

76820

ANALYSE VAN STROOM- EN SEDIMENT-METINGEN TER HOOGTE VAN DE DREMPEL VAN ZANDVLIET (SCHELDE)

M. FETTWEIS, M. SAS
International Marine & Dredging
Consultants N.V.
L. MEYVIS
Ministerie van de Vlaamse
Gemeenschap,
Antwerpse Zeehavendienst

ANALYSIS OF FLOW AND SEDIMENT MEASUREMENTS IN THE SCHELDT RIVER

Measurements in estuaries are not only important for the calibration of various mathematical models which are used in river management. They are also necessary in order to quantify the effects of human activities on the physical and biological environment. The results of two measurement campaigns (one at neap tide and one at spring tide) over a cross section in the vicinity of the 'Drempel van Zandvliet' are presented. The measured quantities were water level, current velocity, salinity and mud concentration. The Scheldt river can be classified as a well mixed to partially stratified estuary. During most of the tide the vertical salinity gradients are small and the flow is unidirectional. The horizontal salinity gradient reached a value of 0.42g/l per km at spring tide and 0.35g/l per km at neap tide. The influence of the horizontal salinity

gradient can be found in the deformation of the velocity profile from the standard logarithmic one. Only near high water slack a pronounced two-layer flow has been observed: in the top layer less salty water is flowing towards the sea whereas in the bottom layer the more salty water coming from the sea is still flowing towards upstream. The mud concentration varies strongly with time, over the vertical plane and over the cross section. The highest values are found in the deepest part of the cross section. Between velocity and concentration a time shift has been observed, resulting in a typical hysteresis curve of concentration and transport in function of velocity. The concentration at accelerating flow is higher than at decelerating flow.

1. INLEIDING

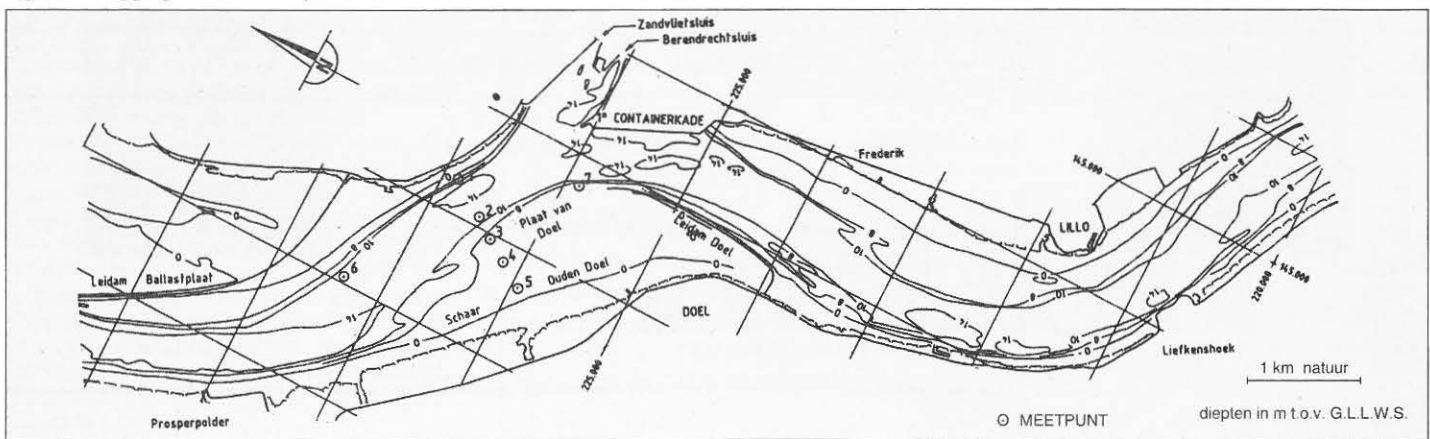
De Schelde vervult zowel economisch als ecologisch een belangrijke rol. De menselijke activiteiten zijn een dominante factor geworden die zowel het fysische als het biologische milieu beïnvloeden. Het inschatten van de effecten van deze activiteiten kan enkel gebeuren door het uitvoeren van uitgebreide meetcampagnes. Aan de hand

van metingen kunnen modellen opgesteld worden die toelaten om evoluties op korte en lange termijn te voorspellen.

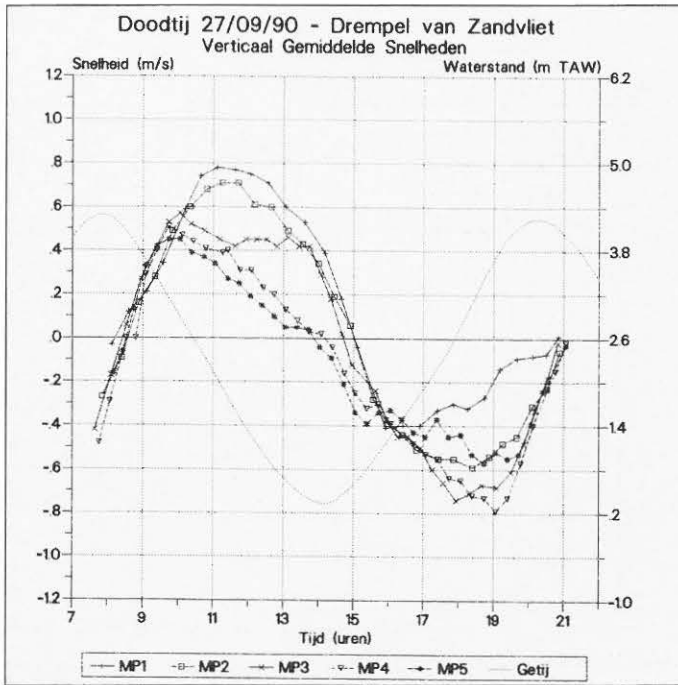
In dit artikel zal een overzicht gegeven worden van de resultaten van twee meetcampagnes in een dwarsraai ter hoogte van de Drempel van Zandvliet (Zeeschelde) tijdens doortijd en springtij, zie IMDC (1991a en 1991b). In een vijftal punten werd de stro-

ming, de saliniteit en de slibconcentratie over een dwarssectie gemeten. Het doel van de campagnes was om een beter inzicht te bekomen in de morfologie ter hoogte van de Drempel van Zandvliet en om de meetresultaten te gebruiken voor het calibreren van numerieke stromings- en sedimenttransportmodellen voor de studie van de noordelijke containerkaai, zie b.v. Fettweis et al. (1993).

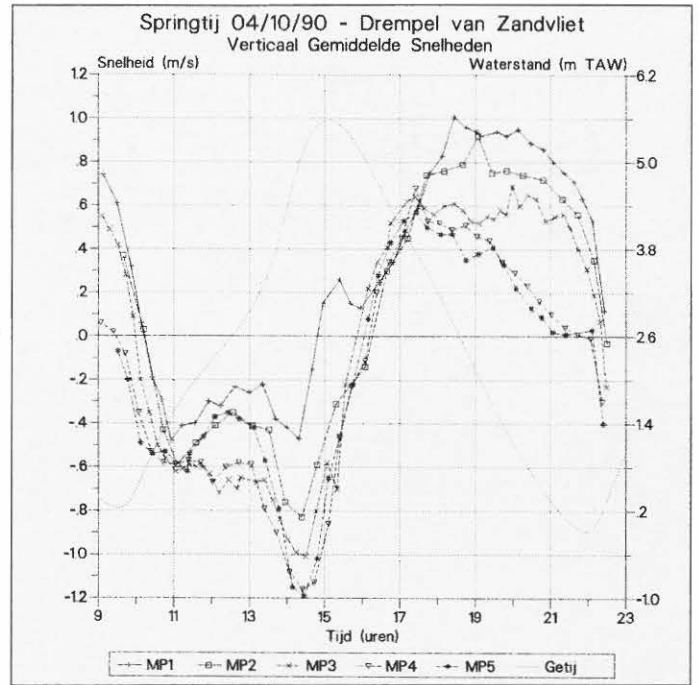
Figuur 1: Ligging van de meetpunten.



Figuur 2



Figuur 3



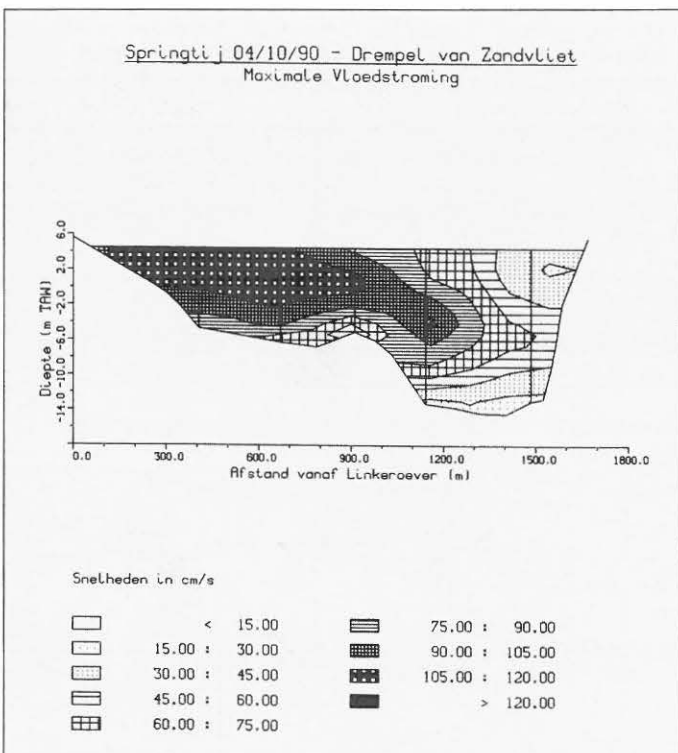
Tabel 1: Opgetreden getij tijdens de twee meetdagen (getijcoëfficiënt t.o.v. gemiddeld getij, zie tekst).

Datum, Getijpost	Tijd (MET)	Waterstand (m + TAW)	Tijverschil (m)	Getijcoëfficiënt
27/09/90, Prosperpolder	HW: 7h43	4.30		
	LW: 14h03	0.37	eb 3.93	0.810
	HW: 20h13	4.26	vloed 3.89	0.802
04/10/92, Prosperpolder	LW: 9h21	0.26		
	HW: 15h02	5.53	eb 5.27	1.087
	LW: 21h52	-0.04	vloed 5.57	1.148

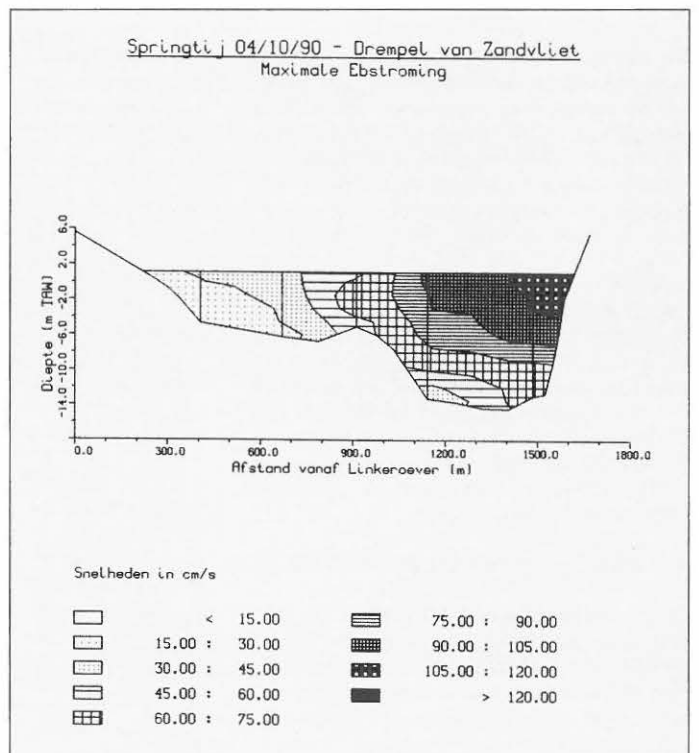
2. BESCHRIJVING VAN DE METINGEN

Op 27/09/90 (doodtij) en op 04/10/90 (springtij) werden twee stroom- en sedimentmetingen uitgevoerd gedurende een volledige getijcyclus over een dwarssectie ter hoogte van de Drempel van Zandvliet. Tijdens dootij werd gemeten van hoogwaterkentering (8h00) tot hoogwaterkentering (21h00), tijdens springtij van laagwaterkentering (9h00) tot laagwaterkentering (22h00). Elke 20 of 30 minuten werden in een vijftal punten gedetailleerde verticale profie-

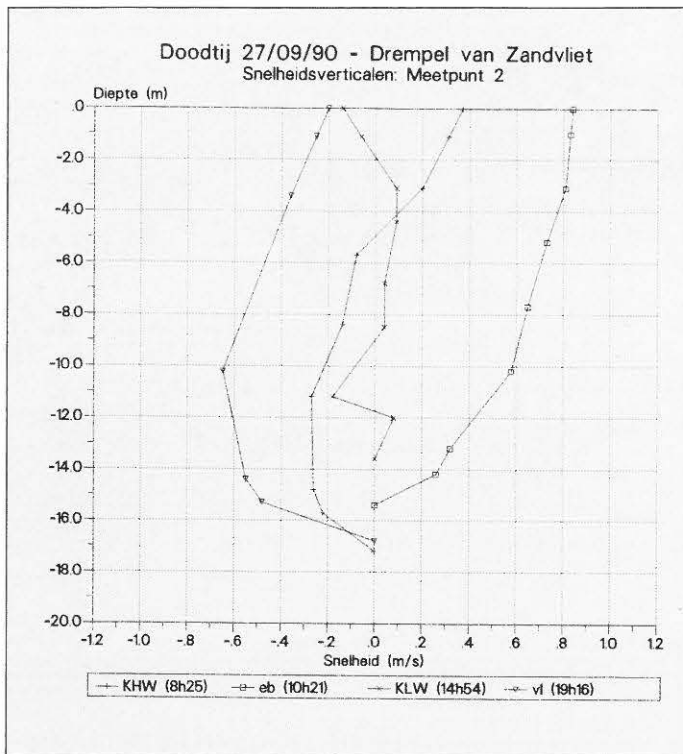
Figuur 4a



Figuur 4b



Figuur 5



len van snelheid, saliniteit en slibconcentratie (sedimentfractie < 63 μ) opgemeten. Voor de snelheidsmetingen werd gebruik gemaakt van een Ott- of NBA-stroommeter.

Tabel 2: Gemiddelde verhouding V_{opp}/V_{gem} tijdens eb en vloed in de vijf meetpunten en de procentuele afwijking t.o.v. het theoretisch logaritmischesnelheidsprofiel.

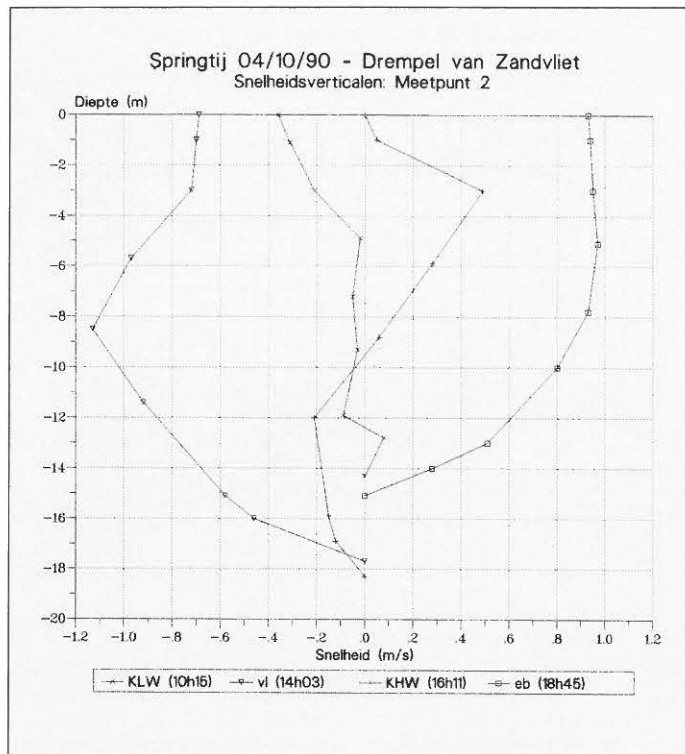
Meetpunt	1		2		3		4		5	
	eb	vloed	eb	vloed	eb	vloed	eb	vloed	eb	vloed
27/09/90	1.22	0.94	1.31	0.94	1.14	1.06	1.27	0.97	1.31	1.09
04/10/90	1.27	0.77	1.24	0.77	1.20	0.99	1.28	1.06	1.24	1.09

De conductiviteit werd opgemeten met behulp van een NBA-sonde, waaruit de saliniteit berekend werd. Slibconcentratie werd gemeten met een Partech turbiditeitssonde, de resultaten werden geïjkt door regelmatig watermonsters te nemen op verschillende dieptes. Indien mogelijk werd in elke verticale gemeten op 0.5m, 1m en 2m van de bodem, op 1/3, 1/2 en 2/3 van de waterdiepte en op 3m en 1m van de oppervlakte. De ligging van de meetpunten tijdens de twee meetdagen is weergegeven in figuur 1. Meetpunten 1 en 2 zijn gelegen in de vaargeul, meetpunt 3 op de Plaat van Doel en meetpunten 4 en 5 in de Schaar van Ouden Doel. Het is belangrijk te wijzen op het feit dat de Plaat van Doel afgeschermd wordt door een leidam, die de ebstroom concentreert in de vaargeul.

3. KARAKTERISTIEKEN VAN HET GETIJ

De getijcurves van de twee meetdagen, opgemeten in de getijpost van Prosperpolder kunnen teruggevonden worden in figuur 2. In onderstaande tabel 1 zijn de hoog- en laagwaters bijeengebracht. De getijcoëfficiënt werd berekend door het getij te verge-

Figuur 6



blijkt dat zowel het doodtij (27/09/90) als het springtij (04/10/90) niet cyclisch zijn (verschillende getijcoëfficiënten bij eb en vloed).

4. SNELHEID

De verticaal gemiddelde snelheden in de vijf meetpunten gedurende de twee meetdagen zijn weergegeven in figuur 2 (doodtij) en 3 (springtij). Uit de figuren komt duidelijk het asymmetrisch karakter van de snelheden naar voren. Tijdens vloed is er een dubbele piek aanwezig, terwijl het snelheidsverloop tijdens eb regelmatig is.

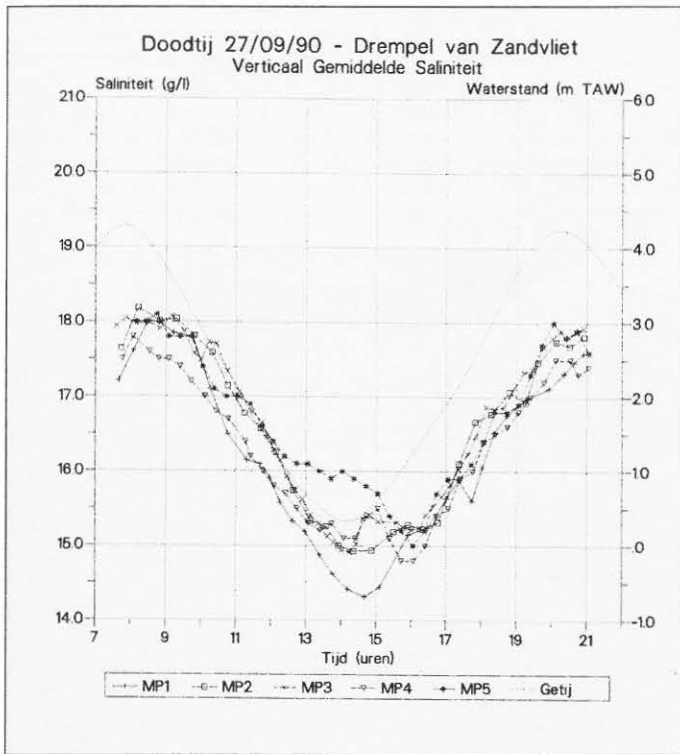
Tabel 3: Doodtij 27/09/90, lateraal en verticaal gemiddeld debiet (10⁶m³ per eb/vloed).

Meetpunt	eb	vloed
1	29.36	-14.68
2	25.86	-23.25
3	10.56	-13.33
4	7.02	-14.45
5	4.94	- 9.71
totaal	77.75	-75.41
eb-vloed	+2.34	

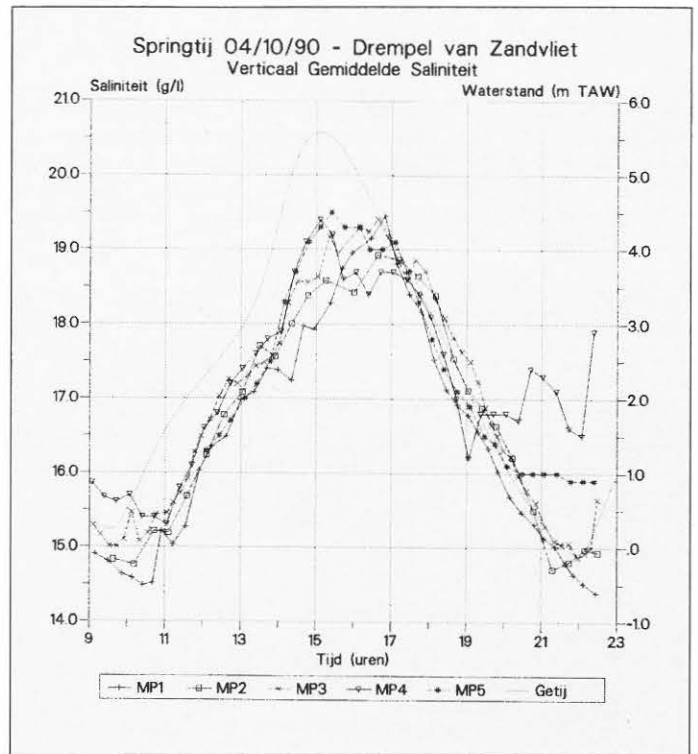
Tabel 4: Springtij 04/10/90, lateraal en verticaal gemiddeld debiet (10⁶m³ per eb/vloed).

Meetpunt	eb	vloed
1	38.60	-13.10
2	33.42	-27.53
3	13.63	-17.17
4	9.71	-22.00
5	7.45	-17.55
totaal	102.81	-97.35
eb-vloed	+5.46	

Figuur 7



Figuur 8

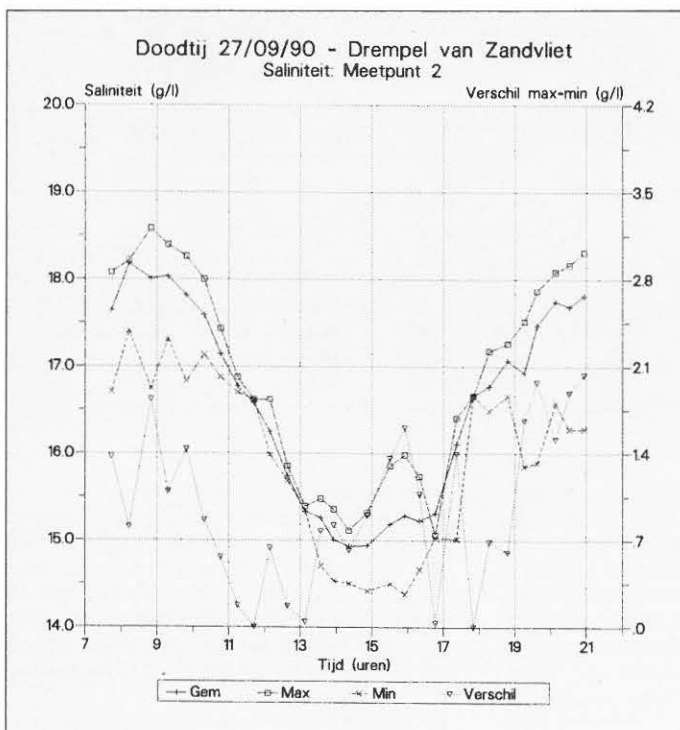


Deze dubbele piek in de vloedcurve is tijdens doortij (figuur 2) nauwelijks zichtbaar. Uit de metingen kan het karakteristiek stromingspatroon ter hoogte van de Drempel van Zandvliet afgeleid worden. De vloedstroom is voornamelijk geconcentreerd over de Plaat van Doel en door de Schaar van Ouden Doel terwijl de ebstroom vooral de vaargeul volgt. Dit heeft als gevolg dat de maximale stroming tijdens vloed zich voordoet ter hoogte van meetpunt 4 (doortij ± 0.8 m/s, springtij ± 1.2 m/s) en de maximale stroming tijdens eb ter hoogte van

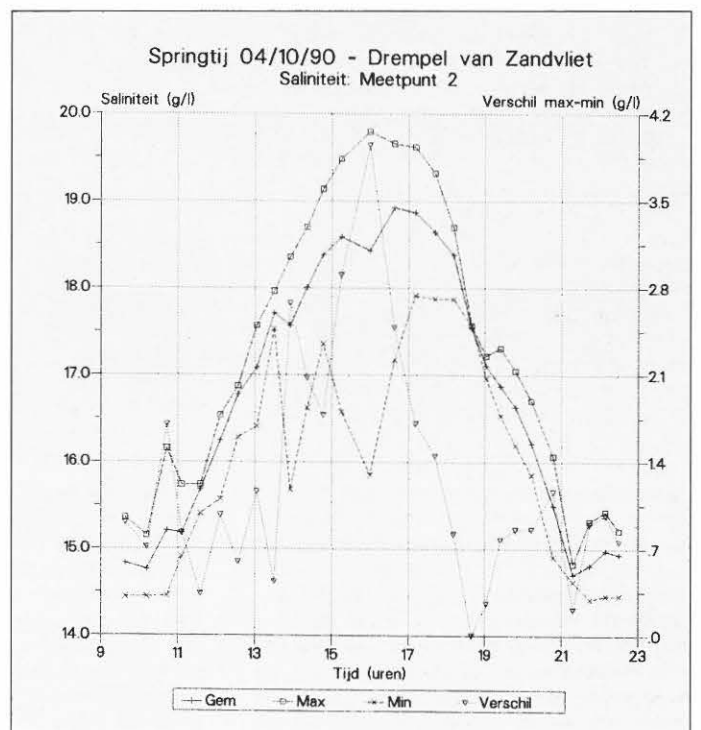
meetpunt 1 (doortij ± 0.8 m/s, springtij ± 1 m/s). In figuur 4 wordt ter illustratie voor springtij het snelheidsverloop over de dwarssectie tijdens maximale eb- en vloedstroom weergegeven. Laagwaterkentering begint op een verschillend tijdstip afhankelijk van de plaats van het meetpunt. De stroomrichting in de meetpunten gelegen op de ondiepere gedeelten (i.e. meetpunten 3, 4 en 5) verandert vroeger dan in de meetpunten gelegen in de vaargeul. Deze faseverschuiving in laagwaterkentering bedraagt ongeveer 1 uur.

Hoogwaterkentering verloopt veel meer synchronoos over de breedte van de rivier. Enkel in meetpunt 1 is (aan rechteroever) tijdens springtij het tijdstip van hoogwaterkentering ongeveer 1 uur vroeger dan in de andere meetpunten. Deze verschillen in kenteringstijdstip zijn het gevolg van het feit dat de ebstroom meer de vaargeul volgt terwijl de vloedstroom haar maximum heeft in de Schaar van Ouden Doel. In figuren 5 en 6 zijn enkele karakteristieke snelheidsverticalen opgesteld. Uit deze figuur blijkt dat tijdens eb en vloed de snel-

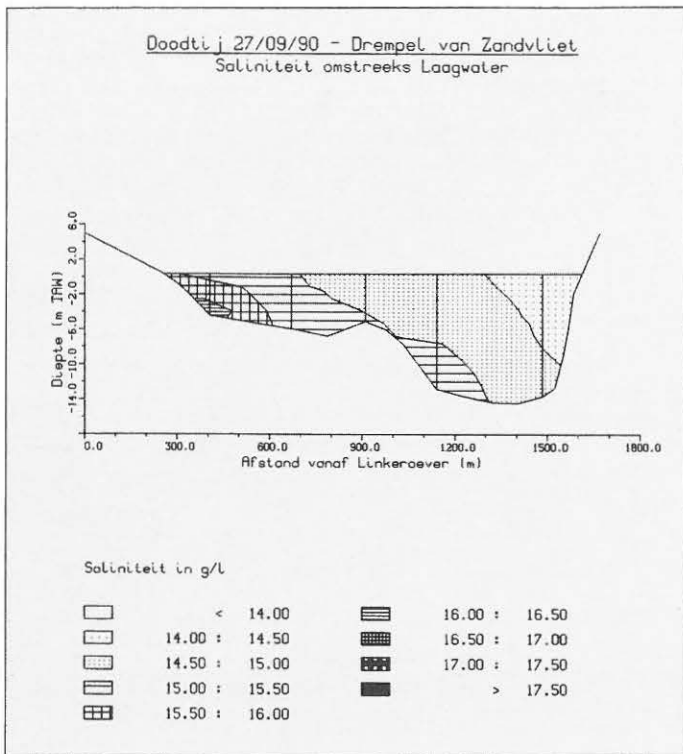
Figuur 9



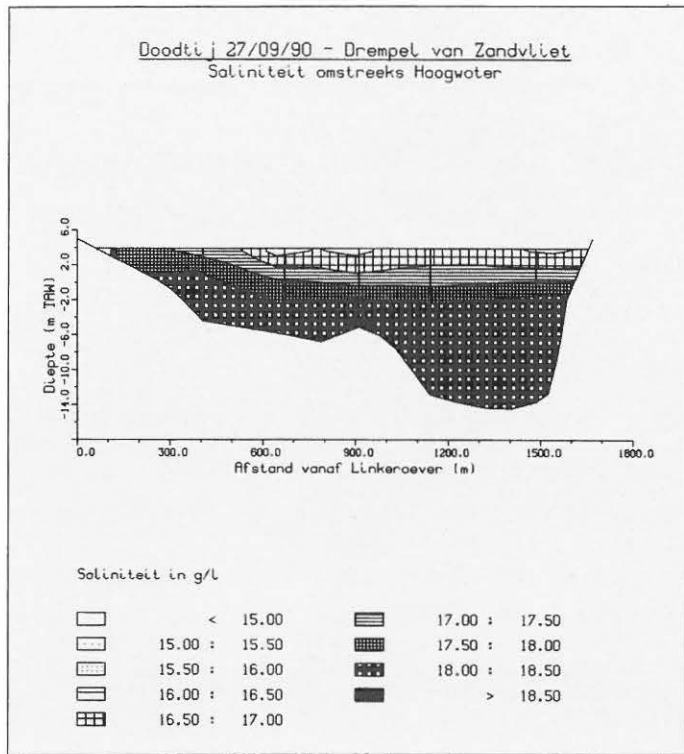
Figuur 10



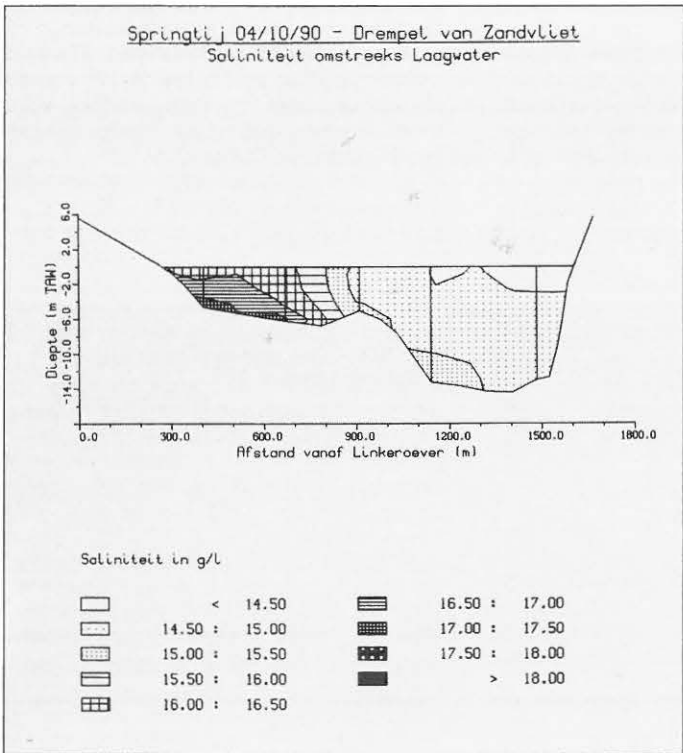
Figuur 11a



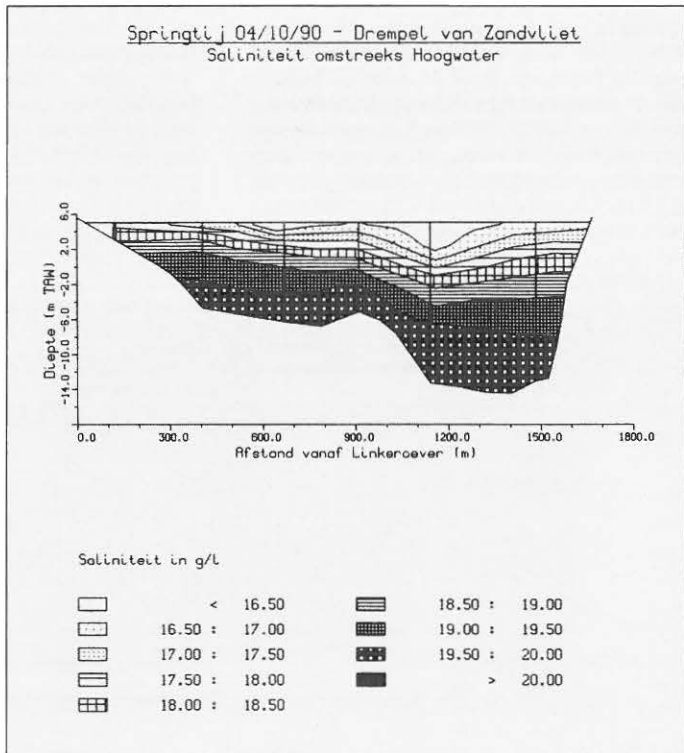
Figuur 11b



Figuur 12a



Figuur 12b



heidsverticale vervormd zijn. Aan het oppervlak is een zeewaartse component en aan de bodem een landwaartse component waarneembaar. Dit veroorzaakt tijdens vloed een verhoogde en tijdens eb een verlaagde snelheidsgradiënt t.o.v. het theoretische logaritmische snelheidsprofiel, resulterend in een afname van de snelheid aan de oppervlakte tijdens vloed en een toename ervan tijdens eb. De vervorming van de

snelheidsverticale is het gevolg van de aanwezigheid van dichtheidsverschillen ten gevolge van een horizontale en verticale saliniteitsgradiënt (zie ook hoofdstuk saliniteit). De vervorming van de snelheidsverticale kan worden aangetoond door uitgaande van de theoretische snelheidsverticaal de verhouding te berekenen tussen de oppervlaktesnelheid en de verticaal gemiddelde snelheid. Deze verhouding is voor het theo-

retisch snelheidsprofiel $V_{opp}/V_{gem} \approx 1.1$. In tabel 2 wordt deze verhouding uitgerekend voor de verschillende meetpunten. In alle meetpunten is de 'ebverhouding' groter dan en de 'vloedverhouding' kleiner dan de theoretische waarde. Dit wijst op een verhoogde snelheid aan de oppervlakte tijdens eb en een verlaagde snelheid tijdens vloed aan de oppervlakte. Uit figuren 5 en 6 is de invloed van de stra-

tificatie tijdens hoogwaterkentering duidelijk waarneembaar: de stroming in de onderlaag is naar opwaarts gericht, terwijl in de bovenlaag reeds het zoeter water naar zee stroomt. Tijdens laagwaterkentering vormt zich geen tweelagenstroming. De reden hiervoor kan gevonden worden in de aanwezigheid van een grote verticale stratificatie van de saliniteit omstreeks hoogwater terwijl omstreeks laagwater er geen uitge-

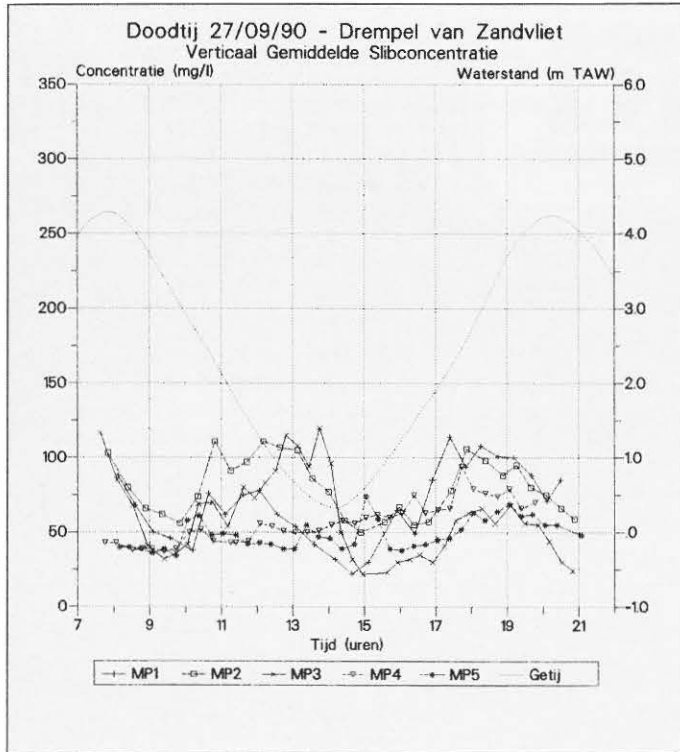
sproken saliniteitsgradiënt aanwezig is.

5. DEBIET

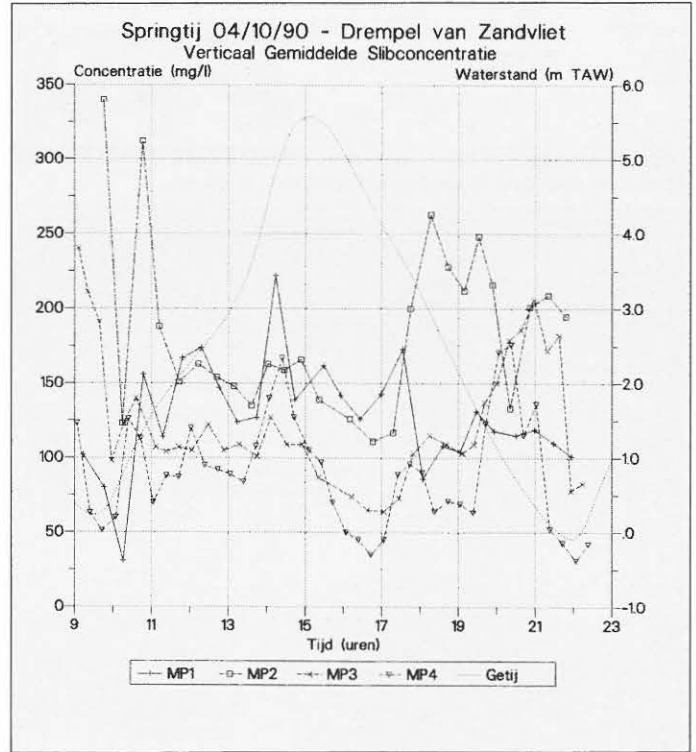
Aan de hand van de snelheidsmetingen werd op een aantal tijdstippen het debiet berekend (doorstroomoppervlakte vermenigvuldigd met de verticaal gemiddelde snelheid). De snelheden en debieten per meetpunt en per eb/vloed zijn samengevat in ta-

bellen 3 en 4. Het verschil tussen het debiet bij eb en bij vloed geeft het bovendebiet van de rivier. Deze waarde is het resultaat van het verschil tussen twee grote getallen, de nauwkeurigheid is derhalve gering. Dit is waarschijnlijk ook de reden dat het berekende bovendebiet voor de meting van 27/09/90 en 04/10/90 zo sterk van elkaar verschilt ($2.34 \cdot 10^6$ t.o.v. $5.46 \cdot 10^6$ m³ per getij). Omgerekend naar m³/s geeft dit voor de

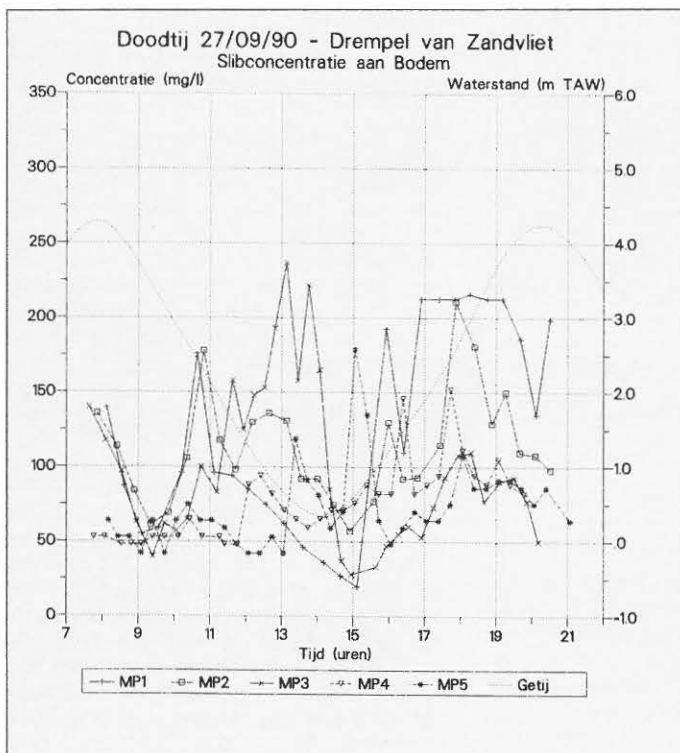
Figuur 13



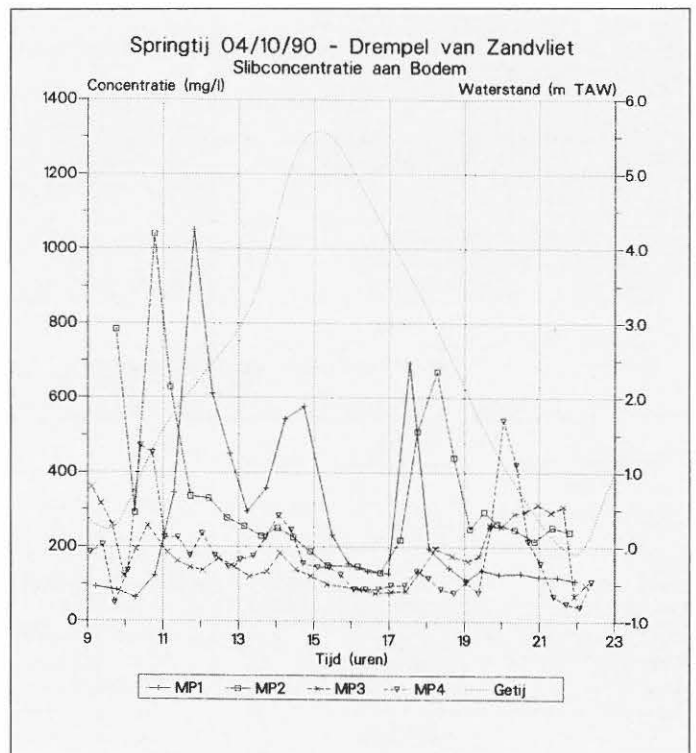
Figuur 14



Figuur 15



Figuur 16



Tabel 5: Gemiddelde verhouding C_{bodem}/C_{gem} tijdens eb en vloed.

	27/09/90	04/10/90
eb	1.45	1.59
vloed	1.67	2.19

meting van 27/09/90 $52\text{m}^3/\text{s}$ en voor de meting van 04/10/90 $121\text{m}^3/\text{s}$. De gemeten maandelijks gemiddelde bovendeblieten te Schelle voor september en oktober 1990 bedragen respectievelijk $45.5\text{m}^3/\text{s}$ en $58.3\text{m}^3/\text{s}$ (Antwerpse Zeehavendienst, 1990).

6. SALINITEIT

De Schelde wordt beschouwd als een goed gemengd tot gedeeltelijk gestratificeerd estuarium, zie Peters (1975). Het zoutgehalte in de rivier is variabel, de twee belangrijkste factoren zijn enerzijds het getij (springtij- doortijcyclus) en anderzijds de bovenafvoer van de rivier. Grote bovendeblieten treden op in de winter. Tijdens de zomer is het bovendebliet geringer en dringt het zout dus verder de rivier binnen. Wegens de optredende faseverschuiving in de seizoensgebonden variaties zijn de hoge zoutwaarden waarneembaar in de herfst, terwijl lage zoutwaarden op het einde van de winter en begin van de lente optreden.

Tabel 6: Doodtij 27/09/90. Slibconcentraties (mg/l): gemiddelde waarde (\pm standaardafwijking) over eb/vloed, maximale en minimale waarde.

		MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
verticaal gemiddeld	eb	57 \pm 19	82 \pm 22	73 \pm 27	46 \pm 6	45 \pm 8
	vloed	83 \pm 25	78 \pm 17	43 \pm 16	68 \pm 6	52 \pm 11
	max eb	78	111	120	56	61
	max vloed	114	106	66	94	74
bodem	min eb	22	50	32	37	34
	min vloed	30	55	22	51	38
	eb	81 \pm 40	105 \pm 33	125 \pm 59	61 \pm 15	61 \pm 20
	vloed	177 \pm 60	125 \pm 39	68 \pm 26	93 \pm 24	83 \pm 30
top	max eb	176	178	237	94	119
	max vloed	216	211	110	152	179
	min eb	22	57	40	48	42
	min vloed	27	77	28	59	59
top	eb	45 \pm 20	65 \pm 15	40 \pm 14	37 \pm 7	41 \pm 6
	vloed	15 \pm 18	41 \pm 4	20 \pm 6	61 \pm 8	41 \pm 6
	max eb	78	91	85	56	53
	max vloed	52	51	32	79	53
top	min eb	9	44	27	24	31
	min vloed	2	37	12	42	37

Tabel 7: Springtij 04/10/90. Slibconcentraties (mg/l): gemiddelde waarde (\pm standaardafwijking) over eb/vloed, maximale en minimale waarde.

		MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
verticaal gemiddeld	eb	124 \pm 24	189 \pm 51	120 \pm 46	84 \pm 44	–
	vloed	140 \pm 49	171 \pm 49	111 \pm 13	97 \pm 30	–
	max eb	173	263	206	176	–
	max vloed	222	312	140	167	–
bodem	min eb	86	111	64	31	–
	min vloed	31	135	87	50	–
	eb	181 \pm 151	298 \pm 152	181 \pm 42	150 \pm 133	–
	vloed	441 \pm 281	356 \pm 259	157 \pm 40	202 \pm 105	–
top	max eb	694	670	314	540	–
	max vloed	1050	1039	257	471	–
	min eb	109	131	68	38	–
	min vloed	63	151	100	47	–
top	eb	96 \pm 24	118 \pm 33	78 \pm 17	52 \pm 18	–
	vloed	32 \pm 11	91 \pm 11	77 \pm 11	44 \pm 368	–
	max eb	142	161	134	87	–
	max vloed	55	112	101	126	–
top	min eb	45	67	62	28	–
	min vloed	21	79	65	0	–

De waarde van de horizontale saliniteitsgradiënt tussen Prosperpolder en Liefkenshoek bereikt een maximale waarde van $\pm 0.50\text{g/l}$ per km in de herfst (november), op het einde van de winter (februari) daalt deze waarde tot $\pm 0.30\text{g/l}$ per km (Antwerpse Zeehavendienst, 1981). Ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens kan die waarde oplopen tot 0.75g/l per km, zie Peters (1975). In het gebied tussen Bath en Doel is de variatie van saliniteit tijdens een getij en het gemiddeld verschil in saliniteit tussen oppervlakte en bodem maximaal. We kunnen dit gebied dus aanduiden als een saliniteitsgradiëntmaximum. Het is ook in dat gebied dat tijdens kentering een duidelijke stratificatie optreedt in de waterkolom (tweelagenstroming). De metingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet (27/09/90 en 04/10/90) zijn typisch voor hoge saliniteitswaarden.

De verticaal gemiddelde saliniteit in functie van de tijd is weergegeven in figuren 7 (doodtij) en 8 (springtij). Een maximum in de saliniteitscurve treedt ongeveer twee uur na hoogwater op in de meetpunten gelegen in de vaargeul. Op de Plaat van Doel treedt het saliniteitsmaximum iets vroeger op. Omstreeks 1 tot 2 uur na laagwater is de zoutwaarde minimaal in de Schelde. Ook hier kan een verschil waargenomen worden tussen de Plaat van Doel (en Schaar van Ouden Doel) en de rest van de vaargeul. Op de Plaat is de saliniteit omstreeks laagwater gemiddeld groter dan in de vaargeul. De leidam langsheen de Plaat van Doel en de Schaar van Ouden Doel heeft hier als gevolg dat het water op de Plaat trager gemengd wordt met het zoeter water dat van opwaarts aangevoerd wordt.

Het verschil tussen maximum en minimum saliniteit bedraagt ongeveer 3.0g/l tijdens doortij en 4.5g/l tijdens springtij. Uitgaande van een duur van de eb (vloed) van 6 uur wordt de tijdsgradiënt dan $1.6 \cdot 10^{-4} \text{g/l/s}$ tijdens doortij en $2.1 \cdot 10^{-4} \text{g/l/s}$ tijdens springtij. De horizontale saliniteitsgradiënt kan berekend worden volgens:

$$dS/dx = (dS/dt) / V \quad (1)$$

waarbij S de saliniteit is, t de tijd en V de snelheid. Voor de bepaling van de gradiënt wordt uitgegaan van een in de tijd en over de dwarssectie gemiddelde snelheid tijdens doortij en tijdens springtij, deze bedraagt respectievelijk 0.4m/s en 0.5m/s . De horizontale saliniteitsgradiënt is dan 0.42g/l per km tijdens springtij en 0.35g/l per km tijdens doortij.

In figuren 9 (doodtij) en 10 (springtij) wordt voor meetpunt 2 de gemiddelde, de maximale (bodem) en de minimale (oppervlakte) saliniteitscurve in functie van de tijd uitgezet. Het verschil tussen bodem en oppervlakte geeft een idee over de verticale stratificatie in het meetpunt. Uit deze figuren blijkt dat de grootste stratificatie optreedt aan het einde van de vloed (saliniteitsmaximum) en dat gedurende de rest van het getij de stratificatie klein is. Het verschil in saliniteit tussen bodem en oppervlakte is afhankelijk van de plaats van het meetpunt (maximum in meetpunt 3). Het verschil tussen bodem

B

OVENGRONDS EN ONDERGRONDS MILIEUBEWUST AKTIEF

DENYS



- Pijpleidingen, waterleidingen en collectoren
- Industriële leidingen en electromechanische uitrustingen
- Pompstations en waterzuiveringsinstallaties
- Renovatiewerken en speciale technieken
- Grondwerken en burgerlijke bouwkunde
- Tunnels, buisdoorpersingen en boringen
- Restauratiewerken
- Spoorwerken

DENYS

Industrieweg 124 - 9032 WONDELGEM (Gent)
Tel. 09/254 01 11 - Fax. 09/226 77 71



Soils n.v. uw partner in bodemsanering

- milieutechnieken
- in situ en ex-situ bodemsanering
- sanering van verontreinigde fabrieksterreinen
- sanering en herinrichting van stortterreinen
- inrichting van nieuwe stortten



Soils n.v. heeft als eerste bedrijf in Vlaanderen een milieuvergunning Klasse I bekomen voor de exploitatie van een grondreinigingsbedrijf en recyclagecentrum in Antwerpen Linkeroever.

Twee reinigingssystemen zullen toegepast worden:

- biologische reiniging (vooral voor met KWS verontreinigde grond)
- fysico-chemische plant (vooral voor verontreiniging door zware metalen, capaciteit 30 T/u - 60.000 T/jaar)



Soils n.v. realiseerde reeds een aantal belangrijke en innovatieve projecten van bodemsanering in opdracht van de NMBS, van de Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaamse Gewest (OVAM) en van diverse privé-klienten.

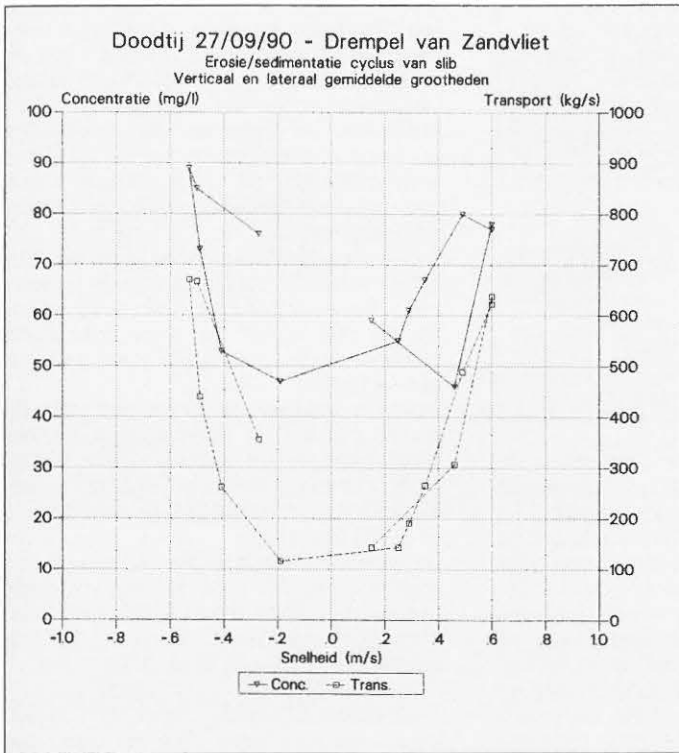


Tevens voerde Soils n.v. een bodemsanering uit in Nederland voor de stad Amsterdam in het kader van de bouw van de Piet Heintunnel. De verontreinigingsgraad was van Klasse III (zware verontreiniging) waardoor de werkzaamheden vielen onder veiligheidsklasse 2T en F.

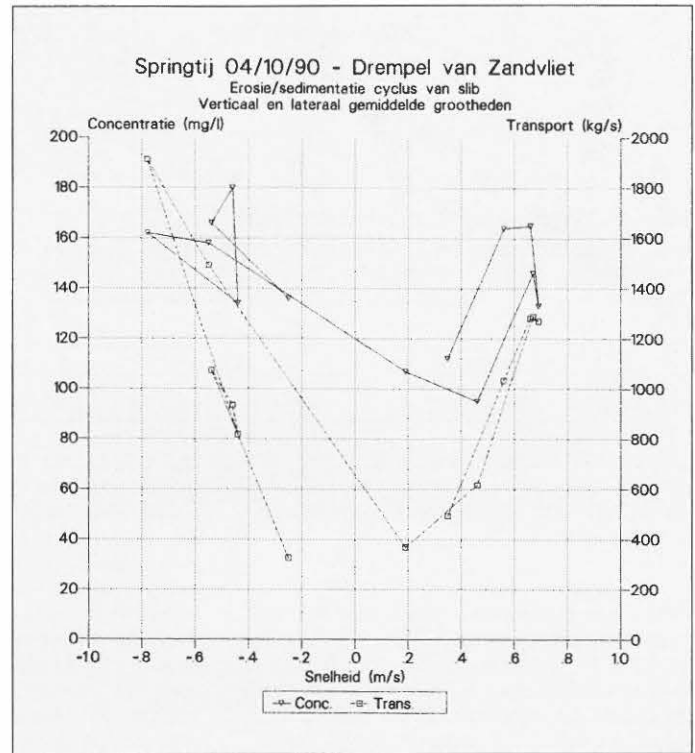


Soils n.v. is in Mariakerke gestart met een nieuw procédé voor de sanering van gronden, verontreinigd door zuurteer. Hiervoor werd geïnvesteerd in de ontwikkeling van een specifieke behandelingsplant.

Figuur 17



Figuur 18



en oppervlakte bereikt maximaal ±2.8g/l tijdens doottij en ±4g/l tijdens springtij. Het gemiddeld verschil tussen bodem en oppervlakte bedraagt ongeveer 1g/l voor zowel doottij als springtij. Het maximaal verschil in saliniteit tussen bodem en oppervlakte is dus van dezelfde grootte orde als het verschil over een getijcyclus.

Uitgaande van de verticale saliniteitsgraadient kan de verticale dichtheidsgraadient bepaald worden. De dichtheid (ρ) wordt berekend uit de saliniteit (S) volgens:

$$\rho = 0.75 S + 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Het relatieve dichtheidsverschil ($\rho_{rel} = \Delta\rho/\rho$) is dan:

$$\rho_{rel} = 0.75 \Delta S/\rho \quad (3)$$

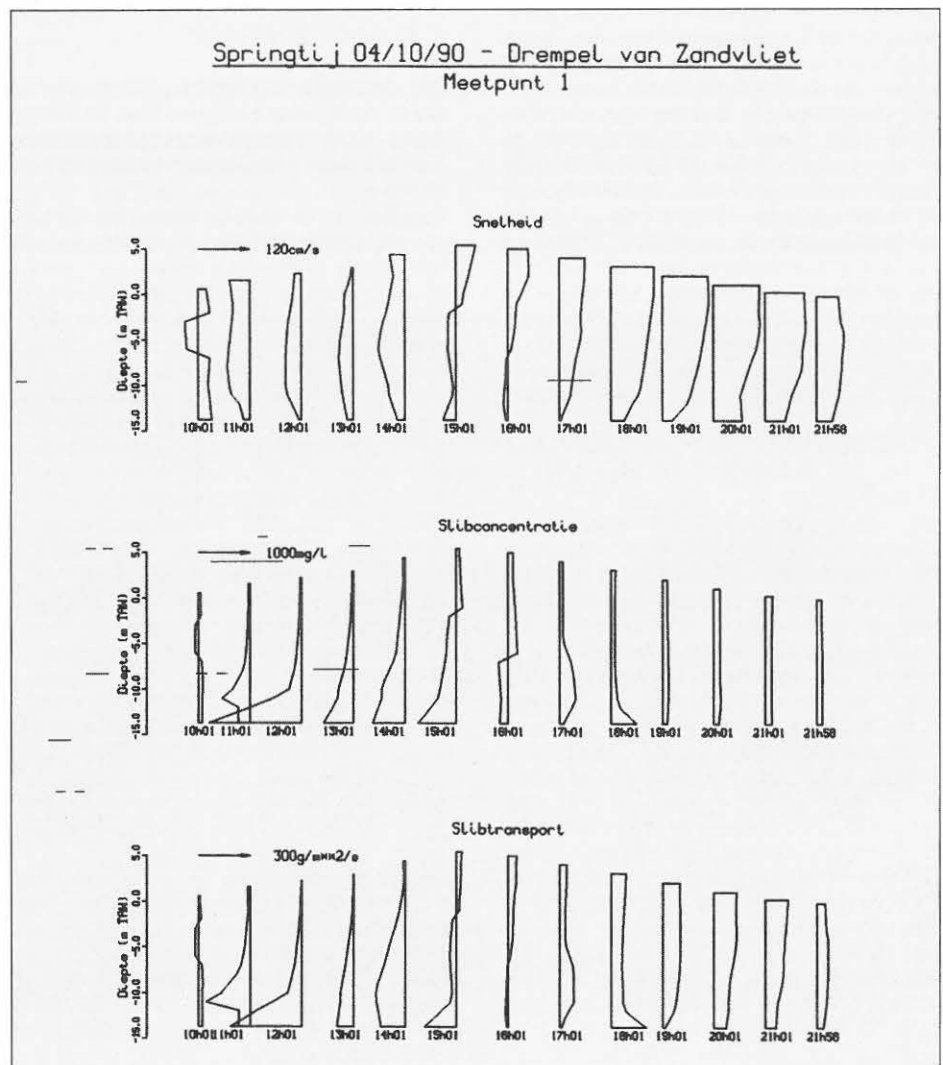
Uit de gemiddelde en de maximale waarden voor het verschil in saliniteit ΔS kan berekend worden dat het relatieve dichtheidsverschil gemiddeld ongeveer $7.5 \cdot 10^{-4}$ bedraagt en ongeveer $2.1 \cdot 10^{-3}$ (doottij) en $3.0 \cdot 10^{-3}$ (springtij) maximaal. De snelheden welke door dit relatieve dichtheidsverschil veroorzaakt worden, kunnen bepaald worden met volgende empirische formule (IMDC, 1988):

$$V_d = 0.4 \sqrt{\rho_{rel} g h} \quad (4)$$

met V_d de snelheid ten gevolge van het dichtheidsverschil [m/s], ρ_{rel} het relatieve dichtheidsverschil [-], g de versnelling ten gevolge van de zwaartekracht [m/s²] en h de waterdiepte [m].

Bij een diepte van 15m geeft dit een snelheidscomponent van gemiddeld ±0.13m/s die in de bovenste helft van de verticaal zeewaarts en in de onderste helft landwaarts gericht is. Deze snelheidscomponent bereikt een maximale waarde van on-

Figuur 19



Tabel 8: Doodtij 27/09/90, eb/vloed transport.

richting	totaal transport (ton)	advectief transport (ton)
eb	5255	5450
vloed	-5206	-5272
getij	49	178

Tabel 9: Springtij 4/10/90, eb/vloed transport.

richting	totaal transport (ton)	advectief transport (ton)
eb	13661	14906
vloed	-13418	-13927
getij	243	979

geveer 0.2m/s tijdens doodtij en 0.3m/s tijdens springtij. Dit verklaart in grote mate de afwijkende vorm van de snelheidsverticalen in figuren 5 en 6.

Tengevolge van verschillen in snelheid en diepte over de dwarssectie kan een laterale saliniteitsgradiënt optreden, zie figuren 11 (doodtij) en 12 (springtij). De laterale saliniteitsverschillen zijn over het algemeen groter tijdens springtij dan tijdens doodtij. Het maximale verschil (tussen rechter en linker-oever) treedt op omstreeks laagwater (bij minimum saliniteit dus) en bedraagt ongeveer 1.5g/l bij doodtij en 2.5g/l bij springtij. De aanwezigheid van een laterale saliniteitsgradiënt is sterk afhankelijk van de lokale bathymetrie. De aanwezigheid van de leidam op de Plaat van Doel samen met het vloeddominant karakter van de stroming op de Plaat terwijl in de vaargeul de stroming ebdominant is maken dat ter hoogte van de meetraai de laterale gradiënt belangrijk kan zijn gedurende bepaalde periodes van de getijcyclus. Tijdens eb

verloopt op de Plaat van Doel en in de Schaar van Doel de menging van zouter en zoeter water trager dan in de vaargeul. De verschillen in saliniteit tussen de meting van 27/09/90 en 04/10/90 zijn voornamelijk het gevolg van verschillen in getij. De gemiddelde maximale en minimale saliniteit over de meetpunten bedraagt voor het doodtij van 27/09/90 18.0g/l en 14.8g/l en voor het springtij van 04/10/90 19.3g/l en 14.9g/l. Uit deze waarden blijkt dat tijdens springtij de maximale saliniteit ongeveer 1.3g/l hoger is dan bij doodtij terwijl de minimale waarde nagenoeg ongewijzigd is.

7. SLIBCONCENTRATIE

Een algemene inleiding over slibconcentraties in de Schelde kan gevonden worden in IMDC (1993). Kenmerkend voor de slibconcentratie is de grote variatie in de ruimte en de tijd.

Van Eck et al. (1991) geven het verloop van de slibconcentratie in functie van de

plaats weer, gebaseerd op metingen tussen 1970 en 1990: een vrij vlak verloop tussen Vlissingen en Bath ($\pm 70\text{mg/l}$) toenevend tot 115mg/l tussen Doel en Kallo en vervolgens vrij constant tot Rupelmonde. De grootste concentraties treden op tussen Antwerpen en Zandvliet, het turbiditeitsmaximum situeert zich ter hoogte van Oosterweel (Wartel, 1977). De meetraai is dus gesitueerd aan het uiteinde van het turbiditeitsmaximum.

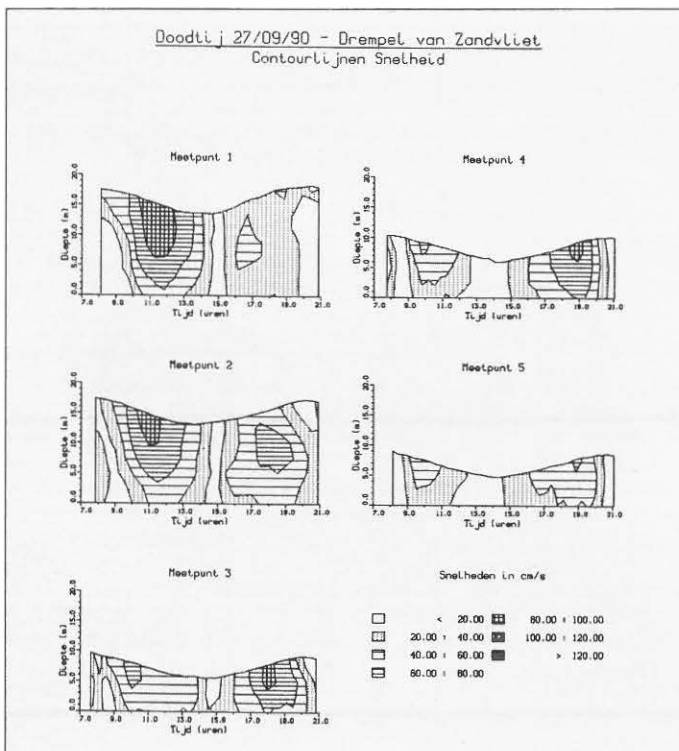
De slibconcentratie verandert in de tijd. Een eerste tijdschaal die beschouwd moet worden is het getij. Van Eck et al. (1991) schatten de variatie van de dieptegemiddelde slibconcentratie gedurende een getij op een factor 2.

Verder is er de variatie tijdens een springtij-doodtij cyclus. Ter hoogte van Liefkenshoek (IMDC, 1990) werden tijdens doodtij slibconcentraties gemeten die $\pm 50\%$ bedroegen van de waarde bij gemiddeld getij en 125% bij springtij.

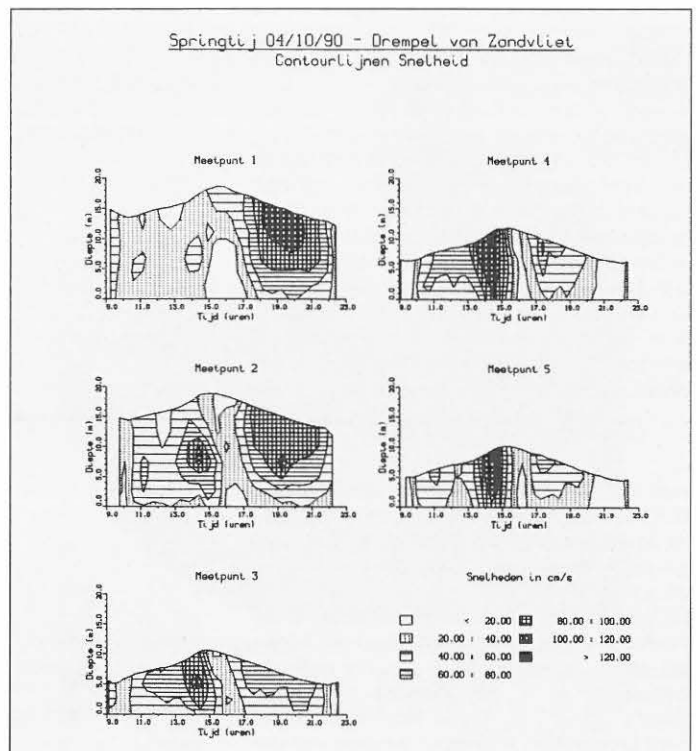
De verschillen die te wijten zijn aan de seizoenen bedragen voor de Westerschelde een factor 3, in de zomer is de slibconcentratie lager omwille van de opslag van slib op de platen (Van Eck et al., 1991).

Theoretisch varieert de concentratie op een karakteristieke manier met het getij, met name resuspensie tijdens perioden met hoge snelheden en sedimentatie tijdens kentering. In praktijk echter spelen ook nog factoren zoals de beschikbaarheid van vloeibaar slib op de bodem en daaraan gekoppeld de ligging van het meetpunt in de rivier (vaargeul of ondiepere delen), het verschil in stroming tijdens vloed of eb (eben vloedgeulen, verticaal snelheidsprofiel en bodemschuifspanning), de duur van de kentering (plaatsafhankelijk), de turbulentie en de saliniteit (vorming van grotere aggregaten met een hogere valsnelheid) een

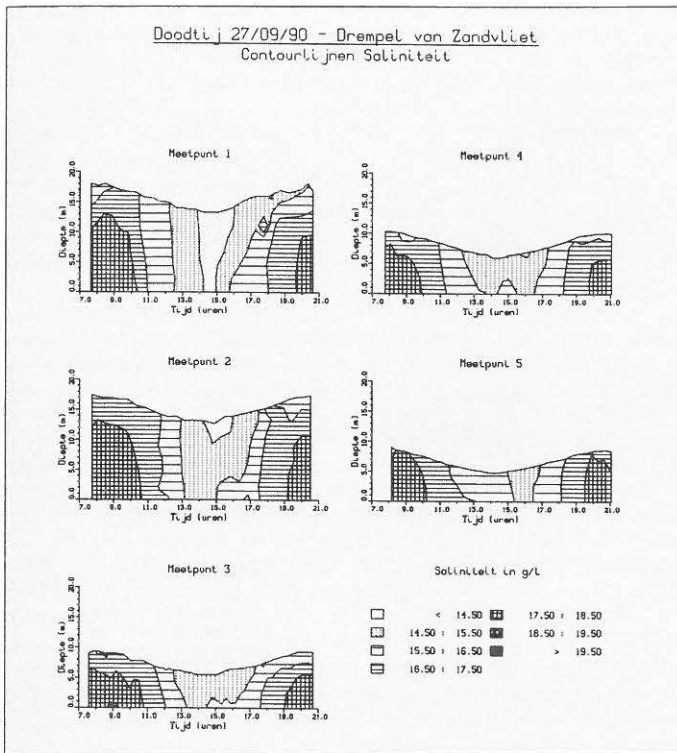
Figuur 20



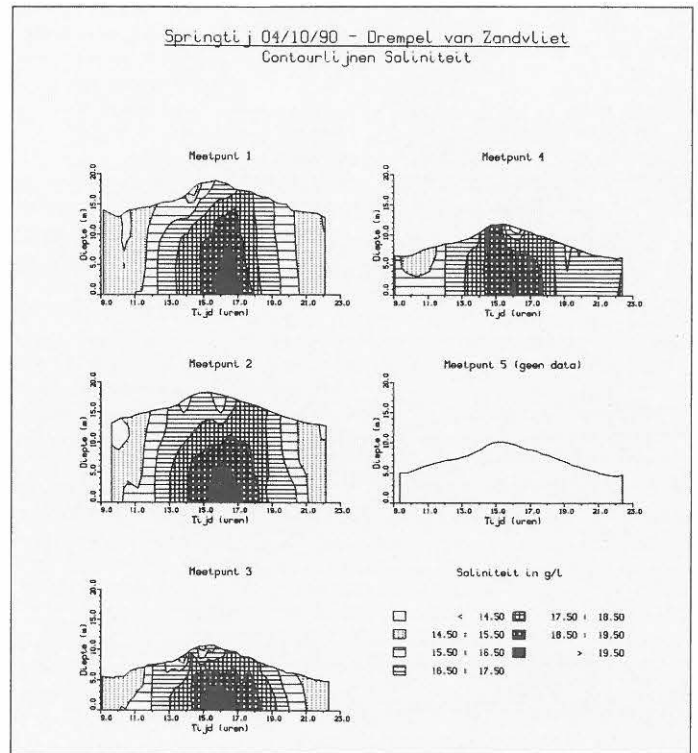
Figuur 21



Figuur 22



Figuur 23



doorslaggevende rol. De aanvoer van slib maakt dat de concentratie, onafhankelijk van de bovengenoemde factoren tijdens eb en vloed kan verschillen.

Uit figuren 13 en 14 (verticaal gemiddelde concentratie) en 15 en 16 (bodemconcentratie, let op de verschillende schalen) kan het bovenvermelde karakteristieke gedrag van slib in suspensie tijdens een getij waargenomen worden.

De verhouding tussen bodemconcentratie en verticaalgemiddelde concentratie is gegeven in tabel 5. Deze verhouding geeft de invloed weer van sedimentatie en erosie en weerspiegelt duidelijk het asymmetrisch karakter van de snelheid gedurende een getijcyclus. Uit de tabel blijkt dat de bodemconcentratie gemiddeld tijdens doortij 1.5 (eb) tot 1.7 (vloed) en tijdens springtij 1.6 (eb) tot 2.2 (vloed) keer groter is dan de gemiddelde concentratie. De langdurige metingen ter hoogte van Liefkenshoek (IMDC, 1989) leverde een verhouding tussen de gemiddelde slibconcentratie en de maximale waarde op van 1.65 tijdens vloed en 2.30 tijdens eb.

De verhouding van de dieptegemiddelde concentratie C_{max}/C_{min} gedurende een getij bedraagt (afhankelijk van de meetpunten) 1.5 tot 4 tijdens doortij en 1.6 tot 7 tijdens springtij. Gemiddeld over de meetpunten bedraagt deze verhouding 2.5 tijdens doortij en 3.5 tijdens springtij. Deze waarden zijn groter dan de bovenvermelde waarde (i.e. 2) van Van Eck et al. (1991).

De verticaal gemiddelde concentratie is het grootst in meetpunt 2 en vermindert naarmate men naar de rechter- en linkeroever toe gaat, zie tabel 6 (doortij) en tabel 7 (springtij).

Uit tabellen 6 en 7 kan afgeleid worden dat

tijdens doortij de gemiddelde concentratie ongeveer een factor 2 kleiner is dan tijdens springtij.

8. EROSIE- EN SEDIMENTATIECYCLUS

Een karakteristieke eigenschap van slibconcentratie onderhevig aan getijwerking is dat er een faseverschuiving optreedt tussen de snelheidspieken en de concentratie- en de transportpieken. Dit resulteert in een typische hysteresis lus van het verloop van de concentratie en het transport t.o.v. de snelheid. Nichols (1984) en Van Leussen (1994) onderscheiden een aantal tijdsverschuivingen die verantwoordelijk zijn voor het asymmetrisch transport:

- uitzakken: nadat de snelheid verminderd is tot onder de kritische drempel voor sedimentatie worden de slibdeeltjes nog verder getransporteerd over een zekere afstand voordat ze zich aan de bodem vasthechten. Deze tijd is omgekeerd evenredig met de valsnelheid.
- erosie: de kritische snelheid nodig om een slibdeeltje in suspensie te brengen is groter dan de kritische snelheid voor sedimentatie.
- verticale menging: de slibdeeltjes die in suspensie gebracht werden, hebben een zekere tijd nodig om over de waterkolom verdeeld te worden. Ten gevolge van verticale stratificatie kan deze dispersie sterk verminderd worden.

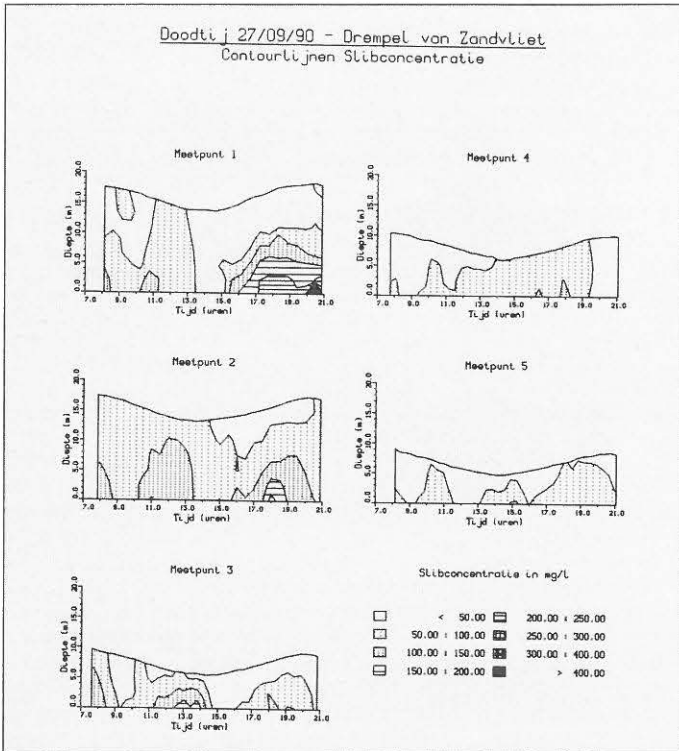
In figuren 17 en 18 worden de slibconcentratie en het -transport uitgezet in functie van de stroomsnelheid (vloed is negatief, eb is positief; de grootheden zijn verticaal en lateraal gemiddeld). De maximale vloedconcentraties en vloedtransporten zijn groter dan de ebconcentraties en -transporten, wat het gevolg is van de grotere vloed-

heden. Deze vaststelling wijst op het vloed-dominant gedrag van de concentratie. Er dient opgemerkt te worden dat deze figuren geen rekening houden met verschillen in duur tussen vloed en eb, zodat de grotere vloedtransporten niet noodzakelijk wijzen op een groter totaal transport van slib tijdens vloed. De figuren tonen aan dat de concentratie en ook het transport bij toenemende stroming lager is dan bij afnemende stroming. Deze verschillen in transport tussen vloed en eb zijn verantwoordelijk voor het residuele transport over een getij. De afname in concentratie tijdens afnemende stroming heeft te maken met de vorming van grote slibaggregaten met een hoge valsnelheid (zie van Leussen, 1994).

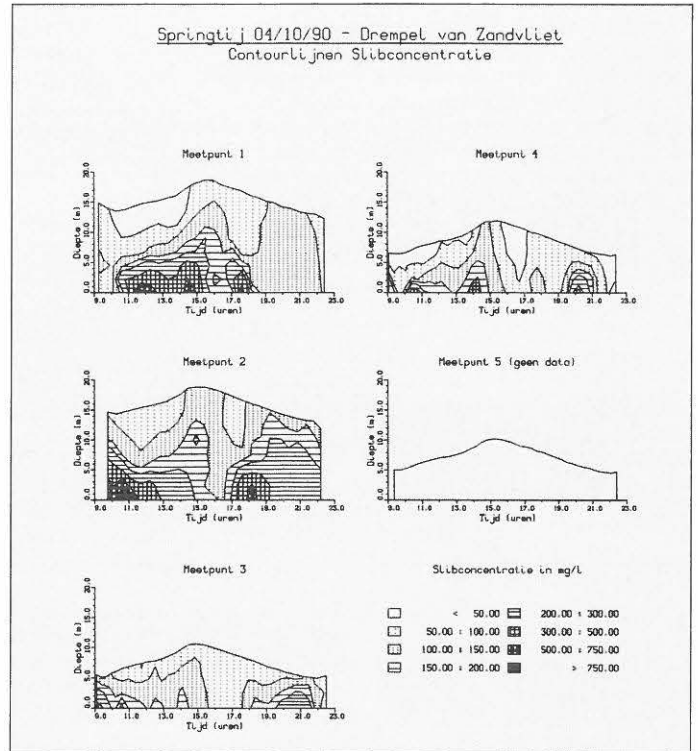
9. SNELHEIDS-, CONCENTRATIE- EN TRANSPORTPROFIELEN

Het erosie- en sedimentatiepatroon van slib kent een complex driedimensionaal karakter. In figuur 19 wordt dit aan de hand van snelheids-, concentratie- en transportprofielen voor meetpunt 1 (gelegen aan de rand van de vaargeul) tijdens springtij weergegeven. Per conventie wordt ook voor het verloop van de slibconcentratie de richting (positief: eb, negatief: vloed) aangeduid. De figuur begint met laagwaterkentering. In het begin van de vloed (omstreeks 12 uur) kan een plotse toename in concentratie en transport aan de bodem waargenomen worden. Nadien zijn de concentraties en de transporten homogener verdeeld over de verticale, er blijft echter steeds een verticale gradiënt behouden. Men kan duidelijk zien dat gedurende de vloed de slibdeeltjes meer en meer verdeeld worden over de waterkolom. De concentratie en ook het transport tijdens eb is homogener dan tijdens vloed. Enkel omstreeks 2 tot 3 uur na hoog-

Figuur 24



Figuur 25



water kan een plotse toename van de concentratie aan de bodem waargenomen worden. De slibconcentratie aan de oppervlakte is heel klein tijdens vloed terwijl tijdens eb er altijd een significante oppervlakteconcentratie aanwezig is. Dit kan verklaard worden door de aanwezigheid van een grotere verticale saliniteitsstratificatie tijdens vloed wat de verticale menging vermindert.

10. SLIBTRANSPORT

Door Fisher (1976) werd een methode ontwikkeld waarbij de invloeden van rivierafvoer, getij, dichtheidsverschillen en geometrie op het totaal transport kunnen worden onderscheiden. De alzo bekomen transportcomponenten geven een inzicht in het mengemechanisme van het estuarium. Een uitvoerige beschrijving van de methode alsmede de afleiding van de eendimensionale dispersie-diffusievergelijking kan gevonden worden in Swart (1983). De uiteindelijke formule voor een permanente toestand na verwaarlozing van de rivierafvoer, de erosie, sedimentatie en brontermen kan als volgt geschreven worden:

$$A u c - A D_x \frac{\delta c}{\delta x} = T \tag{5}$$

- waarbij
- A = dwarsdoorsnede
- c = gemiddelde slibconcentratie over doorsnede
- u = gemiddelde snelheid over doorsnede
- D_x = effectieve dispersiecoëfficiënt
- T = totaal transport

Integratie van formule (5) over de getijperiode geeft dan:

$$\langle A u c \rangle - A D_x \frac{\delta \langle c \rangle}{\delta x} = \langle A u c \rangle \tag{6}$$

Het getijgemiddeld transport kan vereenvoudigd als volgt geschreven worden:

$$\langle A u c \rangle = \langle A u c \rangle + \langle A u'' c'' \rangle \tag{7}$$

- waarin
- $\langle A u c \rangle$: totaal transport
- $\langle A u c \rangle$: advectief en niet lokaal dispersief transport
Dit is het transport ten gevolge de gemiddelde vloeistofbeweging. In een getijregime vertegenwoordigt het een resttransport (gemiddeld over het getij), dat beïnvloed wordt door de processen welke zich aan beide zijden van de meetraai voltrekken.
- $\langle A u'' c'' \rangle$: totale resttransport (lokaal dispersief transport)
transport ten gevolge van de onregelmatige stroomverdeling in de dwarsdoorsnede. Bestaat uit een horizontale component (gerelateerd aan getij - en dieptegemiddelde waarden) die ontstaat door onregelmatige bodemligging, eb- en vloedstroom en transversale gravitatiecirculatie, en een verticale component, hoofdzakelijk veroorzaakt door dichtheidsstromingen (gerelateerd aan breedtegemiddelde waarden).

Het slibtransport werd voor de twee metingen opgesplitst volgens formule (7), waarbij per tijdstip het advectief en het totaal transport bepaald werd, het verschil tussen die twee geeft dan het totale resttransport weer. Per meetpunt werd het tijdstip van kentering bepaald. Het eb- of vloedtransport gaat steeds van kentering tot kentering.

Het tijdstip van kentering per meetverticale hoeft daarbij niet gelijk te zijn. Per conventie wordt het ebtransport als positief beschouwd en het vloedtransport als negatief.

De resultaten zijn gebundeld in tabellen 8 en 9. Uit de tabellen blijkt dat er een netto transport is in de ebrichting. Het valt op dat het totaal transport altijd kleiner is dan het advectief transport. Boven werd reeds opgemerkt dat het advectief transport belangrijk is in raaien met een sterke debietsverandering (tengevolge van eb- en vloedgeulen).

Het netto totaal transport uitgedrukt in kg/s is voor de meting van 27/09/90 (doodtij) 1.1kg/s en voor de meting van 04/10/90 (springtij) 5.4kg/s. Indien men de vloed- en ebtransporten afzonderlijk beschouwt is het transport tijdens springtij ongeveer een factor drie groter dan tijdens doodtij. Het is niet mogelijk om aan de hand van deze metingen algemene conclusies te formuleren aangaande het slibtransport en de slibballans in de Schelde, daarvoor dient men te beschikken over een voldoende aantal metingen gespreid zowel in de ruimte als in de tijd.

11. CONCLUSIES

Om een overzicht van de metingen te bekomen worden in figuren 20, 22 en 24 (doodtij) en 21, 23 en 25 (springtij) de isolijnen van snelheid, saliniteit en slibconcentratie in functie van de tijd weergegeven.

Uit de snelheidsfiguren (20 en 21) komt duidelijk het verschillend stromingsveld tijdens vloed en eb naar voren. Zo volgt de ebstroom vooral de vaargeul terwijl de vloedstroom haar maximum heeft in de Schaar van Ouden Doel. Uit de figuren

komt ook duidelijk het vervormde snelheidsprofiel tijdens eb en vloed naar voren, ook kan de duur en het tijdstip van kentering (en de afwijkingen) duidelijk waargenomen worden. De asymmetrie van het getij maakt dat de isolijnen omstreeks hoogwaterkentering dichter bijeen liggen dan bij laagwaterkentering.

De saliniteit varieert met het getij zodanig dat de extreme waarden ongeveer één uur nauwelijks op de waterstandsextrema. Het verschil tussen minimum en maximum saliniteit bedraagt tijdens doortij ongeveer 3g/l en tijdens springtij ongeveer 4.5g/l. In alle meetpunten kan gedurende een groot deel van de getijcyclus een verticale stratificatie van de saliniteit waargenomen worden (figuren 22 en 23). Deze stratificatie is het grootst omstreeks hoogwater en is minimaal of afwezig omstreeks laagwater. Het maximaal verschil in saliniteit tussen de bodem en oppervlakte treedt op omstreeks het saliniteitsmaximum en bedraagt tijdens doortij ongeveer 2.8g/l en tijdens springtij ongeveer 4g/l. De horizontale saliniteitsgradiënt bedraagt 0.35g/l per km tijdens doortij en 0.42g/l per km tijdens springtij. De aanwezige horizontale en verticale saliniteitsgradiënten zijn verantwoordelijk voor de vervormde snelheidsverticalen tijdens eb en vloed. De laterale saliniteitsverschillen hebben een maximale waarde tijdens het saliniteitsminimum en kunnen oplopen tot 1.5g/l (doortij) tot 2.5g/l (springtij). Uit een vergelijking van de saliniteitswaarden tijdens doortij en springtij blijkt dat de minimale saliniteiten nagenoeg ongewijzigd zijn, terwijl de maximale saliniteit ongeveer 1.5g/l hoger is tijdens springtij.

De figuren 24 en 25 tonen aan dat de slibconcentratie sterk varieert in de tijd, over een verticale en over een dwarssectie. Deze figuren geven een aanduiding van de erosie- en sedimentatiecyclus van slib in de verschillende meetpunten. De variaties in concentratie kunnen voor een groot deel gecorreleerd worden aan variaties in snelheid. De grootste bodemconcentraties treden op tijdens vloed. Omstreeks hoogwaterkentering is er een duidelijke vermindering aan slib in het water waarneembaar ten gevolge van het uitzakken van de slibdeeltjes. De concentratie is dan vrij uniform verdeeld over de verticale.

De concentratie is (gemiddeld) het grootst in de vaargeul (meetpunt 2). Naarmate men dichterbij de oever komt neemt de concentratie in het water af. De verhouding gemiddelde concentratie/bodemconcentratie is ongeveer 1.5 tijdens doortij en 2 tijdens springtij. Tijdens springtij is de verticaal gemiddelde slibconcentratie ongeveer twee keer groter dan tijdens doortij.

Tussen de snelheidspieken en de slibcon-

centratie- en transportpieken treedt een faseverschuiving op, resulterend in een typisch hysteresisverloop van de concentratie en het transport in functie van de snelheid. De concentratie en ook het transport is bij toenemende stroming lager dan bij afnemende stroming.

In hoofdstuk 10 werd het slibtransport doorheen de meetraai voor zowel spring- als doortij berekend. Voor beide meetdagen werd een nettotransport berekend in ebrichting. Het slibtransport werd opgesplitst in een totaal en een advectief transport. Het feit dat het advectief transport altijd groter is dan het totaal transport is te verklaren doordat in de meetraai belangrijke veranderingen in debiet over de dwarssectie bestaan. Het netto transport bedraagt tijdens doortij 1.1kg/s en tijdens springtij 5.4kg/s. Omdat deze getallen het resultaat zijn van het verschil tussen twee grote getallen is de nauwkeurigheid hiervan gering. Gemiddeld gezien is het transport tijdens springtij ongeveer 3 keer groter dan tijdens doortij.

De twee meetcampagnes ter hoogte van de Drempel van Zandvliet hebben geleid tot een beter inzicht in het stromingspatroon en het sedimenttransport in de nabijheid van de Belgisch-Nederlandse grens. Het is echter duidelijk dat twee 13-uursmetingen enkel een klein deel van de sluier kunnen oplichten en geen volledig antwoord kunnen geven op vragen betreffende het slibtransport in het algemeen en het grensoverschrijdend slibtransport in het bijzonder.

DANKWOORD

De auteurs wensen hun dank te betuigen aan het personeel van de Studiedienst (Antwerpse Zeehavendienst) en van het Waterbouwkundig Laboratorium voor de vruchtbare discussies en samenwerking tijdens de studie van de Noordelijke Containerkaai. Ook de inspanningen van de bemanning van de meetschepen van zowel de Antwerpse Zeehavendienst als de Meetdienst Zeeland (Rijkswaterstaat) waarderen zij ten zeerste.

*M. FETTWEIS, M. SAS
IMDC N.V.
Wilrijkstraat 37-45
2140 Borgerhout
L. MEYVIS
Min. VI. Gem.
Antwerpse Zeehavendienst
Tavernierkaai
2000 Antwerpen*

LITERATUURLIJST

Antwerpse Zeehavendienst (1981). Zeeschelde

Chloridegehalte 1979, Verslag Nr. AZ.81/13.

Antwerpse Zeehavendienst (1990). Maand en Decade Gemiddelde Debieten van het Scheldebekken 1990.

Fettweis M., M. Sas, K.P.P. Pathirana, E. Jabbari and C.S. Yu (1993). Suspended Sediment Transport Modelling in the Scheldt Estuary: Comparison of Different Models. *Advances in Hydro-Science and Engineering*, Vol. 1, 1705-1710.

Fisher H.B. (1976). *Mixing and Dispersion in Estuaries*. Annual Review of Fluid Mechanics.

I.M.D.C. (1988). Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek Betreffende de Morfologische Factoren. Eindrapport. Rapport IMDC Nr. 130-88.09.03.

I.M.D.C. (1989). Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek Betreffende de Morfologische Factoren. Langdurige Stroom- en Sedimentmeting. Rapport IMDC Nr. 138-89.11.06.

I.M.D.C. (1990). Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek Betreffende de Morfologische Factoren. Analyse Stroom- en Sedimentmetingen. Rapport IMDC Nr. 138-90.11.05.

I.M.D.C. (1991a). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek. Stroom- en Sedimentmeting 27/09/90. Deelrapport 1 (twee delen). Rapport IMDC Nr. 1166-92.01.02-03.

I.M.D.C. (1991b). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek. Stroom- en Sedimentmeting 04/10/90. Deelrapport 2 (twee delen). Rapport IMDC Nr. 1166-92.01.04-05.

I.M.D.C. (1993). Gedrag van Particulair Materiaal in het Schelde-Estuarium. Eindrapport in opdracht van de BMM (Ministerie van Volksgezondheid en Leefmilieu).

Nichols M.M. (1984). Effects of Fine Sediment Resuspension in Estuaries. *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics* (Ed. A.J. Mehta). Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies Vol.14. Springer-Verlag.

Peters J.J. (1975). Les Mécanismes de Mélange des Eaux dans l'Estuaire de l'Escaut. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, No.2.

Swart J.P. (1983). Slibtransportberekeningen in een Dwarsraai in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Nota WWKZ-83.V007.

Van Eck G.T., N. De Pauw, M. Van Langenbergh, G. Verreut (1991). Emissies, Gehalten, Gedrag en Effecten van (Micro)verontreinigingen in het Stroomgebied van de Schelde en het Schelde-estuarium. *Water*, Nr. 60.

Van Leussen W. (1994). Estuarine Macroflocs, their Role in Fine-Grained Sediment Transport. Doctoraatsthesis Universiteit Utrecht.

Wartel S. (1977). Composition and Origin of Sediments in the Scheldt Estuary. *Geologie en Mijnbouw*, Vol.56, Nr.3.