

Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek

C-13443 712

(Deel 1)

INSTITUUT VOOR MARIEN EN ATMOSFERISCH ONDERZOEK UTRECHT

Morfologisch onderzoek Westerschelde monding

Deel 1

Inventarisatie beschikbare literatuur over en metingen in de Westerschelde monding

Irene van Broekvort
december 1996

R 06-21

Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek

C-13443 712

Deel 1

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Inventarisatie meetgegevens Westerschelde monding	2
2.1 Morfologie	2
2.2 Hydraulica	7
2.2.1 Waterstanden	7
2.2.2 Stroming	7
2.2.3 Golven	9
2.3 Menselijke ingrepen	9
3. Inventarisatie Literatuur Westerschelde monding	14
3.1 Westerschelde monding algemeen	14
3.2 Morfologie Westerschelde monding	14
3.3 Kuststroken Westerschelde monding	16
3.4 Processen Westerschelde monding	16
3.5 Morfodynamiek buitendelta's	17
Lijst van Figuren	ii
Lijst van Tabellen	ii

Lijst van Figuren

Figuur 1: Overzicht ligging lodingsvakken Westerschelde monding.

Figuur 2: Overzicht meetraaien en meetpunten in Westerschelde monding.

Figuur 3: Bagger- en stortactiviteiten in de Westerschelde monding.

Figuur 4: Baggerhoeveelheden in de Westerschelde monding.

Figuur 5: Storthoeveelheden in de Westerschelde monding.

Lijst van Tabellen

Tabel 1: Beschikbaarheid oude morfologische opnamen.

Tabel 2: Beschikbaarheid vaklodingen Westerschelde monding.

Tabel 3: Definitie hoogwater en laagwaterlijn per kustvak ten Behoeve van strandmetingen.

Tabel 4: Overzicht kustmetingen voor de Noordwestkust van Walcheren.

Tabel 5: Overzicht kustmetingen in Zeeuwsch Vlaanderen.

Tabel 6: Overzicht kustmetingen in Belgisch Vlaanderen.

Tabel 7: Plaatsing instrumenten voor de registratie van de waterstand in de Westerschelde monding.

Tabel 8: Uitgevoerde strandsuppleties langs de kust van Walcheren (ZO deel).

Tabel 9: Uitgevoerde strandsuppleties langs de kust van Vlaanderen.

Tabel 10: Baggerhoeveelheden in de Westerschelde monding.

Tabel 11: Storthoeveelheden in de Westerschelde monding.

Tabel 12: Overzicht menselijke activiteiten in en rond de Westerschelde monding.

1. Inleiding

Als vooronderzoek voor KUST*2000, Westerschelde monding is de beschikbare literatuur over en relevante metingen in de Westerschelde monding geïnventariseerd en gepresenteerd in het voorliggende rapport. Op basis van de literatuur is de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding sinds 1800 beschreven in het bijgaande rapport (Morfologische onderzoek Westerschelde monding, deel 2: Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding sinds 1800).

Tijdens deze studie is geen aandacht besteed aan slib transport, omdat hier weinig literatuur over verschenen is. Volgens Terwindt (1967) is het slibpercentage in de buitendelta van de Westerschelde relatief hoog (gemiddeld 200 mg per liter) en circuleert het slib, dat hoofdzakelijk van mariene afkomst is, in het mondingsgebied. De circulatie van het slib komt overeen met de circulatie van het water. Tevens is de ontwikkeling tot 1800 buiten beschouwing gelaten, aangezien de Rijks Geologische Dienst (RGD) tegelijkertijd met een vooronderzoek bezig was, waarin de geologische geschiedenis van de Westerschelde monding en de invloed van resistente kleilagen op de morfologische ontwikkeling onderzocht wordt.

2. Inventarisatie meetgegevens Westerscheldemonding

2.1 Morfologie

De oudste redelijk betrouwbare weergave van de Westerschelde monding is te vinden op de hydrografische kaart van het zuidelijk Nederlandse kustgebied gemaakt door de Franse hydrograaf Beautemps-Beaupré. De kaart is uitgegeven in 1817, maar de metingen waarop de weergave van de Westerschelde inclusief de buitendelta is gebaseerd zijn verricht in de jaren 1804-1805. Derhalve wordt deze opneming meestal aangeduid als opneming 1804.

Sindsdien heeft de Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine iedere 15 tot 20 jaar opnamen gemaakt van de Nederlandse kust. De eerste opneming is verricht in 1823 en is in 1841 herzien. In 1863 is de hele Westerschelde monding opnieuw opgenomen en in 1875-1876 is de meting van 1863 gedeeltelijk geactualiseerd. Vervolgens is de morfologische situatie in 1894-1895, 1907-1908, 1921-1922, 1931-1932, 1952 en 1978 bepaald. Een overzicht van de morfologische kaarten is gegeven in tabel 1. In deze tabel staat tevens vermeld waar deze kaarten zich thans bevinden en welke coördinaten, eenheden en reductievlakken zijn gebruikt. In 1933 heeft Kleinjan de tot dan toe beschikbare kaarten geuniformaliseerd; de diepten zijn omgerekend naar gemiddeld laag water. Deze kaarten zijn in veel recente rapporten overgenomen (o.a. De Looff en Verhagen, 1986). Op de kaarten tot 1875 staan alle lodingsgegevens vermeld, daarna is slechts een gedeelte op de kaarten overgenomen. De meetgegevens (minuutbladen) waarop de kaarten gebaseerd zijn, zijn ofwel aanwezig bij het Algemeen Rijksarchief in Den Haag (gegevens tot 1930), ofwel bij de Dienst der Hydrografie eveneens in Den Haag (gegevens vanaf 1930). De kaarten van 1804, 1823, 1841, 1863, 1894 en 1931 zijn door Leo Uit den Bogaard gedigitaliseerd en in het ArcInfo systeem opgenomen. Hierbij zijn echter de lineair geïnterpoleerde dieptelijnen gedigitaliseerd en niet de oorspronkelijke puntwaarnemingen. Aangezien in een raster GIS de gegevens geïnterpoleerd moeten worden om aan iedere rastercel een waarde toe te kennen, wordt geadviseerd om voor verder gebruik van de gegevens de oorspronkelijke punten te digitaliseren alvorens middels interpolatie het raster op te vullen. Op deze manier zijn de fouten het kleinst. De metingen zijn verricht vanaf zeilschepen met een handlood. De schepen hebben in raaitjes kriskras door het gebied gevaren. De afstand tussen de punten in een raai bedraagt ongeveer 100 meter. De afstand tussen de raaien varieert van ongeveer 200 meter in de geulen tot 1000 meter op de platen. De Raan, het Bankje van Zoutelande en het westelijk deel van de Rassen bevatten de minste punten. Het oostelijk deel van de Wielingen tot Zwartepolder is het dichtst bedekt met metingen. De nauwkeurigheid van de lodingspunten wordt in orde van 2-3 dm in diepte en enkele tientallen meters in afstand geschat (stochastische fouten). Daarnaast zijn systematische fouten aanwezig als gevolg van onzekerheden in het reductievlak en door menselijke fouten bijvoorbeeld tijdens de calibratie, die tevens enkele decimeters kunnen bedragen. Tot slot moet nog opgemerkt worden dat de kaarten ten behoeve van de scheepvaart vervaardigd zijn en daarom weinig informatie bevatten over de allerdiepste delen van de geulen en de ondiepste delen op de platen. Dit beperkt de nauwkeurigheid van de morfologische analyses gebaseerd op deze kaarten.

Tabel 1: Beschikbaarheid oude morfologische opnamen.

Jaar opneming	Waar beschikbaar	Coördinaten/Eenheden	Reductievlak
1804 (Beautemps-Beaupré)	J.H. van den Berg, UU	lengte beoosten Parijs / Franse voet	g.l.l.w.s.eq.
1823	T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte bewesten Amsterdam/ Nederlandse palmen	g.l.w.d.
1842	T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte bewesten Amsterdam/ Nederlandse palmen	g.l.w.d.
1865	Meetdienst Vlissingen T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte bewesten Amsterdam/ Nederlandse palmen	g.l.w.
1875/76	Meetdienst Vlissingen T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte bewesten Amsterdam/ Nederlandse palmen	g.l.w.
1894/95	Meetdienst Vlissingen T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte bewesten Amsterdam/ Nederlandse palmen	g.l.w.
1907/08	Meetdienst Vlissingen T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte bewesten Amsterdam/ Nederlandse palmen	g.l.w.
1921/22	Meetdienst Vlissingen T. Pieters, RIKZ, Middelburg	lengte beoosten Greenwich/dm	g.l.l.w.s.
1932	Meetdienst Vlissingen	lengte beoosten Greenwich/dm	g.l.l.w.s.
1952	Meetdienst Vlissingen	lengte beoosten Greenwich/dm	g.l.l.w.s.
1978	Meetdienst Vlissingen	lengte beoosten Greenwich/dm	g.l.l.w.s.

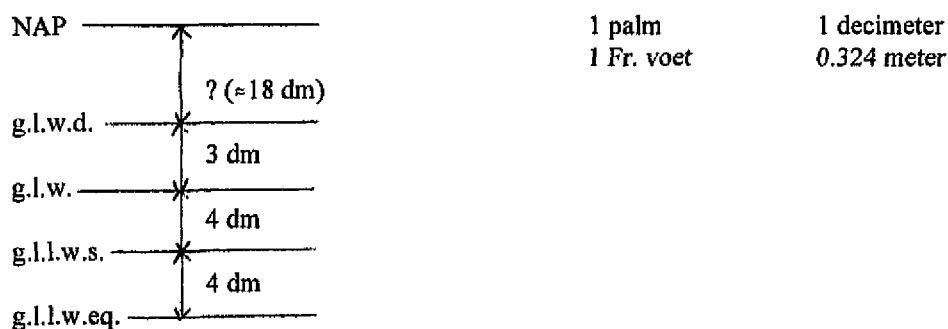
g.l.w. gemiddeld laagwater

g.l.w.d. gemiddeld laagwater doortij

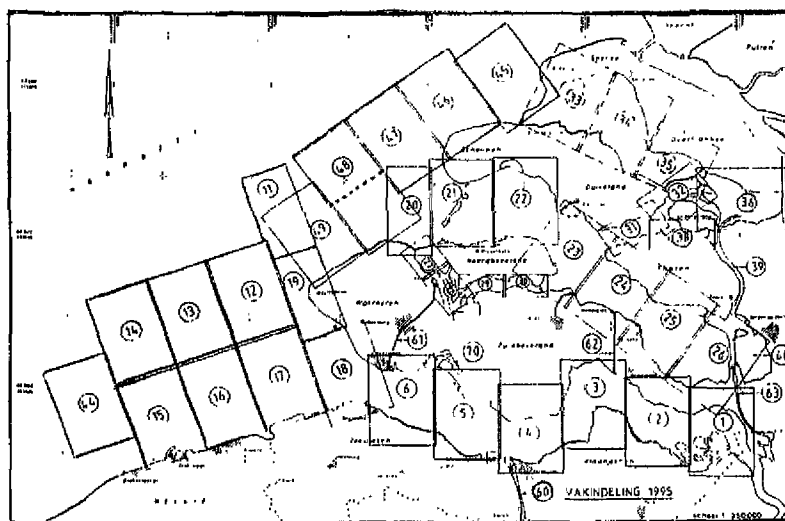
g.l.l.w.s. gemiddeld laag laagwater springtij

g.l.l.w.s.eq. gemiddeld laag laag water springtij tijdens equinoxiale getijden

Bovenstaande reductievlakken zijn bepaald uit waterstanden van enkele jaren voor het tot stand komen van de kaart. Indien deze gegevens omgerekend worden naar NAP moeten de ligging van de reductievlakken uit oude gegevens bepaald worden. De oude reductie vlakken zijn niet horizontaal, aangezien de getijrange varieert in het mondingsgebied (toename naar land en afname in noordelijke richting). In onderstaande figuur is een globale indicatie gegeven van de waterstandsverschillen tussen de genoemde reductievlakken.



De meetdienst Zeeland heeft vanaf 1960 vaklodingen in het mondingsgebied van de Westerschelde uitgevoerd (tabel 2). De vakken 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 en 44 beslaan het grootste deel van het mondingsgebied, alleen het deltafront valt hier gedeeltelijk buiten (figuur 1). Sinds 1969 is het mondingsgebied iedere twee jaar (bijna) volledig opgenomen. Het grootste gedeelte is ook digitaal beschikbaar, zodat eenvoudig morfologische analyses, bijvoorbeeld kuberingen, uitgevoerd kunnen worden.



Figuur 1: Overzicht ligging lodingsvakken Westerschelde monding.

Tabel 2: Beschikbaarheid vaklodingen Westerschelde monding.

Vak	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
11					o			o			o		o		o		k	
12						o			•		o		o		o		k	
13							o			o			o			o		
14										o		o		o			o	
15										o		o		o		o		k
16							o			o		o		o		o		k
17					o				o		o		o		o		k	
18	o		k		o			o			o		o		o		k	
19					o			o			o		o		o		k	
44														k			o	k

Vak	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
11	o		k		o			k	•	•	•	•		•		•		
12	o		k		o		k		•				•			•		
13	o		k	o				o				•				•		
14	o	k		o				k				•				•		
15		o		o		k		o		o		o	•			•		•
16		o		o		k		o		o		o	•			•		•
17	o		k		o		k		•		•	o	•		•		•	
18	o		k		o		k		•		•		•		•		•	•
19	o		k		o			k	•	o	o	o	•		•		•	
44		o		o		k		k		•		•	•			•		•

k beschikbaar als kaart

o beschikbaar als kaart, digitaal beschikbaar als digibeeldgrid

• beschikbaar als kaart, digitaal beschikbaar als digibeeldgrid en ArcInfoGrid

Daarnaast zijn van de kuststroken strandmetingen, oeverlodingen en doorlodingen aanwezig. De strandmetingen beslaan het gebied tussen de duinen en de laagwaterlijn. De oeverlodingen sluiten aan op de strandmetingen. Tijdens doorlodingen wordt aansluitend op de oeverlodingen de kustnabije zone tot 1 à 3 km uit de kust opgemeten. De oude strandmetingen bestaan uit het opmeten van de positie van de laagwater-, hoogwater- en duinvoetlijn. De duinvoet was gedefinieerd als de overgang tussen strand en duin. De overgang werd op het oog bepaald, waardoor de methode enigszins subjectief is. De hoog- en laagwaterstanden zijn niet constant in de tijd, daarom werden de hoogwater- en laagwaterlijn gedefinieerd als een bepaalde waterstand ten opzichte van NAP. Die NAP waarden zijn verschillend voor elk kustvak en zijn derhalve indien bekend per kustvak weergegeven in tabel 3. De metingen zijn altijd in hetzelfde jaargetijde verricht om seizoensvariaties zo veel mogelijk uit te sluiten. De kustmetingen werden vroeger door lokale instanties (districten) verricht en de frequentie varieert derhalve sterk langs de kust. Over het algemeen zijn er langs de Nederlandse kust aanzienlijk meer metingen verricht dan langs de Belgische kust.

Tabel 3: Definitie hoogwater- en laagwaterlijn per kustvak ten behoeve strandmetingen

Kustvak	Waterlijn	Waterstand (m NAP)
Westwatering: Vlissingen tot Zoutelande	HW	+1.79
Westwatering: Vlissingen tot Zoutelande	LW	-1.87
Noordwatering zuiderstrand: Zoutelande tot Westkapelle	HW	+1.76
Noordwatering zuiderstrand: Zoutelande tot Westkapelle	LW	-1.74

Halverwege de jaren zestig is in Nederland een nieuw uniform kustlodingsraaiensstelsel ingevoerd. Sindsdien worden in het kader van JARKUS (=jaarlijkse kustlodingen) kustprofielen gemeten in plaats van hoogwater-, laagwater- en duinvoetlijnen en oeverlodingen. De kustprofielen liggen op een onderlinge afstand van 200 meter en strekken zich uit van 200 meter landwaarts van de duinvoet tot 800 meter zeewaarts van de laagwaterlijn.

Tot het uniforme lodingsraaiensstelsel behoren tevens doorlodingsraaien, die aansluiten op de kustlodingen en doorlopen tot 1500 meter uit de kust. De doorlodingen worden ééns in de vijf jaar verricht en liggen 1000 meter uit elkaar. Tot 1962 zijn de lodingen verricht met behulp van een handlood, daarna is men overgestapt op echolood, waarmee de nauwkeurigheid enigszins toenam. De nauwkeurigheid van lodingen wordt door diverse factoren bepaald, namelijk de fout in de diepte, in de plaatsbepaling en in het reduceren naar een vaste waterstand (Glim en Visser 1981). Hierdoor bedraagt de totale fout in de diepte 1 tot 2 decimeter en in de afstand enkele meters. De nauwkeurigheid van de lodingen in de mond van de Westerschelde neemt in westelijke richting af als gevolg van het gebruikte plaatsbepalingssysteem (decca deltaketen), de toename in deining en golfslag verder van de kust en de zeewaarts toenemende onzekerheid in het referentievlak.

kust van Walcheren (zie tabel 4):

Vanaf 1881/82 zijn in Walcheren jaarlijks strandmetingen en oeverlodingen verricht en ééns in de vijf jaar doorlodingen. In de periode van 1924 tot 1942 zijn de metingen slechts om het jaar uitgevoerd, terwijl tussen 1942 en 1946 geen metingen werden verricht vanwege de Tweede Wereldoorlog. De raaien voor de strandmetingen en oeverlodingen lagen ongeveer 200 meter uit elkaar. Alleen voor de Westkapelse zeedijk bedroeg de spatiëring van de oever-

lodingen slechts 100 meter. In 1958 werd het aantal strandmetingsraaien tussen Zoutelande en Westkapelle uitgebreid tot om de 100 meter. Na de invoer van het nieuwe raaien stelsel in 1968 werden de strandmetingen en oeverlodingen jaarlijks uitgevoerd in raaien om de 200 meter.

De doorlodingsraaien vielen gedeeltelijk samen met de oeverlodingsraaien. Het aantal lodingsraaien werd in de loop der tijd uitgebreid, zodat in 1949 om de 2000 meter doorlodingsraaien aanwezig waren, waarin tot 3000 meter uit de kust gepeild werd. Sinds de invoer van het nieuwe lodingsstelsel in 1968 liggen de doorlodingsraaien om de 1000 m en wordt tot 1500 meter uit de kust gepeild.

Tabel 4: Overzicht kustmetingen voor de Noordwestkust van Walcheren.

Periode	Metingen	Frequentie	Spatiëring (m)
1882-1967	HW, LW en duinvoet	jaarlijks (m.u.v. 1924-1946)	200 (na 1958 100)
	oeverlodingen	jaarlijks	200 (voor Westkapelse zeedijk 100)
	doorlodingen	1 maal per 5 jaar	2000 (pas sinds 1949, daarvoor meer)
1968-heden	kustlodingen	jaarlijks	200
	doorlodingen	1 maal per 5 jaar	1000

Kust van Vlaanderen (zie tabel 5 en 6):

In Zeeuwsch Vlaanderen zijn vanaf 1880 jaarlijks om de 200 meter strandmetingen en iedere vijf jaar doorlodingen uitgevoerd. Oeverlodingen zijn reeds vanaf 1875 jaarlijks verricht. Na invoer van het nieuwe uniforme kustlodingsraaienstelsel in 1963 worden jaarlijks strand- en duinprofielen en één in de vijf jaar doorlodingen uitgevoerd.

In Belgisch Vlaanderen is de kuststrook tot 1971 niet apart gelood. Het bodemverloop in de kustzone kan derhalve alleen afgeleid worden uit peilkaarten. In 1954, 1962, 1970, 1972, 1974, 1975, 1976, 1979 en 1982 is de bodemligging van het Belgische deel van de Westerschelde monding gepeild en de vervaardigde kaarten zijn aanwezig bij de studiedienst Vlissingen. In de perioden 1971 tot 1973 en 1976 tot 1978 zijn halfjaarlijkse lodingen verricht. Genoemde gegevens zijn overgenomen uit Roelse en Maranus (1985), het overzicht is derhalve waarschijnlijk niet compleet; recente informatie ontbreekt.

Tabel 5: Overzicht kustmetingen in Zeeuwsch Vlaanderen.

Periode	Metingen	Frequentie	Spatiëring (m)
1880-1963	HW, LW en duinvoet	jaarlijks	200
	oeverlodingen (al vanaf 1875)	jaarlijks	?
	doorlodingen	1 maal per 5 jaar	?
1963-heden	kustlodingen	jaarlijks	200
	doorlodingen	1 maal per 5 jaar	1000

Tabel 6: Overzicht kustmetingen in Belgisch Vlaanderen.

Jaar	Metingen	Frequentie	Spatiëring (m)
1954, 1962, 1970, 1972, 1975, 1976, 1979 en 1982	Peiling bodemligging Belgisch deel Westerscheldemondd	n.v.t	n.v.t
1971-1973 1976-1978	strandprofielen	halfjaarlijks	?

2.2 Hydraulica

2.2.1 Waterstanden

Het verloop van de waterstand wordt op vijf verschillende stations in de Westerschelde monding bijgehouden, namelijk bij Cadzand, Breskens, Vlissingen, Westkapelle en de Vlakte van de Raan (figuur 2). De waterstand wordt thans overal met een vlotter (peilschaal) gemeten, behalve bij Breskens waar een druksensor aanwezig is. De metingen zijn in de tweede helft van de vorige eeuw gestart (tabel 7). Het verloop van de waterstand werd bepaald met een peilschaal die regelmatig werd afgelezen. De peilschalen werden later (tabel 7) voorzien van peilschrijvers, waarmee de waterstand automatisch continu geregistreerd wordt. Recent (tabel 7) zijn de schrijfstiften vervangen door elektronische apparatuur (DNM=digitale niveau meter), waarmee de gegevens digitaal doorgestuurd en opgeslagen worden. Bovenstaande informatie is ontleend aan diverse tienjarig-overzichtsrapporten van de waterstand.

Tabel 7: Plaatsing instrumenten voor registratie van de waterstand in de Westerschelde monding.

Station	Plaatsing peilschaal	Plaatsing peilschrijver	Plaatsing DNM
Vlissingen	1862	26 juli 1877	11 nov 1986
Breskens	1862	11 dec 1973	-
Cadzand	1876	1 sep 1966	11 nov 1986
Westkapelle	1872	21 juni 1954 *	1 jan 1987

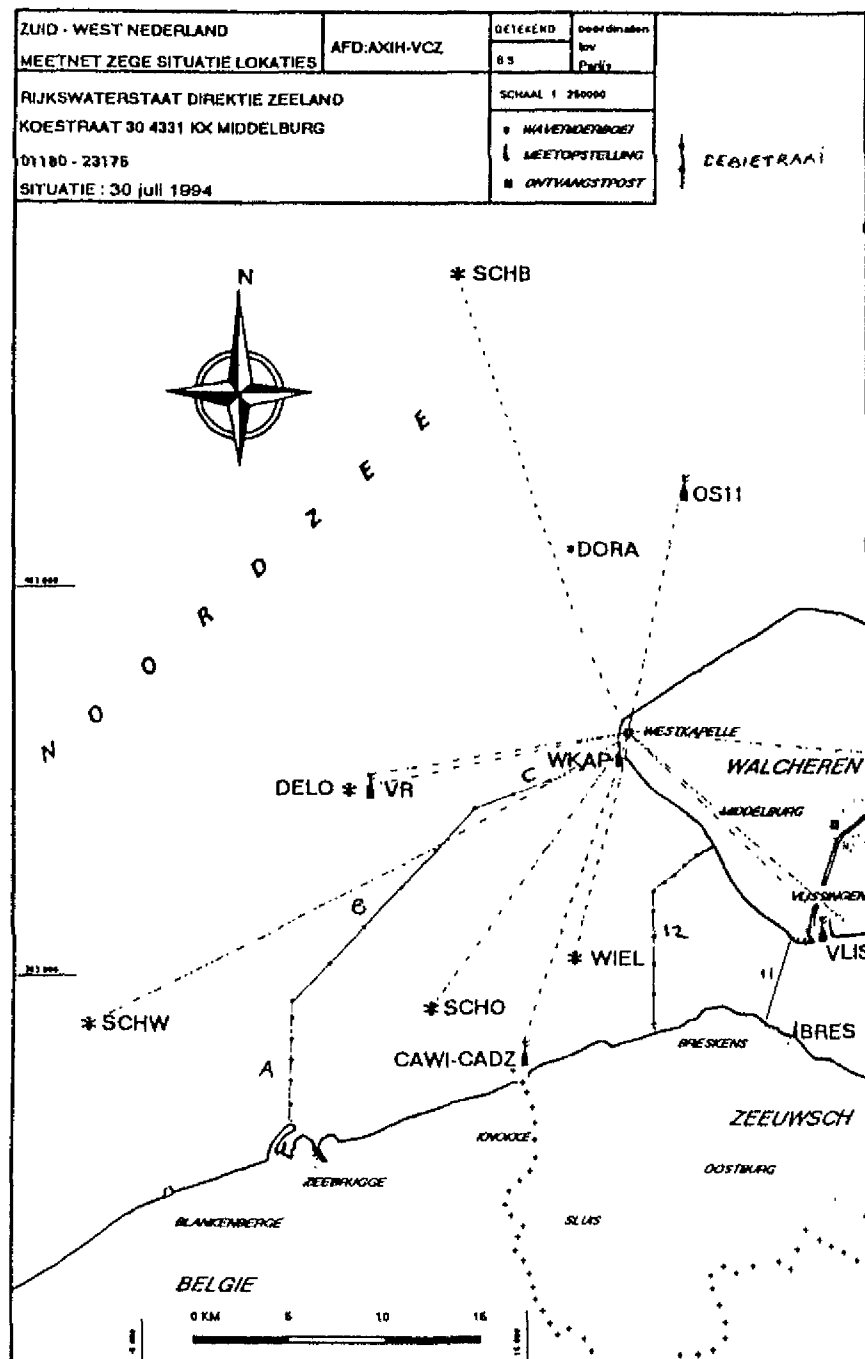
* Reeds in 1885 is hier een peilschrijver geplaatst. Deze is echter slechts gedurende enkele jaren (1885-1890 en 1935-1943) in gebruik geweest.

2.2.2 Stroming

Uit stroomatlassen kan het algemene stroombeeld in het mondingsgebied afgeleid worden. Deze atlassen zijn er vanaf 1958.

In de Westerschelde monding zijn drie debietraaien aanwezig (zie figuur 2), waarin door de meetdienst Vlissingen met meetschepen met enige regelmaat dertienuurs metingen worden uitgevoerd. Tijdens dertienuurs metingen wordt op een aantal plaatsen in de meetraai de stroomsnelheid, stroomrichting en sedimentconcentratie op verschillende hoogten boven de bodem gemeten. De stroomsnelheid en stroomrichting worden met respectievelijk een Ott-molen en een Elmar gemeten. De zandconcentratie wordt thans met een AZTM bepaald en de slibconcentratie met een PARTECH. Voordat deze acoustische instrumenten bestonden, werd in situ water met sediment opgevangen. Hiervoor bestonden verschillende apparaten, zoals speciale flessen en afsluitbare vallen. In het laboratorium werd vervolgens de hoeveelheid opgevangen sediment bepaald. Met behulp van de dertienuurs metingen kan de debietverdeling in de ruimte en in de tijd bepaald worden en tevens kunnen de sedimenttransporten berekend worden. Debietraai 11 ligt in het oosten van het mondingsgebied en doorsnijdt de Wielingen, Nolleplaat en Sardijn-geul. In 1932, 1964, 1975, 1985 en 1995 zijn daar metingen uitgevoerd. Debietraai 12 ligt meer naar het westen en gaat door het Oostgat, de Deurloo en de Wielingen. Deze raai is doorgemeten in 1985 en 1991. De derde raai loopt van Westkapelle naar Zeebrugge en is onderverdeeld in drie deelraaien. Deelraai A ligt in de Wielingen, deelraai B gaat over de Vlakte van de Raan en deelraai C doorsnijdt het Oostgat en de Deur-

loo. Deelraai A en C zijn in 1992 doorgemeten, terwijl in deelraai B pas in 1993 metingen zijn uitgevoerd.



Figuur 2: Overzicht meetraaien en meetpunten in de Westerschelde monding.

Bovengenoemde debietmetingen duren één hooguit twee dagen en de resultaten worden herleid naar gemiddeld getij. Om het verloop van de snelheid gedurende een doottij-springtij cyclus te achterhalen zijn aanvullende OSM metingen uitgevoerd. Een OSM, vroeger Flachsee genoemd, meet de stroomsnelheid op een vaste hoogte boven de bodem. Van 5 september tot en met 3 oktober 1991 zijn met behulp van 6 OSM's metingen uitgevoerd in debietraai 12. In de periode van 16 oktober tot en met 13 november 1991 is met 8 OSM's gemeten in het Oostgat en de Deurloo.

2.2.3 Golven

Voor 1985 werden incidentele golfwaarnemingen verricht in het mondingsgebied van de Westerschelde. De golfhoogte, periode en lengte werden visueel bepaald, met behulp van een drijvende of vaste baak en verrekijker. De windrichting werd als maat voor de golfrichting gebruikt. In 1954 zijn plaatselijk de eerste zelfregistrerende golfmeters in gebruik genomen, waarmee het mogelijk werd verder uit de kust de golfhoogte te bepalen. De golfwaarnemingen van 1947-1954 en van 1954-1969 zijn gerapporteerd in respectievelijk nota 55-7 en 74-5 van de Studiedienst Vlissingen.

Vanaf 1985 worden golfgegevens uitsluitend geregistreerd met behulp van golfboeien op 4 locaties in de Westerschelde mond (figuur 2), namelijk Deurloo (DELO), Scheur Oost (SCHO), Scheur West (SCHW) en Wielingen (WIEL). De golfboeien geven zowel de golfhoogte en periode als de hoek van inval.

2.3 Menselijke ingrepen

De mens heeft op verschillende manieren ingegrepen in het natuurlijke systeem ten behoeve van de scheepvaart en de veiligheid. Door middel van de aanleg van strandhoofden heeft hij getracht de natuurlijke erosie van de kust tegen te houden. Verder is de kusterosie frequent gecompenseerd door strandsuppleties. Ten behoeve van de scheepvaart zijn geulen door middel van baggeractiviteiten op de vereiste diepte gehouden. Het gebaggerde materiaal is elders in de buitendelta gestort. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de menselijke activiteiten in het mondingsgebied.

Strandsuppleties (tabel 8 en 9):

In de onderstaande tabellen staan de suppleties vermeld die langs de kust van Zeeuwsch Vlaanderen, Vlaanderen en het zuidoostelijke deel van Walcheren uitgevoerd zijn.

De gegevens omtrent de Belgische suppleties zijn ontleend aan Roelse en Maranus (1985). Gedetailleerdere informatie is aanwezig bij de Hydrografische Dienst van de Kust. Alle suppleties langs de Nederlandse kust worden thans geïnventariseerd door H. Cohen (RIKZ Den Haag). Het onderstaande overzicht is overgenomen uit een voorlopige uitdraai daarvan.

Tabel 8: Uitgevoerde strandsuppleties langs de kust van Walcheren (ZO deel)

Jaar	Locatie (kilometrerings)	Type	Hoeveelheid (10^6 m^3)	Herkomst
1952-1959	Zwanenburg (32.6-33.4)	strand	0.775	Sardijngeul
1952	Vlissingen (34.0-34.4)	vooroever	0.050	Sardijngeul
1956	Vlissingen (34.0-34.4)	vooroever	0.032	Sardijngeul
1975	Vlissingen (34.0-34.4)	strand	0.045	Nolleplaat
1984	Westkapelle (22.94-23.68)	duin	0.100	Nolleplaat
1988	Westkapelle (23.83-23.94)	duin	0.013	
1988	Boerenhof (22.55-23.54)	strand	0.230	
1988	Joossesweg (23.25-23.54)	duin	0.0935	
1988	Westkapelle (24.186)	duin	0.025	
1988	Zoutelande (24.8-25.8)	duin	0.153	

1986-1988	Westkapelse zeedijk (17.95-23.00)	dijk	1.300
1990	Westkapelle-Zoutelande (23.7-24.9)	strand	0.100
1991	Vlissingen (34.00-34.58)	?	?
1991	Westkapelle-Zoutelande (21.8-25.9)	strand	0.788
1992	Vijgeter-Vlissingen (31.60-34.63)	strand	0.169
1992	Zoutelande-Vijgeter (25.93-27.82)	strand	0.192
1993	Zoutelande-Vijgeter	strand	0.619
1995	Dishoek (25.50-26.02)	strand	0.054
1995	Zoutelande (29.825-33.060)	strand	0.463

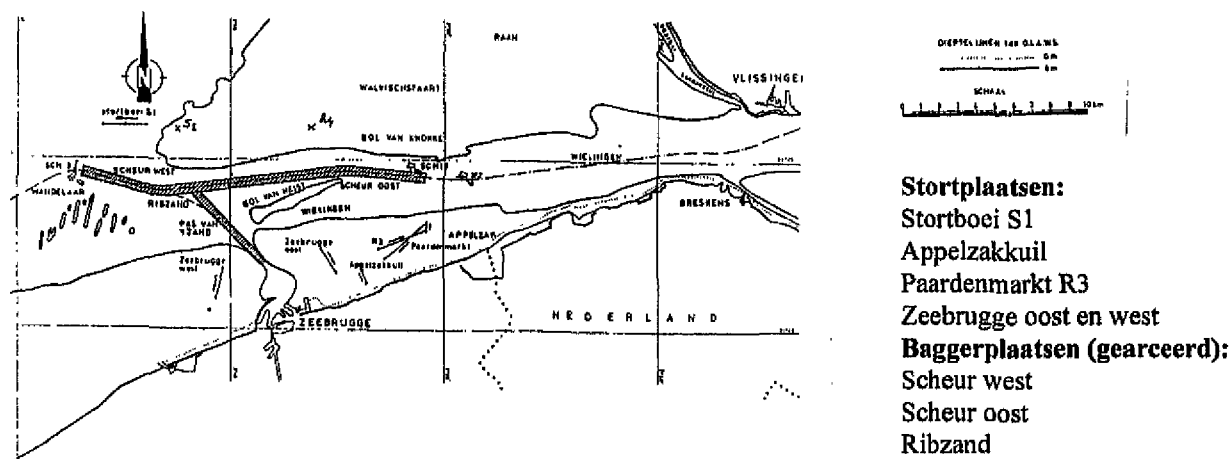
Tabel 9: Uitgevoerde strandsuppleties langs de kust van Vlaanderen

Jaar	Locatie (kilometrerings)	Type	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)
1920	Heist	strand	?
1955-1957	Heist, Duinbergen en Knokke	strand	1.250
1968	Heist	strand	0.600
1971	Breskens (0.40-0.85)	strand	0.206
1971-1972	(1.46-1.71)	?	?
1975-1982	(10.68-10.92)	duin	?
1977-1978	ten oosten van Knokke (lengte van 5 km)	strand	2.600
1979-1981	(13.63-14.12)	duin	?
1984-1985	(12.62)	duin	?
1977-1978	ten oosten van Zeebrugge (lengte van 8 km)	strand	5.800
1988	Cadzand (11.25-13.45)	strand	1.030
1989	Groede	strand	0.440
1989	Nieuwe Sluis-Breskens veerhaven (1.0-4.0)	strand	0.660
1990	Cadzand west (13.18-14.27)	dijk	0.260
1990	Kievitte west	strand en duin	0.388
1990	Tienhonderdpolder (10.46-11.12)	dijk	0.580
1992	ten noorden van Zwin (13.54-14.87)	strand	0.067
1993	Breskens-Schooneveld (2.40-3.12)	strand	0.090
1994	Adornispolder (8.06-9.18)	strand	0.348
1994	Breskens-Kom (0.11-0.71)	strand	?
1994	Cadzand (10.57-13.46)	strand	0.560
1994	ten noorden van Zwin (13.63-14.17)	strand	0.091
1996	Schooneveld (2.0-3.5)	strand	0.130

Bagger- en storthoeveelheden (tabel 10 en 11):

De verdiepingswerken in het Scheur door de Belgische Dienst der Kust te Oostende zijn in 1960 begonnen. Aanvankelijk waren de gebaggerde hoeveelheden beperkt, na 1968 zijn de

baggerhoeveelheden echter sterk toegenomen. In deze periode werd tevens in de Pas van 't Zand en de haven van Zeebrugge gebaggerd. Het sediment uit het Scheur werd tot 1969 ten westen van Zeebrugge in de omgeving van de Paardenmarkt gestort. Sinds 1969 wordt het materiaal uit het Scheur tesamen met de specie uit de Pas van 't Zand bij Schooneveld gedumpt. De onderhoudsspecie uit de haven van Zeebrugge wordt naar de stortplaats op de Paardenmarkt gebracht. De bagger- en stortlocaties in de Westerschelde monding zijn in figuur 3 weergegeven. De bagger- en stortvolumes voor zover die vermeld zijn in de bestudeerde rapporten zijn bijeengevoegd in respectievelijk tabel 9 en 10. De bagger- en stortvolumes per jaar zijn daarnaast grafisch weergegeven in figuur 4 en 5. De tabellen en de figuur komen echter niet helemaal overeen. Mijns inziens zijn de gegevens in de figuren het meest betrouwbaar, aangezien het rapport van Mol (1995) waaruit de figuren afkomstig zijn speciaal gericht is op de menselijke activiteiten in de Westerschelde.



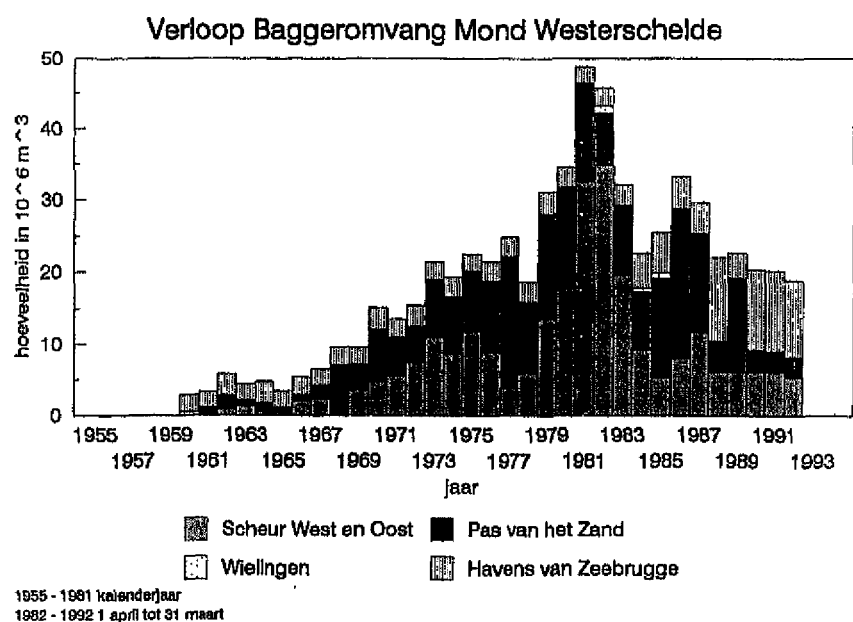
Figuur 3: Bagger- en stortlocaties in de Westerschelde monding.

Tabel 10: Baggerhoeveelheden in de Westerschelde monding.

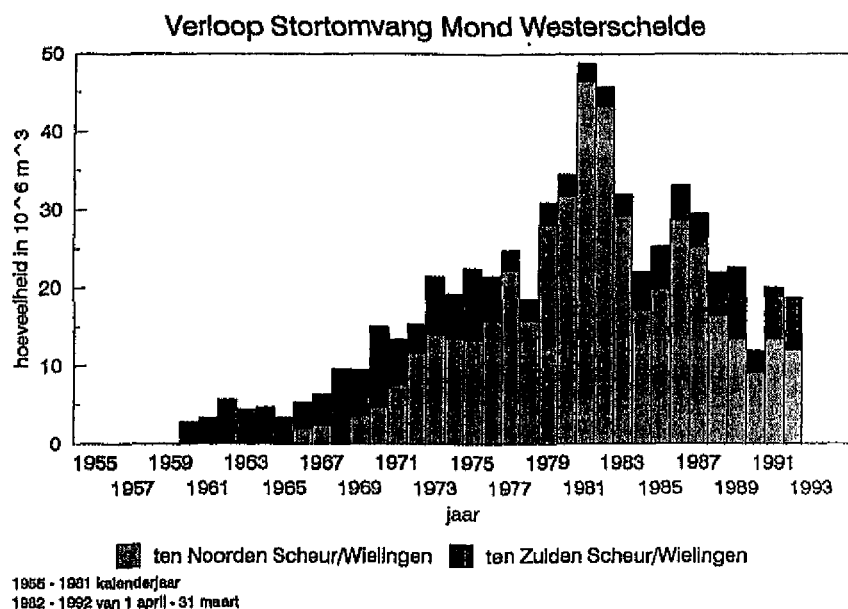
Jaar	Locatie	Hoeveelheid (10^6 m^3)
1957	Haven Breskens	0.206
1960-1968	Scheur	4.50
1969-1980	Scheur	77.76
1974-1975	Westelijke oever Sardijngheul / NO rand Nolleplaat	1.023
1976-1977	Westelijke oever Sardijngheul / NO rand Nolleplaat	0.20
1985-1990	Westelijke oever Sardijngheul	0.65
1986-1990	Bankje van Zoutelande	2.20

Tabel 11: Storthoeveelheden in de Westerschelde monding.

Jaar	Locatie	Hoeveelheid (10^6 m^3)
1957	Ten oosten haven Breskens	0.206
1969-1980	Schooneveld	100
jaren '70	Paardenmarkt	2.50 per jaar
jaren '70	Appelzakkuil	2.0 à 3.0 per jaar 2.9 (1976), 0 (1977)



Figuur 4: Baggerhoeveelheden in de Westerschelde monding (Mol, 1995).



Figuur 5: Storthoeveelheden in de Westerschelde monding (Mol, 1995).

Bouw strandhoofden, havendammen etcetera (tabel 12):

Afgezien van strand- en duinverdedigingswerken die de stroming alleen in de directe kustzone beïnvloeden zijn de ingrepen door de mens in de Westerschelde monding vrij beperkt gebleven. In de vorige eeuw is het Zwin ingepolderd en in deze eeuw is de haven van Zeebrugge van havendammen voorzien. Echter grootschalige ingrepen in aangrenzende gebieden, zoals de verdiepingswerkzaamheden in de Westerschelde en de aanleg van de Oosterscheldekering, zullen waarschijnlijk ook invloed uitoefenen op de waterbeweging in de Westerschelde monding.

Tabel 12: Overzicht menselijke activiteiten.

Jaar	Activiteit
begin 18 ^e eeuw	Aanleg strandhoofden (van rijshout) ten oosten van het Zwin, Zeeuwsch Vlaanderen
begin 18 ^e eeuw	Aanleg strandhoofden ten noordwesten van Vlissingen, Walcheren
begin 18 ^e eeuw	Aanleg strandhoofden tussen Westkapelle en Zoutelande
19 ^e eeuw	Aanleg duinvoetverdediging ten noorden van Vlissingen, voor Zoutelande en ten zuiden van de Westkapelse zeedijk.
1827	Begin inpoldering Zwin
vanaf 1860	Strandhoofden Zeeuwsch Vlaanderen worden van bestening voorzien
1864	Vervolg inpoldering Zwin
≈1865	Duindoorsnijding te Heist ten behoeve van uitwatering
1867	Aanleg strandmuren te Knokke en Heist
1872	Uitwateringssluys Cadzand
1897-1907	Bouw havendam te Zeebrugge
≈1900	Aanleg strandhoofden langs de Belgische kust
1950	Renovatie strandhoofden Walcheren
1956	Duinvoetverdediging voor Zoutelande omgezet in een zeedijk
1957	Aanleg veerhaven Breskens
1970-1980	Verdieping vaarwegen op Antwerpen en Zeebrugge
1971	Verlengen havendammen Breskens
1980	Zeewaartse uitbreiding havendam Zeebrugge
≈1980	Renovatie strandhoofden tussen het Zwin en Zwarte Polder
1985	Uitbouw haven Zeebrugge
1986	Voltooing stormvloedkering Oosterschelde
1986	Duinvoetverdediging tussen Vlissingen en Dishoek omgezet in een zeedijk

3. Inventarisatie literatuur Westerschelde monding

3.1 Westerschelde monding Algemeen

Ferguson, H.A., 1991. Dialoog met de Noordzee. AMAboeken, Hippolytushoeve Kruisweg 1, Hippolytushoef, Nederland.

Looff, A.P. de en Verhagen, H.J., 1986. Mondingsgebied van de Westerschelde: Getijstromingen, golfklimaatgegevens, bodemligging en morfologische processen. Rijkswaterstaat rapport GWWS-86.404.

Jong, H. de en Maldegem, D. van, 1988. Literatuurbestand morfologie en fysica Schelde-estuarium (periode 1930-1988). Rijkswaterstaat notitie GWAO-88.1311.

Mol, G., 1995. De Westerschelde: Een resultaat van menselijke ingrepen. Rapport RIKZ-95.030.

Svašek, 1995. KUST*2000 Definitiestudie: Westerscheldemon. Ingenieursbureau Svašek B.V., nota RKZ-256.

Terwindt, J.H.J en Stolk, A., 1995. Morphodynamics of tidal deltas (mortidel). A comparative study of the deltas of the Westerschelde and the Gironde. Universiteit Utrecht, Mast III proposal PL 950104.

Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989. Beleidsplan Westerschelde deelrapport 4: Morfologische structuur en dynamiek. Rijkswaterstaat Middelburg.

3.2 Morfologie Westerschelde monding

Berg, J.H. van den, 1987. Toelichting bij de isallobatenkaart Voordelta 1975-1984. Rijkswaterstaat, nota ZL 87.0020.

Berg, J.H. van den, Schouten, D. en Westenbrugge, C.J. van, 1991. Zandbalans Westerschelde 1965-'70-'75-'80-'85. Rijkswaterstaat, nota NWL-91.36.

Cauwenberghe, C. van, 1966. Hydrografische analyse van de Scheldemonding ten oosten van de meridiaan 3°05' tot Vlissingen. Het ingenieursblad, 35, 17, 565-576.

Cauwenberghe, C. van, 1971. Hydrografische analyse van de Vlaamse Banken langs de Belgisch-Franse kust.

Cauwenberghe, C. van, 1977. Hydrografische analyse van de Paardenmarkt en de Appelzak (Belgische oostkust) sinds 1954 tot 1975. Hydrografische dienst der kust, rapport nr. 16.

Dam, D. van, 1992. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde naar aanleiding van de in 1990 in de vakken 11, 12, 17, 18 en 19 verrichte lodingen. Rijkswaterstaat Directie Zeeland, nota NWL-92.31

Haring, J., 1948. Inhouds- en diepteveranderingen buitenbankengebied van de mond van de Westerschelde, 1894-1921. Rijkswaterstaat rapport nr. 7.

Haring, J., 1955. Zandbalansen van de zuidwestelijke wateren van Nederland over de perioden 1872-1933 en 1933-1952. Rijkswaterstaat, rapport nr. 3.

Israel, C., 1993. De ontwikkeling van de Westerscheldemon voor de zuidwestkust van Walcheren. Afstudeerverslag, juni 1993.

Kleinjan, I.L., 1933. Beschouwingen en berekeningen over de ontwikkeling van de Westerschelde en haar mondingsgebied sedert 1800 op grond van de beschikbare hydrografische

kaarten. Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren.

Looff, A.P. de, 1987. Vaarwegverdieping van de Wielingen: morfologische en stroomtechnische aspecten. Afstudeerverslag TH Delft.

Looff, D. de, 1975. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1974 in de vakken 18, 11, 17 en 12 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota 75.19.

Looff, D. de, 1977. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1976 in de vakken 14 en 43/44 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota 77.7.

Looff, D. de, 1977. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1976 in de vakken 18, 11, 17 en 12 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota 77.8.

Looff, D. de, 1978. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1977 in de vakken 16, 15, 14 en 43/44 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-78.V009.

Looff, D. de, 1979. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1978 in de vakken 13 en 14 (noordelijk deel) verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-79.V012.

Looff, D. de, 1979. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1978 in de vakken 18, 11, 17 en 12 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-79.V013.

Looff, D. de, 1980. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1979 in de vakken 13, 14, 15, 16 en 43/44 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-80.V014.

Looff, D. de, 1980. Onderzoek gevolgen verdieping Westerschelde, met betrekking tot morfologie, zandhuishouding, stortplaatsen en stabiliteit oevers. Rijkswaterstaat, nota WWKZ-80.V018.

Looff, D. de, 1981. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1980 in de vakken 18, 11, 17 en 12 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-81.V009.

Looff, D. de, 1981. Opgetreden en te verwachten diepteveranderingen in het gebied van de mond van de Westerschelde, in samenhang met de reeds uitgevoerde en voorgenomen verdiepingsbaggerwerken in het Scheur. Rijkswaterstaat, Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-81.V207.

Looff, D. de, 1982. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1981 in de vakken 13, 14, 15, 16 en 43/44 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-82.V011.

Looff, D. de, 1983. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1982 in de vakken 18, 11, 17 en 12 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-83.V005.

Looff, D. de, 1984. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1983 in de vakken 15, 16 en 43/44 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-84.V012.

Looff, D. de, 1985. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1984/85 in de vakken 18, 11a, 11b en 17 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-85.V026.

Looff, D. de, 1986. Beschouwingen over de bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde, naar aanleiding van de in 1985 in de vakken 13, 14, 15, 16 en 43/44 verrichte rivierlodingen. Rijkswaterstaat studiedienst Vliissingen, nota NXL-866.017.

Maranus, J.W., 1986. Grootchalige zandgolfbeweging langs de zuidelijke deltakust. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg, nota DGW-86.002.

Postma, R., Mulder, J., Louters, T. en Hallie, F., 1991. Voorspelling van de morfologie en de sedimentbalans van de voordelta in 2010. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, GEOPRO rapport 1991.11.

Projectgroep Morfologie, 1987. Morfologisch onderzoek Verdieping 48'-43' Mondingsgebied Wielingen-Vliissingen. Rijkswaterstaat.

Storm, C., Bollebakker, P., Jong, J. de en Mol, G., 1994. Nauwkeurigheid zandbalans Westerschelde 1965-1990 en aanbevelingen ter optimalisatie. Rijkswaterstaat, rapport RIKZ-94.008.

Svašek, Preliminary study on the morphological development southern part of the North Sea.

Uit den Bogaard, L.A., 1991. Relatie zandbalans Westerschelde met de morfologie van de ebgetijdedelta en kust. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, rapport GEOPRO 1991.021.

Veen, J. van, 1943. Verdieping Scheldemond.

3.3 Morfologie kuststroken Westerschelde monding

Agema, J.F., 1980. Verandering van de Zeeuwse kusten door mens en natuur, Rijkswaterstaat, studiedienst Vliissingen, nota WWKZ-80.V024.

Bakker, W.T., 1968. A mathematical theory about sand waves and its application on the Dutch Wadden isle of Vlieland. Shore and Beach, 36, 2, 5-14.

Lambeek, J.J.P., 1991. Zandgolven in Zeeland. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, GEOPRO rapport 91.30.

Rijkswaterstaat, 1988. Handboek zandsuppleties.

Roelse, P. en Maranus, J.W., 1985. De lange termijn ontwikkeling van de Belgische oostkust en het aangrenzende gedeelte van Zeeuwsch Vlaanderen. Rijkswaterstaat, nota WWKZ-85.V0101.

Roelse, P. en Maranus, J.W., 1988. Prognose kustontwikkeling Zeeland 1990-2090, beschrijving methode en resultaten fase 2. Rijkswaterstaat, nota GWWS-88.409.

Walburg, A.M. en Louters, T., 1990. Inventarisatie van bestanden met de ligging van de duinvoet, gemiddeld laagwater en gemiddeld hoogwater van de Zeeuwse eilanden. Rijkswaterstaat, GWA0-90.10.153.

Wilderom, M.H. en Malde, J. van, 1968. De ontwikkeling van de Noordzeekust van Walcheren tussen 1882 en 1968. Rijkswaterstaat, nota 68.3.

Wilderom, M.H., 1973. Tussen deltadijken en afsluitdammen, deel IV Zeeuwsch Vlaanderen.

3.4 Processen Westerschelde monding

Dronkers, J.J., 1961. De invloed van de deltawerken op de getijbeweging en de stormvloedstanden langs de kust van Zuidwest-Nederland. In: Onderzoekingen betreffende de opzet van het deltaplan en de gevolgen van de werken, deel 5. Rapport Deltacommissie.

Ferguson, H.A., 1943. Verslag over de waarnemingen met de 'Oceaan' in het mondingsgebied van de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren, Den Haag.

Jong, H. de, 1989. Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932. Rijkswaterstaat, nota GWAO-89.1004.

Kleinjan, I.L., 1935. Enkele beschouwingen over de verandering der tijverschillen, voornamelijk in de Wester- en Oosterschelde, sedert ongeveer 1860-1870. Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren.

Kohsiek, L.H.M. en Mulder, J.P.M., 1988. Een verkenning van een veranderend watersysteem: de Voordelta. Rijkswaterstaat, nota GWAO-88.002.

Lievense, P., 1989. Faseverschuiving waterstandslokaties Walcheren. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, notitie AX 89.077.

Lievense, P., 1990. Getijontwikkeling voordelta. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, notitie AX 90.037.

Studiedienst Vlissingen, 1955. Verslag over de van 1947-1954 langs de Westerschelde verrichte golfwaarnemingen. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Afdeling Studiedienst Vlissingen, nota 55-7.

Studiedienst Vlissingen, 1974. Incidentele golfwaarnemingen langs de Westerschelde en de Zeeuwse kust, deel 1: meetgegevens in de periode 1954-1969. Rijkswaterstaat, nota 74.5.

3.5 Literatuur morfodynamiek buitendelta's

Allen, G.P., 1971. Relationship between grain size parameter distribution and current patterns in the Gironde estuary (France). *Journal of Sedimentary Petrology*, 41, 1, 74-88.

Biegel, E. en Hoekstra, P., 1995. Morphological response characteristics of the Zoutkamperlaag, Frisian inlet (The Netherlands), to a sudden reduction in basin area. *Spec. Publs. Int. Ass. Sediment.*, 24, 85-99.

Boothroyd, J.C., 1985. Tidal inlets and Tidal deltas. In: *Coastal sedimentary environments*. R.A. Davis (editor), Springer-Verlag, New York, 445-532.

Davis, R.A. en Fox, W.T., 1981. Interaction between wave- and tide-generated processes at the mouth of a microtidal estuary: Matanzas river, Florida (U.S.A.). *Marine Geology*, 40, 49-68.

Fitzgerald, D.M., 1984. Interactions between the ebb-tidal delta and landward shoreline: Price inlet, South Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 4, 1303-1318.

Fitzgerald, D.M., Penland, S. en Nummedal, D., 1984. Control of barrier island shape by inlet sediment bypassing: East Frisian Islands, West Germany. *Marine Geology*, 60, 355-376.

Gallivan, L.B. en Davis, R.A. Jr., 1981. Sediment transport in a microtidal estuary: Mantanzas river, Florida USA. *Marine Geology*, 40, 69-83.

Hayes, M.O., 1980. General morphology and sediment patterns in tidal inlets. *Sedimentary Geology*, 26, 139-156.

Hubbard, D.K., Oertel, G. en Nummedal, D., 1979. The role of waves and tidal currents in the development of tidal-inlet sedimentary structures and sandbody geometry: examples from North Carolina, South Carolina and Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49, 4, 1073-1092.

Huijs, S.W.E., 1993. Geulmigratie op de buitendelta, het Friesche Zeegat en het Amelandse Zeegat. IMAU, Universiteit Utrecht, rapport R93-1.

Kleef, A.W., 1991. Empirical relationships for tidal inlets, basins and deltas. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, rapport GEOPRO 1991.19.

Oertel, G.F., 1972. Sediment transport of estuary entrance shoals and the formation of swash platforms. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42, 4, 857-863.

- Oertel, G.F., 1977.* Geomorphic cycles in ebb deltas and related patterns of shore erosion and accretion. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47, 3, 1121-1131.
- Price, W.A., 1963.* Patterns of flow and channeling in tidal inlets. *Journal of Sedimentary Petrology*, 33, 2, 279-290.
- Sha, L.P., 1989a.* Cyclic morphologic changes of the ebb-tidal delta, Texel Inlet, The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 68, 35-48.
- Sha, L.P., 1989b.* Sand transport patterns in the ebb-tidal delta off Texel Inlet, Wadden Sea, The Netherlands. *Marine Geology*, 86, 137-154.
- Sha, L.P., 1989c.* Variation in ebb-tidal delta morphologies along the west and east Frisian Islands, The Netherlands and Germany. *Marine Geology*, 89, 11-28.
- Sha, L.P. en Berg, J.H. van den, 1993.* Variation in ebb-tidal delta geometry along the coast of the Netherlands and the German Bight. *Journal of Coastal Research*, 9, 3, 730-746.
- Stein, R.C., 1991.* Some considerations on tidal inlets. A literature survey on hydrodynamics and morphodynamic characteristics of tidal inlets with special attention to 'Het Friesche Zeegat'. Delft Hydraulics H 840.45, 109 pp.
- Terwindt, J.H.J., 1967.* Mud transport in the dutch delta area and along the adjacent coastline. *Netherlands Journal of Sea Research*, 3, 4, 505-531.
- Terwindt, J.H.J., 1971.* Sedimentbeweging en sedimenteigenschappen, relatie tot de bodem-morfologie in de getijdewateren van zuidwest Nederland. Proefschrift.
- Terwindt, J.H.J., 1973.* Sand movement on the in- and offshore tidal area of the southwest part of the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 52, 2, 69-77.
- Todd, T.W., 1968.* Dynamic diversion: influence of longshore current-tidal flow interaction on chenier and barrier island plains. *Journal of Sedimentary Petrology*, 38, 3, 734-746.

Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek

C-13443 712
(Deel 2)



INSTITUUT VOOR MARIEN EN ATMOSFERISCH ONDERZOEK UTRECHT

Morfologisch onderzoek Westerschelde monding

Deel 2.

Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding sinds 1800

Irene van Enckevort
december 1996

R 96-21

Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek

C-13443 712
Deel 2

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Theorie buitendelta's	2
2.1 Algemene morfologie	2
2.2 Hydraulica	4
2.2.1 Getijstromen	4
2.2.2 Golven	6
2.3 Sedimenttransport	7
3. Morfologie, getijstromingen en golfklimaat Westerschelde monding	10
3.1 Morfologie buitendelta Westerschelde	10
3.2 Getijstromingen	11
3.3 Golfklimaat	13
3.4 Veranderingen in stromingspatroon en golfklimaat Westerschelde monding	13
4. Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding	15
4.1 Inleiding	15
4.2 Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde monding tot 1800	16
4.3 Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding op de tijdschaal van decennia (1800-1970)	16
4.3.1 Inleiding	16
4.3.2 Morfologische ontwikkeling	17
4.3.3 Verklaring morfologische ontwikkeling	23
4.4 Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding op de tijdschaal van jaren (1969-1994)	25
4.4.1 Inleiding	25
4.4.2 Morfologische ontwikkeling	25
4.4.3 Conclusies	29
5. Hypothesen met betrekking tot het sedimenttransport en de morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde monding	30
5.1 Algemene ontwikkeling Westerschelde monding	30
5.1.1 Beschowing algemene ontwikkeling Westerschelde monding	30
5.1.1 Hypothesen algemene ontwikkeling Westerschelde monding	31
5.2 Sedimenttransport	31
5.2.1 Hypothesen sedimentuitwisseling tussen Westerschelde monding en aangrenzende gebieden	31
5.2.2 Sedimentuitwisseling binnen Westerschelde monding	32
5.2.3 Hypothesen sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen binnen de Westerschelde monding	34

6. Voorstel meetplan KUST*2000 Westerschelde monding	36
6.1 Probleemstelling en doelstelling	36
6.2 Onderzoeksvragen	36
6.3 Methoden	38
6.3.1 Algemeen	38
6.3.2 Zandbalans	38
6.3.3 Stromings- en golfmodellen	40
6.3.4 Analyse bestaande gegevens	41
6.3.5 Aanvullende procesmetingen	41
Literatuur	43
Bijlage A: Stromingspatroon Westerschelde monding	45
Bijlage B: Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding sinds 1800	48
Lijst van Figuren	iii
Lijst van Tabellen	iii

Lijst van figuren

- Figuur 2.1: Morfologisch model van een ebgetijde delta.
Figuur 2.2: Definitieschets buitendelta.
Figuur 2.3: Verloop van de stroomsnelheid in eb- en vloedgeulen.
Figuur 2.4: Theorie van Van Veen voor de voorkeursrichting van getijgeulen in een buitendelta gebaseerd op maximale eb- en vloedverhangen.
Figuur 2.5: Stromingscondities in een buitendelta gedurende één getijperiode bij (a) geen faseverschil tussen de getijstroom op open zee en in het zeegat en (b) een faseverschil van een kwart periode tussen de getijstroom op open zee en in het zeegat.
Figuur 2.6: Refractie op een buitendelta en het resulterende stromingspatroon.
Figuur 2.7: Principeschets zandtransport in het mondingsgebied van een getij-estuarium.
Figuur 3.1: Mondingsgebied Westerschelde.
Figuur 3.2: Golfenergie flux voor verschillende richtingen op basis van golfgegevens van het lichtschip Goeree.
Figuur 4.1: Het door van Veen beschouwde gebied van de Westerschelde monding.
Figuur 4.2: Globale erosie en depositie over de periode 1823 tot 1978.
Figuur 4.3: Gebieden die gedurende de periode 1823-1978 continu boven 50 dm - g.l.w. zijn gebleven.
Figuur 4.4: Morfologische veranderingen omgeving Oostgat-Deurloo tussen 1964 en 1982.
Figuur 4.5: Morfologische veranderingen omgeving Oostgat-Deurloo tussen 1982 en 1992.
Figuur 4.6: Bagger- en stortvolumes in de monding van de Westerschelde over de periode 1970-1984.
Figuur 5.1: Reststroom in de buitendelta van de Westerschelde volgens De Looff en Verhagen (1986).
Figuur 5.2: Resultierend sedimenttransport in de buitendelta van de Westerschelde volgens Ferguson (1943).
Figuur 5.3: Resultierend sedimenttransport in de buitendelta van de Westerschelde volgens een globale analyse van recente debietmetingen.
Figuur 5.4: Hypothese sedimentuitwisseling binnen de Westerschelde monding tijdens zuidwester-storm (a) en rustig weer (b).
Figuur 6.1: Voorstel vakindeling zandbalans Westerschelde monding.

Lijst van tabellen

- Tabel 4.1: Zandbalans 1878-1931.
Tabel 6.1: Voorstel vakindeling zandbalans Westerschelde monding.

1. Inleiding

Over de werking van het mondingsgebied van de Westerschelde is slechts weinig bekend. Met name met betrekking tot het sedimenttransport bestaan nog veel onopgeloste vragen. Het is onder meer onbekend in hoeverre er uitwisseling van sediment plaats vindt tussen de buitendelta van de Westerschelde en de aangrenzende gebieden, zoals de Zeeuwsch-Vlaamse en Walcherse kusten, het mondingsgebied van de Oosterschelde en de Noordzee. Verder is het gedrag van de verschillende geulen en platen slechts globaal bekend. Een uitgebreidere kennis van de werking van de buitendelta van de Westerschelde is voor de Directie Zeeland van belang om een lange termijn visie op dat gebied te ontwikkelen, aan de hand waarvan beheersalternatieven getoetst kunnen worden. Om de bestaande kennisleemten met betrekking tot het lange termijn gedrag op te vullen, wordt in het kader van KUST*2000 onderzoek verricht naar het historische en huidige gedrag van de Westerschelde monding.

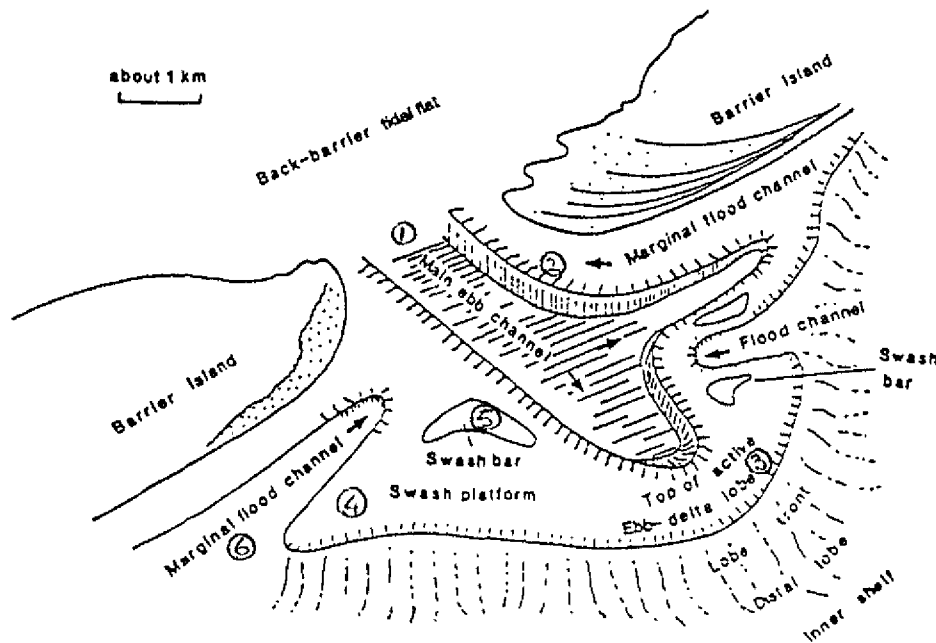
Als voorstudie voor KUST*2000 is een inventarisatie van de voor de Westerscheldemond beschikbare literatuur en meetgegevens gemaakt (zie bijgaande rapport: Morfologisch onderzoek Westerschelde monding, deel 1: Inventarisatie Beschikbare literatuur over en metingen in de Westerschelde monding). In het voorliggende rapport wordt de morfologische ontwikkeling van het gebied tot heden besproken op basis van de gevonden literatuur (hoofdstuk 4). Hierbij wordt zowel aandacht besteed aan het autonome lange termijn gedrag als de invloed van de mens hierop. De nadruk ligt op de ontwikkeling sinds 1800, aangezien de Rijks Geologische Dienst gelijktijdig met een geologisch onderzoek van de Westerschelde monding bezig is, waarbij de geologische ontwikkeling nader wordt bekeken en waarbij tevens aandacht wordt besteed aan de invloed van stroomresistente lagen op de morfologische ontwikkeling. Naast de beschrijving van de opgetreden morfologische veranderingen is bovendien getracht deze te verklaren aan de hand van waargenomen variaties in de waterbeweging. Dit onderzoek heeft uiteindelijk geleid tot enige hypothesen over het sedimenttransport in het mondingsgebied. Deze hypothesen zullen binnen het onderzoeksprogramma KUST*2000 - Westerscheldemond getoetst worden met veldmetingen en ingebouwd worden in een gedragsmodel, waarmee in de toekomst de meest effectieve beheersstrategie gedistilleerd kan worden. De afgeleide hypothesen staan vermeld in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 wordt een voorstel voor een meetplan, inclusief een vakindeling voor het opstellen van een sedimentbalans, besproken.

2. Theorie buitendelta's

2.1 Algemene morfologie

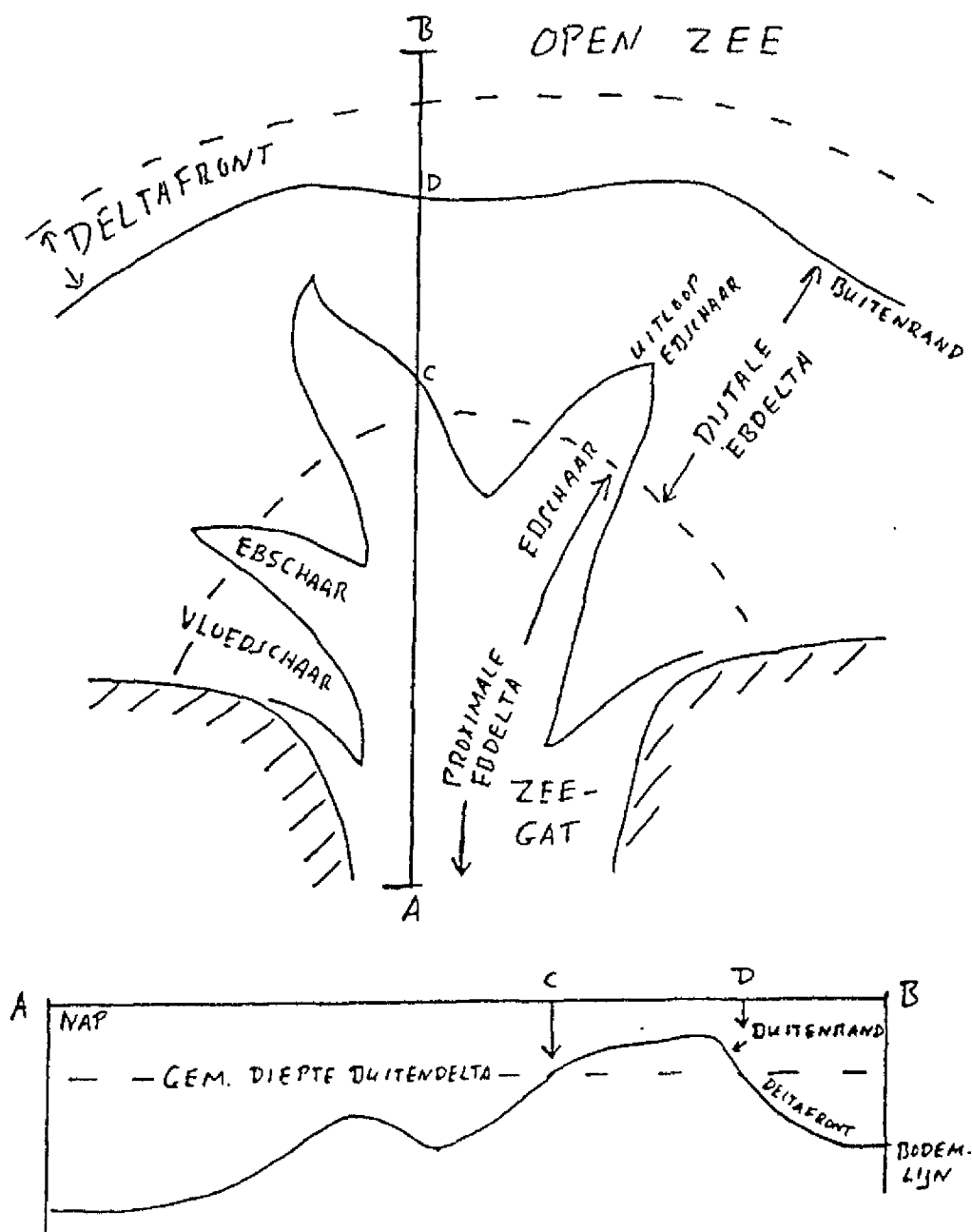
Waar getijstroomen een zeegat binnendringen, bijvoorbeeld tussen barrière eilanden of bij (voormalige) estuaria, wordt een stelsel van geulen en platen gevormd, die tezamen de buitendelta vormen. Een algemeen model van een buitendelta is weergegeven in figuur 2.1. De hoofdcomponenten van dit systeem zijn:

1. Hoofdgeul: geul gedomineerd door ebstromen.
2. Oeverwal-achtige lineaire banken aan de rand van de ebgeul.
3. Buitenrand: een lob sediment aan de zeewaartse rand van de buitendelta, afgezet door de in sterkte afnemende ebstroom. Het landwaarts gerichte sedimenttransport door golven en het zeewaarts gerichte transport door de ebstroom zijn hier in evenwicht.
4. Uitgestrekte plaatgebieden, waarop sedimenttransport door asymmetrische of brekende golven dominant is.
5. Banken op laatstgenoemde plaatgebieden, eveneens gevormd door het golfgerelateerde sedimenttransport.
6. Vloedscharen: geulen gelegen aan de rand van de buitendelta, waarin de vloedstroom dominant is.



Figuur 2.1: Morfologisch model van een ebgetijde delta (Sha, 1990 in Uit den Bogaard, 1991).

In de literatuur wordt de buitendelta regelmatig verdeeld in een proximale en distale deel (zie figuur 2.2 voor een definitieve schets van de buitendelta ontleend aan Van den Berg, 1987). In het proximale deel zijn de eb- en vloedscharen aanwezig, gescheiden door omvangrijke bankgebieden. Zeewaarts hiervan ligt het distale deel van de buitendelta dat vanaf de buitenrand via het deltafront overgaat in open zee.



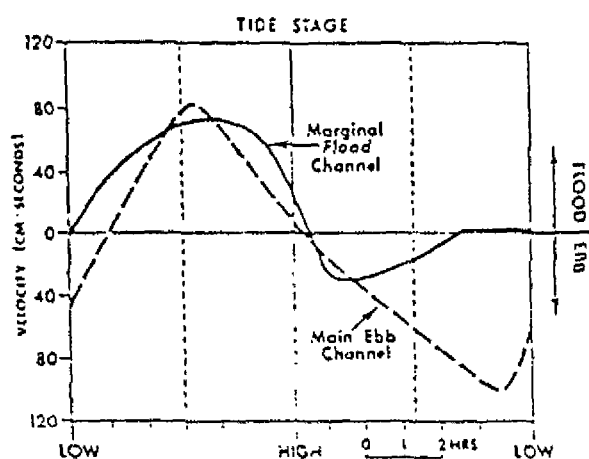
Figuur 2.2: Definitieschets buitendelta (Van den Berg, 1987).

2.2 Hydraulica

In een buitendelta zijn niet alleen golven, maar ook getijstromen van belang voor de zandhuishouding. Stein (1991) geeft een literatuur overzicht van de morfodynamiek van buitendelta's. Hierin komen in achtereenvolgende hoofdstukken de verschillende processen die van belang zijn in een buitendelta aan de orde. In het huidige rapport worden alleen de relevante processen, namelijk de processen onder invloed van getijstromen en golven, belicht. Windgedreven stromingen, dichtheidsstromen en rivierafvoeren zijn voor de buitendelta van de Westerschelde waarschijnlijk van ondergeschikt belang en worden derhalve hier alleen genoemd en niet toegelicht.

2.2.1 Getijstromen

In de situatie met een relatief zwak kustlangs horizontaal getij wordt tijdens vloed het water van alle zijden naar de nauwe hals van het estuarium gezogen. De convergentie van de stroombanen in de hals leidt lokaal tot grote stroomsnelheden. De uitstroming tijdens eb vindt meer geconcentreerd plaats, waarbij het water als het ware uit het estuarium gespoten wordt. Het genoemde verschil in het karakter van de waterbeweging is mede verantwoordelijk voor de gescheiden ligging van de eb- en vloedscharen. Als gevolg van het 'jet'-achtige karakter van de ebstroom concentreert deze zich in het midden van de hals en de buitendelta. Pas verder zeewaarts spreidt de ebstroom zich uit door de weerstand die het ondervindt van het zeewater en de bodemwrijving. Aangezien de ebstroom maximaal is tussen gemiddeld en laag water (figuur 2.3) is de ebstroom nog steeds van belang als de waterstand al toeneemt. De vloedstromen kiezen derhalve de plaats van de minste weerstand, aan de rand van het zeegat. Deze scheiding van eb- en vloedstroom veroorzaakt een netto horizontale circulatie van water in de buitendelta.

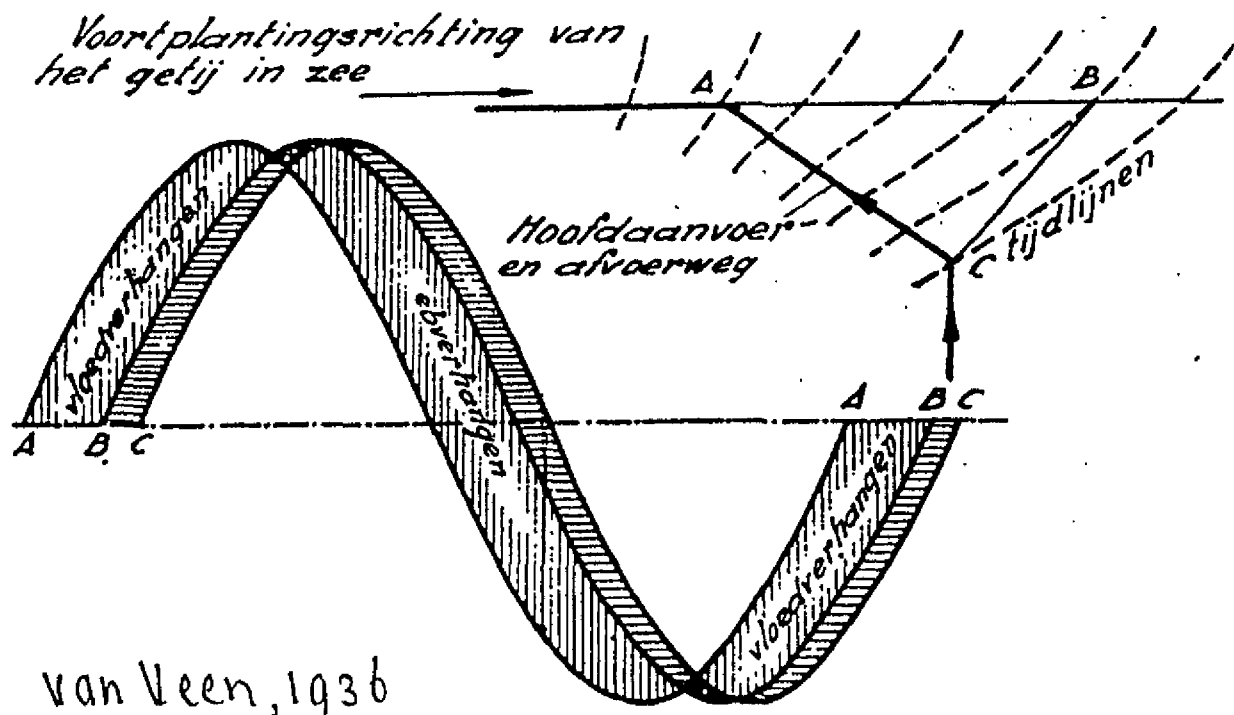


Figuur 2.3: Verloop van de stroomsnelheid in eb- en vloedgeulen (Hayes, 1980).

In de situatie met een relatief sterk horizontaal getij langs de kust, zoals langs de Zeeuwse kust, ligt de hoofdgeul niet in het midden van de buitendelta. Onderzoek naar de algemene morfologie van verschillende buitendelta's heeft aangetoond dat de ligging van de hoofdgeul in de buitendelta niet overal gelijk is. Er bestaan twee verschillende theoriën die de ligging

van de geulen verklaren. De oudste theorie is die van Van Veen (1936) en de jongste theorie is die van Sha en Van den Berg (1993).

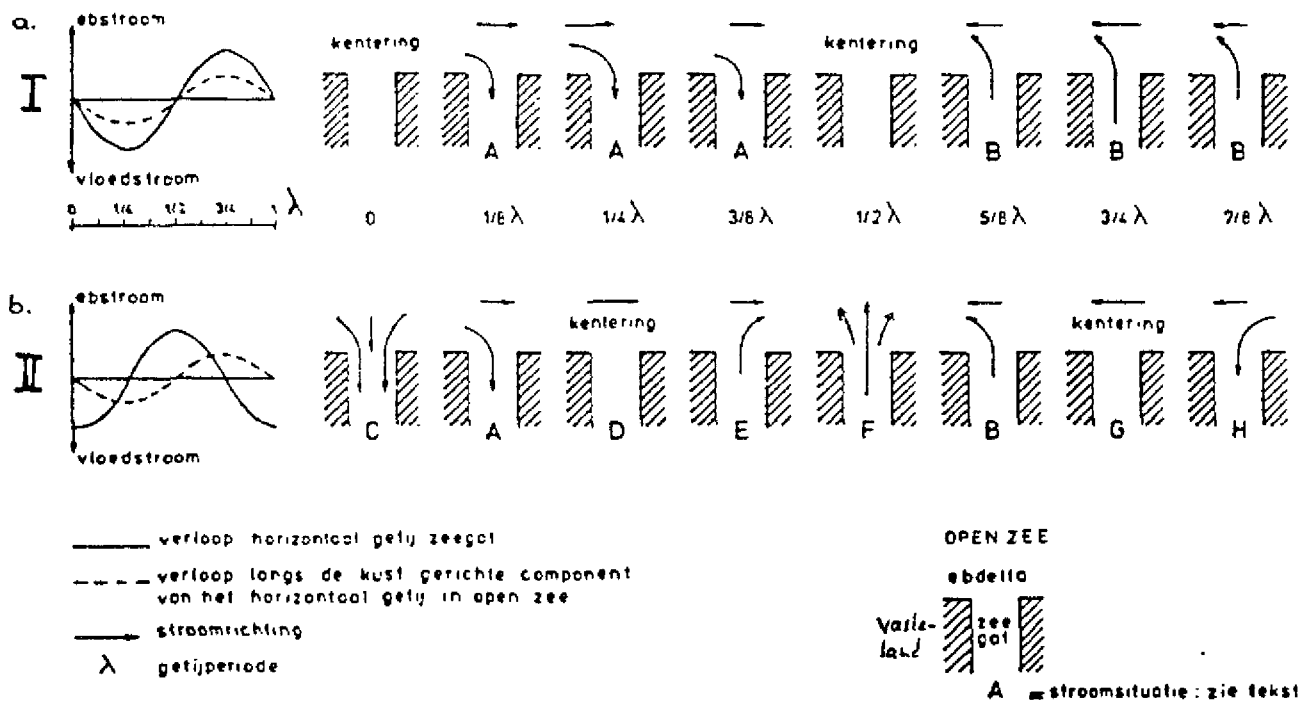
Van Veen (1936) koppelt de ligging en omvang van de geulen aan eb- en vloedverhangen: De geulen oriënteren zich in de richting van de grootste verhangen (figuur 2.4). Bovendien is er een minimaal verhang nodig om een geul in stand te houden. Deze verhangen ontstaan door locale verschillen in getij-amplitude of door faseverschillen tussen het getij aan de rand van de buitendelta en in het zeegat. Indien de getijgolf zich voortplant van zuid naar noord zijn de faseverschillen het grootst tussen de zuidelijke deltarand en het zeegat. In dit geval zal de hoofdgeul zich zuidelijk concentreren. Veranderingen in de loopsnelheid van de getijgolf door bagger- en stortactiviteiten of veranderingen in de locale getij-amplitude door menselijke ingrepen in aangrenzende gebieden, kunnen de ligging van de geulen derhalve beïnvloeden.



Figuur 2.4: Theorie van Van Veen voor de voorkeursrichting van getijgeulen in een buitendelta gebaseerd op maximale eb- en vloedverhangen (Svašek, 1995).

Volgens Sha en Van den Berg (1993) is de ligging van de geulen afhankelijk van het faseverschil tussen de getijgolf op open zee en in het zeegat. Als gevolg van de afname van de getijrange in noordelijke richting bereikt de getijstroom langs de Zeeuwse kust zijn maximale waarde na hoog- en laagwater. In het zeegat vervormt de getijgolf onder invloed van bodemwrijving, waardoor de getijstroom voor komt te lopen op de waterstand. Hierdoor is een faseverschil van ongeveer drie uur aanwezig tussen de getijstroom op open zee en in het zeegat. Onder dergelijke omstandigheden ontstaan acht verschillende stromingssituaties, waardoor de hoofdgeul geen voorkeursrichting heeft (figuur 2.5, situatie II). Langs de Waddeneilanden daarentegen heeft de hoofdgeul wel een voorkeursrichting, omdat hier de getijrange toeneemt in de voortplantingsrichting van de getijgolf, waardoor er geen faseverschil aanwe-

zig is tussen het horizontaal getij op open zee en in het zeegat (figuur 2.5, situatie I). Indien op grond van de getijstromen geen voorkeursrichting aanwezig is, bepalen de dominante richting van golfval en de verschillen in getijrange langs het deltafront de oriëntatie van de hoofdgeul.



Figuur 2.5: Stromingscondities in buitendelta gedurende één getijperiode bij (a) geen faseverschil tussen de getijstroom op open zee en in het zeegat en (b) een faseverschil van een kwart periode tussen de getijstroom op open zee en in het zeegat (Van den Berg, 1987).

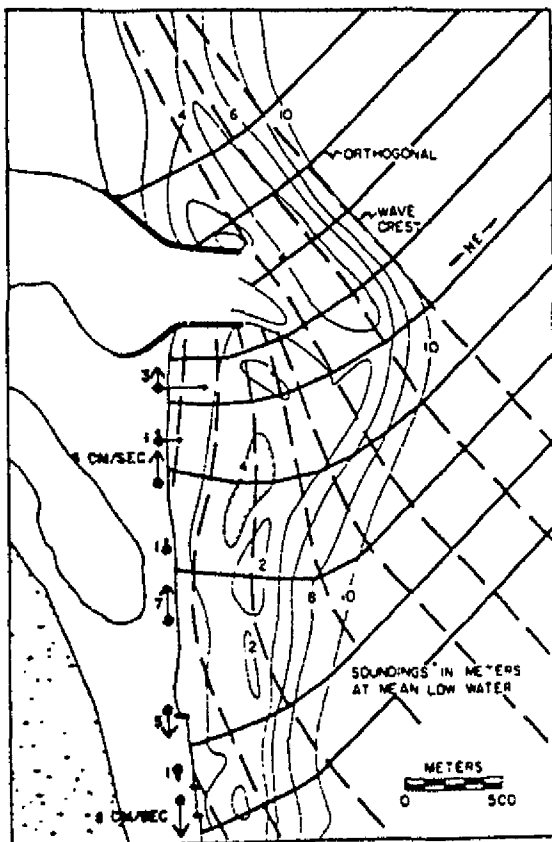
Het verschil tussen beide theoriën is gering; Sha en Van den Berg baseren de ligging van de geulen op het stromingspatroon, omdat de stroming niet alleen het gevolg is van verhangen, maar ook bepaald wordt door naijlingseffecten, die erg groot kunnen zijn vanwege de grote watermassa's die verplaatst moeten worden.

Indien de kust onderbroken is door meerdere getijgaten, zijn direct langs de kust kortsluitgeulen aanwezig tussen de verschillende buitendelta's. Aangezien de getijgolf zich kustlangs voortplant, ontstaan faseverschillen tussen de getijbewegingen in de verschillende zeegaten, waardoor vervallen veroorzaakt worden die de kortsluitgeulen genereren.

2.2.2 Golven

In de vorige paragraaf is reeds het belang van golven op de voorkeursrichting van de hoofdgeul vermeld (theorie Sha en Van den Berg, 1993). Als golven onder een hoek de kust naderen wordt een kustlangse stroming, de brandingsstroom, gegenereerd op het moment van

golfbreken. Deze stroming loopt in de richting van de kustlangse component van de lokale golfvoortplantingsrichting. Als gevolg van refractie op het deltafront kan de brandingsstroom aan beide zijden van de buitendelta naar het zeegat toegericht zijn (figuur 2.6).



Figuur 2.6: Refractie op een buitendelta en het resulterende stromingspatroon (Hubbard in Boothroyd, 1985).

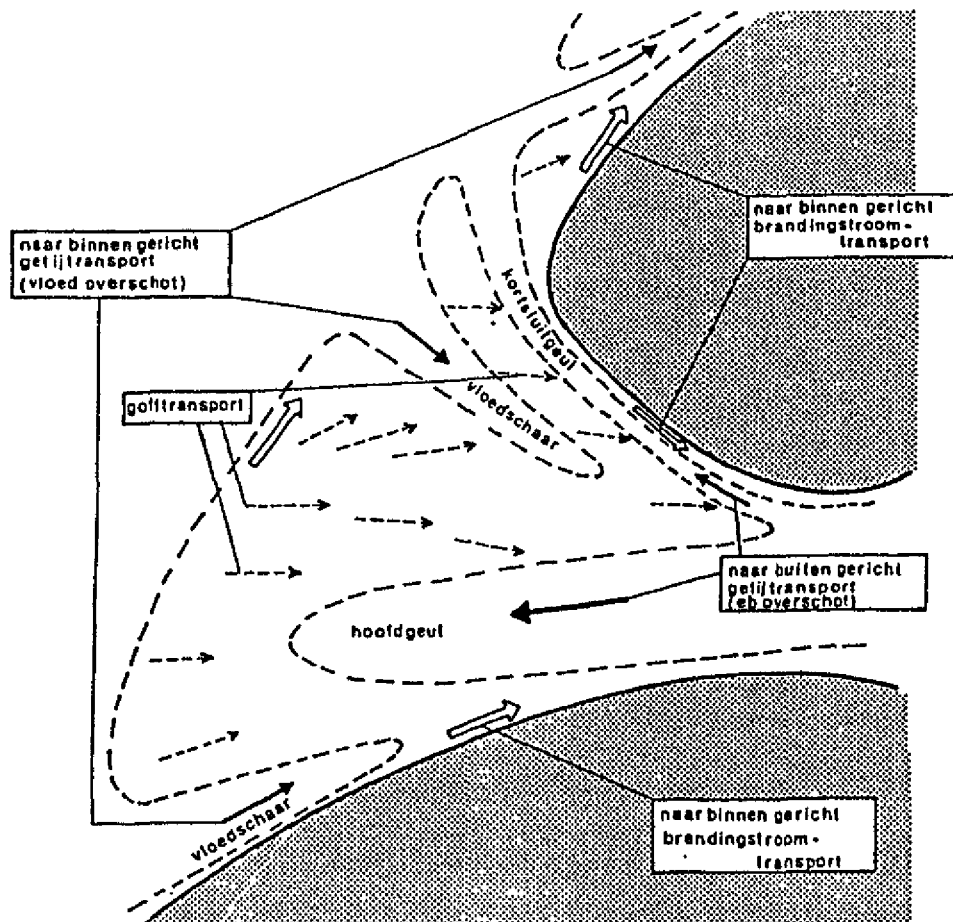
Naast het hierboven beschreven kustlangse transport veroorzaken golven ook kustdwarse transporten. Golven die een deltafront naderen voelen de bodem en worden daardoor asymmetrisch. De golftop wordt hoger en de landwaartse waterbeweging duurt korter, terwijl het golfdal minder diep wordt en de zeewaartse waterbeweging langer duurt. Naar de kust toe worden de golven zo asymmetrisch worden dat ze instabiel raken en beginnen te breken. Tijdens het breken treedt een landwaarts massa transport van water op. Dit massa transport wordt verticaal of horizontaal gecompenseerd door respectievelijk een retourstroom of een muistroom.

2.3 Sedimenttransport

De getij - en golfgedreven stromingen nemen sediment op en transporteren dit. Bovendien brengt de golfbeweging zelf extra sediment in suspensie, dat door de stromingen vervoerd wordt. Aangezien op een buitendelta de verschillende processen op verschillende plaatsen dominant zijn, ontstaat een ingewikkeld sedimenttransport-patroon. Een prinsipschets van het zandtransport in het mondingsgebied van een getij-estuarium, zoals de Westerschelde, is weergegeven in figuur 2.7.

In de geulen overheersen de getijstromingen. Als gevolg van het in § 2.2.1 beschreven

ruimtelijke stromingsbeeld zijn de geulen hetzij eb- of vloed gedomineerd. Over het algemeen komt de stromings-dominantie overeen met de richting van het netto sedimenttransport. Echter bij grote verschillen tussen eb- en vloed snelheid, kan het netto sedimenttransport toch tegen de richting van de reststroom in plaatsvinden, aangezien het sedimenttransport volgens een macht groter dan drie toeneemt met de stroomsnelheid. Verder is de concentratie van belang voor de grootte van het sedimenttransport. Golven zijn door hun opwoelende vermogen van groot belang voor de plaatselijke sediment concentratie.



Figuur 2.7: Principeschets zandtransport in het mondingsgebied van een getij-estuarium (RWS, 1988 in Svašek, 1995).

Op de platen en vlak onder de kust zijn golven veelal dominant. Langs de kust ontstaat een overwegend naar binnen gericht brandingstroom transport. Indien de golven reeds tegen het deltafront breken, ontstaat dit transport al langs de rand van de buitendelta. De richting en sterkte van het brandingstroom transport is afhankelijk van de lokale hoek van inval. Op de platen wordt het sediment overwegend landwaarts verplaatst door asymmetrische golven.

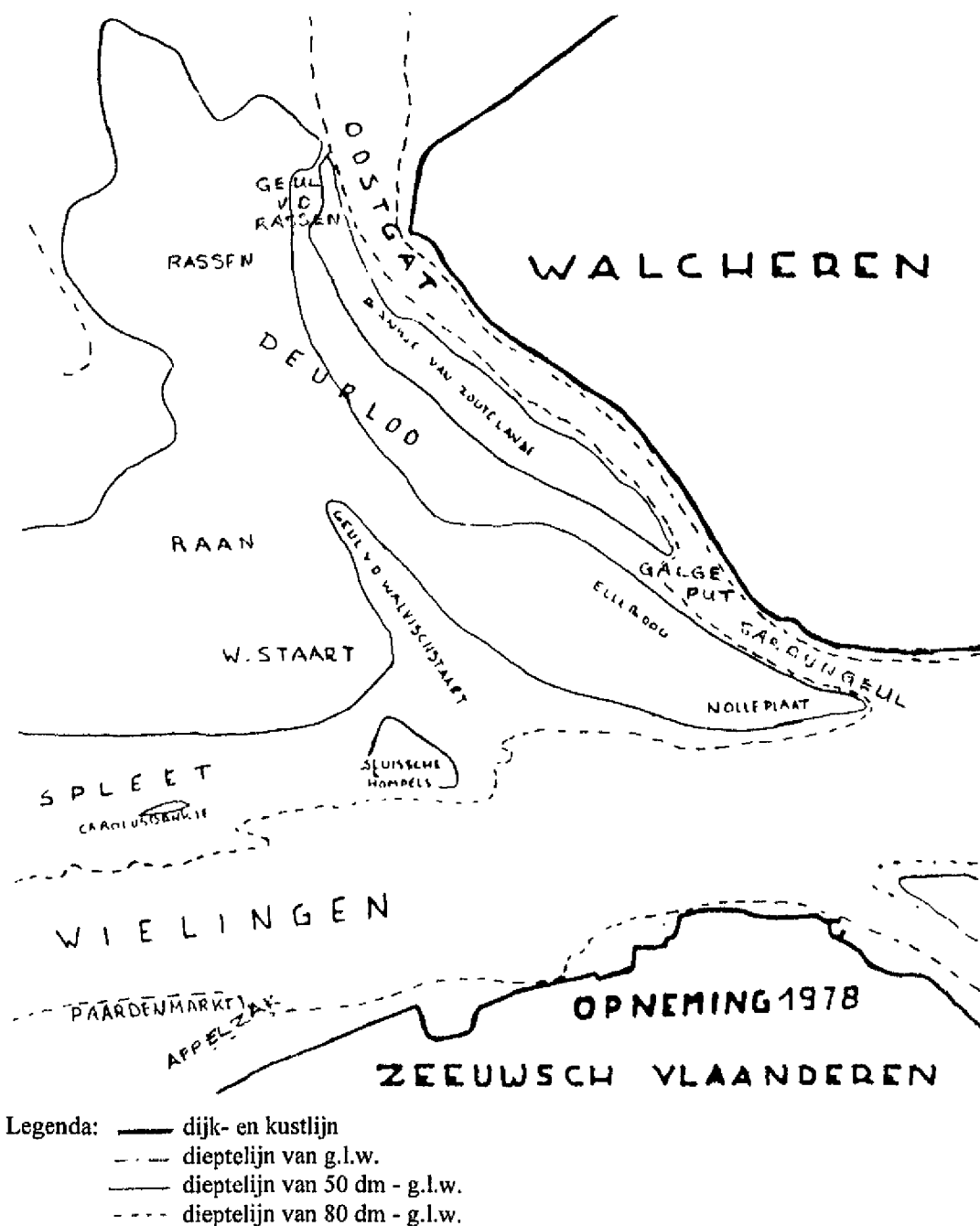
Uit onderzoeken naar de kustontwikkeling is het belang van zogeheten zandgolven voor het lange termijn gedrag naar voren gekomen. Een zandgolf wordt hierbij gedefinieerd als een horizontale uitbouw van de kust die zich in de tijd lateraal langs de kust verplaatst. Dit verschijnsel is voor het eerst beschreven door Bakker (1968) voor de kustlijn van Vlieland. Het cyclische gedrag van zandplaten op de buitendelta lijkt de zandgolven langs de Waddeneilanden te veroorzaken; de platen migreren richting kust, groeien vervolgens vast aan de kust en verplaatsen zich tenslotte langs de kust. Sindsdien zijn op meerdere plaatsen langs de kust

zandgolven geïdentificeerd en geanalyseerd. De zandgolfbewegingen langs de Zeeuwse kusten zijn beschreven door Lambeek (1991) en lijken samen te hangen met het gedrag van vloedscharen en kortsluitgeulen. Er zijn blijkbaar meerdere mechanismen die een zandgolf kunnen initiëren, alle mechanismen hebben echter wel gemeen dat het cyclische processen zijn, veroorzaakt door kleinschalige, periodieke bewegingen van autonome zandlichamen.

3. Morfologie, getijstromingen en golfklimaat Westerschelde monding

3.1 Morfologie buitendelta Westerschelde

In deze paragraaf wordt de morfologie van de Westerschelde monding besproken. De namen van de verschillende geulen en platen staan vermeld in figuur 3.1.



Figuur 3.1: Mondingsgebied Westerschelde (naar De Looff en Verhagen, 1986).

De buitendelta van de Westerschelde wordt thans doorsneden door twee hoofdgeulen: de Wielingen, een ebgedomineerde geul in het zuiden, en het Oostgat, een kortsluitgeul in het noordoosten. Het Oostgat ligt vlak onder de kust van Walcheren en mondt in het oosten uit in de Galgeput en de Sardijngeul en wordt in het zuidwesten geflankeerd door het Bankje van Zoutelande. Met name de Sardijngeul heeft een sterk vloed-schaar karakter. Ten westen van het Bankje van Zoutelande bevindt zich de ebgedomineerde Deurloo die via de Geul van de Rassen in het noorden en de Galgeput in het zuiden verbinding heeft met het Oostgat. De Wielingen ligt met name in het oosten dicht tegen de kust van Zeeuwsch Vlaanderen en wordt in het zuidwesten begrensd door de Paardenmarkt en in het noorden door van oost naar west de Sluissche Hompels, het Carolus bankje, de Bol van Knokke en de Bol van Heist. De Paardenmarkt wordt van de kust gescheiden door de Appelzak, een voormalige vloedgeul. Tussen de Wielingen en het Oostgat liggen verschillende bankengebieden die momenteel grotendeels met elkaar vergroeid zijn en slechts gedeeltelijk gescheiden worden door ondiepe geulen. In het zuidwesten gaan de Rassen over in de Vlakte van de Raan en de Walvischstaart. Ten oosten hiervan bevinden zich de Elleboog en de Nolleplaat. Laatsgenoemde platen worden gescheiden van de Walvischstaart door de ebgedomineerde Geul van de Walvischstaart. In het zuidwesten wordt het bankengebied begrensd door de geul de Spleet, een voormalige vloedgeul die in de loop der tijd sterk verondiept is.

Het zojuist beschreven gebied beslaat het proximale deel van de buitendelta, waarover de meeste gegevens beschikbaar zijn. Zeewaarts hiervan, in het distale deel, liggen de Droogte van Schooneveld en de Wandelaar. Het eerstgenoemde gebied fungeert thans als een van de belangrijkste stortgebieden van baggerspecie. De Wandelaar is de zeewaartse drempel van de in westelijke richting geleidelijk verondiepende Wielingen. Direct ten westen van de buitendelta ligt het Buitenbankengebied. In het zuidwesten wordt de Westerschelde monding begrensd door de Vlaamsche Banken. Aan de noordzijde gaat de ebgetijde-delta van de Westerschelde over in die van de Oosterschelde. Deze overgang wordt gevormd door de Domburger Rassen.

3.2 Getijstromingen

De Looff en Verhagen (1986) hebben het stroombeeld in de Westerschelde monding uitgebreid beschreven aan de hand van gegevens uit de stroomatlas Zuidelijk Deltagebied. De informatie in deze paragraaf is derhalve ook aan hun rapport ontleend. Allereerst worden enige algemene karakteristieken van het stroombeeld beschreven, waarna het ruimtelijke stroompatroon gedurende één getijcyclus besproken zal worden aan de hand van kaarten uit de stroomatlas (bijlage A). Tot slot wordt het resulterende netto stroompatroon in het mondingsgebied gepresenteerd.

Algemene karakteristieken:

De getijgolf die zich in noordoostelijke richting langs de Nederlandse kust voortplant, dringt het Westerschelde estuarium binnen. Het kost de getijgolf thans ongeveer 1 uur om van de rand van de buitendelta naar de hals van het zeegat, ter hoogte van Vlissingen, te reizen. De getijgolf doet er in de huidige situatie iets minder dan 1 uur over om Westkapelle te bereiken. Er is derhalve een faseverschil van 1 uur aanwezig tussen de waterstanden bij de zeewaartse monding van de Wielingen en Vlissingen en nauwelijks een faseverschil tussen de zeewaartse monding van het Oostgat en Vlissingen. Het verhang over het Oostgat wordt met name

bepaald door het verschil in getijamplitude tussen Westkapelle en Vlissingen. Er is tot nu toe geen onderzoek gedaan naar eventuele veranderingen in de faseverschillen door de verdieping van de Wielingen en de speciéstortingen langs het deltafront, op de Droogte van Schooneveld. Naar verwachting is het faseverschil in de Wielingen geringer geworden, omdat een getijgolf zich sneller voortplant in dieper water, en langs het deltafront groter, vanwege de vertragende werking die de plaatselijke uitbouw van het deltafront op de getijvoortplanting heeft.

Het vullen en legen van het estuarium vindt met name via de Wielingen plaats; debietmetingen in de raai Vlissingen-Breskens, de landwaartse grens van de buitendelta, geven een debietverhouding Wielingen:Nolleplaat:Sardijngeul van 7:2:1. Het totale ebvolume door de raai Vlissingen-Breskens is een paar procent groter dan het vloedvolume ten gevolge van de Schelde-afvoer, maar het maximale debiet is het grootst tijdens vloed (De Jong, 1989).

In de geulen is de stromingsrichting over het algemeen evenwijdig aan de geulas. Boven de platen is de stroming meer indifferent en draait geleidelijk één keer volledig rond per getijcyclus.

Stromingspatroon:

Rond LW te Vlissingen is de stroming in de buitendelta overheersend WZW en is voornamelijk geconcentreerd in de Wielingen, waar de stroomsnelheden oplopen tot 0.9 m/s. Eén uur na LW te Vlissingen vindt in de hals van het estuarium de stroomkentering plaats. Tot 1 uur na LW stroomt dus nog water uit het estuarium terwijl de waterstand al aan het toenemen is. Dit is een traagheidseffect: het kost immers tijd om een grote bewegende watermassa zoals die van de Westerschelde af te remmen. In het Oostgat is de stroming dan reeds gekenterd, terwijl in de Wielingen en op de Noordzee de stroming nog steeds volgens de ebstroom gericht is. Drie uur voor HW te Vlissingen stroomt over de hele buitendelta het water het estuarium in. Het water komt met name uit het noorden (eb), aangezien de getijstroom op de Noordzee nog niet gekenterd is. Rond HW te Vlissingen stroomt het water nog steeds over de hele buitendelta het estuarium in, maar aangezien nu ook op diep water een stroomkentering heeft plaats gevonden komt het water nu voornamelijk uit het zuid-westen (vloed). Eén uur na HW te Vlissingen kentert de stroming in de hals van het estuarium, waardoor de stroming over de buitendelta met name kustlangs naar het noorden gericht is volgens het Noordzee getij. Drie uur later (vier uur na HW te Vlissingen) kentert ook de stroming op de Noordzee en stroomt over de hele buitendelta water het estuarium uit in westelijke richting.

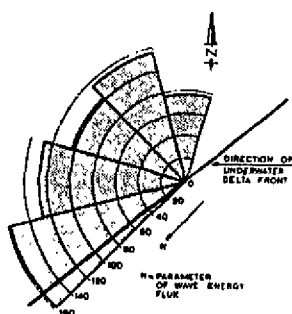
Reststroom:

Door de beweging van een waterdeeltje in de tijd te volgen hebben De Looft en Verhagen (1986) de reststroom op verschillende plaatsen in de buitendelta bepaald. Uit deze analyse blijkt dat in de Wielingen een kleine reststroom in westelijke richting plaats vindt. In de geul van de Rassen en de Deurloo vindt eveneens een resulterende waterbeweging in westelijke richting plaats. Op de bankengebieden tussen de Deurloo en de Wielingen is de netto waterverplaatsing in zuidoostelijke richting. De netto verplaatsing van een waterdeeltje in het Oostgat is niet bepaald, maar vindt hoogstwaarschijnlijk plaats in zuidoostelijke richting. Deze reststromen geven een indicatie voor de netto sedimenttransportrichtingen. De werkelijke sedimenttransporten hangen echter ook nog samen met het verloop van de concentratie in de tijd.

3.3 Golfklimaat

Voor 1985 werden incidentele golfwaarnemingen verricht in het mondingsgebied van de Westerschelde. De golfhoogte, periode en lengte werden visueel bepaald, met behulp van een baak en een verrekijker. De windrichting werd als maat voor de golfrichting gebruikt. In 1954 werden plaatselijk de eerste zelfregistrerende golfmeters in gebruik genomen. Sindsdien heeft de techniek zich verder ontwikkeld en vanaf 1985 wordt de golfhoogte continu geregistreerd door golfboeien op zes locaties in de buitendelta. Voor nadere informatie wordt verwezen naar het bijgaande rapport waarin de beschikbare literatuur over en metingen in de Westerschelde mond geïnventariseerd zijn.

Met behulp van golfgegevens van het lichtschip Goeree heeft Terwindt (1973) een verdeling van de golfenergie flux over de verschillende richtingsklassen gemaakt (figuur 3.2). Hieruit blijkt dat de golven uit zuidwestelijke richting overheersen, waardoor de netto golfgedreven kustlangse stroming op lange termijn in noordoostelijke richting plaatsvindt.



Figuur 3.2: Golfenergie flux voor verschillende richtingen op basis van golfgegevens van het lichtschip Goeree.

3.4 Veranderingen in stromingspatroon en golfklimaat Westerschelde monding

Sinds het ontstaan van de Westerschelde is het getijprisma geleidelijk toegenomen en heeft zijn maximale waarde bereikt omstreeks 1600. Vervolgens is het getijprisma van de Westerschelde gestaag afgenomen door inpolderingen. Een uitgebreidere beschouwing van deze historische debietveranderingen wordt gegeven in § 4.2, waarin het ontstaan en de ontwikkeling van de Westerschelde tot 1800 besproken wordt.

In vergelijking met de andere Zeeuwse zeegaten zijn de getijveranderingen in de Westerschelde deze eeuw gering. De menselijke invloed in de Westerschelde is gedurende de 20^e eeuw beperkt gebleven tot baggerwerkzaamheden en verdere inpolderingen. De laatste inpoldering heeft plaatsgevonden in 1973 (Schorren van Ossendrecht). De baggerwerkzaamheden in het estuarium zijn omstreeks 1900 begonnen. Op de buitendelta is de baggeractiviteit tot 1970 beperkt gebleven. Sindsdien wordt ook hier op grote schaal gebaggerd, met name in het Scheur. Thans bestaan ook plannen om de Wielingen te verdiepen. De verdieping van de geulen ten gevolge van de baggerwerkzaamheden beïnvloedt de voortplantingssnelheid van de getijgolf en de zijdelingse dissipatie. Hierdoor is het getijdebiet in het estuarium na 1970 toegenomen met ongeveer 6% (Kohsiek e.a., 1988). Tevens lijkt de getij-asymmetrie, gedefi-

nieerd als de verhouding tussen de maximale vloed- en ebdebieten, recent te zijn afgenomen ten gevolge van de baggeractiviteiten in het estuarium (project OOST-WEST).

De gedeeltelijke afsluiting van de Oosterschelde zal indirect het getij in de Westerschelde monding beïnvloeden, met name in de omgeving van Westkapelle. Op grond van modelberekeningen verwacht Dronkers (1961) een geringe afname van de hoogwaterstand te Westkapelle en een afname van de getijrange te Vlissingen, door de invloed van de afsluitdammen op het Noordzeegetij in de kuststrook. Dit heeft uiteindelijk een afname van de verhangen over het Oostgat en derhalve een reductie van de stroomsnelheden aldaar tot gevolg. De modelberekeningen zijn echter uitgevoerd voor de aanleg van een dam in plaats van de uiteindelijke stormvloedkering. Lievense (1989 en 1990) heeft de 10-minuten-waterstandsgegevens rond gemiddeld getij van de periode voor en na de bouw van de Oosterscheldekering met elkaar vergeleken. Uit zijn analyse komen geen significante wijzingen in het getij naar voren.

Het getij op de Noordzee is tevens veranderd in de loop der tijd. Over de afgelopen eeuw is een toename van het verticaal getij langs de Nederlandse kust van 4% geconstateerd (De Ronde 1983, in Van den Berg, 1987).

4. Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding

4.1 Inleiding

Morfologische veranderingen kunnen ingedeeld worden in twee typen, namelijk: (1) wijzigingen die inherent zijn aan het dynamisch karakter van het milieu en (2) wijzigingen die verband houden met veranderingen in de hydraulische randvoorwaarden van het systeem. Tot het eerste type behoren o.a. cyclische veranderingen in de ligging van geulen en platen. Verder kan gedacht worden aan kortstondige variaties veroorzaakt door de afwisseling van storm en rustig weer. Kortom het eerste type omvat alle variaties binnen het dynamische evenwicht en leidt op langere termijn niet tot netto veranderingen. Het tweede type daarentegen wordt gekarakteriseerd door netto erosie of sedimentatie van grootschalige morfologische eenheden, zoals de buitendelta of het estuarium. Deze veranderingen zijn het gevolg van veranderingen in het getij- en golfklimaat. Deze veranderingen kunnen over het algemeen goed beschreven worden door stabiliteitsrelaties, waarin de omvang van de buitendelta of de grootte van het doorstroomoppervlak gekoppeld worden aan het getijvolume. Zowel de veranderingen die inherent zijn aan het dynamisch karakter als de veranderingen die het gevolg zijn van wijzigingen in de randvoorwaarden kunnen beïnvloed worden door menselijk handelen. Bagger- en stortactiviteiten leiden tot een antropogeen erosie-depositie patroon, dat het natuurlijke patroon kan versterken of teniet doen. Bovendien kunnen de baggeractiviteiten, evenals de aanleg van dammen en de inpoldering van intergetijde-gebieden het getijklimaat beïnvloeden. In de Westerschelde bleef de menselijke invloed lange tijd beperkt tot bedijking, oeververdediging en het afdammen van verzande ondiepe geulen (Van den Berg, 1987). Rond 1970 namen de menselijke activiteiten drastisch toe. Voor de buitendelta van de Westerschelde zijn met name de baggeractiviteiten en de aanleg van de Oosterscheldekering van belang.

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de morfologische veranderingen die in de Westerschelde monding opgetreden zijn. Deze veranderingen zijn ontleend aan de bestudeerde literatuur over (delen van) het beschouwde gebied. De beschrijvingen zijn gebaseerd op morfologische kaarten die beschikbaar zijn vanaf 1804 met een frequentie van ongeveer één per twintig jaar en op vaklodingen die sinds 1960 ook in het mondingsgebied van de Westerschelde zijn verricht. Vanaf 1969 is het mondingsgebied iedere twee jaar (bijna) volledig opgenomen. Het grootste gedeelte is ook digitaal beschikbaar, zodat eenvoudig morfologische analyses, bijvoorbeeld kuberingen, uitgevoerd kunnen worden. Voor de perioden 1823-1952 en 1970-1985 zijn naast kwalitatieve beschrijvingen van de morfologische ontwikkeling ook kwantitatieve gegevens beschikbaar in de vorm van kuberingen uitgevoerd door respectievelijk Kleinjan (1933), Van Veen (1943) en Haring (1955) en Van den Berg e.a., (1991).

Morfologische veranderingen vinden plaats op verschillende tijdschalen. De grootste tijdschaal betreft het ontstaan en de ontwikkeling van het gebied. Deze zal eerst in het kort besproken worden alvorens over te gaan op de ontwikkelingen op de tijdschaal van decennia (periode 1800-1970) en jaren (periode 1969-1994). De ontwikkelingen op tijdschalen van weken tot maanden wordt niet besproken gezien de frequentie van de beschikbare gegevens en het feit dat de ontwikkelingen in zeegaten en getijde wateren vrij geleidelijk en regelmatig verlopen (Haring, 1948).

4.2 Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde monding tot 1800

In de Romeinse tijd was de kust ter plaatse van het huidige mondingsgebied van de Westerschelde gesloten met uitzondering van een kleine opening ter hoogte van de tegenwoordige grens met België. De meest recente reconstructies van het ontstaan van de Westerschelde door Vos en Van Meerdingen laten zien dat vanaf de 4^e eeuw een zeearm zich in noordoostelijke richting door Zuid-Beveland ontwikkelde. Zijtakken van deze zeearm drongen vanaf de 6^e eeuw in zuidelijke richting door tot in Zeeuwsch Vlaanderen. Vervolgens breidde de hoofdgeul van het zeegat zich gedeeltelijk via de zuidelijke zijtakken naar het oosten uit en maakte uiteindelijk contact met de Schelde, waarmee de ontwikkeling van de huidige Westerschelde en haar buitendelta kon beginnen. Het noordoostelijke deel van de hoofdgeul was inmiddels reeds verzand. In de loop van de middeleeuwen breidde het getijsysteem van de Westerschelde zich uit, doordat de Westerschelde een steeds groter aandeel van de rivierafvoer van de Schelde te verwerken kreeg. Hierdoor vormde de Westerschelde vanaf de veertiende eeuw de belangrijkste benedenloop van de Schelde. De uitbreiding van de Westerschelde leidde tot het ontstaan van grote inhammen in Zeeuwsch Vlaanderen. Deze uitbreiding van het kombergingsgebied werd indirect bevorderd door grootschalige veenaufgravingen in de middeleeuwen. Dijkdoorbraken konden derhalve in korte tijd grote landverliezen veroorzaken. In het begin van de 17^e eeuw bereikte het kombergingsgebied zijn grootste uitbreiding. Sindsdien is het kombergingsgebied geleidelijk afgenomen door verzanding en inpoldering van de noordelijke en zuidelijke vertakkingen van de Westerschelde. De afname van het kombergingsgebied veroorzaakte een afname van het getijprisma, die weer gedeeltelijk gecompenseerd werd door een toename van de getijslag met name in het oostelijk deel van het estuarium. De getijslag nam toe als gevolg van (1) een vermindering van de zijdelingse dissipatie door de afname van het oppervlak schorren en slikken, en (2) een versnelling van de voortplanting van de getijgolf door de afname van het areaal aan ondiepe gebieden en in mindere mate door de verdieping van de geulen. Ondanks de afname van het getijprisma sinds het begin van de 17^e eeuw werden de geulen dieper, zowel in het estuarium zelf als in de buitendelta. Op de ondiepe schorren en slikken vond mede als gevolg van inpolderingswerkzaamheden versterkte sedimentatie plaats, waardoor de zandbalans van de Westerschelde een netto zandimport vertoonde. Dit zand werd aangevoerd vanuit het mondingsgebied, aangezien de uitwisseling tussen de Schelde en het estuarium verwaarloosbaar is.

4.3 Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding op de tijdschaal van decennia (1800-1970)

4.3.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt de ontwikkeling van de buitendelta van de Westerschelde op de schaal van decennia beschreven. De algemene ontwikkeling is ontleend aan: Kleinjan (1933), Van Veen (1943), Haring (1948 en 1955), Van Cauwenberghe (1966), Van den Berg (1987), Van den Berg et. al. (1991), Uit den Bogaard (1991) en Svašek (1995). Voor de omgeving van de kust van Walcheren zijn tevens Wilderom en Van Malde (1968), Maranus (1986) en Roelse en Maranus (1988) geraadpleegd. Roelse en Maranus (1985 en 1988) en Van Cauwenberghe (1977) geven gedetailleerde informatie over de ontwikkeling van de kust van Zeeuwsch Vlaanderen en de aangrenzende geulen en platen.

Allereerst zal de verandering in de buitendelta als een geheel en de aangrenzende gebieden beschreven worden, vervolgens zal de ontwikkeling van de afzonderlijke geulen en platen belicht worden. De ontwikkeling van de omgeving van het Oostgat en het Bankje van Zoutelande en de kuststroken van Walcheren en Zeeuwsch Vlaanderen zullen apart behandeld worden. In de laatste subparagraaf (§4.3.3) worden de waargenomen grootschalige tendensen in de morfologische ontwikkeling samengevat en indien mogelijk verklaard op grond van opgetreden veranderingen in de waterbeweging.

4.3.2 Morfologische ontwikkeling

Buitendelta en aangrenzende gebieden:

Het zandvolume van het proximale deel van de ebgetijdedelta (nat oppervlak 437 km², zie figuur 4.1) nam in de periode van 1804 tot 1931 geleidelijk met $400 \cdot 10^6$ m³ af, hetgeen overeenkomt met een gemiddelde verdieping van 0.9 m. De afname van het zandvolume was het gevolg van verdieping van de geulen en het grotendeels verdwijnen van de platen boven gemiddeld laagwater (Uit den Bogaard, 1991). De sedimentatie in het estuarium zelf inclusief de grote schorgebieden was onvoldoende om het verlies in het proximale deel van de buitendelta te verklaren. De geulen van het estuarium erodeerden slechts in geringe mate en waren dus min of meer in evenwicht (Uit den Bogaard, 1991). Op de schorren daarentegen werd een grote hoeveelheid sediment afgezet, waardoor een netto sedimentimport vanuit de buitendelta naar het estuarium plaatsvond. Volgens kuberingen over de hele Westerschelde inclusief het proximale deel van de buitendelta bedroeg het zandverlies $214 \cdot 10^6$ m³ over de periode 1878-1931 (zie tabel 4.1, Uit den Bogaard, 1991). In deze periode trad in het Buitenbankengebied depositie op (Haring, 1948). Ten zuidwesten van de ebdelta in het gebied van de Vlaamsche Banken (oppervlak 206 km²) vond een gemiddelde bodemverlaging van 0.5 m plaats tussen 1894 en 1921 (Van Veen, 1943). In de noordelijk gelegen monding van de Oosterschelde trad eveneens erosie op (Terwindt, 1973). Volgens Terwindt (1973) bleef de kustlijn van Vlaanderen gedeeltelijk stabiel (Nederlandse deel) en erodeerde op de overige plaatsen (Belgische deel).

Tabel 4.1: Zandbalans 1878-1931 (Uit den Bogaard, 1991)

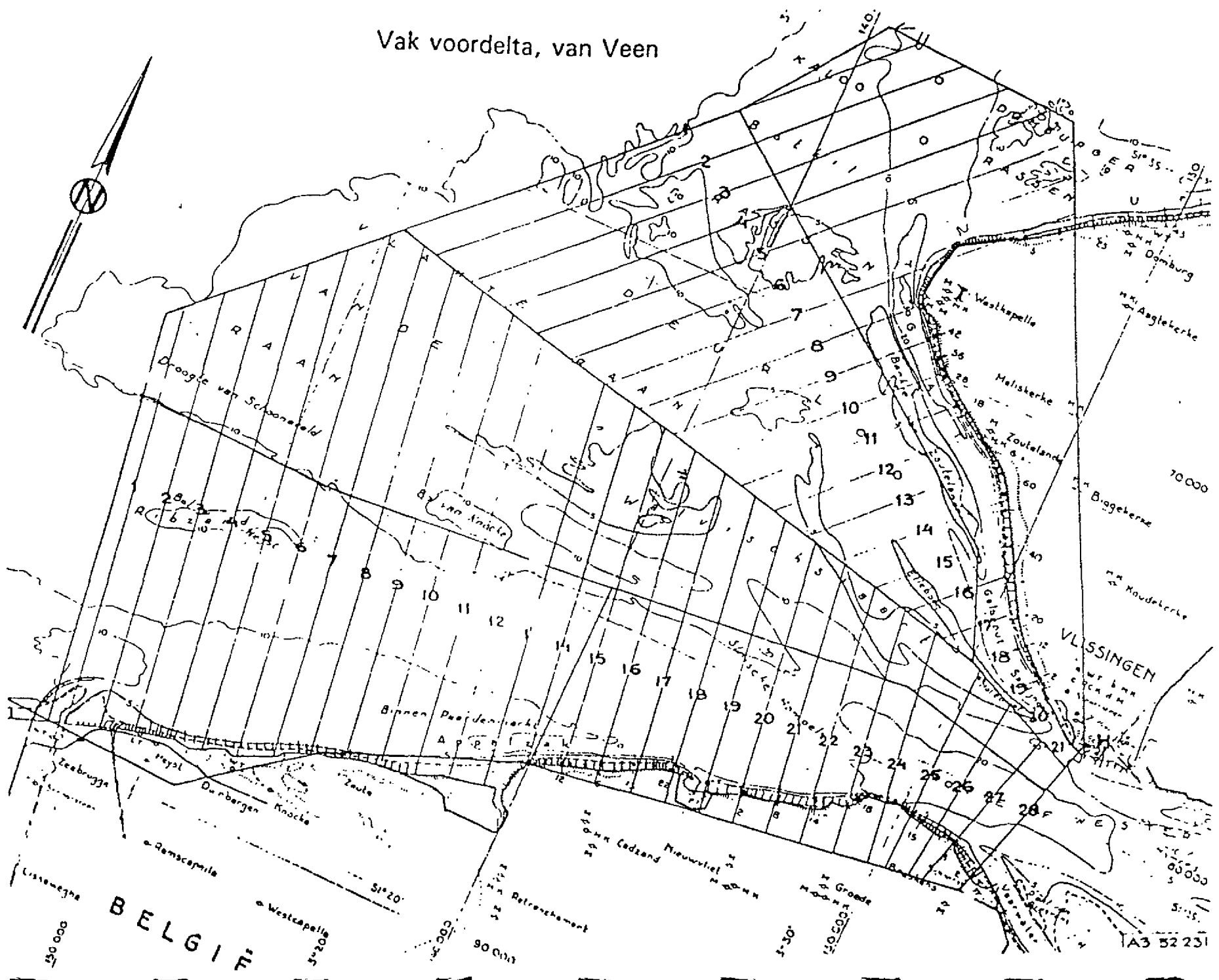
	sedimentatie (10 ⁶ m ³)	oppervlak (km ²)
buitendelta	-280	438
estuarium	-13	284
schorren	79	50

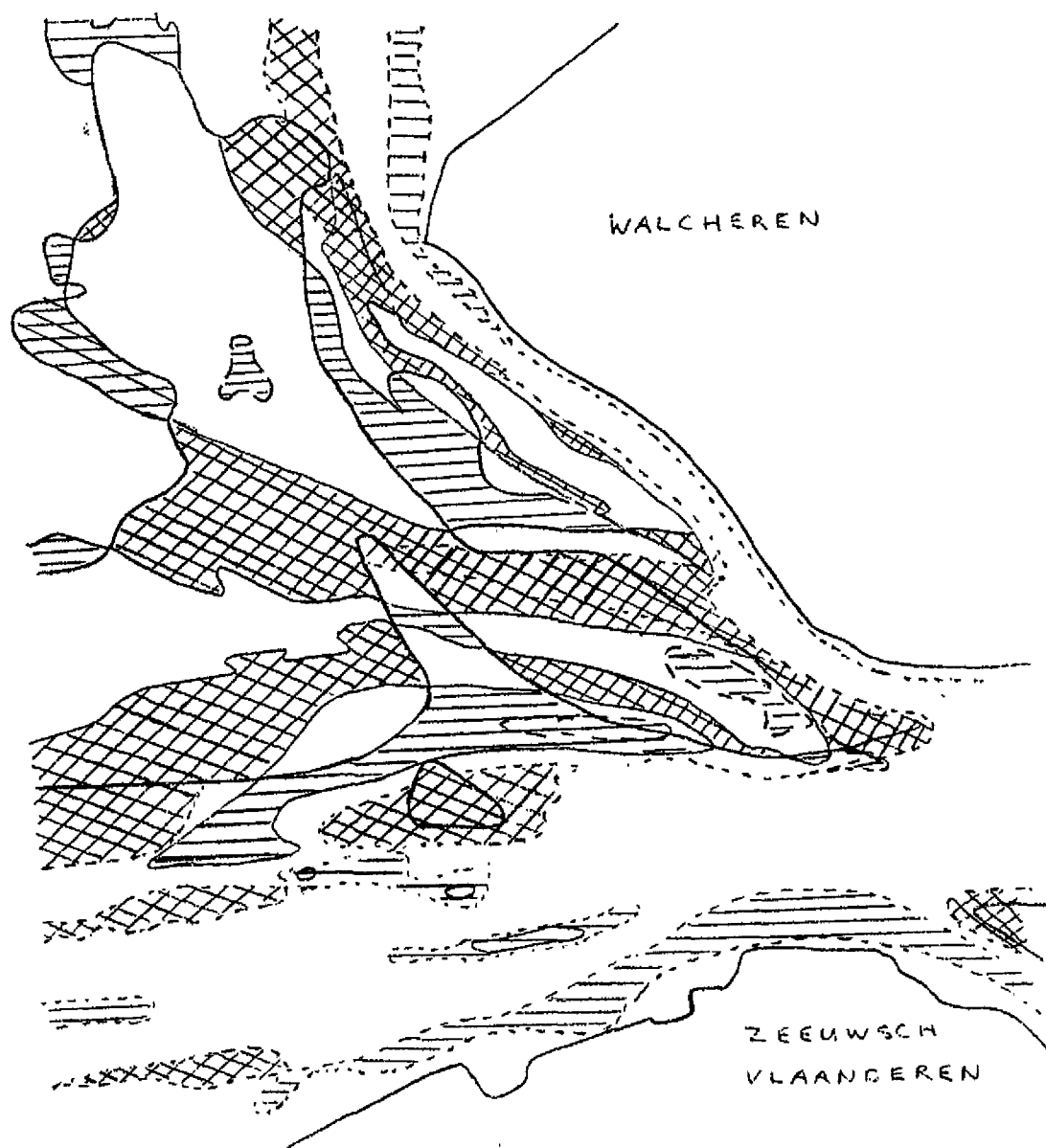
Afzonderlijke geulen en platen:

De hieronder beschreven morfologische ontwikkeling van de afzonderlijke geulen en platen is tevens af te lezen aan de morfologische kaarten van 1823, 1863, 1875, 1894, 1907, 1921, 1932, 1952 en 1978 (bijlage B) en weergegeven in een globale netto erosie-depositie kaart (figuur 4.2). De veranderingen worden hier verder niet chronologisch, maar per morfologische eenheid beschreven.

Vak voordelta, van Veen

Figuur 4.1: Het door Van Veen beschouwde gebied van de Westerschelde monding.





Legenda:  erosie
 depositie
 --- dieptelijn van g.l.w.
 — dieptelijn van 50 dm - g.l.w.
 -.- dieptelijn van 80 dm - g.l.w.

Figuur 4.2: Globale netto erosie en depositie over de periode 1823 tot 1978.

Oostgat en Wielingen:

Het Oostgat had in de beschouwde periode een vrij constante ligging en werd dieper net als de Galgeput en de Sardijngeul die in het verlengde van het Oostgat liggen. Het Bankje van Zoutelande had eveneens een vrij stabiele ligging. Ook de Wielingen werd dieper en breder,

waardoor de banken in (Paardenmarkt en bankje van Cadzand) en langs de flank van deze geul (Sluissche Hompels, Carolusbank, Bol van Knokke, Bol van Heist) in omvang afnamen en zich van de geulas af verplaatsten. Omstreeks 1865 ontstond een ebgeul tussen de Bol van Knokke en de Bol van Heist. Deze ebgeul breidde zich uit naar het Westen en vormde zo een eerste aanzet tot de latere Scheur. De verdiepingen in zowel het Oostgat als de Wielingen bedroegen vaak meer dan 2 meter (Van Veen, 1943 in Van den Berg, 1987 en De Looff en Verhagen, 1986).

Deurloo:

Rond 1800 was de Deurloo dieper en breder dan thans en lag centraler in de buitendelta. Bovendien was de oriëntatie hoofdzakelijk oost-west. In tegenstelling tot de Wielingen en het Oostgat werd de Deurloo smaller en ondieper. Tevens verplaatste het oostelijk deel van de Deurloo richting het noordoosten, waardoor de geul naar rechts roteerde. In ca. 1920 begon vanuit het zuiden de ontwikkeling van de Geul van de Rassen tussen de Rassen en het Bankje van Zoutelande. Rond 1960 begon de Deurloo af te wateren via de Geul van de Rassen die een NNO-ZZW oriëntatie had. Door deze aftapping werd de rotatie van de Deurloo sterk versneld. Het deel van de Deurloo ten westen van de Geul van de Rassen verzandde bijna volledig. De verzanding van de Deurloo ging gepaard met erosie van de noordwestelijke deltarand ter hoogte van de Deurloo (Uit den Bogaard, 1991 en Van den Berg, 1987).

Rassen:

Mede door het verleggen van de Deurloo nam het zuidelijke deel van de Rassen in omvang af. De locatie van het centrale ondiepe gedeelte van de Rassen was vrij stabiel. In het noorden werden perioden van plaataanwas (vanaf 1823) afgewisseld met perioden van plaaterosie (vanaf 1932).

Vlakte van de Raan:

In 1800 waren de Vlakte van de Raan en de Elleboog met elkaar verbonden en werden gescheiden van de Walvischstaart door de waarschijnlijk vloed-gedomineerde geul de Spleet. Beide bankcomplexen waren destijds langgerekt en hadden een oost-west oriëntatie. Rond 1850 kwamen de Elleboog en de Raan los van elkaar te liggen. Omstreeks 1860 ontstond het Nolleplaatje ten oosten van de Elleboog. De Nolleplaat was oorspronkelijk een drempel tussen de Honte, de hoofdebgeul in de hals van het estuarium, en de Galgeput-Deurloo, maar groeide gestaag en verplaatste na 1878 in westelijke richting en verheelde omstreeks 1890 met de Elleboog, waardoor ruimte vrij kwam voor de Sardijngeul. De Elleboog veranderde tussen 1820 en 1930 nauwelijks in omvang, maar nam aanzienlijk in hoogte toe net als de Nolleplaat (sedimentatie van ruim 2 meter, De Looff en Verhagen, 1986). De Walvischstaart verplaatste in noordelijke richting en kwam omstreeks 1860 vast te liggen aan de de Raan en de Elleboog. Hierdoor nam de Spleet in omvang af en kreeg meer een ebschaar-geometrie. Rond 1895 begon in het zuiden van de Walvischstaart een geul tot ontwikkeling te komen. De oriëntatie van deze geul, de Geul van de Walvischstaart, was NNW-ZZO.

(Sluissche) Hompels:

In 1823 was de plaat van de Walvischstaart verbonden met de Hompel. Dit aanhangsel ontwikkelde zich in de periode van 1823-1875 tot een langgerekte bank met een oost-west oriëntatie en een positie midden in de vaargeul de Wielingen. Vanaf 1880 verschoof deze

bank in noordwestelijke richting en heden is deze bank onderdeel van de noordelijke oever van de Wielingen. Het oostelijke gedeelte wordt thans de Sluisschse Hompels genoemd en het westelijke gedeelte staat bekend als het Carolus bankje.

Appelzak:

De vloodschar de Appelzak onderging tot 1894 nauwelijks veranderingen (Uit den Bogaard, 1991). Na 1931 verdween de westelijke helft, waarschijnlijk door de aanleg van de strekdam bij de haven van Zeebrugge (uit den Bogaard, 1991). Het oostelijk deel van de Appelzak verondiepte sterk na de aanleg van de havendam (Agema e.a., 1988) en verloor zijn vloodschar karakter.

Kustontwikkeling Walcheren en ontwikkeling omgeving Oostgat:

De kustontwikkeling van Walcheren hangt sterk samen met de ontwikkeling van het Oostgat en het Bankje van Zoutelande, derhalve worden deze twee onderwerpen samen besproken. Allereerst zal de geologische ontwikkeling van de kuststrook van Walcheren kort toegelicht worden, aangezien deze ontwikkeling bepalend is voor de huidige morfologie. Vervolgens worden de opgetreden veranderingen in de kuststrook en de omgeving van het Oostgat besproken. Tot slot wordt getracht deze morfologische veranderingen te verklaren.

Walcheren:

Ter hoogte van Zoutelande is Walcheren sterk ingeschaard. Deze inscharing hangt samen met de ontwikkeling van Walcheren. Gedurende de middeleeuwen hebben enkele stormvloeden plaatsgevonden, waarbij delen van Walcheren overstroomd zijn. Tijdens deze overstromingen zijn oude resistente afzettingen weggeslagen. De inbraken hebben zich geconcentreerd tussen Zoutelande en Dishoek, waardoor hier vooral jonge, makkelijk erodeerbare afzettingen in de directe ondergrond aanwezig zijn. Deze jonge afzettingen zijn in de loop der tijd verder geërodeerd dan de omliggende oude afzettingen, waardoor de kustlijn thans hol is en ten zuiden van Zoutelande de hoogste en breedste duinen zijn gevormd (Roelse en Maranus, 1988).

De vooroever tussen Westkapelle en Vlissingen was de laatste twee eeuwen aan geringe doorgaande erosie onderhevig. De gemiddelde erosie was het sterkst in Westkapelle, namelijk ongeveer 1.0 meter per jaar, en nam af in zuidelijke richting tot ongeveer 0.2 meter per jaar (Roelse en Maranus, 1988). Op deze negatieve trend was een flauwe langperiodieke fluctuatie gesuperponeerd met een amplitude van 10 tot 35 meter waardoor een afwisseling van perioden van verminderde erosie en perioden van versnelde erosie ontstond. In de jaren tachtig was er sprake van verminderde erosie. De fluctuaties in erosiesnelheid werden door Roelse en Maranus (1988) ten onrechte toegeschreven aan een grootschalige zandgolfbeweging over de Voordelta. Het ruimtelijke erosie- en depositiepatroon dat door Roelse en Maranus (1988) als zandgolf beschouwd werd, was immers het gevolg van de grootschalige, geleidelijke migratie van geulen over de buitendelta van de Westerschelde zoals hiervoor beschreven is. Bovendien verplaatsen zandgolven zich langs de kust, terwijl het 'zandgolfverschijnsel' in Walcheren kustlangs synchroon plaatsvond.

De erosie van de duinvoet verloopt aanvankelijk trager dan die van de vooroever tot een maximale helling ontstaat, waarna de erosie van de duinvoet synchroon loopt met die van de vooroever. De erosie van de duinvoet duurt langer, waardoor de uiteindelijke achteruitgang voor het hele profiel gelijk is (Roelse en Maranus, 1988).

Oostgat en Bankje van Zoutelande:

Ten westen van het Bankje van Zoutelande zijn regelmatig geulen aanwezig. De omvang en de vorm van deze geulen zijn in de loop der tijd veranderd. In 1823 werd het Bankje van Zoutelande begrensd door een geul met de vorm van een vloedschaar. In 1841 had deze geul verbinding gekregen met de Deurloo en sindsdien heeft deze geul de vorm van een ebschaar. Tegelijkertijd met de ontwikkeling van de meer westelijk gelegen Geul van de Rassen, verdwijnt de geul direct ten westen van het Bankje van Zoutelande geleidelijk. Thans neemt de Deurloo-Geul van de Rassen de plaats in van het voormalige geultje ten zuidwesten van het Bankje van Zoutelande en lijkt een vloedschaar-geometrie te ontwikkelen.

Gedurende de afgelopen twee eeuwen verschoof het Oostgat zeer langzaam in oostelijke richting (Roelse en Maranus, 1988) en breidde het Bankje van Zoutelande zich in oostelijke richting uit (Maranus, 1986).

De doorgaande kustachteruitgang in Walcheren kan verklaard worden door de (geringe) landwaartse verplaatsing van het Oostgat. Deze verplaatsing is het gevolg van het landwaartse stroom- en golfgeïnitieerde zandtransport over het Bankje van Zoutelande. De migratie van het Oostgat verloopt zo langzaam door de vrij resistente ondergrond en de intensieve kustverdediging. Bovendien wordt het meeste zand kustlangs door de getijstromen in het Oostgat afgevoerd.

De erosiesnelheid hangt waarschijnlijk samen met de debietverdeling over de geulen ten oosten, Oostgat, en ten westen van het Bankje van Zoutelande; een toename van het (vloed) debiet door het Oostgat vergroot de stroomdruk op de Walcherse oever en derhalve de erosiesnelheid. Op grond van de funktiewisselingen van de geul ten westen van het Bankje van Zoutelande lijkt de verdeling van de eb- en vloeddebieten over beide geulen in de loop der tijd enkele malen veranderd te zijn. Het is tot nu toe onbekend hoe, wanneer en waarom deze veranderingen zijn opgetreden.

Kustontwikkeling Belgisch Vlaanderen:

Over de ontwikkeling van de kust tussen Zeebrugge en het Zwin is geen gedetailleerde informatie beschikbaar, aangezien pas sinds 1954 opnemingen van de Belgische kuststrook zijn verricht. De veranderingen voor 1954 moeten derhalve ontleend worden aan morfologische kaarten van het gehele mondingsgebied waarvan de nauwkeurigheid gering is. In de 19^e eeuw trad aanzienlijke stranderosie op ten oosten van Zeebrugge. Rond de Zwinmond daarentegen groeide het strand aan. Overal vond een afname van de onderzeese oever plaats, waardoor de oever in de buurt van het Zwin versteilde. In de 20^e eeuw erodeerde het strand in de omgeving van het Zwin. De aanleg van de havendam bij Zeebrugge in het begin van de 20^e eeuw beïnvloedde de kustontwikkeling van de omgeving. Ten westen van Zeebrugge trad depositie op, omdat de brandingsstroom onderbroken werd. De lij-erosie ten oosten van de havendam bleef beperkt. Plaatselijk leek zelfs sprake te zijn van een lichte vooruitgang, bijvoorbeeld in de omgeving van Heist. Dit is waarschijnlijk het gevolg van kustdwarse transporten die in de luwte van de dam relatief belangrijker werden of door een horizontale circulatie (vergelijkbaar met backflow achter een megaribbel). De omvangrijke suppleties van eind jaren 70 verplaatsten de kustlijn significant zeewaarts, hetgeen in de daaropvolgende jaren geleidelijk weer verloren ging. Over het algemeen was langs de Belgische kust sprake van geringe tot aanzienlijke erosie.

Kustontwikkeling Zeeuwsch Vlaanderen:

Voor het Nederlands grondgebied zijn frequentere gegevens beschikbaar, waardoor de kustontwikkeling beter vastgelegd is. Hieruit blijkt dat de kustlijn sterk fluctueerde in de tijd en op langere termijn slechts een geringe kustachteruitgang te zien gaf. Met name in de omgeving van Cadzand traden abrupte grote verplaatsingen van de laagwaterlijn op. Lambeek (1991) heeft de zandgolven voor de Zeeuwse kusten uitgebreid geanalyseerd aan hand van de beschikbare lodingen en luchtfoto's. Zijn analyse toonde aan dat langs de kust van Zeeuwsch Vlaanderen twee zandgolven aanwezig waren die samenhangen met de oostwaartse migratie van het voor de kust liggende vloedschuurtje de Appelzak. Hierbij schoof tegelijkertijd de drempel die aan het uiteinde van het geultje onder een hoek tegen de kust aan lag mee. Ter hoogte van deze drempel bouwde de kust uit. Achter deze voorste zandgolf migreerde een tweede zandgolf ter hoogte van een meanderbocht in de Appelzak. Tussen 1890 en 1950 versmolten deze twee zandgolven, zodat in 1975 slechts één zandgolf over was. De oostwaartse uitbreiding van de Appelzak stopte in de periode dat de havendam bij Zeebrugge aangelegd werd. De geul verzandde sindsdien gedeeltelijk en de drempel werd geleidelijk opgeruimd door de getijstromingen in de Wielingen. Thans vindt er geen zandgolfbeweging plaats langs de kust van Zeeuwsch Vlaanderen (Lambeek, 1991).

4.3.3 Verklaring morfologische ontwikkeling buitendelta Westerschelde

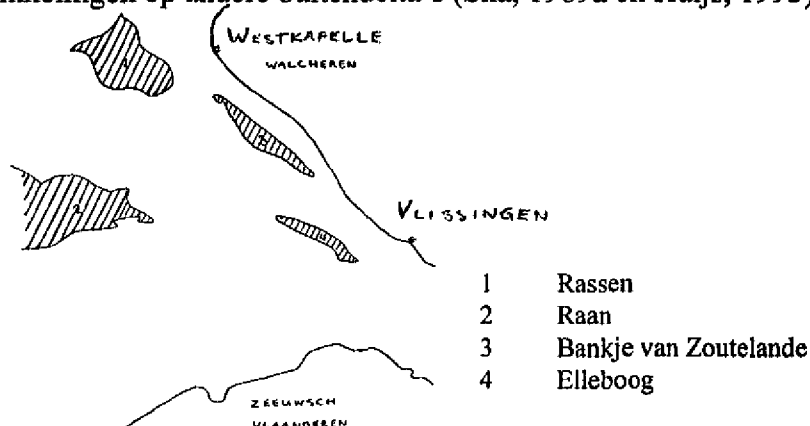
Buitendelta en aangrenzende gebieden:

Indien het getijprisma toeneemt, ruimen de geulen in het estuarium uit en wordt zand in de richting van de buitendelta getransporteerd. De geulen in het proximale deel van de buitendelta verdiepen tevens en het sediment wordt op het deltafront afgezet waardoor de delta zeewaarts uitbreidt. Een afname van het getijprisma heeft het tegenovergestelde effect. De geulen verzanden en het deltafront verplaatst landwaarts door golfwerking, waardoor het totale zandvolume van de buitendelta afneemt (Van den Berg, 1986 in Uit den Bogaard, 1991). In de beschouwde periode van 1800-1970 zijn de geulen zowel in het estuarium als in de buitendelta over het algemeen dieper geworden, ondanks de afname van het getijprisma sinds ca. 1610. Deze schijnbare tegenstelling kan verklaard worden door een aanzienlijk naijlingseffect; de geulen konden de snelle toename van het getijprisma in de middeleeuwen niet bijhouden door de aanwezigheid van een stroomresistente kleilagen in de ondergrond (Van den Berg e.a., 1991). De verdieping van de geulen veroorzaakte de waargenomen afname van het zandvolume van het proximale deel van de buitendelta. Van het distale deel van de buitendelta zijn helaas geen gegevens beschikbaar. Het geërodeerde sediment is slechts gedeeltelijk in het estuarium zelf afgezet. Onmiddellijk ten noorden, zuiden en zuid-westen van de buitendelta trad geen depositie op. Er heeft derhalve ofwel geen transport in die richtingen plaats gevonden of het sediment is verder weg afgezet. Terwindt (1973) vond aanwijzingen voor een noordoostelijk transport over de voordelta en een westelijk transport in de Oosterschelde monding. Het is derhalve zeer waarschijnlijk dat het geërodeerde sediment deels in het westen is afgezet en deels richting het noordoosten is getransporteerd. De noordoostelijke transportrichting komt overeen met het vloedoverschot op dieper water en het te verwachten dominante brandingsstroom transport (§3.3). Postma e.a. (1991) stellen echter dat de sedimentuitwisseling tussen de Ooster- en Westerschelde monding gering is, omdat op de Domburger Rassen geen significante morfologische ontwikkelingen plaats gevonden hebben. Echter alleen gradienten in sedimenttransport leiden tot morfologische veranderingen, het sediment kan ook

alleen doorgevoerd zijn en in het distale deel van de Oosterscheldedelta of in de buitendelta's van de Grevelingen en het Haringvliet tot afzetting zijn gekomen.

Afzonderlijke geulen en platen:

Uit de oude morfologische kaarten van de Westerschelde monding is gebleken dat de kernen van de plaatgebieden de afgelopen twee eeuwen redelijk stabiel waren (figuur 4.3) en dat de Wielingen en het Oostgat verdiept zijn ten koste van de Deurloo. Ten noorden van de Wielingen is de oriëntatie van de geulen en platen veranderd van oost-west naar noord-zuid. Deze veranderingen zijn geleidelijk verlopen en er zijn geen cyclische patronen in aangetroffen, in tegenstelling tot de ontwikkelingen op andere buitendelta's (Sha, 1989a en Huijs, 1993).



Figuur 4.3: Gebieden die gedurende de periode 1823-1978 continu boven 50 dm - g.l.w. zijn gebleven.

De verdieping van de Wielingen en het Oostgat en de verondieping van de Deurloo werd veroorzaakt door een herverdeling van de afvoer. Er was immers geen sprake van een toename van het getijvolume die de uitdieping kan verklaren. Zowel Sha en Van den Berg (1993) als Van Veen (1936) verwachten op basis van hun theoriën ter verklaring van de ligging van de geulen in een buitendelta (§ 2.2.1) dat de hoofdgeul in de Westerschelde monding in het zuiden ligt. De concentratie van de ebstroom in het zuiden hangt derhalve samen met de historische ontwikkeling van de Westerschelde monding. Aanvankelijk lag de hoofdgeul centraal in het gebied dat thans de Westerschelde monding vormt. Ten zuiden van deze geul ter hoogte van de huidige Wielingen waren lange tijd eilanden aanwezig. Geleidelijk verdwenen deze eilanden en onstond hier een geul, die waarschijnlijk slechts langzaam uitschuurde als gevolg van resistente kleilagen in de ondergrond. In de 17^e eeuw zijn beide ebgeulen ongeveer even diep (Van den Berg, 1987). Sindsdien is de Wielingen verder in belang toegenomen.

De concentratie van de ebstroom in het zuiden kan bovendien beïnvloed zijn door de aanstroomrichting vanuit het estuarium. Hierin zijn in de loop der tijd veranderingen opgetreden. Sinds 1800 is de Honte uitgebocht, waardoor de platen ten zuiden van deze geul uitgebreid zijn door materiaaltransport naar de binnenbocht (Wilderom en Van Malde, 1968). De richting van de ebstroom op de overgang van de Westerschelde naar de buitendelta is hierbij veranderd van WNW naar WZW (Svašek, 1995). In de laatste decennia is de afvoer van de Honte afgenomen (Svašek, 1995 en Wilderom en Van Malde, 1968) ten gunste van de oost-west georiënteerde Schaar van Spijkerplaat. Hierdoor is de richting van de uitstroom uit het estuarium naar het westen gedraaid (Svašek, 1995). Het is echter onduidelijk of de ontwikkeling in de hals een oorzaak (Svašek, 1995) of een gevolg (Van den Berg, 1987) van de concentratie van de ebstroom in het zuiden is.

Tot slot is de versmalling en rotatie van de Deurloo in de 20^e eeuw waarschijnlijk versterkt door de ontwikkeling van de Geul van de Walvischstaart. Het ebschild aan het einde van deze geul drukte de Deurloo verder dicht en splitste de Deurloo op in een westelijk en oostelijk deel. De verbinding tussen beide delen werd steeds slechter, waardoor de oostelijke helft langzamerhand af ging wateren via de Geul van de Rassen.

Over de processen die verantwoordelijk zijn voor de ontwikkeling van de geulen ten noorden van de Wielingen bestaan twee zienswijzen. Svašek (1995) stelt dat het verhang in het centrale deel van de buitendelta voorheen groot genoeg was om daar een geul in stand te houden. Door de verdieping van de Wielingen is de voortplantingssnelheid van het getij toegenomen, waardoor het faseverschil ter plaatse van de voormalige Deurloo is afgenomen. In oostelijk richting neemt het verhang tussen de buitenrand en de hals van het estuarium toe, ondanks de afname van het faseverschil, als gevolg van een afname van de afstand tussen de rand en de hals. Hierdoor roteerde de Deurloo naar het noordoosten. Van den Berg (1987) schrijft de NO-rotatie van de geulen en platen in het noorden toe aan het feit dat het Noordzee getij relatief belangrijker is geworden, omdat de stroming naar en uit het zeegat afgenomen is. Hierdoor overheerst het Noordzee getij in het totale stromingsbeeld en richten de geulen zich sterk naar het Noordzee getij.

4.4 Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding op de tijdschaal van jaren (1969-1994)

4.4.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de jaarlijkse morfologische veranderingen besproken. De beschrijving is gebaseerd op rapporten van De Looff en Van Dam, die naar aanleiding van de verrichte vaklodingen zijn geschreven. Daarnaast zijn de verslagen van De Looff en Verhagen (1986) en Israel (1993) geraadpleegd, waarin de recente ontwikkelingen in respectievelijk de Wielingen en de omgeving van het Oostgat uitgebreid zijn beschreven. De onnauwkeurigheden in de lodingen liggen in de orde van een paar decimeter in diepte. Deze grote onnauwkeurigheid leidt tot afwisselingen van erosie en depositie op jaarlijkse basis en overschaduwde derhalve de werkelijke diepteveranderingen. Daarom worden hier alleen de trends in de jaarlijkse veranderingen besproken. Verder wordt er aandacht besteed aan de aard van het oppervlak. Plaatselijk is de bodem onregelmatig door de aanwezigheid van resistente kleilagen aan het oppervlak, die doorgaans niet korrel voor korrel, maar in grotere brokken eroderen. Tevens leidt de migratie van beddingvormen tot lokale afwisselingen van erosie en depositie.

4.4.2 Morfologische ontwikkeling

Wielingen en omgeving:

Over het algemeen verdiepten het Scheur en het westelijke deel van de Wielingen in de periode 1969-1994 jaarlijks. Deze verdiepingen hingen direct, namelijk in het Scheur, of indirect, zoals in het deel van de Wielingen aangrenzend aan het Scheur, samen met baggeractiviteiten. De gemiddelde bodemligging in het oostelijk deel van de Wielingen was stabiel, plaatselijk trad echter afslag of aanwas op door de onregelmatige erosie van de aanwezige kleilagen en de migratie van beddingvormen. De Sluissche Hompels, de Carolus bank, de Bol van Knokke en de Bol van Heist, vertoonden een plaatselijke afwisseling van erosie en

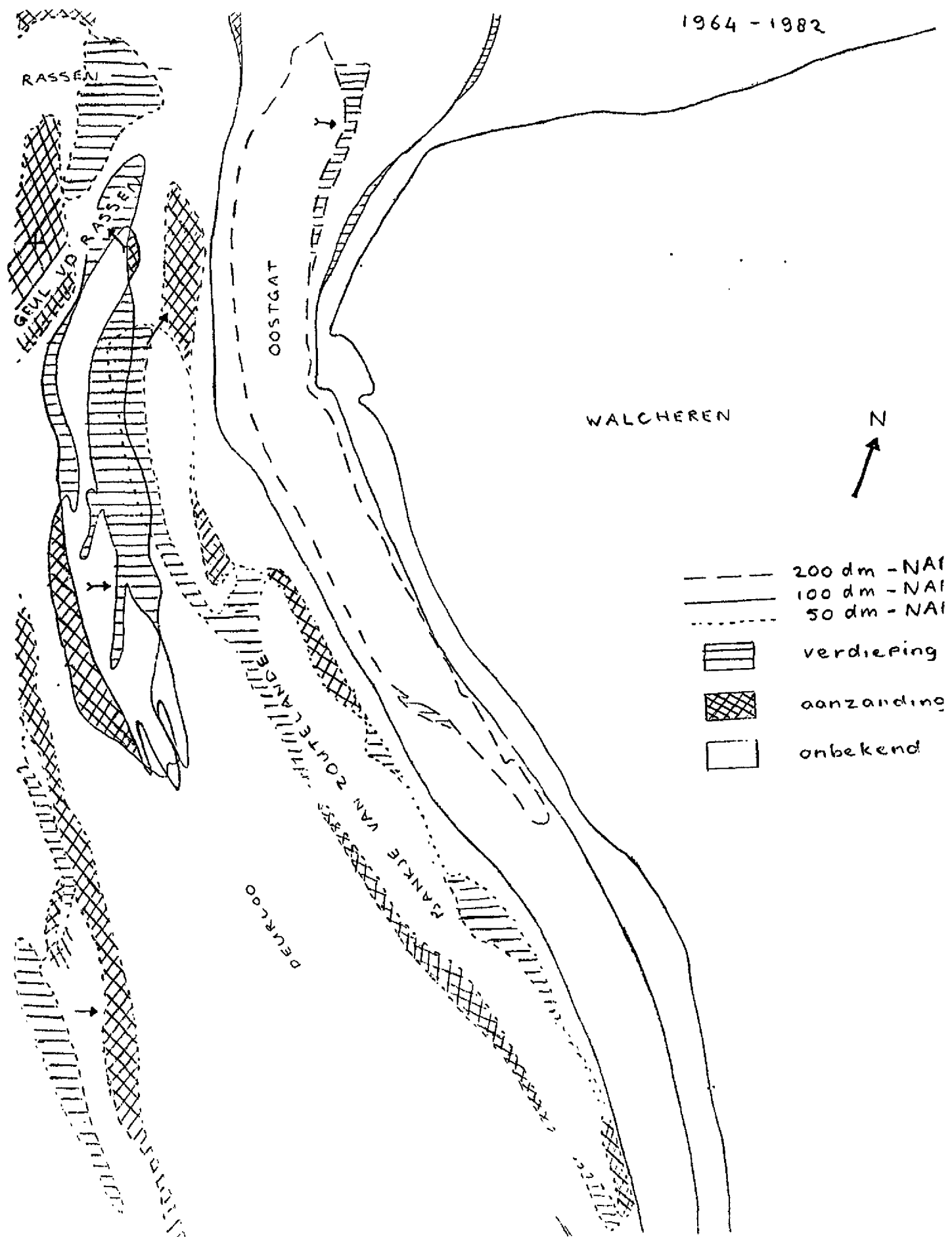
depositie ten gevolge van de migratie van beddingvormen. Op de Sluissche Hompels waren bovendien resistente kleilagen aanwezig die een onregelmatig bodemverloop veroorzaakten (De Looft en Verhagen, 1986). De Bol van Knokke werd smaller en verplaatste noordwaarts. De Carolus bank en de Sluissche Hompels vertoonden geen netto erosie of migratie, maar hadden daarentegen een zeer variabele omvang en ligging. De noordflank van de Paardenmarkt was bedekt met beddingvormen, terwijl de top vlak was. De noordwestelijke zijde van de Paardenmarkt was over het algemeen aan erosie onderhevig, terwijl de zuidoostelijke zijde aanzandde. In de zuidelijk gelegen Appelzak vond eveneens depositie plaats. De aanzanding op de Paardenmarkt en in de kuil van de Appelzak verliep onregelmatig en was gedeeltelijk het gevolg van het storten van baggerspecie. De geul van de Appelzak vernauwde geleidelijk, verondiepte en verplaatste kustwaarts.

Centrale bankengebied:

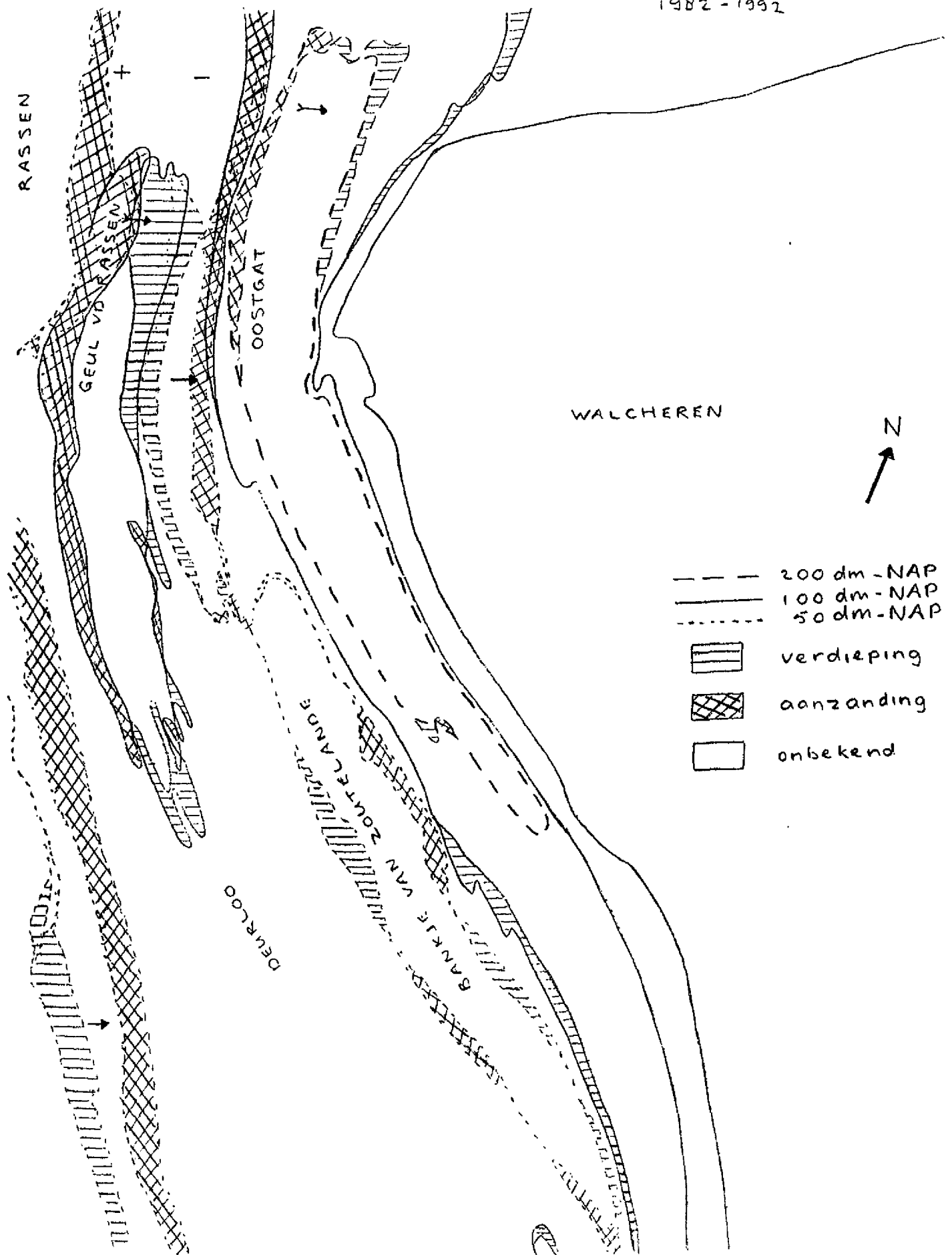
De Vlake van de Raan, Walvischstaart en Elleboog werden gekarakteriseerd door plaatselijke aanzanding en verdieping; met name op de Elleboog waren de variaties groot (tot 4 meter). De Droogte van Schooneveld, gelegen tegen de zuidwestelijke punt van de Vlake van de Raan, was bedekt met beddingvormen en zandde sterk aan. De ontwikkeling van de Geul van de Walvischstaart zette zich voort.

Oostgat, Deurloo en omgeving (figuur 4.4 en 4.5):

De Geul van de Rassen verbreedde en verdiepte en breidde zich naar het noorden uit, omdat het oostelijk deel van de Deurloo via deze geul ging afwateren. Hierdoor versmalde het noordelijk deel van het Bankje van Zoutelande aan de westzijde. Het geërodeerde zand werd waarschijnlijk door getijstromen naar het noorden getransporteerd en daar afgezet in de vorm van een noordelijke uitloper van het Bankje van Zoutelande. Deze uitloper groeide aan tot 1992 en verdween vervolgens in het Oostgat. Door de verdieping van de noordelijke inloop van de Geul van de Rassen namen de Rassen tevens plaatselijk in omvang af. De erosie concentreerde zich in het oosten, in het zuiden daarentegen breidden de Rassen zich uit. Na 1986 roteerde de inloop van de Geul van de Rassen geleidelijk naar het oosten, waardoor de Rassen zich in oostelijke richting uit konden breiden. Het Oostgat verdiepte gedurende de hele periode en de noordelijke inloop roteerde gestaag naar het oosten. Vanaf 1986 verbreedde het zuidelijk deel van het Oostgat door zandwinnig. De ligging van het Oostgat was ook op korte tijdschaal vrij stabiel, evenals de ligging van het Bankje van Zoutelande. Het Bankje van Zoutelande vertoonde zones van aanwas en erosie. Deze zones verplaatsten in de loop der tijd langs het bankje en kunnen derhalve als een soort zandgolfverschijnsel beschouwd worden. Dit zandgolfverschijnsel werd veroorzaakt door de aanwezigheid van een knik in het Bankje van Zoutelande die in de loop der tijd in zuidelijke richting verplaatste. Deze knik lijkt samen te hangen met een flauwe bocht in het Oostgat. Tussen het Oostgat en de Deurloo ontstond een kortsluitgeul, waardoor het Bankje van Zoutelande in een noord en zuid deel gesplitst werd. Deze kortsluitgeul verzandde echter weer na 1982. De Deurloo nam nog steeds in belang af. Het oostelijk deel van de Deurloo versmalde, doordat de Elleboog in noordoostelijke richting opschoof. Het westelijke deel van de Deurloo verzandde geleidelijk. De Sardijngeul daarentegen verdiepte, terwijl de Galgeput zijn diepte behield.

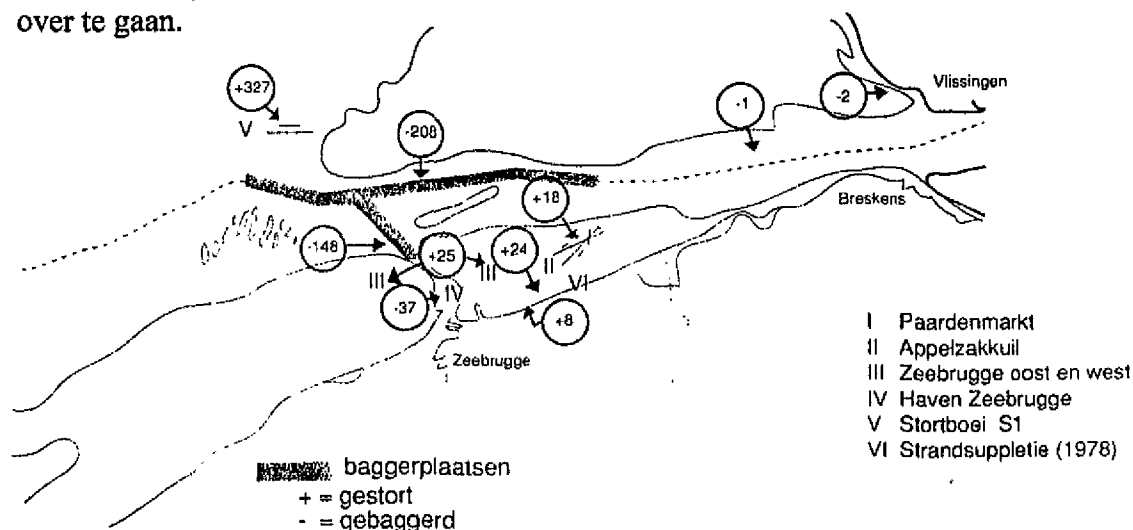


Figuur 4.4: Morfologische veranderingen omgeving Oostgat-Deurloo tussen 1964 en 1982.



Figuur 4.5: Morfologische veranderingen omgeving Oostgat-Deurloo tussen 1982 en 1992.

Een groot deel van de waargenomen morfologische veranderingen is beïnvloed door of het gevolg van menselijke bagger- en stortactiviteiten. In figuur 4.6 is een overzicht van de gebaggerde en gestorte hoeveelheden sediment over de periode van 1970-1984 weergegeven. In de toegangsgedul tot de haven van Zeebrugge, in de haven zelf en in het Scheur werden grote hoeveelheden sediment weggebaggerd. Dit sediment werd grotendeels op de Droogte van Schooneveld gestort. Andere stortplaatsen waren de Appelzakkuil, de Paardenmarkt en het gebied direct ten oosten en westen van de haven van Zeebrugge. In de Wielingen was tot 1984 nauwelijks gebaggerd, maar er bestaan plannen om ook hier tot grootschalige verdieping over te gaan.



Figuur 4.6: Bagger- en stort volumes in de monding van de Westerschelde over de periode 1970-1984.

4.4.3 Conclusies

De natuurlijke morfologische ontwikkeling verloopt geleidelijk, zodat de diepteveranderingen op jaarbasis vaak in de orde van grootte van de onnauwkeurigheden van de ladingen liggen. De menselijke bagger- en stortactiviteiten overheersen direct of indirect (erosie in Wielingen ten oosten van de verdiepingswerken in het Scheur) de morfologische veranderingen gedurende de laatste 25 jaar. Alleen de ontwikkeling van de Geul van de Rassen en de Geul van de Walvischstaart is ongetwijfeld een natuurlijke ontwikkeling, die ook voor de toename van de menselijke invloed al aan de gang was.

5. Hypothesen met betrekking tot het sedimenttransport en de morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde monding

5.1 Algemene ontwikkeling Westerschelde monding

5.1.1 Beschouwing algemene ontwikkeling Westerschelde monding

In hoofdstuk 4 is de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding beschreven. Hieruit is gebleken dat de morfologische veranderingen langzaam en geleidelijk verlopen. In tegenstelling tot andere buitendelta's zijn in de Westerschelde monding geen cyclische patronen in de geulmigratie aangetroffen. Uit geologisch onderzoek is gebleken dat in de Westerschelde monding veel mariene kleiige afzettingen aanwezig zijn en weinig fluviatiele zandige afzettingen (voor een uitgebreide beschouwing van de geologische opbouw van het gebied en de invloed van de aanwezige resistente lagen op de morfologische ontwikkeling zie RGD rapport). De aanwezigheid van resistente afzettingen in combinatie met de geringe ouderdom van het gebied hebben er waarschijnlijk voor gezorgd dat er vooralsnog geen cyclische morfologische veranderingen in de Westerschelde monding zijn aangetroffen.

In vergelijking met andere buitendelta's zijn de platen in de Westerschelde monding laag en relatief vlak. Tegenwoordig vallen in de buitendelta van de Westerschelde geen platen meer droog tijdens laagwater, terwijl dit in andere ebdelta's meestal wel het geval is. De afwezigheid van droogvallende platen hangt waarschijnlijk samen met het feit dat de monding trechtervormig is, waardoor de ruimte beperkt is en bijna volledig wordt ingenomen door geulen. De trechtervorm impliceert dat de hals te klein is voor het debiet; in de periode dat het getijvolume in de Westerschelde sterk toenam, was de kust al grotendeels vastgelegd (Ferguson, 1991), waardoor het mondingsgebied niet mee kon groeien. De geringe hoogte van de bankgebieden heeft consequenties voor het relatieve belang van golf- en getijgerelateerde processen. Onder gemiddelde golfcondities blijft de golfgerelateerde stroming op de platen beperkt tot een landwaartse stroming als gevolg van golf asymmetrie. Alleen tijdens storm breken de golven op de platen. Afhankelijk van de manier waarop het massatransport onderbrekende golven gecompenseerd wordt, vindt of een netto landwaarts transport (geconcentreerde terugstroming via geulen) of een netto zeewaarts transport (retourstroom) plaats op de platen. Over het algemeen wordt aangenomen dat het massatransport over de platen in buitendelta's gecompenseerd wordt door een zeewaartse stroming in de geulen. Echter gezien de uitgestrektheid en de lage ligging van de plaatgebieden in de Westerschelde monding acht ik verticale compensatie van het massatransport niet ondenkbaar. Brekende golven zijn bovendien van belang voor de opbouw van banken op de plaatgebieden (Oertel, 1972 en Fitzgerald, 1984).

De belangrijkste verandering in de Westerschelde monding was het in belang toenemen van de Wielingen en tegelijkertijd in belang afnemen van de Deurloo. Hierdoor werd ten noorden van de Wielingen het kustlangse getij relatief belangrijker, waardoor de geulen en platen naar het noordoosten roteerden.

5.1.2 Hypothesen algemene ontwikkeling Westerschelde monding

Op grond van bovenstaande beschouwing van de algemene ontwikkeling van de Westerschelde monding zijn de volgende hypothesen gevormd:

Vlakte van de Raan:

- Als gevolg van de grote waterdiepte boven de platen in de Westerschelde monding zijn de golfgerelateerde processen daar relatief onbelangrijk in vergelijking met andere buitendelta's.
- Door het geringe belang van golven hebben de platen een vlak verloop.

Wielingen:

- De verdieping van de Wielingen heeft het stromingsbeeld in de rest van de Westerschelde monding beïnvloed en derhalve de morfologische veranderingen daar gestuurd.

5.2 Sedimenttransport

5.2.1 Hypothesen sedimentuitwisseling tussen Westerschelde monding en aangrenzende gebieden

Over het sedimenttransport in de Westerschelde monding is tot nu toe weinig bekend. Op grond van de bestudeerde literatuur zijn de volgende hypothesen opgesteld over de uitwisseling van sediment tussen het mondingsgebied en de aangrenzende gebieden:

Deltafront / Uitwisseling met de Noordzee:

- Er vindt uitwisseling van sediment plaats tussen het mondingsgebied en de Noordzee door de kustdwarse component van de getijstromen (Terwindt, 1973), het netto sedimenttransport is echter verwaarloosbaar. In evenwichtssituaties zijn ter hoogte van het deltafront de landwaartse transporten door de vloedstroom en de golf-asymmetrie in evenwicht met de zeewaartse transporten door de ebstroom, waardoor het netto sedimenttransport verwaarloosbaar is. De Westerschelde monding als geheel is thans vrijwel in evenwicht (Kohsiek en Mulder, 1988), echter door een herverdeling van het debiet binnen de buitendelta kan lokaal het evenwicht verstoord zijn. Indien de Wielingen nog steeds in belang toeneemt, zal in het zuidelijk deel van de ebdelta het sediment netto zeewaarts over het deltafront verplaatst worden, waardoor het deltafront uitbouwt, terwijl in het noordelijk deel het sediment netto naar land getransporteerd zal worden.
- Langs het deltafront van de Westerschelde vindt netto sedimenttransport plaats in noord-oostelijke richting als gevolg van het dominante brandingsstroomtransport (Terwindt, 1973) en het vloedoverschot langs de kust (Kohsiek en Mulder, 1988 en Sha, 1989b). Hierbij moet nog opgemerkt worden dat alleen tijdens storm de golven zo hoog zijn dat ze tegen het deltafront breken en een brandingsstroom langs het deltafront opwekken.

Rassen / Uitwisseling met Oosterschelde monding:

- Er wordt netto een geringe hoeveelheid sediment van het mondingsgebied van de Westerschelde naar het mondingsgebied van de Oosterschelde getransporteerd door de dominante brandingsstroom over de plaatgebieden (Terwindt, 1973). Gezien de lage ligging van de Domburger Rassen wordt hier alleen tijdens ruw weer een brandingsstroom gegenereerd, waardoor de bijdrage aan de totale sedimentuitwisseling gering is.

Uitwisseling met Westerschelde:

- De Westerschelde monding exporteert zand richting het Westerschelde estuarium (o.a. Van den Berg e.a., 1991), ondanks het eboverschot door de raai Vlissingen-Breskens (De Jong, 1989). Immers door de hogere vloedsnelheden en grotere sedimentconcentraties (als gevolg van golfwerking in mondingsgebied) wordt het sediment netto richting estuarium getransporteerd. Onderzoek in het estuarium zelf door de projectgroep OOSTWEST suggereert dat de getij-asymmetrie in de Westerschelde de laatste tijd is afgenomen door de kunstmatige verdieping van de Westerschelde, waardoor de sedimentimport gereduceerd is.

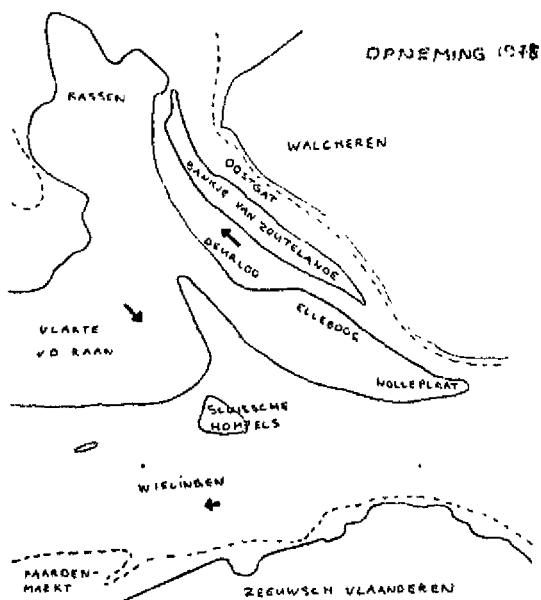
5.2.2 Sedimentuitwisseling binnen Westerschelde monding

Indicaties met betrekking tot het netto sedimenttransport patroon in een buitendelta kunnen verkregen worden op grond van het debietoverschot of de reststroom in de afzonderlijke geulen en platen. Mits het doorstroomoppervlak niet significant varieert tussen eb en vloed, is het debietoverschot evenredig met de reststroom. Het debietoverschot en de reststroom houden echter geen rekening met het verloop van de snelheid en de concentratie gedurende een getijcyclus. Aangezien het transport toeneemt met de snelheid volgens een macht groter dan drie kan de aldus voorspelde netto transportrichting afwijken van de werkelijke transportrichting. Het transport kan het nauwkeurigst bepaald worden uit gelijktijdige registraties van de concentratie en de snelheid op verschillende hoogten boven de bodem.

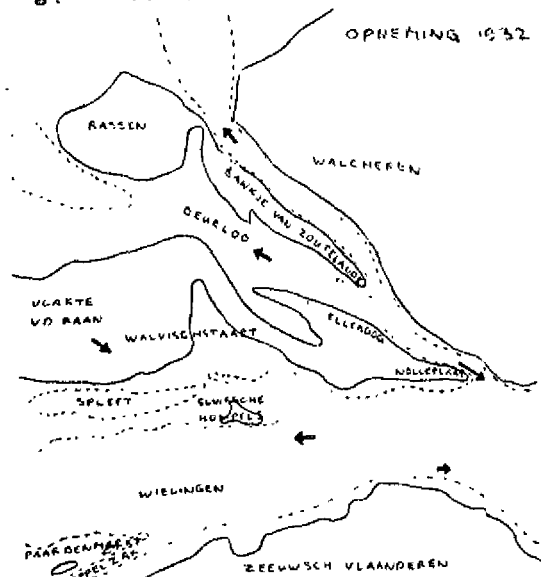
De Loeff en Verhagen (1986) hebben de reststroom op verschillende plaatsen in het mondingsgebied bepaald door de baan van een waterdeelte gedurende een getijcyclus te volgen (figuur 5.1). In de Wielingen is een kleine reststroom in westelijke richting aanwezig. In de Deurloo beweegt het water eveneens in ebrichting, terwijl boven de Vlakte van de Raan het water netto in vloedrichting verplaatst wordt.

Ferguson (1943) heeft sedimenttransporten bepaald op één hoogte boven de bodem, door de uursgemiddelde concentratie en stroomsnelheid met elkaar te vermenigvuldigen en de producten van één hele getijcyclus bij elkaar op te tellen. Hieruit blijkt dat de netto transporten in de Westerschelde klein zijn in vergelijking met buitendelta's langs de Nederlandse Waddenkust. Op de Vlakte van de Raan, in de Sardijngeul en in het zuidoostelijk deel van de Wielingen wordt het sediment netto richting het estuarium verplaatst. In het noordelijk deel van de Wielingen, het Oostgat en de Deurloo vindt een resulterend transport naar zee plaats (figuur 5.2).

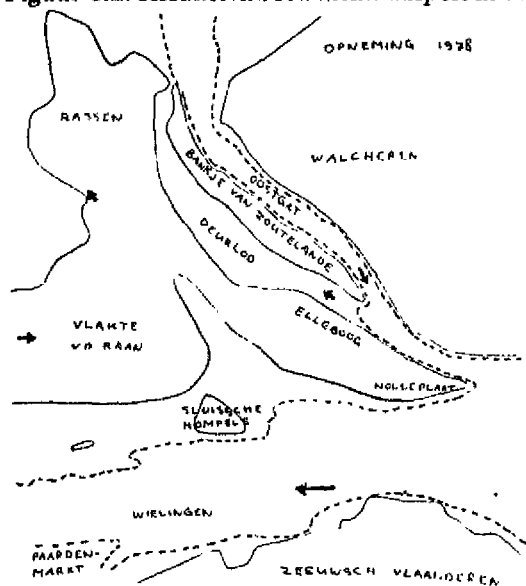
Een globale analyse van recente debietmetingen in de Westerschelde monding, waarbij zowel de concentratie als de snelheid op verschillende hoogten boven de bodem gedurende één getij zijn gemeten, geeft het volgende beeld van de sediment circulatie (figuur 5.3): De Wielingen, de Deurloo en de Geul van de Walvischstaart brengen het sediment naar zee. Door het Oostgat en de Sardijngeul en op het centrale bankengebied wordt het zand richting estuarium getransporteerd.



Figuur 5.1: Reststroom in de buitendelta van de Westerschelde volgens De Looff en Verhagen (1986).



Figuur 5.2: Resultierend sedimenttransport in de buitendelta van de Westerschelde volgens Ferguson (1943).



Figuur 5.3: Resultierend seimenttransport in de buitendelta van de Westerschelde volgens een globale analyse van recente debietmetingen.

5.2.3 Hypothesen sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen binnen de Westerschelde monding

Combinatie van de in paragraaf 5.2.2 genoemde onderzoeken leidt tot de volgende hypothesen met betrekking tot de sedimentuitwisseling binnen de buitendelta (figuur 5.4):

Vlakte van de Raan:

- Op de Vlakte van de Raan wordt het sediment onder gemiddelde golfcondities netto naar land getransporteerd als gevolg van de reststroom in zuidoostelijke richting en door asymmetrische golven. Tijdens storm, wanneer de golven boven de platen breken, wordt het sedimenttransport door de reststroom (getij) hetzij gedeeltelijk teniet gedaan door een zeewaartse retourstroom, of versterkt door het landwaartse massatransport. Op uitgestrekte, lage plaatgebieden, zoals de Vlakte van de Raan, wordt het massatransport door brekende golven waarschijnlijk verticaal gecompenseerd. Het netto transport is dan afhankelijk van het relatieve belang van de verschillende processen. Op kleinere platen daarentegen, zoals het Bankje van Zoutelande, vindt een netto landwaarts transport plaats, aangezien het massatransport door brekende golven via geconcentreerde terugstroming in de aangrenzende geulen gecompenseerd wordt.

Bankje van Zoutelande - Oostgat - Deurloo:

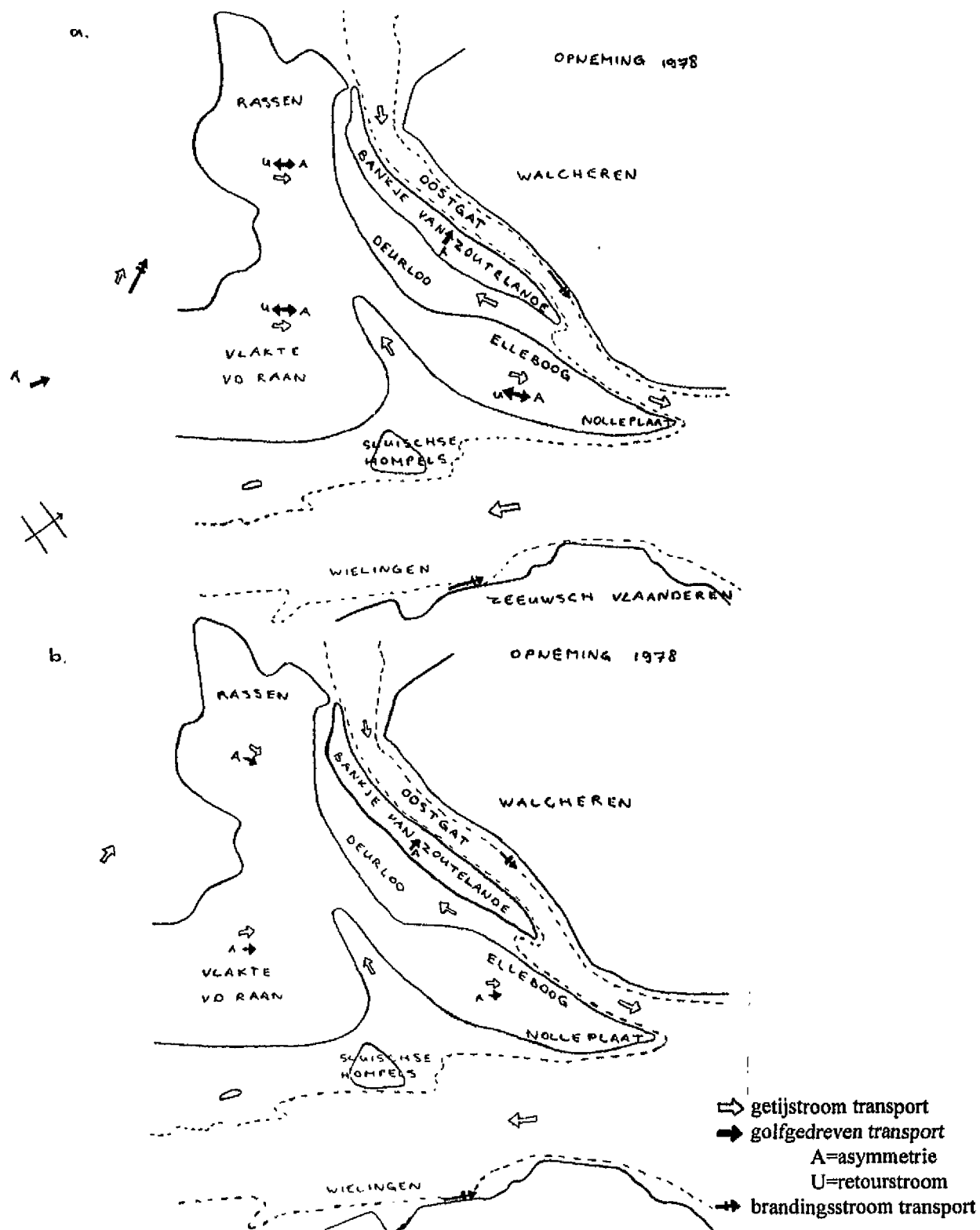
- Over het Bankje van Zoutelande wordt zowel gedurende gemiddelde golfcondities als tijdens storm sediment richting land verplaatst door respectievelijk asymmetrische en brekende golven. Deze 'zanddruk' zorgt voor een landwaartse uitbreiding van het Bankje van Zoutelande, met name tijdens ruw weer, en houdt het Oostgat tegen de kust. Het meeste zand dat over het Bankje van Zoutelande richting het Oostgat wordt getransporteerd, wordt door de getijstroom in het Oostgat afgevoerd. De landwaartse migratie van het Bankje van Zoutelande is derhalve slechts gering. In samenhang hiermee dringt het Oostgat tevens slechts langzaam op richting kust.
- In de Deurloo-Geul van de Rassen wordt het sediment gedurende één getijcyclus in zeewaartse richting verplaatst, terwijl in het Oostgat een netto transport richting het estuarium plaatsvindt. Aangezien het Oostgat en de Deurloo met elkaar verbonden zijn via de Geul van de Rassen en de Galgeput treedt een netto circulatie van sediment op.

Ontwikkeling kust ZW Walcheren en Zeeuwsch Vlaanderen:

- Het zandtransport over het Bankje van Zoutelande drukt het Oostgat tegen de kust van zuidwest Walcheren. De getijstroom in het Oostgat oefenen derhalve een 'stroomdruk' uit op de Walcherse oever. Deze 'stroomdruk' veroorzaakt de erosie van de zuidwest kust van Walcheren. De grootte van de 'stroomdruk' is afhankelijk van de 'zanddruk' en de debietverdeling over het Oostgat en de Deurloo-Geul van de Rassen. De ontwikkeling van laatstgenoemde geulen is derhalve van belang voor de kustontwikkeling van Walcheren. Indien het debiet in de Deurloo-Geul van de Rassen toeneemt ten koste van het Oostgat, vermindert de 'stroomdruk' op de Walcherse oever en dus de erosiesnelheid.
- Langs de Walcherse en Vlaamse kust wordt het sediment richting estuarium getransporteerd door de brandingsstroom.

Wielingen:

- In de Wielingen en de Geul van de Walvischstaart vindt netto zandtransport naar zee plaats, conform de getijdominantie van deze geulen.



Figuur 5.4: Hypothese sedimentuitwisseling binnen de Westerschelde monding tijdens zuidwester-storm (a) en rustig weer (b).

6. Voorstel meetplan KUST*2000 Westerschelde monding

6.1 Probleemstelling en doelstelling

Het aantal studies over en metingen in de Westerschelde monding is beperkt. Het bestaande onderzoek heeft zich vooral gericht op een globale analyse van de morfologische veranderingen aan de hand van verrichte peilingen en grootschalige veranderingen in het stromingsbeeld. Op dit moment is nog weinig bekend over het sedimenttransport binnen het mondingsgebied en de uitwisseling van sediment met de omliggende gebieden, zoals de Oosterschelde monding, de Westerschelde en de Noordzee. Derhalve wordt binnen KUST*2000 een onderzoeksprogramma opgesteld met als doel het netto sedimenttransport patroon in de Westerschelde monding te achterhalen en na te gaan welke processen daarvoor verantwoordelijk zijn. De hypothesen die in het vorige hoofdstuk gepresenteerd zijn, zullen tijdens het onderzoek getoetst worden.

6.2 Onderzoeksvragen

De hoofdvragen van het onderzoek zijn:

- Wat is het netto sedimenttransport patroon in de Westerschelde monding?
- Welke processen domineren het sedimenttransport in de geulen, op de plaatgebieden, langs het deltafront en langs de kust?

Kennis omtrent de sedimentuitwisseling en de verantwoordelijke processen is relevant voor het opstellen van een gedragsmodel waarmee de meest effectieve beheersalternatieven voor de Westerschelde monding geselecteerd kunnen worden. Gezien de complexe sedimentuitwisseling binnen een buitendelta (§2.3) zijn enige deelgebieden voor onderzoek geselecteerd, zowel op de platen als in de geulen. De deelgebieden met hun eigen specifieke probleemstelling en onderzoeksvragen worden hieronder behandeld. De kopjes referen naar de hypothesen uit hoofdstuk 5.

Rassen / Uitwisseling met Oosterschelde monding:

- Het is tot nu toe onbekend of er sediment uitgewisseld wordt tussen de mondingsgebieden van de Ooster- en Westerschelde monding. Aangezien de Rassen in het meest noordelijk deel van de Westerschelde monding liggen geeft het netto transport over de Rassen een indicatie van de sedimentuitwisseling met de buitendelta van de Oosterschelde. Hoe groot is het resulterende transport over de Rassen en wat is de netto richting op de schaal van jaren (netto effect van de afwisseling storm en rustig weer)?

Deltafront / Uitwisseling met de Noordzee:

- Het is tot nu toe onbekend of er sediment wordt uitgewisseld tussen de ondiepe Noordzee en de Westerschelde monding. Aangezien de Droogte van Schooneveld deel uitmaakt van het deltafront, geven de transporten daar een indicatie van de sedimentuitwisseling met de Noordzee. Bovendien fungeert de Droogte van Schooneveld thans als één van de belangrijkste stortgebieden. Voor het opstellen van richtlijnen voor het uitgeven van stortvergunningen

ningen is het derhalve van belang om de sedimentuitwisseling in de omgeving van de stortlocatie en de eventuele gewenste of ongewenste neveneffecten van de verrichte stortingen te achterhalen.

Vindt er netto sedimenttransport plaats tussen de Noordzee en de buitendelta en zo ja in welke richting? Beïnvloeden de speciëstoringen op de Droogte van Schooneveld de morfologische ontwikkeling van de omliggende gebieden, zoals de Wielingen, het Scheur en de Vlakte van de Raan? Verandert de uitbouw van het deltafront ten gevolge van de speciëstoringen de getijvoortplanting langs het deltafront?

Vlakte van de Raan:

- De Vlakte van de Raan vormt een uitgestrekt platengebied tussen de Wielingen en het systeem Deurloo - Bankje van Zoutelande - Oostgat. Gezien de geringe hoogte en het betrekkelijk vlakke bodemverloop van de platen in de Westerschelde monding, is het interessant om na te gaan wat het belang van golven voor het sedimenttransport op deze platen is. Kennis omtrent de morfodynamiek van de platen is van belang, omdat de platen het achterliggende gebied tegen golfaanval beschermen door gedeeltelijke dissipatie van de binnenkomende golfenergie.

Zijn er banken aanwezig op de platen? Beïnvloeden de speciëstoringen het bodemverloop van de platen? Hoe groot is het netto getij transport gedurende één getijcyclus en wat is de richting? Op welke manieren dragen de golven bij aan een netto sedimenttransport (golf-asymmetrie, golfbreking, retourstroom, brandingsstroom) en onder welke diep-water golfcondities gaan deze processen een rol spelen? Hoe groot is het netto golfgerelateerde transport op de schaal van jaren (netto effect van afwisseling storm en rustig weer)?

Bankje van Zoutelande - Oostgat - Deurloo: en Ontwikkeling kust ZW Walcheren:

- De morfologische ontwikkelingen van de Deurloo, het Bankje van Zoutelande en het Oostgat zijn grotendeels aan elkaar gekoppeld. Veranderingen in de Deurloo of het Bankje van Zoutelande gaan gepaard met veranderingen in het Oostgat. Het Oostgat bepaalt op zijn beurt de kustontwikkeling van zuidwest Walcheren. Het is derhalve van belang de samenhang tussen genoemde geulen en bank te achterhalen. Een eerste aanzet hiertoe is reeds uitgevoerd door Israel (1993). Kennis omtrent de oorzaak van de opgetreden morfologische veranderingen kan tevens gebruikt worden om methoden op te stellen, waarmee de kustontwikkeling gestuurd kan worden.

Zijn er veranderingen opgetreden in de debietverdeling over het Oostgat en de Deurloo en zo ja gaat dit gepaard met veranderingen in kusterosie? Hoe is het verhang over het Oostgat (tussen Westkapelle en Zoutelande) veranderd in de loop der tijd en kunnen de gevonden veranderingen de variaties in de debietverdeling of kusterosie verklaren? Hoe heeft het Bankje van Zoutelande zich ontwikkeld?

Wielingen:

- De verdieping van de Wielingen lijkt de morfologische ontwikkeling in de rest van de buitendelta te sturen. Onderzoek hiernaar is van belang om de invloed van de voorgenomen verdiepingsbaggerwerken in de Wielingen op de buitendelta te achterhalen.

Wat is het effect van de natuurlijke of antropogene verdieping op de getijvoortplanting in de Wielingen? Wat zijn de consequenties hiervan voor de faseverschillen tussen de rand van de buitendelta en de hals van het estuarium? Wat zijn de gevolgen van de verdieping

van de Wielingen voor het stromingsbeeld in de rest van de buitendelta? Kunnen de (gemodelleerde) veranderingen in stromingsbeeld de grootschalige morfologische ontwikkeling van de buitendelta verklaren?

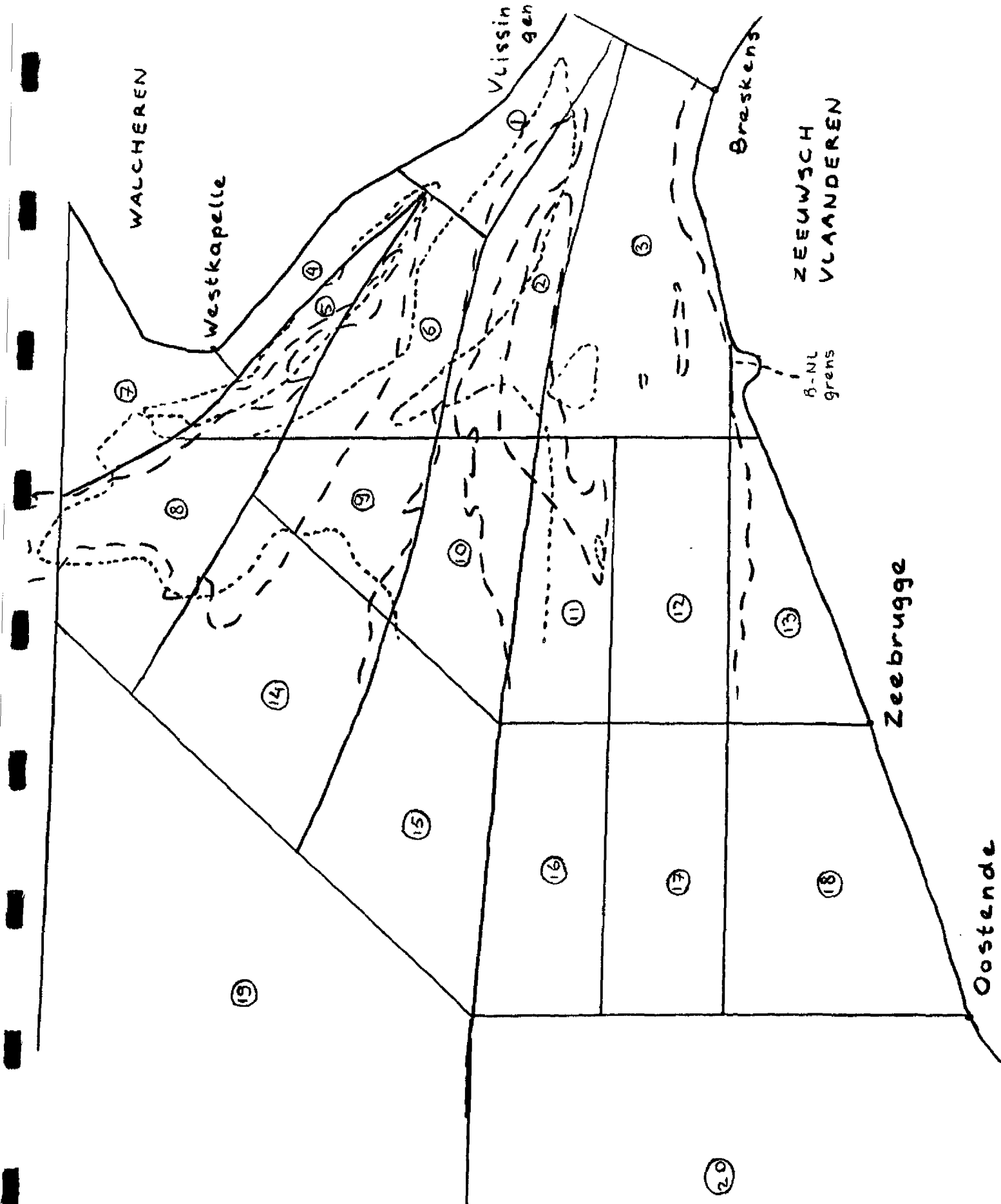
6.3 Methoden

6.3.1 Algemeen

Om bovenstaande vragen te beantwoorden, moeten de bestaande gegevens nader geanalyseerd worden en nieuwe metingen uitgevoerd worden. Aangezien een buitendelta een ruimtelijk complex milieu is waar de processen zowel kustdwars als kustlangs sterk variëren, moeten de metingen bestaan uit gebiedsdekkende technieken gecombineerd met gerichte procesmetingen. Bij gebiedsdekkende technieken kan gedacht worden aan 2D of 3D stromings- en golfmodellen en Remote Sensing technieken. Remote Sensing kan gebruikt worden om het stromingsbeeld (HF radar) en de morfologie (SAR) te achterhalen. De modellen kunnen in combinatie met bestaande transport formuleringen de sedimentuitwisseling in het mondingsgebied bepalen en vervolgens op basis van gradiënten in het transport morfologische ontwikkelingen voorspellen of verklaren. Het is echter nog onbekend hoe de invloed van golven op het sedimenttransport geïmplementeerd moet worden. Een indicatie van de sedimentuitwisseling zou wellicht verkregen kunnen worden uit een analyse van de korrelgrootte verdeling op verschillende plaatsen in het mondingsgebied volgens de methode van McLaren.

6.3.2 Zandbalans

Aan de hand van bestaande morfologische opnamen kunnen de morfologische veranderingen in de Westerschelde monding geanalyseerd worden (zie hoofdstuk 4). De morfologische veranderingen kunnen gekwantificeerd worden door een zandbalans op te stellen. Een voorstel voor een vakindeling hiervoor is gegeven in figuur 6.1. Aangezien de geulen de dynamische elementen zijn, zijn de vakken zodanig gekozen dat de geulen voortdurend binnen de vakken blijven. Tussen deze geulvakken zijn plaatvakken aanwezig, waarin de relatief stabiele kernen van de grote plaatgebieden liggen. Vervolgens zijn de hoofdvakken onderverdeeld op grond van de afstand tot de hals van het estuarium. De zandvolume-veranderingen geven derhalve alleen het verdiepen/verbreden of verzanden/versmallen van de morfologische eenheden en niet de migratie van de geulen en platen. De vaknummers en de bijbehorende morfologische eenheden staan vermeld in tabel 6.1. De vakken 19 en 20 liggen buiten het mondingsgebied en beslaan respectievelijk het Buitenbankengebied en de Vlaamse Banken. De vakken zijn tamelijk groot, zodat de stochastische fouten uitgemiddeld worden bij inhoudsberekeningen. De onzekerheid bedraagt dan echter toch nog minimaal 1 tot 2 decimeter ten gevolge van systematische fouten (bijvoorbeeld fouten en onzekerheden in reductievlak). Om na te gaan of de berekende veranderingen significant zijn, dienen de volumeverandering omgerekend te worden naar een gemiddelde diepteverandering voor het vak. Verder kan gekeken worden naar de trend van de zandvolume-veranderingen per vak; de morfologische veranderingen in een ebgetijde delta verlopen namelijk over het algemeen geleidelijk.



Figuur 6.1: Voorstel vakindeling zandbalans Westerschelde monding (doorgetrokken lijn). De ligging van de dieptelijn van 50 dm beneden g.l.w. van de opnemingen van 1823 (gestreepte lijn) en 1978 (gestippelde lijn) zijn tevens in de figuur opgenomen.

Tabel 6.1: Voorstel vakindeling zandbalans Westerscheldemonding.

Vak nr.	Morfologische eenheid
1	Sardijngeul, Galgeput
2	Elleboog, Nolleplaat, Walvischstaart
3	Wielingen Oost
4	Oostgat Zuid
5	Bankje van Zoutelande, Geul van de Rassen
6	Deurloo Oost
7	Oostgat Noord
8	Rassen
9	Deurloo midden
10	Raan
11	Spleet
12	Wielingen midden
13	Paardenmarkt Oost
14	Deurloo West
15	Schooneveld
16	Scheur
17	Wielingen West
18	Paardenmarkt Oost
19	Buitenbankengebied
20	Vlaamse Banken

In het verleden zijn zandbalansen voor de Westerschelde monding berekend door Kleinjan (1933), Van Veen (1943, 1949) en Haring (1955) op basis van oude hydrografische opnamen en door Van den Berg e.a. (1991) op basis van vaklodingen. De aangrenzende gebieden, zoals de Buitenbanken en de Vlaamse Banken zijn door respectievelijk Haring (1948) en Van Cauwenberghe (1971) beschreven. In genoemde rapporten wordt een overzicht gegeven van de bruikbare meetgegevens voor de betreffende gebieden. Aangezien het Buitenbankengebied ver zeewaarts ligt, is de nauwkeurigheid gering, waardoor de bruikbare meetgegevens beperkt zijn. Bovendien valt het Buitenbanken gebied slechts gedeeltelijk binnen de vaklodingen van Rijkswaterstaat. Voor de Vlaamse Banken zijn met name Belgische gegevens nodig naast Nederlandse en Franse.

6.3.3 Stromings- en golfmodellen

Voordat de modellen gebruikt gaan worden om de opgetreden morfologische veranderingen te verklaren, moeten de modellen gevalideerd worden aan de hand van metingen. Aangeraden wordt derhalve om met OSM's op verschillende plaatsen verspreid over het mondingsgebied of met Remote Sensing technieken het stromingsbeeld gedurende minimaal één volledige doottij-springtij-cyclus te meten. De golfmodellen kunnen gevalideerd worden aan hand van de golfboeien die in het gebied aanwezig zijn en de procesmetingen die in het gebied verricht gaan worden.

Naast het berekenen van de resulterende sedimenttransporten en het verklaren van de opgetreden morfologische veranderingen kunnen de modellen tevens gebruikt worden om inzicht in het systeem te krijgen. Stromingsmodellen geven het stromingsbeeld in de monding en de grootte en richting van de netto stromingen. Recente stromingsmodellen (TRISULA) geven zowel de getijstromen als de wind-, golf- en dichtheidsgeïnduceerde stromingen. De golfmodellen geven een idee waar golven van belang zijn en welke golfgerelateerde processen een rol spelen. In recente golfmodellen (HISWA) zijn alle belangrijke golfprocessen, zoals

golfvoortplanting (lineaire golftheorie), shoaling, refractie, dissipatie en golfbreking (zowel op diepte, volgens de methode van Battjes-Janssen uit 1978, als op steilheid) ingebouwd. Een aantal hypothesen, zoals het effect van de verdieping van de Wielingen op de rest van het mondingsgebied, kunnen bovendien met behulp van gerichte modelberekeningen getoetst worden. Verder kunnen met de modellen gevoeligheidsanalyses uitgevoerd worden.

De bruikbaarheid van de modellen is afhankelijk van welke processen opgenomen zijn en op welke wijze die gemodelleerd zijn. Echter van het sedimenttransport door stroming gecombineerd met golven is nog weinig bekend. Met name over het relatieve belang van de golfge-relateerde transportmechanismen (golf-asymmetrie, golfbreking, retourstroom en brandings-troom), de opwoeling van sediment door golven (grootte en faseverschillen) en de vorm van het snelheidsprofiel bij stroming met golfwerking is nog weinig bekend. Derhalve moeten procesmetingen uitgevoerd worden om het netto sedimenttransport door golven en de interac-tie tussen golven en stroming nader te onderzoeken.

6.3.4 Analyse bestaande gegevens

Deltafront / Uitwisseling met de Noordzee:

- De Looff (1981) heeft reeds gekeken naar de invloed van speciéstoringen op de morfologi-sche ontwikkelingen van de aangrenzende gebieden. Hij trof nog geen ongunstige nevenef-fecten aan. Het wordt aangeraden een dergelijke analyse met recente gegevens voort te zetten. Met modelberekeningen kan nagegaan worden in hoeverre de getijbeweging be-invloed wordt door de speciéstoringen op de Droogte van Schooneveld.

Vlakte van de Raan:

- Met behulp van de bestaande lodingsgegevens kan onderzocht worden of er banken aanwe-zig zijn op de Vlakte van de Raan en of daar in de loop der tijd veranderingen in zijn opgetreden.

Bankje van Zoutelande - Oostgat - Deurloo: en Kustontwikkeling ZW Walcheren:

- Er zijn te weinig debietmetingen uitgevoerd om direct de variaties in de debietverdeling over de Deurloo en het Oostgat te achterhalen. Uit de continue waterstandsregistraties te Westkapelle en Vlissingen kan het verhang over het Oostgat bepaald worden. Afgezien van naijlingseffecten geeft dit verhang gecombineerd met de waterstand een redelijke benade-ring van het debiet. De veranderingen in het maximale verhang kunnen gekoppeld worden aan de variaties in kusterosie.

Wielingen:

- Met behulp van modelberekeningen kan het effect van de verdieping van de Wielingen op het stromingsbeeld in de Westerscheldemonding achterhaald worden. Tevens kan nagegaan worden of de gemodelleerde veranderingen in het stromingsbeeld de morfologische ont-wikkeling van de Westerschelde monding kunnen verklaren.

6.3.5 Aanvullende procesmetingen

De procesmetingen moeten vooral gericht worden op de interactie tussen golven en getijstro-mingen en het belang hiervan voor het sedimenttransport. Het Bankje van Zoutelande, de

Vlakte van de Raan, en het deltafront zijn derhalve als onderzoekslocatie aangewezen. Op grond van modelberekingen kunnen de precieze meetlocaties geselecteerd worden.

Op genoemde locaties gaan metingen verricht worden met een meetframe uitgerust met stroomsnelheidsmeters (EMSen) en zandconcentratiemeters (ABSen) op verschillende hoogten boven de bodem en een druksensor. Daarnaast moet een logger aanwezig zijn om de instantane meetgegevens (tijdseries) op te slaan. Uit de stroomsnelheden en de concentraties kunnen het stromingsbeeld en het sedimenttransport bepaald worden. Indien de onderste concentratiemeters in de bodem zitten is tevens de positie van de sensoren boven de bodem en de de hoogte van eventuele beddingvormen bekend. De druksensor geeft de waterdiepte en de golfhoogte. De metingen vinden bij voorkeur plaats in een stormgevoelige periode en een rustige periode (vaststellen op basis van langjarige reeksen klimaatgegevens), zodat een groot bereik aan condities doorgemeten wordt.

De meetgegevens leveren kennis omtrent de processen; hoe de stroming en de golfbeweging in elkaar zitten en onder welke condities bepaalde processen een rol gaan spelen. Daarnaast kunnen uit de meetgegevens de sedimenttransporten door gemiddelde stroming en golven berekend worden (sedimentfluxen berekenen door de instantane concentratie en snelheid met elkaar te vermenigvuldigen en over de tijd te middelen voor zowel de gemiddelde (trend) als oscillerende (gefilterd) component). Om het belang van de verschillende transportprocessen op langere tijdschaal te weten te komen, is kennis omtrent de frequentie en duur van stormen en rustige periodes nodig. Deze kennis kan verkregen worden uit een waarschijnlijkheidsverdeling van de golf- en wind-condities gemaakt op basis van langjarige golf- en wind-registraties. Het product van de waarschijnlijkheidsverdeling en de berekende transporten per conditie geeft het netto transport op lange tijdschaal.

Literatuur

- Agema, J.F., 1980.* Veranderingen van de Zeeuwsche kusten door mens en natuur, Rijkswaterstaat, studiedienst Vlissingen, nota WWKZ-80.V024.
- Bakker, W.T., 1968.* A mathematical theory about sand waves and its application on the Dutch Wadden isle of Vlieland. *Shore and Beach*, 36, 2, 5-14.
- Berg, J.H. van den, 1987.* Toelichting bij de isallobatenkaart Voordelta 1975-1984. Rijkswaterstaat, nota ZL 87.0020.
- Berg, J.H. van den, Schouten, D. en Westenbrugge, C.J. van, 1991.* Zandbalans Westerschelde 1965-'70-'75-'80-'85. Rijkswaterstaat, nota NWL-91.36.
- Cauwenberghe, C. van, 1966.* Hydrografische analyse van de Scheldemonding ten oosten van de meridiaan 3°05' tot Vlissingen. *Het ingenieursblad*, 35, 17, 565-576.
- Cauwenberghe, C. van, 1977.* Hydrografische analyse van de Paardenmarkt en de Appelzak sinds 1954 tot 1975. Hydrografische Dienst der Kust, rapport nr. 16.
- Ferguson, H.A., 1943.* Verslag over de waarnemingen met de 'Oceaan' in het mondingsgebied van de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren, Den Haag.
- Ferguson, H.A., 1991.* Dialoog met de Noordzee. AMAboeken, Hippolytushoeve Kruisweg 1, Hippolytushoef, Nederland.
- Fitzgerald, D.M., 1984.* Interactions between the ebb-tidal delta and landward shoreline: Price Inlet, South Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 4, 1303-1318.
- Haring, J., 1948.* Inhouds- en diepteveranderingen buitenbankengebied van de mond van de Westerschelde, 1894-1921. Rijkswaterstaat rapport nr. 7.
- Haring, J., 1955.* Zandbalansen van de zuidwestelijke wateren van Nederland over de perioden 1872-1933 en 1933-1952. Rijkswaterstaat rapport nr. 3.
- Huijs, S.W.E., 1993.* Geulmigratie op de buitendelta, het Friesche Zeegat en het Amelandse Zeegat. IMAU, Universiteit Utrecht, rapport R93-1.
- Israel, C., 1993.* De ontwikkeling van de Westerscheldemond voor de zuidwestkust van Walcheren. Afstudeerverslag bij Directie Zeeland, afdeling NWL, juni 1993.
- Jong, H. de, 1989.* Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932. Rijkswaterstaat, nota GWA0-89.1004.
- Kleinjan, I.L., 1933.* Beschouwingen en berekeningen over de ontwikkeling van de Westerschelde en haar mondingsgebied sedert 1800 op grond van beschikbare hydrografische kaarten.
- Kohstiek, L.H.M. en Mulder, J.P.M., 1988.* Een verkenning van een veranderend watersysteem: de Voordelta. Rijkswaterstaat, nota GWA0-88.002.
- Lambeek, 1991.* Zandgolven in Zeeland. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, Geopro-rapport 91.30.
- Lievense, P., 1989.* Faseverschuiving waterstandslocaties Walcheren. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, notitie AX 90.037.
- Lievense, P., 1990.* Getijontwikkeling voordelta. Rijkswaterstaat, directie Zeeland, notitie AX 90.037.
- Looff, D. en Verhagen, J.H., 1986.* Mondingsgebied van de Westerschelde: Getijstromingen, golfklimaatgegevens, bodemligging en morfologische processen. Rijkswaterstaat, rapport GWWS-86.404.
- Maranus, J.W., 1986.* Grootchalige zandgolfbeweging langs de zuidelijke deltakust. Rijkswa-

terstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg, nota DGW-86.002.

Oertel, G.F., 1972. Sediment transport of estuary entrance shoals and the formation of swash platforms. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42, 4, 857-863.

Postma, R., Mulder, J., Louters, T. en Hallie, F., 1991. Voorspelling van de morfologie en sedimentbalans van de voordelta in 2010. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, GEOPRO rapport 1991.11.

Roelse, P. en Maranus, J.W., 1985. De lange termijn ontwikkeling van de Belgische oostkust en het aangrenzende gedeelte van Zeeuwsch Vlaanderen. Rijkswaterstaat, nota WWKZ-85.V0101.

Roelse, P. en Maranus, J.W., 1988. Prognose kustontwikkeling Zeeland 1990-2090, beschrijving methoden en resultaten fase 2. Rijkswaterstaat, nota GWWS-88.409.

Sha, L.P., 1989a. Cyclic morphologic changes of the ebb-tidal delta, Texel Inlet, The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 68, 35-48.

Sha, L.P. en Berg, J.H. van den, 1993. Variation in ebb-tidal delta geometry along the coast of The Netherlands and the German Bight. *Journal of Coastal Research*, 9, 3, 730-746.

Steijn, R.C., 1991. Some considerations on tidal inlets. A literature survey on hydrodynamic characteristics of tidal inlets with special attention to 'Het Friesche Zeegat'. Literature Survey H 840.45 Delft Hydraulics.

Svašek, 1995. KUST*2000 Definitiestudie: Westerschelde mond. Ingenieursbureau Svašek B.V., nota RKZ-256.

Terwindt, J.H.J., 1973. Sand movement on the in- and offshore tidal area of the southwest part of the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 52, 2, 69-77.

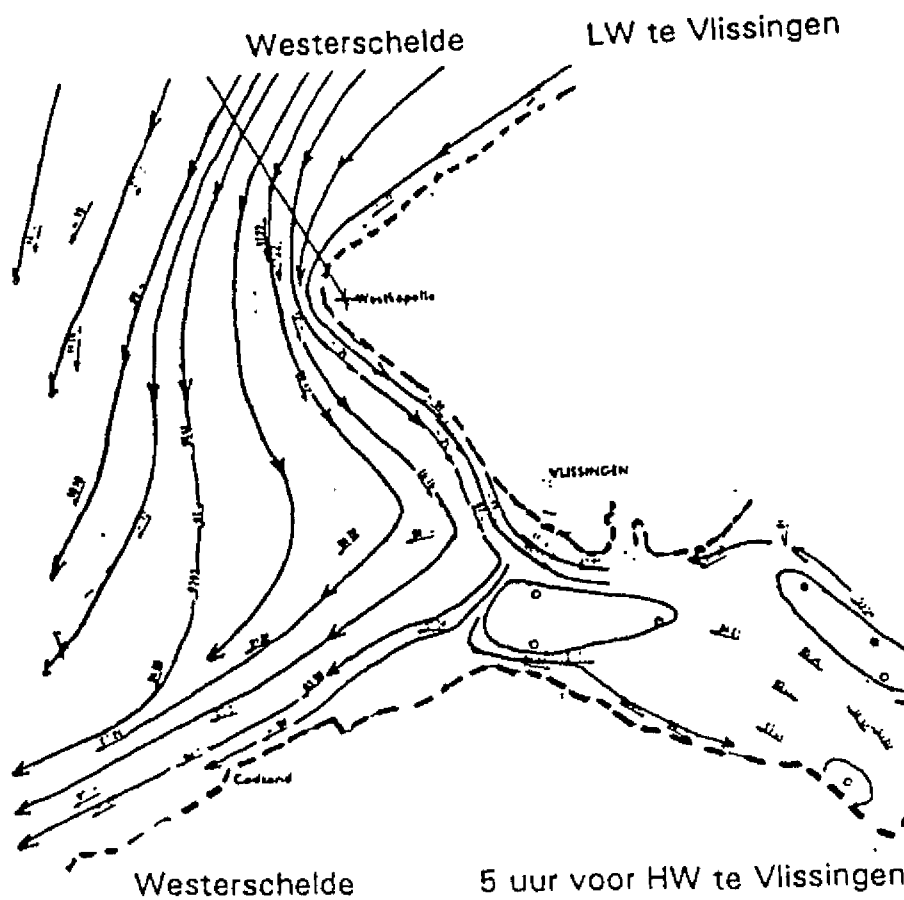
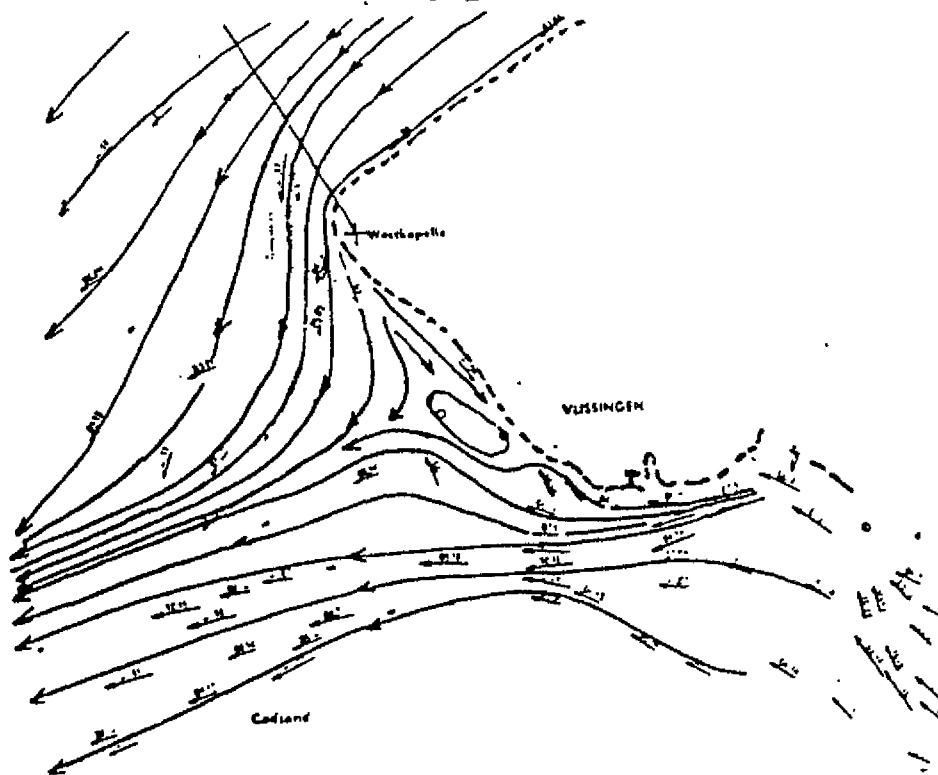
Uit den Bogaard, L.A., 1991. Relatie zandbalans Westerschelde met de morfologie van de ebgetijde delta en kust. Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht, Rapport GEOPRO 1991.021.

Veen, J. van, 1936. Onderzoekingen in de hoofden, in verband met de gesteldheid van de Nederlandse kust. Den Haag.

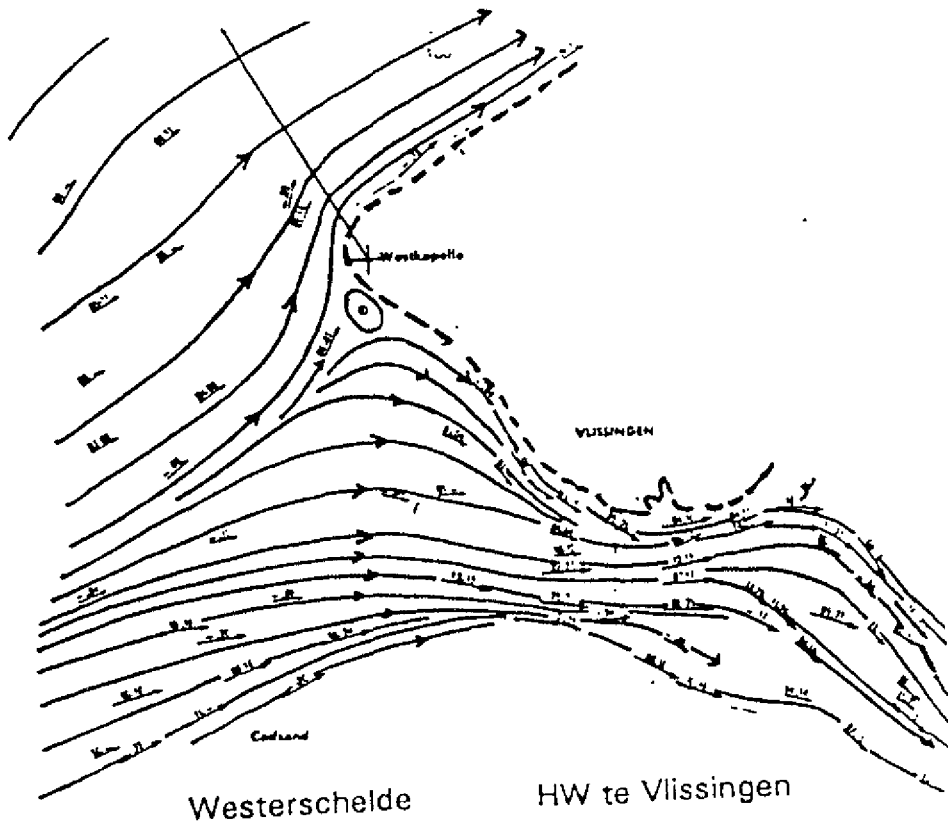
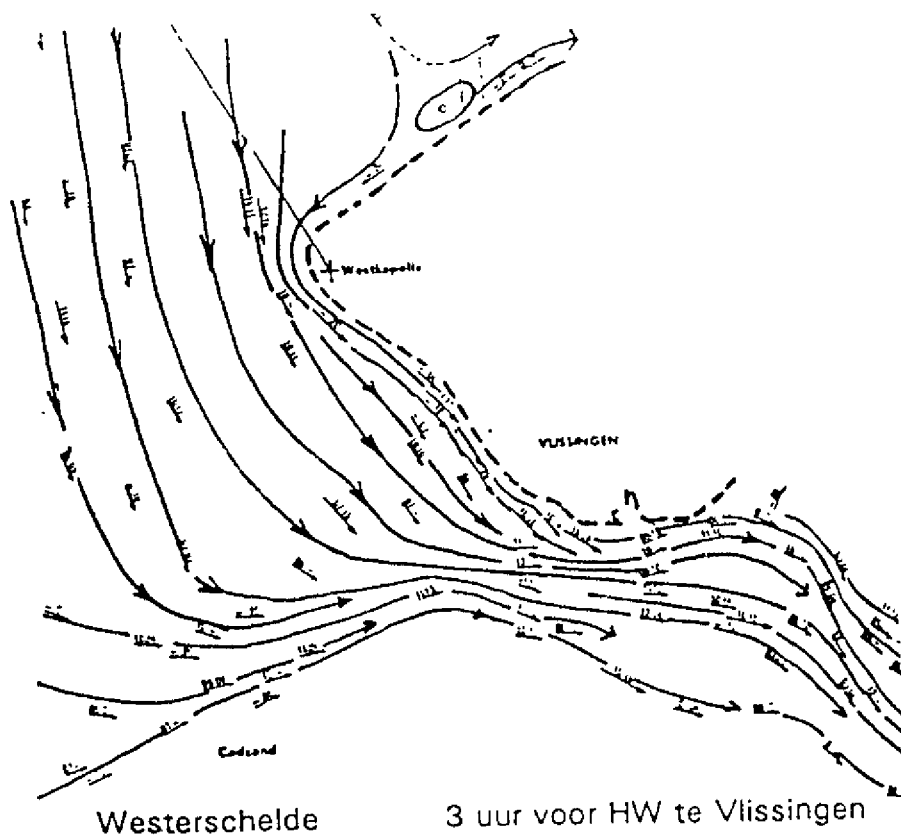
Veen, J. van, 1943. Verdieping Scheldemondd.

Wilderom, M.H. en Malde, J. van, 1968. De ontwikkeling van de noordzeekust van Walcheren tussen 1882 en 1968. Rijkswaterstaat, nota 68.3.

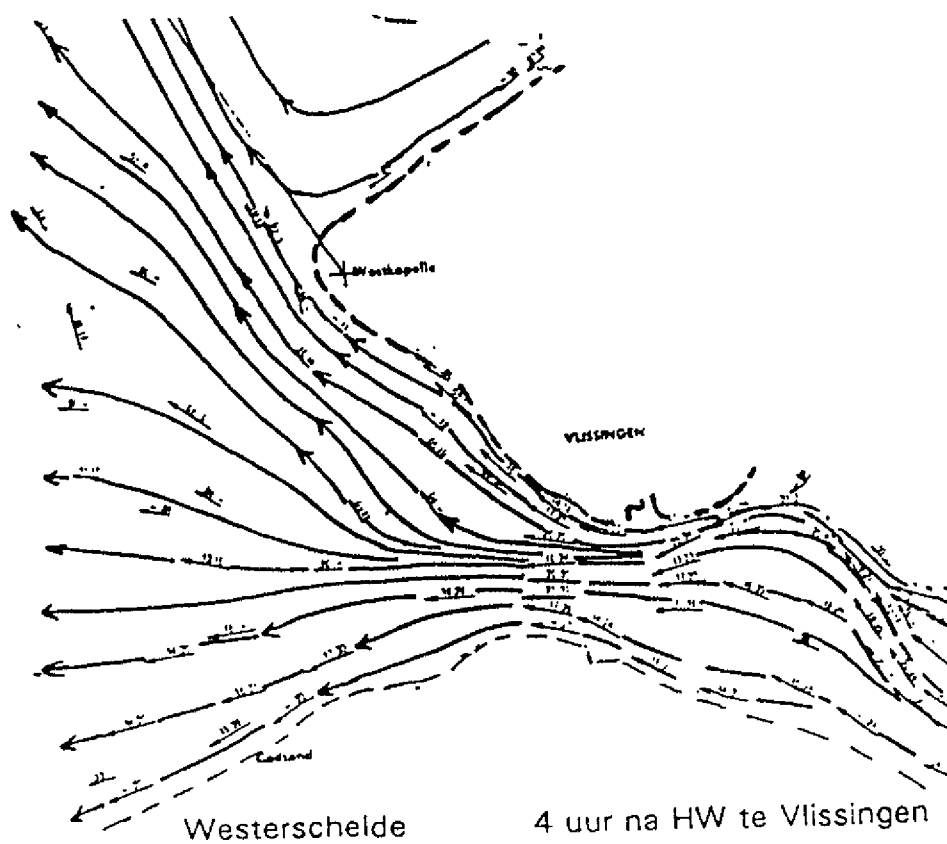
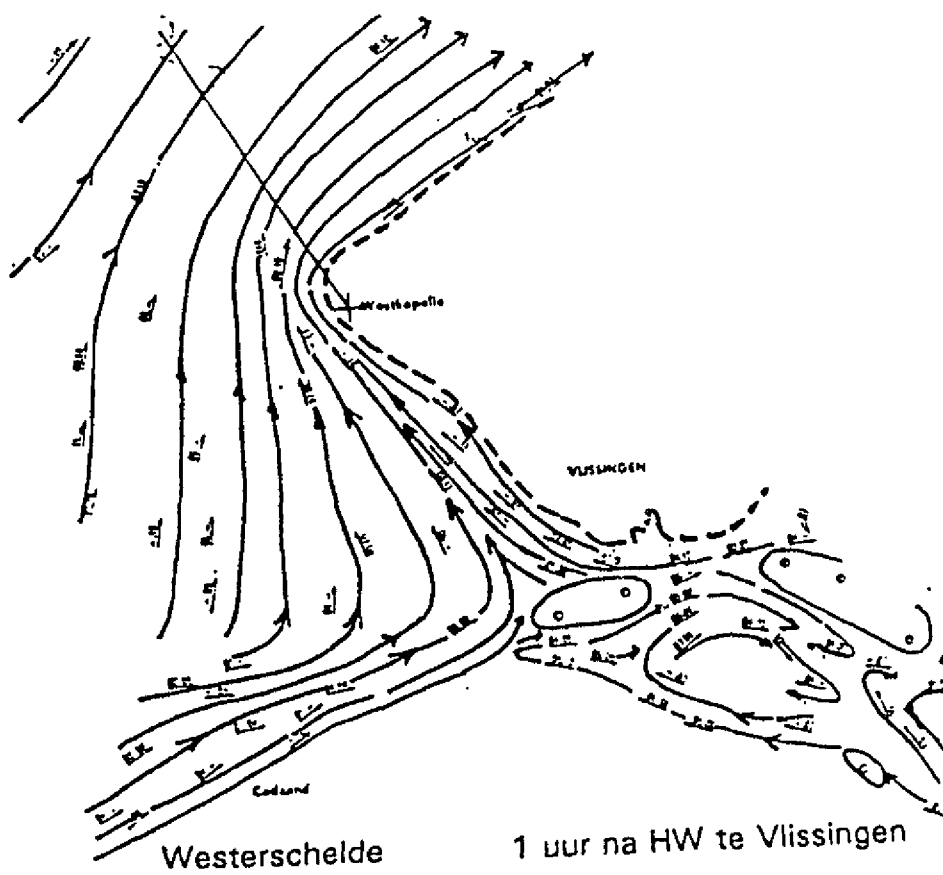
Bijlage A: Stromingspatroon Westerscheldemonding



Figuur A.1: Stromingspatroon Westerschelde monding (uit Uit den Bogaard, 1991)

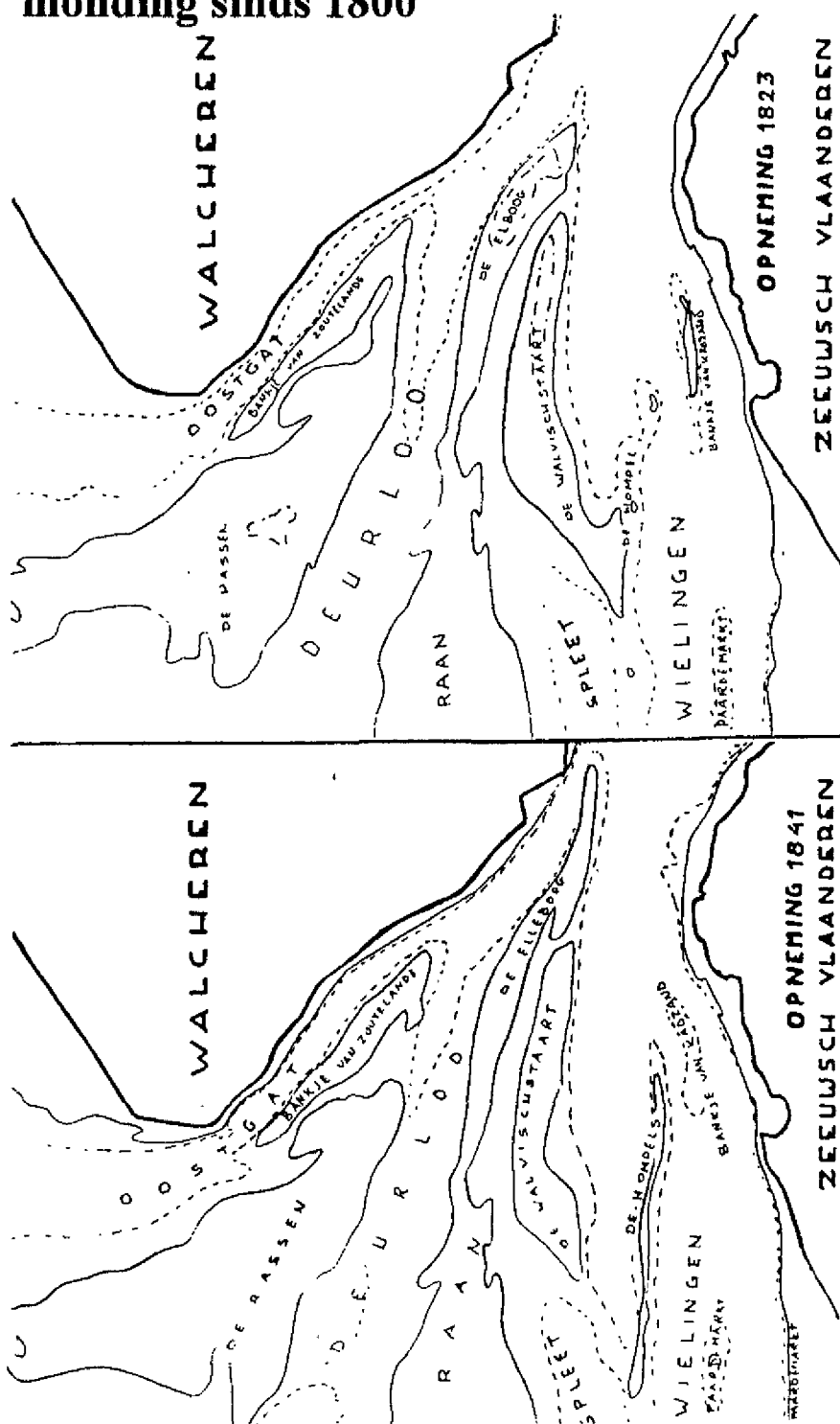


Figuur A.1 (vervolg)



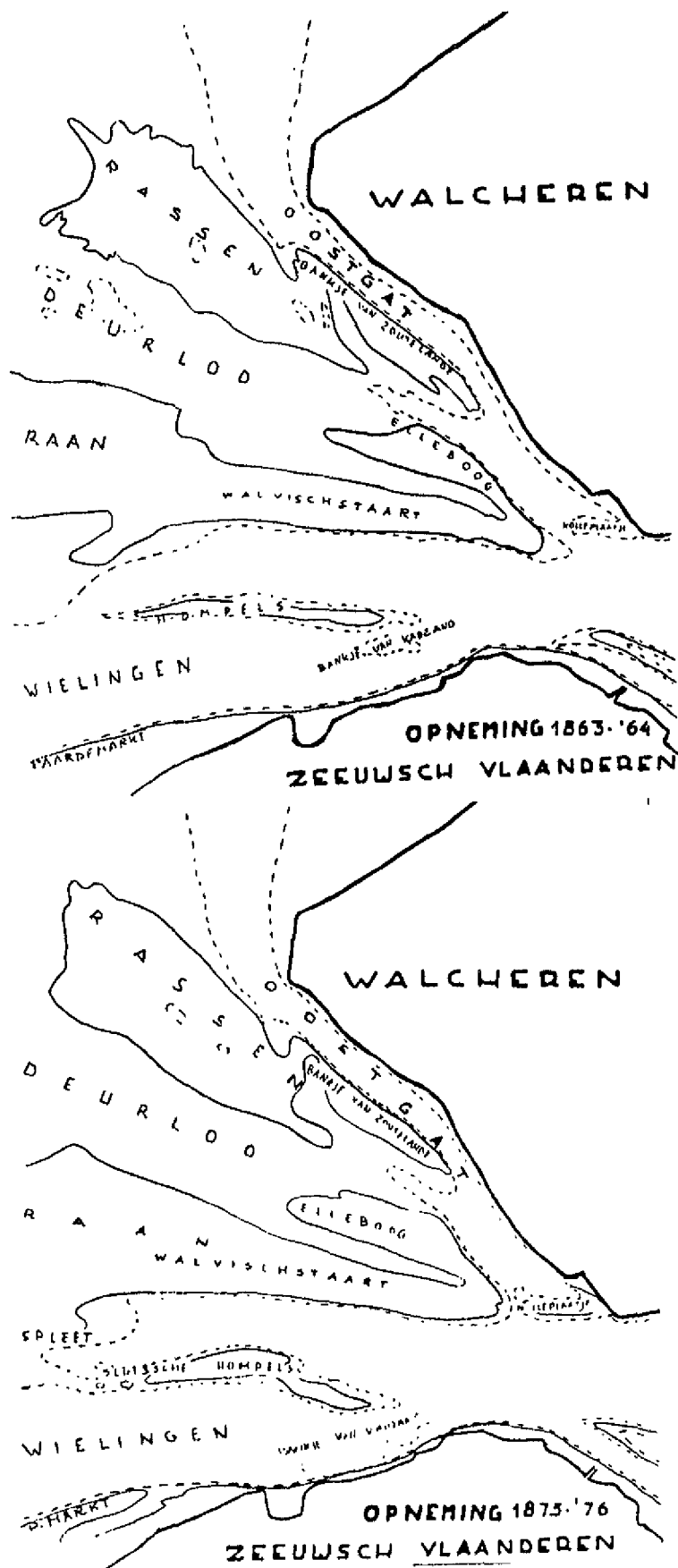
Figuur A.1 (vervolg)

Bijlage B: Morfologische ontwikkeling Westerschelde monding sinds 1800

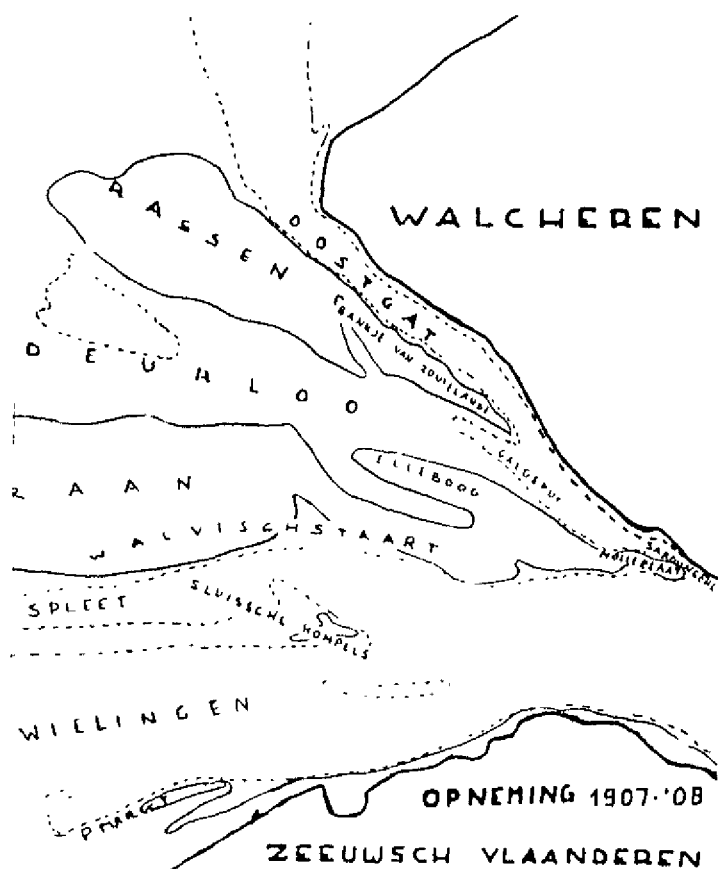
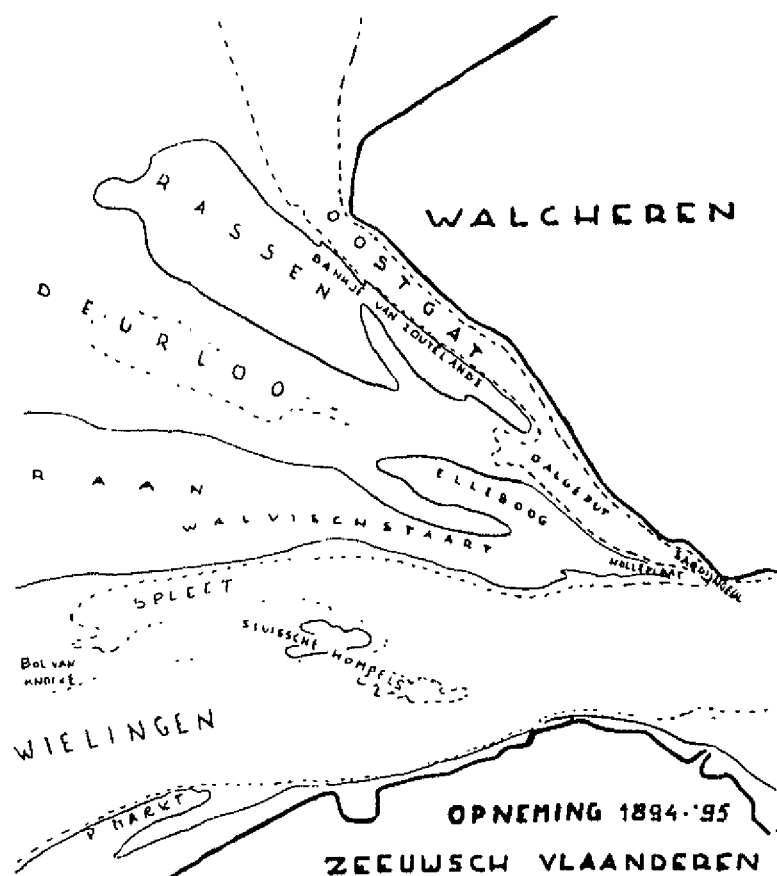


Figuur B.1: Morfologische situatie Westerschelde monding, vervaardigd door Rijkswaterstaat op grond van opnamen door de Dienst der Hydrografie (uit De Looft en Verhagen, 1986).

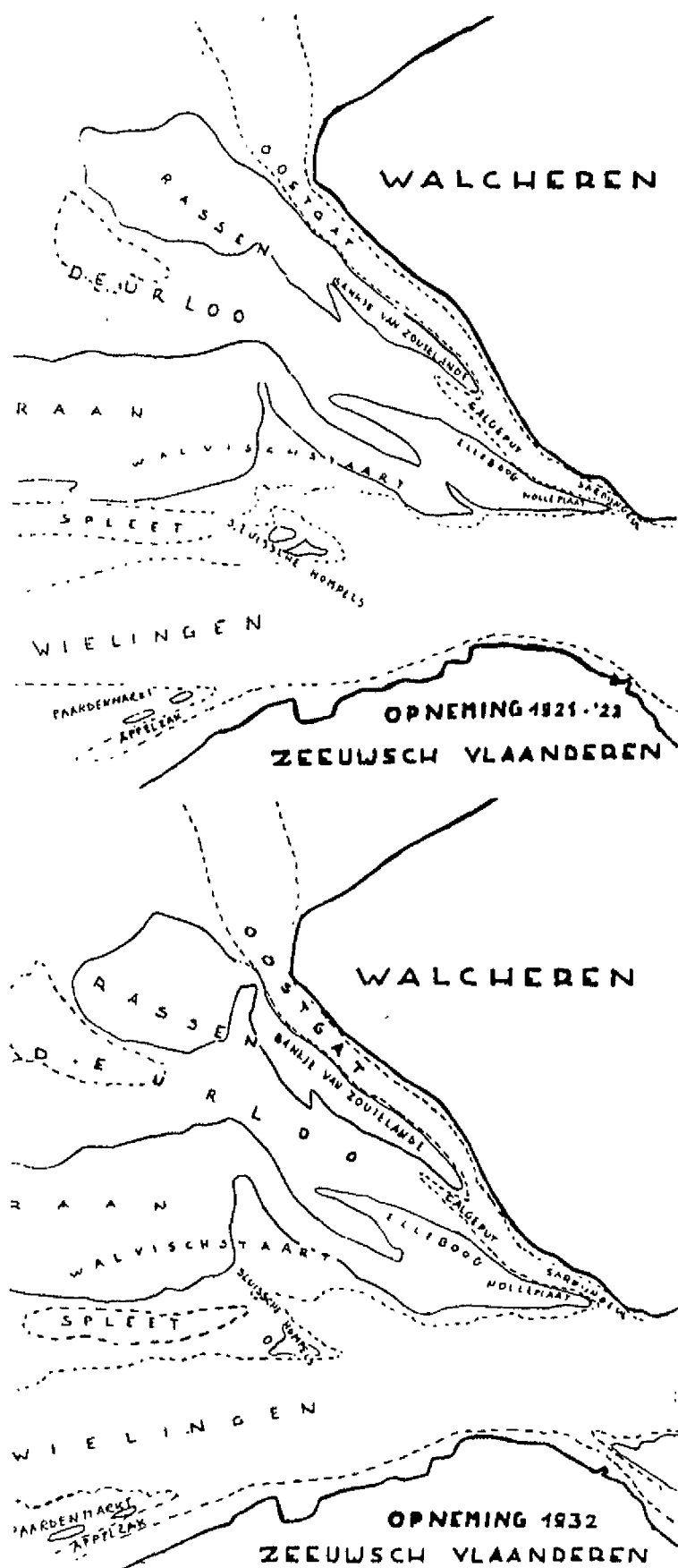
Legenda: — dijk- en kustlijn
 - - - - - dieptelijn van g.l.w.
 — dieptelijn van 5 dm - g.l.w.
 - - - - - dieptelijn van 8 dm - g.l.w.



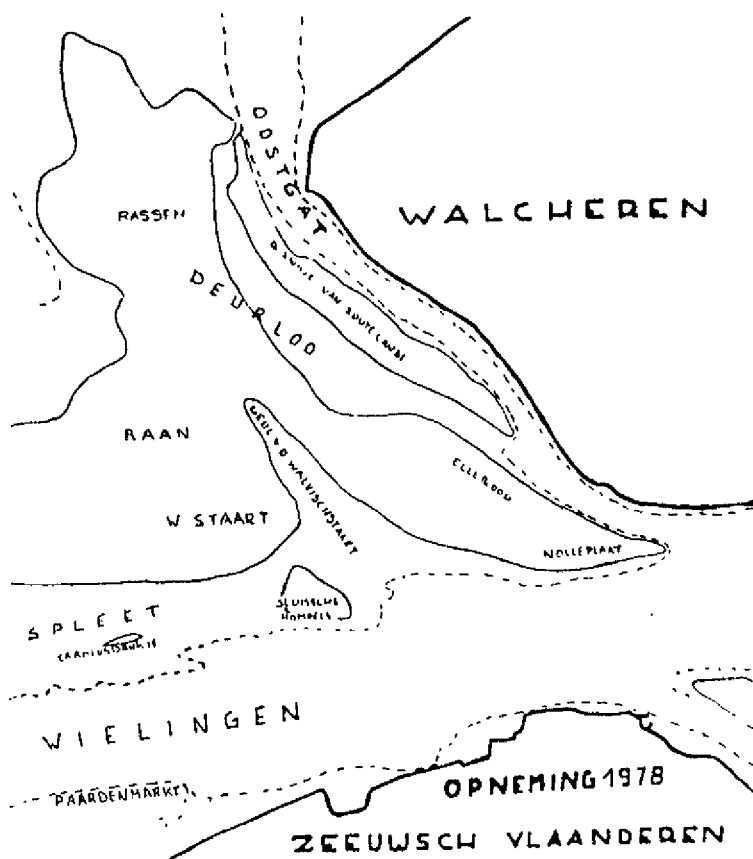
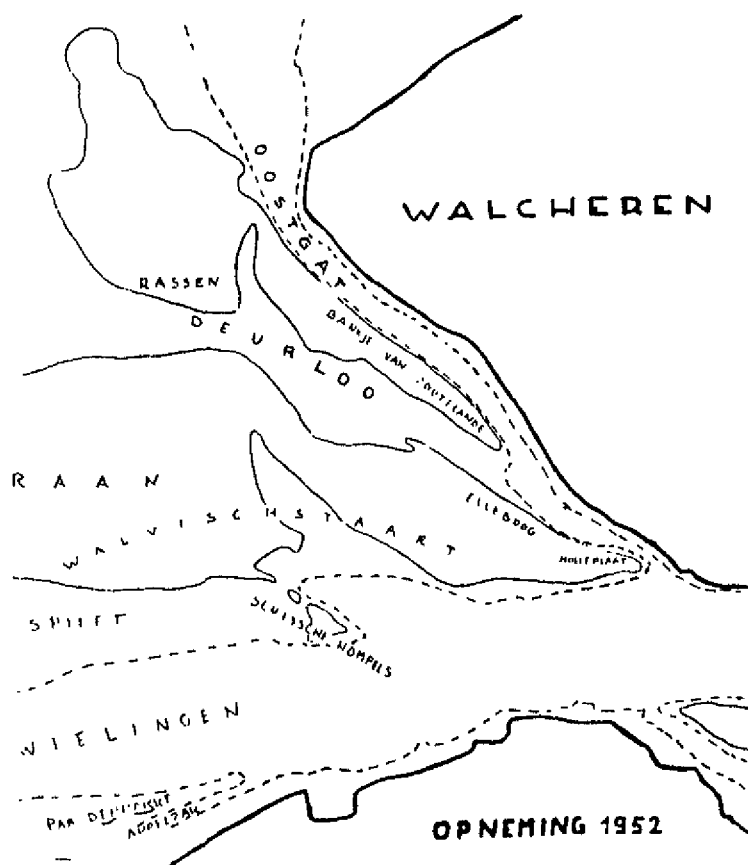
Figuur B.1(vervolg)



Figuur B.1 (vervolg)



Figuur B.1 (vervolg)



Figuur B.1 (vervolg)