

Rijkswaterstaat/RIKZ

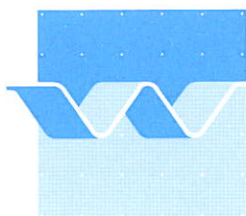
Slibtransport via zeesluizen;
Zandvlietsluis en Berendrechtsluis

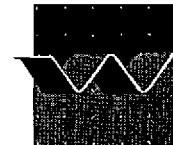
bureaustudie

juni 1997

Slibtransport via zeesluizen;
Zandvlietsluis en Berendrechtsluis

J.C. Winterwerp





KLANT : Rijkswaterstaat / RIKZ

TITEL : Slibtransport via Berendrecht- en Zandvlietsluis

SAMENVATTING :

Dit rapport geeft een overzicht van de mechanismen verantwoordelijk voor de slibtransporten door de Zandvliet- en Berendrechtssluis in de haven van Antwerpen met als doel te komen tot een betere afschatting van deze transporten ten behoeve van de overall slibbalans van de Westerschelde.

Het rapport geeft een overzicht van de beschikbare data en berekent de slibtransporten op twee manieren, namelijk via uitwisselingsvolume maal zwevend slibgehalte, en via de slibbalans van de havendokken zelf. Beide manieren komen tot vergelijkbare slibtransporten. Tevens worden aanbevelingen gedaan om de afschattingen te kunnen verbeteren.

REFERENTIES :

Offerte-aanvraag RIKZ/wsl.2.9.b/wll.wp5, d.d. 10 april 1997

Offerte WL MCM3358/Z2320.95/HW, d.d. 21 april 1997

Opdrachtbonnummer 6791132, d.d. 22 april 1997

REV.	AUTEUR		DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW		GOEDKEURING	
0.0	J.C. Winterwerp	<i>hw</i>	27 mei 1997		A.W. van der Weck	<i>hw</i>		
1.0	J.C. Winterwerp	<i>hw</i>	13 juni 1997				T. Schilperoort	<i>hw</i>

TREFWOORD(EN)	INHOUD	STATUS	
slibtransport, uitwisseling via schutsluizen, Westerschelde	TEKST :18 TABELLEN :- FIGUREN :1 APPENDICES :	<input type="checkbox"/>	VOORLOPIG
		<input type="checkbox"/>	CONCEPT
		<input checked="" type="checkbox"/>	DEFINITIEF

Samenvatting, conclusies en belangrijkste aanbevelingen

Dit rapport geeft een overzicht van de mechanismen verantwoordelijk voor de slibtransporten door de Zandvliet- en Berendrechtsluis in de haven van Antwerpen met als doel te komen tot een betere afschatting van deze transporten ten behoeve van de overall slibbalans van de Westerschelde.

Het rapport geeft een overzicht van de beschikbare data en berekent de slibtransporten op twee manieren, namelijk via uitwisselingsvolume maal zwevend slibgehalte, en via de slibbalans van de havendokken zelf. Beide manieren komen tot vergelijkbare slibtransporten, i.e. ter grootte van 300 tot 500 10^6 kg/jaar. Tevens worden aanbevelingen gedaan om deze afschattingen te kunnen verbeteren. De drie belangrijkste aanbevelingen luiden:

1. Meet op, bij voorkeur, drie hoogten (nabij de bodem, nabij wateroppervlak en halverwege) de slib- en zoutgehaltes in één der sluispanden en vlak bij de sluisdeuren in de voorhaven en in de zwaairom in het havendok. Deze metingen dienen ten minste gedurende een doortij-springtij cyclus volgehouden te worden tijdens verschillende rivierafvoeren, bijvoorbeeld bij hoge, gemiddelde en lage afvoer. Aan de hand van de saliniteitsverschillen kunnen schattingen gemaakt worden van de uitwisselingen, zodat geen moeilijke snelheidsmetingen uitgevoerd behoeven te worden. Deze metingen moeten een beter inzicht geven in de relevante slibgehaltes.
2. Afschattingen van de accumulatie van slib uit gegeven slibtransporten kunnen slechts gemaakt worden indien gegevens over de valsnelheid van het slib beschikbaar zijn. Deze dienen daarom gemeten te worden.
3. Aanbevolen wordt de door de Antwerpse Havendienst verzamelde data over de slibbalansen en wateruitwisselingsvolumina routinematig te vergaren en te analyseren om een gevoel te krijgen voor de variabiliteit van de slibtransporten. Een goede analyse vraagt echter om gegevens over de sedimenteigenschappen in de havendokken, met name de bulkdichtheid van het sediment op de bodem en de sedimentsamenstelling. Dit impliceert een tamelijk intensief bemonsteringsprogramma.

Samenvatting, conclusies en belangrijkste aanbevelingen**Inhoudsopgave**

1.	Inleiding	2
2.	Beschrijving sluizencomplex	3
3.	Omgevingscondities en water- en sedimenthuishouding	4
3.1	Relatie diverse referentieniveaus	4
3.2	Verticaal getij	4
3.3	Horizontaal getij	5
3.4	Rivierafvoer	5
3.5	Zoutgehalten	6
3.6	Waterhuishouding van de havendokken	7
3.7	Slibdynamica en zwevend slibgehalten	8
3.8	Gebaggerde hoeveelheden	9
4.	Afschatting slibtransport door zeesluizen	11
4.1	Rest- en dichtheidsstroming in het havendok	11
4.2	Sedimenttransporten en slibverlies	13
5.	Aanbevelingen voor verder onderzoek	15
	Referenties	17

1. Inleiding

RIKZ beoordeelt jaarlijks in opdracht van Rijkswaterstaat, directie Zeeland de slibbalans van de Beneden Zeeschelde. Eén van de belangrijkste posten op deze balans is het zijdelings verlies naar het Havengebied van Antwerpen. Dit verlies wordt veroorzaakt door slibtransport via de zeesluizen tussen de Beneden Zeeschelde en het Havengebied van Antwerpen. RIKZ en Directie Zeeland willen in samenwerking met de Vlaamse overheidsinstantie de Maritieme Schelde komen tot een betere afschatting van deze post.

Per brief RIKZ/wsl.2.9.b/wll.wp5, d.d. 10 april 1997 werd het Waterloopkundig Laboratorium gevraagd een schatting te maken, in de vorm van een beperkte bureaustudie, van de fysische processen die een rol spelen bij het slibtransport door de sluizen. Deze schatting dient zich te richten op de twee grootste en belangrijkste zeesluizen, namelijk de Zandvliet- en Berendrecht-sluis (ZVS en BDS). Tevens dienen aanbevelingen voor verder onderzoek vermeld te worden.

Per opdrachtbonnummer 67971132, d.d. 22-4-1997 werd WL opdracht gegeven deze studie uit te voeren.

De voorliggende rapportage geeft een overzicht van de sluisafmetingen en het schutbedrijf in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van alle andere relevante gegevens, waaronder historische baggercijfers. In hoofdstuk 4 wordt een daadwerkelijke afschatting van de slibtransporten gegeven, en de aanbevelingen zijn te vinden in hoofdstuk 5.

2. Beschrijving sluizencomplex

De Zandvlietsluis en de Berendrechtsluis liggen naast elkaar aan de rechteroever van de Beneden Zeeschelde, enigszins stroomopwaarts van de zogenaamde Drempel van Zandvliet (ref. 17). Het meest nabijgelegen vaste meetstation is Prosperpolder - zie Figuur 1 voor een overzicht.

Beide sluizen hebben aan beide zijden, i.e. aan de Schelde en aan de havendokken twee sluisdeuren (ref 18). De laatste afstand tussen het hart van twee naastgelegen deuren bedraagt 27 m en tussen het hart van de twee buitenste deuren voor beide sluizen 500 m. Deze afstand wordt hiernavolgens beschouwd als de lengte van de sluizen.

De Zandvlietsluis is 57 m en de Berendrechtsluis 68 m breed (ref 15, 16 & 18).

De drempel van de Berendrechtsluis ligt op 13.5 m NKD, dit is 13.42 m TAW (ref 17) en van de Zandvlietsluis op 13.0 m NKD. Opgemerkt dient te worden dat, voor wat betreft de drempelling van de Zandvlietsluis ref. (15) en (17) verschillende waarden geven. Verondersteld is dat ref. (17) de correcte waarden geeft. De volgende tabel vat de sluisafmetingen samen.

	lengte [m]	breedte [m]	niveau deurdrempel		gemiddelde waterdiepte [m]	gem. volume [10 ³ m ³]
			[m NKD]	[m TAW]		
Zandvlietsluis	500	57	- 13.0	- 13.92	15.4	440
Berendrechtsluis	500	68	- 13.5	- 13.42	15.9	540

Tabel 1: Afmetingen sluizen; de gemiddelde waterdiepte is gerelateerd aan het gemiddeld peil op de Schelde van +2.5 m TAW.

Beide sluizen bezitten omloopriolen met uitmondungen langs de onderzijde van de sluisvloer voor nivellering van het niveauverschil tussen sluisvand en omringend water (ref. 11, 15, 16). Bovendien bezitten beide sluizen een tweevoudig hevelcomplex dat gebruikt wordt om het niveau in de havendokken op peil te houden - zie hoofdstuk 3.5. De mondingen van de hevels van de Berendrechtsluis zitten hoog in de waterkolom, die van de Zandvlietsluis liggen ter hoogte van de bodem (ref. 6).

Het streefpeil in de havendokken bedraagt +4.18 m TAW (ref. 20), met tolerantie tussen +4.15 en +4.27 m TAW. Extreme waarden in 1995 bedroegen +3.99 en +4.37 m TAW, bij een gemiddeld peil t.g.v. +4.15 m TAW.

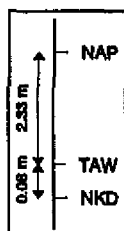
Het aantal schuttingen ("versassing") in 1995 bedroeg voor de Berendrechtsluis 2157 en voor de Zandvlietsluis 2293 (ref. 20). Tijdens een schutcyclus staat één der deuren van de sluizen tientallen minuten open om de schepen naar binnen te kunnen laten varen. De grotere schepen doen dit overigens met sleepbootassistentie.

3. Omgevingscondities en water- en sedimenthuishouding

3.1 Relatie diverse referentieniveaus

De diverse data en gegevens zijn uitgedrukt ten opzichte van de Belgische referentie-niveaus NKD (Nul Krijgsdepot) en TAW (Tweede Algemene Waterpassing) en het Nederlandse NAP (Normaal Amsterdams Peil). De relatie tussen deze niveaus is als volgt (ref. 3):

$$TAW = NKD + 0.08 = NAP - 2.33 \quad (1)$$



Voor de duidelijkheid is deze relatie nogmaals in bijgaande schets weergegeven.

Het in Figuur 1 gegeven peil GLLWS komt ongeveer overeen met NKD.

3.2 Verticaal getij

De astronomische getijcomponenten in Antwerpen, meetstation Prosperpolder, zijn verkregen uit ref. (1) en samengevat in Tabel 2. Voor de dubbeldaagse M_2 -component worden seizoensafhankelijke waarden gegeven; Tabel 2 bevat de maximale en minimale waarden.

getijcomponent	M_2 - min	M_2 - max	S_2	K_1	O_1
grootte [m]	2.09	2.28	0.58	0.07	0.11

Tabel 2: Astronomische getijcomponenten Prosperpolder.

Uit deze tabel blijkt dat het getij in Antwerpen dubbeldaags is, met een verwaarloosbare enkeldaagse bijdrage.

Referentie (3) geeft een samenvatting van de getijwaarnemingen in de periode 1971 tot 1980. Hier wordt ook het voor de analyses gebruikte gemiddeld getij gedefinieerd. De relevante waarden zijn in Tabel 3 samengevat.

	L.W. [m TAW]	H.W. [m TAW]	gem. waterstand [m TAW]
gemiddeld springtij	- 0.15	5.32	2.59
gemiddeld getij	0.07	4.92	2.50
gemiddeld doottij	0.34	4.39	2.37

Tabel 3: Gemiddelde getijcondities Prosperpolder.

3.3 Horizontaal getij

Er zijn weinig waarden beschikbaar van de getij-geïnduceerde snelheden. Referenties (7) en (8) geven stroommetingen op een aantal punten in de breedte een kleine km benedenstrooms van de Zandvliet- en Berendrechtsluis. Deze waarden zijn samengevat in Tabel 4. De Stroomatlas (ref 5) geeft wat hogere waarden; ook deze zijn in Tabel 4 gegeven.

		ref. (7) & (8)		ref. (5)	
		$U_{\max, eb}$	$U_{\max, vloed}$	$U_{\max, eb}$	$U_{\max, vloed}$
springtij	meetpunt noord	1.0	0.5	1.4	0.9
	meetpunt zuid	0.6	1.1	1.2	1.5
gem.tij	meetpunt noord			1.2	0.8
	meetpunt zuid			1.0	1.3
doodtij	meetpunt noord	1.1	0.4		
	meetpunt zuid	0.5	0.6		

Tabel 4: Typische stroomsnelheden [m/s] in de Zeeschelde nabij de sluizen.

Het noordelijke meetpunt ligt in een ebschaar en het zuidelijke in een vloedschaar.
De gemiddelde eb- en vloedvolumina voor een viertal jaren is gegeven in Tabel 5 (ref. 14).

jaar	ebvolume [10^6 m^3]	vloedvolume [10^6 m^3]	tijvolume [10^6 m^3]	$Q_{eb, \max}$ [$10^3 \text{ m}^3/\text{s}$]	$Q_{vl, \max}$ [$10^3 \text{ m}^3/\text{s}$]	dwarsprofiel [m^2]
1971	142.5	134.5	277.0	9.0	13.1	12,600
1975	159.9	153.8	313.7	9.9	14.4	12,690
1982	169.5	152.0	321.5	10.2	14.8	13,425
1991	157.6	147.9	305.5	10.5	14.1	13,044
gem.	157.4	147.1	304.4	9.9	14.1	12,940

Tabel 5: Getijkarakteristieken nabij Nederlands-Belgische grens.

Stroomkentering vindt ca 1 uur na Hoog-, respectievelijk Laagwater plaats (ref. 7).

3.4 Rivierafvoer

De jaargemiddelde rivierafvoer van de Schelde nabij de Nederlands-Belgische grens is gegeven in referentie (21) en samengevat in Tabel 6.

jaargemiddelde afvoer [m ³ /s]	minimale afvoer [m ³ /s]	maximale afvoer [m ³ /s]
120	20	600

Tabel 6: Jaargemiddelde rivierafvoer Beneden Zeeschelde.

Aangezien de Schelde een regenrivier is varieert de afvoer sterk over het jaar, met twee maxima, namelijk in de wintermaanden (december t/m maart) en de zomermaanden (juni t/m augustus). Duidelijke minima treden op rondom de maanden april en oktober/november (ref. 13).

In de voorhaven van de sluizen wordt de stroming bepaald door komvullingseffecten, horizontale circulaties en dichtheidsstromingen (gravitatie-circulatie - zie hoofdstuk 3.5). Volgens referentie (8) is de uitwisseling door gravitatie-circulatie een orde groter dan de uitwisseling door komvullingseffecten, en is zo groot dat het water in de voorhaven per getijcyclus meer dan drie keer wordt ververs. Typische dichtheidsgeïnduceerde stroomsnelheden bedragen gemiddeld over de dwarsdoorsnede 10 cm/s, doch zijn lokaal veel groter (0.2 - 0.3 m/s).

3.5 Zoutgehalten

Bij gemiddelde rivierafvoeren bevindt de overgang zout-zoetwater zich in de buurt van het Antwerpse havengebied. Bij lage rivierafvoer kan het zeewater tot Rupelmonde reiken (ref. 21). De verticale saliniteitsgradiënten op de rivier zijn klein; rondom Hoogwater maximaal 3 à 4 g/l. Karakteristieke horizontale saliniteitsgradiënten bedragen tegen het einde van de herfst $dS/dx \approx 0.5$ g/l/km en aan het einde van de lente $dS/dx \approx 0.3$ g/l/km (ref. 7 en 8).

Een goede maat voor de gelaagdheidskarakterisering van de rivier wordt gegeven door het vloedgetal α , gedefinieerd als $\alpha = Q_{riv} T/P_1$, waarin Q_{riv} = rivierafvoer, T = getijperiode en P_1 = vloedvolume. Voor $\alpha < 0.1$ wordt een getijderivier als goed gemengd beschouwd; voor $\alpha > 1$ als sterk gelaagd. Tabel 7 geeft een overzicht van het vloedgetal voor verschillende getijcondities en rivierafvoeren; P_1 is afkomstig uit ref. (13) en opgeschaald met de getij-amplitude.

	lage rivierafvoer	gemiddelde afvoer	hoge rivierafvoer
doodtij	0.008		0.25
gemiddeld tij		0.04	
springtij	0.005		0.14

Tabel 7: Vloedgetal voor Beneden Zeeschelde.

Uit deze tabel blijkt dat alleen bij hoge rivierafvoeren ($Q_{riv} = 600$ m³/s) het estuarium als gedeeltelijk gemengd kan worden geclassificeerd. Bij gemiddelde rivierafvoer en lager is het estuarium goed gemengd. Dit betekent niet dat gedurende bepaalde fases van het getij (bijv. rondom stroomkentering) geen verticale gelaagdheid kan optreden. Deze gelaagdheid is alleen niet stabiel.

In de voorhaven, cq toegangsgeulen naar de sluizen treffen we overigens een geheel andere situatie aan. Hier is de stroming gedurende een belangrijk deel van de getijperiode behoorlijk gelaagd (ref. 8), doch nu ten gevolge van de horizontale zoutgradiënten. Deze horizontale gradiënten generen in de voorhaven een significante gravitatie-circulatie die in belangrijke mate bijdraagt aan de uitwisseling met de rivier - zie ook hoofdstuk 3.4. Slechts bij zeer lage rivierafvoeren is de voorhaven vrijwel homogeen zout.

3.6 Waterhuishouding van de havendokken

Referentie (20) bevat een samenvatting van de waterhuishouding van de havendokken voor het jaar 1995. De dokken ontvangen water uit het achterland, met name via het Albertkanaal en de Kreekraksluizen en in mindere mate via het Pompstation Verlegde Schijns en het Zuiveringsstation Schijnpoort. De industrie langs de dokken verbruikte ca $110 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Tijdens het schutten vindt gemiddeld een netto watertransport van de dokken naar de Schelde plaats, omdat het gemiddelde dokpeil aanzienlijk hoger is dan het gemiddeld Schelde-peil. Het niveau in de dokken wordt ten slotte op streefpeil gehouden via de aan- en afvoerkanalen langs de diverse sluizen. Een overzicht van de relevante waterhuishoudingsbijdragen is gegeven in Tabel 8. Een "-" teken" betekent watertransport van de dokken naar de Schelde, terwijl een "+" teken" watertransport van de Schelde naar de dokken weergeeft. In dit rapport wordt verondersteld dat deze 1995-gegevens representatief zijn voor andere jaren.

	totaal [10^6 m^3]	Berendrecht [10^6 m^3]	Zandvliet [10^6 m^3]	totaal BDS & ZVS
waterverlies door schutbedrijf	-337.88	-106.06	-95.89	-201.95
handhaven streefpeil dokken: inname van Schelde naar dokken	+38.88	+29.11	+9.59	+38.7
handhaven streefpeil dokken: lozen van dokken op Schelde	-230.85	-178.29	-48.26	-226.55
totaal waterverlies bij sluizen	-529.85	-255.24	-134.56	-389.80
watertoevoer via Albertkanaal	+389.72	n.r.		
watertoevoer via Kreekraksluizen	+173.82			
totale toevoer via achterland	657.31			
industrieel verbruik	-107.74			
resttermen / sluitfout waterbalans	-19.72			

Tabel 8: Samenvatting waterhuishouding havendokken in 1995.

3.7 Slibdynamica en zwevend slibgehalten

De Schelde ontvangt marien slib dat stroomopwaarts wordt getransporteerd en fluviatiel slib dat stroomafwaarts wordt getransporteerd. In de buurt van de Zandvliet- en Berendrechtluizen bestaat het slib in de Scheldebodem voor ca 30 % uit marien slib en dus ca 70 % fluviatiel slib (ref. 11 en 21). Deze verhouding is overigens afgeleid uit isotopenonderzoek van het organisch materiaal, aannemende dat de hoeveelheid organisch materiaal van marien en fluviatiel slib gelijk is¹.

De Beneden Zeeschelde kent een troebelingsmaximum (ref. 11). Haar lokatie zal afhangen van de zoutindringing, doch bevindt zich dikwijls in de buurt van de twee sluizen. Jaargemiddeld bedraagt de getij- en diepte-gemiddelde slibconcentratie ca 150 mg/l tijdens de wintermaanden en ca 80 mg/l tijdens de zomermaanden. Momentaan werden ter hoogte van de Plaat van Doel nabij de bodem zwevend slibconcentraties gemeten van ca 0.5 tot 1 g/l.

Er zijn geen metingen beschikbaar van de slibgehalten in de voorhaven van de sluizen. Naar verwachting is deze echter relatief hoog: in de voorhaven wordt het slib tijdens eb **continu** geagiteerd met een zogenaamde sweepbeam. De bedoeling is accumulatie van slib in de voorhaven te voorkomen, zodat geen klassiek baggerwerk hoeft te worden uitgevoerd. Deze werkwijze blijkt voor de voorhaven erg effectief.

In juni 1990 zijn debietmetingen in de spuirollen van de beide sluizen verricht (ref. 6). Tijdens deze metingen zijn gedurende een periode waterinname vanuit de Schelde van 1.5 uur (Berendrechtsluis), respectievelijk 2 uur (Zandvlietluis) ook zwevend sedimentgehalten in de rollen gemeten. Deze gehalten bedroegen voor de Berendrechtsluis 100 - 300 mg/l, met een gemiddelde van ca 200 mg/l, en voor de Zandvlietluis 100 - 700 mg/l, met een gemiddelde van ca 350 mg/l. Dit grote verschil wordt veroorzaakt door de hoogte waarop de inlaten van de rollen zich bevinden (zie hoofdstuk 2). Dit verklaart ook waarom tijdens spuien het zwevend slibgehalte in de rollen van de Berendrechtsluis verwaarloosbaar is, terwijl die in het riool van de Zandvlietluis varieert tussen ca 50 en 200 mg/l. Blijkbaar wordt tijdens spuien via de Zandvlietluis enig sediment terug de voorhaven ingepompt.

Deze gehalten zijn aanzienlijk hoger dan de zomergemiddelde gehalten op de Schelde. Dit kan veroorzaakt worden door het agitatie-baggeren in de voorhaven, waardoor veel sediment in suspensie gebracht (gehouden) wordt.

Incidentele metingen met een dubbelfrequentie echolood (ref. 4) suggereren het bestaan van fluid-mudlagen met diktes tot 2 à 3 m in de voorhaven van de Kallosluis. Naar verwachting zullen dergelijke lagen ook in de voorhaven van de Berendrechtsluis en Zandvlietluis (kunnen) optreden. Deze worden waarschijnlijk gegenereerd door enerzijds het agitatie-baggeren en anderzijds door natuurlijke depositie-processen (ref. 23). Er zijn echter geen gegevens over dergelijke voorkomens beschikbaar. Opgemerkt kan verder worden de bodem van de voorhaven min of meer horizontaal loopt op ca -13.5 m TAW, zodat geen geprononceerde gravitatie-gedreven fluid-mudstromingen verwacht worden.

Uit de relatief grote verschillen in gemeten sedimentgehalten in de rollen van de Berendrecht- en

¹ Over het algemeen is het organisch gehalte van fluviatiel slib groter dan dat van marien slib, zodat de werkelijke verhouding fluviatiel - marien slib waarschijnlijk kleiner is dan de gegeven waarden.

Zandvlietsluis kan ook geconcludeerd worden dat de verticale verdeling van slib nogal grote gradiënten vertoont. Dit kan uiteraard verwacht worden in sedimentatie-gebieden, zoals de voorhavens van de sluizen, waar geen evenwichtsprofielen (Rouse-profielen) zullen bestaan.

3.8 Gebaggerde hoeveelheden

Gegevens over de hoeveelheden slib die in de sluizen zijn gebaggerd zijn per fax door de heer De Backer van het Havenbedrijf toegezonden. Dit slib is met een grijper uit de sluispanden verwijderd. De gebaggerde hoeveelheden zijn in Tabel 9 gegeven.

	Zandvlietsluis		Berendrechtsluis	
	[10 ³ m ³]	[10 ⁶ kg droge stof]	[10 ³ m ³]	[10 ⁶ kg droge stof]
1987	-	-	-	-
1988	412.35	132.5	-	-
1989	-	-	34.24	11.0
1990	-	-	20.80	6.7
1991	13.00	4.2	15.60	5.0
1992	-	-	-	-
1993	1.50	0.5	-	-
1994	-	-	-	-
1995	101.10	32.5	-	-
1996	-	-	-	-

Tabel 9: Gebaggerde volumina in sluispanden.

De baggerwerkzaamheden worden geïnitieerd vanuit nautische overwegingen (hinder voor de scheepvaart) en vanuit onderhoudsbehoeftes. Het grote volume dat in 1988 uit de Zandvlietsluis is verwijderd, is waarschijnlijk ingegeven door mechanische onderhoudswerkzaamheden aan de sluis. Dit volume wordt in de verdere analyse daarom ook verwaarloosd. Verder wordt verondersteld, bij gebrek aan gedetailleerde gegevens, dat de dichtheid van het gesedimenteerde slib ca 1200 kg/m³ (ref 22) bedraagt. Op basis hiervan zijn de volumina gegeven in Tabel 9 omgerekend naar massa's droge stof.

De hoeveelheid droge stof die in de periode 1989 t/m 1996 gemiddeld per jaar uit de sluispanden werd verwijderd bedraagt dan: Zandvlietsluis: $4.7 \cdot 10^6$ kg/jaar en Berendrechtsluis: $8.8 \cdot 10^6$ kg/jaar. Uit de Berendrechtsluis is een meer dan evenredig met de sluisbreedte grotere hoeveelheid sediment verwijderd. Dit wordt veroorzaakt door het grote baggerwerk in 1988 in de Zandvlietsluis, waardoor een buffercapaciteit is ontstaan. Als we aannemen dat het uit de Berendrechtsluis verwijderde slib een maat voor de natuurlijke aanslibbing is, zou de gemiddelde aanslibbing in de Zandvlietsluis dus $57/68 \times 8.8 \cdot 10^6 = 7.4 \cdot 10^6$ kg/jaar bedragen.

Uit hoofdstuk 4 zal blijken dat het via het schutbedrijf de dokken instromende slib 1.7 à 3.9 km de dokken in kan worden getransporteerd; dit is tot ongeveer het Solvaydok, cq 700 m ten noorden van de Lillobrug. Op basis hiervan worden de gegevens uit referentie (22) in rekening gebracht en geanalyseerd. Verondersteld wordt dat de slibbalans van het havendok t/m de sectie Kanaaldok B2, 600-608 gerelateerd is aan de slobuitwisseling via de Zandvliet- en Berendrecht-luis. De gegevens zijn in Tabel 10 samengevat.

Sectie	verschil peilingen	gebaggerd	gestort	verdiept	totaal	totaal [10 ⁶ ton]
Dok BASF	86.603				86.603	
Kanaaldok B3	176.397	696.336			872.733	
Zwaaikom sluizen	657.307	2.770.000	- 689.200	812.287	3.250.394	
Wapper		2.727.775	- 2.724.770		2.980	
Dok BRC	4.829	89.050			93.879	
B2, 774-ZK	- 185.614	47.856			- 137.758	
Dok Solvay	8.756				8.756	
t/m Solvaydok					4.177.587	1.34
B2, 624-772	232.345				232.345	
Delwaidedok	85.700	153.250			238.950	
Dok Gamatex	- 118.279	483.530			365.251	
B2, 610-622	74.692		- 545.150		- 470.458	
t/m B2, 622					4.543.675	1.46
rest dokken					1.888.736	0.61
totaal dokken					6.432.411	2.07

Tabel 10: Gebaggerde hoeveelheden in havendok in [10³ m³] in de periode 1989 - 1993.

Uit de vijfjaarsgegevens in Tabel 10 blijkt dat de aanslibbing in het door de Zandvliet- en Berendrechtsluis beïnvloede gebied dus gemiddeld ca 270 à 290 10⁶ kg/jaar bedraagt. Tezamen met de uit de sluispannen zelf verwijderde specie wordt op basis van de thans beschikbare gegevens het slibverlies door deze sluizen geschat op ca 280 à 310 10⁶ kg/jaar.

In de rest van het havendok, i.e. voorbij het vak B2, 610-622 bedraagt de volumetoename ca 120 10⁶ kg/jaar. Dit is ca 29 % van de totale aanslibbing in de havendokken.

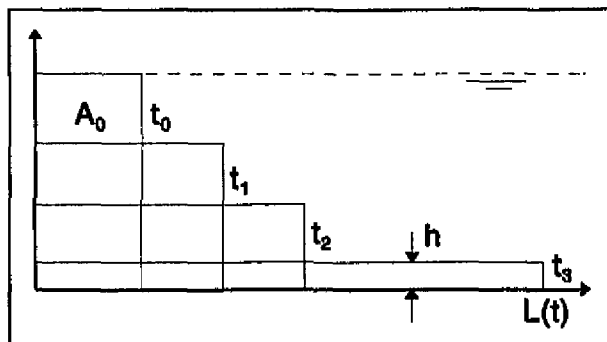
4. Afschatting slibtransport door zeesluizen

4.1 Rest- en dichtheidsstroming in het havendok

Tabel 8 geeft een samenvatting van de waterhuishouding van de havendokken. Voor de huidige analyse is de huishouding in het noordelijk deel, d.w.z. in de buurt van de Zandvliet- en Berendrechtsluis van belang. We beschouwen alleen de belangrijkste bijdragen. De totale waterafvoer via deze sluisen bedroeg in 1995 $389.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Vanuit de Kreekraksluizen werd $173.82 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ toegevoerd. Dit betekent dat er in het havendok over het jaar gemiddeld een aanzienlijke reststroom naar het noorden staat, met een volume t.g.v. $216 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, overeenkomend met een gemiddeld debiet t.g.v. ca $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$, i.e. een gemiddelde snelheid t.g.v. ca 1 mm/s . Er kan gespuid worden als het water in het dok hoger staat dan op de Schelde. Voor gemiddeld getij is dit het grootste deel van de tijd, i.e. ongeveer 10 uur per getijperiode van 12.5 uur (ref. 3). Dit betekent dat de gevonden 1 mm/s een redelijke waarde is voor de gehele getijperiode. Het is echter niet bekend hoe groot de momentane variaties in deze snelheid kunnen zijn. Echter, zelfs als zij een orde groter zouden zijn (i.e. ca 1 cm/s), zullen zij niet significant bijdragen aan de slibtransporten.

Door de constante toevoer van zoet water uit het achterland zal het havendok *gemiddeld* zoeter zijn dan het Schelde-water. Mogelijk dat echter tijdens extreme rivierafvoer het omgekeerde waar is. Er zijn echter geen gegevens beschikbaar over het zoutgehalte in de dokken. Van belang is echter dat het zoutgehalte in de dokken en de Schelde niet constant is. Dit betekent dat bij het openen van de sluisdeuren het water in het sluispand met het omringende water via dichtheidsstromen uitwisselt. Aangezien de deuren tientallen minuten openstaan, zal deze uitwisseling volledig zijn en behoeven dynamische aspecten niet beschouwd te worden (zie ook afschatting einde hoofdstuk). Een consequentie van dit uitwisselingsmechanisme is dat het water in de dokken waarschijnlijk behoorlijk gestratificeerd zal zijn met sterk over de diepte en met de tijd variërende dichtheidsgradiënten.

Het voor de slibuitwisseling relevante sluisvolume heeft betrekking op het gemiddeld peil in de dokken (streefpeil). Dit is het volume dat in Tabel 1 gegeven is. Na het openen van de deuren zal het in het sluispand aanwezige water over de bodem, onder het dokwater, het dok instromen. De bovengenoemde reststroming t.g.v. ca 1 mm/s is zo klein, dat dit voor de dichtheidsstroming geen *belemmering zal vormen tot aan de einden van de havendokken te stromen*. Uiteindelijk zal het ingestroomde water als een dunne pannekoek op de bodem van de dokken liggen, of lokaal in één of meerdere diepere delen verzamelen. Deze dichtheidsstroming transporteert het in het sluispand gesuspendeerde sediment verder de dokken in. Tijdens dit transport zakt het slib uit door haar valsnelheid, en de vraag die dan ook beantwoord dient te worden is hoever dit slib getransporteerd kan worden.



Hiertoe beschouwen we het uitwisselingsproces bij het openen van de sluisdeur, beschreven in ref. (9), als het uitzakken van een "blok zwaar water" in een omgeving van "lichter water", zoals in bijgaande figuur geschetst. Het front van de geïnduceerde dichtheidsstroming plant zich voort volgens de volgende relatie:

$$Fr_f \equiv \frac{u}{\sqrt{g'h}} = \sqrt{2} \tag{2}$$

waarin Fr_f het Froude-getal van het dichtheidsfront is, u de snelheid van het dichtheidsfront, g' de gereduceerde zwaartekracht ($g' = g\Delta\rho/\rho$), en h de dikte van de dichtheidsstroming. Volgens ref (9) komt (2) goed overeen met diverse experimenten en veldwaarnemingen. Verder wordt verondersteld dat entrainmentprocessen niet van belang zijn, zodat het oorspronkelijke volume (in het verticale vlak) A_0 aan zwaar water behouden blijft. Dan worden de volgende twee vergelijkingen verkregen:

$$h \times L = A_0 = \text{constant} , \quad u = \frac{dL}{dt} = Fr_f \sqrt{g'h} \tag{3}$$

waarin L de lengte waarover het front zich verplaatst heeft in de tijd t . Deze vergelijkingen kunnen geïntegreerd worden, zodat wordt verkregen:

$$L = (1.5 Fr_f)^{2/3} (g'A_0)^{1/3} t^{2/3} \tag{4}$$

De voor ons probleem relevante tijd is de valtijd van het sediment: $\tau = h/W_s$, waarin W_s is de valsnelheid van het sediment². Invullen in (4) levert:

$$L = (1.5 Fr_f)^{2/3} (g')^{1/3} A_0^{3/5} W_s^{-2/5} \tag{5}$$

Voor een zout-zoetdichtheidsverschil van 3 g/l en een "verticaal volume" van $\frac{1}{2} \times 500 \times 15.9$ m vinden we voor $W_s = 0.1$ mm/s: $L \approx 1.7$ km en voor $W_s = 1$ mm/s: $L \approx 3.9$ km. De factor $\frac{1}{2}$ is opgenomen omdat het zware water zich in twee richtingen kan verspreiden. Opgemerkt dient te worden dat dit een overschatting van de afgelegde weg geeft die de slibdeeltjes in de dokken kunnen afleggen, aangezien de dichtheidsstroming zich ook nog zijwaarts kan verspreiden (3D-effecten).

Met behulp van (4) kan ook een afschatting van de uitwisselingstijd van de sluispanen verkregen worden. Stel daartoe dat deze uitwisseling compleet is als het front zich heeft verplaatst over de

² We veronderstellen dat het sediment zelf niet bijdraagt aan de dichtheidsstroming, doch passief wordt getransporteerd.

bovenberekende afstand t.g.v. 1.7 km. Volgens (4) gebeurt dit in ca 45 minuten, gebruik makend van bovengenoemde parameters. Aangezien ook deze 45 min. een bovengrens is, betekent dit dat tijdens het openstaan van de deuren de sluispannen inderdaad geheel uitwisselen met het omgevingswater.

4.2 Sedimenttransporten en slibverlies

Een goede afschatting van de slibtransporten door de sluizen en de spuirollen vereist gedetailleerde data omtrent de zwevend slibgehalten. Deze zijn echter niet voorhanden, en de hierna volgende afschatting is daarom tamelijk grof.

De volgende mechanismen kunnen worden onderscheiden:

1. Schelde en Voorhaven wisselen zwevend slib uit door zout-zoetgedreven dichtheidsstromingen, door komberging ten gevolge van verticaal getij en door turbulente uitwisseling ten gevolge van horizontale neren in de monding (zie hoofdstuk 3.4). Het is momenteel niet mogelijk een afschatting te maken van deze uitwisseling, omdat het slib in de voorhaven tijdens eb continu geagiteerd wordt, waardoor een onbekende hoeveelheid met het getij, en mogelijk als dichtheidsstroming kan wegstromen. Aangezien stroomkentering (dus afname in zoutgehalte) ongeveer een uur na Hoogwater optreedt (hoofdstuk 3.2) kan gedurende dat uur het geagiteerde slib door zout-zoet geïnduceerde dichtheidsverschillen naar de sluizen toestromen. Of dit werkelijk gebeurt hangt af van het door het agitatie-baggeren veroorzaakte dichtheidsverschil. Voor het transport door de sluizen zelf is het zwevend slibgehalte in de voorhaven (voor de sluizen) van belang.
2. Bij de inname van water uit de Schelde om het peil in het havendok te handhaven wordt sediment de dokken ingetransporteerd. Op deze wijze wordt via de Berendrechtsluis $29.11 \cdot 10^6 \times 0.2 \approx 6 \cdot 10^6$ kg/jaar en door de Zandvlietsluis $9.59 \cdot 10^6 \times 0.35 \approx 3 \cdot 10^6$ kg/jaar, dus totaal ca $9 \cdot 10^6$ kg/jaar de dokken ingetransporteerd.
3. Bij het lozen van water uit de dokken op de Schelde om het peil te handhaven wordt via de Zandvlietsluis sediment de dokken uitgetransporteerd. Volgens de beschikbare gegevens bedraagt de concentratie bij dit spuien gemiddeld 100 mg/l, zodat een export t.g.v. $48.26 \cdot 10^6 \times 0.1 \approx 5 \cdot 10^6$ kg/jaar wordt gevonden. Het is niet bekend hoe representatief deze gegevens zijn voor jaargemiddelde condities.
4. Tijdens het schutbedrijf wordt het gehele sluisvolume uitgewisseld met de havendokken. De hoeveelheid uit te wisselen slib is gerelateerd aan de waterhoogte op de Schelde, waarvoor in deze studie de gemiddelde waarde wordt genomen (e.g. Tabel 1). De relevante concentratie zal variëren tussen $c_{\text{slib}} \approx 80$ en 150 mg/l, representatief voor het slibgehalte op de Schelde in de zomer en in de winter, en $c_{\text{slib}} \approx 200$ en 350 mg/l, representatief voor het slibgehalte in de rollen. Uitgaande van het in 1995 gerealiseerde aantal schuttingen per dag vinden we dan voor de slibimport: $(2157 \times 540 + 2293 \times 440) \cdot 10^3 \times c_{\text{slib}} \approx 2.17 \cdot 10^9 \times c_{\text{slib}}$. Dit levert voor de diverse slibgehalten de volgende transporten op:

slibgehalte [mg/l]	slibtransport [10^6 kg/jaar]
80	175
150	325
200	435
350	760

Tabel 11: Geschat slibtransport door schutbedrijf.

5. Volgens een afschatting van de aanslibbing in de dokken op basis van peilingen zou de bijdrage van slibbronnen anders dan via schutverliezen door de Zandvliet- en Berendrechtssluis aan deze aanslibbing (i.e. slibverlies door de andere sluizen, lokale mors, toevoer via Albertkanaal enz.) ca 29 % bedragen. Het is momenteel niet mogelijk dit slibverlies direct te vergelijken met de uitwisselingsvolumina zelf, omdat de gegevens daartoe niet beschikbaar zijn.
6. Ten slotte kan er nog transport optreden via sediment geïnduceerde dichtheidsstromingen, i.e. in de vorm van mobiel fluid mud of een Hooggeconcentreerde Benthische Suspensie (ref. 22). Er zijn echter geen gegevens over dergelijke transporten, hoewel het bestaan van zachte sliblagen wel is waargenomen.

We zien dus dat de bijdrage door het schutbedrijf de transporten door de riolen veruit domineert. In feite zijn de transporten hoger dan de geschatte $300 \cdot 10^6$ kg/jaar welke uit de sedimentbalansen voor de havendokken volgt. Hieruit zou geconcludeerd kunnen worden dat mobiel fluid mud niet bijdraagt aan de slibtransporten van en naar de dokken.

5. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Uit bovenstaande analyses en afschattingen kan geconcludeerd worden dat de bijdrage van het regulier spuien en innemen (steken) van water om het streefpeil in de havendokken te handhaven verwaarloosbaar is ten opzichte van de slibtransporten ten gevolge van het schutbedrijf. De nauwkeurigheid van de schatting van deze laatste is echter gering, hoewel de orde van grootte goed overeenstemt met onafhankelijke bepalingen van de slibbalans van de havendokken. De bijdrage van mobiel fluid mud is onbekend, maar waarschijnlijk niet groot, omdat de schatting van de slibtransporten uit uitwisselingsvolumina en zwevend slibgehaltenes behoorlijk groter is dan de transporten die uit de slibbalans volgen. Er zijn ook geen aanwijzingen dat de Berendrechtsluis zich anders gedraagt dan de Zandvlietsluis.

Daarom worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Meet op, bij voorkeur, drie hoogten (nabij de bodem, nabij wateroppervlak en halverwege) de slib- en zoutgehaltenes in één der sluispannen en vlak bij de sluisdeuren in de voorhaven en in de zwaikom in het havendok. Deze metingen dienen ten minste gedurende een doortij-springtij cyclus volgehouden te worden tijdens verschillende rivierafvoeren, bijvoorbeeld bij hoge, gemiddelde en lage afvoer. Aan de hand van de saliniteitsverschillen kunnen schattingen gemaakt worden van de uitwisselingen, zodat geen moeilijke snelheidsmetingen uitgevoerd behoeven te worden. Deze metingen moeten een beter inzicht geven in de relevante slibgehaltenes.
2. Afschattingen van de accumulatie van slib uit gegeven slibtransporten kunnen slechts gemaakt worden indien gegevens over de valsnelheid van het slib beschikbaar zijn. Deze dienen daarom gemeten te worden.
3. Ter ondersteuning van de analyses van de onder 1. uitgevoerde metingen kan overwogen worden om met behulp van een ADCP de uitwisselingsvolumina, en de verdeling daarvan over de diepte ten gevolge van het schutbedrijf daadwerkelijk te meten. Voorgesteld wordt om dit gedurende een aantal schutcycli aan beide zijden van de sluisen te doen tijdens verschillende jaargetijden (rivierafvoer). Zo'n meting zou bijvoorbeeld tijdens speciaal hiervoor geënceneerde schuttingen kunnen plaatsvinden.
4. Vermoed wordt dat in de voorhaven fluid-mudlagen bestaan, gegenereerd door natuurlijke sedimentatieprocessen en/of de agitatie-baggerwerkzaamheden. Er zijn echter geen gegevens beschikbaar over het bestaan en/of de mobiliteit van dergelijke lagen. Omdat mobiele fluid-mudlagen aanzienlijk kunnen bijdragen aan de slibtransporten, wordt geadviseerd om met enige regelmaat peilingen in de voorhaven uit te voeren met een dubbel-frequentie echolood (210 en 33 kC), met in eerste instantie als doel het vaststellen van de aanwezigheid van dergelijke lagen. In tweede instantie kan dan hun mobiliteit bestudeerd worden. Dit heeft tevens als voordeel dat een gevoel verkregen wordt van de grootte een eventuele accumulatie van slib in de voorhaven, ondanks de agitatie-baggerwerkzaamheden.
5. Aanbevolen wordt de door de Antwerpse Havendienst verzamelde data over de slibbalansen en wateruitwisselingsvolumina routinematig te vergaren en te analyseren om een gevoel te krijgen voor de variabiliteit van de slibtransporten. Een goede analyse vraagt echter om gegevens over de sedimenteigenschaften in de havendokken, met name de

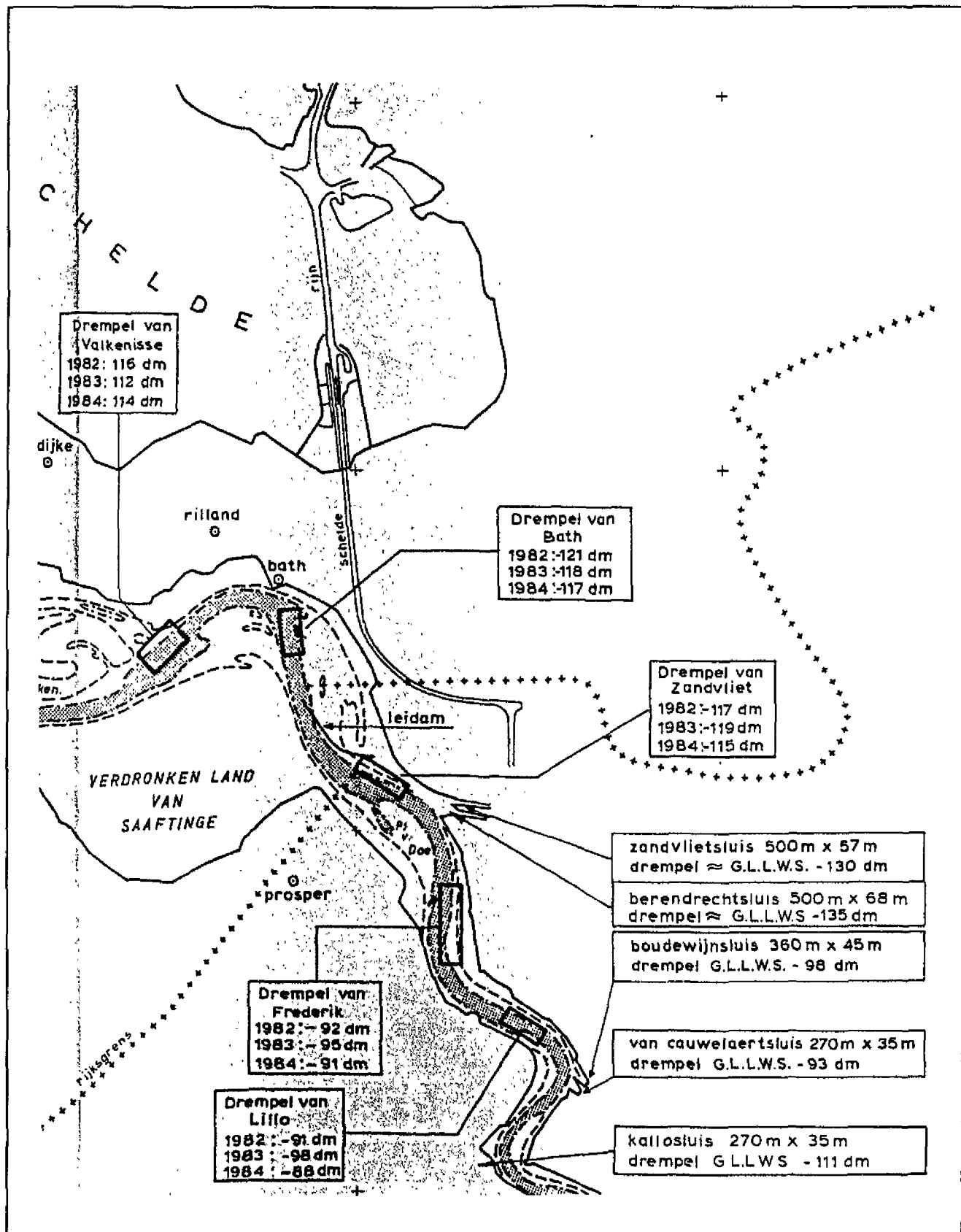
bulkdichtheid van het sediment op de bodem en de sedimentsamenstelling. Dit impliceert een tamelijk intensief bemonsteringsprogramma.

6. Ten slotte wordt aanbevolen om een vergelijkbaar aan de in dit rapport beschreven analyse uit te voeren voor de andere sluizen, aangezien deze naar schatting ca 30 % bijdragen aan de slibverliezen. Zo'n analyse is echter alleen zinnig indien voldoende gegevens beschikbaar zijn over de lokale zwevend slibgehaltenes, de exacte volumina van de schutpanden en het aantal schutcycli per jaar.

Referenties

1. Admiralty Tide Tables, Volume 1, 1994, European Waters, Published by the Hydrographic Society of the NAVY.
2. Backer, J. De, 1997, "Overzicht in sluispanen gebaggerde volumina slib", informatie per fax d.d. 14-05-1997.
3. Claessens, J. en Belmans, H., 1984, "Overzicht van de tijwaarneming in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1971 - 1980", Uittreksel uit het Tijdschrift der Openbare Werken van België, Nr. 3.
4. Claessens, J. en Marain, J.M., "Toegangsgeul Kallosluis - Onderzoek naar alternatieve baggermethoden", 16 p.
5. Dienst der Hydrografie, "Stroomatlas Westerschelde 1976".
6. Diensten van de Vlaamse Executieve Openbare Werken en Verkeer, 1990, "Debietmetingen spuriolen Zandvliet- en Berendrechtsluis", rapport AZ90/3.
7. Fettweis, M., Sas, M. en Meyvis, L., 1994, "Analyse van stroom- en sedimentmetingen ter hoogte van de drempel van Zandvliet (Schelde)", Water, nr. 76, pp 88 - 99.
8. Fettweis, M. en Sas, M., 1994, "De complexe stroming in de toegangsgeul van de Zandvliet- en Berendrechtsluis: inzicht via metingen en modellering", Water, nr. 77, pp 109 - 116.
9. Hallworth, M.A., Huppert, H.E., Phillips, J.C. and Sparks, R.S.J., 1996, "Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents", Journal of Fluid Mechanics, Vol 308, pp 289-311.
10. Maldegem, D.C. van, 1992, "De slibbalans van het Schelde-estuarium", Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Algemeen Onderzoek Fysica, NOTA GWAO-91.081, SAWES-NOTA 91.08.
11. Maldegem, D.C. van, 1995, "Meten van slibtransport via Zandvliet- en Berendrechtsluis", Rijkswaterstaat, RIKZ, project SAP, nota RIKZ/AB95853x.
12. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterinfrastructuur en Zeewezen, Antwerpse Zeehavendienst, Hydrografie, 1992, "Bathymetrische kaart van de Schelde: Saeftinge - Doel", kaart C3-800.
13. Mol, G., 1995, "Zout-zoet in het Schelde-estuarium", Rijkswaterstaat, RIKZ, project OOSTWEST, nota RIKZ/AB-95.867x.
14. N.N., "Getijkarakteristieken van de (totale) debiet-raaien in de Westerschelde (herleid naar gemiddeld getij).
15. N.N., "Informatie over sluisafmetingen".

16. OTAR, 1986, "De "Berendrechtsluis" in de haven van Antwerpen", jaargang 71, nr. 7, pp 255 - 263.
17. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Directie Kust en Zee - Adviesdienst Vlissingen, 1985, "Ligging van drempels, bagger- en stortplaatsen in het Schelde-estuarium", NOTA WWKZ-85.V001.
18. Stad Antwerpen - Havenbedrijf - Technische Dienst, Havenwerktuigen, 1997, "Zandvliet-sluis - Grondplan", tekening ST 262-2193^a.
19. Stad Antwerpen - Havenbedrijf - Technische Dienst, 1990, "Plattegrond van de haven". van Antwerpen
20. Stad Antwerpen - Havenbedrijf - Technische Dienst, Havenwerktuigen, 1995, "Samenvatting waterhuishouding 1995", notitie JDB\TR\Wh000010.
21. Verlaan, P.A.J., Maartense, V.J., Meijerink, S.V. en Donze, M., 1997, "Slibtransport in de Schelde over de Belgisch-Nederlandse grens", H₂O, Vol 30, nr 8, pp 255 - 260.
22. Verliefde, G., Nielandt, W. en Vanthienen, W., 1994, "Haven van Antwerpen - slibbals 1989 - 1993", notitie 24 maart 1994.
23. Winterwerp, J.C., 1996, "HCBS, Hooggeconcentreerde Benthische Suspensie", Waterloopkundig Laboratorium, Rapport Z1013.



<h3>Situatie-overzicht Antwerpse haven</h3>	mei '97		
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</td> <td style="text-align: center;">Proj: Z2320</td> <td style="text-align: center;">Fig. 1</td> </tr> </table>	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	Proj: Z2320
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	Proj: Z2320	Fig. 1	



• Delft

delft hydraulics

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
telex 38176 hydel-nl
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

