

**Studie inrichting Oostelijk deel
Westerschelde
Analyse van het fysische systeem**

Nota voor de Werkgroep OOSTWEST

E. Allersma



INHOUD

LIJST VAN TABELLEN

LIJST VAN FIGUREN

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Achtergronden.....	1
1.2 Opdracht.....	4
2. <u>Uitvoering</u>	6
2.1 Deelname aan de Werkgroep.....	6
2.2 Systeemanalyse.....	6
2.3 Rapportering.....	7
3. <u>Geografie en hydrografie</u>	9
4. <u>Waterbewegingen</u>	14
4.1 Rivierafvoeren.....	14
4.2 Waterstanden.....	14
4.3 Stromen.....	17
4.4 Zoutindringing en dichtheidsstromen.....	20
4.5 Reststromen en circulaties.....	20
4.6 Berging en stromen.....	22
4.7 Verhangen.....	22
4.8 Secundaire stromen.....	25
4.9 Golven.....	26
5. <u>Transporten</u>	27
5.1 Algemene transportpatronen.....	27
5.2 De sedimenten.....	28
5.3 Suspensies.....	29
5.4 Transportmechanismen.....	32
5.5 Locale transporten.....	38
5.6 Jaarlijkse transporten.....	39
5.7 Erosie en sedimentatie.....	42
5.8 Baggerwerk.....	42
6. <u>Morfologie</u>	44
6.1 Geologie en geschiedenis.....	44
6.2 De morfologische structuur.....	44
6.3 De geulen.....	46
6.4 De platen en schorren.....	50
6.5 Het effect van baggeren.....	56
6.6 Dynamiek van de bodem.....	60
7. <u>Een samenvattend model</u>	64
7.1 Algemeen.....	64
7.2 Reservoirs.....	65
7.3 Transporten.....	67
7.4 Balans-relaties.....	67
7.5 Evenwichtsrelaties.....	68
7.6 Morfo-dynamische relaties.....	68
7.7 De invloed van het baggeren.....	70
7.8 Toepassing van het model.....	70
8. <u>Geraadpleegde bronnen</u>	72

LIJST VAN TABELLEN

- 4.1 Karakteristieke waterstanden bij Vlissingen en in het oosten van de Westerschelde
- 4.2 Berekende verhangen door traagheid en weerstand
- 5.1 Gemeten suspensietransporten bij Baalhoek en Waarde
- 5.2 Transporten in het Zuidergat en baggerwerk in de O-Westerschelde
- 6.1 Oppervlakte van de Platen van Walsoorden en Valkenisse in 1979, 1987 en 1989; hoogste punten
- 6.2 Afmetingen en aanslibbing in havens rond de oostelijke Westerschelde

opm.

- zie lit. lijst. Nr. water 43 nov/dec '88 ←
- blz 14.10/17: nadere studie
- symbolen lijst. ?
- rapport met veel algemeenheid. Wanj 'to the point'
van grote stappen.

LIJST VAN FIGUREN

- 3.1 Het Schelde-estuarium
- 3.2 Geometrie van het Schelde-estuarium
- 3.3 De Westerschelde

- 4.1 Het getij op de Schelde
- 4.2 Waterstanden en stroomsnelheden
- 4.3 Verloop van gehalten aan chloride en slib
- 4.4 Eb- en vloedvolumina en reststromen
- 4.5 Bergingsgebieden

- 5.1 Sedimenttransporten
- 5.2 Eigenschappen van afzettingen
- 5.3 Waargenomen relaties stroomsnelheid-transport
- 5.4 Gemiddelde concentratie gedurende een getijperiode
- 5.5 Metingen van stroomsnelheden en concentraties in Zuidergat en Schaar van Waarde
- 5.6 Sedimentatie en erosie in het oostelijke deel van de Westerschelde

- 6.1 Verlanding van het Land van Saeftinge en de totale Westerschelde
- 6.2 Oppervlakte van water en platen in de O. Westerschelde
- 6.3 Relaties tijdvolume/dwarsprofielen van geulen en estuarium
- 6.4 Breedte/diepte relaties van geulen
- 6.5 Waterstanden en hoogten van banken, platen, slikken en schorren
- 6.6 Ontwikkeling van de Platen van Walsoorden en Valkenisse
- 6.7 Gebieden waar wordt gebaggerd en gestort
- 6.8 Analyse baggerwerk oostelijk deel Westerschelde

- 7.1 Schema sediment-balans

1. Inleiding

1.1 Achtergronden

In augustus 1989 is het ontwerp-beleidsplan Westerschelde [Rijkswaterstaat, 1989] gepresenteerd. Als onderbouwing daarvoor zijn door de Directie Zeeland en de Dienst Getijdewateren, samenwerkend in de Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, diverse knelpunten geanalyseerd en mogelijkheden voor oplossingen aangegeven. Deel 4 van de serie nota's [Rijkswaterstaat, 1989], die door deze groep werd uitgebracht, "Morfologische structuur en dynamiek" heeft voornamelijk betrekking op het vaargeulonderhoud en de daarmee samenhangende aspecten. De problemen en effecten spitsen zich toe op het deel van de Westerschelde tussen Hansweert en de Belgische grens, het oostelijk deel. Aanbevolen werd en mogelijkheden werden aangegeven voor een aanpak bij de bron van de problemen via minimalisering van het baggerwerk. Langs deze weg ontstaan reële perspectieven op verhoging van de ecologische waarde van dit deel van het systeem.

In het concept-beleidsplan is deze aanbeveling overgenomen en in het bijbehorende actieplan is een nadere uitwerking aangekondigd. Gekozen is, om hierna te noemen redenen, voor een eerste uitwerking in de vorm van een relatief kortlopende zgn. pilotstudie onder de projectnaam OOSTWEST.

In het ontwerp-beleidsplan is een aanzet voor een beleid geformuleerd dat enerzijds tegemoet komt aan de belangen van de scheepvaartfunctie, terwijl anderzijds de waarde van het oostelijke deel van de Westerschelde, uit het oogpunt van ecologie, natuur en visserij, ten opzichte van de huidige situatie op een hoger niveau wordt gebracht. Voor het laatste deel van deze beleidsdoelstelling is nodig dat, naast de verbetering van water- en bodemkwaliteit, de baggerintensiteit aanmerkelijk wordt teruggebracht. Om met minder baggerwerk toch voldoende vaardiepte in de hoofdgeul te realiseren en te handhaven, moet, zo mogelijk, bereikt worden dat in het oostelijke deel de hoofdgeul zichzelf op de gewenste diepte houdt. Dit vergt, samen met het scheppen van goede begin- en randvoorwaarden voor een gewenste ecologische ontwikkeling van het gebied, een ingrijpende ruimtelijke herinrichting van dit deel van het estuarium. Via de waterbeweging kunnen dergelijke ingrepen doorwerken in het gehele systeem.

Tijdens het onderbouwende werk voor en het opstellen van het concept-beleidsplan ontbrak de tijd en capaciteit om meer dan een globaal beeld te geven van de mogelijkheden en beperkingen. Ook konden niet alle, op verschillende plaatsen aanwezige kennis, informatie en gegevens worden benut. Zeker voordat de eerste maatregelen ter realisering van deze optie kunnen worden uitgevoerd, moeten nog veel aspecten nader worden uitgewerkt en moet overleg worden gevoerd met België. Onder andere voor laatstgenoemd overleg bestaat er echter wel behoefte om op relatief korte termijn te beschikken over een duidelijker beeld van de te realiseren optimale situatie in het oostelijke deel.

Om bovengenoemde redenen is ervoor gekozen om als eerste uitwerking een relatief kortlopende zgn. pilotstudie uit te voeren. Doel, te leveren resultaten en aanpak zijn in de volgende punten samengevat:

- het selecteren en beschrijven van een aantal haalbare alternatieven voor de herinrichting van het oostelijke deel, die een vermindering van de baggerintensiteit en een verhoging van de ecologische waarde van het gebied bewerkstelligen;
- het beschrijven van de "duurzaamheid" van de alternatieven, d.w.z. de gevolgen ervan op lange termijn voor het systeem, zowel ten aanzien van de hydraulisch/morfologische als de ecologische ontwikkelingen;
- het aangeven de relaties van de alternatieven met de water- en bodemkwaliteitsaspecten;
- de studie wordt uitgevoerd met de nu beschikbare en gedurende de looptijd beschikbaar komende kennis, informatie en middelen; in de eindpresentatie wordt aangegeven welke essentiële leemten daarin werden aangetroffen.

De centrale vraag die zal moeten worden beantwoord is: "Hoe kan het oostelijke deel van de Westerschelde worden ingericht om in dit gebied te komen tot een optimum tussen minimaal onderhoudsbaggerwerk en een maximale ecologische waarde van het gebied".

Uiteraard betreft deze vraagstelling ook de situatie na uitvoering van de verdieping 43'/48' [Technische Scheldecommissie, 1984].

Een drietal deelgebieden zijn in deze vraagstelling te onderscheiden. In de eerste plaats zijn dit de hydraulisch/morfologische aspecten, samenhangend met de minimalisering van het baggerwerk en de ecologische potenties van het gebied. Als derde zal de beïnvloeding van de slibhuishouding expliciet aandacht vragen, zowel in actieve (beïnvloeding in gewenste richting) als in passieve (gevolgen van ingrepen) zin.

Dit zijn mijn
in z'n niet de juiste
vragen.

Concreet zijn per deelgebied de vragen:

Hydraulica/morfologie

- Hoe kan door een combinatie van stroomgeleidingsconstructies en hoger opgevulde nevengeulen de waterbeweging zo worden beïnvloed dat de hoofdgeul zichzelf ook na de verdieping op diepte houdt en de waterbeweging land- en zeewaarts van het gebied minimaal wordt beïnvloed;
- Vermindert het vervangen van speciéstortingen in eroderende buitenbochten door oeververdedigingen de baggerintensiteit en in welke omvang zijn dan oeververdedigingen nodig;
- Tot welk niveau kan de baggerintensiteit worden teruggebracht;
- Hoe wordt de "natuurlijke" ontwikkeling van het estuarium op lange termijn beïnvloed, o.a. door kombergingsverandering als gevolg van veranderingen in sedimentatie-omvang.

Slibhuishouding

- Hoe kunnen/zullen in combinatie met de maatregelen ter minimalisering van de baggerintensiteit en de slibtransport- en sedimentatie worden beïnvloed; → deze zin loopt niet.
- Hoe wordt door deze maatregelen de ligging van de zout-/zoetgradiënt en de troebelingszone beïnvloed, zowel op de korte als lange termijn;
- Hoe werkt de beïnvloeding van de slibhuishouding door op de ontwikkeling van water- en bodemkwaliteit.

Ecologie

- Wat zijn de mogelijkheden ter verhoging van de ecologische waarde van het oostelijke deel;
- Wat zijn de noodzakelijke ruimtelijke en fysische begin- en randvoorwaarden behorende bij deze mogelijkheden.

Algemeen

- Hoe kunnen/moeten de te nemen maatregelen onderling en in de tijd worden gefaseerd, ter voorkoming van ongewenste overgangssituaties, ter beheersing van de hydraulisch/morfologische ontwikkelingen en in relatie tot het tempo van verbetering van de slibkwaliteit;
- Hoe worden bovengenoemde aspecten beïnvloed door eventuele toekomstige ontwikkelingen als aanleg de Westerschelde Oeververbinding, ingrijpende kustverdedigingsscenario's en zeespiegelrijzing;

- grootschalige in kustonts.
- slibbergingsdepot.

- Wat is de invloed van de ingrepen op de lange termijn, zowel ten aanzien van de hydraulisch/morfologische als de ecologische ontwikkelingen.

1.2 Opdracht

Reeds kort na het verschijnen van het ontwerp-Beleidsplan Westerschelde werd het Waterloopkundig Laboratorium gevraagd om, binnen een daartoe gevormde commissie van vier deskundigen, een beoordeling van het plan te geven en te adviseren ten aanzien van de verdere uitwerking. Het desbetreffende rapport [van Os, 1989] werd in de herfst van 1989 ingediend.

Ongeveer gelijktijdig werd het Waterloopkundig Laboratorium gevraagd met een deskundige deel te nemen in de Werkgroep OOSTWEST om te assisteren bij de uitvoering van de in de vorige paragraaf genoemde pilot-studie. Naar aanleiding van een offerte van het WL (EZ460/Z368.95/aw) van 1 augustus 1989 verleende de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat opdracht tot deze werkzaamheden in brief nr. 9444 van 1 september 1989. Binnen de taakstelling van het onderzoeksproject omvatten de activiteiten van de deskundige, conform de offerte:

- A. Bestudering van de bestaande gegevens, rapporten en andere informatie met het doel vertrouwd te raken met de situatie in het gebied, met de relevante processen en met de problematiek van de ontwikkeling. Zo nodig zullen ook gesprekken worden gevoerd met andere deskundigen.
- B. Deelname aan relevante bijeenkomsten van de werkgroep en overleg met afzonderlijke functionarissen met als doelen uitwisseling van informatie en ideeën, en het co-ordineren van activiteiten.
- C. Bureaustudies die kunnen leiden tot:
 - nadere inzichten in de morfologische processen in het beschouwde gebied;
 - relaties tussen de waterbeweging en de geometrie;
 - schatting van de autonome morfologische ontwikkeling van het gebied;
 - een eigen inbreng in de definiering van alternatieve menselijke ingrepen, en
 - schatting van de invloeden van deze ingrepen op de ontwikkeling van het gebied.
- D. Rapportering over zijn werkzaamheden en bevindingen.

Een verdere concretisering van de werkzaamheden in dit kader zou binnen het werkgroepverband kunnen worden afgesproken.

Namens het Waterloopkundig Laboratorium nam ir E. Allersma deel aan de werkzaamheden van de Werkgroep OOSTWEST.

2. Uitvoering

2.1 Deelname aan de Werkgroep

Vanaf 25 september 1989 werd deelgenomen aan de maandelijkse bijeenkomsten van de Werkgroep in Middelburg; eventueel uitlopend in discussies in beperkt kring over specifieke onderwerpen. Op 7 november vond een gezamenlijke terreinverkenning plaats in het gebied van de Platen van Valkenisse. Op de OOSTWEST-dag, op 15 maart 1990, werd een inleiding gehouden over de karakteristieken van het hydraulisch-morfologische systeem van het Schelde-estuarium.

De belangrijkste taak was het analyseren van het estuarieme systeem voor zover het de grootschalige fysische aspecten betrof. Getracht werd daarvan een zo compleet mogelijk kwantitatief beeld te verkrijgen in de vorm van een globaal model. Dit inzicht vormde de basis van de deelname aan de discussies; in vorm van gesprekken in de Werkgroep en in de vorm van enkele korte notities waarin op specifieke aspecten nader werd ingegaan. Suggesties werden gedaan met betrekking tot de uitwerking van gegevens over het baggerwerk en van resultaten van waterloopkundige berekeningen.

Bij de uitwerking van de analyse werd zo goed mogelijk aansluiting gezocht bij de andere aspecten van de taak van de Werkgroep: de ecologie, het baggeren, andere beheersmaatregelen en de te overwegen nieuwe maatregelen en onderbouwende studies.

De bevindingen worden uiteindelijk gerapporteerd in deze nota na een laatste bespreking met de cliënt op 26 mei, 1992.

2.2. Systeemanalyse

Een estuarium, zoals dat van de Schelde, is een, min of meer trechtervormige, overgang van een rivier naar de zee. De rivier verzorgt een variabele voeding van zoet water, sedimenten en opgeloste stoffen. Vanuit de zee penetreren het getij (en stormvloeden), zwaar zout zeewater en ook sedimenten en opgeloste stoffen. Al deze invloeden veroorzaken een gecompliceerd tijd-ruimtelijk proces van bewegingen van water, zout, sedimenten en opgeloste stoffen.

9. Het alluviale karakter van het systeem impliceert een nauwe interactie tussen de waterbewegingen en de geometrie met voortdurende veranderingen waarvan de tijdschaal voornamelijk afhangt van de grootte van een gebied.

De ontwikkeling van het estuarium is (en wordt) sterk beïnvloed door menselijke activiteiten zoals inpolderingen, kustverdediging, scheepvaart, zandwinning en industrie. Aanvankelijk volgden deze ingrepen de natuurlijke verlanding van het estuarium maar de menselijke greep op het systeem neemt toe; vooral gedurende de laatste halve eeuw. Daarin vond ook een aanmerkelijke verdieping van de scheepvaartgeul plaats. In België kwam het Sigmaplan tot uitvoering [Casteleijn en Kerstens, 1988].

Op basis van dit fysische systeem functioneert een ecologisch systeem; in het water, in de bodem, op het land en in de lucht. De fysische processen bepalen in sterke mate de dynamiek van het ecologische systeem met tijdschalen van enkele seconden (golven, ribbels) tot eeuwen (land van Saeftinge). Het water, het land en de lucht verbinden het systeem met een wijde omtrek.

De wenselijkheid van een ruimere scheepvaartweg en de bezorgdheid om de ontwikkeling van het ecologische systeem zijn de belangrijkste aspecten van deze studie. Een analyse van het fysisch-ecologische systeem moet de basisgegevens verschaffen van beleidsoverwegingen met betrekking tot verdere ingrepen in het gebied. Het onderhouden van een ruimere vaarweg kan leiden tot grootschalige ingrepen; het ecologische aspect vereist studie van de grootschalige processen maar voor bepaalde soorten kunnen ook verschijnselen op kleine schaal zeer belangrijk zijn.

Gezien de problemen rond de verruiming van de vaargeul valt de nadruk in deze studie op het oostelijke deel van de Westerschelde. De processen in dit gebied kunnen echter niet los worden gezien van het totale estuarium.

2.3 Rapportering

Na een eerste bestudering van de grote hoeveelheid literatuur die door Rijkswaterstaat ter beschikking werd gesteld, en naar aanleiding van de eerste discussies in de Werkgroep werden in oktober 1989 vier notities opgesteld:

1. Sedimentbalans en morfologie (9-10-1989);
2. Sedimenten en sedimenttransporten (30-10-1989);
3. Analyse berekeningen waterbeweging (26-10-1989);
4. Analyse baggergegevens (25-10-1989) en
5. Morfologische aspecten van enkele oplossingsrichtingen (1-11-1990).

Deze notities waren het onderwerp van discussie en aanleiding tot nadere bestudering van bepaalde aspecten.

De verdere rapportering vond later plaats in de vorm van een min of meer complete analyse van het grootschalige systeem. De geamendeerde en uitgewerkte eerdere notities zijn in deze Nota opgenomen.

Deze Nota heeft gediend als basis voor de systeemanalyse (Hoofdstuk 3) in het eindrapport van de Projectgroep OOSTWEST (Rijkswaterstaat, 1991).

Gezien de aard en de omvang van de opdracht kan deze Nota niet worden beschouwd als een uitputtende analyse van het fysische systeem van de Schelde. Alleen aspecten (en achtergronden) die van de Werkgroep aan de orde kwamen, zijn behandeld voor zover dit voor een goed begrip nodig was.

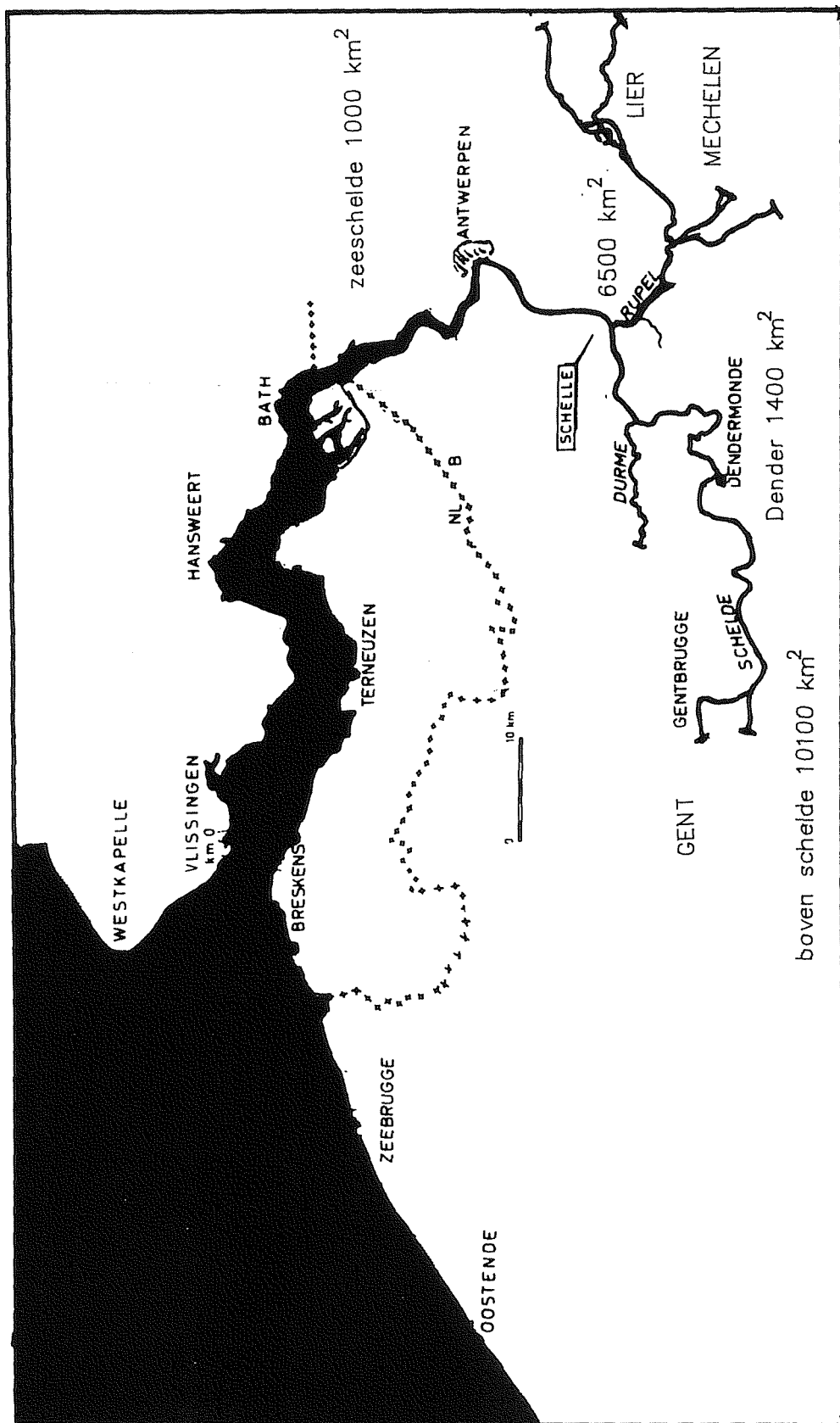
3. Geografie en hydrografie

Het Schelde-estuarium vormt de verbinding tussen het stroomgebied van de Schelde (en enkele kleinere rivieren) en de zuidelijke baai van de Noordzee; gelegen in de Atlantische kustzone van het Euraziatische continent. Het maakt deel uit van het Nederlandse zuidwestelijke Deltagebied.

Figuur 3.1 laat zien dat het estuarium zich, vanaf de mond bij Vlissingen-Breskens, uitstrekt tot enkele stuwen ver in België. De breedte neemt af van ca. 5 km aan de mond tot 54 m bij Gent, 160 km landinwaarts. Meer geometrische details geeft Figuur 3.2. Het stroomgebied van de Schelde strekt zich vanaf Gent over ruim 10.000 km², tot in Frankrijk, uit. De stroomgebieden van de andere Belgische rivieren, die beneden Gent uitmonden, zijn ca. 9.000 km² en vormen dus een aanzienlijk deel van het totaal.

Zeewaarts gaande vertoont het estuarium niet alleen toenemende dwarsafmetingen maar ook een toenemende schaal van de meanders. Na de afsluiting van de Braakman en het Sloe, is het Land van Soeftinge nog het enige laterale kombergingsgebied. Tot enkele kilometers bovenstrooms van de Belgisch-Nederlandse grens bestaat het estuarium uit een enkele stroomgeul. Verder benedenstrooms (Figuur 3.3) vertoont het dwarsprofiel twee of meer evenwijdige geulen met ondiepten en banken er tussen. Een aantal grotere platen ligt boven de gemiddelde waterstand (NAP); enkele (Hooge Platen, Platen van Ossenis, Platen van Valkenisse) reiken zelfs tot gemiddelde hoogwater (ca. NAP +2.5 m) of iets hoger. Langs de oevers liggen gebieden (Mosselbanken, Slikken van Everingen, Schor van Emanuelpolder, Land van Saeftinge) die ook bij springtij droog blijven [Leemans, 1980].

De geulen zijn het diepst (tot 30 à 40 m) in de scherpe bochten. In de binnenbochten van de meanders bevinden zich typische eb- en vloedgeulen die aansluiten op de diepe geulen in de bochten en die aan het beneden- resp. bovenstroomse eind worden afgesloten door hoefijzervormige banken waarvan de "staarten" aansluiten op platen of op elkaar. In het laatste geval vormen ze een ondiepe drempel of een langgerekte richel die twee geulen scheidt (zie Figuur 3.3).

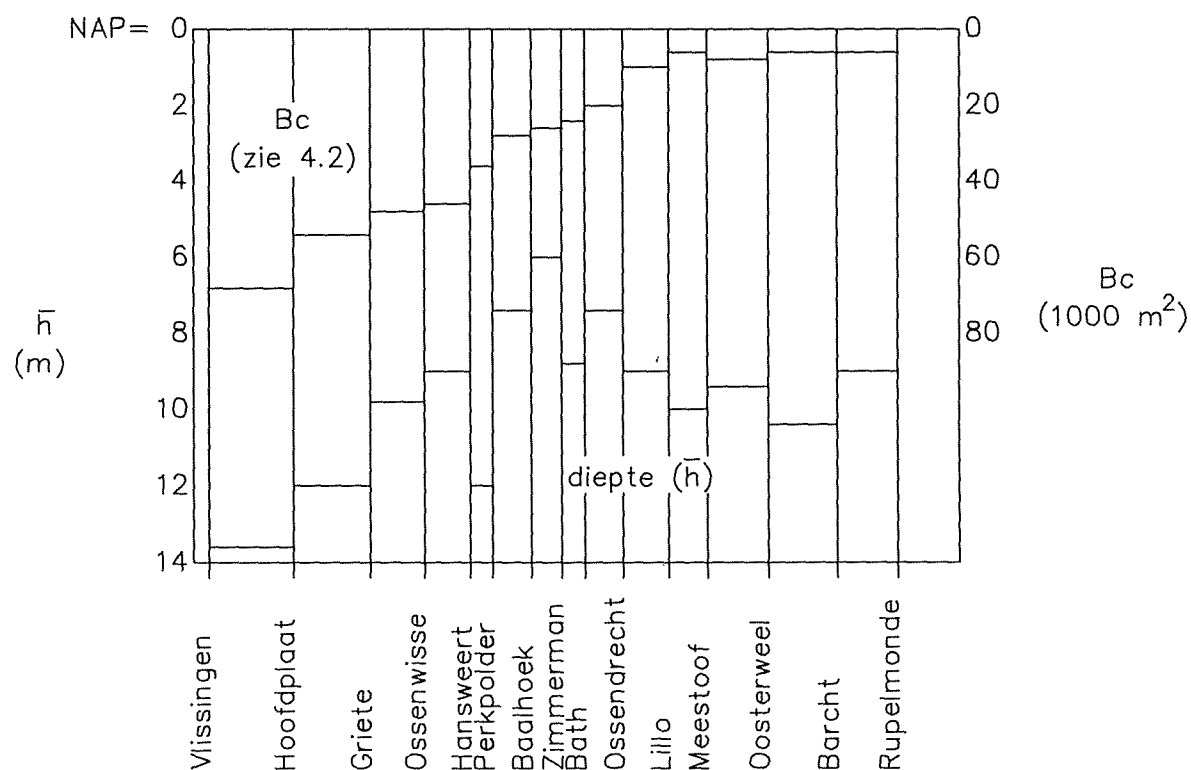
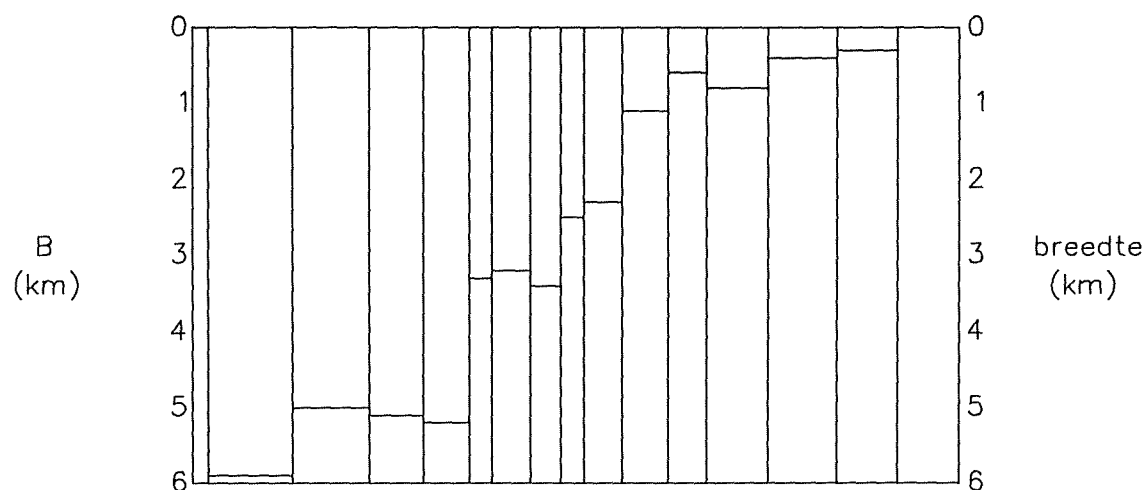
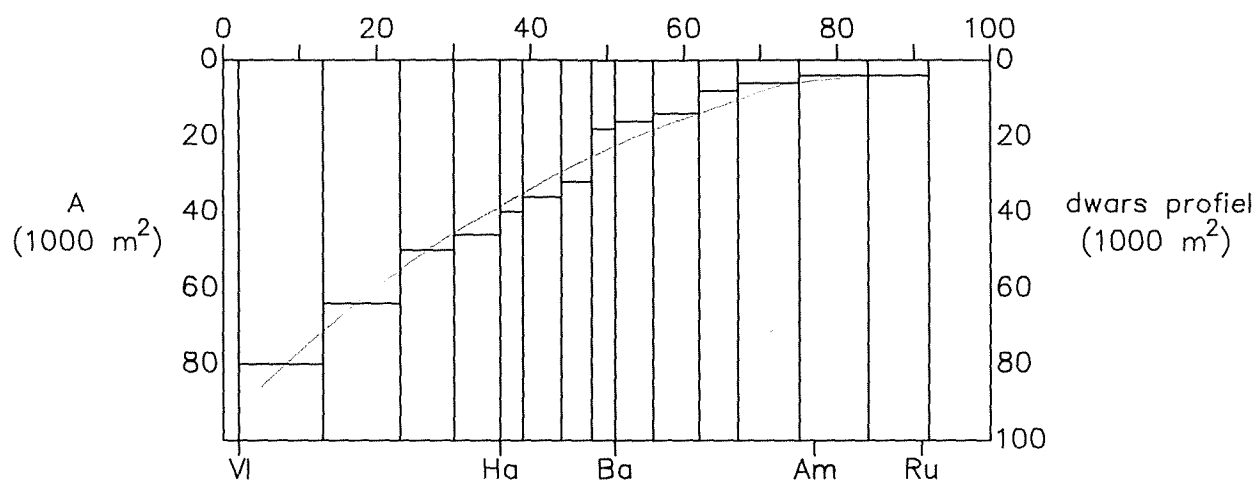


HET SCHELDE-ESTUARIUM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 3.1



GEOMETRIE VAN HET SCHELDE-ESTUARIUM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 3.2

Over de hoogste platen en de schorren vindt, ook rond de normale hoogwaters, geen doorgaande stroming plaats. Deze kommen zijn relatief vlak en worden gevuld en geledigd door doodlopende prielen. Men vindt er, op de zandige delen, kleine golfribbels. De bodems van de geulen en de randen van de platen, die bij hoogwater enige meters of meer diep zijn, vertonen megaribbels met hoogten van 0,2 - 2 m en lengten van één tot 20 m. In diepe geulen (> 25 m) komen zandgolven voor met hoogten van 2 m en lengten rond 100 m. De hogere randen van de platen zijn veelal steil en vlak.

4. Waterbewegingen

4.1 Rivieraafvoeren

De totale gemiddelde jaar-afvoer van zoet water op het Schelde Estuarium is ca. $120 \text{ m}^3/\text{s}$ of $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ per getij-cyclus. Hiervan levert de Bovenschelde $27 \text{ m}^3/\text{s}$ en de andere rivieren boven Schelle nog ca. $80 \text{ m}^3/\text{s}$. De gemiddelde maandafvoer varieert bij Schelle tussen 50 à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ in april-oktober en 160 - $180 \text{ m}^3/\text{s}$ in december-februari.

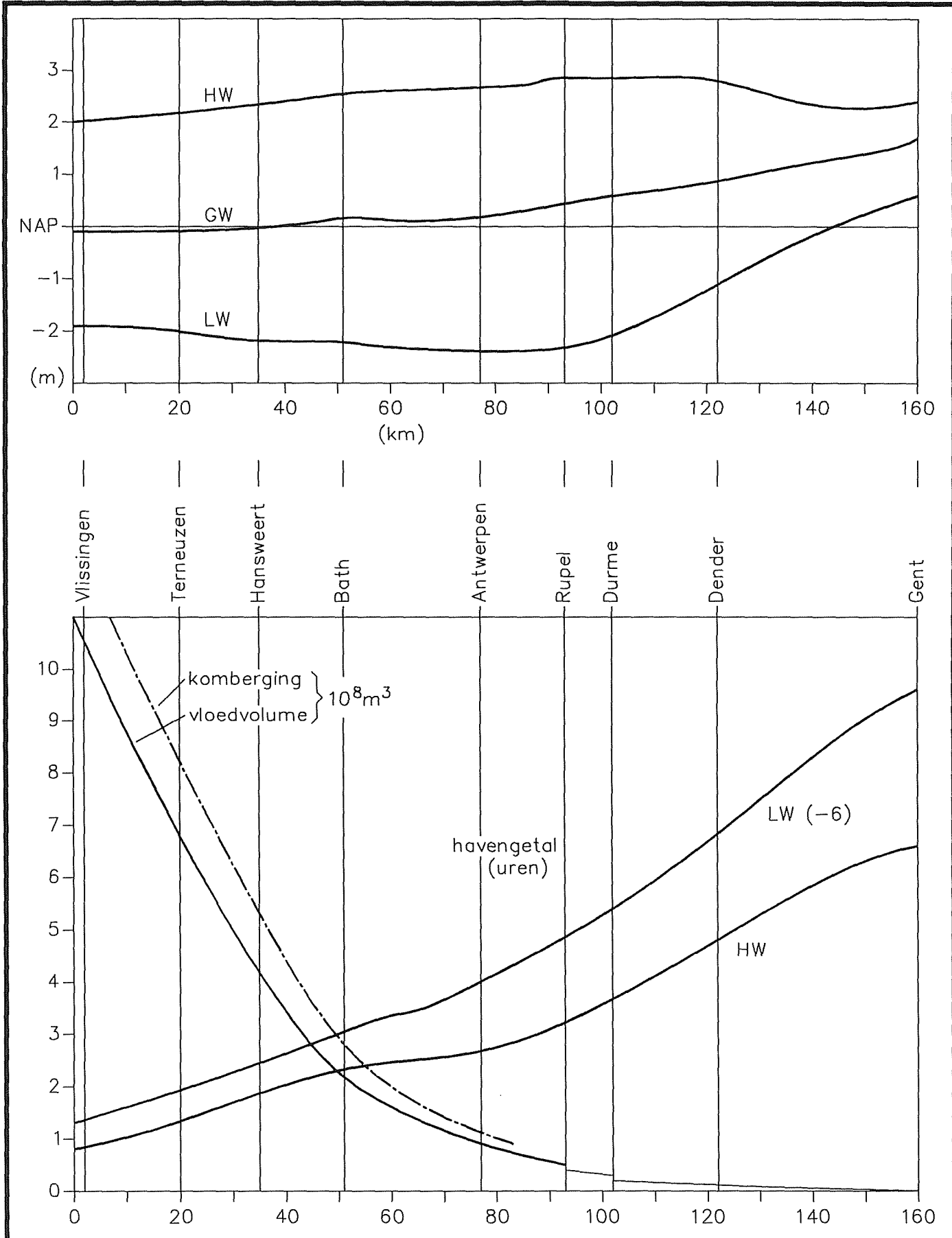
De rivieraafvoer veroorzaakt in de Westerschelde een resulterende stroom naar de zee met een snelheid van 1 - 3 cm/s bij de mond tot 5 - 15 cm/s bij de grens. De verblijftijd (volume estuarium/rivieraafvoeren) is één tot enkele maanden.

4.2 Waterstanden

De afvoeren van de rivieren naar het Schelde-estuarium zijn zo gering dat de invloed op de waterstanden in de Westerschelde kan worden verwaarloosd. De stijging van de gemiddelde waterstanden in stroomopwaartse richting (Figuur 4.1) is voornamelijk het gevolg van opstuwing door het getij.

De waterstandsvariaties in het estuarium worden dus vrijwel geheel veroorzaakt door het getij op zee; eventueel gestoord door meteorologische invloeden. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de karakteristieke waterstanden bij Vlissingen en in het oostelijk deel van de Westerschelde [Rijkswaterstaat, 1989; British Admiralty, 1989]. Het getij is groot, dubbeldaags en het heeft een geringe dagelijkse ongelijkheid. Binnen de veertiendaagse spring/doodtij cyclus varieert het tijverschil ca. $\pm 15\%$ rond het gemiddelde. De invloed van stormen loopt van -1 tot $+2 \text{ m}$, eens per 10 jaar.

De getijgolf loopt vanuit de Noordzee het estuarium binnen (Figuur 4.2). Zijn energie neemt gaandeweg af door de hydraulische wrijving. Verder treedt vervorming op in de onregelmatige, vernauwende geometrie van het estuarium (Figuur 3.2). De golf wordt deels teruggekaatst. De zeewaarts lopende golf interfereert met de binnenkomende golf.



HET GETIJ OP DE SCHELDE

		Vlissingen	Hansweert Bath
Overschrijdings- frequentie: maal per jaar	0,1	3,8	4,5
	0,2	3,6	4,3
	0,5	3,4	4,1
	1	3,3	3,9
	2	3,2	3,7
	5	3,0	3,5
Hoogste astr. tij		2,9	3,2
Gem. H.W. spring		2,4	2,8
Gem. H.W.		2,0	2,5
Gem. H.W. dood		1,5	2,0
Gem. waterstand		-0,06	0,1
N.A.P.		0	0
Gem. L.W. dood		-1,5	-1,8
Gem. L.W.		-1,8	-2,1
Gem. L.W. spring		-2,0	-2,3
Referentievlak vlak		-2,3	-2,6
Laagste astr. tij		-2,5	-2,9

Tabel 4.1 Karakteristieke waterstanden bij Vlissingen
en in het oosten van de Westerschelde

In eerste benadering is de voorplantingssnelheid van de golf

$$c = \sqrt{g \bar{h}} \quad (4.1)$$

waarin:

g = versnelling van de zwaartekracht;

h = gemiddelde waterdiepte = A/B

A = oppervlakte van het dwarsprofiel onder de momentane waterstand; en

B = bergende breedte op de momentane waterstand.

De golf veroorzaakt een horizontale waterbeweging met een debiet.

$$Q = B c(z) \quad (4.2)$$

dese z is samengesteld uit een inkomende en reflecterende golf.
wordt ook beïnvloed door reflectie?

waarin:

z = hoogte van de golf ten opzichte van de middenstand

Een verandering van Bc (verbreiding, versmalling, splitsing) leidt tot gedeeltelijke reflectie van de aankomende golf (1) met een terugkerende golf (2) en een doorgaande golf. Op grond van de continuïteit van de waterstand en de debieten geldt: (3)

?

$$z_1 + z_2 = z_3$$

(4.3)

en



$$Q_1 + Q_2 = Q_3$$

(4.4)

? In de Schelde loopt het hoogwater (grote $\bar{h}$) sneller dan het laagwater (kleine $\bar{h}$) (Figuur 4.1); vooral bovenstrooms van Antwerpen waar de gemiddelde diepte relatief gering is (Figuur 3.2). De sterke afname van B_c rond Antwerpen (50% bij Ossendrecht; Figuur 3.2) veroorzaakt reflectie waardoor de tijverschillen beneden dat punt relatief groot zijn en de voortplantings-snelheid schijnbaar groter is (Figuur 4.1).

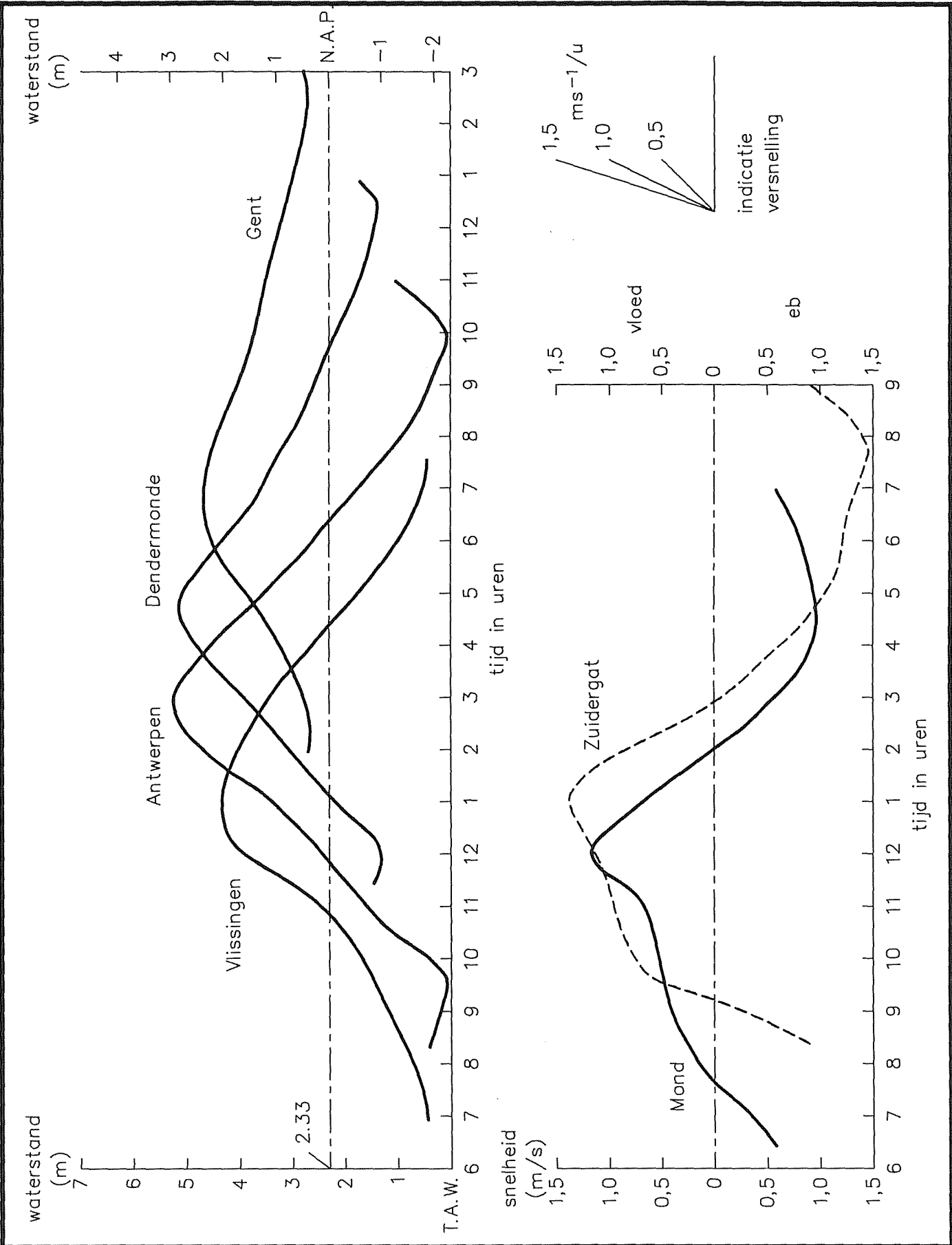
De kunstmatige verdieping van de geulen beneden Antwerpen en de verkleining van de bergende oppervlakte hebben in de loop van de tijd geleid tot een vergroting van de voortplantingssnelheid en een versterking van de reflectie.

4.3 Stromen

De variaties van de waterstand gaan gepaart met stromen die het estuarium vullen en ledigen. Figuur 4.1 laat zien dat het vloedvolume geleidelijk afneemt van ca. 1 km³ bij Vlissingen naar 0,2 km³ bij Bath en 0,1 km³ bij Antwerpen. De stromen verschillen in fase ongeveer $\frac{1}{4}$ periode van de waterstanden zoals bij het vullen en ledigen van een kom (Figuur 4.2).

De horizontale oscillaties van het water gedurende een getijperiode zijn 10 à 15 km (zie ook Figuur 4.3); de resulterende verplaatsing door de rivierafvoer 0,5 - 2 km.

De stroomsnelheden in het estuarium variëren tussen 1 en 1,5 m/s (3,6 - 5,4 km/u) maximaal in de beide richtingen (Figuur 4.2). Tijdelijk (extreme getijden) en plaatselijk (drempels, banken) kunnen grotere of kleinere snelheden optreden. Dicht bij de bodem zijn de stroomsnelheden kleiner dan bij de oppervlakte. Gecomplexeerde stroompatronen treden op rond (mega)ribbels op de bodem (zie Hoofdstuk 7).

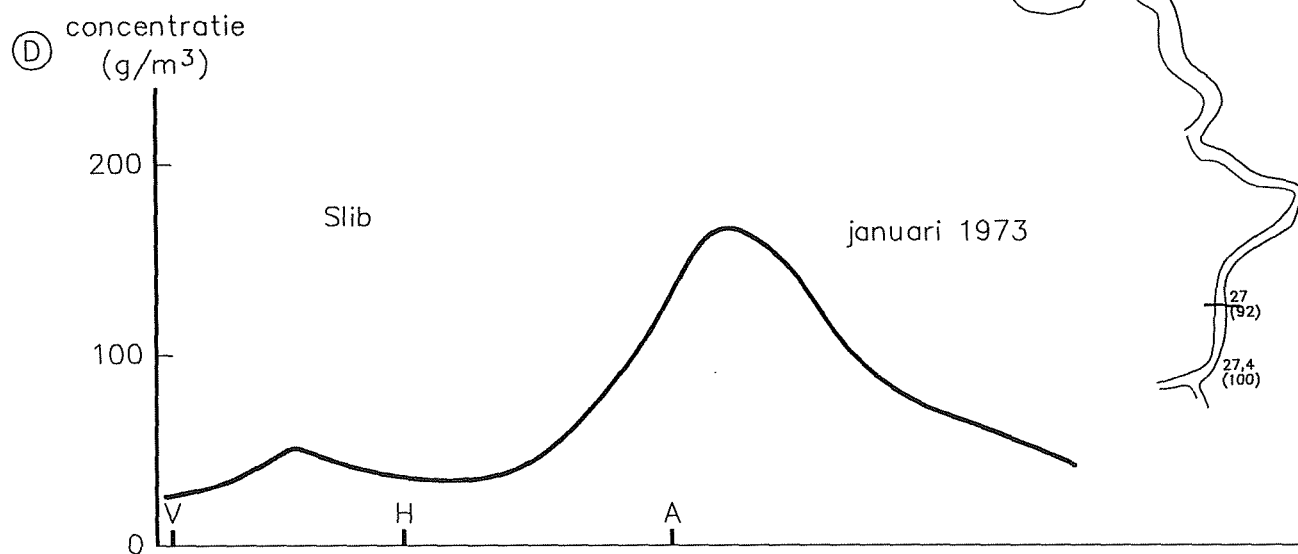
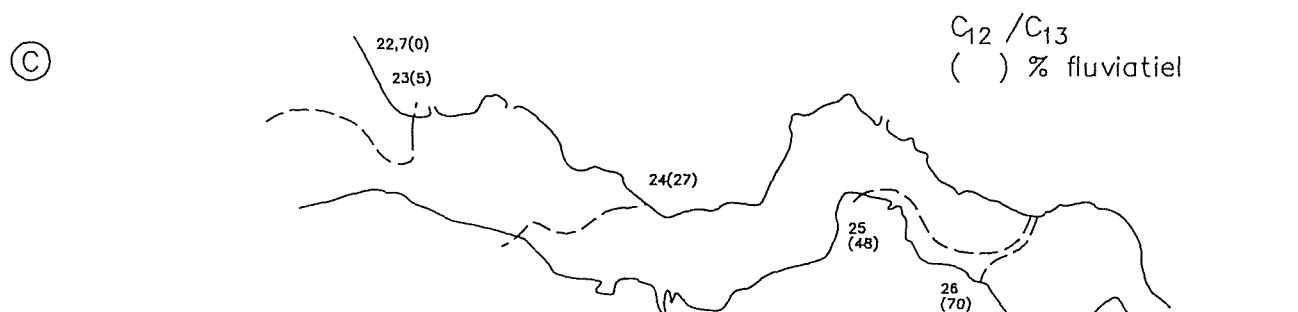
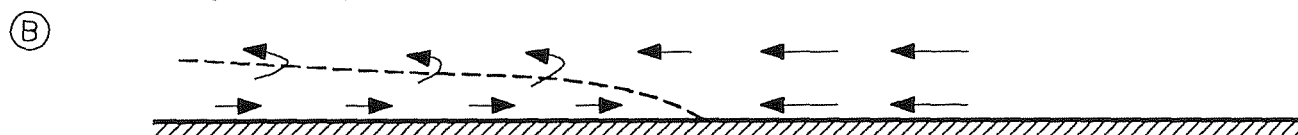
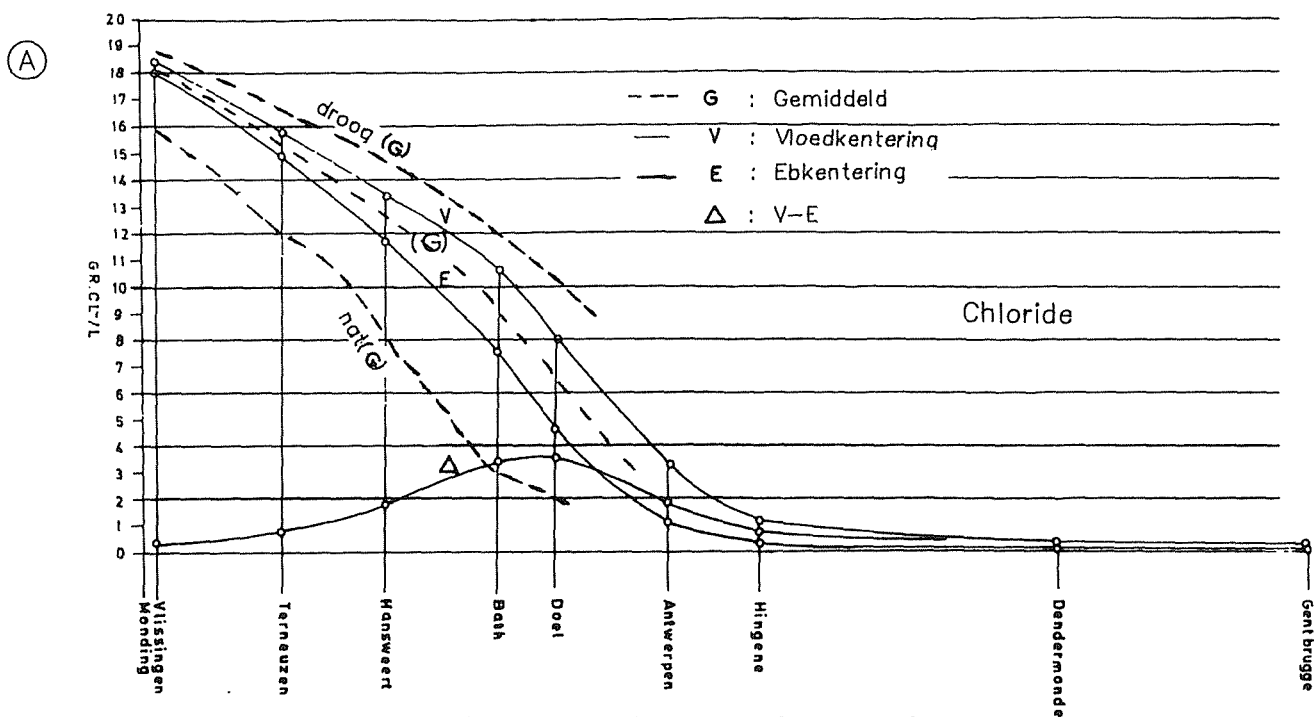


WATERSTANDEN EN STROOMSNELHEDEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 4.2



VERLOOP VAN GEHALTEN AAN CHLORIDE
EN SLIB

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 4.3

dit beeld
is achterhaald!

-20-

4.4 Zoutindringing en dichtheidsstromen

Het zoute zeewater, met zijn grote soortelijke massa, heeft de neiging om langs de bodem het estuarium binnen te dringen; tegen de zeewaartse stroom van het zoete rivierwater in. Vooral door het getij, treedt er menging op tussen de twee watersoorten. Het zoete water stroomt, meer en meer gemengd met zout water, langs de oppervlakte naar zee. De afstand waarover het zout gemiddeld binnendringt hangt af van de afvoer van zoet water. Het hele patroon oscilleert, rond het gemiddelde, met de getijbeweging van het water. Figuur 4.3A geeft hiervan een beeld.

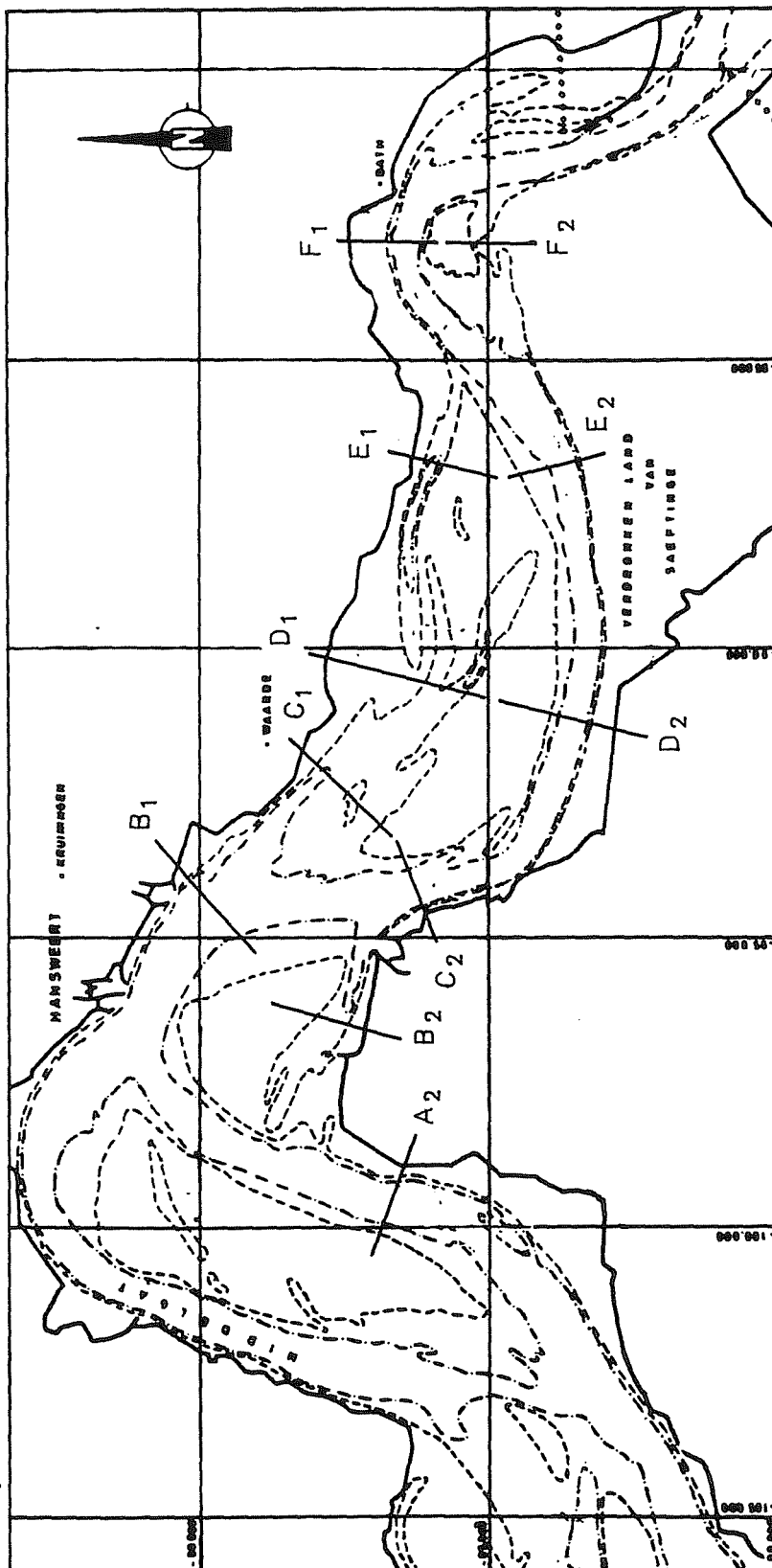
Over het getijgemiddeld leidt dit tot een patroon van resulterende stromen als aangegeven in Figuur 4.3B. In het brakke gebied heerst, vooral in de diepste geulen, een landwaartse stroom van enkele centimeters per seconde. In het zoete deel van het estuarium is de resulterende stroom over de hele diepte zeewaarts gericht. De bodemstromen ontmoeten elkaar dicht bij de grens van het zoute gebied. De plaats daarvan hangt dus af van de rivierafvoeren. Langs de oppervlakte is overal de resulterende stroom zeewaarts gericht.

4.5 Reststromen en circulaties

Naast de doorgaande stroom van zoet water ($50 - 200 \text{ m}^3/\text{s}$) zorgen de dichtheidsverschillen dus voor een verticale circulatie van zout water; langs de bodem naar binnen en langs de oppervlakte naar buiten. Gegevens over het debiet aan zout water zijn niet bekend maar de (vertikale) verdeling van het zoutgehalte en vergelijking met andere estuaria leiden tot een schatting van één tot enkele malen de afvoer van zoet water.

hoe?

De dichtheidsstromen zijn niet de enige reststromen die de verdeling van zout in het estuarium beïnvloeden. Ook in horizontale zin treden circulaties op als gevolg van verschillen in diepte. Figuur 4.2 laat zien dat de vloedstromen in het algemeen optreden bij hogere waterstanden dan de ebstromen. Over ondiepe gebieden stroomt daardoor meer vloedwater dan ebwater. Dit effect wordt uiteraard gecompenseerd door een eb-overschot in de diepere geulen. De berekende eb- en vloedvolumina in het oostelijke deel van de Westerschelde (Figuur 4.4) laten dit duidelijk zien.



E/V		E/V		E/V		E/V		E/V		E/V	
A ₁	283/226	B ₁	349/374	C ₁	124/136	D ₁	101/113	E ₁	35/26	F ₁	173/175
A ₂	245/301	B ₂	62/48	C ₂	274/258	D ₂	246/238	E ₂	254/258	F ₂	59/62
A	528/527	B	411/422	C	398/394	D	347/351	E	289/284	F	232/237
↔	56	↔	25	↔	14	↔	10	↔	6	↔	2,5

EB- EN VLOEDVOLUMINA EN
RESTSTROMEN ($10^6 m^3$)

Het gevolg van deze circulaties is dat het zoute water langs de noordelijke oever aanzienlijk verder binnendringt dan langs de zuidelijke oever [Van Maldegem, 1989]; zie ook Figuur 4.3C. De rivierinvloed is relatief groot in het Land van Saeftinge.

De hier beschreven reststromen zijn 1-5% van de hoofdstromen. Ze worden daarom sterk beïnvloed door storingen zoals waterstandsafwijkingen op de Noordzee, locale wind en wisselende afvoeren van de rivieren. Op langere termijn worden vooral de horizontale circulaties beïnvloed door veranderingen van de geometrie van de waterlopen.

4.6 Berging en stromen

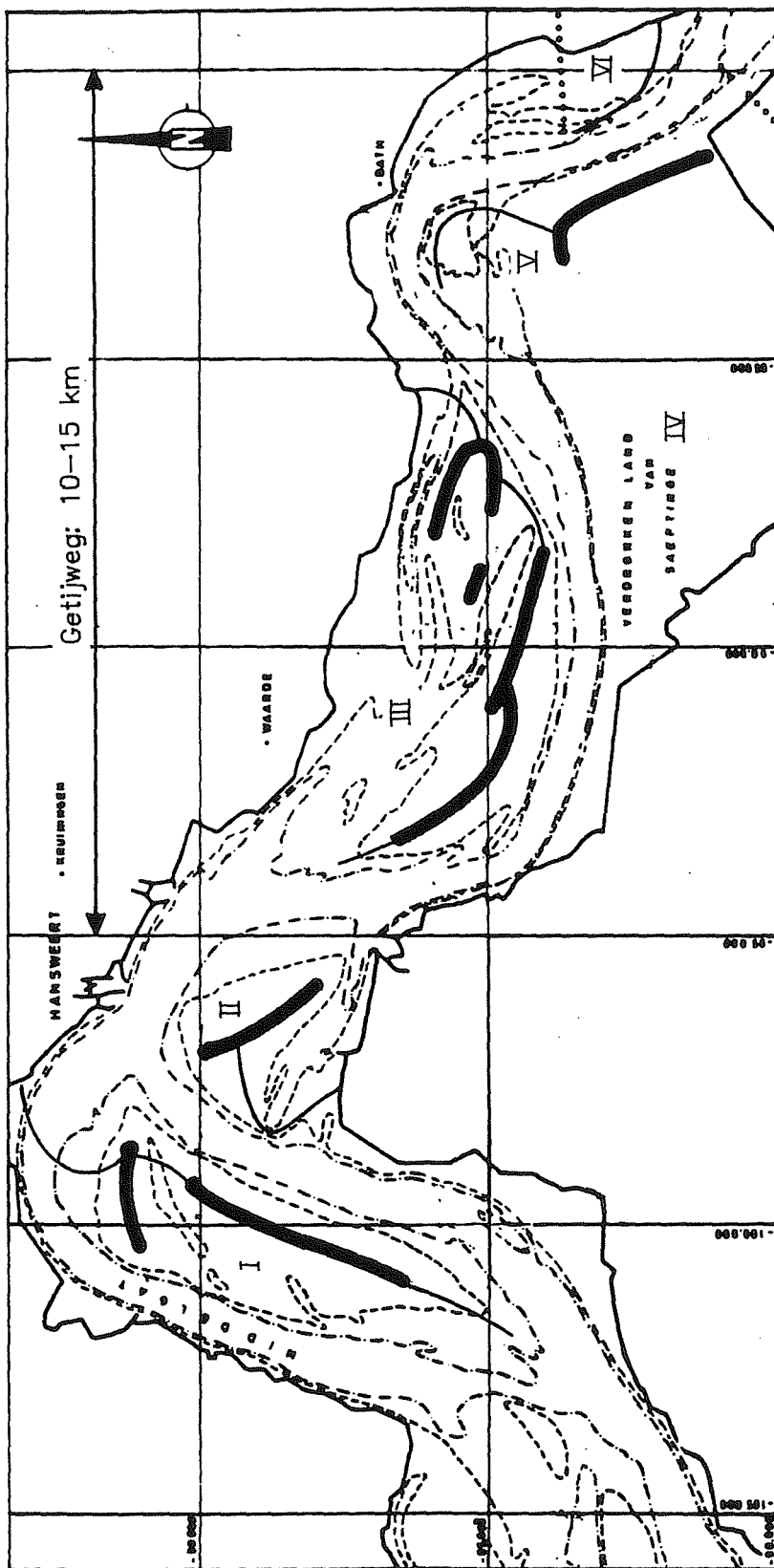
Het getij in een estuarium is een voortdurende wederzijdse wisseling van potentiële en kinetische energie. Ruimtelijk komt dit tot uitdrukking in relatief ondiepe bergingsgebieden en relatief diepe stroomgeulen. Figuur 4.5 toont de bergingsgebieden in het oostelijke deel van de Westerschelde. Ze omvatten ongeveer 50% van de totale oppervlakte van het gebied.

Alleen het Land van Saeftinge (IV) is een zuiver bergingsgebied. Met de Ballastplaat (VII) is dat ook al vrijwel het geval. Alle andere ondiepe gebieden vervullen naast de berging ook een doorgaande stroomfunctie. Een deel van het water dat er bij vloed aan de westzijde in stroomt, verlaat het gebied weer over de, relatief ondiepe oostelijke rand.

Vrijwel zuivere berging treedt ook op op de hoge platen die bij hoog water maar kort en weinig onderlopen. Ze fungeren als "waterscheidingen" en de berging is relatief gering. De schorren van het Land van Saeftinge blijven droog behalve bij extreme hoogwaters (Figuur 6.5).

4.7 Verhangen

In het voorgaande is getoond hoe de stromen in belangrijke mate worden geleid door de geometrie van het gebied. Ze worden verder beheerst door de, alomtegenwoordige, verticale versnelling van de zwaartekracht en verder de horizontale snelheidsafhankelijke massatraagheid en bodemwrijving.



gebied	I	II	III	IV	V	VI
berging $10^6 m^3$	90	30	75	12	20	18

BERGINGSGEBIEDEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 4.5

De verhouding tussen de horizontale en verticale versnellingen bepaalt de locale helling (verhang) van de topografie van de waterspiegel.

De massakrachten zijn een gevolg van de versnelling en vertraging (in de richting van de stroom, Figuur 4.2), de centrifugale versnelling (langs de straal van de bocht) en de Coriolis-versnelling (loodrecht naar rechts). Tabel 4.3 geeft een overzicht van de verhangen die in (het oostelijk deel van) de Westerschelde optreden onder invloed van de heersende stromen. Ook het langsverhang door de hydraulische weerstand is aangegeven.

De optredende verhangen blijken alle van dezelfde orde van grootte te zijn. De relatieve grootte hangt af van de locatie en de stromingscondities. Het patroon wisselt dus voortdurend in ruime en tijd. De volgende verschijnselen verdienen de aandacht:

- de centrifugale versnelling is relatief belangrijk in het oosten van het gebied omdat daar de bochten relatief scherp zijn;
- bij grote stroomsnelheden domineert hij over de Coriolis-versnelling;
- bij eb compenseren de centrifugale versnelling en de Coriolis-versnelling elkaar min of meer in de bochten met een positieve straal; bij vloed gebeurt hetzelfde in bochten met de tegengestelde kromming;
- in de andere gevallen treedt een cumulatie van de beide laterale versnelingen op;
- de weerstand is belangrijk bij sterke stromen in ondiep water, en
- de traagheid is groot rond de kenteringen zoals Figuur 4.2 laat zien.

Fas over enige afstand leiden de verhangen tot belangrijke niveau-verschillen. Daartoe behoren vervallen over langgerekte banken die leiden tot kortsluitstromen (en geulen) dwars over deze banken.

Stroomsnelheid	Verhang (10^{-5})			straal (km)
	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s	
<u>Centrifugale versn.</u>				
Honte	+0,5	+2,1	+ 4,7	+4,8
Pas v. Terneuzen W.	-0,3	-1,1	- 2,5	-9
Pas v. Terneuzen O.	-0,35	-1,4	- 3,1	-7
Oml. v. Hansweert	-0,5	-2,0	- 4,5	-5
Middelgat	+1,0	+4,0	+ 9,0	+2,5
Bocht bij Hansweert	+1,1	+4,5	+10,1	+2,2
Zuidergat W.	-1,25	-5,0	-11,3	-2,0
Zuidergat O.	-0,4	-1,7	- 3,9	-5,8
Nauw van Bath	+1,5	+5,8	+13,2	+1,7
Vaarw. boven Bath	-0,8	-3,1	- 7,0	-3,2
<u>Coriolis (eb +)</u>	0,75	1,5	2,25	-
<u>Langsverhang</u> (weerstand) D = 5 m	1,8	7,3	16,4	-
D = 10 m	0,7	2,9	6,5	-
D = 20 m	0,3	1,2	2,6	-
<u>Traagheid</u>				
$\Delta v/\Delta t$ ($\text{ms}^{-1}/\text{uur}$)	0,5	1	1,5	-
$\frac{dv}{dt}$ (10^{-5}) g	1,4	2,8	4,2	-

Tabel 4.2 Berekende verhangen (cm/km) door traagheid en weerstand

4.8 Secundaire stromen

In stromend water wordt de stroom bij de bodem afgeremd door de wrijving. Dicht bij de bodem is de stroomsnelheid ca. 1/20 van het gemiddelde; van plaats tot plaats treden echter grote verschillen op. In het algemeen blijft in de onderste 37% van de waterkolom het water achter bij de gemiddelde beweging; daarboven stroomt het sneller. De stroom kan worden opgevat als een gemiddelde translatie plus een verticale circulatie ter grootte van ca. 5% van het totale debiet.

De verticale verdeling van de snelheid wordt beïnvloed door de dichtheidsgradiënt; de bodemstroom wordt versterkt gedurende de vloed en verzwakt tijdens de eb.

Deze verticale verdeling van de snelheid heeft tot gevolg dat de centrifugale versnelling en de Coriolis-versnelling bij de oppervlakte sterker zijn dan aan de bodem. Dit geeft aanleiding tot secundaire stromen loodrecht op de hoofdstroom. De centrifugale versnelling stuwt oppervlaktewater naar de buitenbocht en een bodemstroom naar de binnenbocht. De Coriolis-versnelling doet de stroom aan de oppervlakte naar rechts uitwijken en bij de bodem naar links. Zoals eerder opgemerkt, kunnen ze elkaar versterken en tegenwerken. Het effect van deze secundaire stromen is dat het water langs spiraalvormige banen door een geul gaat stromen. De dwarscomponent is dan 1 tot 5% van de hoofdstroom met de hoogste waarde in diepe scherpe bochten.

De traagheid van het langzamer stromende water, dicht bij de bodem en in ondiep water, is relatief gering. Het gevolg is dat dit water gemakkelijker kan afbuigen naar zijgeulen en dat het eerder kentert dan de hoofdstroom.

4.9 Golven

De opwekking van golven door de wind wordt beperkt door de strijklengte en de diepte. Het golfklimaat en de effecten daarvan variëren dus sterk met het getij. Strijklengten zijn beperkt tot ca. 6 km in diep water en rond 10 km in het algemeen. Geulen zijn niet breder dan ca. 1 km. Winden van 5-10 m/s wekken hierin golven op van 0,3 - 0,6 m respectievelijk 0,1 - 0,25 m met perioden van 1-2 seconden. Onder extreme omstandigheden zijn golven van 0,75 - 1,5 m mogelijk met perioden van 3-4 seconden. In ondiep water wordt de golfhoogte niet groter dan ca. 40% van de diepte. Golven die in ondiep water lopen breken als de diepte minder wordt dan 1,25 maal de golfhoogte.

De amplitude van de orbitale snelheden is onder normale omstandigheden 0,25 - 0,5 m/s in water van 1-2 m. De slag van de waterbeweging is 0,15 - 0,3 m. De snelheid en de slag nemen snel af met de diepten. Onder extreme omstandigheden kan de amplitude van de snelheden oplopen tot 0,5 à 1 m/s en de slag tot 0,5 - 1 m in water van 2-3 m; ook sterk afnemend met de diepte.

5. Transporten

5.1 Algemene transportpatronen

In het voorgaande zijn de bewegingen van het water in het algemeen, en van "zoet" en "zout" in het bijzonder, geanalyseerd.

Andere stoffen, die zijn opgelost in concentraties die de soortelijke massa niet wezenlijk beïnvloeden, voegen zich in dit patroon van convectieve transporten met een bijdrage van de turbulente dispersie in de naaste omgeving van een lozingspunt.

In het oostelijke deel van de Westerschelde betekent dit dat stoffen uit de zee en uit het westelijke deel binnentrekken langs de noordelijke oever en dat de fluviatiele invloed het meest merkbaar is langs de zuidelijke oever.

Bij transporten van sedimenten en andere vaste stoffen spelen ook de volgende factoren een rol:

- de partikels vallen onder invloed van de zwaartekracht;
- de turbulentie veroorzaakt een opwaarts gradient-transport;
- flocculatie beïnvloedt de valsnelheid van gesuspendeerde klei in belangrijke mate;
- via sedimentatie en erosie vindt interactie met de bodem plaats;
- relatief grote korrels bewegen deels of geheel langs de bodem, dus niet in suspensie, en
- de relatie tussen de waterstroom en het transport van vaste stoffen is daardoor complex, niet lineair en soms discontinu.

Het gevolg is dat er in het algemeen geen directe relatie bestaat tussen de stromen en de transporten en zeker niet tussen de reststromen en de resulterende transporten.

Die resulterende transporten zijn het verschil van relatief grote eb- en vloedbewegingen. Ze worden in belangrijke mate bepaald door tweede-orde verschijnselen zoals:

- a-symmetrie van de horizontale getijbeweging;
- a-symmetrie in de processen van erosie en afzetting;
- de secundaire stromen veroorzaakt door dichtheidsverschillen, de massa-traagheid en de bodemwrijving, en
- de invloed van golven.

grote tab.

Het gevolg is dat de resttransporten, naast de reguliere variaties met het halfdaagse getij, de veertiendaagse spring/dood cycli en de seizoenen, ook sterk onder invloed staan van storingen door wind en rivierafvoer.

5.2 De sedimenten

Blijkbaar als gevolg van intensieve bewegingen, vertonen de sedimenten in de geulen en op de morfologisch dynamische ondiepten een grote homogeniteit. Fijne afzettingen worden vooral gevonden in typische sedimentatiegebieden op de hoge platen, de slikken en de schorren.

Analyses van 35 bodemonsters in de geulen ten oosten van Hansweert [Van Rijn, 1983] gaven als resultaat:

	Gemiddeld	Variatie
D ₁₅	160 µm	135-190
D ₅₀	220 µm	185-250
D ₈₅	275 µm	230-320

Het gehalte aan fijn materiaal is in deze bodemonsters zeer gering; enkele procenten kleiner dan 16 µm en tot ca. 7% kleiner dan 50 µm. Figuur 5.1A geeft het korrelverdelingsdiagram van deze afzettingen.

Het percentage slib (< 50 µm) in de afzettingen is groter naarmate de waterbeweging zwakker is. De afzettingen in gebaggerde geulen bevatten, naar schatting, 0 - 5% slib; wat hoger 10-20% op plaatsen met sterke sedimentatie. Dat laatste materiaal komt ook voor op hoge platen. Daar, en op de slikken en schorren, komen ook veel hogere slibgehalten voor. Het afzettingsproces leidt daar ook tot een afwisseling van min of meer zandige laagjes en tot zandige oeverwallen naast zwaardere kommen. De hoogste slibgehalten (85 - 90%) komen voor in havens en hun toegangen. In deze afzettingen komt ook meer organische stof voor.

De consistentie van de afzettingen (en daarmee hun resistentie tegen erosie) hangt, naast de slib/zandverhouding, sterk af van de mate van consolidatie of rijping. Figuur 5.2 [Allersma, 1988, IV] geeft hiervan een algemeen beeld

Verkleen de
matten

↓ dit moet je er wel bij nemen
denk ik.

in het geval van minerale afzettingen. Een beperkt percentage slib blijkt al een aanzienlijke invloed te hebben op de eigenschappen van de bodem.

5.3 Suspensies

Analyses van 6 monsters van gesuspendeerd materiaal, uit het gebied ten zuidoosten van Hansweert, geven de volgende karakteristieken van de korrelverdeling (zie ook Figuur 5.1A).

	Gemiddeld	Variatie	Valsnelheid
D ₁₀	95 µm	85 - 100	
D ₅₀	145 µm	130 - 160	0,013 - 0,018
D ₉₀	200 µm	180 - 225	m/s

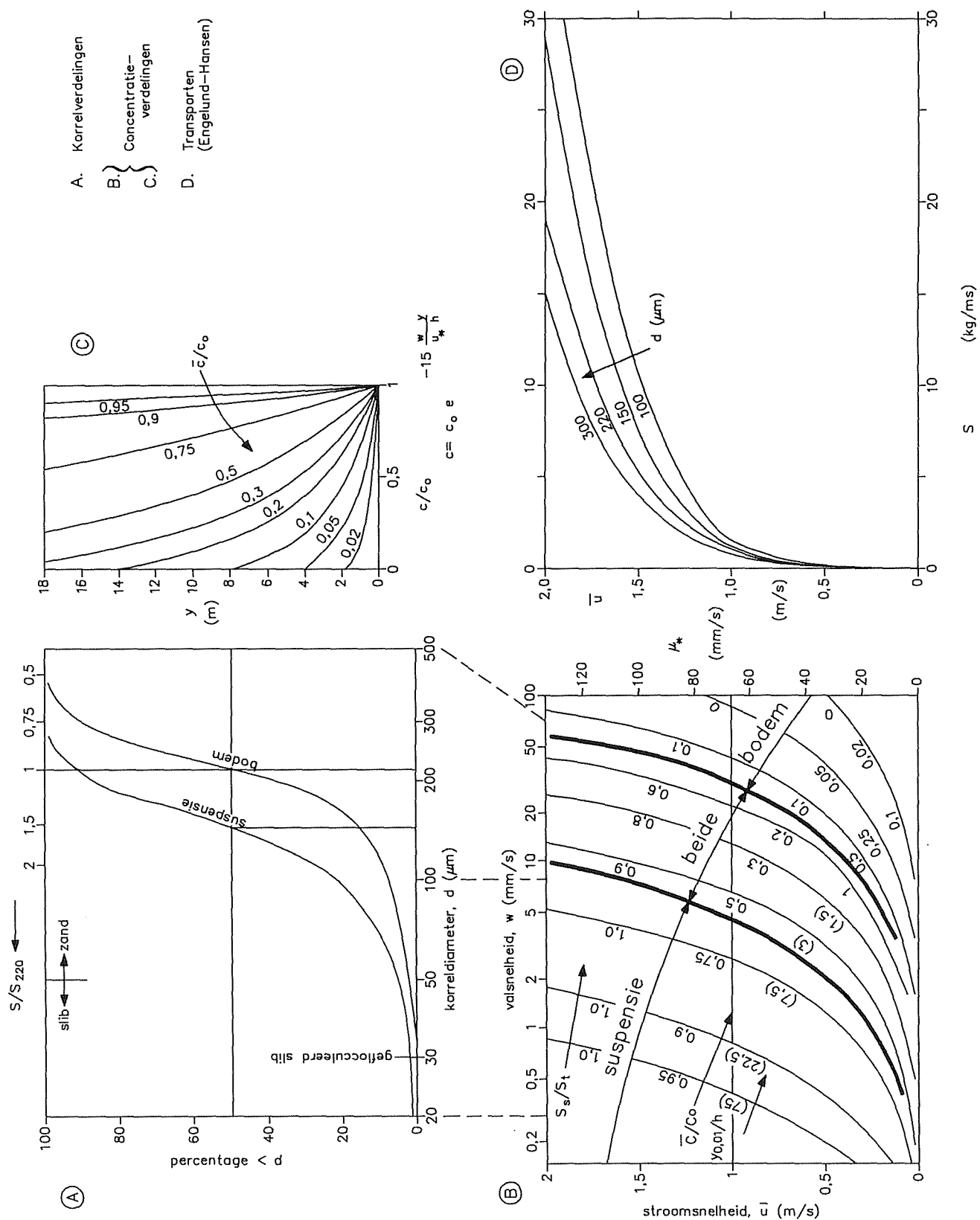
Hierin komt, afhankelijk van de omstandigheden, meer of minder slib voor.

Gedurende metingen, bij een relatief groot tijverskil, in het zuidengat in 1974 en 1975 varieerde de slibconcentratie tussen 40 en 120 g/m³ terwijl de concentratie aan zand, veel sterker afhankelijk van de stroomsnelheid, varieerde tussen 5 en 80 g/m³.

Regelmatige oppervlakte-bemonsteringen (zie ook Figuur 4.3) tonen een variatie van de slibgehalten in het oostelijk deel van de Westerschelde tussen, gemiddeld, 20 à 25 g/m³ in de zomer en 40 à 60 g/m³ in de winter.

Bepalingen van de isotopenverhouding C12/C13 (Figuur 4.3C) geven een indicatie van de menging van sedimenten van fluviatiele en mariene oorsprong in het estuarium [Van Maldegem, 1989]. Het patroon van reststromen (Sectie 4.5) leidt tot een relatief ver binnendringen van marien materiaal langs de noordelijke oever en een ver zeewaarts reikende invloed van de rivier langs de zuidelijke oever.

Het volume onder N.A.P. van het oostelijk deel van de Westerschelde, tussen Hansweert en de grens, is gemiddeld ca. 0,5 km³. Uit een aantal metingen op diverse punten in het gebied, over de diepte en over getijperioden [Van Rijn, 1983] volgen karakteristieke concentraties van 70 g/m³ voor slib en 60 g/m³ voor zand. In totaal is het hele gebied dus globaal 35.000 ton slib en 30.000 ton zand in suspensie; samen 65.000 ton.

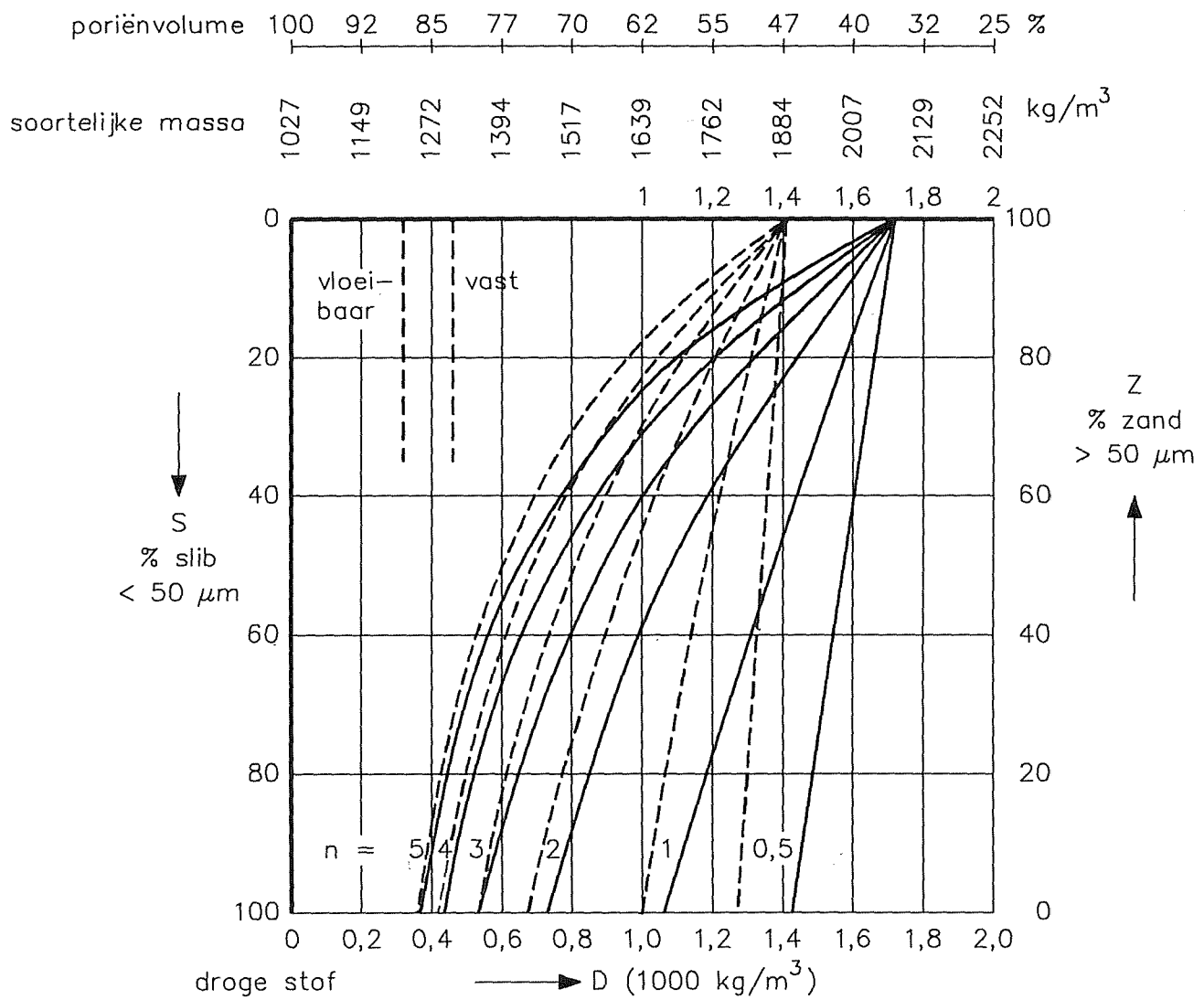


SEDIMENT TRANSPORTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 5.1



mate van consolidatie (n) =		3	2	1,5	1	0,7
onrijp		LW		HW		rijp

?
symbol
inley figuur

EIGENSCHAPPEN VAN AFZETTINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 5.2

De waargenomen concentraties zijn te laag om de eigenschappen van het water als vloeistof merkbaar te beïnvloeden. Wel neemt de extinctie-coëfficiënt voor licht, ongeveer evenredig met de concentratie, toe.

De valsnelheid van de zandkorrels neemt toe van 7 à 10 mm/s bij korrels van 50 µm tot ca. 75 mm/s bij korrels van 0,5 mm (zie Figuur 5.1). Bij klei treedt flocculatie op, leidend tot valsnelheden in de orde van 0,5 - 1 mm/s [Migniot, 1977]; in rustig water nog wel hoger.

5.4 Transportmechanismen

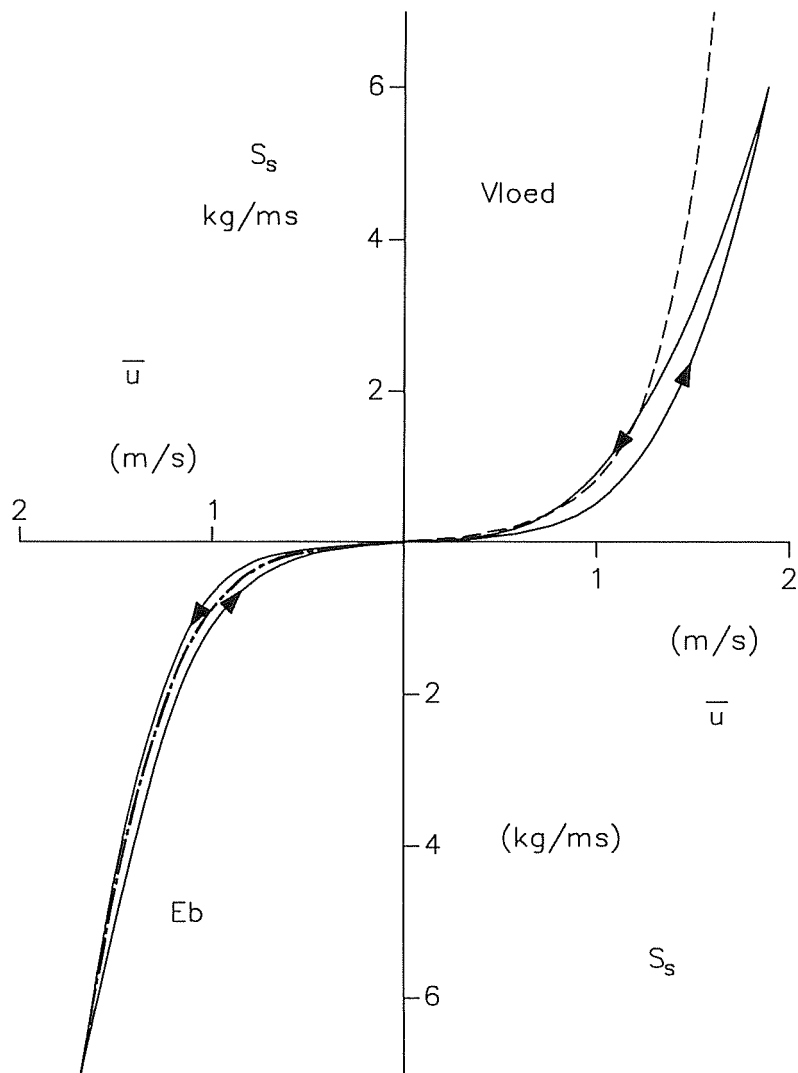
De sedimenten worden door het water getransporteerd, òf schuivend langs de bodem als bodemtransport òf gesuspendeerd in de massa van het water. Er blijkt een vrij direct verband te bestaan tussen de stroomsnelheid en het transport bij bodemtransport van relatief grof zand en bij suspensietransport in het geval van fijn materiaal waarvan de concentratie weinig varieert. In het domein van het fijne zand blijkt geen eenduidig verband te bestaan in een oscillerende stroom.

Een analyse van de transporten door het tracé van de Oeververbinding [Van Rijn, 1982] leidt tot de volgende gemiddelde relaties voor het suspensie-transport (kg/ms)

	Eb	Vloed
Versnellend	$S_s = 0,58 \bar{u}^{5,2}$	$S_s = 0,49 \bar{u}^{4,1}$
Vertragend	$S_s = 0,94 \bar{u}^{4,3}$	$S_s = 0,84 \bar{u}^{3,2}$

Figuur 5.3 laat zien dat de transporten bij een versnellende stroom kleiner zijn dan die bij een vertragende stroom. De lussen duiden op een faseverschil tussen de stromen en de transporten; zodanig dat de transporten achter lopen bij de stroom.

De bekende transportformules voor sedimenten gelden voor een permanente eenparige stroom in een kanaal met homogene bodem, bestaande uit niet cohesief korrelmateriaal (Figuur 5.1). Het transport van zeer fijn materiaal in suspensie vertoont gelijkenis met het transport van opgeloste stoffen via advectie en diffusie.



gemeten
Engelund-Hansen $S_s = 0,6 \bar{u}^5$

WAARGENOMEN RELATIES STROOMSNELHEID-
TRANSPORT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 5.3

VERKLARING SYMBOLEN

-34-

In het volgende wordt eerst ingegaan op het gedrag van de sedimenten in een permanente eenparige stroom en vervolgens op de processen in oscillerende watermassa's.

a. Permanent eenparig transport

Een relatief goede en eenvoudige formule, voor het totaaltransport van korrelig materiaal met een diameter groter dan ca. 100 μm , is die van Engelund en Hansen [Engelund and Hansen, 1967]

$$S_t = 0,05 \frac{\rho_s \bar{u}^5}{\Delta^2 g^{1/2} C^{3/2} d_{50}} \quad \text{of} \quad 0,05 \frac{n^3 \rho_s \bar{u}^5}{\Delta^2 g^{1/2} h^{1/2} d_{50}} \quad (5.1)$$

In Figuur 5.1D is dit verband weergegeven voor zand van verschillende diameters in water met een diepte van ca. 15 m.

In een suspensie treedt transport in verticale en horizontale richting op. Verticaal valt het materiaal (w) en wordt het opwaarts getransporteerd door de diffusie (D)

$$s_v = w c + D \frac{dc}{dy} \quad \text{concentratie verandert in de richting?} \quad (5.2)$$

$$\text{met voor } s_v = 0, \quad c = c_o e^{-wy/D} \quad \text{en} \quad \bar{c} = c_o \frac{D}{wh} (1 - e^{-wh/D}) \quad (5.3)$$

Een eenvoudige uitdrukking voor de gemiddelde diffusiecoëfficiënt is

$$D = \frac{1}{15} u_* h \quad (5.4)$$

Het horizontale transport in suspensie is

$$s_s = \int_0^h u c \, dy \quad \text{of globaal} \quad s_s = \bar{u} \bar{c} h = \frac{c_o D \bar{u}}{w} (1 - e^{-wh/D}) \quad (5.5)$$

Enkele van deze relaties zijn weergegeven in Figuur 5.1B en C.

Voor zand wordt vaak uitgegaan van een verband tussen de stroomsnelheid en de concentratie bij de bodem (c_o) die min of meer is gerelateerd aan

een wel bij
rijbewijst
verhuist water
deze vinnende
concentratie

het bodemtransport. Voor fijn en cohesief materiaal bestaan geen betrouwbare relaties. Bekend is dat de concentraties in een permanente eenparige stroom zeer hoog kunnen oplopen boven een bodem van dit materiaal.

De Figuren 5.1B en C suggereren dat bij $\bar{c}/c_0 < 0,1$ à $0,2$ het suspensie-transport gering is vergeleken bij het bodemtransport. Het diagram toont een globale schatting van de verhouding tussen suspensietransport en totaaltransport (s_s/s_t) afhankelijk van $\bar{c}/c_0$. Vooral bij de grovere zanden is het suspensietransport relatief gering en overheerst het bodemtransport; vooral bij lagere snelheden.

Uit deze globale analyse blijkt dat het slib voornamelijk wordt getransporteerd als suspensie. Het fijne zand vormt een overgang en wordt dan ook veel in suspensie waargenomen. Het grovere zand, ca. 60% van het bodemmateriaal, beweegt zich voornamelijk als bodemtransport.

b. Oscillerende transporten

In dit geval varieert de stroomsnelheid in grootte en richting. Ook de waterstand varieert hetgeen vooral in ondiepe gebieden kan leiden tot aanzienlijke variaties van de waterdiepte; tot droogvallen toe.

Het bodemtransport beweegt in een dunne laag over de bodem, praktisch synchroon met de stroom. Dit betreft dus een groot deel van het grovere zand en veel van het fijnere zand.

Figuur 5.4 geeft een beeld van processen rond suspensietransport in een oscillerende stroom. Het betreft resultaten van een berekening met een één-dimensionaal verticaal model (een prismatisch kanaal) met een sinusoidaal verloop van de snelheid. De randvoorwaarden aan de bodem zijn:

$$\begin{aligned} \text{- Erosie: } E_e &= -m \left(\frac{\tau - \tau_e}{\tau_e} \right)^n \text{ voor } \tau > \tau_e \\ &= 0 \text{ voor } \tau \leq \tau_e \end{aligned} \quad (5.6)$$

met $n = 1$ voor cohesief materiaal

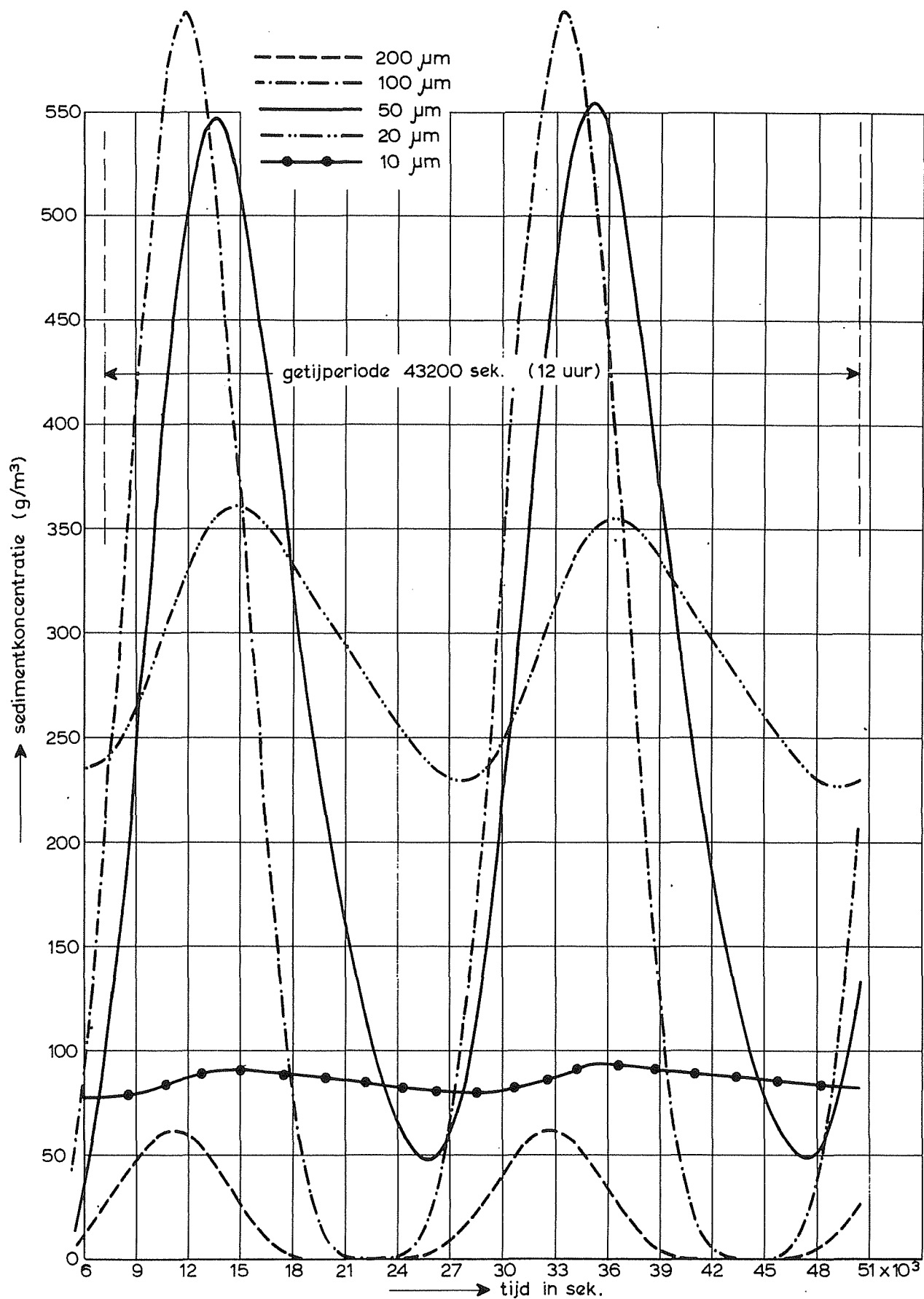
$n = 2$ voor fijn zand

$m = 0,02$ voor fijn zand

$u_{*e} = 10$ mm/s voor $d = 100$ μm

12 mm/s voor $d = 200$ μm

13 mm/s voor $d = 400$ μm



GEMIDDELDE CONCENTRATIE
GEDURENDE EEN GETIJPERIODE

Voor slib hangt u_{*e} sterk af van de aard van het materiaal en de mate van consolidatie. De erosie van echte slibbodems is in dit gebied niet relevant.

$$\begin{aligned} - \text{Afzetting: } E_a &= w c \frac{\tau_a - \tau}{\tau_a} \quad \text{voor } \tau < \tau_a \\ &= 0 \quad \text{voor } \tau \geq \tau_a \end{aligned} \quad (5.7)$$

Bij zand is τ_a relatief groot zodat bij benadering geldt $E_a = w c$

Figuur 5.4 is een duidelijke illustratie van het (berekende) gedrag van sedimenten van verschillende korrelgrootte in een oscillerende stroom [de Reus, 1979].

Het cohesieve slib (10 μm) erodeert moeilijk en valt langzaam zodat het een vrijwel constante evenwichtsconcentratie vertoont en een transport dat vrijwel evenredig is met de stroomsnelheid. Het materiaal van 20 μm vertoont een hoger gemiddelde en grotere variaties van de concentratie. Het transport loopt achter op de stroom. Bij 50 μm gebeurt dit in nog sterkere mate. Het grovere materiaal (100 μm en 200 μm) valt vrijwel geheel op de bodem rond de kentering. Vooral bij 200 μm is het de val-snelheid die de concentraties laag houdt.

Een relatief eenvoudig één-dimensionaal verticaal model van de sediment-beweging in suspensie blijkt een handig middel te zijn om de processen globaal te simuleren en schattingen te maken van de relevante parameters.

c. Vormen van transport

Uit het voorgaande volgt dat er drie vormen van transport vallen te onderscheiden:

- a. Spoeltransport van het slib in suspensie dat 50% van het transport en 5% van het bodemmateriaal uitmaakt;
- b. Suspensietransport van de fijnere ca. 40% van het zand, en
- c. Voornamelijk bodemtransport van de grovere 60% van het zand.

De vormen b en c overlappen enigermate in een korrelgrootte-gebied dat verschuift met de stroomsnelheid.

5.5 Locale transporten

bron? De afstand die gesuspendeerd fijn slib per getij aflegt is vrijwel gelijk of iets kleiner dan de bewegingen van het water (zie Sectie 4.3). De bewegings-snelheid van korrels in het bodemtransport is in de orde van de schuifspanningssnelheid (ca. 1/15 van de gemiddelde snelheid) gedurende de perioden dat de kritieke schuifspanning wordt overschreden. De afstand die per eb/vloed wordt afgelegd is beperkt: één tot enkele golflengten van megaribbels en duinen bij het grovere materiaal tot een kilometer bij fijner zand. Van het laatstgenoemde materiaal beweegt zich ook een deel over grotere afstanden in suspensie.

Naast faseverschillen in de tijd (Figuur 5.4) treden er ook verschillen in de ruimte op. Eenzelfde watermassa passeert, in de loop van de tijd, door gebieden met verschillende stroomsnelheid, diepte en bodemgesteldheid. Die geschiedenis bepaalt de sedimentconcentratie op het moment dat het water een bepaal punt passeert. Om deze redenen mag een directe relatie tussen stromen en transporten alleen worden verwacht in eenvoudige situaties. En zelfs daar leidt het verticale transportproces tot "lussen" (Figuur 5.3).

Figuur 5.5 toont de resultaten van een viertal metingen:

- A: op een locatie in het Zuidergat bij Baalhoek in 1974 en 1975, en
- B: gelijktijdig op twee locaties in het Zuidergat en de mond van de Schaar van Waarde bij Waarde.

De eerstgenoemde locatie bevindt zich min of meer in een prismatische geul; de andere twee liggen midden in de geul en bij de noordelijke oever.

Hoewel de locale bodemgesteldheid in alle gevallen gelijksoortig is vertonen de concentraties van zand en slib grote variaties die slechts in enkele gevallen kunnen worden gecorreleerd met overeenkomstige variaties van de stroomsnelheid. De, uit deze metingen berekende, locale transporten van slib en zand, per getijfase en resulterend, zijn gegeven in Tabel 5.1.

De metingen bij Baalhoek vertonen duidelijk de invloed van het tijverschil. Opmerkelijk is verder dat de resulterende transporten van slib (met het water in eb-richting) en zand (door de tijdelijke sterke vloedstroom) consistent verschillend van richting zijn. Bij Waarde bewegen de beide sedi-

ment-soorten gelijk maar hier verschilt de richting per locatie; in het midden van de geul in eb-richting (met de stroom) en in het noorden in vloed-richting.

Plaats	A Baalhoek		B Waarde	
	1974	1975	Midden	Noord
<u>Slib</u>				
Eb	15,7	30,6	41,1	38,0
Vloed	<u>15,2</u>	<u>23,2</u>	<u>28,2</u>	<u>43,2</u>
Resultierend	0,5 e	7,4 e	12,9 e	5,2 v
<u>Zand</u>				
Eb	16,2	23,9	24,8	9,2
Vloed	<u>16,4</u>	<u>30,8</u>	<u>13,3</u>	<u>23,9</u>
Resultierend	0,2 v	6,9 v	11,5 e	14,7 v
Tijverschil	4,5	5,1	5,25 m	

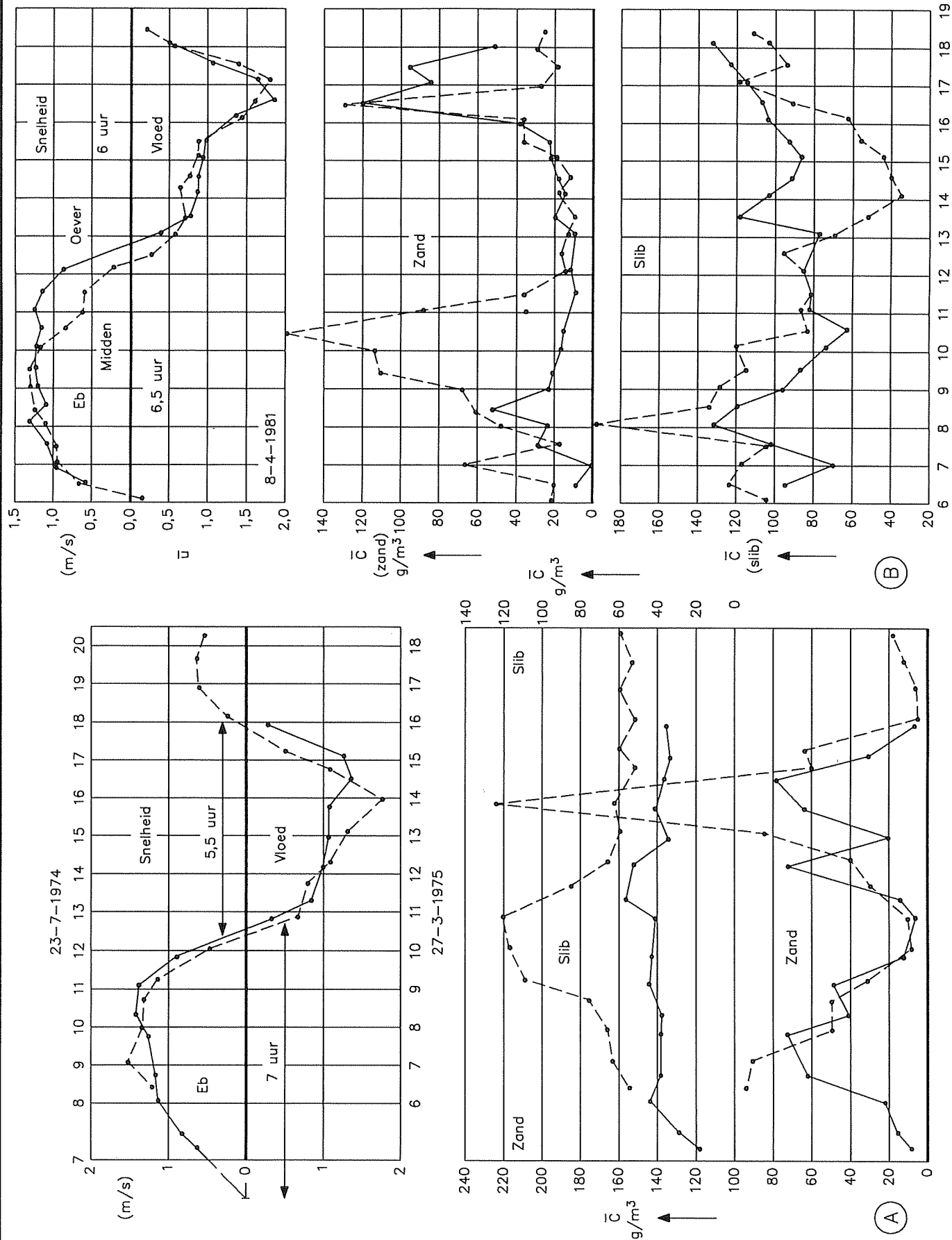
Tabel 5.1 Gemeten suspensietransporten (ton/m, getij)
bij Baalhoek en Waarde [Van Rijn, 1983]

5.6 Jaarlijkse transporten

Een ruwe schatting van de jaarlijkse transporten kan worden verkregen, uit gegevens van metingen, via integratie in ruimte en tijd en rekening houdend met variaties gedurende de springtij/doodtij-cyclus en de seizoenen. Tabel 5.2A toont het resultaat van zo'n bewerking voor het Zuidergat bij Baalhoek op grond van de metingen in 1974 en 1975 (Tabel 5.1A en Figuur 5.5A) met inachtname van:

- een breedte van de geul van 750 m;
- een variatie van de transporten (t.o.v. die bij een gemiddeld getij) tussen 50% bij doodtij en 200% bij springtij, en
- bij zand, een suspensietransport (S_s) dat 60% is van het totaaltransport (S_t) zie Figuur 5.1B.

De overeenkomst tussen de beide schattingen is alleszins acceptabel. De onnauwkeurigheid van het resttransport als verschil van twee grote transporten komt duidelijk naar voren. Een zeewaarts slibtransport van ruim één miljoen t per jaar en een inwaarts zandtransport van $1,5 \text{ à } 2 \times 10^6$ ton/jaar lijken aannemelijke schattingen.



METINGEN VAN STROOMSNELHEDEN EN CONCENTRATIES IN ZUIDERGAT (A) EN SCHAAR VAN WAARDE (B)

Gezien de waterbeweging, en de meting voor de oever bij Waarde (Figuur 5.5B), is een resulterend inwaarts transport van slib en zand over de platen van Valkenisse waarschijnlijk. Ook de vorm van de megaribbels in dit gebied en de afzetting van zand in het Nauw van Bath ten oosten van het gebied duiden op zo'n transport. De jaarlijkse hoeveelheden zijn mogelijk even groot of iets groter dan in het Zuidergat.

Deze globale overwegingen leiden tot een schatting van de totale transporten (eb + vloed) door de raai tussen Baalhoek en de Emanuelpolder van 35×10^6 ton slib per jaar en 60×10^6 ton zand per jaar; gemiddeld overeenkomend met 50.0000 ton slib per getij en 85.000 ton zand per getij. Van het laatste beweegt 50.000 ton in suspensie.

A. Transporten Zuidergat (10^6 ton/jaar)

	1974	1975
<u>Slib</u>		
Eb	8,9	9,1
Vloed	<u>8,6</u>	<u>6,9</u>
Resulterend	0,3	2,2
Totaal	17,5	16,0
<u>Zand</u>		
Eb	15,3	11,8
Vloed	<u>15,5</u>	<u>15,2</u>
Resulterend	0,2	3,4
Totaal	30,8	27,0

B. Baggerwerk (10^6 ton/jaar) in 1980-1989 (Figuur 6.7)

Baggeren		Storten	
Hansweert	3,8	Zeewaarts	3,1
Walsoorden	1,0	Schaar v. Waarde	1,6
Ov. van Valkenisse	2,5	Zimmerman	0,1
Dr. van Valkenisse	3,0	Boei 63	2,2
NW. van Bath	2,9	Konijnenschor	1,9
		Sch. v.d. Noord	0,5
		Appelzak	<u>0,1</u>
	<u>13,2</u>		9,5

Droge stof 1250 kg/m³

Tabel 5.2 Transporten in het Zuidergat (A) en baggerwerk (B) in de O-Westerschelde

5.7 Erosie en sedimentatie

Een beeld van de verplaatsingen van sedimenten in het gebied kan ook worden verkregen door meting van de erosie en de afzetting van materiaal in verschillende delen van het gebied. Figuur 5.6 geeft de (voorlopige) resultaten van kuberingen in zes vakken in het oostelijke deel van de Westerschelde [v.d. Berg, 1991] en van metingen van het getijvolume in het Land van Saeftinge (VI). Zie ook Hoofdstuk 6. Bij deze berekeningen is rekening gehouden met het baggeren en storten.

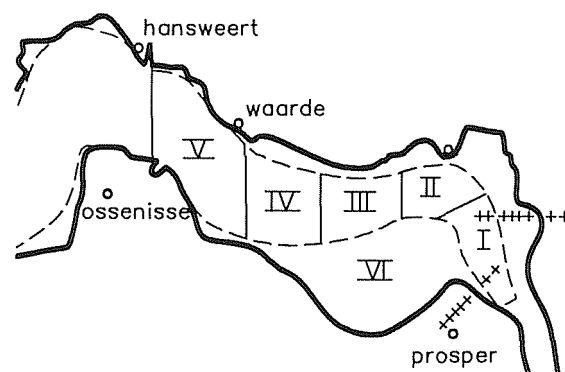
De "natuurlijke" afzettingen in het hele gebied zijn gemiddeld $2,8 \times 10^6$ ton/jaar. Deze hoeveelheid komt bevredigend overeen met het beeld dat uit de transportmetingen is verkregen. De afzettingen in het Land van Saeftinge bevatten veel slib; die in de andere gebieden zijn zandig.

5.8 Baggerwerk

Het baggerwerk is een bijzondere vorm van sedimenttransport in het gebied. Het materiaal wordt op bepaalde plaatsen aan het systeem onttrokken terwijl er op andere plaatsen materiaal aan wordt toegevoegd. Het gebaggerde materiaal wordt door sedimentatie weer aangevuld en van het gestorte materiaal wordt het grootste deel weer door de stromen weggevoerd.

Tabel 5.2B geeft een globaal overzicht van de hoeveelheden die per jaar worden gebaggerd en gestort. De specie die op Nederlands gebied wordt verplaatst bevat over het algemeen 90-95% zand; op Belgisch gebied neemt dit af naar 60 à 70% [Belmans, 1988]. Bij het baggeren spoelt ca. 50% van het slib over boord. Dit betekent dat er rond 10×10^6 ton zand wordt verplaatst door baggeren en dat er $2 \text{ à } 3 \times 10^6$ ton slib wordt opgebaggerd en geloosd; deels bij het baggeren en deels bij het storten.

Volgens Tabel 5.2A passeren er langs de baggerlocaties $40 \text{ à } 50 \times 10^6$ ton sedimenten per jaar; in het oosten vermoedelijk wat minder. Afgezien van enig beperkt baggerwerk is de sedimentatie per locatie 1 tot $4,5 \times 10^6$ ton/jaar dus 3 à 10% van het passerende materiaal. Deze hoge waarde is, gezien de zandigheid van het materiaal, aannemelijk.



Vak	V	IV	III	II	I	Tot.	10 ⁶
1965-75	+10,5	-8,0	-0,3	+10,5	-4,6	+8,1	m ³
1975-80	-3,6	-4,7	-1,7	+8,4	-2,7	-4,3	m ³
1980-85	+7,3	-2,3	-0,3	+10,7	+2,3	+17,7	m ³
1965-85	+14,2	-15,0	-2,3	+29,6	-5,0	+21,5	m ³
	+21	-22	-3,5	+4,5	-7,5	+33	t
Gem:	+1,05	-1,1	-0,18	+2,25	-0,38	+1,65	t/j

Vak	VI	+ 0,5x10 ⁶ m ³ /j = + 0,5x10 ⁶ t/j
-----	----	---

SEDIMENTATIE EN EROSIE IN HET OOSTELIJK
DEEL VAN DE WESTERSCHELDE

6. Morfologie

6.1 Geologie en geschiedenis

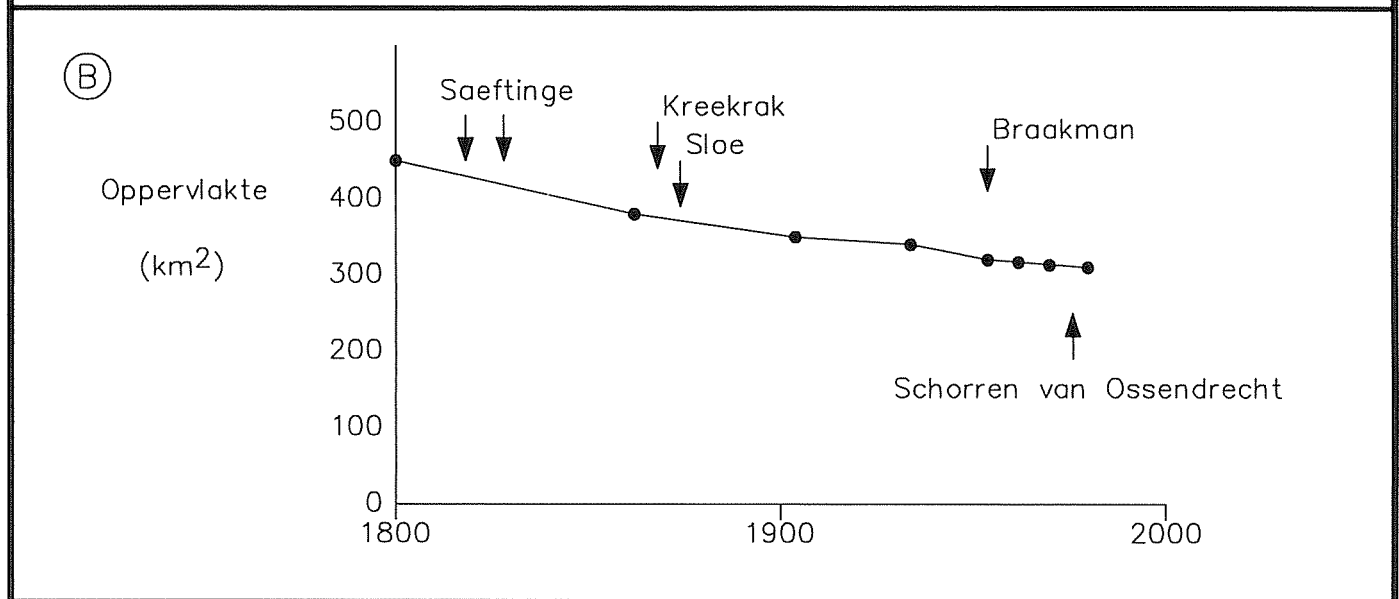
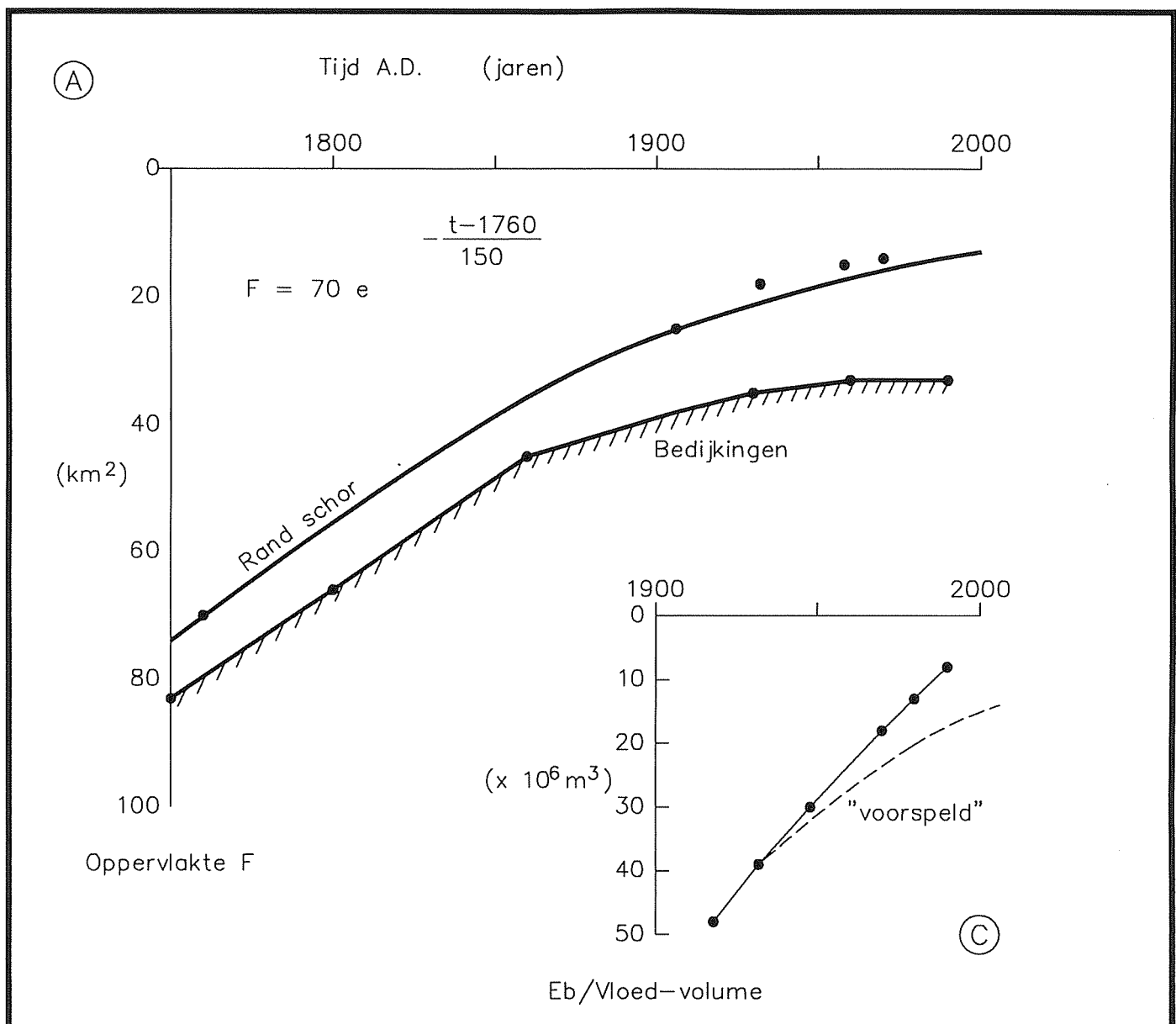
Gedurende de afgelopen 20 eeuwen heeft de benedenloop van de Schelde zich ontwikkeld van een riviértje, dat door een groot Holocene veengebied naar de Oosterschelde stroomde [Kiden, 1991], tot het huidige estuarium. Onder invloed van successieve transgressies is de Honte vanuit het westen het veengebied binnengedrongen. In het begin van de Middeleeuwen ontstond een doorbraak naar de Schelde die zich tegen het eind van de Middeleeuwen zodanig had ontwikkeld dat het getij en de scheepvaart langs deze weg tot Antwerpen konden doordringen. Het veenpakket werd van het westen naar het oosten geleidelijk vervangen of overdekt door nieuwe afzettingen van zand en klei tot een dikte van ca. 5 m, en meer in (vroegere) geulen. Bedijkingen, overstromingen en oorlogshandelingen bepaalden mede de ontwikkeling van het gebied. In de 16^e en 17^e eeuw ontstonden de verdrinken gebieden van Saeftinge, Reimerswaal en het Markiezaat van Bergen op Zoom.

Sinds het begin van de 18^e eeuw is weer sprake van een geleidelijke verlanding en inpoldering van grote gebieden. Figuur 6.1B toont de geleidelijke afname van de oppervlakte van het estuarium van ca. 450 naar 300 km² gedurende de afgelopen twee eeuwen. Naar schatting was met de gemiddelde verlanding van 0,8 km²/jaar een afzetting van 3 à 4 x 10⁶ m³/jaar gemoeid. De dammen in de Kreekrak en het Sloe scheidden de Westerschelde van de Oosterschelde.

Door de vorming van (ingepolderde) schorren is de komberging strek afgenomen. Daardoor, en door het baggeren, is de gemiddelde waterdiepte in het estuarium toegenomen. Het tijverschil bij Antwerpen is toegenomen van ca. 3 m in 1550 tot de huidige 5 m (zie ook Hoofdstuk 4).

6.2 De morfologische structuur

Het algemene beeld is een meanderend estuarium waarvan de geometrische schaal in zeewaartse richting toeneemt (zie Hoofdstuk 3). Deze vorm wordt mede bepaald door de relatief harde Pleistocene ondergrond, de dijken, de oever-verdedigingen en het baggerwerk.



VERLANDING VAN HET
 - LAND VAN SAEFTINGE (A) + (C)
 - TOTALE WESTERSCHELDE (B)

Binnen deze begrenzingen vertoont het estuarium een min of meer duidelijke hoofdgeul die heen en weer slingert tussen de buitenbochten van het estuarium. In de binnenbochten van de hoofdgeul bevinden zich relatief hoge platen. In het geval van het land van Saeftinge is dit gebied hoog opgeslibd en verbonden met de oever van het estuarium. In alle andere gevallen zijn de platen van de oever gescheiden door één of meer nevengeulen. Sommige lage platen worden doorsneden door kortsluitgeulen. Met de breedte van het estuarium neemt het aantal geulen in het dwarsprofiel af in stroomwaartse richting tot er, bij Antwerpen, nog een enkele geul over is.

De platen met de bijbehorende nevengeulen vormen min of meer zelfstandige kommen die door de vloed worden gevuld via een relatief diepe geul aan de zeezijde terwijl slechts een geringe watermassa de kom verlaat over een ondiepere rand aan de rivierzijde.

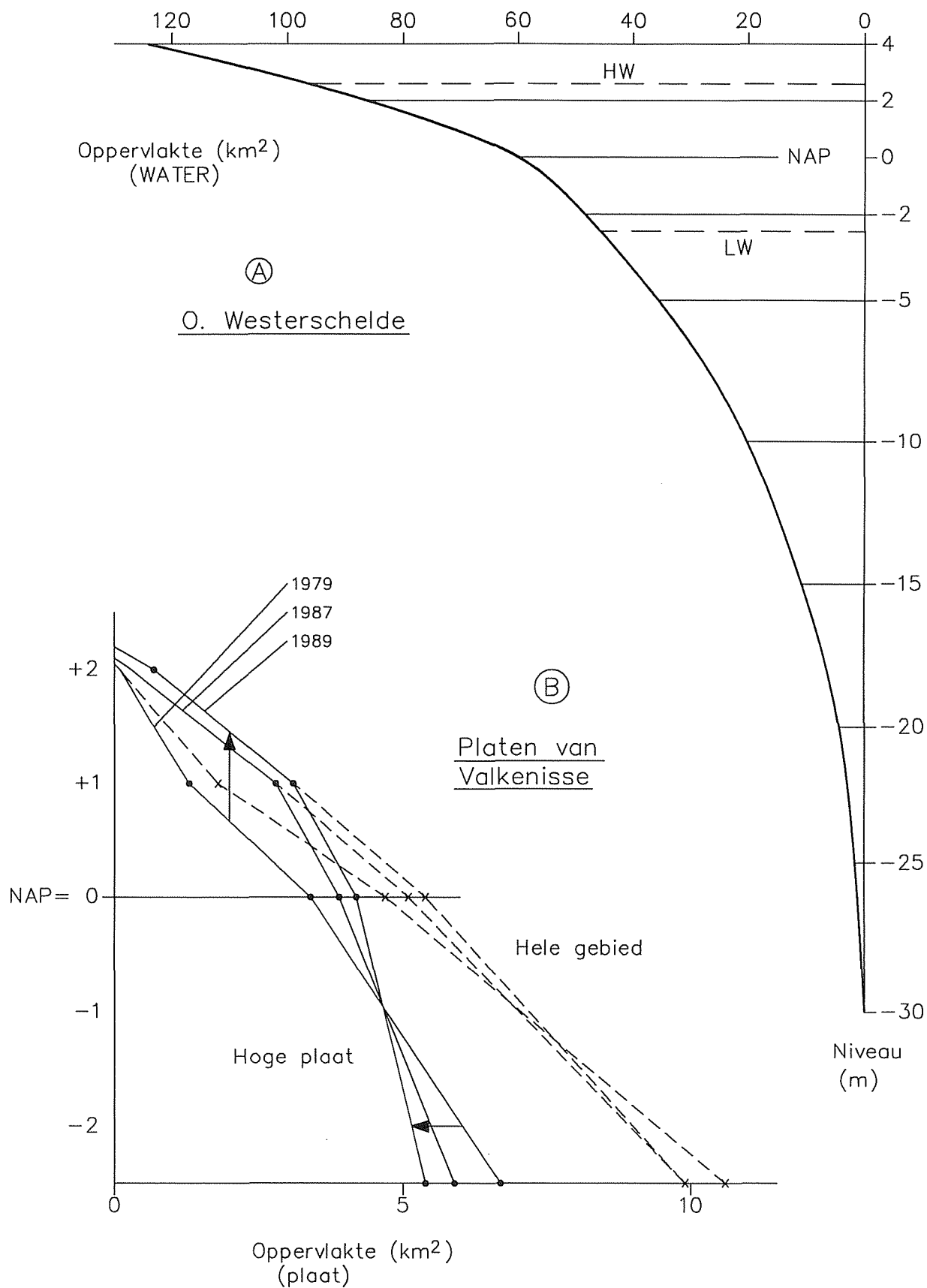
Figuur 6.26A laat zien dat ca. 30% van de oostelijke Westerschelde bestaat uit geulen onder L.W. Het inter-getijdegebied omvat bijna 40% en de rest bestaat uit schorren boven H.W. Ongeveer de helft van het gebied wordt ingenomen door platen en schorren boven N.A.P. De diepe geulen, onder NAP -15 m, beslaan ca. 10 km² met een lengte van bijna 25 km dus een gemiddelde breedte van 400 m.

6.3 Geulen

Het grootste deel van de water- en sedimentbewegingen in het estuarium speelt zich in de geulen af. Daar is de interactie tussen de stromen en de vormen sterk, op een schaal die relevant is voor het beschouwde gebied en de onderwerpen van deze studie.

Algemeen

Een typische geul bestaat uit een drietal elementen waarvan de onderlinge ligging afhankelijk is van het karakter van de geul: eb of vloed (zie Hoofdstuk 4). Aan de "bovenstroomse" zijde ontstaat de geul uit water dat, over drempels, toevloeit uit andere geulen. In het middelste deel vormt het verzamelde water een typische relatief diepe en eventueel gekromde geul. Vervolgens waaiert de stroom min of meer uit over een hoefijzervormige drempel die de geul aan het "benedenstroomse" einde afsluit. Deze hoefijzers sluiten aan bij elkaar en bij de oevers en platen. Voorbeelden zijn de geulen ten



OPPERVLAKTEN VAN WATER EN PLATEN
IN DE O. WESTERSCHELDE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 6.2

zuiden van de Spijkerplaat, de Schaar van Vlakenisse en de Zimmermangeul (hoefijzers aan beide einden) op de peilkaarten van 1986/87.

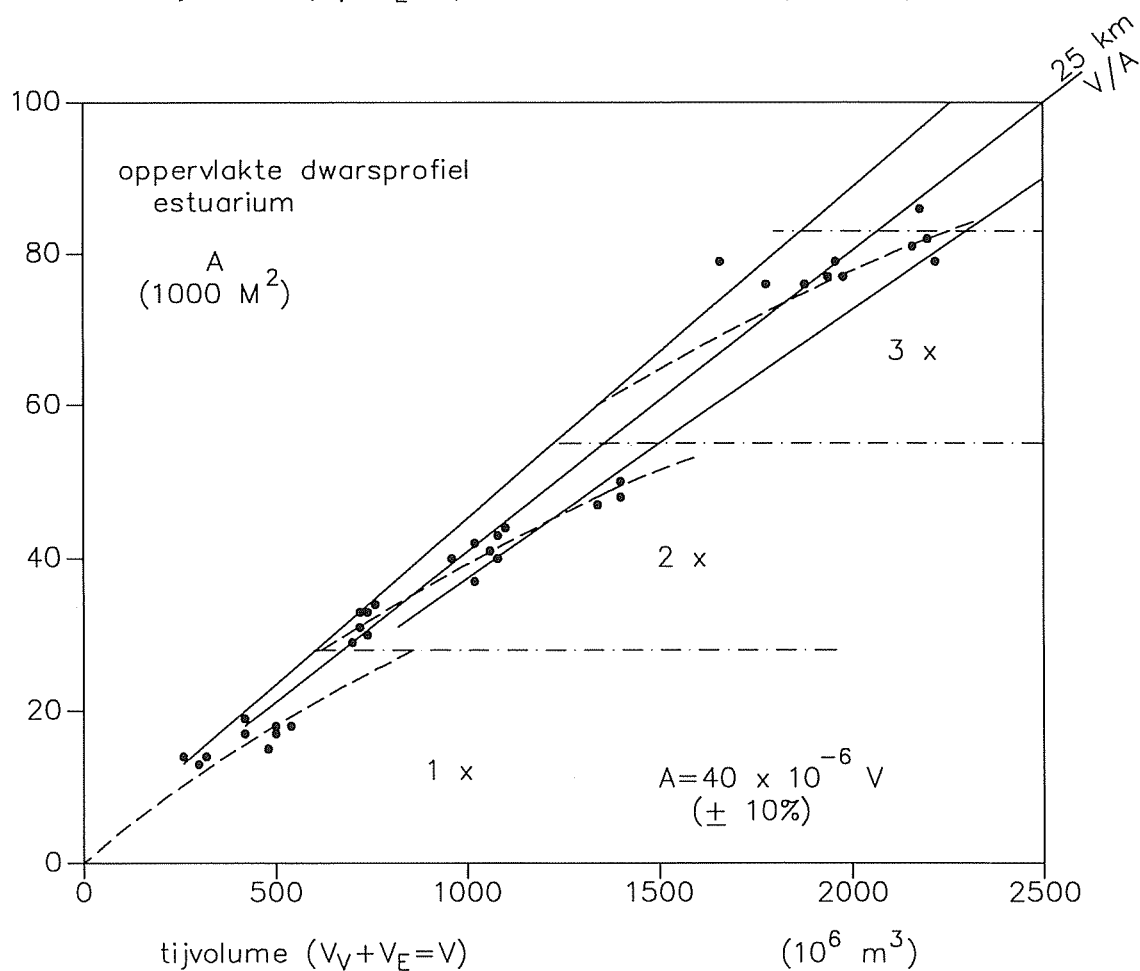
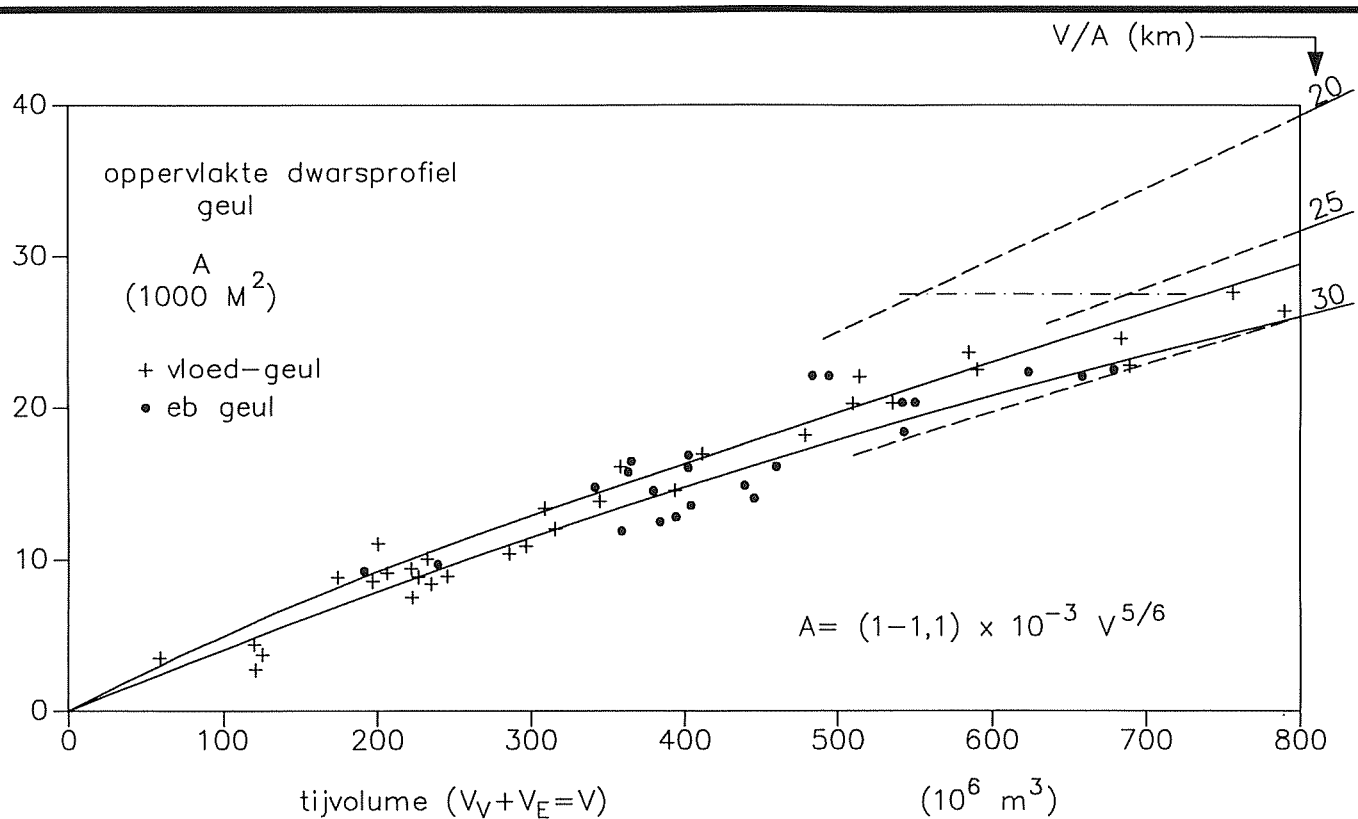
In verband met de berging neemt in het algemeen de capaciteit van een geul af in rivierwaartse richting. Tevens vloeit de eb bij lagere waterstanden dan de vloed (zie Figuur 4.2). Hierdoor, en ook door de afvoer van de river, zijn de hoofijzervormige drempels van de ebgeulen lager dan die van de vloedgeulen; vooral in het riverwaartse deel van het estuarium. De min of meer doorlopende hoofdgeul is daarom gevormd uit een reeks van eb-geulen, met min of meer ondiepe drempels of richels ertussen. Het baggerwerk op deze plaatsen heeft de vorming van deze doorgaande geul bevorderd.

In het algemeen hebben de hoofijzervormige drempels de neiging zich in de richting van de reststroom (beter het resttransport) te verplaatsen. De geulen verschuiven (vooral in bochten) in zijdelingse richting door erosie aan de ene zijde en afzetting aan de andere zijde. Ook kan de capaciteit van een geul in de tijd toe of afnemen. Het is deze "slangenkuil" van geulen die de morfologische dynamiek van het estuarium in hoge mate bepaalt.

De lengte van de "geulen" is in de orde van 2 tot 10 km. De breedte is in de orde van 10% van de lengte; in de kleinere geulen wat kleiner: tot 5%. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de stralen van enkele bochten. Die zijn minimaal drie maal zo groot als de breedte van de geul [Berben, 1985].

Oppervlakte van het dwarsprofiel

In het algemeen [Bruun and Gerritsen, 1960; Bruun, 1966; Eysink, 1979; Allersma, 1988 II; Eysink, 1979] blijkt er een verband te bestaan tussen de dwarsafmetingen van een alluviale geul en de stromen die er door vloeien. Figuur 6.3 toont de relaties tussen de oppervlakten (onder NAP) van de dwarsprofielen van geulen (A) en van het totale estuarium (B) in het geval van de Westerschelde en het getijvolume (= eb- + vloedvolume). De afzonderlijke geulen blijken "efficiënter" te zijn naarmate ze groter zijn. De verhouding V/A , een maat voor de getijweg en dus de stroomsnelheden, neemt toe van 20 naar 30 km. Er blijkt geen verschil te zijn tussen eb- en vloedgeulen en er zijn geen geulen groter dan ca. 27.500 m^2 ; overeenkomend met een getijvolume van ca. $800 \times 10^6 \text{ m}^3$.



RELATIES TIJVOLUME/DWARSPROFIEL VAN
GEULEN EN ESTUARIUM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 6.3

Volgens Figuur 4.1 bereikt het getijvolume van het estuarium ($\approx 2 \times$ het vloedvolume) deze waarde in de buurt van Hansweert. Reeds vanaf Doel bestaat het dwarsprofiel van het estuarium echter uit twee of meer geulen. Figuur 6.3B toont de relatie tussen de oppervlakte van het dwarsprofiel van het estuarium en het tijvolume ter plaatse van een 7-tal raaien. De som van meerdere geulen leidt tot een gemiddelde "efficiëntie": V/A ligt rond de 25 km; een waarde die ook elders in Nederland wordt gevonden. Of de herhaling van het kromlijnige verloop uit Figuur 6.3A de werkelijkheid weergeeft is niet duidelijk. De spreiding in de gegevens per raai is vrij groot (zie ook Gerritsen en de Jong, 1983; en Gerritsen 1990).

Breedte en diepte

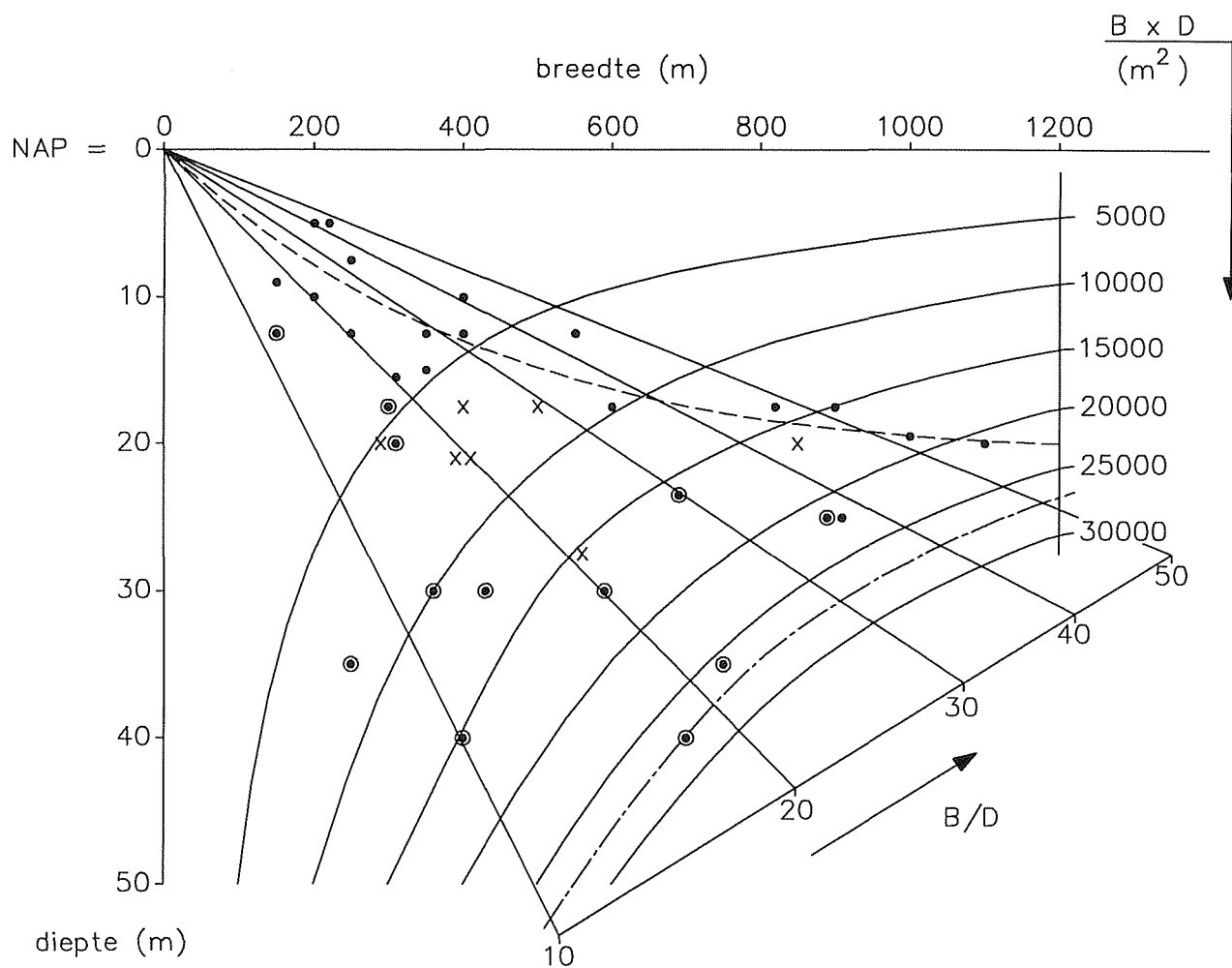
Voor de scheepvaart zijn de breedte en de diepte van een geul van belang. Die hangen, naast de oppervlakte van het dwarsprofiel, ook af van de situatie. Figuur 6.4 geeft de breedte/diepte relatie voor een aantal geulen ingedeeld naar drie categoriën van situaties:

- een rechte onbelemmerde geul;
- een geul die een min of meer scherpe bocht vertoont (zie ook Berben, 1985], en
- een geul die wordt ingesnoerd door een hard punt in de vorm van een verdigde oever of een hoofd.

De rechte stukken blijken relatief ondiep te zijn. Daar vindt men ook veelal de drempels. Een grotere diepte dan 20 m kan in deze situatie vrijwel niet voorkomen. Wel in bochten en bij insnoeiingen maar dan wordt de breedte beperkt.

6.4 De platen en schorren

Naast de relatief bewegelijke geulen vormen de platen en de hoge gebieden langs de oevers betrekkelijk stabiele elementen in het morfologische systeem. Ze staan slechts gedurende beperkte tijd onder weinig water met zwakke stromen (Figuur 6.5). Op de hogere delen hebben zich slikken en begroeide schorren ontwikkeld. Havens zijn verwante rustige bezinkingsgebieden.



• onbelemmerd (---) $B \approx 2,5 h^2$

x in een (scherpe) bocht

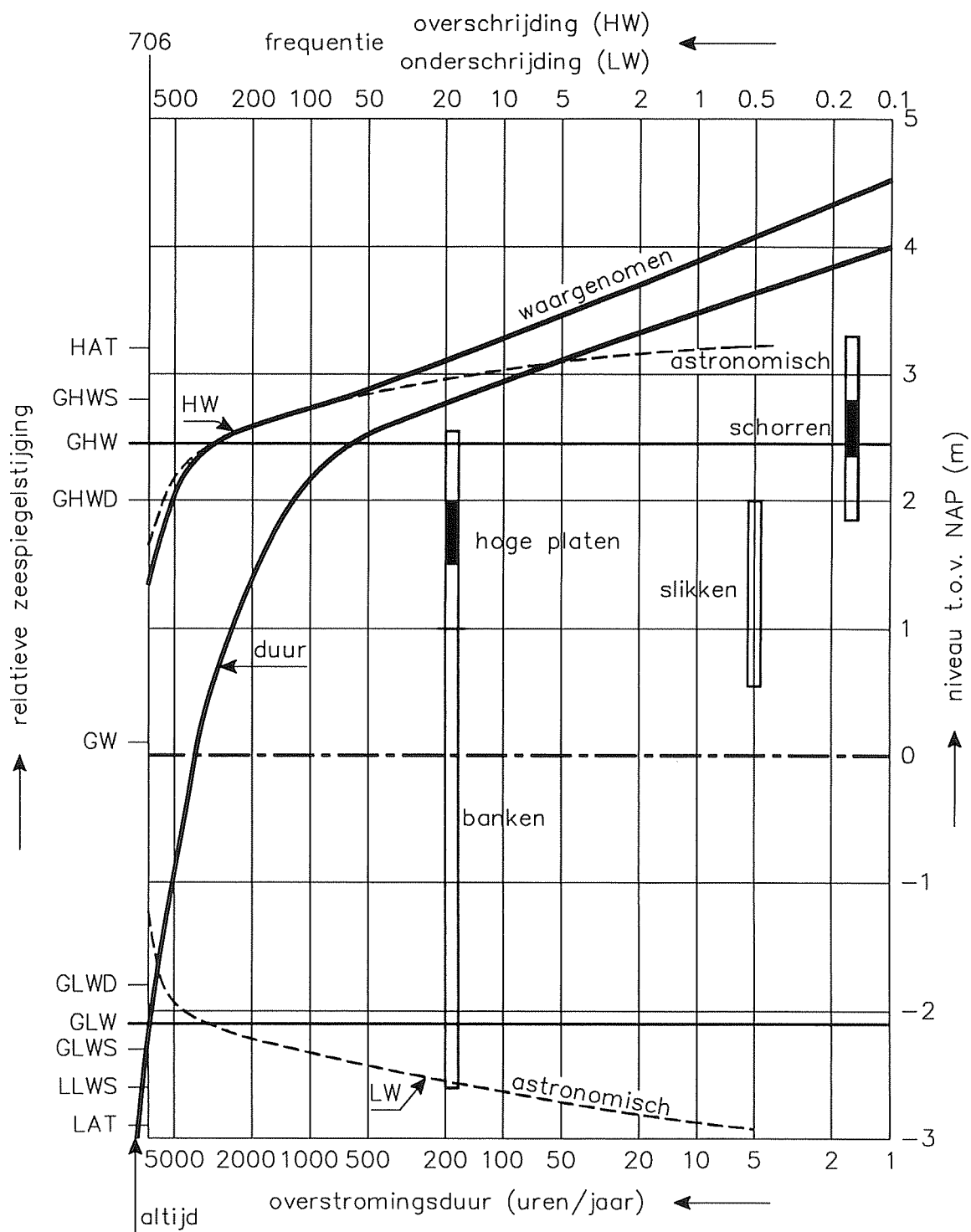
⊙ insnoering

BREEDTE/DIEPTE RELATIES VAN GEULEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 6.4



WATERSTANDEN EN HOOGTEN VAN BANKEN,
PLATEN, SLIKKEN EN SCHORREN

Ze vertonen allemaal een geleidelijke verticale groei; de stromen zijn te zwak voor erosie. Alleen horizontale erosie, door verplaatsende geulen, is in staat deze gebieden weer op te ruimen. Door lagere banken ontstaan soms kortsluitgeulen. Veel schorren zijn in de loop van de tijd ingepolderd. De havens worden op diepte gehouden met baggeren. Op de morfologische karakteristieken van deze gebieden wordt in het volgende iets dieper ingegaan.

Het land van Saeftinge

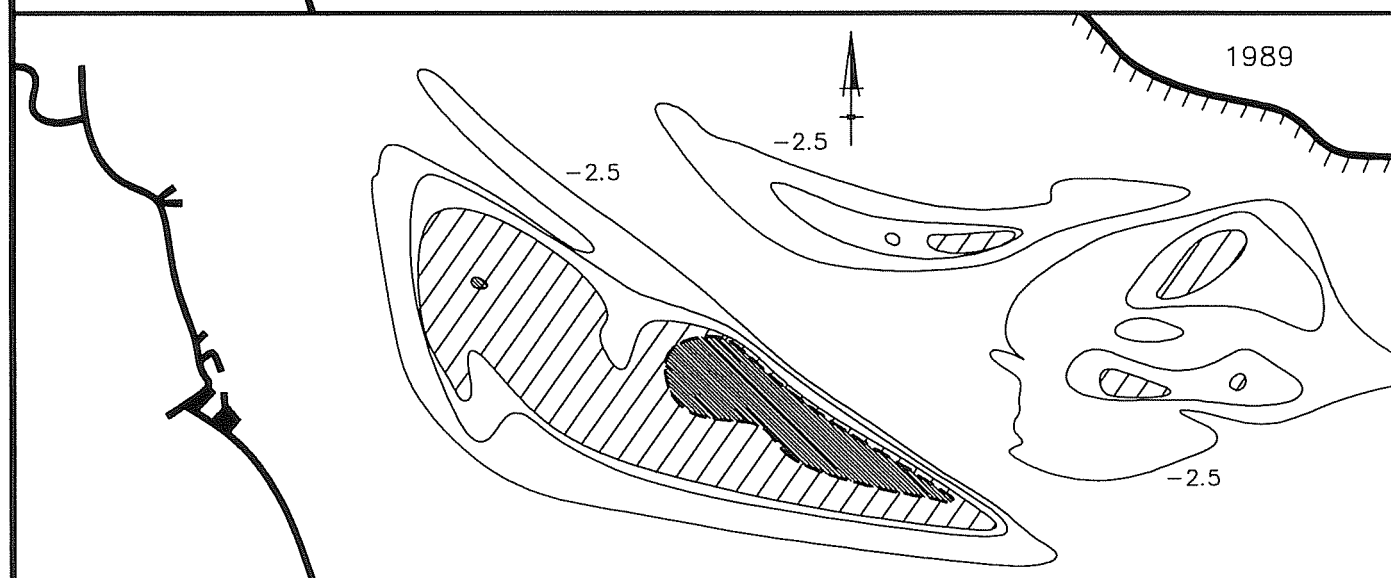
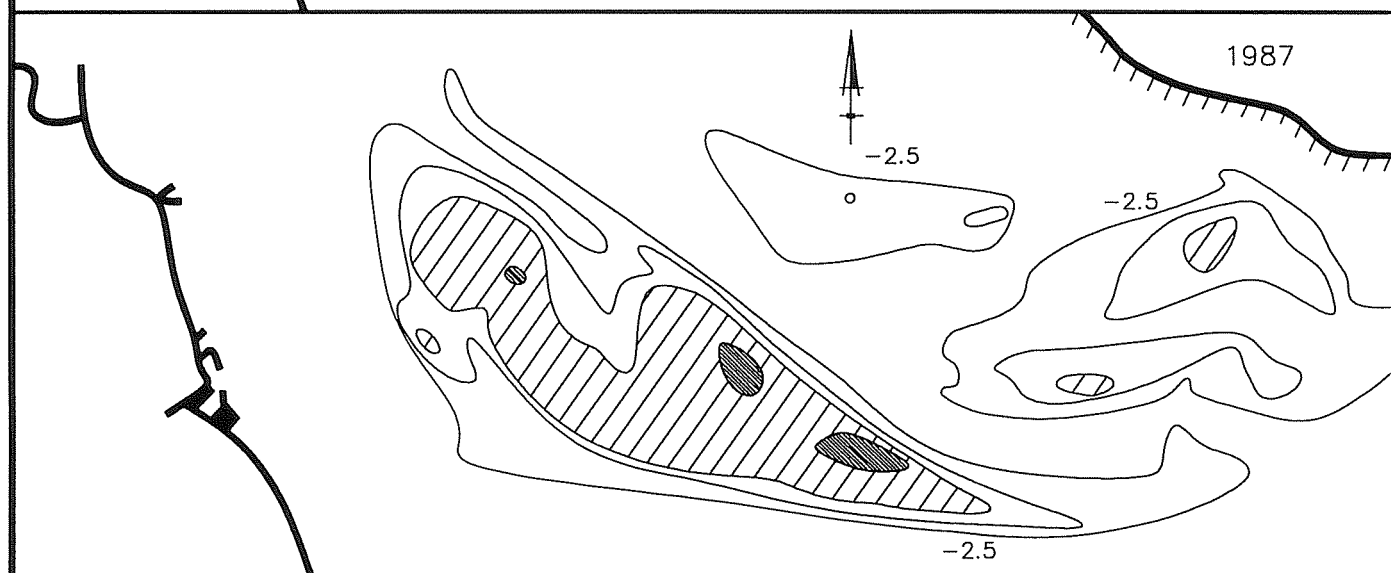
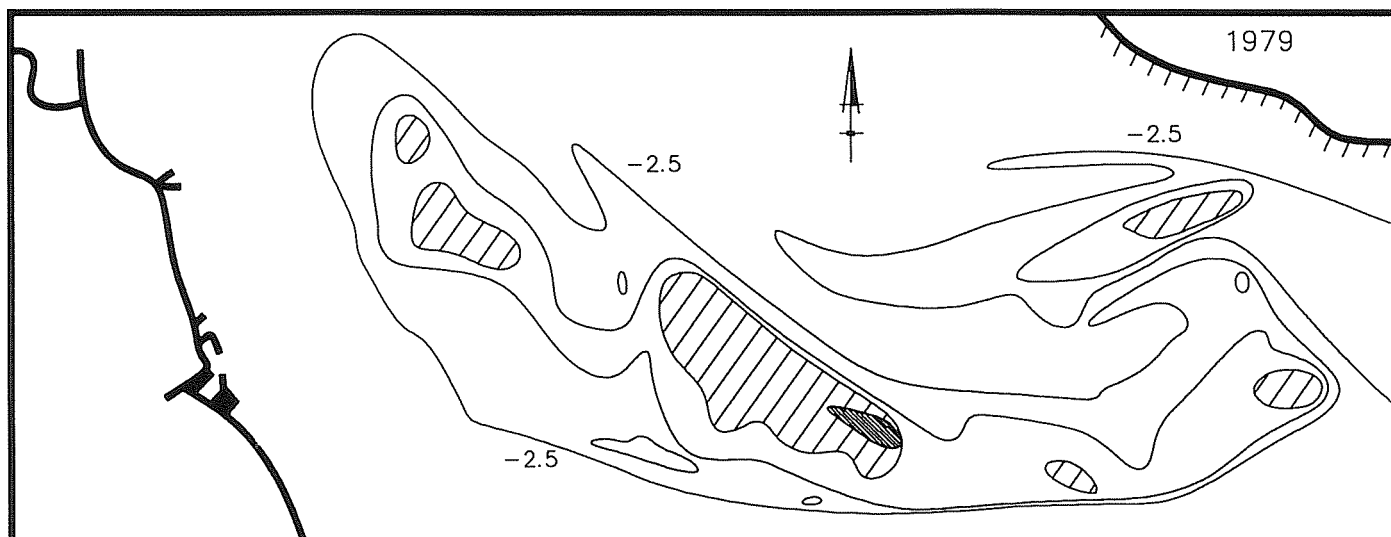
Na enkele calamiteiten in het begin van de achttiende eeuw is het land van Saeftinge, sinds ca. 1750, geleidelijk verland. De (deels gestimuleerde) vorming van schorren is steeds op de voet gevolgd door indijkingen.

Figuur 6.1 toont het gereconstrueerde [Coen, 1988] verloop van deze processen. De huidige laagwaterlijn is hierbij als begrenzing van het gebied genomen. Bij benadering vertoont de natte oppervlakte een negatief exponentieel verloop met een tijdconstante van 150 jaar.

Het volume van de afzettingen wordt geschat op $180 \times 10^6 \text{ m}^3$. De jaarlijkse sedimentatie nam af van ruim $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ rond 1750 tot ca. $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ rond 1900. Volgens [Rijkswaterstaat, 1989] neemt het getijvolume sindsdien nog steeds met $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ af dus sneller dan de geëxtrapoleerde $0,35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$. (zie Figuur 6.1C). Dit houdt vermoedelijk verband met het storten van baggerspecie langs de zuidelijke oever van het Zuidergat (zie Sectie 6.5).

Platen van Valkenisse

In het begin van de vorige eeuw liep de hoofdgeul langs de oever bij Waarde in zuid-oostelijke richting [Technische Scheldecommissie, 1984]. Deze schaar van Waarde en het Zuidergat zijn tot ver in deze eeuw wisselend van grootte geweest met, relatief stabiel, de platen van Walsoorden en Valkenisse er tussenin. Soms ontstonden er één of meer kortsluitgeulen over dit gebied. Figuur 6.6 toont de recente ontwikkeling. Tabel 6.1 en Figuur 6.2B verschaffen kwantitatieve informatie over het verloop van de diepte-verhoudingen met betrekking tot de stabiele hoge platen en het meer dynamische gebied tussen deze platen en de noordelijke oever van het estuarium.



boven NAP + 2 m

— NAP



boven NAP + 1 m

--- NAP -2.5 m

ONTWIKKELING VAN DE PLATEN VAN
WALSOORDEN EN VALKENISSE

SCHAAL 1: 50.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 6.6

De stabiele plaat, die ontstond uit samensmelting van de Platen van Walsonden en Valkenisse, kreeg de gelegenheid zich te ontwikkelen tot boven NAP +2 m. Hij stroomt, door prielen van van beide zijden, bij H.W. onder maar er trekt vrijwel geen stroom overheen. De hoogste gedeelten raken begroeid. Boven NAP is de gemiddelde verhoging 0,7 m in 10 jaar (ca. $2,5 \times 10^6$ m³); plaatselijk meer dan 0,2 m/jaar. Op de hoogste delen vormt zich slik. Beneden NAP wordt de plaat ietwat aangetast door eroderende geulen. Figuur 6.2B toont deze versteiling.

NAP	1979			1987			1989		
	ZW	NO	Tot.	ZW	NO	Tot.	ZW	NO	Tot.
+2	12	0	12	17	0	17	70	0	70
+1	130	35	165	280	15	295	310	25	335
0	340	120	460	390	110	500	410	115	525
-2.5	670	390	1060	585	415	1000	540	450	990
Max.	2,2			2,3			2,4		

Tabel 6.1 Oppervlakten van de Platen van Walsonden en Valkenisse (ha) in 1979, 1987 en 1989; hoogste punten (m +NAP)

Het gebied ten noord-oosten van deze grote plaat is in het verleden voortdurend "omgeploegd" door geulen (zie ook [Coen, 1989]). De bodem komt, op wisselende plaatsen, nauwelijks boven NAP. Het proces zet zich nog steeds voort over een oppervlakte van ca. 10 km², met een dikte van ca. 5 m en in een periode van enkele decennia. Er zijn dus één of meer miljoenen m³/jaar mee gemoeid.

De kom tussen de Platen van Walsoorden en Valkenisse en de kust wordt bij vloed gevuld door de Schaar van Waarde. Een deel van het water vloeit over de hoge oostelijke rand in de Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath. De hoefijzervormige afsluitingen van de Zimmermangeul en de Schaar van Valkenisse groeien vanuit het noord-westen in de hoofdgeul en drukken die naar het zuid-oosten. De ebstroom in die geul neemt zand mee en zet dat af langs de zuidrand van het grote platencomplex. Daardoor wordt het Zuidergat tegen zijn zuidelijke oever gedrukt, geholpen door de centrifugale versnelling in de bochten.

Havens

De aanslibbing in havens hangt in het algemeen af van de intensiteit van het relevante sedimenttransport, van de aard van het sediment en van de vorm en inhoud van de haven. Ook dichtheidsstromen kunnen een rol spelen. Bij zandig materiaal bezinkt er relatief veel dicht bij de havenmond dus vangt een grote haven relatief weinig; dan speelt dus ook de grootte van de havenmond een rol. Tabel 6.2 geeft informatie betreffende de havens van Hansweert, Kruiningen en Perkpolder.

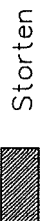
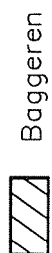
De aanslibbing is in de orde van 4-8% per jaar van het volume van de haven onder HW (D = diepte onder HW). De tijdconstante is dus 12,5-25 jaar.

naam:	natte doorsnede havenin- gang [m ²]	water- diepte havenin- gang [m]	haven opper- vlakte [m ²]	gem. haven diepte [m]	aanslibbing per m ² haven oppervlakte [m/jr] S'	S'/D (%/j)
Hansweert-buithaven			15.10 ⁴		0,24	
Hansweert-vluchthaven			6.10 ⁴		0,50	
Hansweert-totaal	540	8,6	21.10 ⁴	6	0,32	4
Kruiningen	1319	14,4	11.10 ⁴	8	0,82	8
Perkpolder	1238	11,7	12.10 ⁴	8	0,53	5

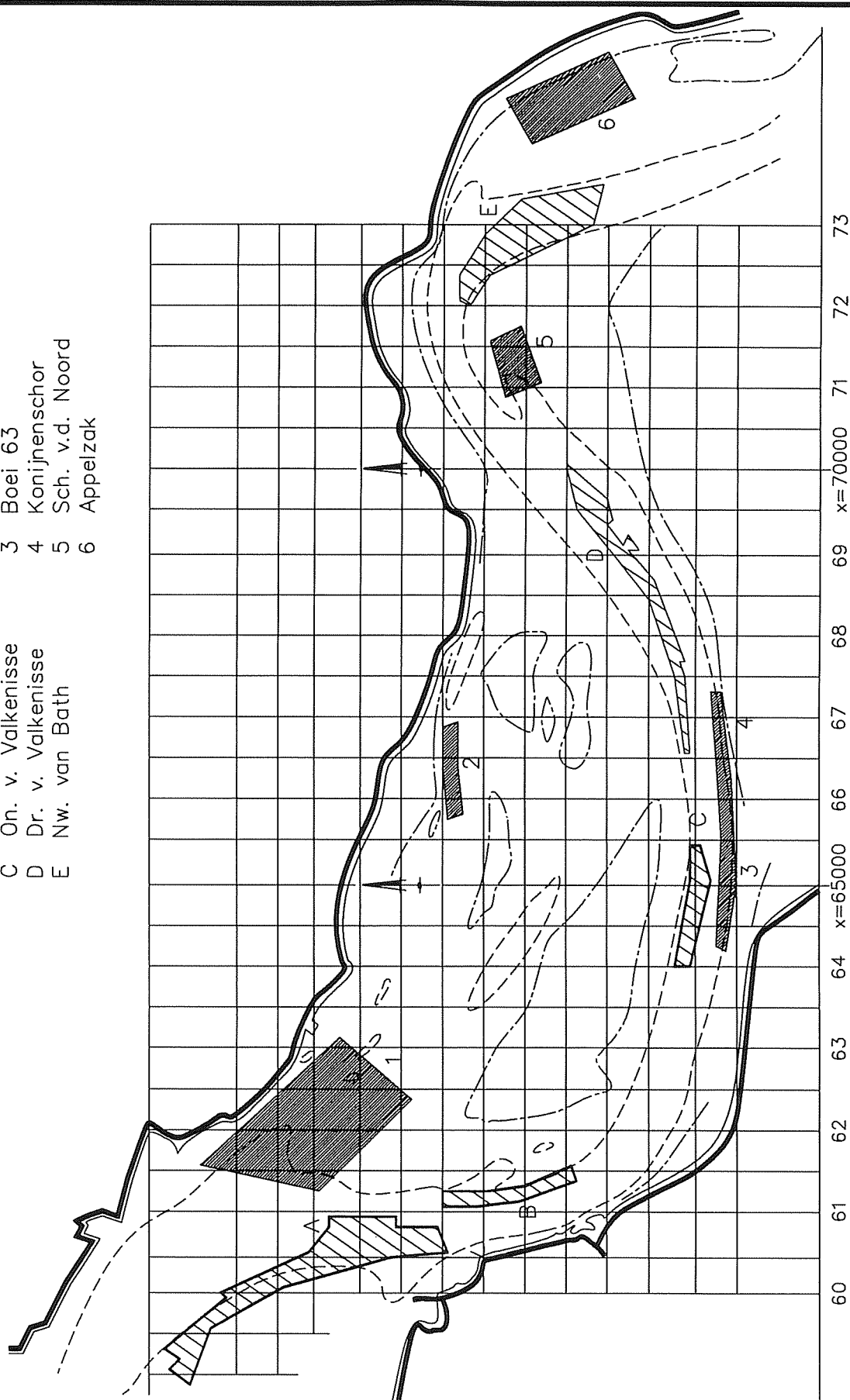
Tabel 6.2 Afmetingen en aanslibbing in havens rond de oostelijke Westerschelde

6.5 Het effect van baggeren

In het oostelijke deel van de Westerschelde wordt gebaggerd op de Drempel van Hansweert, de zuidrand van de Plaat van Walsonden, in de Omloop van Valkenisse langs de zuid-oostelijke rand van het Valkenisse-gebied, op de Drempel van Valkenisse, in het Nauw van Bath en op de Drempel boven Bath als aangegeven in Figuur 6.7. De sedimenten worden gestort in het estuarium op plaatsen waar men vermoedt dat de actie nuttig zou kunnen zijn (eroderende oevers) of waar de negatieve effecten aanvaardbaar worden geacht. Relevant zijn de Schaar van Waarde, de Zimmermangeul, de oever langs het Konijnschor, de Schaar van de Noord, en de Appelzak. Een deel van het materiaal wordt afgevoerd naar het gebied tussen Hansweert en Terneuzen. Tabel 5.2B geeft een beeld van de hoeveelheden.



- | | | | |
|---|-------------------|---|-------------------|
| A | Hamsweert | 1 | Schaar van Waarde |
| B | Walsoorden | 2 | Zimmervaaigeul |
| C | On. v. Valkenisse | 3 | Boei 63 |
| D | Dr. v. Valkenisse | 4 | Konijnenschor |
| E | Nw. van Bath | 5 | Sch. v.d. Noord |
| | | 6 | Appelzak |



GEBIEDEN WAAR WORDT GEBAGGERD EN GESTORT

Baggeren

Het effect van dit baggerwerk is een verdieping van de vaarweg over de drempels van bijna 12 m -NAP rond 1970 naar 14 à 14,5 m aan het eind van de jaren 80 als weergegeven in Figuur 6.8A. Tevens is de ligging en de breedte van de geul gecorrigeerd.

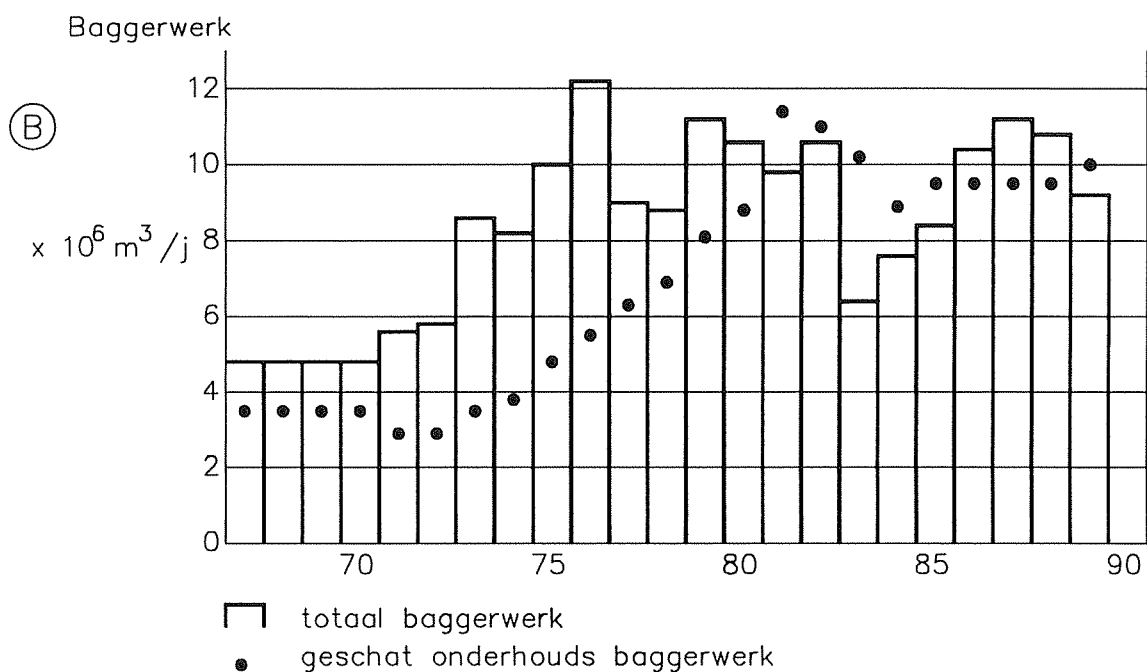
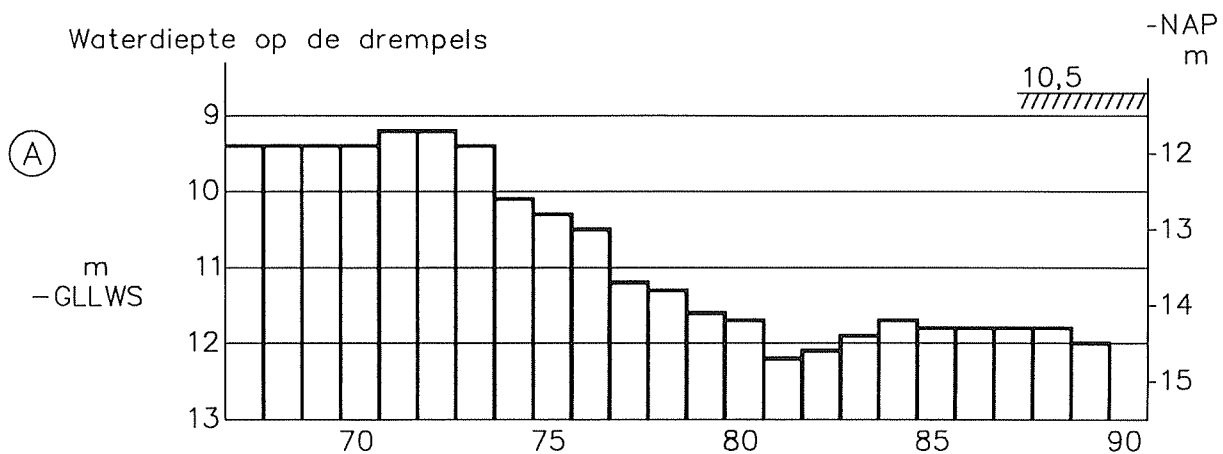
Een adequate maat van het effect van baggerwerk is, in het algemeen, het volume van de verdieping, onder de natuurlijke bodem, die wordt gerealiseerd. Dit volume is dan, in eerste benadering, evenredig met de intensiteit van het onderhoudsbaggerwerk. Anders gezegd, de aanzanding is evenredig met het volume van de kuil die men onderhoudt.

In de praktijk hebben aanpassingen van de bodem in de omgeving tot gevolg dat de natuurlijke diepte (de diepte tot waar de bodem zou aanzanden als het baggeren zou worden gestopt) in de loop van de tijd iets groter wordt. In dit geval is een daling van NAP -9,5 (GLLWS -7 m) naar NAP -10,5 m geschat. Met behulp van peilkaarten uit 1965/66 en 1986/87 is een ruwe schatting gemaakt van het volume van de kuil, afhankelijk van de diepte onder de natuurlijke bodem als aangegeven in Figuur 6.8C.

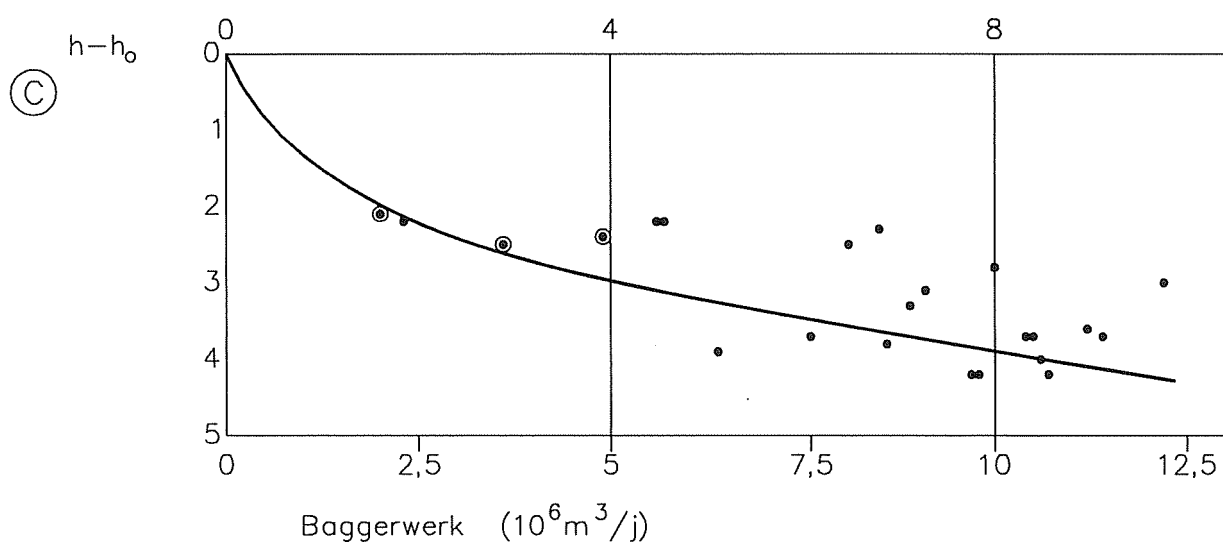
In dezelfde figuur is ook het baggerwerk aangegeven als functie van de diepte van de kuil. De schalen zijn zodanig gekozen dat de curve overeenkomt met het baggerwerk in die jaren dat er geen verdieping of verondieping van de kuil optrad (zie Figuur 6.8A). De curve is dus een schatting van het onderhoudsbaggerwerk dat was begrepen in het totale baggerwerk zoals ook aangegeven in Figuur 6.8B.

Uit het voorgaande blijkt dat de verhouding tussen het onderhoudsbaggerwerk en het volume van de kuil ongeveer 1,25 is; met een tijdconstante van 9 à 10 maanden. Bij een totale oppervlakte van het gebaggerde gebied van bijna 3 km² is de dikte van de jaarlijkse aanzandingen gemiddeld 3,7 m. Dit zijn hoge waarden; in overeenstemming met het, in Sectie 5.8 gevonden, hoge vangstpercentage.

Het baggeren leidt dus plaatselijk tot een aanzienlijke verdieping: ca. 5 m op een "evenwichtsdiepte" van ca. 10 m op enkele drempels en langs de randen van platen. Het totale volume van de "kuil" ($8 \times 10^6 \text{ m}^3$) is echter klein vergeleken bij het volume van de hoofdgeul (ca. $200 \times 10^6 \text{ m}^3$) en van het totale oostelijke deel van de Westerschelde.



$$\text{Volume kuil } (10^6 \text{ m}^3) = 0,5 \times 10^6 (h - h_0)^{2,2}$$



ANALYSE BAGGERWERK OOSTELIJK DEEL
WESTERSCHELDE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 368

FIG. 6.8

Storten

Het morfologische effect van het storten is nog moeilijker te schatten. Het moet worden onderscheiden van de totale sedimentatie in het gebied (zie [v.d. Berg, 1990]): ruim $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ tussen 1965 en 1985 (zie Figuur 5.6) dus bijna $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ buiten de baggergebieden.

De stortgebieden (Figuur 6.7) waar vermoedelijk materiaal is achtergebleven zijn: de Schaar van Waarde, de Zimmermangeul, de Schaar van de Noord en de Appelzak. Een vergelijking tussen de kaarten van 1965 en 1986/87 laat dat ook wel zien; behalve in de Zimmermangeul. De zuidelijke oever van het Zuidergat is niet zichtbaar verondiept maar ook is niet duidelijk of het storten de terugschrijding heeft afgeremd. Vermoedelijk is, onder deze eroderende omstandigheden, het vers gestorte materiaal vrijwel direct afgevoerd; bij vloed deels naar het Land van Saeftinge.

In het westelijke deel van de Schaar van Waarde is de diepte tussen 1965 en 1986/87 afgenomen met 3 tot 4 m; veel meer dan het gemiddelde (ca. 1,5 m) in het hele Valkenisse-gebied. De extra verondieping, als gevolg van het storten kan ruw worden geschat op $5 \text{ à } 10 \times 10^6 \text{ m}^3$. De verondiepingen in de Schaar van de Noord en de Appelzak zijn enkele miljoenen m^3 waarvan een deel is veroorzaakt door het storten. Globaal leidt dit tot een effect van het storten dat even groot of iets groter is dan het effect van het baggeren $8\text{--}10 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Sedimentconcentraties

Volgens [Technische Scheldec commissie, 1984] is de concentratie aan vaste stoffen in een aantal waarnemingspunten en in de oostelijke Westerschelde tussen 1973 en 1980 toegenomen van ca. 30 g/m^3 naar 40 g/m^3 . Deze verhoging wordt (mede) toegeschreven aan de toename van het baggerwerk.

6.6 Dynamiek van de bodem

De bewegelijkheid van de bodem, soms in combinatie met de waterbeweging, vormt een belangrijke voorwaarde voor het leven van planten en dieren in of bij die bodem. Bepaalde soorten zijn aangepast aan een bepaalde dynamiek. Veranderingen in die omstandigheden kunnen belangrijke ecologische gevolgen hebben. Vooral de snelheid waarmee de bodem erodeert of ophooft is een kenmerk van het proces.

Factoren die de dynamiek van de bodem bepalen zijn:

- a. de positie ten opzichte van de waterspiegel;
- b. de waterbewegingen;
- c. de erosie en sedimentatie, en
- d. de bewegingen van bodemvormen.

Op elk daarvan wordt in het volgende beknopt ingegaan om de schaal van de processen aan te geven. Hierbij wordt verwezen naar beschrijvingen van processen die het voorgaande reeds zijn gegeven.

a. Positie ten opzichte van de waterspiegel

In verband met de getijbeweging (Sectie 4.2) zijn globaal drie zônes te onderscheiden (Figuur 6.5):

- de onderwatergebieden beneden GLW; voornamelijk bestaande uit geulen (Sectie 6.3).
- het intergetijdengebied tussen GLW en GHW; omvat ondiepe geulen, banken, platen, slikken en lage schorren.
- de zeer hoge banken en schorren boven GHW.

De laatste categorie wordt niet dagelijks overstroomd. De frequentie van overstromen neemt af met de hoogte (Figuur 6.5).

In het intergetijdegebied wordt de bodem dagelijks bedekt met water; langduriger en dieper naarmate de bodem lager ligt.

De onderwatergebieden zijn permanent met water bedekt; in de geulen tot 10 m en meer.

Met betrekking met golven (Sectie 4.9) op de momentane waterspiegel vallen eveneens drie zônes te onderscheiden:

- de diepere gebieden (meer dan 2 à 5 m onder de waterspiegel) waarin de, in de Westerschelde voorkomende, golven geen invloed hebben;
 - de zône tussen de oppervlakte en 2 à 5 m waarin de orbitaal bewegingen (Sectie 4.9), met de diepte afnemend, vulbaar zijn, en
 - de zône rond de waterlijn waar de golven breken op de oevers.
- Deze drie zônes bewegen met het getij (en de stormvloeden) op en neer. ze "staan relatief stil" rond HW en LW.

b. Waterbewegingen

Een algemeen beeld van de waterbeweging is gegeven in Hoofdstuk 4.

In het algemeen treden relatief sterke stromen (Sectie 4.3) op in diep water; door de geulen en over de lagere (delen van) platen bij HW. Relatief zwakke stromen komen voor in ondiep water boven de hogere banken, de slikken en de schorren. Dit komt mede omdat ze slechts rond de kentering met water bedekt zijn.

Golfaanval (Sectie 4.9) treedt op rond de waterlijn; de orbitale beweging reikt tot enkele meters lager.

In het algemeen is de stroomsnelheid dicht bij de bodem (enkele centimeters) zwakker dan hoger in de waterkolom. Luwe gebieden komen ook voor in de wervels achter diverse bodemvormen.

Begroeiing van de bodem kan een stroom aanzienlijk afremmen.

c. Erosie en sedimentatie

De bewegingen van de geulen gaan gepaard met relatief snelle erosie en sedimentatie langs hun oevers. De diepte kan daar tot vele meters per jaar veranderen. De bodems van deze geulen kunnen zich per jaar tot enkele meters verdiepen of verondiepen. Op plaatsen waar gebaggerd wordt is ook de sedimentatie aanzienlijk. Storten kan leiden tot een snelle verondieping; afhankelijk van de mate waarin de stromen het gestorte materiaal kunnen afvoeren.

In de gebieden met zwakke stromen in ondiep water (en in havens) overheerst de sedimentatie. De snelheid daarvan hangt samen met het sedimentgehalte van het water, de waterdiepte, de valsnelheid van het materiaal en de duur van de overstroming (zie ook Sectie 7.6). Ook de aanwezigheid van begroeiing bevordert de afzetting. Waargenomen snelheden van verticale opbouw zijn [de Gloppen, 1964; Goedheer, 1985; Harrison and Bloom, 1977; Knights and Phillips, 1979; Leemans en Verspaandonk, 1980, de Smet en Wiggers, 1960; Stumpf, 1983).

- Land van Saeftinge: schor 0,001 - 0,01 m/jaar
slik 0,075 m/jaar
- Slike Oosterschelde 0,05 m/jaar

- Slik (rond NAP)	0,1 - 0,2 m/jaar
- Kwelder	0,002 m/jaar
- Havens (Tabel 6.2)	0,25 - 0,8 m/jaar

De afzettingen op hoge kwelders vinden alleen plaats gedurende stormen. Het effect wordt beperkt door compactie van de bodem (rijping, consolidatie; Figuur 5.2) en de relatieve bodemdaling (Sectie 7.2).

d. Bewegende bodemvormen

Golven en stromen veroorzaken onder bepaalde omstandigheden golvingen van een zandige bodem (Hoofdstuk 3). Die planten zich voort en dat proces gaat gepaard met variaties van de bodemligging.

Ribbels, gevormd door golven hebben hoogten van 1 tot 5 cm en lengten van 10 - 50 cm. De verplaatsingssnelheid is in de orde van 1 tot enkele cm per minuut. Ze komen vooral voor in ondiep water op en langs de randen van platen.

Megaribbels van 0,2 - 2 m hoog en lengten van 1 tot 20 m komen voor in de kleinere geulen en langs de diepere randen van platen. De voortplantingssnelheid is niet bekend; vermoedelijk enkele meters per getij.

Duinen van 2 - 5 m hoog en 50 - 100 m lang komen voor op de bodems van diepe geulen. De beweging is in de orde van enkele meters per getij; het resultant van grotere (3 - 15 m) bewegingen met de eb en de vloed.

Het resultaat van deze drie processen is dat de golven de bodem over een diepte van enkele centimeters regelmatig omwoelen en dat in de megaribbels en duinen de bodem stijgt en daalt over enkele meters met verticale snelheden van 0,25 - 2 m/getij in de megaribbels en de duinen.

7. Een samenvattend model

7.1 Algemeen

In het voorgaande is een globale analyse gemaakt van de fysische aspecten van het estuariene systeem van de Westerschelde. De nadruk is gelegd op de morfologische processen in het oostelijke deel van dat gebied met het oog op het onderhouden en verbeteren van de vaarweg en in het licht van de ecologische ontwikkeling.

Getracht is de verschillende factoren zo veel mogelijk te kwantificeren uit waarnemingen, berekeningen en schattingen. Mede op grond van ervaring elders zijn relaties gelegd tussen verschillende grootheden. In het volgende zullen deze elementen worden samengevoegd tot een consistent model dat is opgebouwd uit:

- reservoirs van sedimenten;
- transporten door het water en in baggerwerktuigen;
- continuïteitsrelaties;
- morfologische stabiliteitsrelaties, en
- relaties die een morfologische ontwikkeling beschrijven.

Het is de bedoeling dat het model, of delen er van, worden gebruikt voor het schatten van de effecten van ingrepen (baggeren en regulering) in het fysische systeem. Mede met het oog hierop is gekozen voor een zo hoog mogelijk niveau van aggregatie. Het model kan ook dienen als een basis voor verdere verfijning.

Hoeveelheden worden in de morfologie veelal uitgedrukt in volumina (in situ, in beun) en in massa's (suspensie, transporten). Transport van zand wordt soms ook uitgedrukt in een volume per tijdseenheid, al of niet met inbegrip van de poriën. In het volgende worden volumina (m^3) gebruikt voor grond in situ en in beun en massa's (ton) bij transporten. De omrekening vindt plaats via de massa droge stof per volumeëenheid (D) als aangegeven in Figuur 5.2. Eenheid van tijd is de getijperiode (12,41 uur) of het jaar (706 getijden).

Zand bevat 1,5 à 1,6 t/ m^3 aan droge stof bij een poriënvolume van 40 à 45%. Met een uitlevering van 20% bevat zand in het baggerwerktuig ca. 1,25 t/ m^3 . Zeer slibrijke afzettingen, op slikken en in havens, bevatten: vers ($n=4$) 0,5 t/ m^3 en geconsolideerd/gerijpt ($n=1$) 1,0-1,1 t/ m^3 .

7.2 Reservoirs

Sedimenten komen in het gebied voor als afzettingen in de bodem en bewegend in het water. In het model (Figuur 7.2) worden de volgende reservoirs onderscheiden:

- Ja: Het volume van verdiepingen/verondiepingen in het bed van het estuarium onder/boven de evenwichtsbodem. Dit volume is nog moeilijk te schatten maar, gezien de jaarlijkse resulterende aanzanding in het gebied ligt de evenwichtsbodem blijkbaar boven de feitelijke bodem..
- Jk: Het volume van aanslibbingsgebieden (slikken, schorren, havens) onder de evenwichtsdiepte. Volgens Figuur 6.1C is dit volume in het land van Saaftinge ca. $15 \times 10^6 \text{ m}^3$; totaal in het hele gebied mogelijk 20 à $25 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Jg: Het volume van de gebaggerde geulen (en hun omgeving) (de onderhouden kuil), onder de natuurlijke bodem. Dit volume is in Sectie 6.5 geschat op $8 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Js: Het volume van de sedimenten die zijn achtergebleven op de baggerstorten; boven de natuurlijke bodem. In Sectie 6.5 geschat op $8 \text{ à } 10 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- T: De massa van de bewegende sedimenten in het betreffende gebied. In Sectie 5.3 wordt de gemiddelde gesuspendeerde massa geschat op 65.000 ton: 35.000 ton slib en 30.000 ton zand. Verder beweegt er als bodemtransport nog ca. 20.000 ton zand. De totale bewegende massa is dan dus 85.000 ton. In Sectie 5.6 zijn de bewegende massa's per getij en bij een getijweg van 25 km geschat op 50.000 ton slib en 85.000 ton zand. Omgerekend op de lengte van het beschouwde gebied (20 km) leidt dit tot een karakteristieke massa van 110.000 ton.
- Combinatie van deze beide schattingen leidt voor T tot 100.000 ton waarvan 40.000 ton slib en 60.000 ton zand (waarvan 35.000 ton in suspensie).

De inhoud van deze reservoirs is niet constant. Per tijdseenheid (getij, jaar) kunnen ze met een hoeveelheid ΔJ of ΔT veranderen. Een bijzonder geval hiervan is het verlies als gevolg van de relatieve zeespiegelrijzing.

- Z: Verlies door zeespiegelrijzing; naar schatting 1,5 mm/jaar over 100 km^2 of $150.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ($200 \text{ m}^3/\text{getij}$).

7.3 Transporten

De sedimenten worden opgenomen, getransporteerd en weer gedeponeed door het water en door de baggerwerktuigen. De onderscheiden (Figuur 7.1) transporten zijn:

Ti: Sedimenten die het gebied binnen komen.

Tu: Sedimenten die het gebied verlaten. De aanvoer via de Schelde wordt geschat op ca. 300.000 ton slib per jaar dat zich vooral afzet in de aanslibbingsgebieden. Het resulterende transport langs Hansweert moet volgen uit de balansvergelijking.

Sg: Sedimentatie in de gebaggerde geul.

Sa: Natuurlijke sedimentatie in het bed van het estuarium. De kubering (Figuur 5.6) leidt tot een afzetting van $1,65 \times 10^6$ ton/jaar of ca. 2.350 ton/getij.

Sk: Sedimentatie in de typische afzettingsgebieden. In Sectie 6.4 wordt de sedimentatie in het Land van Saeftinge geschat op $0,5 \times 10^6$ m³/jaar of ca. $0,6 \times 10^6$ ton/j. Samen met andere gebieden is de totale Sk ca. 1×10^6 ton/jaar; waaronder relatief veel slib.

Es: Erosie in de gebieden waar sedimenten worden gestort. In het geval van een bodem die in evenwicht is, is deze erosie gelijk aan de hoeveelheid die gestort wordt: $Es = Bs + Bi$. Als het stortgebied zich verondiept is $Es < Bs + Bi$.

Bg: De hoeveelheden gebaggerd in de geul en zijn omgeving. Tabel 5.2 geeft een totaal van $13,2 \times 10^6$ ton/jaar of 18.700 ton per getij.

Bs: Baggerspecie, van Bg, die binnen het gebied is gestort; volgens Tabel 5.2 is dit $9,5 \times 10^6$ ton/jaar of 13.500 ton per getij.

Bu: Baggerspecie, van Bg, die buiten het gebied wordt gestort = $Bg - Bs$. Dit is dus $3,8 \times 10^6$ ton/jaar of 5.200 ton/getij.

Bi: Baggerspecie die van buiten komend in het gebied wordt gestort. Dit transport wordt geschat op 1 à $1,5 \times 10^6$ ton/jaar.

7.4 Balans-relaties

Uit Figuur 7.1 vallen de volgende relaties tussen veranderingen van de reservoirs en de transporten af te leiden:

$$\Delta T = Es - Sk - Sg - Sa + Ti - Tu$$

$$\Delta J_g \quad Dg = -Sg + Bg$$

$$(\Delta J_a + Z) Da = Sa$$

$$\Delta J_s D_s = B_s + B_i - E_s$$

$$\Delta J_k D_k = -S_k$$

$$B_g = B_s + B_u$$

Dg, Da, Ds en Dk = massa droge stof per m³

Onder de veronderstelling dat de gebaggerde gebieden, de stortplaatsen en de bewegende massa niet veranderen ($\Delta T = \Delta J_g = \Delta J_s = 0$) leidt deze balans ondermeer tot de conclusie dat $T_i - T_u = 8.100 \text{ t/getij}$ of $5,7 \times 10^6 \text{ t/jaar}$ waarvan $0,3 \times 10^6 \text{ ton}$ slib uit de Schelde.

7.5 Evenwichtsrelaties

In Sectie 6.3 (Figuur 6.3) is een relatie gelegd tussen het evenwichts-profiel (A) en het getijvolume (V) dat door de doorsnede stroomt. De praktijk leert dat de natuur deze relatie probeert te handhaven. Een verdieping op de ene plaats leidt tot een verondieping elders en omgekeerd. Dat geldt ook als de verandering in V of A kunstmatig wordt aangebracht. In Figuur 7.2 is dan in de evenwichtssituatie $A_g - A_s - A_a = 0$.

De volumina Jg, Js en Ja zijn gerelateerd aan Ag, As en Aa. In Sectie 6.5 (Figuur 6.8) is het volume van de kuil (Vg) gerelateerd aan de gebaggerde diepte onder de evenwichtsdiepte (NAP -10,5 m).

Wat men als evenwichtsdiepte dient te beschouwen hangt af van de tijdschaal waarbinnen de verschijnselen zich afspelen. Een bodem die met een tijdschaal van een eeuw geleidelijk verandert kan als "in evenwicht" worden beschouwd vergeleken bij een aanslibbing of erosie met een tijdschaal van één of enkele jaren.

7.6 Morfo-dynamische relaties

Ervaring met sedimenterende gebieden [Allersma, 1984], zowel natuurlijke als kunstmatige, heeft geleerd dat de snelheid van opvullen evenredig is met het volume van de afwijking uit het evenwicht, het relevante sedimenttransport (Tr) en de valsnelheid (w) van het sediment. De locale stroomsnelheid (v) kan het proces remmen. Dit leidt tot de globale relatie

$$S = D \frac{dJ}{dt} = -\alpha \text{ Tr } \frac{w}{v} J$$

Tr is het transport dat over een gebaggerde geul trekt of het uitwisselings-transport van een havenbekken. J is het volume onder de natuurlijke bodem bij een geul of het volume onder H.W. bij een haven of een ander sedimentatiegebied.

In het geval van de gebaggerde geul in het oosten van de Westerschelde is
 $S = S_g = B_g = 18.700 \text{ ton/getij}$ of $13,2 \times 10^6 \text{ ton/jaar}$

$Tr = T = 100.000 \text{ ton (/getij)}$

$J = 8 \times 10^6 \text{ m}^3$

$D = 1,5 \text{ ton/m}^3$

$dJ/dt = S/D = 12.500 \text{ m}^3/\text{getij}$ of $8,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$

$S_g/Tr = 0,187$

$dJ/dt \text{ (jaar)} = 1,1 J$

Integratie van de bovenstaande relatie tussen sedimentatie en volume leidt tot

$$J = J_0 e^{-t/\tau}$$

waarin:

J_0 = het volume bij $t = 0$

τ = de tijdconstante = $J/(dJ/dt) = J_0/(dJ/dt)_0$

$$= \frac{Dv}{\alpha Tr w}$$

De tijdconstante is karakteristiek voor het sedimentatieproces. In dit rapport zijn de volgende tijdconstanten naar voren gekomen:

- Het estuarium $3,5 \text{ km}^3/3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j} = 1200 \text{ jaar}$
- Land van Saeftinge (Figuur 6.1A): 150 jaar
- Kreken L.v. Saeftinge (Figuur 6.1C) : 75 jaar
- Havens (Tabel 3.6): 12,5-25 jaar.
- Gebaggerde geul: 0,9 jaar.

De havens en de geul worden op diepte gehouden. De andere aanslibbingsgebieden nemen geleidelijk in volume af.

Ook bij erosie kan in eerste instantie worden uitgegaan van evenredigheid met de afwijking uit het evenwicht:

$$E = D \frac{dJ}{dt} = -\alpha' J$$

waarbij α' (net als α) afhangt van de situatie en de aard van de sedimenten.

7.7 De invloed van het baggeren

Met behulp van het model kan een globale indruk worden verkregen van de invloed van het baggeren op de sedimenttransporten dus de invloed van V_g op T . Het baggeren zou dus een vergroting van T tot gevolg moeten hebben; tot uiting komend in hogere concentraties aan vaste stof en de gevolgen daarvan.

De waargenomen concentraties zijn in de periode 1973-1980 toegenomen van ca. 30 naar ca. 40 g/m³ dus een toename van 30 à 35%.

In die periode nam het baggerwerk toe van 4 naar 12 x 10⁶ ton/jaar (Figuur 6.8). Een waargenomen effect is de grotere sedimentatie in het Land van Saeftinge dan mocht worden verwacht op grond van een extrapolatie van de sedimentatie in het begin van deze eeuw (Figuur 6.1C). Aangenomen wordt dat T evenredig is toegenomen met deze indicatoren.

Verder wordt verondersteld dat de transporten (T) evenredig zijn toegenomen met het baggerwerk dus met S_g dus

$$T = T_0 + \beta J_g T$$

Toepassing op de bovengenoemde gegevens leidt tot de schatting dat T is toegenomen van bijna 70.000 ton vóór het baggeren naar 75.000 ton in 1973 en 100.000 ton in 1980. De concentratie moet dan van oorspronkelijke 27 g/m³ zijn toegenomen naar respectievelijk 30 en 40 g/m³. Het model geeft dan aan dat de sedimentatie in typische afzettingsgebieden, zoals het land van Saeftinge, evenredig is toegenomen.

7.8 Toepassing van het model

De analyse van het fysische systeem heeft geleid tot de opzet van een globaal model. Het verdient aanbeveling dit operationeel te maken; b.v. in de vorm van een spread-sheet. Deze concretisering, en de daarop volgende toetsing, van het model geven inzicht in de werking van het systeem en de onderlinge gevoeligheid van de parameters.

Uit experimenten met het model zal ook de behoefte aan meer kwantitatieve gegevens en aan verdere modelmatige ontwikkeling naar voren komen.

Nadere kwantificering van het model zal vooral moeten worden gebaseerd op de resultaten van waarnemingen aan het prototype. De aanwezige gegevens [van Rijn, 1983] en de resultaten van nieuwe metingen naar het transport van zand en slib moeten worden uitgewerkt middels aggregatie over ruimte en tijd; eventueel via correlatie met parameters waarvan langdurige waarnemingen of voorspellingen bestaan.

De volumetrische uitdrukking van het effect van baggeren (de kuil) en stor-
ten verdient nadere studie; mede om een relatie te leggen met de sedimen-
tatie (= het onderhoudsbaggerwerk).

Na voltooiing kan het model worden gebruikt voor een globale schatting van de effecten van ingrepen in het gebied zoals meer baggeren en regulerings-
werken.

Bij de verdere ontwikkeling van het model moet vooral worden gedacht aan een introductie van de tijd, zodat een EMPREL-achtig model kan ontstaan. Dit vereist een verdere uitwerking van de omschrijving van de processen van ero-
sie en sedimentatie mede op grond van modellen van het morfologische even-
wicht de ontwikkeling van het systeem naar zo'n evenwicht. Geaggregeerde uitkomsten van simulaties met meer gedetailleerde modellen (WAQUA, ZWENDL) kunnen modules vormen in het globale model.

8. Geraadpleegde bronnen

Allersma, E. (1961)

Enkele gegevens uit foto-electrische metingen aan slib suspensies
Waterloopkundig Laboratorium, H6, juli 1961

Allersma, E. (1984)

Effecten van de bouw van de Dollardhaven
Waterloopkundig Laboratorium (R2034), februari 1984

Allersma, E. (1988)

Morfologisch Onderzoek Noordelijk Deltabekken.

Morfologische modellering

Deel I : Inleiding en samenvatting

Deel II : Morfologische relaties

Deel III: Samenstelling en dichtheid van sedimenten .

Waterloopkundig Laboratorium, Z71-03, Delft, september 1988

Belmans, ir. H. (1988)

Verdiepings- en onderhoudsbaggerwerken in Wester- en Zeeschelde
Water, 43/1, nov./dec. 1988

Berben, F. (1985)

Meandergeometrie en morfologisch gedrag van estuaria in geulen
Rijkswaterstaat, Den Haag, dec. 1985

Berg, J.H. van den (1985)

Meting en berekening van bodemtransport in een megaribbelveld ten noorden
van de Galgenplaat, Oosterschelde

Rijkswaterstaat, Deltadienst, Geomor nota 85.01, nota DDWT 85.023, 1985

Berg, dr. J.H. van den (1986)

Aspects of sediment- and morphodynamics of subtidal deposits of the Ooster-
schelde (the Netherlands)

Rijkswaterstaat, Communications no. 43, The Hague, 1986

Berg, J.H. van den, Schouten, D. en Westbrugge, C.J. van (1991)

Zandbalans Westerschelde 1965-'70-'75-'80

Rijkswaterstaat, Dir. Zeeland, Nota NWL-91.36

Brabander, lic. K. de en Greeve, lic. K. de (1988)
Waterkwaliteit van de Schelde,
Water, 43/2, nov./dec. 1988

X

British Admiralty (1989)
Admiralty tide tables 1990, Vol. I
Hydrographer of the Navy, 1989

Brugninckx, lic. E. (1988)
Betekenis van de waterwegen op economisch en ecologisch gebied
Water, 43/2, nov./dec. 1988

Bruun, P. and Gerritsen, F. (1960)
Stability of coastal inlets.
North Holland Publ. Comp., Amsterdam, 1960

Bruun, P. (1966)
Tidal inlets
Universitetsforlogat, Oslo, 1966

Cappaert, dr.ir. I. (1988)
Het waterzuiveringsprogramma van de Schelde
Water, 43/2, nov./dec. 1988

Casteleijn, ir. E. en Kerstens, ir. P. (1988)
Het Sigmaplan: beveiliging van het zeescheldebekken tegen stormvloeden op de
Noordzee
Water, 43/1, nov./dec. 1988

Claessens, ir. J. (1988)
Het hydraulische regime van de Schelde
Water, 43/1, nov./dec. 1988

Coen, ir. I. (1988)
Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde
Water, 43/1, nov./dec. 1988

Coppieters, lic. H. (1988)
De scheepvaart op de Westerschelde
Water, 43/2, nov./dec. 1988

X

Mc.Dowell, D.M. and O'Conner, B.A. (1977)
Hydraulic Behaviour of Estuaries
MacMillan, London, 1977

Dyer, K.R. (1973)
Estuaries, a physical introduction
John Wiley, London, 1973

X

Edelman, ir. T. (1974)
Bijdrage tot de historische geografie van de Nederlandse kuststrook.
Rijkswaterstaat, Dir. W. en W., Den Haag, 14 maart 1974

Engelund, F. and Hansen, E. (1967)
A monograph on sediment transport in alluvial streams
Technisk Forlag, Copenhagen, 1967

Engelund, F. and Skovgaard, O. (1973)
On the origin of meandering and braiding in alluvial streams
J. Fluid Mech. (1973) vol. 57, part 2

X

Eysink, W.D. (1979)
Morfologie van de Waddenzee, gevolgen van zand- en schelpenwinning
Waterloopkundig Laboratorium (R1336) mei 1979

Fredsøe, J. (1978)
Meandering of braiding rivers
J. Fluid Mech. (1978) vol. 84, part 4

Gerritsen, F. en de Jong, H. (1983)
Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde
Nota WWKZ-83.V008, november 1983

Gerritsen, F. (1990)

Morphological stability of inlets and channels in the Western Wadden Sea
Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWA0-90.019

Gerritsen, F. (1990)

Numerieke modellering van morfologische processen met betrekking tot het
Oost-West Project in de Westerschelde
Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWA0-90.021

Glopper, R.J. de (1964)

Landaanwinning in het Waddengebied in: Het Waddenboek
Thieme, Zutphen, 1964

Goedheer, drs. G.J. (1985)

Schorontwikkeling
R.U. Utrecht, RWS, Nota DDM1-85.22

Harrison, E.Z. and Bloom, A.L. (1977)

Sedimentation rates on tidal salt marshes in connecticut
J. of Sed.Petr. 47, no. 4, 1977

Hiep, prof. dr. C. (1988)

Het ecosysteem van het Westerschelde Estuarium
Water, 43/2, nov./dec. 1988

Hoogweg, ir. P.H.A. en Westen, ir. C.J. van (1988)

De ecologische waarde van de Westerschelde voor de Noordzee
Water, 43/1, nov./dec. 1988

Jong, H. de en van Maldegem, D.C. (1988)

Literatuurbestand morfologie en fysica
Schelde-estuarium (periode 1930-1988)
Rijkswaterstaat, Notitie GWA0-88.1311, september 1988

Jong, H. de (1988)

Berekening van inhouden en oppervlaktes van de Schelde en de Westerschelde
t.b.v. SAWES
Rijkswaterstaat, Notitie GWA0-88.1314, november 1988

Jong, H. de (1989)

Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932 (voorlopige versie)

Rijkswaterstaat Nota GWA0-89.1004, april 1989

Kaarten

- a. Hydrografie 1442: Mond van de Westerschelde, 1:50.000
- b. Hydrografie 1443: Westerschelde van Vlissingen tot Antwerpen, 1:50.000
- c. R.W.S., dir. Zeeland: Westerschelde vak A (1986) en vak B (1986),
1:25.000
- d. ANWB10: Zeeland en West Noord-Brabant en ANWB12: Zeeuws en Belgisch
Vlaanderen, 1:100.000
- e. Shell: Grote autokaart, België, Luxemburg, 1:250.000

Kiden, P. (1991)

The Laterglacial and Holocene evolution of the Middle and Lower River
Scheldt, Belgium

In: Starkel. L. et al, Temporate Paleohydrology, John Wily, 1991

Knights, B. and Phillips, A.J. (1979)

Estuarine and coastal land reclamation and water storage

Saxon House, Westwead, 1979

X

Kranenborg, B. en van Zetten, J.W. (1988)

Morfologische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken op lange termijn

Rijkswaterstaat, DBW/RIZA nota 88.018, mei 1988

Kranenborg, B. en van Zetten, J.W. (1989)

EMPREL 4.0; ontwikkeling en toepassing

Rijkswaterstaat, DBW/RIZA nota 89.038, augustus 1989

Leemans, J. en Berspaandonk, B. (1980)

Saeftinge: Vegetatiekaart 1:10.000, 1972

Het Zeeuwse Landschap, Heikenszand, 1980

Leeuw, H. de (1985)

Zandtransportmodel Westerschelde

Stochastisch onderzoek zandtransportformule

Waterloopkundig Laboratorium, S582, oktober 1985

Looff, D. de (1980)

Kartering van de bodemsamenstelling van het westelijk gedeelte van de Westerschelde

Rijkswaterstaat, Nota WWKZ-80.V009, april 1980

Maldegem, D.C. van (1989)

Beïnvloeding slibhuishouding Westerschelde bij een ingreep in het oostelijk deel

Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Notitie GWAO-89.1338

Maldegem, D.C. van en Storm (1990)

Toename zwevende stofgehaltenes in het oostelijk deel van de Westerschelde?

Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Notitie OW-90.064

Meire, drs. P en Kuijken, dr. E. (1988)

Het Land van Saaftinge, Slikken en Schorren: ecologische betekenis van de getijdegebieden langs de Schelde

Water, 43/2, nov./dec. 1988

Migniot, C. (1977)

Étude des propriétés physiques de différentes sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrauliques

La Houille Blanche, 1968, no. 7

Officer, C.B. (1976)

Physical oceanography of estuaries

John Wiley, New York, 1976

Peters, J.J. en Wollast, R. (1976)

Role of the sedimentation in the self-purification of the Schelde estuary

Proc. 3rd. Federal Inter-Agency

Sedimentation Conf., Denmark, 1976

Pieters, T. (1989)

Projectplan OOSTWEST; studie naar ontwikkelingsmogelijkheden oostelijk deel Westerschelde

Rijkswaterstaat, Nota GWWS-89.407, oktober 1989

Raudkivi, A.J. (1963)
Study of sediment ripple formation
Proc. ASCE, Hydr. Div., 89 HY6, 1963

Raudkivi, A.J. (1976)
Loose boundary hydraulics
Pergamon, Oxford, 1976

Reus, J.H. de (1979)
Sedimenttransport: Berekening van de sedimentconcentratie in de verticaal
bij niet permanente stroming
Waterloopkundig Laboratorium, S151 deel II, april 1979

Roovers, ir. P. (1988)
Verdiepingsprogramma van de maritieme toegang tot de Haven van Antwerpen
Water, 43/1, nov./dec. 1988

Rijkswaterstaat (1989)
Getijtafels voor Nederland, 1990
S.D.U. Uitgeverij, 's Gravenhage, 1989

Rijkswaterstaat (1989)
Beleidsplan Westerschelde
a. Ontwerp
b. Beschrijving van de Westerschelde
c. Deelrapport 1: Zuurstof huishouding en Nutriëntenhuishouding
d. Deelrapport 2: Microverontreinigingen
e. Deelrapport 3: Slibhuishouding en Bodemkwaliteit
f. Deelrapport 4: Morfologische structuur en Dynamiek
Middelburg, augustus 1989

Rijkswaterstaat (1991) (T. Pieters, C. Storm, T. Walhout, T. Ysebaert)
Het Schelde-estuarium; meer dan een vaarweg
D.G.W. Nota G.W.W.S.-91.081

Rijn, ir. L.C. van (1982)
Vaste oeververbinding Westerschelde
Sedimenttransport in de tracé-as van de tunnelverbinding
Waterloopkundig Laboratorium, R1586 deel I, december 1982

Rijn. ir. L. C. van (1983)

Project NAUWESB

- a. Appendix A : Verwerkingsprogrammatuur voor sedimenttransportmetingen in de Westerschelde
- b. Appendix B1: Archief-file (deel I)
Sedimentconcentratie - en stroomsnelheidsmetingen in de Westerschelde
- c. Appendix B2: Archief-file (deel II)
Sedimentconcentratie - en stroomsnelheidsmetingen in de Westerschelde
- d. Appendix B3: Archief-file (deel III)
Sedimentconcentratie - en stroomsnelheidsmetingen in de Westerschelde
- e. Appendix B4: SEDWES-file
Sedimenttransport in de Westerschelde; programma-uitvoer en plots

Waterloopkundig Laboratorium, S582, december 1983

Schaik, A.W.J. van, Jong, D.J. de en Pluijm, A.M. van der (1988)

Vegetatie buitendijkse gebieden Westerschelde

Rijkswaterstaat, nota GWAD-88.1003, december 1988

Schoot, drs. P.M. en van Eerdt, drs. M.M. (1985)

Toekomstige ontwikkeling van de schorgebieden in de Oosterschelde

R.U. Utrecht/R.W.S. Deltadienst, Middelburg, Nota DDm1-85.23, november 1985

Smet, L.A.H. de en Wiggers, A.J. (1960)

Einige Bemerkungen über die Herkunft und die Sedimentationsgeschwindigkeit der Dollartablagerungen

Verh.Kon. Ned. Geol.Mijnb. Gen., 1960

Smet, P. de (1969)

Geomorfologie van slikken en schorren langsheen het Schelde Estuarium

Acta Geografica Lovaniensa, 7, 1969

Sterling, A. (1963)

Het vraagstuk van de Schelde, toegang tot de Haven van Antwerpen. Beweging van vaste stoffen in water. Algemene technische en economische problemen.

Eurisoton, Rapportnr. 1

Sterling, ir. A. en Roovens, ir. P. (1967)

Modelstudies aangaande de verbetering van de bewaarbaarheid van de Westerschelde.

De Ingenieur, Bouw en Waterbouwkunde, 4 en 5, mei 1967

Stive, M.J.F. en Eysink, W.D. (1989)

Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990 - 2090, fase 3

Deelrapport 3.1: Dynamisch model van het Nederlandse kustsysteem.

Waterloopkundig Laboratorium (H 825) september, 1989

Storm, C. (1989)

De correlatie tussen aanzandingssnelheden van de drempels van Valkenisse en Hansweert, en in de nabijheid gestorte specie.

Rijkswaterstaat, oktober 1989

Strubbe, ir. J.

De politieke geschiedenis en het internationale statuut van de Westerschelde.

Water, 43/2, nov./dec. 1988

Stumpf, R.P. (1983)

The process of sedimentation on the surface of a salt marsh.

Estuarine, Coastal and Shelf Science (1983), 17

Suykens, prof.lic. F. (1988)

Het economisch belang van de zeehaven.

Water, 43/2, nov./dec. 1988

Swart, J.P. (1982)

Onderzoek oppervlaktebemonstering slib in de Westerschelde periode '69-'80

Rijkswaterstaat, nota WWKZ-82.V003, mei 1982

Technische Scheldecommissie (1984)

Verdieping Westerschelde

Studierapport programma 48'/43'

- Deel 1: Tekst

- Deel 2: literatuur, tabellen, bijlagen

Middelburg/Antwerpen, juni 1984

Temmerman, dr. I. (1988)

De kwaliteit van het Scheldesediment.

Water, 43/1, nov./dec. 1988

Tromp, ir. D. (1988)

Consequenties van het op diepte houden van de vaargeul in de Westerschelde.

Water, 43/1, nov./dec. 1988

Verhoeven, dr.ir. B. (1954)

Enkele opmerkingen om de groei van schorren in de Braakmanhaven
in: Langs gewonnen velden.

Veerman, Wageningen, 1954

Verhoeven, B. en Akkerman J. (1967)

Buitendijken marine gronden, hun opbouw, bedijking en ontginning.

in: Van zee tot land (R.IJ.P.)

Tjenk Willink, Zwolle, 1967

Zagwijn W.H. en Staalduinen, C.J. van (1975)

Geologische overzichtskaarten van Nederland met toelichting.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 1975

Zagwijn, W.H (1986)

Nederland in het Holoceem

Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 1986

Zuur, A.J., Ebbens, O.S., Venstra, A.J. en Jansen, G.J.F. (1954)

Langs gewonnen velden, Facetten van smedingswerk.

Veenman, Wageningen, 1954