2		3		4		5		6	
	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%
HT	19570		10200		783		1612		5012		632		1331	
A8	19600	0	11127	9	736	-6	1220	-24	4849	-3	667	5	1001	-25
A1	19844	1	11309	11	724	-7	1233	-24	4867	-3	666	5	1044	-22
A3	19858	1	11394	12	774	-1	1155	-28	4847	-3	678	7	1009	-24
A7	18526	-5	10172	0	735	-6	991	-39	4760	-5	907	44	960	-28
A2	19497	0	10996	8	666	-15	1255	-22	4860	-3	667	6	1053	-21
A4	18031	-8	9625	-6	560	-28	1343	-17	4815	-4	595	-6	1093	-18
A5	18822	-4	10485	3	649	-17	1243	-23	4809	-4	633	0	1002	-25
A6	19751	1	11154	9	704	-10	1294	-20	4845	-3	668	6	1084	-19
A9	19241	-2	10698	5	676	-14	1289	-20	4870	-3	655	4	1053	-21
A10	19004	-3	10574	4	644	-18	1275	-21	4844	-3	622	-2	1045	-21
SEDIMEN.														
HT	-18449		-8016		-1218		-1235		-3936		-1889		-2156	
A8	-18439	0	-8750	9	-1116	-8	-1006	-19	-3862	-2	-2068	9	-1637	-24
A1	-18631	1	-8978	12	-1027	-16	-995	-19	-3891	-1	-2055	9	-1685	-22
A3	-18644	1	-9023	13	-1053	-14	-1009	-18	-3855	-2	-2085	10	-1620	-25
A7	-17325	-6	-8007	0	-1089	-11	-887	-28	-3731	-5	-2092	11	-1518	-30
A2	-18329	-1	-8666	8	-1021	-16	-1032	-16	-3867	-2	-2037	8	-1707	-21
A4	-17020	-8	-7547	-6	-1074	-12	-1029	-17	-3801	-3	-1806	-4	-1764	-18
A5	-17700	-4	-8228	3	-1080	-11	-1000	-19	-3798	-3	-1949	3	-1645	-24
A6	-18576	1	-8814	10	-1068	-12	-1051	-15	-3851	-2	-2049	8	-1743	-19
A9	-18101	-2	-8422	5	-1056	-13	-1036	-16	-3872	-2	-2005	6	-1709	-21
A10	-17882	-3	-8295	3	-1093	-10	-1013	-18	-3830	-3	-1961	4	-1691	-22

Tabel 4.7 Som erosie en sedimentatie zand in m³/getij en % verschil t.o.v. HT (definitie zones, zie tekst), mathematisch model.

ZONE / SOM E+S	totaal		1		2		3		4		5		6	
	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%
HT	1121		2185		-435		377		1076		-1257		-825	
A5	1122	0	2257	3	-431	-1	243	-36	1011	-6	-1316	5	-643	-22
A9	1140	2	2276	4	-380	-13	253	-33	997	-7	-1350	7	-656	-20
A10	1122	0	2279	4	-448	3	261	-31	1014	-6	-1338	6	-646	-22

4.3.5. Simulaties ten behoeve van het MER

Gezien de aard van het zandtransportmodel, met name een transportcapaciteitsmodel, was het weinig zinvol om zandtransportberekeningen uit te voeren met het verfijnde rooster. Niettemin kan worden gesteld, dat op basis van de oorspronkelijke berekeningen, de zandhuishouding nauwelijks wijzigt op de Ballastplaat na het bouwen van een noordelijke containerkaai.

4.3.6. Simulaties gedurende stormtij

Door het veranderen van de hydraulische condities tijdens storm ondergaat het zandtransport grote wijzigingen. De erosie neemt toe in de vaargeul ter hoogte van de leidam van de Ballastplaat, terwijl de sedimentatie op de Drempel van Zandvliet vermindert. Tijdens storm zijn er geen uitgesproken negatieve effecten te verwachten door het bouwen van de containerkaai. Wel is er een sterkere tendens tot lokale erosie langsheen de kaaimuur.

5. BESLUITEN

In het kader van het globale studieprogramma van de Containerkaai Noord werd op 14/10/1991 door de Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, aan het studieconsortium International Marine and Dredging Consultants NV - Waterbouwkundig Laboratorium de opdracht verleend om een hydraulisch-sedimentologisch onderzoek uit te voeren. Dit onderzoek diende ondermeer de meest gunstige lay-out te bepalen voor een nieuwe containerkaai ten noorden van het sluizencomplex Zandvliet-Berendrecht. Het streefdoel hierbij was om een minimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken na te streven, gekoppeld aan een veilige verkeersafwikkeling en randvoorwaarden inzake bouwtechnieken en exploitatiemogelijkheden.

Tijdens de studie werd zowel gebruik gemaakt van mathematische modellen als van een fysisch model om de gevolgen van alternatieve inplantingen van de noordelijke containerkaai te begroten. De vormgeving van de kaaimuur evolueerde tijdens het onderzoek van een drietal theoretische oplossingen, namelijk een kaaimuur van 1200m, of 2 maal 600m en tenslotte een kaai van 1800m, naar een geoptimaliseerde vormgeving die zoveel mogelijk de diverse vereisten inzake baggerwerken, bouwtechniek en exploitatie kon verenigen. In een latere fase van het onderzoek werden bovendien de nodige gegevens bepaald om de impact van de containerkaai op het nabijgelegen natuurgebied 'Groot Buitenschoor' de kunnen evalueren.

In totaal werden op deze wijze tien alternatieve inplantingen van de noordelijke containerkaai bestudeerd. Uit dit onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

Vanuit hydraulisch oogpunt blijkt dat de geplande werken een geringe invloed hebben op het stroombeeld ter hoogte van de geplande containerkaai. Door de bouw van de kaai en de daarmee gepaard gaande wijzigingen in de bodemligging, inclusief het verdiepingsprogramma van de vaargeul tot -13.3m GLLWS wordt de stroming meer herverdeeld over de volledige breedte van de Schelde.

1. In de vaargeul ter hoogte van de containerkaai noord verminderen de snelheden t.o.v. de huidige toestand en dit zowel tijdens eb als tijdens vloed (grootte-orde 5 à 10 cm/s). Ook op de Plaat van Doel nemen de snelheden af, vooral langsheen de rand van de plaat, langsheen de noordelijke containerkaai daarentegen is er een snelheidstoename. De snelheidsverande-

ringen zijn groter tijdens eb dan tijdens vloed.

2. Omwille van de verdieping van de vaargeul zal de ebstroom in sterkere mate de rechter oever volgen, vandaar de lokale toename van de snelheid ter hoogte van de kaai.
3. Een langere kaaimuur beïnvloedt het snelheidspatroon sterker dan een kortere.
4. Een kaaimuur die zoveel mogelijk naar het vaarwater ligt, wijzigt het stroombeeld minder dan één die meer naar de oever toe gelegen is.
5. De snelheden langs de noordelijke containerkaai zijn beduidend kleiner dan deze langs de zuidelijke kaai.
6. De snelheden langsheen de zuidelijke kaai worden slechts in geringe mate gewijzigd door de bouw van de noordelijke kaai.

Vanuit morfologisch oogpunt kan worden gesteld dat het sedimentatiepatroon van slib door de bouw van de kaai op analoge wijze verandert. Er treedt een verhoging op van de afzetting met ongeveer 50%. Deze afzetting komt voor langsheen de kaai en in de toegangseul naar de sluizen. De verschillen die optreden in de slibafzetting zijn te wijten aan de oriëntatie van de kaaimuur, de lengte en de geometrie.

1. Wanneer een langere kaaimuur wordt gebouwd, vergroot de slibafzetting meer dan bij een kortere en dit zowel in het vaarwater als op de Plaat van Doel.
2. Een kaaimuur die meer naar het vaarwater toe gelegen is, is gunstiger wat slibafzetting betreft dan één die meer naar de rechter oever toe ligt.
3. Een kaaimuur die beter de dieptelijnen volgt en dus minder de bathymetrie van de Schelde verstoort, heeft een kleinere sedimentatie tot gevolg dan één die rechthoekig is.

Ook de bodemligging in de omgeving van de Drempel van Zandvliet zal wijzigingen ondergaan als gevolg van het gewijzigd zandtransport.

1. Door de bouw van de containerkaai zet de tendens zich voort dat de rand van de Plaat van Doel verschuift naar het vaarwater toe. Dit fenomeen doet zich ook al voor als enkel een verdieping van de vaargeul wordt gerealiseerd.
2. Langs de kaaimuur treedt bij alle alternatieven een kleine erosie op, die beduidend kleiner is als de erosie ten gevolge van de schroefwerking van de schepen.
3. Ten gevolge van de bouw van de containerkaai kan een erosieput verwacht worden afwaarts van de kop van de terminal.

Op basis van het hydraulisch-morfologisch onderzoek blijkt dat alternatief 2 (2x600m) en in tweede instantie alternatief 5 (350 + 1000m) de voorkeur genieten. Aangezien het om geknikte kaaimuren gaat, zijn deze voor de exploitatie onaanvaardbaar. Bovendien reikt alternatief 5 tot in het natuurgebied 'Groot Buitenschoor'. Alternatief 9 (een kaai van 1200m die zo ver mogelijk naar het vaarwater ligt) biedt een aanvaardbare oplossing inzake minimalisatie van de slibafzetting, maar houdt een aantal nadelen in op bouwtechnisch vlak. De integratie van de diverse argumenten heeft geleid tot een alternatief waarbij de kaaimuur zo ver mogelijk naar het vaarwater toe wordt geconstrueerd, rechtlijnig is en bovendien droog kan uitgevoerd worden (alternatief 10).

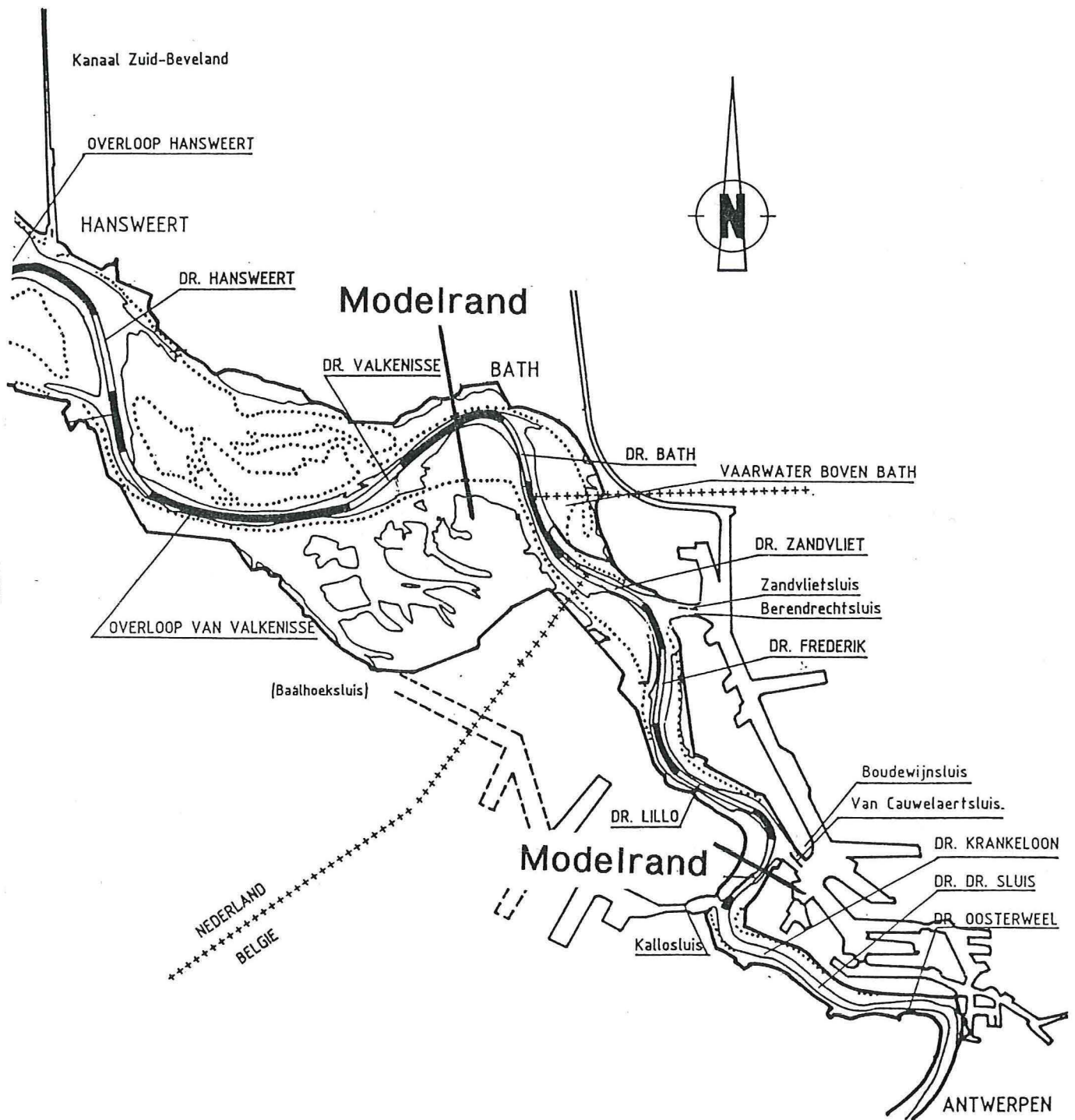
LITERATUURLIJST

- (1) Antwerpse Zeehavendienst (1990). De Buitengewone Stormvloeden tussen 26 Februari en 2 Maart 1990. AZ90.2.
- (2) Bastin, A. en H. Belmans (1988). A New Bottom Composition Map of the River Scheldt and the General Use of a Fast Method to Chart the Composition of Sea and Riverbottoms for the Study of Siltation Problems. 9th Int. Harbour Congress, Antwerp.
- (3) Delo, A. (1988). Estuarine Muds Manual. Hydraulics Research Wallingford, SR 164.
- (4) Engelund, F. and E. Hansen (1967). A Monograph on Sediment in Alluvial Streams. TU Copenhagen. Teknisk Forlag.
- (5) Hydraulics Research Wallingford (1980). River Scheldt Surge Barrier - Study of Estuary Sediments. Ex 928.
- (6) I.M.D.C. (1986). Optimalisatie van de Onderhoudsbaggerwerken in de Westerschelde, Drempel van Zandvliet 1980-1983.
- (7) I.M.D.C. (1988). Optimalisatie van de Onderhoudsbaggerwerken in de Toegangsgeul naar de Kallosluis - Mathematisch Model SLIBTRANS. Rapport Nr. 906-88.01.02.
- (8) I.M.D.C. (1988). Een Tweede Containerterminal langs de Schelde. Rapport Nr. 131-88.12.02.
- (9) I.M.D.C. (1988). Liefkenshoektunnel, Onderzoek betreffende de Morfologische Factoren. Rapport Nr. 130-88.01.03.
- (10) I.M.D.C. (1990). Rivierbodemsanering en Landschapsbouw. Het nuttig gebruik van Baggerspecie uit de Antwerpse Regio. Rapport Nr. 129-90.10.2.
- (11) I.M.D.C. (1991). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek, Deelrapport 1, Stroom- en Sedimentmeting 27/09/90. Nr. 1166-92.01.02.

-
- (12) I.M.D.C. (1991). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek, Deelrapport 2, Stroom- en Sedimentmeting 04/10/90. Nr. 1166-92.01.04.
- (13) I.M.D.C. (1991) Containerkaai Noord - Hydraulisch Onderzoek, Eindrapport. Rapport Nr. 1146-91.12.08.
- (14) Krone, R.B. (1962). Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarine Shoaling Processes. Tech. Report Hydr. Laboratory, University of California, Berkeley California.
- (15) Manni, R.J. (1986). Slibtransport en Slibbalans in de Westerschelde. Reeks Westerscheldestudies, Rapport Nr. 4, Rijkswaterstaat - Vlissingen.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) Partheniades, E. (1962). A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water, PhD Thesis, University of California.
- (20) Puls, W. (1984). Erosion Characteristics of Estuarine Muds. Hydraulics Research Wallingford, IT 265.
- (21) Rijkswaterstaat - DGW Middelburg (1991). Zandribbelatlas Westerschelde. Intern Rapport.
- (22) Technische Scheldecomisie (1984). Verdieping Westerschelde - Studierapport - Programma 48'/43'. Middelburg, Antwerpen.
- (23) Teeter, A.M. (1992). Erosion of Cohesive Dredged Material in Open-Water Disposal Sites. DRP-1-07. US Army Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg.

- (24) van Rijn, L.C. (1987). Mathematical Modelling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment Transport. Phd Thesis TU Delft.
- (25) Voogt, L., L.C. van Rijn and J.H. van den Berg (1991). Sediment Transport of Fine Sands at High Velocities. ASCE J. Hydr. Eng. Vol 117.
- (26) Wartel, S. (1972). Sedimentologisch Onderzoek van de Opbouw van het Schelde Estuarium, Doctoraatsthesis KULeuven.
- (27) Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (1990). Wiskundig Model van de Schelde, Actualisatie Sigmaplan, Mod. 440, Rapport 3.
- (28) Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (1990). Containerterminal ten Noorden van de Zandvlietsluis, Oriënterend Modelonderzoek. Mod. 481/1.
- (29) Waterloopkundig Laboratorium Delft (1985). Vergelijking Zandtransportformules van Morra-Kalinske, Englund-Hansen en Van Rijn. Rapport Nr. R2142.

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

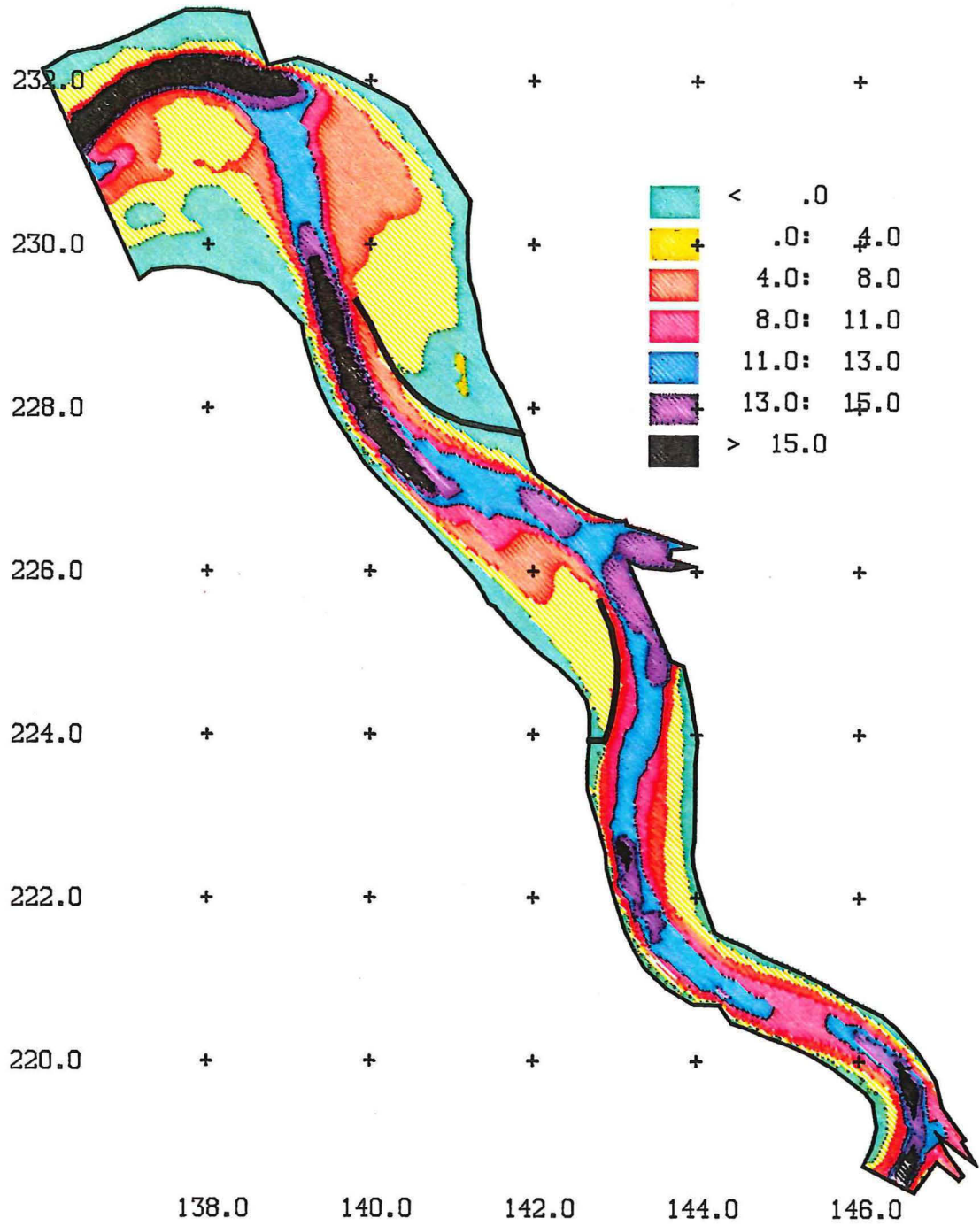


CONSORTIUM



Figuur 2.1

Bathymetrie Schelde
 Mathematisch Model (m TAW)



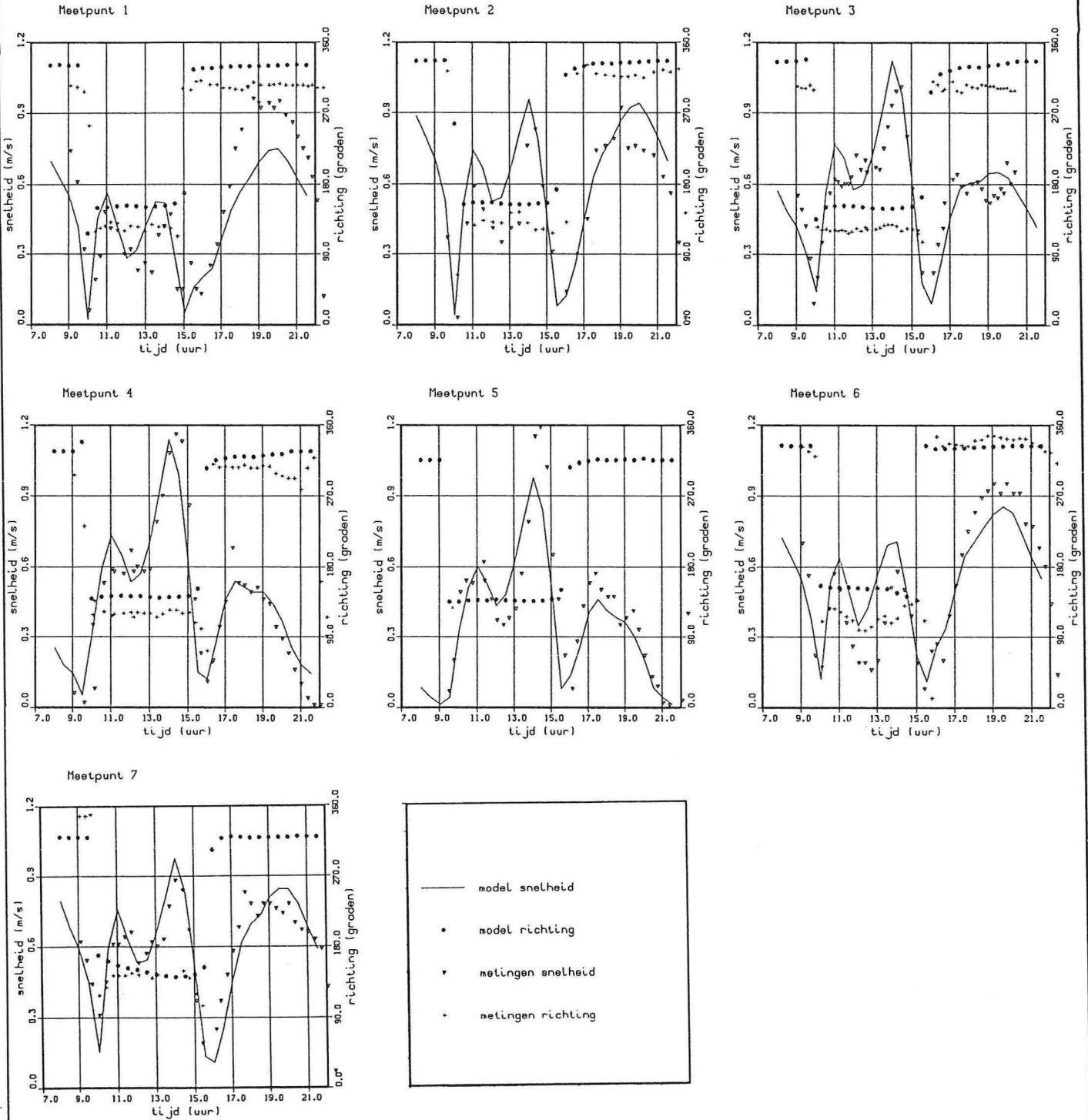
CONSORTIUM



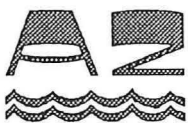
Figuur 2.2

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Springtij 4/10/90 - Calibratie
 Snelheid in Meetpunten van 4/10/90
 Vergelijking met Metingen

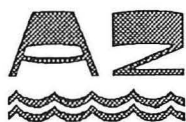
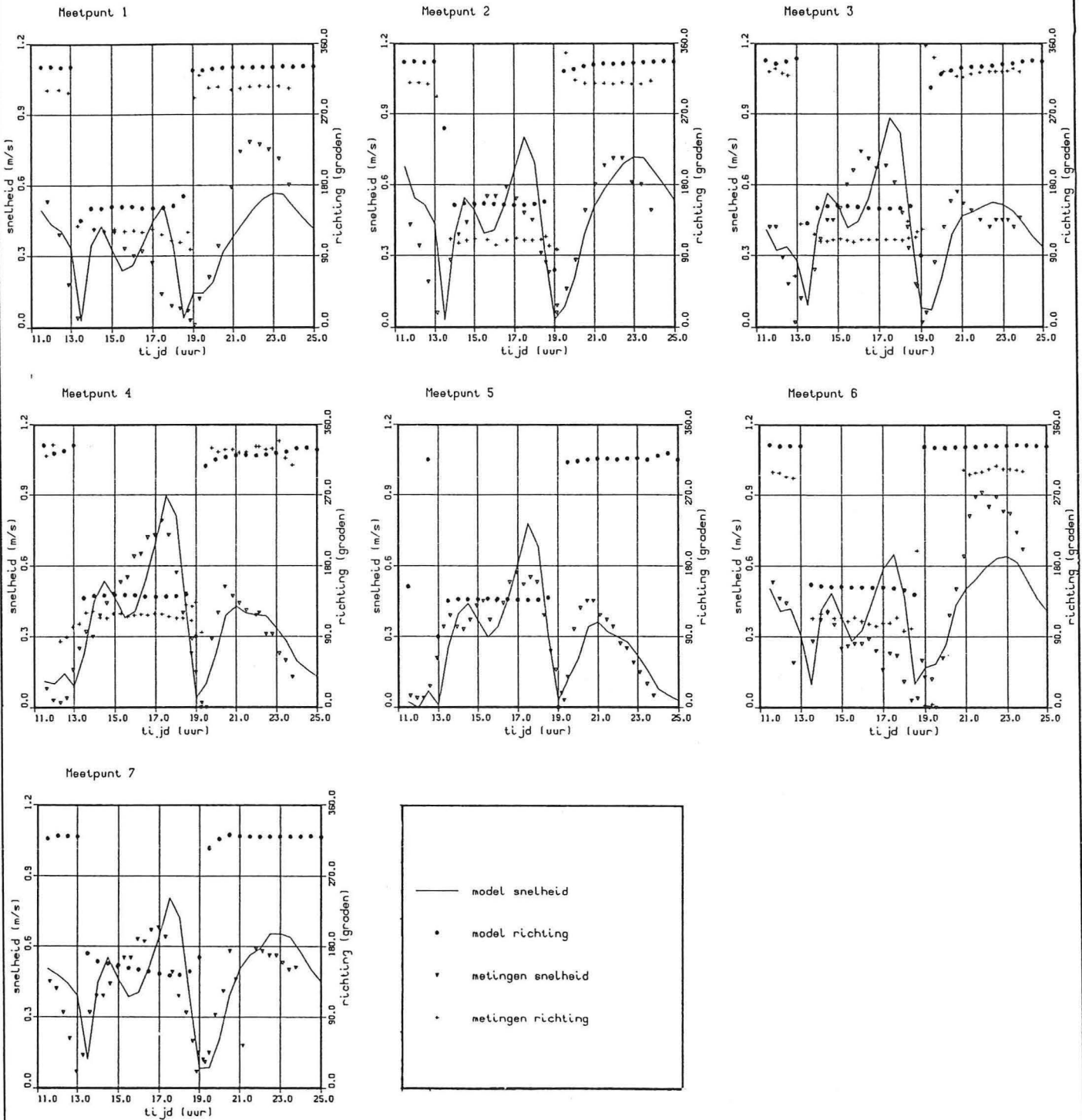


CONSORTIUM



Figuur 2.3

Doodtijd 27/9/90 - Validatie Snelheid in Meetpunten van 27/9/90 Vergelijking met Metingen

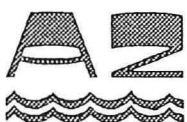
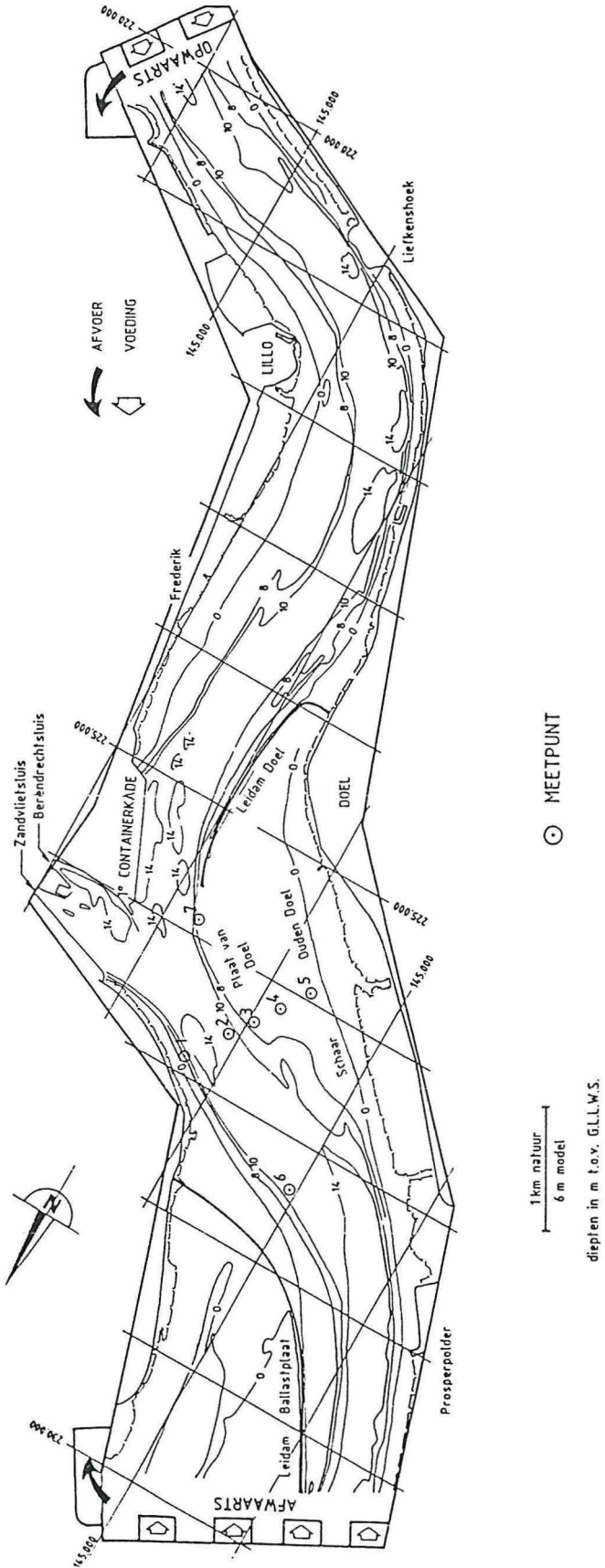


CONSORTIUM



Figuur 2.4

Plan Fysisch Model



CONSORTIUM



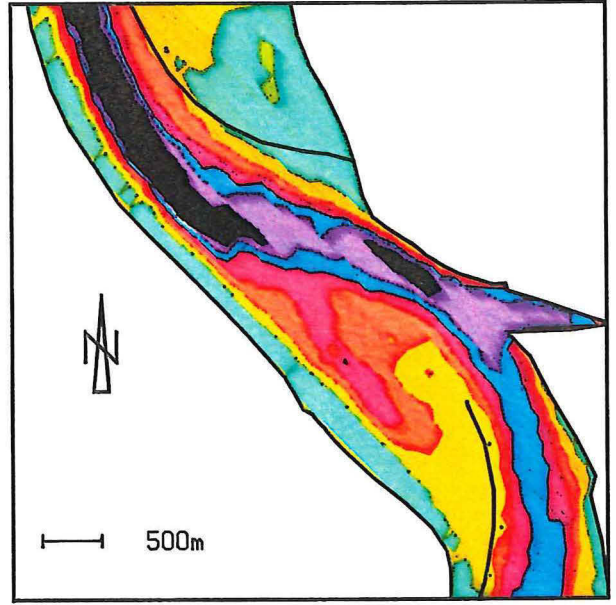
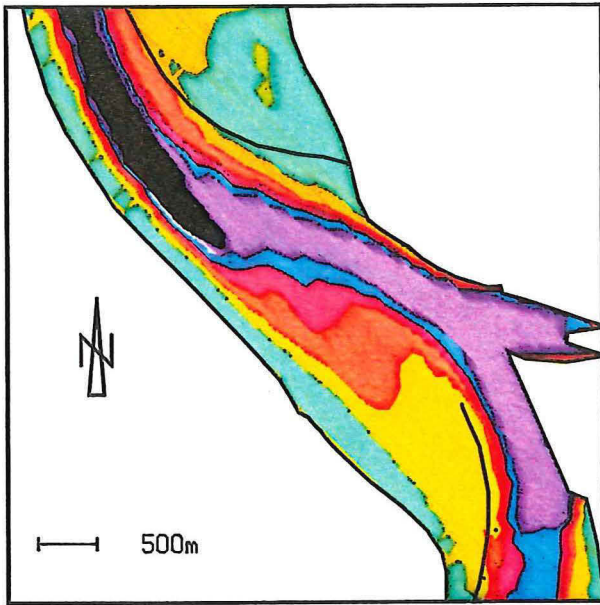
Figuur 2.5

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

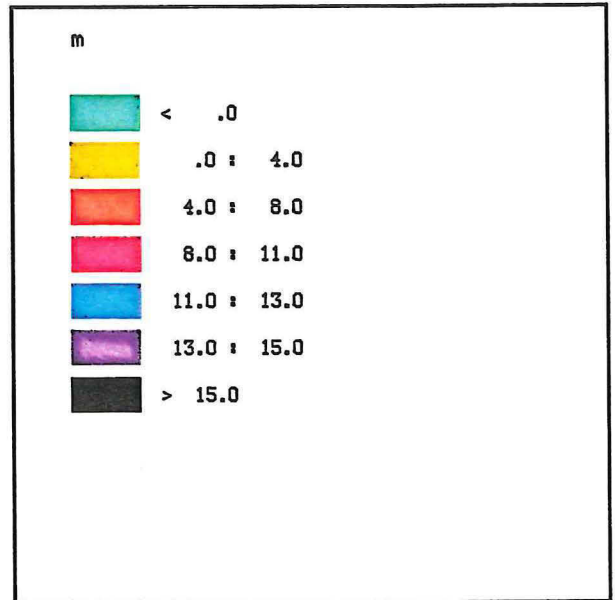
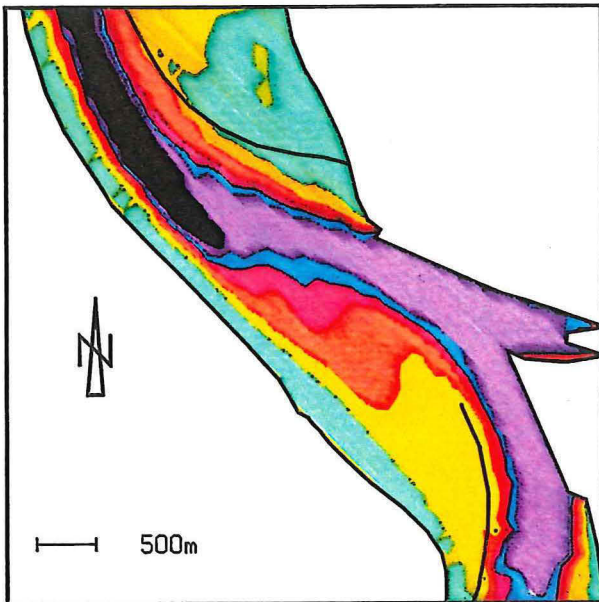
Bathymetrie Schelde Mathematisch Model, (m TAW)

Verdieping -13.3GLLWS

Put van Doel



Alternatief 1

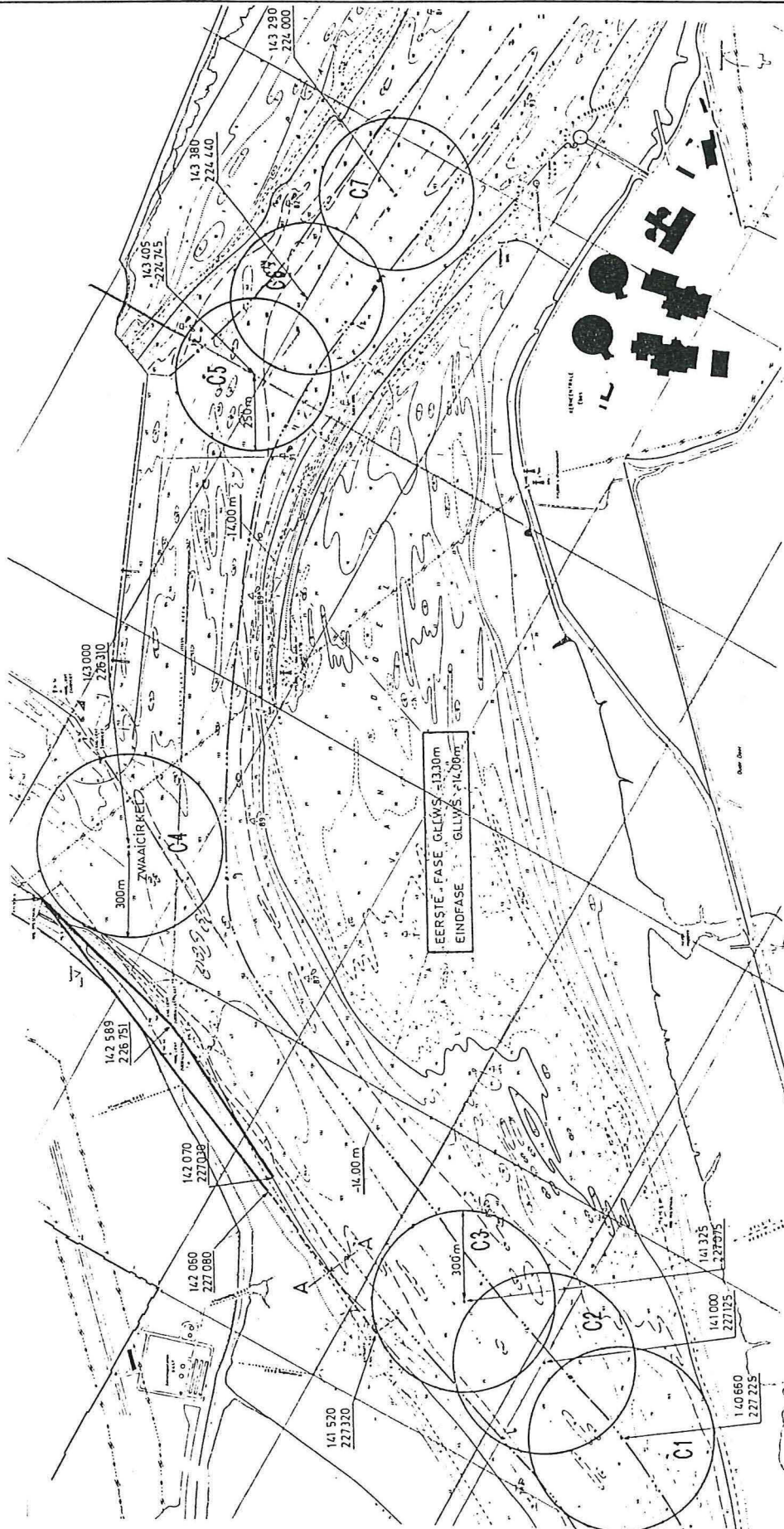


CONSORTIUM



Figuur 3,1

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

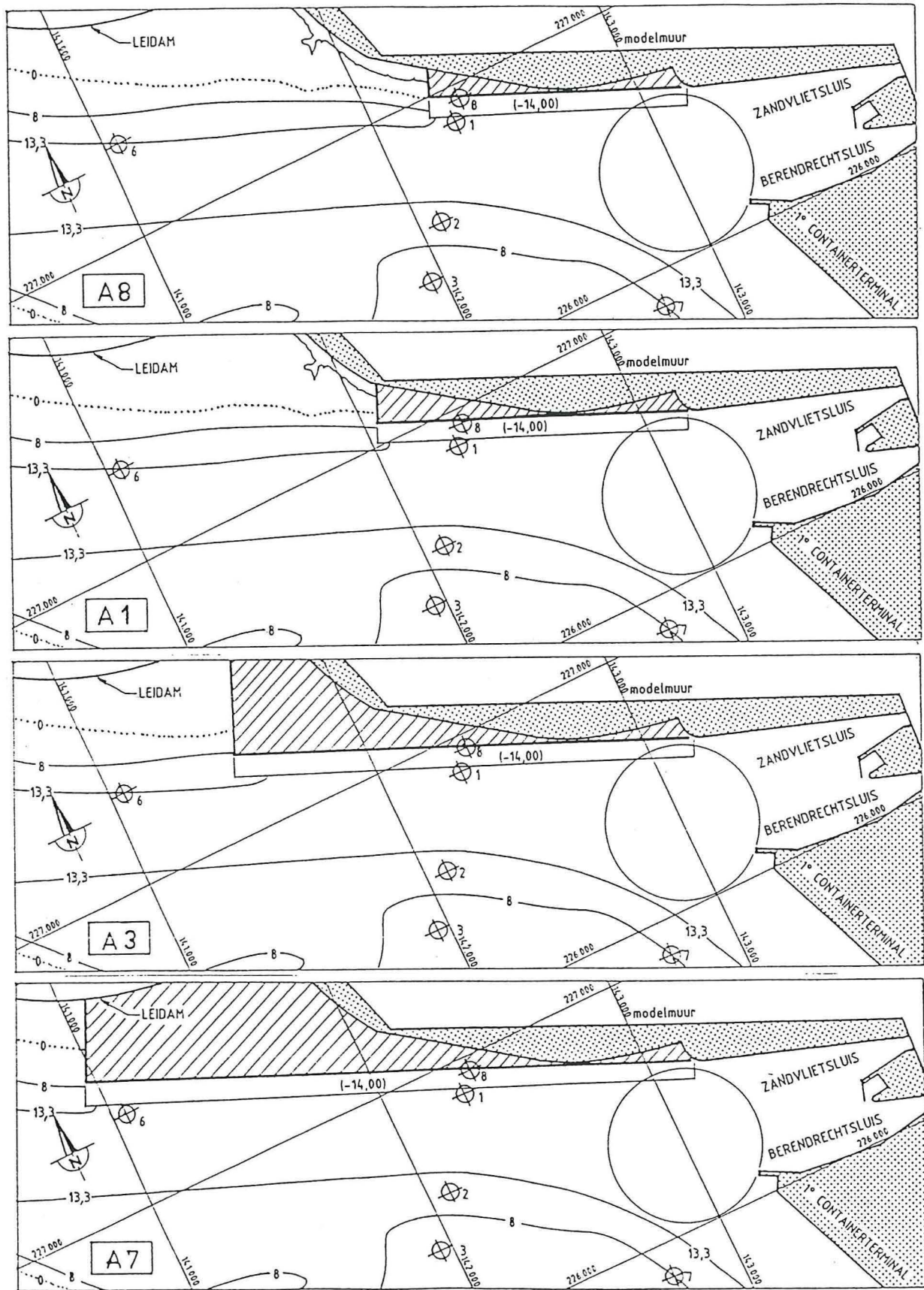


CONSORTIUM



Figuur 3.2

CONTAINERKAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

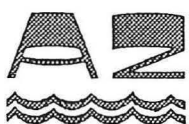
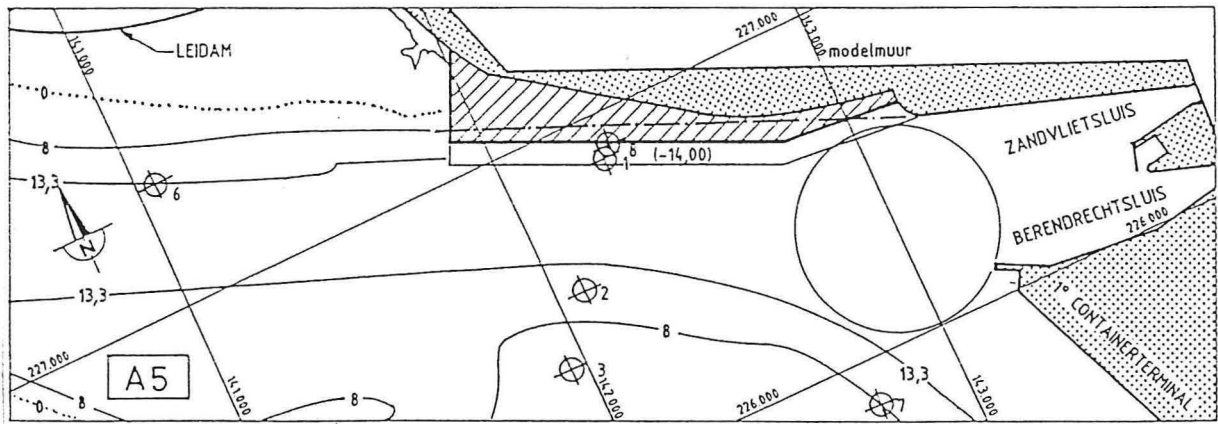
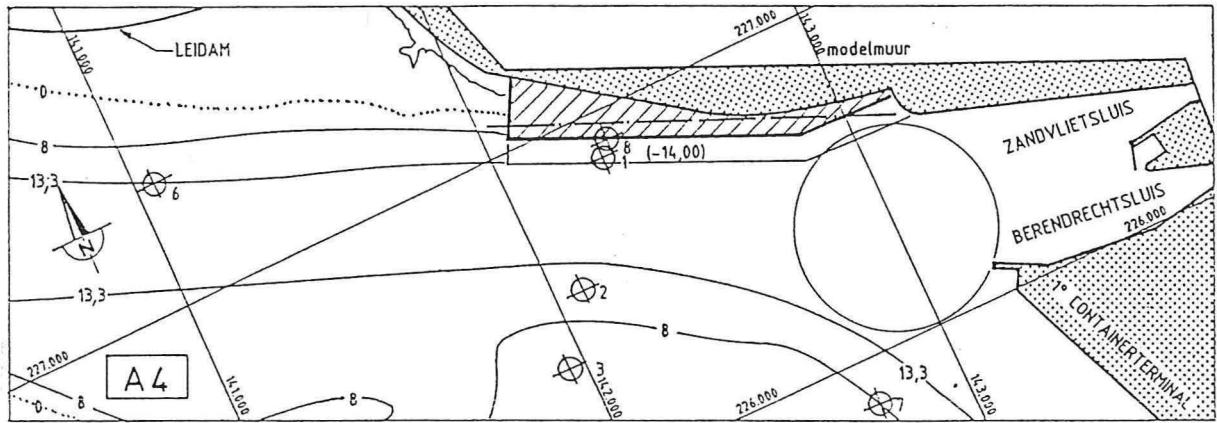
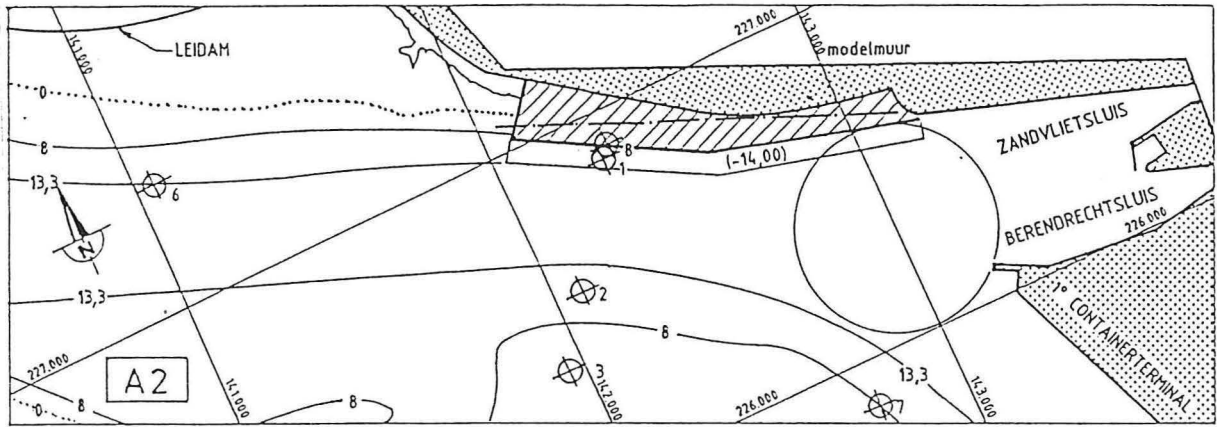


CONSORTIUM



Figuur 3.3

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

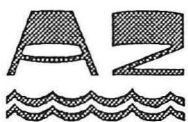
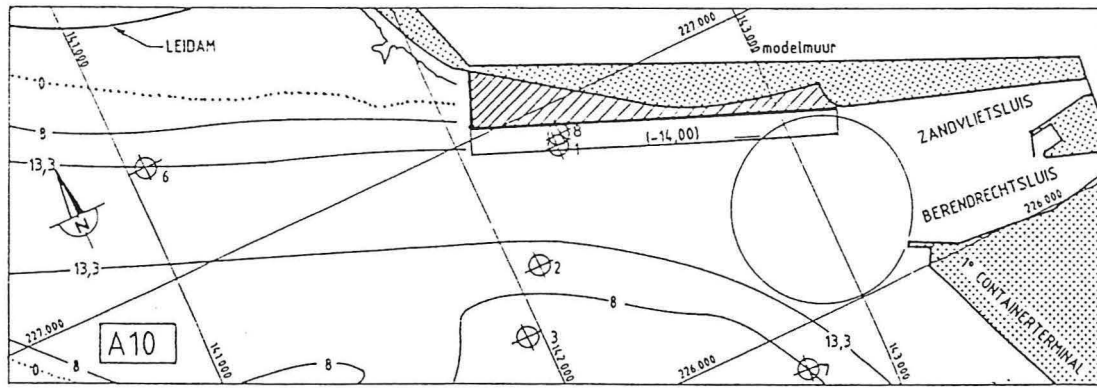
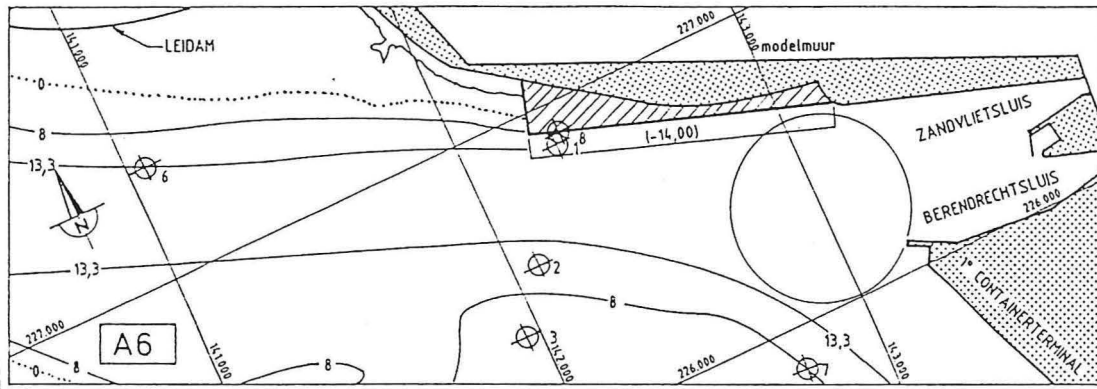
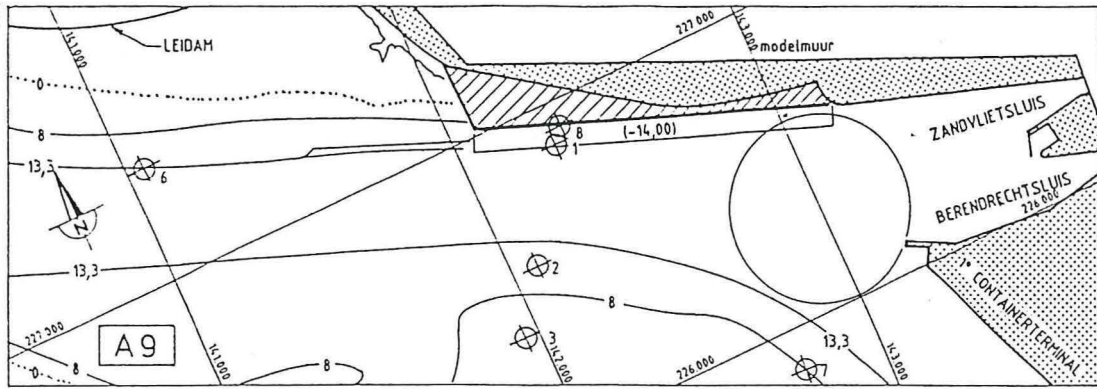


CONSORTIUM



Figuur 3.4

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK



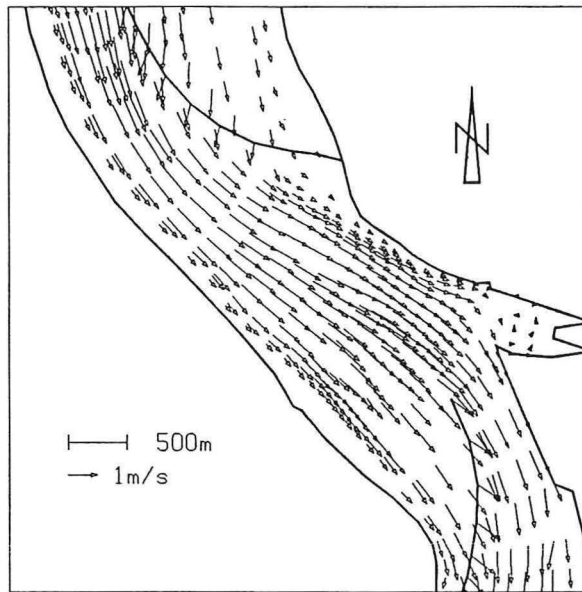
CONSORTIUM



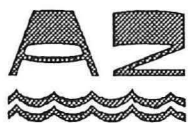
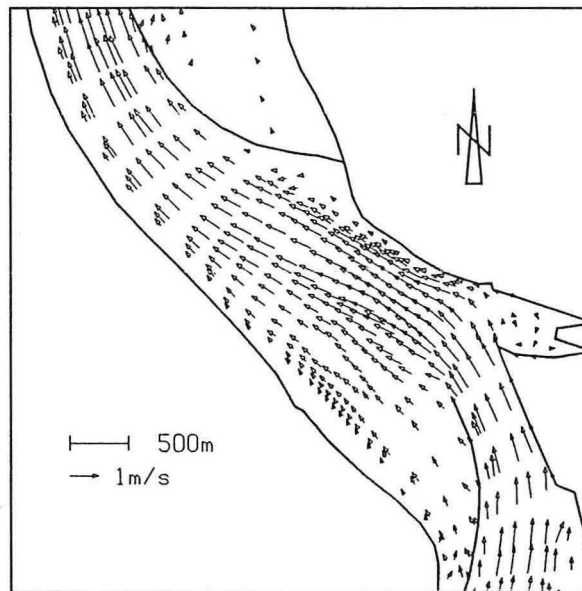
Figuur 35

Huidige Toestand - Morfologisch Getij
Snelheidsbeeld

Maximale Vloed



Maximale Eb



CONSORTIUM

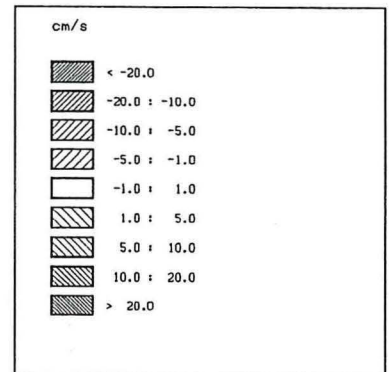
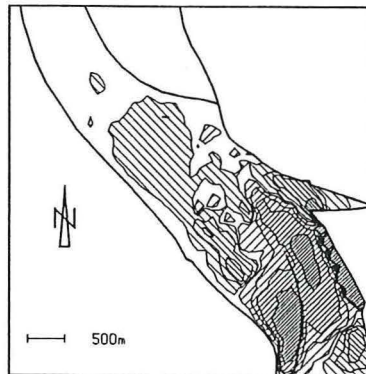
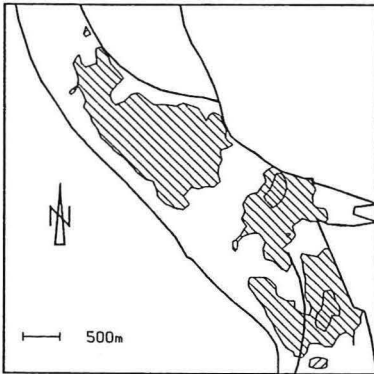


Figuur 4.1

Verschilkaart Snelheid
Maximale Ebstroming
+: HT groter, -: HT kleiner

Verdieping -13.3GLLWS

Put van Doel



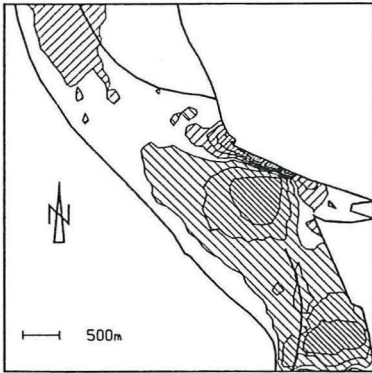
CONSORTIUM



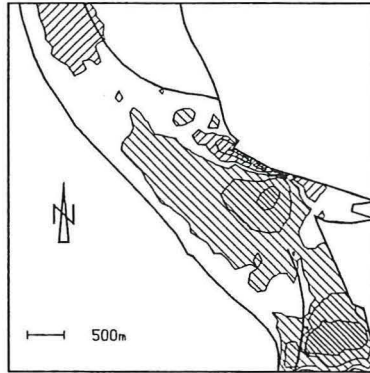
Figuur 4.2

Verschilkaart Snelheid
 Maximale Ebstroming
 +: HT groter, -: HT kleiner

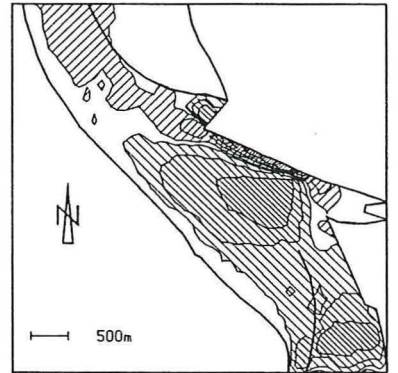
Alternatief 1



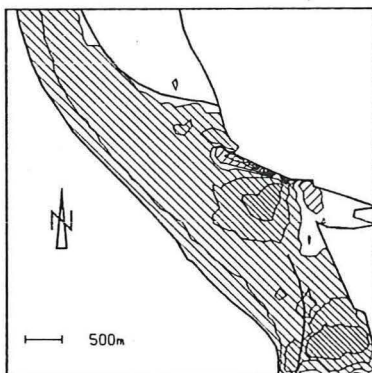
Alternatief 2



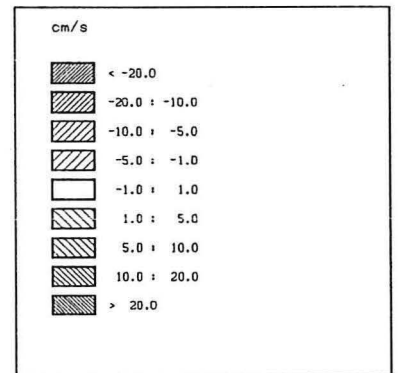
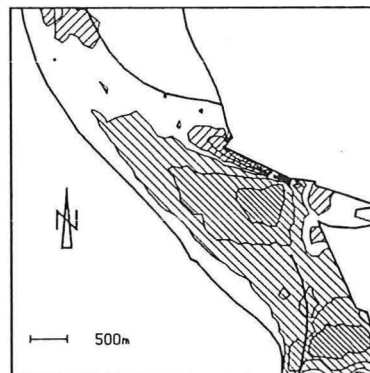
Alternatief 3



Alternatief 4



Alternatief 5



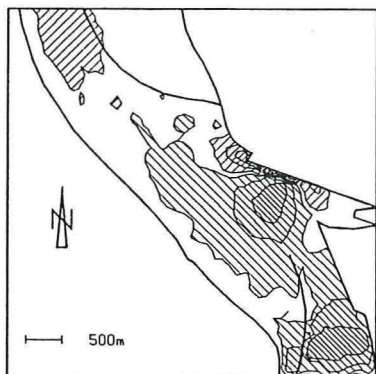
CONSORTIUM



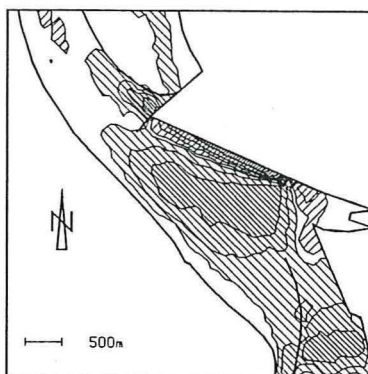
Figuur 4.3

Verschilkaart Snelheid
 Maximale Ebstroming
 +: HT groter, -: HT kleiner

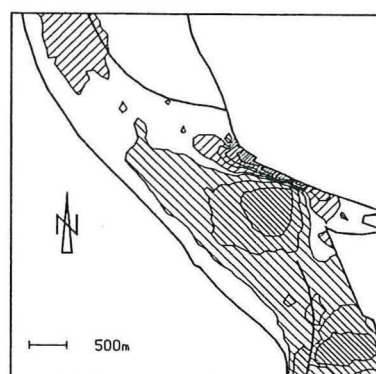
Alternatief 6



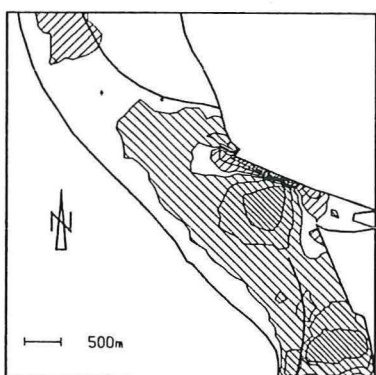
Alternatief 7



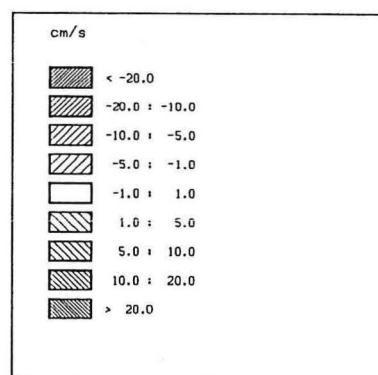
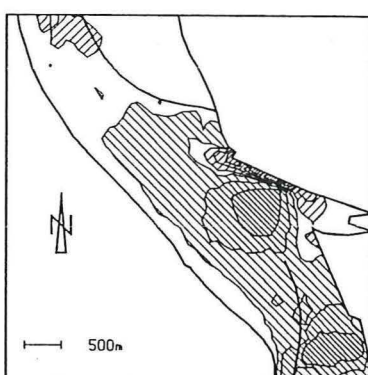
Alternatief 8



Alternatief 9



Alternatief 10



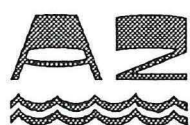
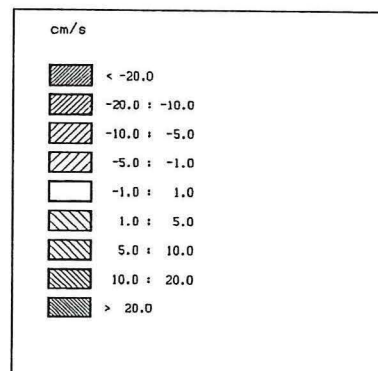
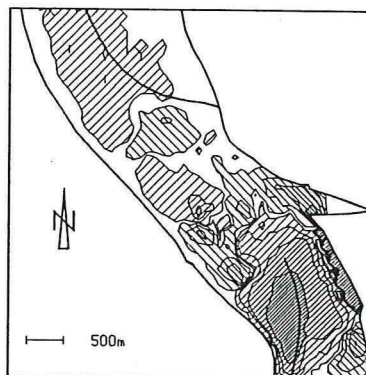
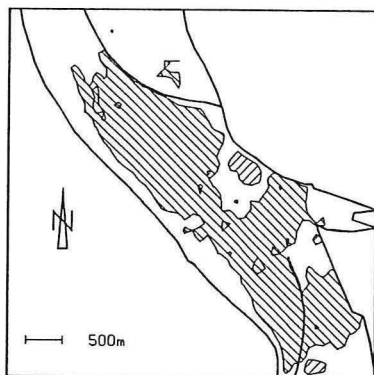
CONSORTIUM



Verschilkaart Snelheid
 Maximale Vloedstroming
 +: HT groter, -: HT kleiner

Verdieping -13.3GLLWS

Put van Doel



CONSORTIUM

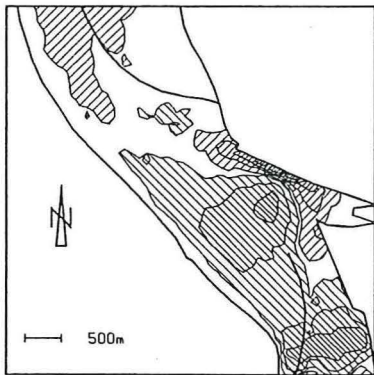


Figuur 4.5

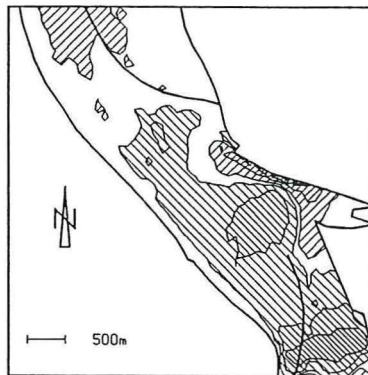
CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Verschilkaart Snelheid
 Maximale Vloedstroming
 +: HT groter, -: HT kleiner

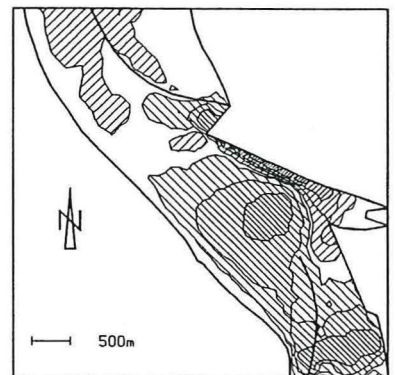
Alternatief 1



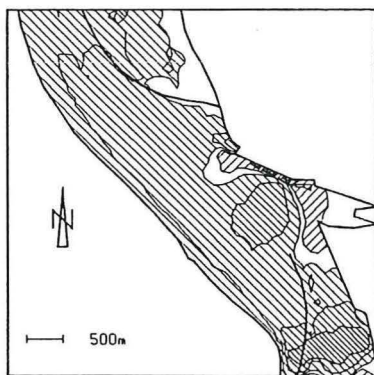
Alternatief 2



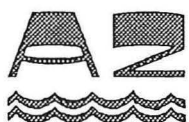
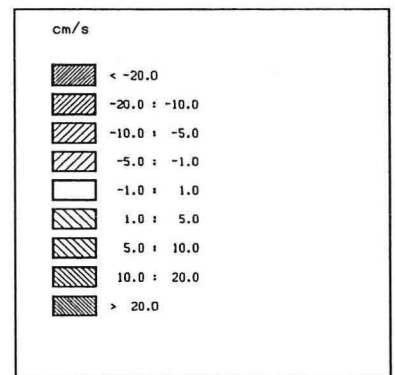
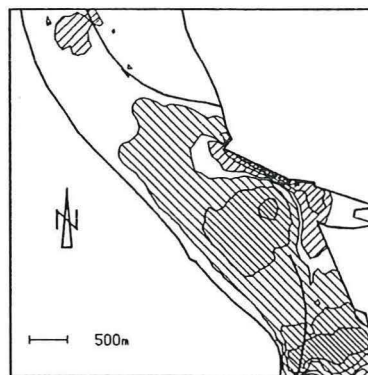
Alternatief 3



Alternatief 4



Alternatief 5



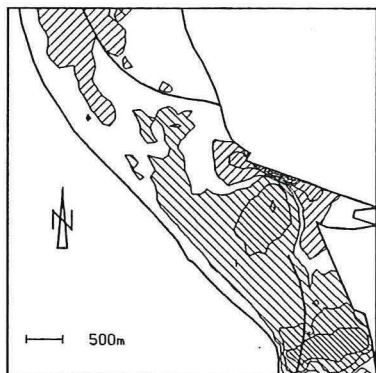
CONSORTIUM



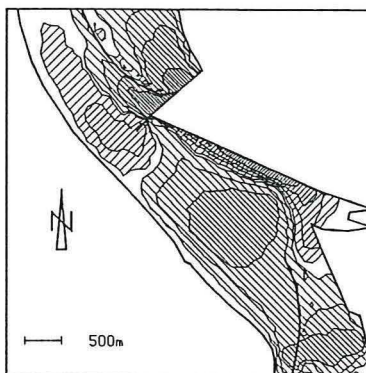
Figuur 4.6

Verschilkaart Snelheid
 Maximale Vloedstroming
 +: HT groter, -: HT kleiner

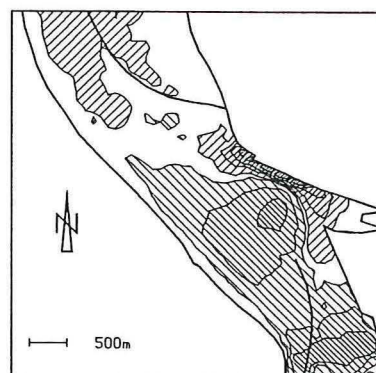
Alternatief 6



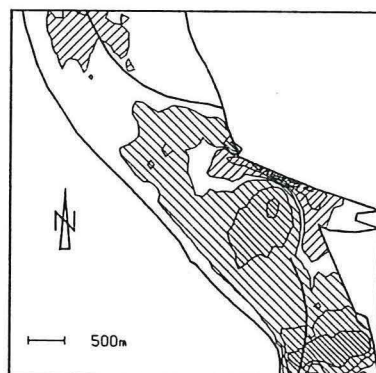
Alternatief 7



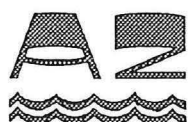
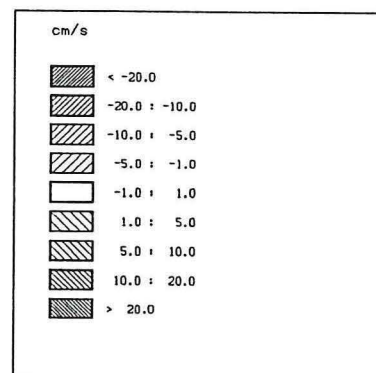
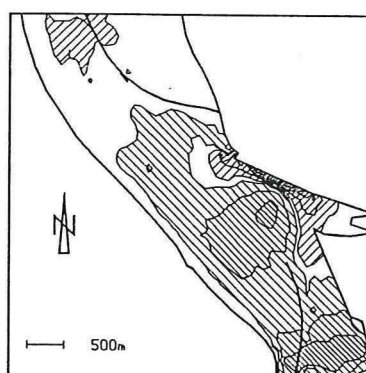
Alternatief 8



Alternatief 9



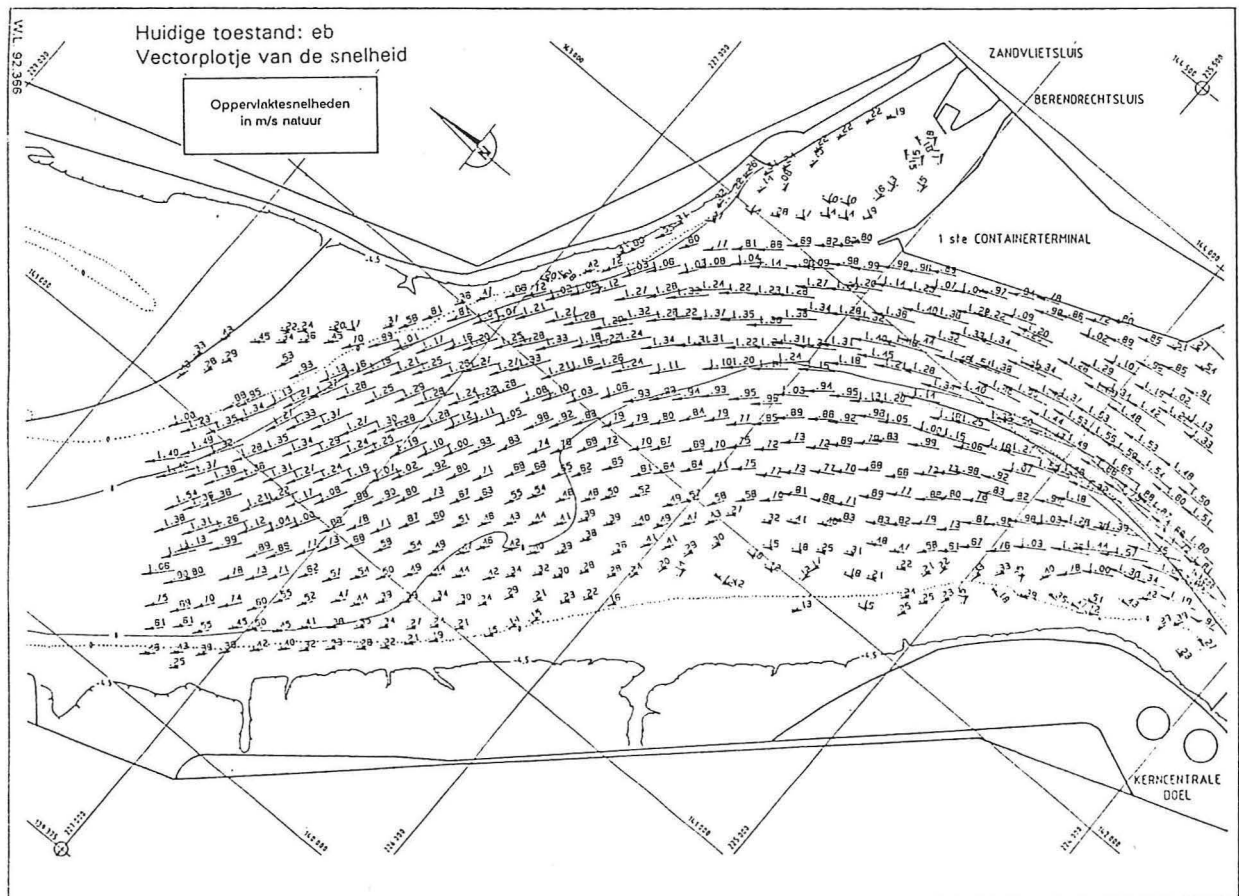
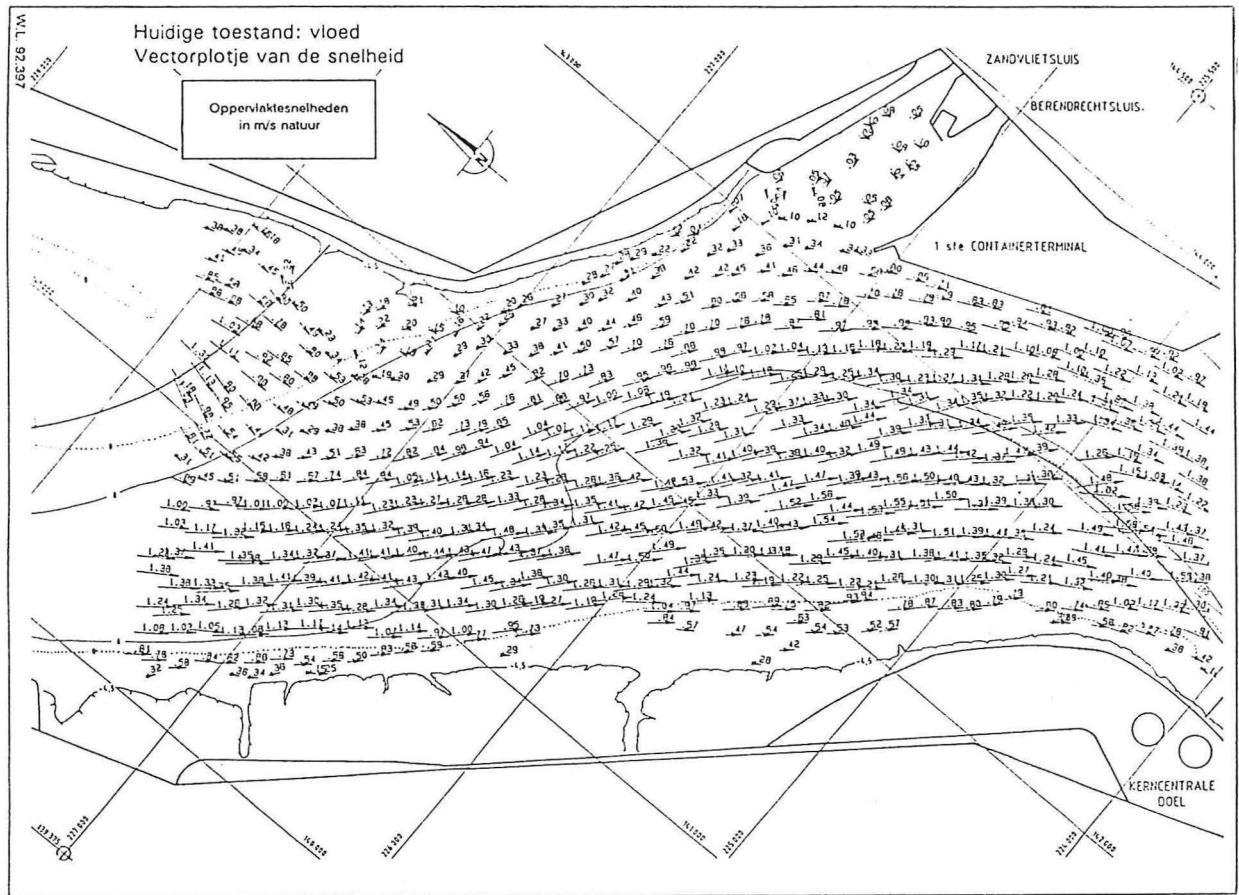
Alternatief 10



CONSORTIUM



CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK



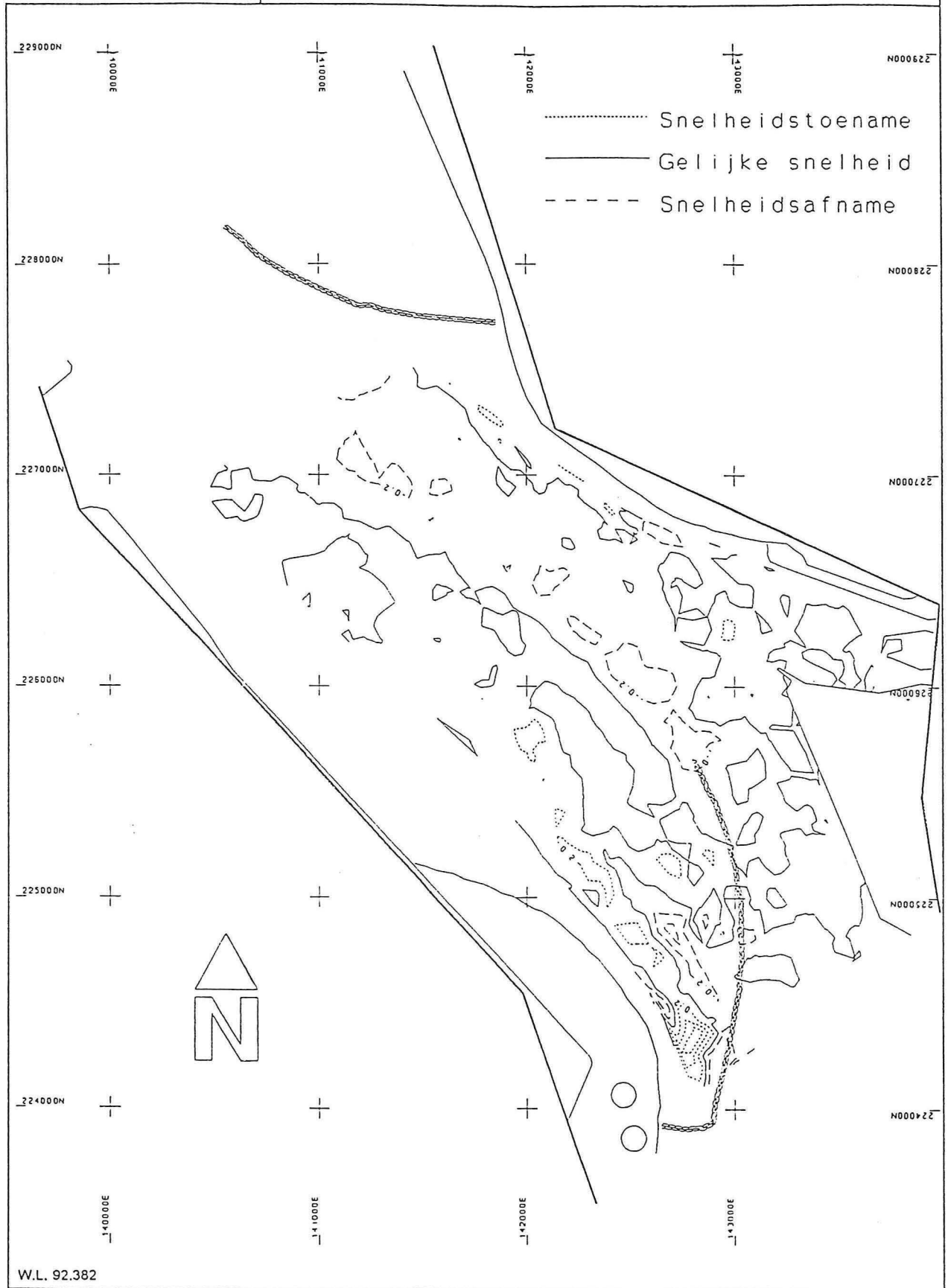
CONSORTIUM



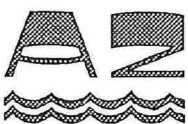
Figuur 4.8

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Verdiepte vaargeul t.o.v. huidige toestand: eb
Verschillijnen van de snelheden (elke 0.20m/s)



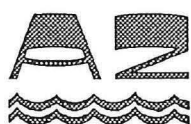
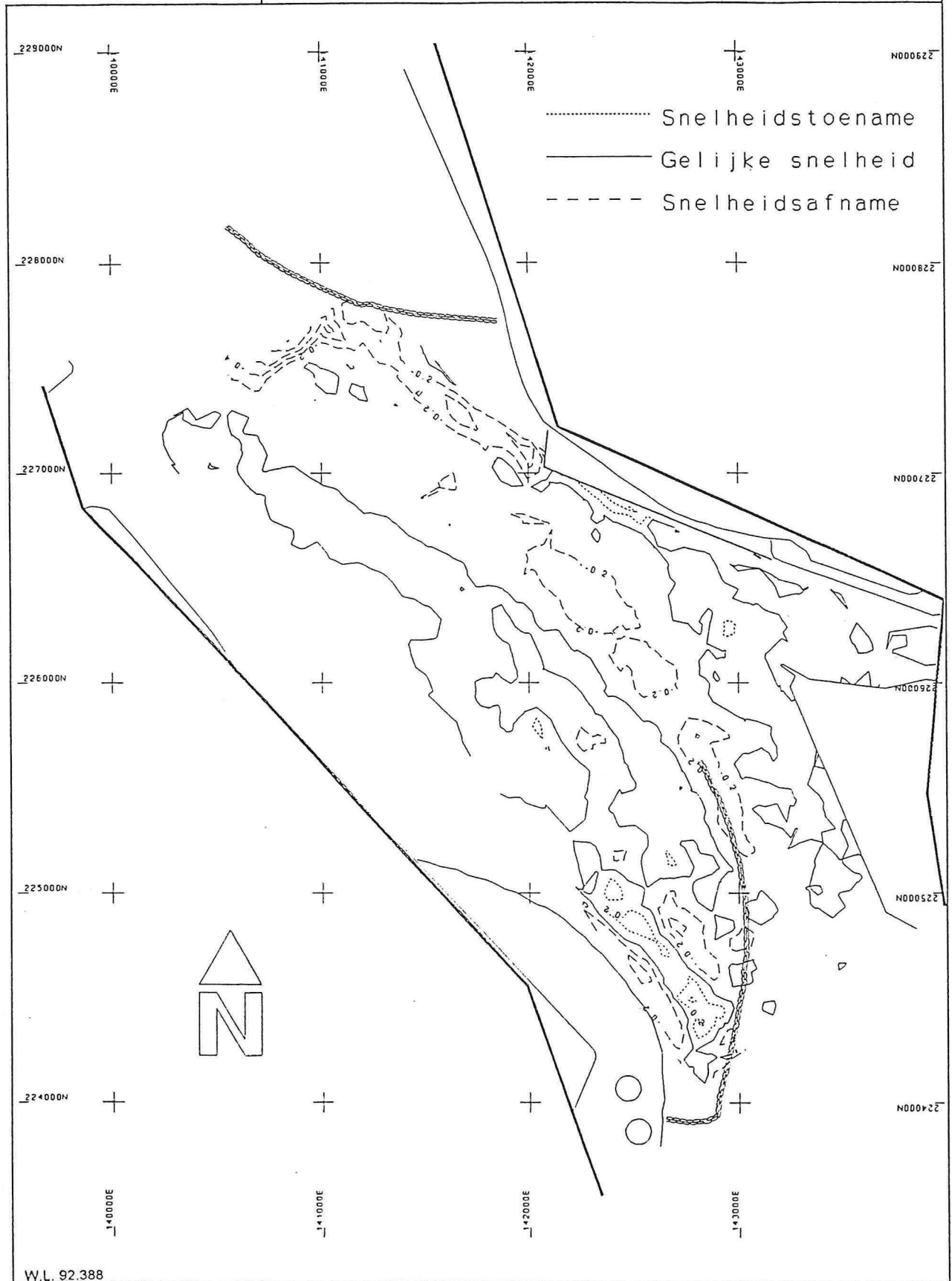
CONSORTIUM



Figuur 4.9

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Alternatief 9 (1200m) t.o.v. huidige toestand: eb
Verschillijnen van de snelheden (elke 0.20m/s)



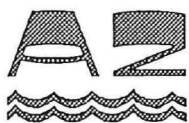
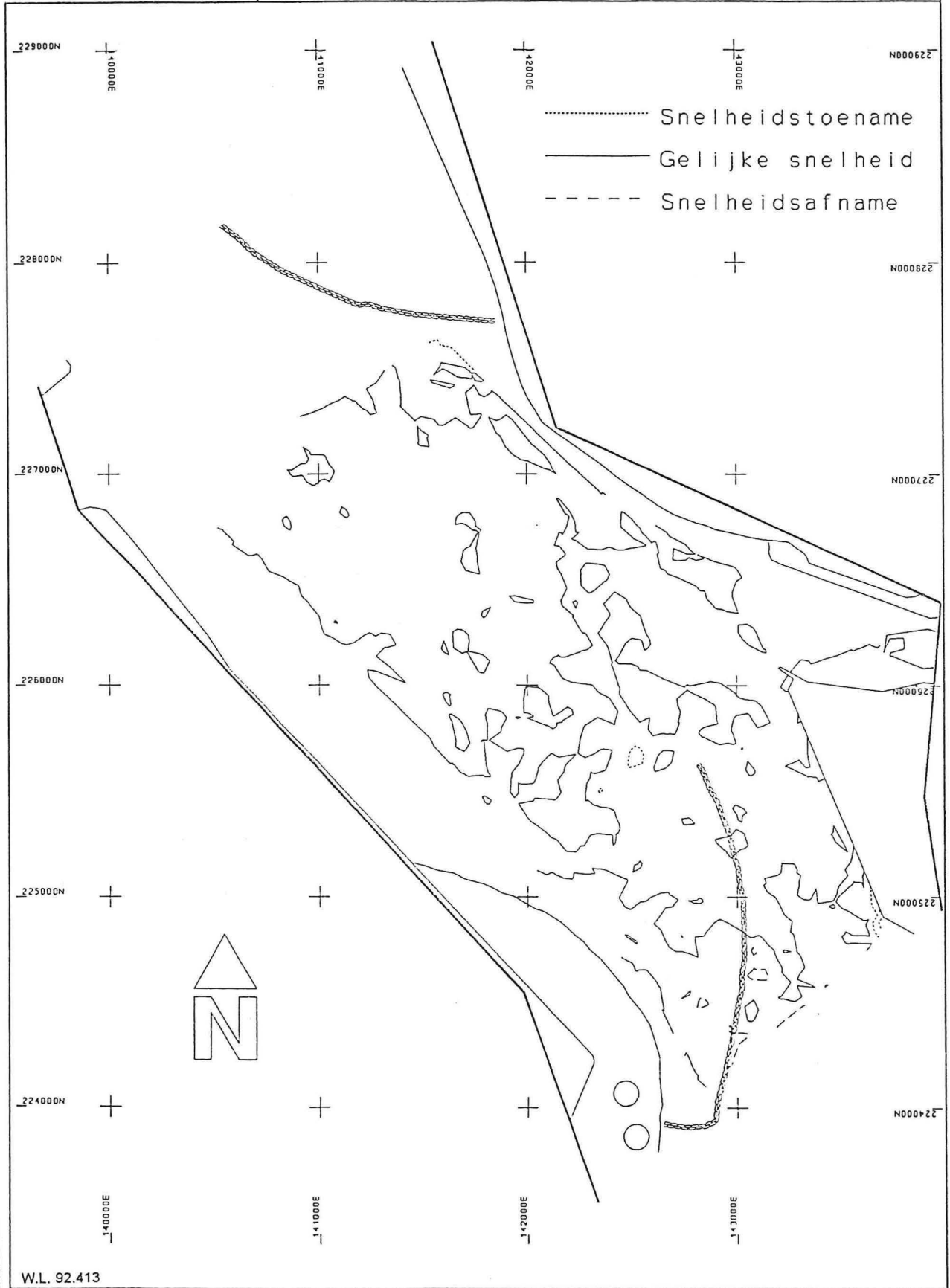
CONSORTIUM



Figuur 4.10

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Verdiepte vaargeul t.o.v. huidige toestand: vloed
Verschillijnen van de snelheden (elke 0.20m/s)



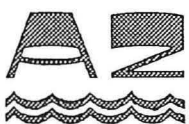
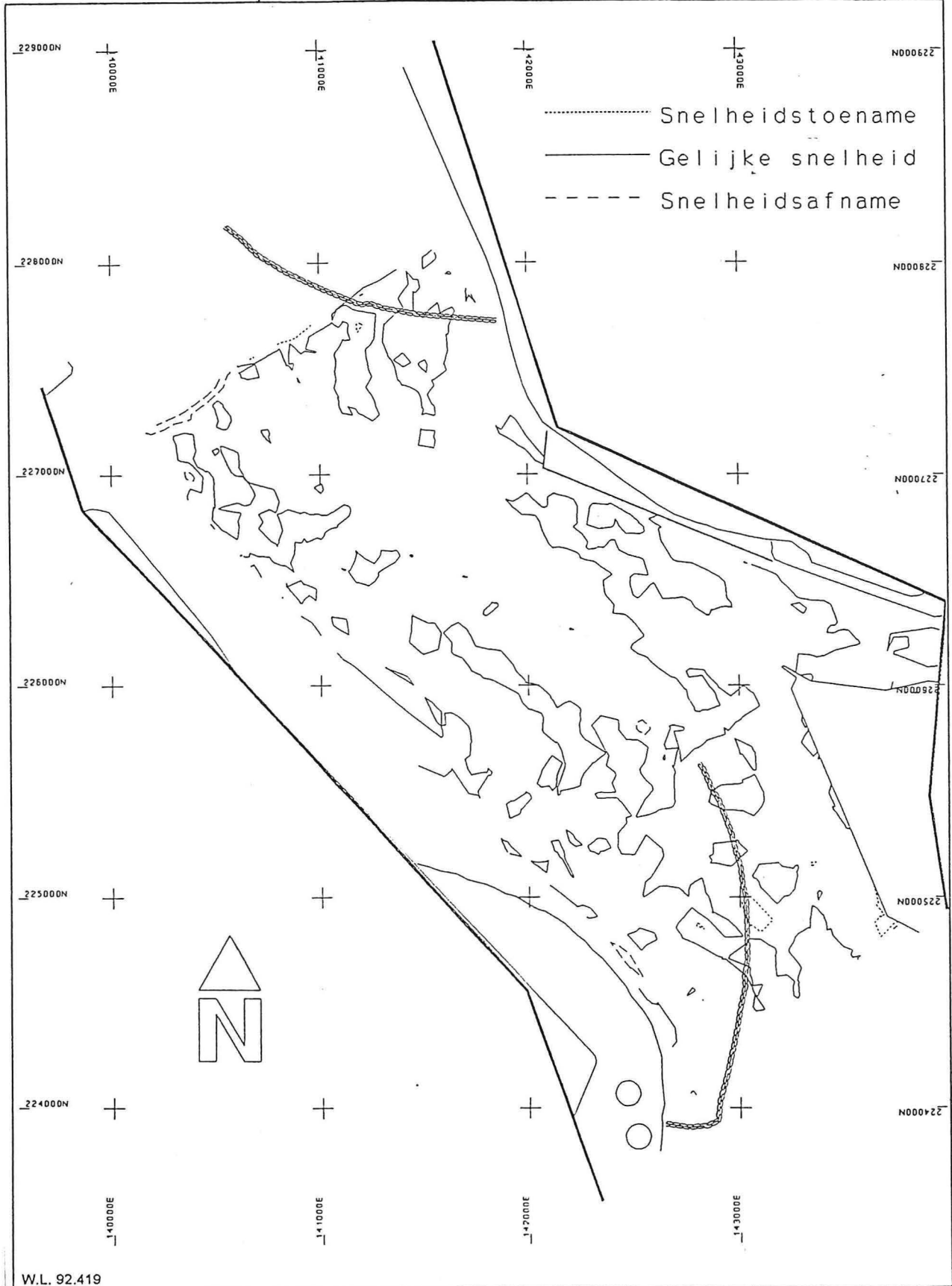
CONSORTIUM



Figuur 4.11

CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

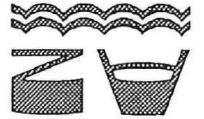
Alternatief 9 (1200m) t.o.v. huidige toestand: vloed
Verschillijnen van de snelheden (elke 0.20m/s)



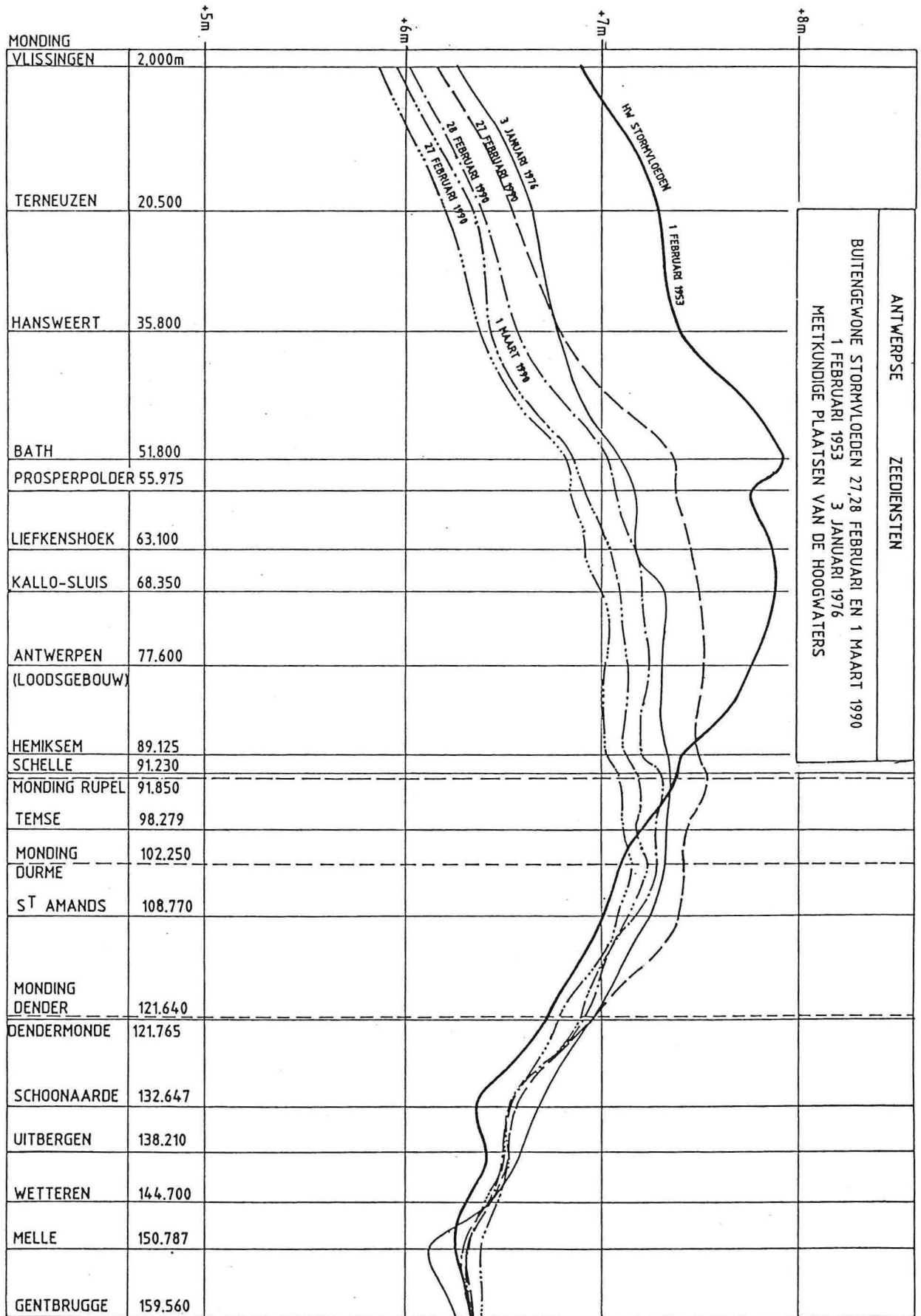
CONSORTIUM



Figuur 4.12



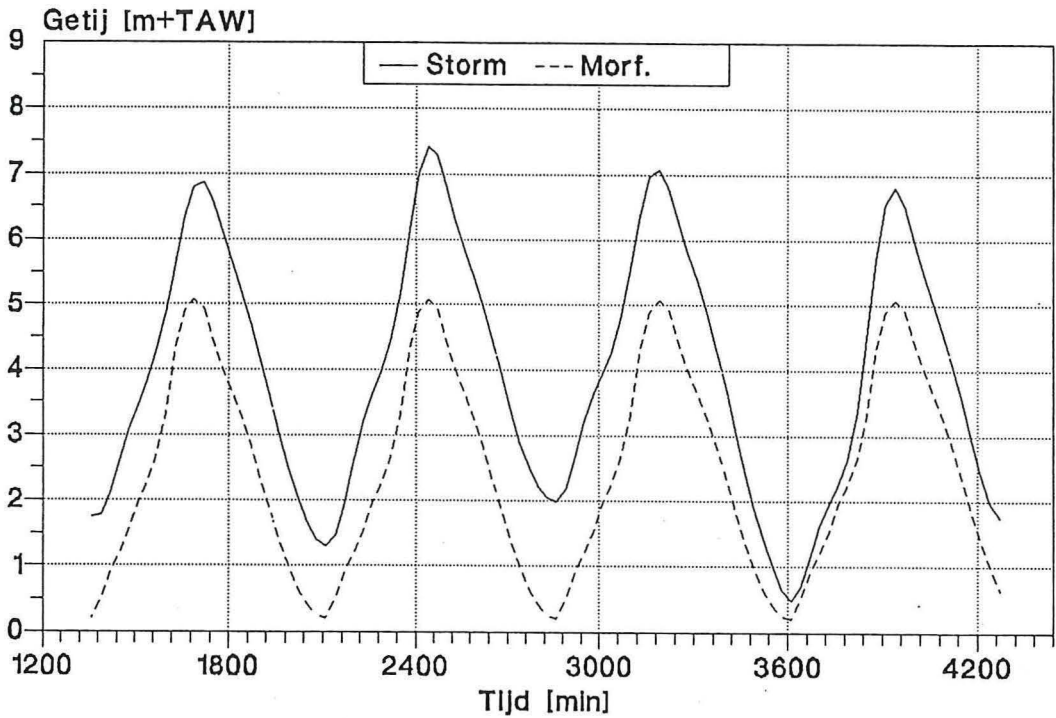
CONSORTIUM



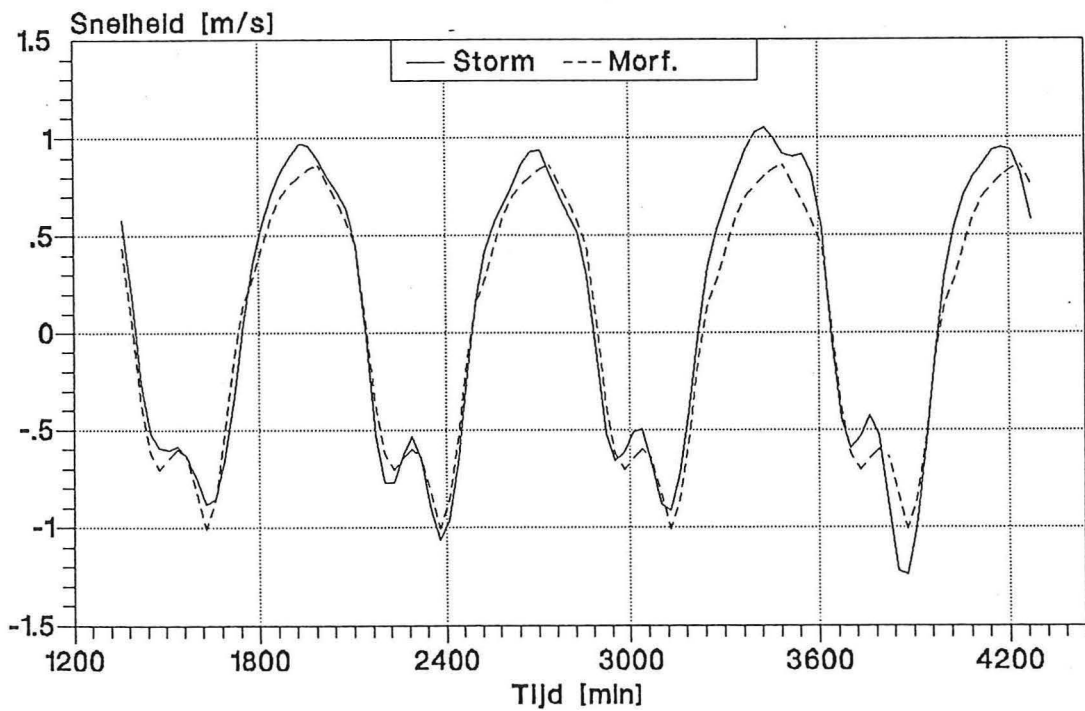
ANTWERPSE ZEEEDIENSTEN
 BUITENGEWONE STORMVLOEDEN 27,28 FEBRUARI EN 1 MAART 1990
 1 FEBRUARI 1953 3 JANUAR 1976
 METKUNDIGE PLAATSEN VAN DE HOOGWATERS

CONTAINERKAAI NOORD
 Huidige Toestand - Stormtij en Morfologisch Getij

Waterstand in Meetpunt 2

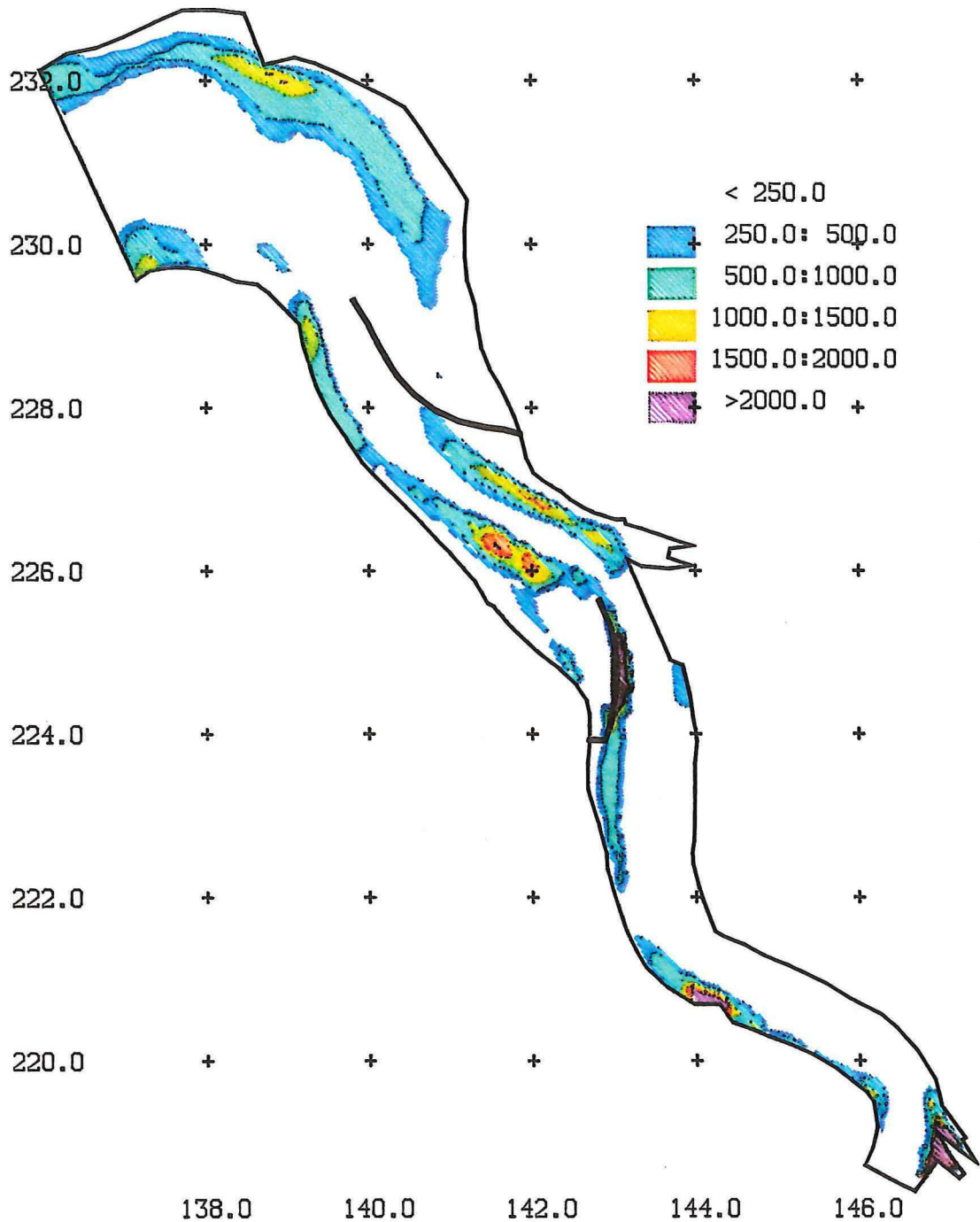


Snelheid In Meetpunt 2



Figuur 4.14

Sedimentatie van Slib
 Huidige Toestand (g/m²m per getij)
 Mathematisch Model



CONSORTIUM

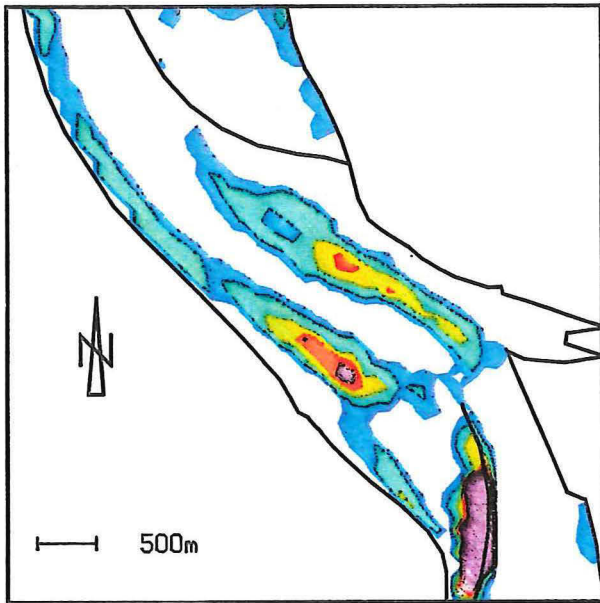


Figuur 4.15

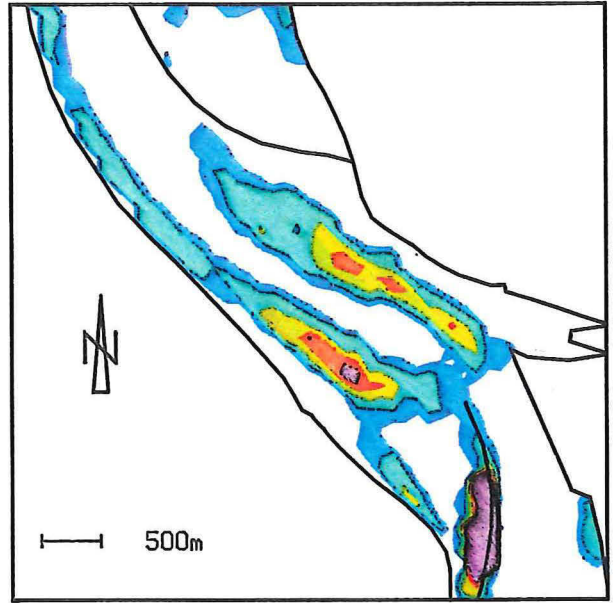
CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Sedimentatie van Slib
 Mathematisch Model ($\rho=1.15\text{kg/L}$)

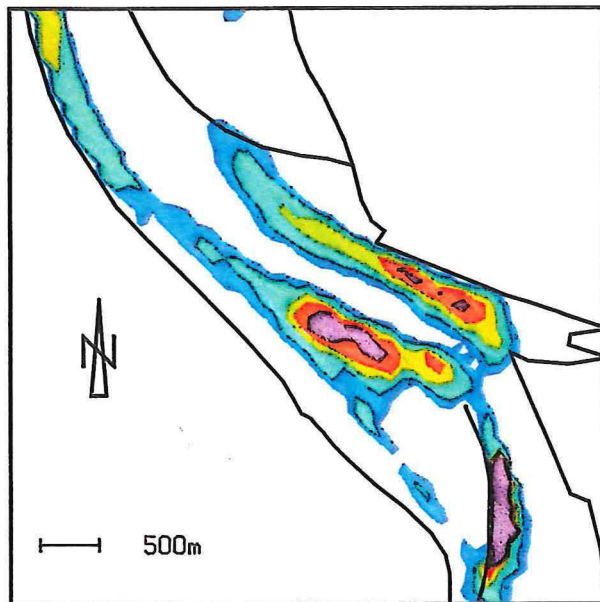
Huidige Toestand



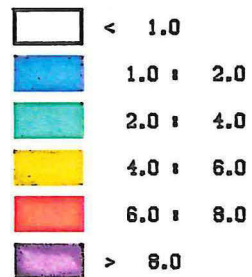
Verdieping -13.3GLLWS



Alternatief 9



mm/get.j



CONSORTIUM

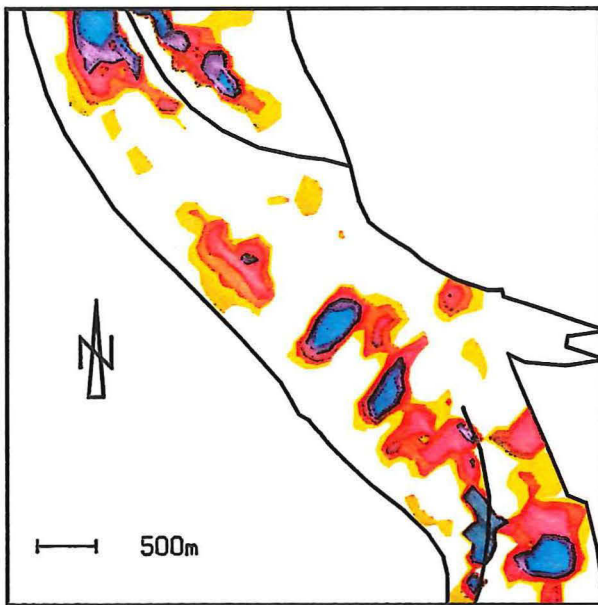


Figuur 4.16

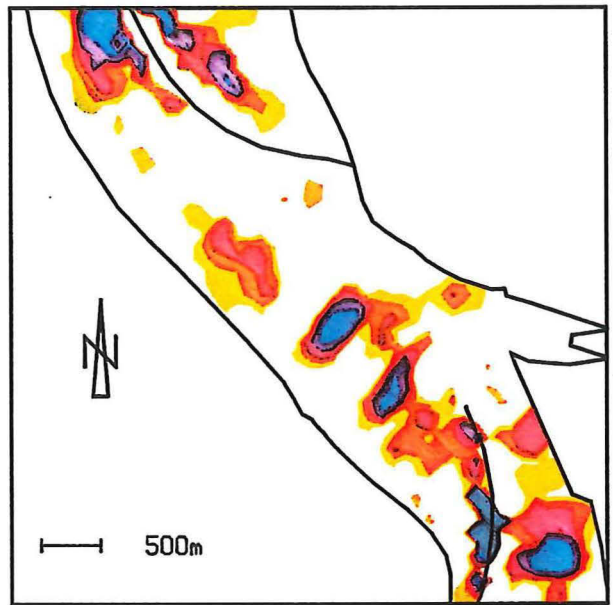
CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Erosie van Zand Mathematisch Model (130mu, 0.1m)

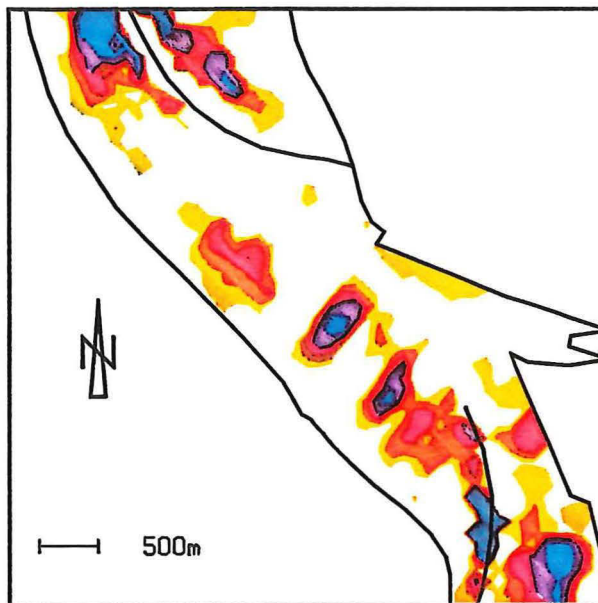
Huidige Toestand



Verdieping -13.3GLLWS



Alternatief 9



0.1 mm/get.j



CONSORTIUM

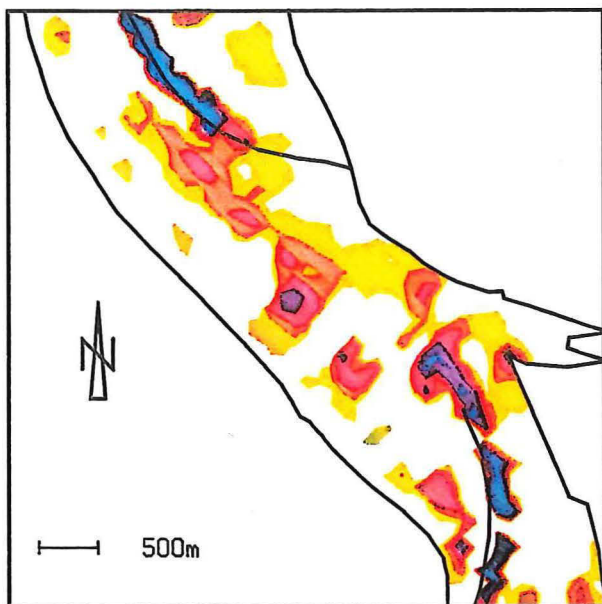


Figuur 4.17

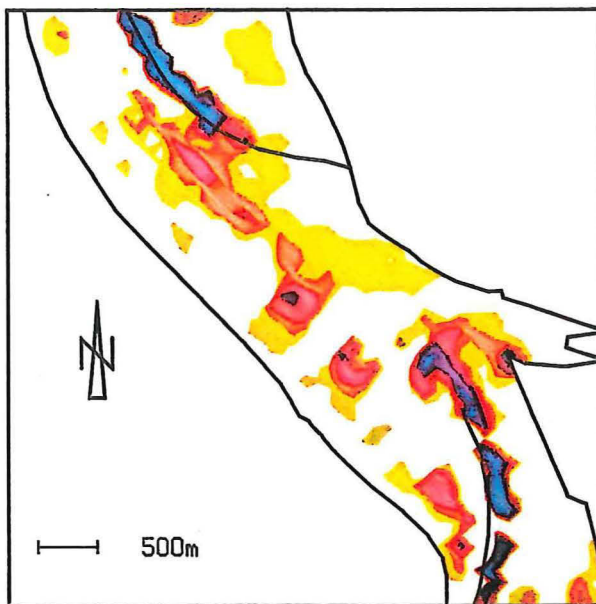
CONTAINERKAAIEN SCHELDE : MORFOLOGISCH ONDERZOEK

Sedimentatie van Zand
 Mathematisch Model (130mu, 0.1m)

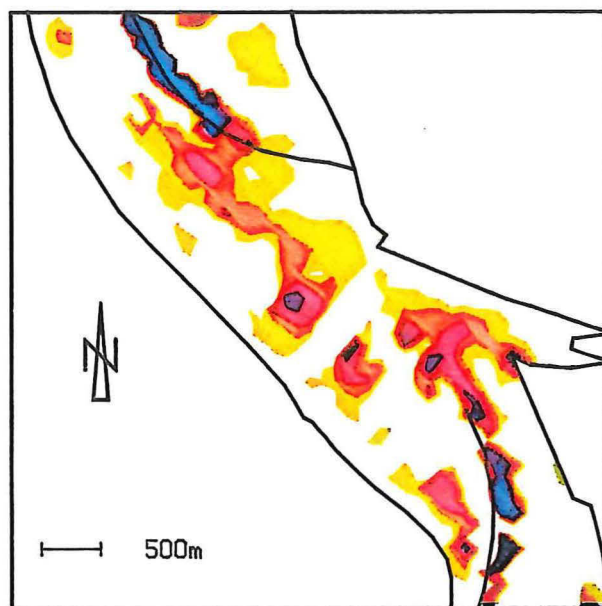
Huidige Toestand



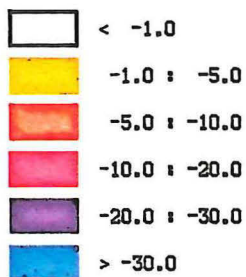
Verdieping -13.3GLLWS



Alternatief 9



0.1 mm/getij



CONSORTIUM



Figuur 4.18