

OVERGANGEN ZOET-ZOUT IN DE OOSTERSCHELDE IN HET VERLEDEN
een historische analyse op basis van beschikbare literatuur



Rapport BGW - 98.1

T. Pieters

In opdracht van:
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ

juni 1998
Vlissingen

BUREAU GETIJDEWATEREN
waterbeweging en morfologie
van estuaria en kustgebieden

OVERGANGEN ZOET-ZOUT IN DE OOSTERSCHELDE IN HET VERLEDEN
een historische analyse op basis van beschikbare literatuur

Rapport BGW - 98.1

T. Pieters

In opdracht van:
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ

juni 1998

Vlissingen

BUREAU GETIJDEWATEREN
Wagnerlaan 14, 4384 LK Vlissingen (NL)
tel: (0118) 470307, e-mail: getijden@zeelandnet.nl

OVERGANGEN ZOET-ZOUT IN DE OOSTERSCHELDE IN HET VERLEDEN
 een historische analyse op basis van beschikbare literatuur

INHOUD

	blz.
O SAMENVATTING	7
I INLEIDING	11
II MENGING EN TRANSPORT VAN ZOET EN ZOUT WATER IN ESTUARIA	13
II-1 ALGEMEEN	13
II-2 FYSISCH BESCHRIJVING VAN ZOET-ZOUTOVERGANGEN	15
II-3 FYSISCH BESCHRIJVING VAN VERSPREIDINGS- EN MENGPROCESSEN	17
II-4 KWANTITATIEVE BENADERINGEN VAN MENG- EN TRANSPORTPROCESSEN	21
III BEPALENDE FACTOREN ZOUTGEHALTEVERDELING OOSTERSCHELDE	25
III-1 BESCHRIJVING BEPALENDE FACTOREN ZOUTGEHALTEVERDELING	25
III-2 VERANDERINGEN EN INGEPEN IN DE OOSTERSCHELDE EN OMGEVING	31
III-3 VERANDERINGEN IN BEPALENDE FACTOREN ZOUTGEHALTEVERDELING	36
IV ZOET-ZOUTOVERGANGEN IN DE OOSTERSCHELDE IN HET VERLEDEN	45
IV-1 SITUATIE IN DELTAGEBIED VOOR UITVOERING DELTAWERKEN	45
IV-2 ZOUTGEHALTEVERDELINGEN VOOR AANLEG VOLKERAK DAM, 1960–1969	48
IV-3 ZOUTGEHALTEVERDELINGEN TUSSEN AANLEG VOLKERAKDAM EN VOLTOOIING OOSTERSCHELDEWERKEN, 1969 - 1985	51
IV-4 ZOUTGEHALTEVERDELINGEN IN HUIDIGE SITUATIE (NA 1987)	55
IV-5 SAMENVATTING VERANDERINGEN IN ZOUTGEHALTEVERDELING	59
V CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	61
LITERATUUR	65

OVERGANGEN ZOET-ZOUT IN DE OOSTERSCHELDE IN HET VERLEDEN een historische analyse op basis van de beschikbare literatuur

O SAMENVATTING

Als onderdeel van het project OZZO, Overgangen Zoet-Zout in de Oosterschelde, is een historische analyse uitgevoerd naar de opgetreden zoutgehalteverdelingen in de Oosterschelde in het verleden. Dit rapport bevat de resultaten van deze analyse. Het project OZZO omvat een verkenning van de mogelijkheden en de effecten van de terugkeer van estuariene gradiënten in de Oosterschelde. Het doel van de historische analyse is het beschrijven van de opgetreden zoutgehalteverdelingen en het verklaren van de karakteristieken daarvan aan de hand van de factoren die deze verdelingen bepaalden. De beschrijving moet kunnen worden gekoppeld aan de ontwikkelingen van de levensgemeenschappen en natuurwaarden in het verleden, waardoor een indruk wordt verkregen van wat kan worden verwacht als er in de toekomst op een aantal plaatsen weer sterkere zout-zoetgradiënten zouden bestaan. De verklaring moet het inzicht vergroten in de bepalende factoren voor de karakteristieken van zoutgehalteverdelingen die kunnen optreden in de Oosterschelde.

Bij de planning van de voor deze historische analyse benodigde capaciteit en doorlooptijd was uitgegaan van uitvoering in de vorm van een literatuuronderzoek. Er was geen rekening gehouden met nadere bewerking, ordening en interpretatie van basisgegevens. Gedurende de uitvoering bleek dat handhaving van dit voornemen de omvang, waarde en bruikbaarheid van de resultaten sterk zou beperken. De grote hoeveelheid uitgebrachte rapporten en publikaties, die verslag doen van het omvangrijke zout-zoetonderzoek in de afgelopen decennia, bleken relatief weinig pasklare relevante informatie te bevatten voor deze historische analyse. De reden daarvan is dat vrijwel geen van de onderzoeken tot doel had de toenmalige, actuele zoutgehalteverdeling systematisch en volledig te beschrijven en te analyseren. De allesoverheersende vraag was of de zoutgehalten in de Oosterschelde tijdens enkele kritische fasen van de uitvoering en na realisering van de werken minimaal zouden voldoen aan de zeer globaal geformuleerde streefwaarden. Toen duidelijk werd dat die met redelijk ruime marges gerealiseerd zouden gaan worden en gerealiseerd werden, was er geen behoefte meer aan brede beschrijvingen en analyses van de actuele situaties. Het blijft opmerkelijk dat de zoutgehalteverdeling in de huidige situatie, waaraan zeer veel onderzoek is besteed om haar te voorspellen, tot nu toe alleen slechts zeer summier en globaal is beschreven als onderdeel van een tweetal brede algemene evaluaties.

Om de hiervoor beschreven redenen moest, om zowel temporeel als ruimtelijk tot een enigszins volledige primaire beschrijving en analyse te komen, zeer veel literatuur worden doorgenomen en aan elkaar worden gerelateerd en waren ook bewerkingen en interpretaties van basisgegevens noodzakelijk. Vanwege de extra tijd en capaciteit die dit vergde, kon niet aan alle aspecten evenveel aandacht worden besteed en kon ook niet alle literatuur en informatie volledig worden verwerkt. Met name is weinig aandacht besteed aan opgetreden verticale gradiënten en is een koppeling met de bepalende factoren daarvoor geheel achterwege gebleven.

Ondanks alle hiervoor genoemde beperkingen komt uit deze eerste verkenning van het verloop in de tijd van de zoutgehalteverdelingen in de Oosterschelde een duidelijk en opmerkelijk beeld naar voren van de ontwikkeling “van estuarium naar zeearm”.

Naar de sterkte van het getij wordt de Oosterschelde als een z.g. “mesotidal” - systeem geclassificeerd. Bij deze systemen ligt het getijverschil tussen 2 en 4m. Geclassificeerd naar

zoutgehalteverdeling en menging zijn “mesotidal” - systemen meestal wat genoemd wordt “gedeeltelijk gemengd”. Dankzij de beperkte zoetwaterbelasting ten opzichte van het getijvolume en de voor menging grotendeels geschikte geometrie behoort de Oosterschelde eigenlijk eerder tot de klasse van “goed gemengde” systemen. Alleen het noordelijke deel van de noordelijke tak, van Keeten tot Zijpe, en het Volkerak, dat tot tien jaar geleden zeker ten aanzien van de zout-zoetaspecten een belangrijk deel vormde van het Oosterscheldesysteem, behoorden tot 1987 tot de klasse van “gedeeltelijk gemengde” systemen.

De ontwikkeling van de Oosterschelde van estuarium naar zeearm is in feite al eeuwenlang aan de gang. Vanaf de 11^e en 12^e eeuw, toen zich een substantiële verbinding vormde tussen de zeearm de Honte en de rivier de Schelde, is de zich sindsdien ontwikkelende Westerschelde een steeds groter deel van de Scheldeafvoer gaan overnemen van de Oosterschelde. De verlanding van het Kreekrak, die uiteindelijk leidde tot de afdamming van de verbinding tussen Oosterschelde en Westerschelde in 1867, werd in feite al “voorbereid” door de overstromingen van grote delen van oostelijk Zuid-Beveland in de 15^e en 16^e eeuw. Door de hiermee gepaarde gaande kombergingsveranderingen verplaatste zich een wantij van het oostelijke deel van de Westerschelde naar het Kreekrak. De uitbreiding van de komberging van de Oosterschelde naar het noordoosten en de deelname aan hoge afvoeren van de grote rivieren Rijn en Maas ontwikkelden zich in de eeuwen daarna.

Vanaf de tweede helft van de vorige eeuw veroorzaakten een aantal menselijke ingrepen een verdergaande vermindering van de invloed van de rivieren op de Oosterschelde. Ingrijpende veranderingen werden veroorzaakt door de scheiding van Oosterschelde en Westerschelde, met de afdammingen van Kreekrak in 1867 en Sloe in 1871, door de aanleg van de Volkerakdam, die gereedkwam in 1969, en door de voltooiing van de Oosterscheldekering en de compartimenteringsdammen, Oesterdam en Philipsdam, in de periode tussen 1985 en 1987.

Overigens had de mens in feite ook al de hand in de verlanding van de verbinding tussen Oosterschelde en Westerschelde. De grote overstromingen in de 16^e eeuw, die de wantijverplaatsingen veroorzaakten, waren deels bevorderd en konden lange tijd niet met de toenmalige middelen ongedaan worden gemaakt, door de sterke maaiveldverlagingen door ontwatering en grootschalige veenaftgravingen voor zoutwinning, de zogenoemde “moertering”.

Ondanks de verlanding van het Kreekrak en de verruiming van de verbindingen naar de benedenlopen van Rijn en Maas, waren tot de scheiding van Oosterschelde en Westerschelde de Scheldeafvoeren nog sterk dominant voor de zoutgehalteverdeling in het grootste deel van de Oosterschelde.

Met name in de Kom van de Oosterschelde was door de rivierwateraanvoer uit het zuiden het gehalte aanmerkelijk lager dan na de afdamming en traden aanzienlijke ruimtelijke en temporele gradiënten op.

Met de afdamming van het Kreekrak werd derhalve globaal beschouwd de “rivierinvloed” op de Oosterschelde tenminste gehalveerd. In de Kom werd sindsdien de oesterteelt mogelijk door de verhoging van het gemiddelde zoutgehalterniveau, de meer homogene verdeling en de kleinere temporele variaties. Tijdelijke dalingen van de gehalten naar waarden tussen 10 en 15 g/l Cl kwamen in de Kom nog wél voor bij hoge afvoeren van Rijn en Maas.

Bij lagere dan gemiddelde rivierafvoeren was de aanvoer naar de Oosterschelde klein en beperkte de invloed zich tot het noordelijke deel van de noordelijke tak en het nog open met de Oosterschelde verbonden Volkerak. Bij hoge afvoeren daalden de gehalten in de noordelijke tak tot waarden tussen 5 en 10 g/l Cl en namen de ruimtelijke verschillen toe tot 3

g/l Cl tussen Zipe en Stavenisse. Door de zoutgehaltedalingen bij hoge afvoeren traden op laatstgenoemde locaties temporele variaties op van respectievelijk 8 en 5 á 6 g/l Cl.

Met de gereedkoming van de Volkerakdam en -sluizen in 1969 werd ook de open verbinding met de benedenlopen van de grote rivieren in het noorden, de Rijn en de Maas, beëindigd. De omvang van de jaargemiddelde zoetwateraanvoer, die voordien volgens globale schattingen tussen 50 en 100 m³/s bedroeg, veranderde waarschijnlijk weinig, maar ze trad gelijkmatiger verdeeld in de tijd op.

Vanaf 1977 werd, door het spuidebiet van de Volkeraksluizen als sluitpost te hanteren, gestreefd naar een totale zoetwaterbelasting op het Krammer/Volkerak, en daarmee van deze zijde op de Oosterschelde, van 50 m³/s. Rond deze streefomvang konden door onvoorziene afvoerfluctuaties van de Brabantse rivieren nog relatief kortdurende variaties van 10 tot 20 m³/s voorkomen. In deze fase is zo de invloed van de voorheen bepalende variaties van de afvoeren van de grote rivieren Rijn en Maas weggenomen en vervangen door die van de kleinere, minder frequent voorkomende, fluctuaties van de afvoeren van de Brabantse rivieren.

De invloed van de klimatologische variaties en die van het kustwatergehalte zijn nu relatief groter. De laatstgenoemde invloed is ook versterkt door de doorgaande toename van de getijvolumes in de mond en naar de noordelijke tak in de decennia rond en na het midden van deze eeuw. Alleen door de verlagingen van het gehalte van het kustwater in de mond, onder bepaalde omstandigheden, hebben hoge afvoeren van de grote rivieren nog wél invloed op de zoutgehalteverdeling in de Oosterschelde.

In de Kom dalen de zoutgehalten in deze fase vrijwel nooit meer beneden 15 g/l Cl. In de noordelijke tak zijn met name de maximale temporele gradiënten sterk afgenomen. Ze hebben nog ongeveer dezelfde grootte als de ruimtelijke, namelijk 2 á 3 g/l Cl.

Met de voltooiing van de Oosterscheldekering en de beide compartimenteringsdammen Philipsdam en Oesterdam, in de periode van 1985 tot 1987, werd de laatste, nog relatief geringe “rivierinvloed” vanaf de landzijde op de Oosterschelde weggenomen. De aanvoer via de noordelijke tak, nu via de Krammersluizen, bedraagt nog ongeveer de helft van de totale zoetwaterbelasting van rond 14 m³/s en is niet meer overheersend. Hoewel ook de getijvolumes vrij sterk zijn gereduceerd, worden de variaties van het gemiddelde niveau nu over vrijwel de gehele Oosterschelde overwegend bepaald door die van het kustwater.

De ruimtelijke gradiënten zijn nog zeer gering, 1 á 1.5 g/l Cl tussen het Zipe en de monding en minder dan 0.5 g/l Cl tussen Kom en monding. De verdeling in de Kom is homogeen. De variaties van de maandgemiddelde waarden binnen een jaar bedragen in de noordelijke tak 1.5 á 2.0 en in de Kom rond 1 g/l Cl. De temporele variaties kunnen over meerdere jaren beschouwd nog oplopen tot 3 g/l Cl in het mondingsgebied tot 4 g/l Cl in het noordelijke deel van de noordelijke tak.

Het gemiddelde niveau van de zoutgehalten vertoont, vanaf tenminste het begin van de zeventiger jaren tot nu, dus door verschillende “fasen” heen, vooral in de Kom en de noordelijke tak een opmerkelijk geleidelijk verlopende substantiële variatie. Gedurende meerdere jaren treden tegen het midden van de zeventiger jaren en rond 1990/1991 relatief hoge waarden op en gedurende eveneens meerdere jaren in de eerste helft van de tachtiger ligt het gemiddelde niveau significant lager. De overgangen ertussen verlopen relatief geleidelijk.

Het bepalen van de significantie van dit verloop en van eventuele overeenkomende oorzaken ervan voor de verschillende gebieden lijkt de moeite waard, maar vereist een afzonderlijke nadere systematische analyse van de zoutgehalteverdelingen in de huidige situatie.

I INLEIDING

Dit rapport bevat een rapportage van een historische analyse van de opgetreden zoet-zoutovergangen in de Oosterschelde in de afgelopen halve eeuw. Deze analyse is uitgevoerd als onderdeel van het project OZZO, Overgangen Zoet-Zout in de Oosterschelde. In dit project wordt een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden en de effecten van de terugkeer van estuariene gradiënten in de Oosterschelde.

De verkenning is gericht op de terugkeer van met name die estuariene gradiënten die worden bepaald door het ruimtelijke verloop van de zoutgehalten. Met de voltooiing van de compartimenteringswerken in de Oosterschelde in 1986/1987, in het kader van de Deltawerken, werd de zoetwateraanvoer vanuit het binnenland geminimaliseerd en nam het zoutgehalte over vrijwel de gehele Oosterschelde dezelfde waarde aan. In het verleden traden de sterkste en ecologische meest waardevolle gradiënten op waar het relatief zoete water het estuarium bereikte: in de noordelijke tak Krammer - Zijpe - Mastgat/Krabbenkreek - Keeten en in de Kom van de Oosterschelde. Beide gebieden ontvingen het van de grote rivieren en de Brabantse rivieren afkomstige zoete water hoofdzakelijk vanuit het Volkerak. De noordelijke tak rechtstreeks en de Kom via de Eendracht, die later een onderdeel vormde van de Schelde-Rijnverbinding.

Al vóór de laatste minimalisering van de zoetwateraanvoer naar de Oosterschelde veroorzaakten ingrepen en activiteiten in de omgeving, meestal in het kader van de Deltawerken, een aantal malen veranderingen in de zoetwatertoevoer en de andere randvoorwaarden voor de zoutgehalteverdeling in de Oosterschelde. In deze historische analyse worden, als bijdrage aan de verkenning van de mogelijkheden ze weer te herstellen, de verschillende in het verleden opgetreden zoet-zoutovergangen met de bijbehorende randvoorwaarden beschreven en geanalyseerd.

Het doel van deze historische analyse is tweeledig: het vergroten van het inzicht in de fysica van de zoet-zoutovergangen in de Oosterschelde en het zodanig beschrijven van de eerder opgetreden zoet-zoutovergangen, dat door koppeling met de biotische aspecten het inzicht in de ecologische samenhangen ten aanzien van deze aspecten kan worden vergroot.

In hoofdstuk II worden in algemene zin de voor de menging van zoet en zout water relevante begrippen, de optredende verschijnselen en processen en de gangbare, meest eenvoudige mathematische benaderingen beschreven. Afzonderlijk wordt aandacht besteed aan de gewenste horizontale gradiënten, maar ook aan de meestal als ongewenst ervaren mogelijk optredende verticale gradiënten, stratificatie genaamd.

Hoofdstuk III bevat een beschrijving en analyse van de voor de Oosterschelde bepalende factoren voor het optreden van substantiële zoutgehaltegradiënten, mét de opgetreden veranderingen daarin in de afgelopen halve eeuw.

In hoofdstuk IV worden de gradiënten beschreven, zoals die in de verschillende fasen in het verleden zijn opgetreden bij de in hoofdstuk III beschreven omstandigheden en randvoorwaarden.

Hoofdstuk V tenslotte bevat een aantal samenvattende conclusies, die van belang kunnen zijn voor het verdere onderzoek naar het doen terugkeren van de zoet-zoutovergangen in de Oosterschelde.

II MENGING EN TRANSPORT VAN ZOET EN ZOUT WATER IN ESTUARIA

II-1 ALGEMEEN

Omdat zout zeewater zwaarder is dan zoet rivierwater mengen ze zich niet zonder meer en onmiddellijk met elkaar, als ze elkaar ontmoeten in estuaria en zeearmen. Een zekere mate van menging in deze situaties kan plaatsvinden als wordt voldaan aan de randvoorwaarden voor het optreden van drie “mengprocessen”, elk op een ander schaalniveau: de grootschalige waterbeweging, de turbulente uitwisseling en de moleculaire diffusie. Afhankelijk van de mate en wijze van menging bij genoemde en andere randvoorwaarden, zoals de omvang van de zoetwateraanvoer, ontstaan zoet-zoutovergangen, vaak zoutgradiënten genoemd, in horizontale en/of verticale richting. Als de randvoorwaarden gedurende een voldoende lange periode weinig veranderen stelt zich in een dynamisch evenwicht een getijgemiddeld min of meer permanente zoutgehalteverdeling in over het systeem. De tijdsduur die het systeem nodig heeft zich in te stellen op significant veranderde randvoorwaarden hangt, bij een aantal gegeven systeem karakteristieken zoals de geometrie, vooral af van de intensiteit van de mengprocessen, waarvoor de energie afkomstig is van de grootschalige waterbeweging. Voor een systeem als de Oosterschelde bedraagt deze tijdsduur enkele maanden.

In paragraaf II-2 worden, aan de hand van een gangbare, op de zoutgehalteverdeling gebaseerde classificatie van estuaria, situaties met verschillende graden van menging beschreven. In paragraaf II-3 wordt nader ingegaan op de genoemde mengprocessen.

De (massa-)dichtheid van zeewater bedraagt rond 1025 kg/m³ en van zoet water 1000 kg/m³. Zeewater is zwaarder doordat het een aantal zouten bevat. Water uit volle zee bevat deze zouten in vaste gewichtsverhoudingen: het heeft een min of meer constante samenstelling. De meest gebruikte parameters om het zoutgehalte in met zoet water gemengd zeewater uit te drukken zijn de saliniteit en de chlorositeit.

De saliniteit is het aandeel van de massa van deze zouten in een kilogram zeewater, uitgedrukt in grammen per kilogram, dus in promillen. Onverdund zeewater heeft een saliniteit van rond 35 promille.

Vanwege onder andere de eenvoudiger bepaling wordt vaker de chlorositeit, dat is het aantal grammen Cl-ionen (eigenlijk inclusief een hele kleine hoeveelheid broom en jodium) in 1 liter zeewater van 20 ° C, als “zoutgehalte” gehanteerd. De chlorositeit van weinig verdund zeewater bedraagt rond 19.5 gram per liter, of wel 19.5 promille. Vanwege de genoemde vaste gewichtsverhoudingen bestaat er een vaste betrekking tussen saliniteit (S) en chlorositeit (Cl):

$$S = 1.80655 \cdot Cl,$$

als beiden in promillen zijn weergegeven.

Het lichtere zoetere water heeft de neiging op het zwaardere zoute water te gaan drijven. Als er weinig mengenergie beschikbaar is ontstaan verticale zoutgradiënten, gelaagdheid of stratificatie genaamd. Het zijn in feite dichtheidsgradiënten. Dichtheidsgradiënten kunnen ook ontstaan door temperatuurverschillen. Zout- en temperatuurstratificatie kunnen elkaar versterken. In het algemeen worden scherpe verticale dichtheidsverschillen als ongewenst ervaren. Ze onderdrukken de turbulente uitwisseling, waarvan bijvoorbeeld ook het transport van zuurstof afhankelijk is. Bij substantieel zuurstofverbruik in de onderlaag kan dan onvoldoende aanvoer vanuit de atmosfeer via de bovenlaag plaatsvinden en kunnen aan de bodem zuurstoftekorten ontstaan.

Naarmate er meer mengenergie beschikbaar is, kunnen er meer geleidelijke horizontale gradiënten ontstaan, in longitudinale of transversale richting. Meestal komt de longitudinale richting overeen met die waarin ook de grootste watersnelheden en zoet- en/of

zoutwaterdebieten optreden. Afhankelijk hiervan en van de geometrie van het gebied, bijvoorbeeld een smalle geul of een ondiep platengebied, kan het onderscheid tussen longitudinale en transversale richting meer of minder duidelijk en relevant zijn.

Sterkte, vorm en afmetingen van de zout-zoetovergangen hangen helemaal af van de wijze waarop en de omstandigheden waaronder het zoute en zoete water elkaar ontmoeten en kunnen daarom per systeem sterk verschillen. Een vergelijking van bijvoorbeeld Oosterschelde en Nieuwe Waterweg illustreert dit heel duidelijk. Er wordt gesproken van het lozen van zoet water op de Oosterschelde en het binnendringen van de zouttong in de Nieuwe Waterweg.

De belangrijkste verschillen komen in het algemeen voort uit de mate waarin de invloed van de zee, het zoute water en getijbeweging, of de rivier, de zoetwaterafvoer, domineren. Deze verhouding wordt vaak uitgedrukt in het zg. estuariumgetal:

$$N = Q * T / V ,$$

waarin Q de rivierafvoer, T de getijperiode en V het getijvolume voorstellen. Dit estuariumgetal geeft dus in procenten uitgedrukt de relatieve invloed weer van de rivier ten opzichte van de zee. Voor de Oosterschelde bedraagt die invloed orde 0.1%. Voor de Nieuwe Waterweg is die invloed 100 maal groter, orde 10%.

Het getij is meestal de belangrijkste mengende kracht. Het systeem is dus meestal meer gemengd naarmate de zee-invloed groter is en derhalve het estuariumgetal kleiner is.

De wijze van verspreiding en menging van zoet en zout water in estuaria, met de erdoor bepaalde dichtheidsverschillen en eventueel dichtheidsstromen, zijn bijna altijd tenminste meebepalend voor de belangrijkste karakteristieken van estuaria en zeearmen. Er zijn daarom veel classificaties van estuaria op gebaseerd (Perillo, 1995). De meeste ervan zijn in feite varianten op de ooit als eerste door Pritchard (1955/1967) uitgevoerde classificaties. Biggs en Cronin (1981) voegden aan deze classificaties ook ecologische aspecten toe.

Tabel 2.1 Hydrologisch/ecologische indeling estuaria volgens Biggs en Cronin (1981) (Cadee, 1994).

Estuariumtype	dominante mengfactor	breedte-diepte verhouding	zoutgradiënt	troebelheid	biologische produktiviteit
A	rivier	laag	longitudinaal en verticaal	zeer hoog	laag
B	rivier, getij	matig	longitudinaal, lateraal en verticaal	matig	zeer hoog
C	getij, wind	hoog	longitudinaal en lateraal	hoog	hoog
D	getij, wind	zeer hoog	longitudinaal	hoog	matig

II-2 FYSISCH BESCHRIJVING VAN ZOET-ZOUTOVERGANGEN

De meeste classificaties van estuaria, die zijn gebaseerd op de verspreiding en menging van zoet rivierwater en zout zeewater, komen neer op ongeveer de volgende verdeling:

- I. het “zoutwig”-estuarium: plaatselijk sterke verticale en longitudinale gradiënten;
- II. het gestratificeerde estuarium: significant aanwezige geleidelijk verlopende verticale en horizontale gradiënten over substantieel deel estuarium;
- III. het matig gestratificeerde of gedeeltelijk gemengde estuarium: over substantieel deel verticale en horizontale gradiënten, overigens alleen horizontale gradiënten;
- IV. het verticaal homogeen estuarium: alleen horizontale gradiënten;
- V. het negatieve estuarium: omgekeerde verticale gradiënten vooral in landwaartse ondiepe deel door sterke opwarming en verdamping.

Type V is fysisch een zeer bijzondere situatie, die in veel classificaties niet wordt meegenomen. Ze is in bovenstaande verdeling opgenomen, omdat deze situatie met name in de Kom van de Oosterschelde wél zo nu en dan optreedt. Bij langere perioden met warm weer nemen watertemperatuur en verdamping in dit relatief ondiepe gebied sterk toe en kan het zoutgehalte hoger worden dan in het water in westelijke deel en het kustgebied. Het voorgaande illustreert dat, hoewel estuaria in principe worden geclassificeerd volgens het algemene beeld op systeemniveau, bijna altijd in grotere of kleinere delen ervan de andere situaties ook in bepaalde mate voorkomen. Daarom worden hierna alle situaties beschreven.

Deze beschrijving is grotendeels ontleend aan Dyer (1995), die in Perillo (1995) een zeer goede, toegankelijke fysische beschrijving geeft van de verschillende vormen van voorkomen met de bijbehorende randvoorwaarden. Dyer verdeelt estuaria in sterk gestratificeerde, gedeeltelijk gemengde en goed gemengde estuaria. De eerdergenoemde types I t/m IV zijn hierin terug te vinden.

- sterk gestratificeerde estuaria

Bij weinig getijbeweging zal het lichtere rivierwater over het zoute water stromen, met een geprononceerde dichtheidsovergang tussen de beide soorten water. Vanwege de stabiele dichtheidsgradiënt, het zwaardere zoute water onder en het lichtere zoete water boven, zullen de beide watermassa's niet zonder meer mengen. Alleen door een door de schuifspanningen op het grensvlak veroorzaakt proces, “entrainment” genaamd, bij voldoende grote snelheid van de zoete bovenlaag, zal de bovenlaag met enig zout water kunnen worden bijgemengd. Er is geen transport van zoet water naar de onderlaag, er is alleen menging naar boven. De onderlaag verliest dus geleidelijk zout aan de bovenlaag. Dit verlies wordt gecompenseerd door een kleine instroom van zout water vanaf de zeezijde. De positie van de zoutwig zal variëren met de getijfase en de zoetwateraanvoer. Deze situatie komt voor bij een relatief hoge zoetwateraanvoer en relatief klein getijverschil, geclassificeerd als “microtidal”, met een getijverschil kleiner dan 2m.

- gedeeltelijk gemengde estuaria

Bij een toenemend getijverschil beweegt de hele watermassa in het estuarium heen en weer met de periode van het getij. De wrijving tussen water en bodem genereert turbulentie, die een sterkere menging bewerkstelligt in de waterkolom dan de “entrainment”. Het dichtheidsverschil en de schuifspanning door de snelheidsverschillen op het grensvlak worden aanzienlijk kleiner. Met deze turbulente menging gaat niet alleen zout water naar de zoete bovenlaag, maar ook zoet water naar de onderlaag. Hierdoor ontstaan nu horizontale zoutgehaltegradiënten, met afnemende zoutgehalten landinwaarts, in zowel onder- als bovenlaag.

Er moet een resulterende afvoer optreden naar de zee, gemiddeld ter grootte van de zoetwateraanvoer. Maar de bovenlaag neemt nu ook opgemengd zout water mee, zodat de afvoer van de bovenlaag aanzienlijk groter kan zijn dan de zoetwateraanvoer.

Vanwege de continuïteitsvoorwaarde, gemiddeld blijft de hoeveelheid water in het estuarium gelijk, moet het surplus worden vervangen door een resulterend landwaarts debiet in de onderlaag. In de mond wordt dus een grote hoeveelheid gemengd water afgevoerd, en de compenserende instroom in de bodemlaag van zout water moet dus groter zijn dan in het “zoutwig-estuarium”, waar in de mond vrijwel alleen het zoete water wordt afgevoerd. Dit proces heet verticale gravitatie-circulatie.

In gedeeltelijk gemengde estuaria ligt het getijverschil meestal tussen 2 en 4 m, geclassificeerd als “mesotidal”, waarbij er vrij grote verschillen kunnen bestaan tussen spring- en doottij. De grotere snelheden bij springtij versterken de turbulente menging van zoet en zout water, waarmee de gelaagdheid afneemt en verticale gravitatiecirculatie toeneemt. Bij doottij en/of bij hoge rivierafvoeren kan de gelaagdheid sterk toenemen en is de intensiteit van de gravitatiecirculatie kleiner.

In de langsrichting van gedeeltelijk gemengde estuaria kan met het verloop van de getijdoordringing en de geometrie ook de verticale zoutverdeling sterk variëren.

Afhankelijk van het verloop van geometrie en getijdoordringing kan er in het zeewaarts gelegen deel een doorgaans goed gemengde situatie bestaan, terwijl er landinwaarts vrijwel permanent significante gelaagdheid optreedt. Dit gebeurt bijvoorbeeld als de getijsnelheden landinwaarts kleiner worden door afname van de getijslag of door afname van de berging door aanwezigheid van dam met sluis. Daar wordt dan de rivierinvloed weer sterker. Het laatste was het geval in het Volkerak, tussen de aanleg van de Volkerakdam en -sluizen in 1969 en de voltooiing van de Oosterscheldewerken.

- goed gemengde estuaria

Als het getijverschil groot is ten opzichte van de waterdiepte, in zg. “macrotidal” estuaria, zijn overal de getijsnelheden en bijbehorende turbulentie voldoende groot om de waterkolom volledig te mengen en verticaal homogene verdelingen te realiseren. In dit type estuarium kunnen er laterale verschillen in snelheden en zoutgehaltes bestaan en kunnen in plaats van verticale horizontale circulaties optreden. In de mond kan aan de ene zijde een resulterende instroom en aan de andere zijde een resulterende uitstroom optreden en er kunnen ook geulen voorkomen, met duidelijke een eb- óf vloeddominantie.

II-3 FYSISCH BESCHRIJVING VAN VERSPREIDINGS- EN MENGPROCESSEN

Anonymus III (1977), Dronkers (1980), Dronkers/Zimmerman (1982), Anonymus VI (1982), Bowden (1984), Bultman-Robaczewska (1986) en Battjes (1997) geven meer of minder toegankelijke fysische en/of mathematische beschrijvingen van de belangrijkste processen, die een rol spelen bij de verspreiding en menging van zoet en zout water in estuaria. De onderstaande beschrijving is voor een belangrijk deel ontleend aan deze literatuur en is vooral gericht op estuaria zoals de Oosterschelde.

De zoutgehalteverdeling in grillig gevormde, relatief ondiepe estuaria wordt bepaald door de zoetwateraanvoer, zoals rivieraanvoer, lokale lozingen en neerslag/verdamping, het getijvolume en het zoutgehalte van het zeewater, het lokale klimaat, zoals wind en temperatuur, en tenslotte door de geometrische verhoudingen en de bodemmorfologie van het estuarium zelf. Als de belangrijkste factoren ongeveer constant blijven ontstaat na enige tijd een dynamische evenwichtstoestand. Per getijcyclus komt er dan gemiddeld ongeveer evenveel zout het estuarium binnen als eruit verdwijnt (zie ook paragraaf II-2). Het dynamische van een dergelijke evenwichtssituatie ligt daarin dat zich in het estuarium dezelfde mengprocessen blijven afspelen als vóór het bereiken ervan, maar dat nu het effect van deze mengprocessen op de zoutgehalteverdeling over een getijcyclus gemiddeld nul is: na elke getijcyclus keert dezelfde zoutverdeling terug. Wél wordt er per getijcyclus een bepaalde hoeveelheid zoet water op het estuarium gebracht en wordt een evengrote hoeveelheid afgevoerd naar zee.

De verspreiding en menging van zout, en van stoffen in het algemeen, in een estuarium vindt plaats, zoals eerder al globaal is aangegeven, door "samenwerking" van drie processen op verschillende schaalniveau's (Anonymus VI, 1982; Bowden, 1984; Battjes, 1997;):

- convectie of meevoering met de grootschalige waterbeweging: transport met (massacentrum van) klein "vloeistofpakketje" mee (met stroomsnelheid u , v of w),
- turbulente uitwisseling of turbulente diffusie: (korte) tijd-gemiddelde waarde van fluctuerende transporten door turbulente bewegingen van zeer kleine "vloeistofpakketjes",
- moleculaire diffusie: tijdgemiddelde waarde van fluctuerende micro-transporten door de z.g. warmtebeweging van moleculen.

Battjes (1997) presenteert als uitwisselbaar met convectie voor de (grootschalige) meevoering ook de benaming advectie en voegt tevens een vierde transportmechanisme toe:

- dispersie: menging als gevolg van verticale en laterale gradiënten in snelheid en concentratie (dit komt naar voren bij integratie over de diepte of over het hele dwarsprofiel).

Anonymus VI (1982) onderscheidt heel expliciet convectief transport als het fysiek optredende meevoerende transport met de momentane lokale (grootschalige) watersnelheden, dat rekenkundig opgebouwd kan worden gedacht uit advectief en dispersief transport:

- convectie of convectief transport is het transport, $u * c$, $v * c$ en $w * c$ in langs-, breedte en verticale richting ten gevolge van snelheidscomponenten in die richting,
- advectie of advectief transport is het over de dwarsdoorsnede gemiddelde transport $u * c$ door de met de gemiddelde snelheid u voortbewegende stroming,
- dispersie of dispersief transport is het niet door turbulentie veroorzaakte transport dat een waarnemer ziet, die zich met de (dwarsprofiel-)gemiddelde snelheid meebeweegt: dispersief transport is dus convectief transport minus advectief transport.

In paragraaf II-4 komt bij de mathematische formulering en modellering de verdeling van convectief in advectief en dispersief transport nader aan de orde. In deze paragraaf worden de fysisch optredende processen convectief transport, turbulente uitwisseling en moleculaire diffusie en de onderlinge interactie beschreven.

transport door moleculaire diffusie

De laatste fase van de menging, waardoor de concentraties worden bepaald, wordt verzorgd door de moleculaire diffusie. Deze moleculaire diffusie wordt aangedreven door concentratieverschillen: (moleculen van) zouten worden getransporteerd van water met hogere naar water met lagere concentraties en het transport is sterker naarmate de concentratieverschillen groter zijn.

De transporterende en mengende werking van alleen de moleculaire diffusie is te zwak om op de schaal van een estuarium substantiële transporten en menging van zoet en zout water te realiseren. Ze “werkt” op zeer kleine ruimteschaal, op moleculaire schaal, en gaat steeds langzamer verlopen, omdat ze zelf de concentratieverschillen, waardoor ze wordt aangedreven, verkleint.

Alleen als de moleculaire diffusie kan werken over voldoende grote oppervlakten en aangedreven blijft worden door voldoende grote concentratieverschillen zal in de tijd en in de ruimte substantiële menging op moleculair niveau kunnen optreden. Daartoe moet de moleculaire diffusie worden ondersteund door een proces dat water over grotere afstanden kan verplaatsen, waardoor steeds opnieuw kleine pakketjes water met verschillende concentraties met elkaar in contact worden gebracht. Het proces dat hiervoor kan zorgen is de turbulente uitwisseling.

transport door turbulente uitwisseling

De turbulentie, ook wel genoemd “de kleinschalige stroming” (Dronkers/Zimmerman, 1982), wordt gegenereerd door en ontvangt haar energie van de grootschalige stroming, met name waar door bodemwrijving of profielveranderingen snelheidsverschillen in het dwarsprofiel optreden. De kleinschalige stroming bestaat uit turbulente wervels, verplaatsingen van kleine pakketjes vloeistof met stochastische snelheidsfluctuaties, in grootte en richting. Dit proces heet turbulente uitwisseling, turbulent transport of ook wel turbulente diffusie. In het Engels wordt het wel “eddy diffusion” genoemd.

Er treedt geen resulterende waterverplaatsing op door deze turbulente uitwisseling. Per kleine tijdsperiode wisselen aangrenzende waterlagen in beide richtingen gemiddeld evenveel pakketjes water uit. Als echter de beide lagen verschillende zoutconcentraties hebben, zal er wél een resulterende zoutverplaatsing, zouttransport, optreden. De pakketjes uit de laag met de hoogste zoutgehalten nemen meer zout mee naar de laag met de lagere gehalten, dan het gemiddeld evengrote aantal pakketjes dat zich in omgekeerde richting verplaatst.

De turbulente uitwisseling mengt zo zoet en zout water, water met verschillende zoutconcentraties, met als resultaat dat de gemiddelde zoutconcentratie ter plaatse, “in het mengsel”, lager wordt dan die van het ingebrachte zoutere water en hoger dan die van het ingebrachte zoetere water. Vervolgens verlaagt de moleculaire diffusie de concentratie van het ingebrachte zoutere water en verhoogt die van het ingebrachte zoetere water tot een gelijke concentratie in het hele “mengsel”.

Hoewel hun werking, weliswaar op verschillende schaalniveau's, kwalitatief hetzelfde is, is het belangrijk de moleculaire diffusie en de turbulente uitwisseling te onderscheiden als duidelijk verschillend aangedreven processen.

De intensiteit van de turbulente uitwisseling, en daarmee de sterkte van de mengende werking, wordt bepaald door de door de grootschalige waterbeweging geleverde “turbulente bewegingsenergie”. De optredende turbulente bewegingen worden echter ook bepaald door de dichtheidsverschillen tussen de uitwisselende lagen, en nemen af naarmate die verschillen groter zijn. En daar zoutgradiënten gepaard gaan met dichtheidsgradiënten, betekent dit dat, in tegenstelling tot de moleculaire diffusie, de turbulente uitwisseling zal afnemen als de concentratieverschillen te groot worden.

Ook samen zijn moleculaire diffusie en turbulente uitwisseling nog niet in staat om op estuariumniveau substantiële transporten en menging te realiseren. De turbulente

uitwisseling is op zich een lokaal proces op relatief kleine schaal. Analooq aan de moleculaire diffusie kan de turbulente menging op systeemniveau alleen van betekenis zijn als ze met voldoende intensiteit kan werken over voldoende grote oppervlakten. Ook moet de turbulente uitwisseling plaatsvinden tussen water met verschillende zoutconcentraties: alleen de uitwisseling tussen zogenaamde isohalinevlakken, vlakken met gelijke zoutgehalten, draagt bij aan de menging van zoet en zout water. De turbulente menging zal dus groter zijn naarmate de oppervlakte aan "isohalinevlakken" groter is. Bij een bepaalde intensiteit van de turbulente uitwisseling zal het zouttransport en daarmee de menging groter zijn naarmate de zoutgradiënt groter is, ofwel naarmate de afstand tussen de isohalinevlakken kleiner is. Dit betekent echter ook een grotere dichtheidsgradiënt, waardoor de intensiteit van de turbulente uitwisseling wordt beperkt of kan worden onderdrukt. De afstand tussen de isohalinevlakken moet dus niet "te klein" zijn. Zoals de kleinschalige menging door de turbulente uitwisseling nodig is om de moleculaire diffusie effectief te kunnen laten zijn, is er een primaire grootschalige menging nodig, die de oppervlakte van de isohalinevlakken vergroot en de zoutgehaltegradiënten verkleint, om de turbulente uitwisseling op grotere ruimte- en tijdschaal van betekenis te laten zijn. Deze grootschalige menging wordt verzorgd door de grootschalige waterbeweging.

convectief transport door grootschalige waterbeweging

De grootschalige waterbeweging, zoals de getijstroom, de waterbeweging door langere golven of de rivierafvoer, wordt gegenereerd door krachten die over grote afstanden en lange perioden werken. Ze brengt in eerste instantie vanaf de rivier en vanuit de zee het zoete en zoute water bij elkaar en verzorgt de grootschalige verspreiding en menging binnen het estuarium. Hierdoor worden de omvang van de oppervlakten van de isohalinevlakken en de afstand ertussen bepaald. Naast de verzorging van de grootschalige menging levert ze de energie voor de turbulentie en de turbulente uitwisseling. De (lokale) intensiteit daarvan wordt bepaald door de sterkte van de grootschalige waterbeweging in combinatie met de (lokale) geometrie.

Het directe momentane transport van "zout", dat is opgelost in het zich met de grootschalige waterbeweging verplaatsende water, wordt het convectieve transport genoemd. De omvang per tijdseenheid en per eenheid van volume water van dit zouttransport is gelijk aan watersnelheid maal concentratie, of wel $u \cdot c$.

Dit convectieve transport is in feite het fysisch reëel optredende transport van zout door de grootschalige waterbeweging. Zoals genoemd komen in mathematische formuleringen en modelleringen van de transport- en mengprocessen ook de begrippen advectieve en dispersieve transporten voor. Dit zijn in feite rekengrootheden. In paragraaf II-4 wordt hierop verder ingegaan.

Samengevat vindt de verspreiding en menging van zoet en zout water in een estuarium plaats:

door de grootschalige waterbeweging, die

- via het convectieve transport het zoete en zoute water op systeemniveau bij elkaar brengt en de primaire grootschalige verspreiding en menging van watermassa's met verschillende zoutgehalten verzorgt,
- hiermee de isohalinevlakken genereert en de omvang ervan bepaalt waarover de turbulente uitwisseling actief kan worden,
- de energie levert en met de geometrie de intensiteit bepaalt van de kleinschalige waterbeweging of turbulentie,

door de kleinschalige waterbeweging of turbulentie, die

- de kleinschalige menging, op "waterdeeltjes-niveau", verzorgt, door via de turbulente uitwisseling waterdeeltjes met verschillende concentraties tussen waterlagen uit te wisselen,
- hiermee de verschillen in gemiddelde concentraties in aangrenzende waterlagen uitmiddelt,

- en hiermee binnen deze lagen steeds opnieuw concentratieverschillen genereert, daarmee de voorwaarden scheppend voor het ruimtelijk en temporeel actief zijn en blijven van de moleculaire diffusie,
- door de moleculaire diffusie, die
- de “finale” menging op moleculair niveau realiseert door, aangedreven door concentratieverschillen, hogere concentraties te verlagen ten gunste van lagere concentraties,
 - hiermee de concentraties lokaal naar eenzelfde niveau brengt.

II-4 KWANTITATIEVE BENADERINGEN VAN MENG- EN TRANSPORTPROCESSEN

In deze paragraaf worden enkele eenvoudige kwantitatieve benaderingen gegeven van de meng- en transportprocessen in achtereenvolgens situaties met stratificatie en met gematigde tot sterke menging.

De turbulente uitwisseling vormt een cruciale schakel in de keten convectief transport – turbulente uitwisseling – moleculaire diffusie, die de verspreiding en menging van zoet en zout water in een estuarium verzorgt. Turbulentie wordt gegenereerd door de grootschalige waterbeweging. Als er geen sprake is van dichtheidsverschillen vormt het zg. kental van Reynolds een maat voor het optreden van zg. turbulente stroming. Het lokale kental van Reynolds wordt berekend als het product van een kenmerkende watersnelheid en de kortste afstand tot een scheidingsvlak, zoals bijvoorbeeld de bodem of een wand. Turbulente stroming treedt op als de waarde groter is dan circa 300 bij stroming rond scherpe objecten of meer dan 2000 voor stroming langs een gladde bodem.

De getijstroming op de Nieuwe Waterweg is zeker turbulent, evenals de geringe stroming in een meertje door wind. Voor rivieren en zeeën bedraagt het kental van Reynolds vele miljoenen: die stromingen zijn praktisch overal en altijd turbulent en de turbulente wervelingen bepalen het stroombeeld en het transport van stoffen. Ze zorgen voor menging en voor een remmende kracht die 100 tot 1000 maal groter is, dan die door moleculaire bewegingen (Anonymus IX, 199?).

In vrijwel alle natuurlijke waterlopen is sprake van turbulente stroming en is derhalve een bepaalde hoeveelheid turbulente energie beschikbaar voor menging. Dichtheidsverschillen kunnen echter de turbulentie en menging sterk beperken of zelfs helemaal onderdrukken. Turbulente wervels verplaatsen pakketjes zwaarder, zouter water naar boven in lichter, zoeter water en terug. Voor zulke verticale verplaatsingen met gewichtsverschillen is energie nodig, die wordt onttrokken aan de turbulente wervelingen, terwijl ook meer pakketjes zwaarder water terugvallen naar de diepte van herkomst zonder te mengen. Zo worden turbulentie en menging meer beperkt naarmate de verticale dichtheidsverschillen groter zijn.

Eerder is genoemd dat het zg. estuariumgetal, de verhouding tussen rivierafvoer en getijvolume, $N = Q * T / V$, een indicatie kan geven voor de mate van menging in estuaria, omdat de menging daar meestal verzorgd moet worden door de getijbeweging. Voor stromingen met dichtheidsverschillen vormt echter het estuariene Ri -getal van Richardson (1920) een meer adequate fysische referentie. Er worden nogal uiteenlopende formuleringen voor Ri toegepast, bijvoorbeeld formuleringen voor estuariumniveau (Ockhuysen / Robaczewska, 1985) en formuleringen voor meer lokale situaties (Anonymus IX, 199?). Overigens zijn al deze formuleringen ontleend aan Fischer (1979).

Ockhuysen / Robaczewska (1985) en van Helvert (1998) passen als Ri toe het product van het dichtheidsverschil over het estuarium(-deel), gerelateerd aan de dichtheid van het kustwater, zoetwaterafvoer en zwaartekrachtsversnelling, gedeeld door het product van estuariumbreedte en de derde macht van de rms-waarde van de getijsnelheid, of wel:

$$Ri = (\Delta\rho / \rho) * g * Q_f / (W * U^3)$$

Bij deze formulering liggen de overgangen van goed gemengd en sterk gestratificeerd bij respectievelijk $Ri < 0.08$ en $Ri > 0.8$.

Anonymus IX (199?) definieert het kental van Richardson als 1/100 van het product van de waterdiepte en het dichtheidsverschil over de verticaal, gedeeld door het kwadraat van het snelheidsverschil over de verticaal, of wel:

$$Ri = D / 100 * (\rho_o - \rho_b) / (U_o - U_b)^2$$

Hoe groter Ri des te belangrijker wordt de invloed van de gelaagdheid op de turbulente menging en des te onbelangrijker wordt het kental van Reynolds. Voor toenemende Ri , tot groter dan circa 0.3 volgens laatstgenoemde "lokale" formulering, daalt de turbulente

menging sterk: bij $Ri = 1$ is de turbulente menging minder dan 1/10 van die bij $Ri = 0$, ongeacht de waarde van het aantal van Reynolds, dat nog steeds vele miljoenen kan bedragen.

Een groot verticaal dichtheidsverschil kan Ri , volgens de lokale formulering, groot maken, maar dat hoeft niet. In de Nieuwe Waterweg zijn over de waterdiepte de dichtheidsverschillen maar ook de snelheidsverschillen groot, door de sterke getijbeweging, en daarom wordt Ri daar maar zelden groter dan 0.7 (Anonymus IX, 1997).

Bij $Ri < 0.08$ volgens de formulering op estuariumniveau en bij Ri voldoende < 0.3 volgens de lokale formulering, is de turbulente uitwisseling sterk genoeg om een redelijke menging te bewerkstelligen. Dan worden het zouttransport en de concentratieverdeling fysisch bepaald door de samenwerking van de processen zoals ze zijn beschreven in paragraaf II-3: het convectieve transport door de grootschalige waterbeweging, de turbulente uitwisseling door de kleinschalige waterbeweging en de moleculaire diffusie.

Goed toegankelijke formuleringen en beschrijvingen en afleidingen van de modelvergelijkingen worden gegeven door Anonymus VI (1982) en Battjes (1997). Op basis van deze literatuur worden hierna enkele voor deze historische analyse relevante beschrijvingen en formuleringen beknopt weergegeven.

In de in de praktijk doorgaans toegepaste kwantitatieve benaderingen en modellering van de zouttransporten en concentratieverdeling op estuariumniveau komen de turbulente uitwisseling en moleculaire diffusie niet meer voor. Dat is het gevolg van een bewuste vereenvoudiging van het complexe geheel van op verschillende schalen werkende processen, waarbij echter qua fysica en resultaten toch in grote lijnen recht wordt gedaan aan de belangrijkste karakteristieken van het systeem. De beschrijvende vergelijkingen zijn in principe wél, min of meer exact, afgeleid van de driedimensionale, over de turbulentietijd gemiddelde diffusievergelijkingen, die zijn gebaseerd op de genoemde optredende fysische processen. In de vergelijkingen komt echter alleen nog de grootschalige waterbeweging voor.

Voor de inzichtelijkheid wordt hierna de formulering beschreven van de ééndimensionale benadering, het zg. ééndimensionale model. Hoewel vaak niet volledig aan alle formele voorwaarden voor toepassing wordt voldaan, worden er vaak bevredigende resultaten mee bereikt. De benadering wordt toegepast op (stelsels van) waterlopen met één dominante waterbewegings-, transport- en verspreidingsrichting. Modelvergelijkingen kunnen dan worden geformuleerd, die het zouttransport door en, als gevolg van een eventuele gradiënt, de concentratieveranderingen in een dwarsprofiel beschrijven. Het transport wordt dan beschreven als functie van de som van product van profielgemiddelde grootschalige watersnelheid en concentratie, het advectioneel transport, en van het product van de longitudinale gradiënt in de profielgemiddelde concentratie en de zg. dispersiecoëfficiënt, het dispersieel transport. Zo ontstaat de z.g. advectione-dispersievergelijking.

Zoals in paragraaf II-3 is beschreven vindt het momentane transport van zout in een punt van het dwarsprofiel fysisch, op afnemende schaal, plaats door convectief transport met de lokale grootschalige watersnelheid, door turbulente uitwisseling met de kleinschalige waterbeweging en door moleculaire diffusie. Beide laatstgenoemde componenten zijn fysisch evenredig met de concentratiegradiënt $\partial c / \partial x$, die weer in belangrijke mate wordt bepaald door de grootschalige convectieve waterbeweging.

In de advectione-dispersieformulering wordt nu een belangrijke vereenvoudiging aangebracht door het convectieve transport door de grootschalige waterbeweging te verdelen in een component die géén, de advectioneel, en die wél, de dispersieel, invloed heeft op de concentratiegradiënt en daardoor ook op de turbulente uitwisseling en de moleculaire diffusie.

Het longitudinale transport door een dwarsprofiel kan dan, met (voorlopige) verwaarlozing van moleculaire en turbulente diffusie, als volgt worden geformuleerd:

$$u * c * d(A) = A * T_x = A * (u * c + u' * c') = Q * c + A * u' * c'$$

waarin u en c de lokale snelheid en concentratie zijn, A het oppervlak is van het dwarsprofiel, T_x het lokale transport voorstelt en Q het totale waterdebiet is door het dwarsprofiel. Overstreept gaat het om de profielgemiddelde waarde van een grootheid. De lokale momentane snelheid en concentratie zijn hier verdeeld in een component gelijk aan de profielgemiddelde waarde, u en c , en een component gelijk aan het verschil tussen lokale en profielgemiddelde waarde, u' en c' .

In het dwarsprofiel van een natuurlijke waterloop variëren de snelheden door de bodeminvloed in verticale richting en door diepteverschillen ook in laterale richting. Door deze snelheidsverschillen in het dwarsprofiel, de verticale en laterale snelheidsgradiënten, wordt het water met zout dat op een zeker moment in een dunne schijf in dat dwarsprofiel aanwezig is, in longitudinale richting "uitgerekt" en verdeeld over een in die richting groter watervolume. Dit is in feite de mengende werking van de grootschalige waterbeweging. Het ermee gepaard gaande transport, het in dit geval longitudinale, dispersieve transport, komt bij het advectioneel transport door de profielgemiddelde snelheid en wordt gerepresenteerd door de laatste term in bovenstaande transportformulering.

De modellering van het dispersieve transport is gebaseerd op de toepasbaarheid van het z.g. dispersieconcept, volgens welk concept dispersie als z.g. gradiënttypetransport kan worden beschreven. Gradiënttypetransport is transport dat evenredig gesteld kan worden met de gradiënt van de profielgemiddelde concentratieverdeling. In Anonymus VI (1982) wordt hierop uitgebreid ingegaan. De essentie van dit concept is het "streven van de natuur" concentratieverschillen in de ruimte te nivelleren: het dispersief stoftransport vindt plaats van hoge naar lage concentratie. De grootschalige menging van water met verschillende stofconcentraties, heeft, evenals de turbulente en moleculaire menging, altijd tot gevolg dat de concentratie van de component met de hoogste concentratie daalt en die van de component met de laagste concentratie stijgt. Menging betekent dus altijd een transport van hoge naar lage concentratie.

Op grond van het dispersieconcept wordt de dispersie analoog aan de moleculaire en turbulente diffusie gemodelleerd als een diffusieproces:

$$u' * c' = -K * \partial c / \partial x$$

zodat het transport nu wordt:

$$A * T_x = Q * c - A * K * \partial c / \partial x$$

In de advectioneel term van de transportformulering was voor $A * u$ al het waterdebiet Q ingevoerd. In veel gevallen zal dit debiet in waarde gelijk zijn aan de zoetwateraanvoer of een vaak redelijk goed te bepalen deel daarvan.

K is hier de coëfficiënt voor longitudinale dispersie. Het minteken ervoor in de formulering duidt op het dispersieve zouttransport tegen de gradiënt in, dus van hoge naar lage concentratie.

Er bestaan verschillende theoretische benaderingen voor de waarde van de dispersiecoëfficiënt voor de verschillende mogelijke vormen van dispersie en verschillende situaties. Zeker bij praktische toepassing in natuurlijke situaties, vormt de dispersiecoëfficiënt echter een vergaarbak van verschillende soorten informatie. Eigenlijk moet de dispersiecoëfficiënt daarom bij praktische toepassing uit metingen in de natuur worden bepaald. Anonymus VI (1982) en Bultman-Robaczewska (1986) gaan daar respectievelijk in het algemeen en voor de Oosterschelde uitgebreid op in. Bij bepaling uit metingen bevat de

dispersiecoëfficiënt, naast de effecten van de beschreven z.g. lokale menging door de lokale snelheidsgradiënten, alle relevante invloeden, zoals onder andere die van de niet-lokale menging op bijvoorbeeld samenkomsten van eb- en vloedscharen en in feite ook eventuele op de dispersie aanvullende effecten van de turbulente uitwisseling.

Concentratieveranderingen in de tijd op een bepaalde plaats treden op als er een longitudinale gradiënt bestaat in het transport:

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \cdot c) + \frac{\partial}{\partial x} (A \cdot T_x) = 0,$$

wat toegepast op de transportformulering resulteert in de advection-dispersievergelijking in één dimensie:

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \cdot c) = \frac{\partial}{\partial x} (A \cdot K \cdot \frac{\partial c}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (Q \cdot c)$$

Voor een systeem als de Oosterschelde, waar deze vergelijking in het algemeen getijgemiddeld wordt toegepast, kan de werking op systeemniveau als volgt worden geïnterpreteerd.

Aan de landwaartse zijde wordt vrijwel zoet water aangevoerd en via het systeem naar zee afgevoerd, waarbij het onderweg wordt gemengd met zouter water. De advectieve afvoer per saldo in zeewaartse richting van zout met het debiet Q zal derhalve in die richting een toename vertonen. Een toenemende afvoer van zout in zeewaartse richting betekent een afvoer van zout op een bepaalde plaats, dus een verlagend effect op het zoutgehalte ter plaatse.

Over het systeem neemt het zoutgehalte in landwaartse richting af van zeewatergehalte aan de kust tot vrijwel zoet aan de landzijde. De dispersieve menging, hoofdzakelijk met de getijbeweging, transporteert zout van hogere naar lagere gehalten, dus in landwaartse richting. De sterkte ervan, en daarmee het ermee gepaard gaande zouttransport, neemt af in landwaartse richting, wat op een bepaalde plaats een verhogend effect heeft op het zoutgehalte.

Als de concentratie ter plaatse (getijgemiddeld) niet verandert, wat overigens nooit overal in het systeem tegelijk het geval zal zijn, houden zoutaanvoer met de vloed en zoutafvoer met de eb elkaar in evenwicht. In de "praktijk" van de natuur komt het er het grootste deel van de tijd op neer dat het momentane vloedtransport wat minder, maar wél zouter water landwaarts brengt en het momentane ebtransport wat méér, namelijk inclusief zoetwaterafvoer, maar minder zout water zeewaarts verplaatst.

III BEPALENDE FACTOREN ZOUTGEHALTEVERDELING OOSTERSCHELDE

III-1 BESCHRIJVING BEPALENDE FACTOREN ZOUTGEHALTEVERDELING

De aanwezigheid van zoet-zoutovergangen in de Oosterschelde komt voort uit de ligging in het gebied waar de grote rivieren Rijn, Maas en Schelde uitmonden in de Noordzee. Deze ligging bepaalt de dominante randvoorwaarden, die samen met de geometrie en enkele secundaire, lokale factoren, de zoutgehalteverdeling over het estuarium bepalen. Veranderingen in het gebied in het verleden, hoofdzakelijk door ingrepen, beïnvloedden de randvoorwaarden waardoor ook de aard en mate van dominantie veranderden.

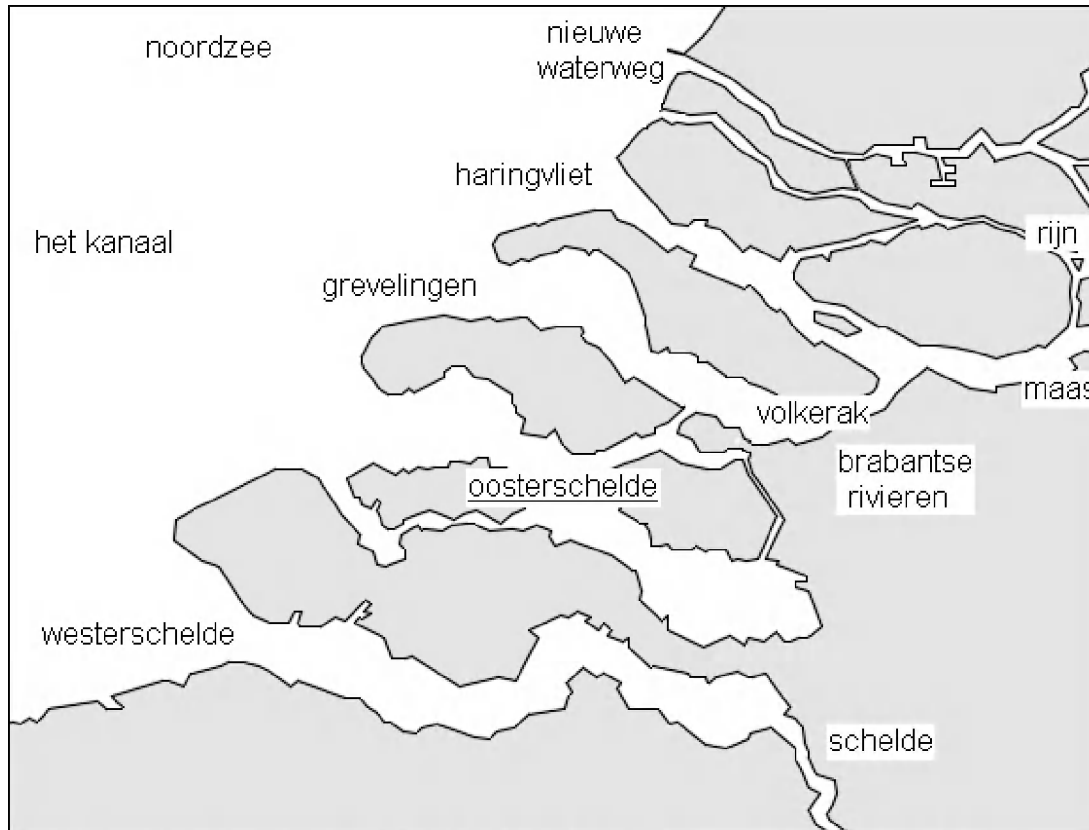


fig.3.1 Oosterschelde tussen rivieren en Noordzee; situatie midden twintigste eeuw.

Voor de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde zijn de bepalende factoren:

- het zoutgehalte van het kustwater,
- het getij in de mond, aangeboden door de Noordzee, meestal uitgedrukt in het getijvolume,
- de geometrie van het bekken,
- de getijbeweging op het bekken, bepaald door Noordzeegetij en geometrie,
- de zoetwaterbelastingen op het bekken: uit aangrenzende watersystemen, rechtstreeks of door spuien en/of schutten, door polderuitslagen en door neerslag en verdamping,
- de klimatologische omstandigheden, zoals wind en temperatuur.

In de afgelopen eeuw en vooral in de laatste decennia zijn er ingrijpende veranderingen opgetreden en aangebracht in het gebied, waardoor ook de meeste dominante en secundaire randvoorwaarden voor de zoutgehalteverdeling zijn beïnvloed.

In paragraaf III-2 van dit hoofdstuk worden de in dit verband relevante veranderingen in de Oosterschelde en omgeving beschreven. In paragraaf III-3 worden overzichten gegeven van de invloeden die de bepalende factoren in enkele duidelijk onderscheidbare fasen in het verleden hebben uitgeoefend, met waar mogelijk de waarden die ze hebben aangenomen. In deze paragraaf III-1 worden, om de gedachten te bepalen, een aantal korte beschrijvingen gegeven van de bepalende factoren, waarmee deze paragraaf tevens fungeert als een op de zoutgehalteverdeling georiënteerde gebiedsbeschrijving.

Anonymus V (1979) bevat een zeer uitgebreide beschrijving van de historische ontwikkeling van het zuidelijk Deltagebied met het accent op de waterhuishoudkundige relaties. Daarin komen uiteraard ook de factoren aan de orde die de zoutgehalteverdeling in de Oosterschelde beïnvloeden. De nadruk ligt op de situatie tijdens de uitvoering van de Deltawerken en de eindsituatie na voltooiing daarvan. Hetzelfde is het geval in Dronkers (1980), die een uitgebreide analyse bevat van een aantal factoren die de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde beïnvloeden. In dit rapport wordt de invloed van verschillende factoren geanalyseerd. Dit gebeurt op basis van de resultaten van een omvangrijk in 1977 gestart meetprogramma, bestaande uit permanente registraties vanaf vaste meetopstellingen, gecombineerd met de gegevens van een dubbele 13-uursmeting in augustus 1977, na een periode met een ingestelde constante zoetwateraanvoer vanaf het Volkerak. Deze metingen vormden een onderdeel van het onderzoek naar en de modellering van de toen optredende en in de toekomst, na voltooiing van de Oosterscheldewerken, te verwachten zoutgehalteverdeling. De beschrijving en analyse is gericht op twee situaties: de toenmalige situatie, die was ingegaan in 1969 met de realisering van de Volkerakdam, en de situatie na voltooiing van de Oosterscheldewerken. De hiernavolgende beschrijving van de bepalende factoren is hoofdzakelijk gebaseerd op beide bovengenoemde publicaties, Anonymus V (1979) en Dronkers (1980), waar nodig aangevuld met relevante informatie over de periode vóór 1969 en met eventuele nieuwe informatie uit later uitgevoerd onderzoek.

Het zoutgehalte van het kustwater

Wolff (1973) onderscheidt Kanaalwater en "continentaal" kustwater, zie ook figuur 4.1. Het Kanaalwater is "echt zeewater" en heeft een chloridegehalte hoger dan 18.5 mg Cl-/l. Het water voor de deltakust en in de mond van de Oosterschelde is volgens deze definitie duidelijk continentaal kustwater. Het zoutgehalte in dit water wordt bepaald door de mate van menging met zoet Rijn- en Maaswater, dat is aangevoerd via Haringvliet en Nieuwe Waterweg. De invloed van de Scheldeafvoer via de Westerschelde is zeer gering. Ook de invloed van de zoetwaterafvoer via de Oosterschelde zelf op het gehalte in de mond is klein ten opzichte van de afvoeren via Haringvliet en Nieuwe Waterweg. Bij gemiddelde omstandigheden bevat het kustwater rond 10 % rivierwater (Dronkers, 1980; Anonymus VII, 1986). In de mond van de Oosterschelde varieert het chloridegehalte tussen waarden van 15 en 19 g Cl/l (Giessen en Kollé, 1989). De benedengrens wordt vooral bepaald door sterkere dalingen, als bij noordelijke en noordwestelijke winden en hoge afvoeren via de Haringvlietsluizen grotere hoeveelheden zoetwater min of meer rechtstreeks naar het zuiden worden gedreven. Het rivierwatergehalte kan dan oplopen tot 20 %. Ten noorden van de Oosterscheldemond is de invloed van de rivierafvoeren vrij direct. Daar treden doorlopend substantiële verschillen op tussen de gehalten aan de oppervlakte en de bodem. De mond van de Oosterschelde wordt alleen rechtstreeks door het zoetere water bereikt, wanneer een noordwestelijke tot noordelijke windrichting tenminste een week aanhoudt (Dronkers, 1980).

De geometrie van het bekken

De geometrie van het bekken komt uitgebreid aan de orde in paragraaf III-2, waar de veranderingen door de ingrepen worden beschreven. Hier worden de belangrijkste karakteristieken samengevat.



fig. 3.2 Deelgebieden Oosterschelde, huidige situatie (uit Anonymus VIII, 1991).

De huidige Oosterschelde is onder te verdelen in vier gebieden (Anonymus VIII, 1991): monding/westelijke deel, middengebied, Kom en noordelijke tak. Een aantal geometrische karakteristieken van deze gebieden zijn weergegeven in onderstaande tabel 3.1.

Tabel 3.1 Geometrische karakteristieken deelgebieden Oosterschelde (Anonymus VIII, 1991)

	ligging tussen (ongeveer)	oppervlakte in ha	volume (NAP) in milj. m3	wateropp.(NAP) in ha	diepte (NAP) in m
mondig/ westelijke deel	OS-kering- Zeelandbrug	10616	1150	9464	12.15
middengebied	Zeelandbrug- Stavenisse- Gorishoek	10660	996	9625	10.35
noordelijke tak	Stavenisse- Philipsdam	4600	262	3187	8.24
Kom	Gorishoek- Oesterdam	9200	333	8076	4.13
huidige Oosterschelde		35076	2741	30352	9.01
Krammer/ Volkerak	Philipsdam- Volkerakdam	7000	221	3931	5.62
Markiezaats gebied	Oesterdam- Brabantse Wal	3118	53	1900	2.79

Tot 1986/1987 stond de noordelijke tak in open verbinding met het Krammer-Volkerakgebied, waren Kom en Volkerak vanaf rond 1975 verbonden door de Eendracht en het noordelijke deel van het Schelde-Rijnkanaal en liep de Kom verder oostelijk door tot aan de Markiezaatskade. Vóór 1983 behoorde bij de Kom ook het Markiezaatsgebied en vormde de Brabantse Wal de oostelijke begrenzing.

Het getij in de mond en op het bekken

Het getij in de mond wordt opgelegd door de Noordzee. Direct buiten de stormvloedkering wordt het getij nog in bepaalde beperkte mate beïnvloed door de Oosterschelde zelf, op wat grotere afstand zeewaarts niet meer. De getijverschillen buiten en binnen de stormvloedkering bedragen in de huidige situatie bij gemiddeld getij respectievelijk ruim 2.80 m en bijna 2.50 m.

Landinwaarts op het bekken gaat de geometrie een steeds grotere rol spelen. De afname van het getijverschil over de stormvloedkering hangt af van de combinatie van doorstroomopening van de kering en komberging erachter, waardoor de snelheden door de kering met de bijbehorende verliezen worden bepaald. Door de specifieke geometrie van het bekken nemen de getijverschillen landinwaarts weer toe tot ruim 3.00 m bij de Philipsdam en bijna 3.50 m bij de Oesterdam.

Het verloop van hoog- en laagwaterstanden, getijverschillen en getijvolumes over het bekken geven een goede eerste indruk van de interactie tussen geometrie en getijvoortplanting. In onderstaande tabel zijn er een aantal samengevat. Dezelfde verdeling in deelgebieden als bij de geometriebeschrijving is aangehouden

Tabel 3.2 Getij huidige situatie (Berchum en Wattel, 1997; Anonymus VIII, 1991)

	Ligging (ong.)	hoogwater	laagwater	getijverschil	eb + vloedvol.
Monding/ westelijke deel	OS-kering-	+ 1.30	- 1.22	2.51	1760
	Zeelandbrug	+ 1.50	- 1.31	2.81	1250
midden-	Zeelandbrug	+ 1.50	- 1.31	2.81	1250
gebied	-				
	Stavenisse-	+ 1.56	- 1.39	2.95	160
	Gorishoek	+ 1.77	- 1.54	3.31	590
noordelijk tak	Stavenisse-	+ 1.56	- 1.39	2.95	160
	Philipsdam	+ 1.60	- 1.43	3.03	0
Kom	Gorishoek-	+ 1.77	- 1.54	3.31	590
	Oesterdam	+ 1.85	- 1.64	3.48	0

De zoetwaterbelasting op het bekken

De Oosterschelde wordt op verschillende plaatsen en op verschillende wijzen belast met water van een andere kwaliteit en samenstelling dan het water van de Oosterschelde zelf. Vanwege deze verschillen tussen aangevoerd en ontvangend water spreekt men van belasting, omdat een dergelijke aanvoer versturend kan werken. In de huidige situatie bedraagt de totale waterbelasting op de Oosterschelde, omgerekend naar zoet water en gemiddeld over een jaar, tussen 20 en 30 m³/s. De verdamping bedraagt jaargemiddeld 5 á 10 m³/s.

Naar aard en plaats kan een aantal belastingbronnen worden onderscheiden:

- neerslag en verdamping,
- polderwaterlozingen,
- belasting met shut- of spuiwater uit sluizen.

Neerslag komt langs verschillende wegen in het bekken terecht: als directe neerslag op het open water, als afstromend water van buitendijkse gronden en via polderlozingen. In het Deltagebied valt er gemiddeld per jaar 725 mm neerslag. 's Zomers is de verdamping groter dan de neerslag, 's winters en over het hele jaar gerekend is er een neerslagoverschot. In een normaal jaar bedraagt het neerslagoverschot op de Oosterschelde jaargemiddeld 0.2 m³/s. Over een natte maand gerekend kan er een overschot optreden van 20 m³/s, terwijl over een droge maand er tekorten van orde 15 m³/s kunnen ontstaan. In de Kom, die door de relatief geringe diepte snel opwarmt en die weinig wateruitwisseling heeft, gebeurt het incidenteel dat het zoutgehalte door sterke verdamping hoger wordt dan in de monding (Dronkers, 1980).

Polderlozingen vormen plaatselijke belastingen, anders dan neerslag die regelmatig verdeeld voorkomt. Polderwater en neerslag hebben verschillende samenstelling. In de polder vinden diverse verontreinigingen plaats en wordt het water gemengd met kwelwater. In enkele polders kan het zoutgehalte in het oppervlaktewater bij weinig verdunning met regenwater in droge zomers oplopen tot nabij het zeewatergehalte. Gewoonlijk is het echter brak, waardoor het bij lozing op het zoute bekken een verlaging van het chloridegehalte veroorzaakt. In de huidige situatie wordt door 11 poldergemalen samen, van bijna 29000 ha polderland, het overtollige water op de Oosterschelde uitgeslagen (Berchum en Wattel, 1997). Dit levert een belasting omgerekend naar zoet water van rond 4 m³/s gemiddeld over een jaar. In natte perioden kan de actueel geloosde hoeveelheid zoet water 10 tot 15 m³/s bedragen. Samen met de belasting door de directe neerslag, waarmee uiteraard een positieve correlatie bestaat, kunnen hierdoor, met name in gebieden met weinig uitwisseling zoals de Kom, substantiële zoutgehalteredalingen optreden.

Belastingen met shut- of spuiwater zijn in de huidige situatie afkomstig van de Grevelingensluis, de Krammersluizen, de Bergsediepsluis en de Zandkreeksluis. Het normale bedrijf van de Krammersluizen, met rond 8 m³/s, en het spuien vanaf het Veerse Meer, van jaargemiddeld enkele m³/s via de Zandkreeksluis, zijn hiervan kwantitatief de belangrijkste.

Over de periode 1991-1995 bedroeg de totale belasting met zoet en brak water, exclusief de rechtstreekse neerslag, jaargemiddeld rond 16 m³/s, waarvan 52 % werd geleverd door de Krammersluizen, 25 % door de polders, 21 % door het Veerse Meer en 2 % door het schutten met de scheepvaartsluizen (van Berchum en Wattel, 1997).

Verweg het grootste deel van de zoetwaterbelasting op de Oosterschelde is altijd geleverd door de zogenoemde zijdelingse belasting. Vóór de scheiding met de Westerschelde in 1867 was die afkomstig van de Schelde via Kreekrak en Kom, erna werd ze geleverd door Rijn, Maas en Brabantse rivieren via Volkerak en noordelijke tak. Laatstgenoemde belasting nam kortgeleden, met de voltooiing van de Oosterscheldewerken in 1987, af van rond 50 m³/s naar de huidige 8 m³/s via de Krammersluizen.

De klimatologische omstandigheden

Van de klimatologische omstandigheden zijn het naast neerslag de wind en de temperatuur die invloed kunnen hebben op de zoutgehalteverdeling. De invloed van de wind is verweg het belangrijkste. Ze werkt door in het chloridegehalte van het kustwater, in de uitwisseling tussen kust- en estuarien water bij op- of afwaaiing, in de (dispersieve) menging bij windgedreven stroming en in de turbulente menging bij golven.

De invloed van de wind op het zoutgehalte van het kustwater is in het voorgaande beschreven.

Windopzet of afwaaiing vanaf de Noordzee bij noordwestelijke, respectievelijk oostelijke windrichtingen veroorzaken een grotere, respectievelijk kleinere indringing van zeewater. Bij windopzet zal men dus op een vast punt een verhoging, bij afwaaiing een verlaging van het

getijgemiddelde zoutgehalte waarnemen. Dit effect is sterker naarmate de longitudinale zoutgradiënt groter is, zoals op de noordelijke tak, vooral vóór de aanwezigheid van de Philipsdam. In die situatie bestond er voor de locaties Stavenisse, Zijpe en Oude Tonge een waarneembare positieve correlatie tussen middenstandsverhogingen en zoutgehalten (Dronkers, 1980).

Het blijvende effect van windopzet of afwaaiing door een enkele storm op de zoutgehalteverdeling is gering ten opzichte van de zoutindringing en menging door de dagelijkse getijbeweging. Alleen bij bijvoorbeeld een langdurige stormachtige periode van bijvoorbeeld enkele weken kan een verhoging van de getijgemiddelde zoutgehalten optreden.

Windgedreven stroming kan zich vooral ontwikkelen bij lokale opwaaiing in ondiepere gebieden, zoals de Kom en het Volkerak. De erdoor veroorzaakte verandering van de snelheidsverdeling in het dwarsprofiel kan via het dispersieve zouttransport doorwerken in de zoutgehalteverdeling. Ook dit effect is sterker naarmate de longitudinale zoutgradiënt groter is.

Uit analyses van enkele grote zoutmeetcampagnes op de noordelijke tak en het Volkerak, toen het nog in open verbinding stond met het Oosterscheldebekken, onderkennen Van de Kreeke en Robaczewska (1989) een tweetal invloeden van de wind in meer gelaagde situaties. Ten aanzien van zout-zoetaspecten werd de situatie op het Volkerak vóór de aanwezigheid van de Krammersluizen in bepaalde mate als indicatief beschouwd voor die op de noordelijke tak ná de voltooiing van de Oosterscheldewerken. Zij concludeerden dat de door de lokale wind opgewekte verticale circulatie van dezelfde orde kan zijn als de dichtheidsstromen, de gravitatiecirculatie, en de stratificatie substantieel kan versterken of beperken. Daarnaast kunnen tegelijk opgewekte windgolven de verticale turbulente uitwisseling versterken en daarmee de gravitatiecirculatie significant beperken.

Op plaatsen met relatief sterke getijbeweging, zoals vrijwel overal op de Oosterschelde, is de bijdrage van windgolven aan de turbulente uitwisseling meestal sterk ondergeschikt aan die van het getij. Op plaatsen met weinig horizontaal getij, zoals in de huidige situatie nabij de sluizen in de compartimenteringsdammen, kan ze wél van betekenis zijn.

De belangrijkste invloed van de temperatuur op de zoutgehalteverdeling is die op de verdamping, waar in het voorgaande al is op ingegaan. De luchttemperatuurverschillen binnen het Deltagebied zijn klein. Verschillen in watertemperatuur tussen kustgebied en estuarium van maximaal enkele graden treden op door de snellere aanpassing in de ondiepere gebieden, zoals vooral de Kom, aan met name de seizoensvariaties van de luchttemperatuur. In de winter is de temperatuur in de Kom 0.5 tot 1.5 °C lager dan in de monding en in de zomer 1 °C hoger. Zoals elders genoemd kunnen deze verschillen incidenteel, in relatief extreme situaties, wél zodanig grote verschillen in verdamping veroorzaken dat het zoutgehalte in de Kom hoger wordt dan in de monding (Dronkers, 1980). De dichtheidsverschillen door temperatuurverschillen zijn vrijwel overal verwaarloosbaar ten opzichte van die door de verschillen in zoutgehalte.

III-2 VERANDERINGEN EN INGEPEN IN DE OOSTERSCHELDE EN OMGEVING

De Oosterschelde vormt een deel van de delta van de grote rivieren Rijn, Maas en Schelde. Al sinds lange tijd voor het begin van de jaartelling is de monding gesitueerd tussen de eilanden Walcheren en Schouwen. Tot in de Middeleeuwen vormde de Oosterschelde de belangrijkste benedenloop van de rivier de Schelde. Tegelijk vormde ze een deel van een systeem van "tidal inlets" en getijgeulen, die zowel onderling als met het riviersysteem van Rijn, Maas en Schelde was verbonden (van den Berg, 1986).

In de Middeleeuwen vond de toenmalige zeearm de Honte een verbinding met de rivier de Schelde, wat het begin vormde van de ontwikkeling van de latere Westerschelde. Vanaf die tijd is de Westerschelde steeds belangrijker geworden als monding van Schelde, ten koste van de Oosterschelde. Tegelijk met de hiermee gepaard gaande afname van de zoetwaterafvoer nam in de eeuwen erna de invloed van de zee op de Oosterschelde sterk toe door uitbreidingen van de komberging in vooral noordelijke en oostelijke richting. Dit was vooral het gevolg van blijvende inundaties van grote oppervlakten land na overstromingen. Maaiveldverlagingen door turfwinning hadden deze overstromingen door stormvloed bevorderd en maakten het opnieuw droogleggen met de toenmalige beperkte middelen moeilijker. Na het begin van substantiële beïnvloeding door de mens van de structuur en waterhuishouding van het gebied met de eerste bedijkingen in de 10^e en 11^e eeuw, was dit de volgende belangrijke vorm van beïnvloeding.

Samenhangend met de verruiming van de mond door de getijvolumetoename ontwikkelde de hoofdgeul in het begin van de 15^e eeuw een sterke meander in noordelijke richting, die het toenmalige eiland Schouwen aanzienlijk verkleinde. Tegen het midden van de 16^e eeuw vonden vooral in het uiterste oostelijke deel nog grote uitbreidingen plaats door overstromingen door zware stormvloed. Deze uitbreidingen naar noorden en oosten zijn in die zin relevant, dat later hierdoor de verbindingen met de benedenlopen van de grote rivieren, Rijn en Maas, konden ontstaan.

In de volgende eeuwen kregen de bedijkingen en inpolderingen weer de overhand. Toch bleef de invloed van de Oosterschelde zich in noordoostelijke richting uitbreiden, waarmee tegelijk ook, met vergroting van komberging en getijvolume, de invloed van de zee op de Oosterschelde zelf toenam. Vrij plotseling ging namelijk vanaf het begin van de achttiende eeuw het Zijpe, de tot dan zeer ondiepe verbinding tussen Oosterschelde- en Grevelingenbekken, eroderen (van den Berg, 1986). Hiermee ontstond een substantiële verbinding tussen het z.g. zuidelijke Deltabekken, de Oosterschelde en Westerschelde, en het noordelijke Deltabekken, gevormd door de mondingen van de grote rivieren. De Oosterschelde nam, met de verdieping van deze verbinding in de loop van de 18^e eeuw, een toenemend deel van zowel het getijvolume als van de zoetwaterafvoer van het Krammer-Volkerak over van de Grevelingen.

De volgende grote verandering in de waterhuishouding van het zuidelijke Deltabekken was de definitieve scheiding van de regimes Oosterschelde en Westerschelde met de aanleg van Kreekrakdam en Sloedam in respectievelijk 1867 en 1871. Onder andere ten aanzien van de overname van de zoetwaterafvoer van de Schelde door de Westerschelde werd hiermee een ontwikkeling voortgezet, die in feite, zoals genoemd, al was begonnen in de vroege Middeleeuwen met het ontstaan van de Westerschelde.

De latere verlanding van het Kreekrak, de verbinding tussen Oosterschelde en Westerschelde, werd "voorbereid" door de grote overstromingen van grote delen van oostelijk Zuid-Beveland in de 15^e en vooral de 16^e eeuw.

Zoals genoemd waren deze inundaties bevorderd en was droogmaking lange tijd niet mogelijk door de door de mens veroorzaakte sterke maaiveldverlagingen. Door de ermee gepaard gaande kombergingsveranderingen verplaatste zich een wantij van het oostelijke

deel van de Westerschelde naar het noorden, naar de verbinding met de Oosterschelde (de Vos en van Heeringen, 1997).

Door de scheiding tussen Oosterschelde en Westerschelde daalde het chloridegehalte in de Westerschelde, die de gehele zoetwaterafvoer van de Schelde te verwerken kreeg, en steeg het chloridegehalte van de Oosterschelde. Deze stijging is van doorslaggevende betekenis geweest voor de opkomst van de oesterteelt in het gebied (Anonymus IV, 1978; Anonymus V, 1979).

Vrijwel tegelijk met de afdammingen van Kreekrak en Sloe werd tussen 1868 en 1872 in het noordelijke deel van het Deltagebied de Nieuwe Waterweg gegraven, omdat de natuurlijke toegang naar Rotterdam, het Brielse Gat en de Brielse Maas, sterk verzandde (Peelen, 1967). Sinds de aanleg is de diepte ruim verdubbeld; in 1966 bedroeg die rond 18 m (Anonymus II, 1968). Aanleg en verdieping van de Nieuwe Waterweg zijn in zoverre relevant voor de zoutgehalteverdeling in de Oosterschelde, dat het deel van de zoetwaterafvoer van de grote rivieren dat via Hollands Diep en Haringvliet werd afgevoerd erdoor moet zijn beïnvloed. Van dit deel werd weer een deel via het Volkerak afgevoerd naar Grevelingen en Oosterschelde.

De afdammingen van Kreekrak en Sloe waren de eerste directe grote menselijke ingrepen die invloed hadden op het niveau van hele estuaria en de laatste voordat in de tweede helft van de twintigste eeuw werd begonnen met de Deltawerken. Met de afdammingen ontstond wat gezien wordt als het "ouderwetse Zeeland": een gebied in open verbinding met de zee, maar landinwaarts onderhevig aan een groot complex van menselijke invloeden (Anonymus V, 1979). Deze situatie, die dus bestond van ongeveer 1870 tot 1960 (zie ook fig.3.1 op blz.24), vormde in het Deltagebied de waterhuishoudkundige uitgangssituatie voor de Deltawerken, die daarin ingrijpende veranderingen zouden aanbrengen.

Hierna worden de werken beschreven die in het kader van de Deltawerken achtereenvolgens werden uitgevoerd en die invloed op de waterhuishouding van de Oosterschelde kunnen hebben gehad. Figuur 3.3 geeft een overzicht van de ruimtelijke situering van deze werken.

- 1960 Gereedkoming Zandkreekdamb
- 1961 Gereedkoming Veerse Gatdam
Met de aanleg van Zandkreekdamb en Veerse Gatdam ontstond het Veerse Meer. De voormalige Zandkreek werd hoofdzakelijk gevuld en geleegd via het Veerse Gat. Ter plaatse van de Zandkreekdamb lag namelijk een wantijgebied. Het overgrote deel van het zoete en brakke water, dat uit de polders en via het Kanaal door Walcheren op de Zandkreek werd gebracht, werd via het Veerse Gat rechtstreeks naar de Noordzee afgevoerd (Anonymus IV, 1979). Sinds de sluiting van het Veerse Gat kan deze afvoer alleen nog plaatsvinden via de Oosterschelde door schutten en spuien met de Zandkreeksluis.
- 1965 Gereedkoming Grevelingendamb
Door aanleg van de Grevelingendamb werden de verbindingen verbroken tussen enerzijds Grevelingen en anderzijds Volkerak/Krammer en noordelijke tak van de Oosterschelde. Eventueel via het Volkerak aangevoerd zoet rivierwater kon nu alleen nog via de noordelijke tak van de Oosterschelde worden afgevoerd.
Omdat de Grevelingendamb werd aangelegd in een wantijgebied waren de gevolgen voor het horizontale en verticale getij beperkt (Anonymus V, 1979). Desondanks veranderden de getijvolumes, met name op de noordelijke tak van de Oosterschelde, aanzienlijk (van den Berg, 1986).

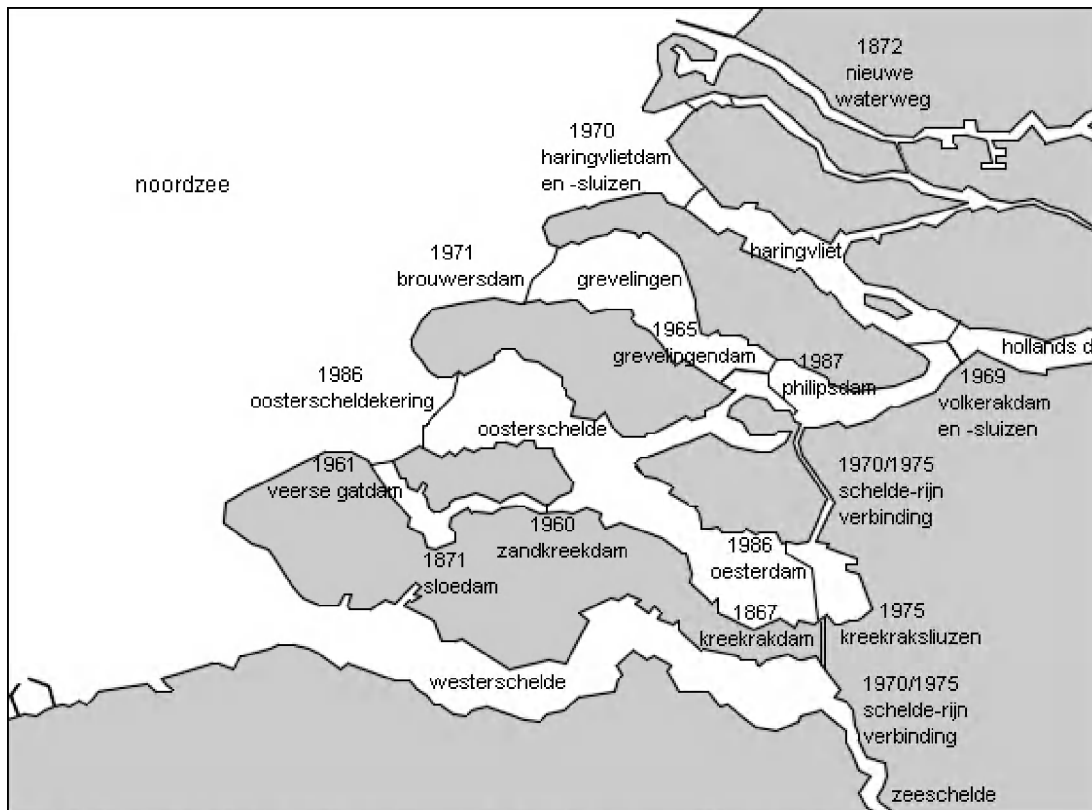


fig. 3.3 Overzicht deltawerken, die van invloed waren op Oosterschelde.

- 1969 Gereedkoming Volkerakdam- en sluizen
Het noordelijke en zuidelijke Deltabekken werden nu gescheiden door de Volkerakdam. Ze werd aangelegd als onderdeel van het systeem ter beheersing van waterstanden, stroomsnelheden, waterverdeling en verzilting in het noordelijk Deltabekken. In de praktijk werd in feite het beperken van de aanvoer van in toenemende mate vervuild water van de grote rivieren naar het zuidelijke Deltabekken een essentiële functie, waarvan noodzaak en belang niet in deze mate waren voorzien. De omvang van de aanvoer van rivierwater naar het zuidelijk Deltabekken werd nu afhankelijk van het spui- en schutbeheer van de Volkeraksluizen, in plaats van van de grootte van de afvoeren van de grote rivieren. Met spuien werd een "zoetwaterbel" aan de Volkerakzijde van de sluizen onderhouden, ter beperking van zouttransport naar en verzilting als gevolg daarvan van het Hollands Diep.
- 1970 Gereedkoming Haringvlietdam- en sluizen
Naast het keren van stormvloed en fungeren de sluizen in de Haringvlietdam als belangrijkste regelkraan voor de waterbeheersing van het noordelijk Deltabekken. Vóór de gereedkoming drong de getijbeweging vóór landinwaarts door, tot in de Biesbosch. Behalve bij zeer hoge afvoeren, als er ook veel rivierwater naar het zuidelijk Deltabekken ging, voerde het Haringvliet 50 á 60 % van de Rijn- en Maasafvoeren af naar de Noordzee.

Met de sluizen worden nu ongewenste gevolgen van hoge en lage afvoeren "weggeregeld". Naast verschillende kleinere belangen bij de waterverdeling in het gebied gaat het met name om het voorkomen van te hoge waterstanden en te hoge watersnelheden op de vaarwegen bij hoge afvoeren en om bestrijding van de verzilting, vooral die via de Nieuwe Waterweg, bij lage afvoeren. Bij Rijnaafvoeren lager dan 1500

m³/s staan de sluizen dicht en bij afvoeren hoger dan 6000 m³/s staan ze bij laagwater op zee helemaal open.

De zoetwateraanvoer "binnendoor" naar de Oosterschelde werd door de ingebruikneming van de Haringvlietsluizen niet beïnvloed, vanwege de aanwezigheid van de een jaar eerder gereedgekomen Volkerakdam. Wél kan er, waarschijnlijk geringe, invloed zijn geweest op de zoutgehalten van het kustwater in de Voordelta, vanwege de veranderde afvoerverdeling over Haringvliet en Nieuwe Waterweg.

- 1971 Gereedkoming Brouwersdam

Met de Brouwersdam ontstond het Grevelingenmeer. In 1965 waren met de gereedkoming van de Grevelingendam de rivierwaterafvoeren vanaf het Volkerak via de Grevelingen naar zee beëindigd en werd alleen nog de zoetwaterbelasting van de Grevelingen zelf geheel afgevoerd naar de Noordzee. Toen het laatste vanaf 1971 niet meer mogelijk was daalde het chloridegehalte op de Grevelingen en ontstond er een geringe zoetlast op de noordelijke tak van de Oosterschelde via de schutsluis bij Bruinisse. Na het gereedkomen van de spuisluis in de Brouwersdam in 1978 kon er weer verversing door uitwisseling met Noordzeewater plaatsvinden, waarmee ook het chloridegehalte op de Grevelingen op een hoger niveau kon worden gehouden.

- 1975 Ingebruikneming Kreekraksluizen

De Kreekraksluizen vormden bij de ingebruikneming de scheiding tussen de Kom van de Oosterschelde, met getijbeweging en zout water, en het getijloze, in open verbinding met de havens van Antwerpen staande, zuidelijke deel van de Schelde-Rijnverbinding. Het chloridegehalte in laatstgenoemd gebied wordt bepaald door het gehalte op de Beneden-Zeeschelde ter hoogte van Antwerpen en zoetwateraanvoer via kanalen en is veel lager dan op de Kom van de Oosterschelde. De Kreekraksluizen zijn ontworpen om het brakke water in de Antwerpse havens te scheiden van oorspronkelijk een zoete Oosterschelde en later het zoete Zoommeer. In de overgangssituatie van 1975 tot 1986, het jaar van sluiting van de Oesterdam, leverden ze een zoetwaterbelasting op de nog zoute Kom van de Oosterschelde.

In de jaren ervoor, in de eerste helft van de zeventiger jaren, waren ook de noordelijke delen van de Schelde-Rijnverbinding aangelegd. Voordien verbond de Eendracht de Krabbenkreek met de Kom van de Oosterschelde. Krabbenkreek en Eendracht werden gescheiden door een dam aan het oostelijke einde van de Krabbenkreek en de Eendracht werd verbonden met het Volkerak door het doorbaggeren van de Slaakdam tussen St-Philipsland en Noord-Brabant.

- 1983 Afsluiting Markiezaat

Met de Markiezaatskade werd 2130 ha ondiep gebied in de Kom van de Oosterschelde, het Markiezaat van Bergen op Zoom, oostelijk van de vaargeul van de Schelde-Rijnverbinding ingepolderd. Het getijvolume en de stroomsnelheden namen hierdoor af met 6 % in het westelijke deel van de Kom tot met 100 % ter plaatse van de dam.

- 1985-1987 Voltooiingsfase Oosterscheldewerken

In deze fase werden de stormvloedkering in de mond (1986) en de Oesterdam (1986) en de Philipsdam (1987), de compartimenteringsdammen, voltooid.

Hiermee kreeg de Oosterschelde haar huidige begrenzingen. Het getij en de omvang en wijze van aanvoer van de zoetwaterbelasting veranderden sterk.

De oppervlakte van de Oosterschelde verkleinde van 452 tot 351 km², het getijvolume verminderde van 2480 naar 1760 miljoen m³ en het getijverschil bij Yerseke daalde van 3.70 m naar 3.30 m +NAP. De zoetwaterbelasting verminderde van gemiddeld 70 naar 40 m³/s, de verblijftijden namen toe van 5-50 naar 10-100 dagen en de chloridegehalten werden vrijwel overal hoger.

Gedurende de voltooiingsfase werden, vanaf midden 1985 tot mei 1987, het getij en de zoetwaterbelasting in bepaalde fasen tijdelijk aanzienlijk sterker beïnvloed dan in de

eindsituatie. Dit was het gevolg van de gekozen fasering van de werken en van het beïnvloeden van het getij met de kering om bepaalde afbouwwerkzaamheden mogelijk te maken en de compartimenteringsdammen met zand te kunnen sluiten.

III-3 VERANDERINGEN IN BEPALENDE FACTOREN ZOUTGEHALTEVERDELING

In deze paragraaf worden de veranderingen in de tijd van de belangrijkste bepalende factoren voor de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde samengevat. Het gaat om:

- de structuur en de geometrie,
- de zoetwaterbelasting en de waterbeweging.

Deze beide categorieën veranderingen zijn weergegeven in respectievelijk de tabellen 3.3 en 3.4. Deze overzichten hangen nauw samen. De veranderingen in de structuur en geometrie waren de oorzaken van de veranderingen in zoetwaterbelasting en waterbeweging. Ze worden hierna in samenhang besproken.

Tabel 3.3 Veranderingen structuur en geometrie Oosterschelde na midden 19^e eeuw

	monding	midden- gebied	Kom	noordelijke tak	Krammer/ Volkerak	Ooster- schelde
vóór 1867						
verbindingen met omgeving	open naar Noordzee	kortsluitingen naar Noordzee en Westerschelde via Zandkreek	kortsluitingen n. Westerschelde via Kreekrak en naar noordelijke tak en Volkerak via Eendracht en Slaak	open naar Krammer/ Volkerak en kortsluiting naar Noordzee via Grevelingen	open naar Haringvliet en kortsluiting naar Noordzee via Grevelingen	open naar Noordzee, Westerschelde en noordelijk Deltabekken
1867-1960/'61						
verbindingen met omgeving	open naar Noordzee	kortsluiting naar Noordzee via Zandkreek	kortsluitingen naar noordelijke tak via Eendracht en tot aanleg Slaakdam (1884) naar Volkerak via Eendracht/Slaak	open naar Krammer/ Volkerak en kortsluiting naar Noordzee via Grevelingen	open naar Haringvliet en kortsluiting naar Noordzee via Grevelingen	open naar Noordzee en noordelijk Deltabekken
1961 - 1964						
verbindingen met omgeving	open naar Noordzee	verbinding met Veerse Meer via Zandkreeksluis	kortsluiting naar noordelijke tak via Eendracht	open naar Krammer/ Volkerak en kortsluiting naar Noordzee via Grevelingen	open naar Haringvliet en kortsluiting naar Noordzee via Grevelingen	open naar Noordzee en noordelijk Deltabekken
1964 - 1969						
verbindingen met omgeving	open naar Noordzee	verbinding met Veerse Meer via Zandkreeksluis	kortsluiting naar noordelijke tak via Eendracht	open naar Krammer/ Volkerak	open naar Haringvliet	open naar Noordzee en noordelijk Deltabekken
1969 - 1975						
verbindingen met omgeving	open naar Noordzee	verbinding met Veerse Meer via Zandkreeksluis	kortsluiting naar noordelijke tak via Eendracht	open naar Krammer/ Volkerak	verbinding met Haringvliet via Volkerak-sluizen	open naar Noordzee en Krammer/ Volkerak
1975-1986/'87 (geometrie op of t.o.v. NAP)						
verbindingen met omgeving	open naar Noordzee	verbinding met Veerse Meer via Zandkreeksluis	kortsluiting naar Volkerak via SRV en verbinding met havens Antwerpen via Kreekraksluis	open naar Krammer/ Volkerak	verbinding met Haringvliet via Volkerak-sluizen	open naar Noordzee en Krammer/ Volkerak
oppervlakte	10616 ha	10660 ha	12318 ha	4600 ha	7000 ha	38194 ha
wateroppervlakte	9464 ha	9625 ha	9976 ha	3187 ha	3931 ha	32252 ha
volume	1150 milj. m3	996 milj. m3	386 milj. m3	262 milj. m3	221 milj. m3	2794 milj. m3
diepte	12.15 m	10.35 m	3.86 m	8.24 m	5.62 m	8.66 m
na 1986/'87 (geometrie op of t.o.v. NAP)						
verbindingen met omgeving	verbinding met Noordzee via Oosterscheldekering	verbinding met Veerse Meer via Zandkreeksluis	verbinding met SRV/Zoommer via Bergsediepsluis	verbinding met Volkerak via Krammersluizen	verbinding met Haringvliet via Volkerak-sluizen	verbinding met Noordzee via Oosterscheldekering
oppervlakte	10616 ha	10660 ha	9200 ha	4600 ha	7000 ha	35076 ha
wateroppervlakte	9464 ha	9625 ha	8076 ha	3187 ha	3931 ha	30352 ha
volume	1150 milj. m3	996 milj. m3	333 milj. m3	262 milj. m3	221 milj. m3	2741 milj. m3
diepte	12.15 m	10.35 m	4.13 m	8.24 m	5.62 m	9.01 m

De veranderingen in de Oosterschelde zelf zijn waar mogelijk genuanceerd naar de vier te onderscheiden deelgebieden van de huidige Oosterschelde: monding, middengebied, Kom en noordelijke tak. Het Krammer/Volkerakgebied is in de overzichten meegenomen, vanwege de belangrijke invloed die het gebied tot 1987 had op de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde.

Als parameter voor de veranderingen van de waterbeweging is zoveel mogelijk het getijvolume gebruikt. Veranderingen van vloed- en ebvolumes geven een indicatie voor de (getijgemiddelde) watersnelheden en zeggen iets over wateruitwisseling en rondstromingen.

Uit het overzicht van de veranderingen van de structuur en geometrie in tabel 3.3 komt duidelijk naar voren hoe sinds de tweede helft van de vorige eeuw de Oosterschelde geleidelijk maar uiteindelijk heel sterk is geïsoleerd van de omringende watergebieden. Vóór 1867 had de Oosterschelde open natuurlijke verbindingen met de Noordzee, direct en via de Grevelingen, met het noordelijke Deltabekken, via Volkerak en Haringvliet, en met de Westerschelde, via Kreekrak en Sloe.

De enige nu overgebleven open verbinding is die met de Noordzee. Ook deze verbinding is minder open geworden: de doorstroomopening is afgenomen van ± 80.000 naar ± 18.000 m², waardoor het getijvolume rond 30 % kleiner werd, terwijl stormvloedten worden buitengesloten door de stormvloedkering.

De belangrijkste mijlpalen in deze ontwikkeling waren

- de scheiding met de Westerschelde in 1867-1870,
- de scheiding tussen noordelijk en zuidelijk Deltabekken door de Volkerakdam in 1969,
- de beperking van de verbinding met de Noordzee door de Oosterscheldekering in 1985/1986
- en de bekkenverkleining en scheiding van het achterland met de kompartimentering door Oesterdam en Philipsdam in 1986 en 1987.

Kleinere veranderingen met meer lokale invloed waren:

- de aanleg van de Slaakdam in 1884, waarmee de kortsluiting van Kom en Krabbenkreek met het Volkerak ophield te bestaan,
- de aanleg van Zandkreekdijk en Veerse Gatdam in 1960 en 1961 waardoor het Veerse Meer werd gevormd,
- de aanleg en voltooiing van de Grevelingendijk in 1962-1964, waarmee een kortsluiting naar de Noordzee wegviel,
- de aanleg van Schelde-Rijnverbinding en Kreekraksluizen in 1970-1975, waardoor de Kom tijdelijk weer open was verbonden met het Volkerak en via sluizen in verbinding stond met de Antwerpse havens,
- de sluiting van de Markiezaatsdam in 1983, waardoor de Kom met rond 2100 ha werd verkleind.

De veranderingen in structuur en geometrie veroorzaakten veranderingen in zoetwaterbelasting en waterbeweging. Hierna worden deze veranderingen beschreven; in tabel 3.4 zijn ze voor zover mogelijk ook kwantitatief samengevat.

Situatie vóór de scheiding met de Westerschelde in 1867/1871

Vóór 1867 was de rivierwateraanvoer naar de Oosterschelde afkomstig van Rijn, Maas, Brabantse rivieren én Schelde. Over deze periode werden in de beschikbare literatuur verder geen kwantitatieve gegevens van zoetwateraanvoer en zoutgehalten aangetroffen. Wél wordt aangegeven dat de Scheldeafvoer voor het grootste deel van de Oosterschelde belangrijker was voor niveau en fluctuaties van de zoutgehalteverdeling dan de aanvoer uit het noorden via het Volkerak (Anonymus IV, 1978).

Deze grotere invloed werd waarschijnlijk bepaald door een vloedoverschot van rond 20 miljoen m³ van Westerschelde naar Oosterschelde (van Veen, 1944). Door het ondiepe

Kreekrak werden per getij enkele tientallen miljoenen m³ water uit de relatief zoete bovenlaag van het oostelijke deel van de Westerschelde op de Oosterschelde gebracht. Bekend is dat in de eerste helft van deze eeuw er vanuit het noorden alleen substantiële zoetwateraanvoer plaatsvond bij hoge rivierafvoeren. Waarschijnlijk was dat in bepaalde mate ook al het geval vóór 1867.

Situatie ná scheiding met Westerschelde en vóór voltooiing Volkerakdam (1867 - 1969)

Uit de dominantie van de zoetwateraanvoer uit het zuiden vóór de scheiding van Oosterschelde en Westerschelde kan worden geconcludeerd dat met deze scheiding de zoetwateraanvoer naar de Oosterschelde tenminste werd gehalveerd. De toename van het gemiddelde niveau en de afname van de fluctuaties van de zoutgehalten waren zo groot dat vanaf die tijd in de Kom de oestercultuur kon worden ontwikkeld.

Na 1867 werd de rivierwateraanvoer vanaf Rijn, Maas en Brabantse rivieren dominant. Tot 1969, de gereedkoming van de Volkerakdam, stond de Oosterschelde in open verbinding met de benedenlopen van de grote rivieren, Krammer, Volkerak en Hollands Diep. De totale omvang van de afvoer van de grote rivieren werd onder gemiddelde omstandigheden voornamelijk bepaald door die van de Rijn. Naarmate de afvoeren groter werden nam het aandeel van de Maas toe.

Gemiddeld bedraagt de Rijnafoer 2200 m³/s. Gedurende gemiddeld enkele tientallen dagen per jaar komen afvoeren voor van 4000 tot 6000 m³/s. Zowel de afzonderlijke afvoeren als het verloop gedurende en het gemiddelde over kortere of langere perioden kunnen aanzienlijke afwijkingen van deze statistisch bepaalde waarden vertonen.

Naar de omvang, de omstandigheden en het voorkomen in de tijd van de van de grote rivieren afkomstige zoetwateraanvoer via het Volkerak, en de verdeling over Grevelingen en noordelijke tak van de Oosterschelde, hebben alleen zeer indirecte analyses en berekeningen kunnen plaatsvinden.

Behalve in bijzondere omstandigheden ging er maar een klein deel van de afvoer van de grote rivieren door Hellegat en Volkerak naar Grevelingen en/of Oosterschelde. Volgens Anonymus I (1966) ging "als regel" 90 % van de rivierafvoeren via Haringvliet en Nieuwe Waterweg, in een verdeling 60 : 40, naar de Noordzee, zodat rond 10 % naar het zuiden moet zijn gegaan. In de latere literatuur (Anonymus II, 1968; Anonymus V, 1979) komt sterker naar voren dat de afvoer van zoet water naar het zuiden vrijwel alleen optrad bij hogere afvoeren. Bekend is dat de afvoeren naar het Volkerak in extreme situaties, hoge afvoeren en/of bijzondere getijomstandigheden, sterk konden toenemen.

Onder gemiddelde omstandigheden trad er een vloedoverschot op van Volkerak naar Haringvliet. Dit vloedoverschot was de oorzaak van de zogenoemde achterwaartse verzilting van dit deel van het Haringvliet, die vooral werkzaam was bij lage afvoeren en die hier belangrijker was dan de zoutindringing via de mond van het Haringvliet.

Volgens Peelen (1969) bedroeg de zoetwateraanvoer naar het zuiden via het Volkerak gemiddeld 50 m³/s. Wolff (1973) concludeert, mede gebaseerd op Peelen (1969), dat er dan, met de 15 - 20 m³/s van de Brabantse rivieren, vóór 1964 via Grevelingen en Oosterschelde en na 1964 uitsluitend via de Oosterschelde 65 - 70 m³/s zoet rivierwater uit het noorden naar de Noordzee werd afgevoerd. De afsluiting van de Grevelingen zou volgens de literatuur weinig invloed hebben gehad op de omvang van de aanvoer en de afvoer via de Oosterschelde, wat zou betekenen dat voor 1964 ook al het grootste deel via de Oosterschelde werd afgevoerd.

Tabel 3.4 Veranderingen zoetwaterbelasting en waterbeweging Oosterschelde na midden 19^e eeuw

	monding	midden- gebied	Kom	noordelijke tak	Krammer/ Volkerak	Ooster- schelde
vóór 1867						
zoetwater- belasting en	Sloe: vloedvolume	32	Kreekrak: vloedvolume	33	aanvoer van relatief zoet water door Volkerak bij hoge afvoeren	rivierafvoeren Schelde (domi-

getijvolumes	ebvolume 10 vloedoverschot 22 vloedoverschot van kustwater van Westerschelde naar mond via Veerse Gat en naar middengebied via Zandkreek	ebvolume 12 vloedoverschot 21 (vloed)overscho t van relatief zoet water van Westerschelde naar Kom	van Rijn en Maas, aangevuld met afvoeren Brabantse rivieren; afvoer deels naar Noordzee via Grevelingen, deels naar Oosterschelde: naar noordelijke tak via Krammer en naar Kom via Slaak/ Eendracht	nant), Rijn en Maas bepalen niveau en varia- ties zoutge- halteverdeling; alleen bij hoge rivierafvoer aanvoer Rijn- en Maaswater		
* getijvolumes volgens van Veen (1944);						
1867 - 1960						
zoetwater- belasting	n.slagov./pold.; zoetwaterbelasting op Zandkreek en Veerse Gat gaat grotendeels via Veerse Gat rechtstreeks n. Noordzee (zie getijvolumes); rondstroming (vloedoverschot) van 40 milj. m3 van Noordzee n. noordelijke tak; uitwisseling m. zoetere Kom;	n.slagov./pold.; uitwisseling met middengebied; zwakke uitwis- seling met zoe- tere noordtak via Eendracht en tot 1884(Slaakdam) met Volkerak	n.slagov./pold.;aanvoer zoet water door Volkerak van hoge Rijn/Maas-afvoeren en van Brabantse rivieren; afvoer zoet water naar Grevelingen /Noordzee, noordelijke tak en Kom (tot 1884) via Slaak/Eendracht; rondstroming 40 milj. m3 vanaf mond via middengebied naar Krammer/Volkerak	niveau en varia- ties zoutgehalte- verdeling wor- den bepaald door bovenge- middelde Rijn- /Maasafvoeren;		
getijvolumes	vloedvol. 1130 ebvolume 1090 Veerse Gat: vloedvolume 70 ebvolume 70	geen waarden getijvolumes be- schikbaar; Zandkreek: vloedvolume 10 ebvolume 10	geen waarden getijvolumes be- schikbaar;	vloed 195 eb 155	n. Grevelingen: vloed 70 eb 45 n. Haringvliet: vloed 120 eb 105	vloedvol. 1130 ebvolume 1090 rondstroming van mond naar Grevelingen en Haringvliet
* getijvolumes situatie 1959 volgens van den Berg (1986)						
1960-1969						
zoetwater- belasting	n.slagov./pold.: orde 1 m3/s; rondstroming: 20 milj. m3 van Noordzee naar middengebied;	n.slagov./pold.: orde 1 m3/s; schutten/spuien Zandkreeksluis: orde 2 m3/s; rondstroming: 20 milj. m3 van monding naar noordelijke tak	n.slagov./pold.: orde 1 m3/s; uitwisseling met zouter midden- gebied; zwakke uitwis- seling met zoetere noordelijke tak	n.slagov./pold.: orde 3 m3/s; zoetwateraanvoer van hoge Rijn/ Maasafvoeren en v. Brab. rivieren: orde 50-100 m3/s jaargemiddeld; zoetwaterafvoer na sluiting Greve- lingendam (1964) geheel via noor- delijke tak O'schelde rondstroming: 20 milj. m3 van mid- dengebied naar Haringvliet	niveau en varia- ties zoutgehalte- verdeling wor- den bepaald door bovenge- middelde Rijn- /Maasafvoeren; polders 6 sluizen 2 rivieren 50- 100	
getijvolumes	vloed 1180 eb 1160	vloed 860 eb 840		vloed 250 eb 230	vloed 120 eb 100	vloed 1180 eb 1160
* polderlozingen geschat uit periode 1969-1985; * getijvolumes situatie 1968 (mét Grevelingendam) volgens van den Berg (1986)						
1969-1985						
zoetwater- belasting	n.slagov./pold. 1 sluizen 0 totaal 1	n.slagov./pold. 1 Zandkr.sluis. 2 totaal 3	n.slagov./pold. 1 Kreekr.sluis 3 totaal 4	n.slagov./pold. 1 Volkerak 50 totaal 51	n.slagov./pold. 2 Volkeraksluis 33 Brab.rivieren 15 totaal 50	n.slagov./pold. 4 sluizen 5 Volkerak 50 totaal 59
getijvolumes	vloedv. 1240 berging 275	vloedv. 965 berging 265	vloedv. 420 berging 420	vloedv. 280 berging ≈ 80	vloedv. ≈ 200 berging ≈ 200	vloedv. 1240
verblijftijd	20	60	100	65	80	10 - 110
* zoetwaterbelastingen 1978 volgens Dronkers(1980); * belasting Kreekraksluizen vanaf 1975; * belasting op Krammer/Volkerak vanaf 1977 gemiddeld 50 m3/s met spuiedbiet Volkeraksluizen als sluitpost; * getijvolumes en verblijftijden volgens Anonymus VIII						
* waterbelasting Oosterschelde is som vier deelgebieden						
1985 - 1987 voltooiingsfase Oosterscheldewerken, zie paragraaf 4.3						
vanaf 1987						
zoetwater- belasting	n.slagov./pold. 1 sluizen 0 totaal 1	n.slagov./pold. 1 Zandkr.sluis 2 totaal 3	n.slagov./pold. 1 Bergsedijsl. 0 totaal 1	n.slagov./pold. 1 Krammersl. 8 totaal 9	n.v.t.	n.slagov./pold. 4 sluizen 10 totaal 14
getijvolume	vloedv. 880 berging 255	vloedv. 625 berging 250	vloedv. 295 berging 295	vloedv. 80 berging 80	n.v.t.	vloedv. 880
verblijftijd	40	100	200	150	n.v.t.	20 - 220
* getijvolumes volgens Anonymus VIII (1991)						
hele overzicht:						
* waterbelastingen in m3/s zoet water jaargemiddeld, * getijvolumes in miljoenen m3, * verblijftijden in aantal getijden						

Periode ná gereedkomen Volkerakdam en vóór voltooiing Oosterscheldekering en compartimenteringsdammen (1969 - 1985)

De voltooiing van de Volkerakdam en -sluizen in 1969 is zeer ingrijpend voor de zoetwataanvoer naar de Oosterschelde. De variaties in de rivierafvoeren werken nu niet meer door in de aanvoer vanaf de landzijde. De afvoer van de grote rivieren heeft nu alleen nog invloed via het zoutgehalte van het kustwater.

De binnen de totale zoetwaterbelasting nog steeds dominante aanvoer vanuit het noorden wordt nu geregeld met de Volkeraksluizen. Omdat het ertoe geïnstalleerde zout-zoetscheidingssysteem niet volledig voldeed werd het spuibeheer vanaf het begin van de zeventiger jaren geheel gericht op het beperken van het zoutbezwaar op het Haringvliet. Hiertoe werd door spuien aan de Volkerakzijde van de sluizen een “zoetwaterbel” onderhouden. Na een aantal jaren experimenteren met wisselende spuidebieten komt men in het midden van de zeventiger jaren uit op een meest wenselijke omvang van rond 25 m³/s.

De zoetwaterbelasting vanaf het Volkerak op de Oosterschelde varieert nog wel, hoewel aanzienlijk minder dan voorheen, door de wisselende afvoeren van de Brabantse rivieren. Mede uit onderzoeksbelangen, het onderzoek naar de gevolgen van de Oosterscheldewerken, wordt er vanaf 1977 naar gestreefd de zoetwaterbelasting op het Krammer/Volkerak, van Volkeraksluizen en Brabantse rivieren samen, gemiddeld in de tijd op een ongeveer constant niveau van 50 m³/s te houden. Dit gebeurt door het spuidebiet van de Volkeraksluizen als sluitpost of correctie achteraf te hanteren op voorspelde of opgetreden afvoeren van de Brabantse rivieren. Relatief kort durende, soms substantiële afwijkingen blijven echter optreden, vanwege de nooit volledige voorspelbaarheid van de afvoeren.

Als proef werd van november 1979 tot april 1980 de nagestreefde belasting verhoogd van 50 naar 100 m³/s.

Als de schattingen van de jaargemiddelde belasting vóór de ingebruikneming van de Volkeraksluizen van 65 - 70 m³/s ongeveer juist zijn, is de omvang op jaarbasis van de zoetwaterbelasting na de ingebruikneming niet substantieel veranderd. Essentieel verschillend is wél de dosering: voorheen werd de totale jaarbelasting aangevoerd gedurende een beperkt aantal kortere perioden met hoge afvoeren, terwijl de aanvoer nu relatief geleidelijk verdeeld over het jaar plaatsvindt.

Voltooiingsfase Oosterscheldekering en compartimenteringsdammen (1985 - 1987)

In de voltooiingsfase van de Oosterscheldekering en de compartimenteringsdammen, van ongeveer midden 1985 tot en met april 1987, werd het getij soms tijdelijk sterker gereduceerd dan in de nieuwe situatie het geval zou zijn.

In de Kom waren al eerder kleinere lokale beïnvloedingen opgetreden: door de sluiting van de Markiezaatskade, die een getijvolumereductie van 6 % in het westelijke deel van de Kom tot 100 % ter plaatse veroorzaakte, en door de aanleg van het damvak Speelmansplaten en de sluiting van het Marollegat in de toekomstige Oesterdam. Deze werken moeten ook invloed hebben gehad op de zoetwaterbelasting op de Kom door de Kreekraksluizen en het riviertje de Zoom.

Vanaf midden 1985 tot mei 1986 werd de doorstroomopening van de Oosterscheldekering verkleind tot de nieuwe omvang door de plaatsing van de zogenoemde dorpelbalken. Omdat de compartimenteringsdammen nog niet waren gesloten, namen de getijverschillen met 20 tot 30 % af, ongeveer tweemaal zoveel als in de eindsituatie, en de getijvolumes met ruim 25 %, iets minder dan in de eindsituatie. Bij Yerseke nam het getijverschil af van 3.70 naar m. Korttijdelijk waren de reducties soms groter door het dichtzetten van groepen schuiven in de kering voor afbouwwerkzaamheden. De Oosterscheldekering was operationeel in oktober 1986 en werd meteen in diezelfde maand ingezet om de zandsluiting van het Tholense Gat in de Oesterdam mogelijk te maken.

Gedurende enkele weken voorafgaande aan de sluiting werd geleidelijk het getij steeds sterker gereduceerd door steeds meer schuiven dicht te zetten en in de laatste fase werd gedurende anderhalve dag het getij geheel “stilgelegd”.

Bij gesloten Oesterdam en nog open Philipsdam, tussen oktober 1986 en april 1987, namen de getijverschillen weer toe, maar waren de getijvolumes, en daarmee de stroomsnelheden, nog wat kleiner. In die situatie werd het gebied achter de Oesterdam geheel gevuld en geleegd via het Volkerak en de Eendracht. Dit veroorzaakte in de winter van 1986/1987 sterk verhoogde stroomsnelheden op de Schelde-Rijnverbinding en een geheel gewijzigde waterhuishoudkundige situatie in het gebied. Om deze snelheden binnen voor de scheepvaart aanvaardbare grenzen te houden werd het getij verder gereduceerd met de Oosterscheldekering, wat op ook andere plaatsen een verdere reductie van de snelheden veroorzaakte.

Voorafgaand en tijdens de sluiting van de Philipsdam, de Krammersluiting, in april 1987 werd het getij volgens eenzelfde scenario gereduceerd als bij de sluiting van het Tholense Gat, echter langduriger en sterker. Met de aanwezigheid van de Philipsdam nam het getijverschil bij Yerseke weer toe tot rond 3.25 m, bereikten de getijvolume- en snelhedenreducties de eindwaarden van op systeemniveau rond 30 % en viel het getij ten oosten van de compartimenteringsdammen geheel weg.

De getijreducties verminderen de menging en verhogen de kans op gelaagdheid. Vanwege de mogelijke schadelijke effecten daarvan op milieu en visserij werden de kansen op te lage zoutgehalten en stratificatie en de mogelijke maatregelen die kansen te verkleinen uitgebreid onderzocht (Ockhuysen en Robaczewska, 1985). Onder andere werd voorafgaande en tijdens de zandsluitingsoperaties de zoetwatertoevoer zoveel mogelijk beperkt en werd met de hevel in de Grevelingendam relatief zout water aangevoerd naar de noordelijke tak. De gehele voltooiingsfase is intensief begeleid met metingen van getij, zoutgehalten en ook biotische aspecten.

Voorafgaand aan en tijdens deze voltooiingsfase is veel kennis opgedaan en informatie verzameld over aspecten die ook het onderwerp vormen van deze historische analyse, zoals de relaties tussen getijbeweging, zoetwateraanvoer en zoutgehalteverdelingen en de invloed van veranderingen hiervan op biotische aspecten. De gehele periode duurde echter relatief kort en binnen deze periode veranderden de omstandigheden vaak weer aanzienlijk. Ook waren die omstandigheden in de meeste gevallen tamelijk specifiek en extreem. Op het niveau van deze historische analyse vormt deze voltooiingsfase daarom geen relevante en karakteristieke fase in de ontwikkeling van de Oosterschelde en zal er hier niet verder op worden ingegaan. Voor mogelijk leerzame detailaspecten of later alsnog relevant blijkende informatie zal moeten worden teruggegaan naar schaars aanwezige deelevaluaties of naar de basisinformatie. Van der Wekken (1987a, 1987b) beschreef de opgetreden zout-zoetontwikkelingen tijdens de finale sluitingsoperaties van Oesterdam (1986) en Philipsdam (1987).

De huidige situatie (ná 1987)

De ingrijpendste veranderingen die optraden met de voltooiing van de Oosterscheldekering en de compartimenteringsdammen, waarmee de "huidige situatie" inging in 1987, waren de vermindering met rond 80 % van de tot dan voor de totale zoetwaterbelasting dominante open aanvoer vanaf het Volkerak en de afname van de getijvolumes, en daarmee van de (gemiddelde) getijsnelheden, met rond 30 %.

Op het niveau van de deelgebieden was de invloed van de combinatie van deze veranderingen in de noordelijk tak verweg het grootste. Daar veranderde het met gemiddeld 50 m³/s zoet water overeenkomende eboverschot van water met een zoutgehalte van 10 tot 15 g Cl/l in het Krammer in een directe lozing van zoet water van gemiddeld 8 m³/s door de Krammersluizen. Daarnaast namen de getijsnelheden op de noordelijke tak af met 70 % bij Stavenisse tot 100 % bij de Philipsdam.

In de Kom viel met de aanleg van de Oesterdam de belasting van 3 m³/s door de Kreekraksluizen weg en namen de getijvolumes en getij(gemiddelde)snelheden af met 30 % bij Gorishoek tot 100 % bij de Oesterdam.

Uit het verloop in het verleden van structuur, geometrie, zoetwaterbelasting en waterbeweging zijn samenvattend een viertal op systeemniveau duidelijk verschillende fasen te onderscheiden:

- de situatie vóór de afscheiding van de Westerschelde in 1867/1871, waarin de zoetwatertoevoer rechtstreeks en volledig wordt gedomineerd door de natuurlijke omvang en fluctuaties van de afvoeren van Schelde, die toen de grootste invloed had, en van Rijn en Maas,
- de situatie ná de afscheiding van de Schelde en vóór de scheiding tussen noordelijk en zuidelijk Deltabekken door de Volkerakdam, van 1867/1871 tot 1969, waarin de zoetwateraanvoer nog steeds werd gedomineerd door de natuurlijke omvang en fluctuaties van de afvoeren van de grote rivieren, maar waarin het voorheen dominerende aandeel van de Schelde is weggevallen,
- de situatie ná de scheiding van noordelijk en zuidelijk Deltabekken door de Volkerakdam en vóór de voltooiing van de Oosterscheldekering en compartimenteringsdammen, tussen 1969 en 1985/1987, waarin de rivierwateraanvoer vanaf het Volkerak naar de noordelijke tak gemiddeld in de tijd nog ongeveer dezelfde omvang heeft en dominant is, maar waarin de grotere fluctuaties worden “weggemiddeld” via het spuibeheer van de Volkeraksluizen,
- de situatie ná de voltooiing van Oosterscheldekering en compartimenteringsdammen, ná 1987, waarin de zoetwaterbelasting en de getijvolumes respectievelijk met 70 en 30 % zijn afgenomen en de omvang en de fluctuaties van de afvoeren van grote en Brabantse rivieren zijn niet meer doorwerken.

Van de laatste drie perioden worden in hoofdstuk IV, paragrafen IV-2 t/m IV-4, de opgetreden zoutgehalteverdelingen beschreven, voorzover die aan de beschikbare literatuur konden worden ontleend. De meeste tijd en aandacht is besteed aan de beide voorlaatste fasen, vóór en tijdens de uitvoering van de Deltawerken.

De huidige situatie is tot nu toe alleen summier beschreven in algemene brede evaluaties (Anonymus VIII, 1991; van Berchum en Wattel, 1997). Ze is voorzover mogelijk als referentie gebruikt voor de beide voorgaande perioden. Een nadere, eigenlijk noodzakelijke analyse van de zoutgehalteverdelingen in de huidige situatie zou moeten teruggaan naar de basisgegevens, wat buiten de opzet en doelstelling van deze literatuurstudie valt.

In het historische verloop vanaf het midden van de vorige eeuw van de bepalende factoren voor de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde zijn een aantal belangrijke consistente grote lijnen te onderkennen:

- een doorgaande afname van de zoetwaterbelasting: waarschijnlijk tenminste een halvering rond 1870 bij de afscheiding van de Westerschelde, een mogelijk geringe afname in 1969 met het gereedkomen van de Volkerakdam en een afname met 70 % in 1987 met het gereedkomen van de Philipsdam,
- een voor de afname van de totale zoetwaterbelasting bepalende afname van het directe aandeel van de rivierafvoeren,
- een verschuiving van het aandeel en de dominantie van de verschillende rivieren in de totale rivierwateraanvoer: van dominante Scheldeafvoeren vóór 1867/1871, naar sterk dominante Rijn/Maasafvoeren tussen 1867 en 1969, een sterk verminderde dominantie van Rijn/Maasafvoeren tussen 1969 en 1987 en een beëindiging en mogelijk omkering ervan ná 1987,
- een doorgaande intensivering van de waterbeweging tot 1985, tot uitdrukking komend in de toenemende getijvolumes en de daarmee gepaard gaande toenemende watersnelheden,
- resulterend, ondanks de afname van het getijvolume in 1985/1987, een doorgaande verschuiving van de dominante invloed op niveau en variaties van de zoutgehalteverdeling van de rivieren naar de zee.

IV ZOUT-ZOETOVERGANGEN IN DE OOSTERSCHELDE IN HET VERLEDEN

In dit hoofdstuk worden de in het verleden opgetreden zout-zoetovergangen beschreven. Zout-zoetovergangen of gradiënten hebben de meeste zeggingskracht als ze worden uitgedrukt in het ruimtelijke verloop van de op een bepaald tijdstip of gemiddeld over een korte periode optredende zoutgehalten. Het gaat om de ongeveer gelijktijdig op verschillende in elkaars nabijheid gelegen locaties optredende (gemiddelde) zoutgehalten. De overgangen of gradiënten kunnen worden uitgedrukt als het ruimtelijke verloop van de momentane zoutgehalten bij de hoog- en laagwaters, bij de hoog- en laagwaterkenteringen of bij de gemiddelde waterstanden of als het ruimtelijk verloop van getij-, dag-, decade-, maand- of jaargemiddelde waarden. Al deze parameters komen voor in de literatuur.

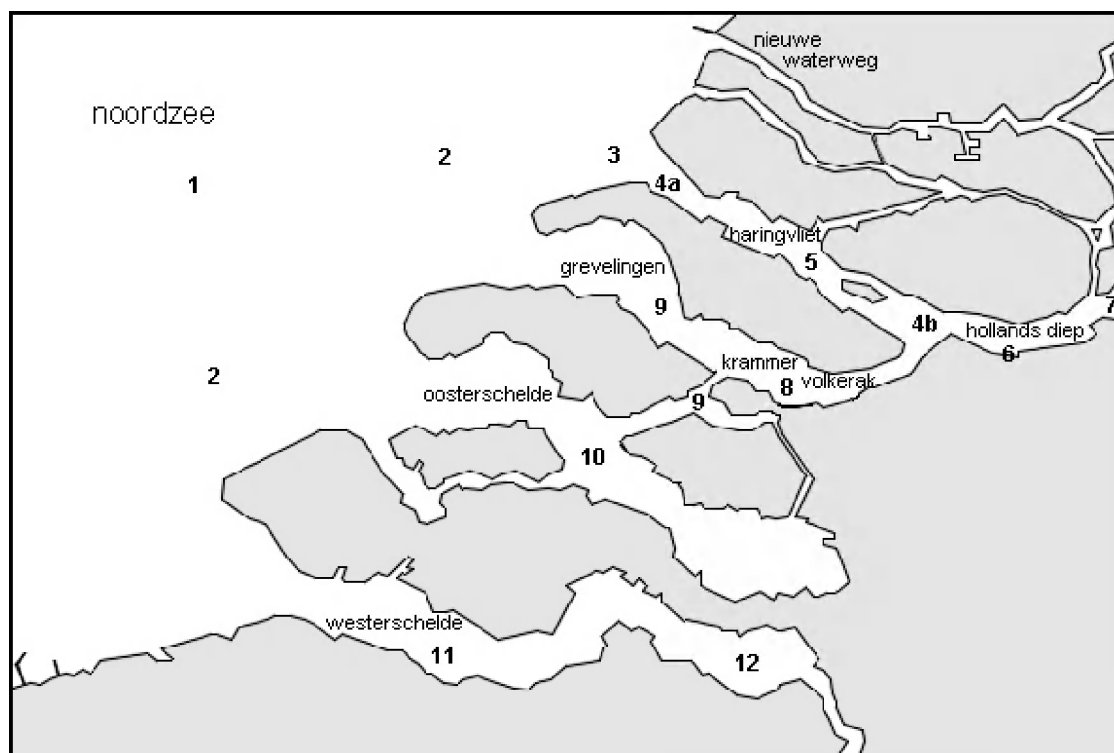
Het ruimtelijke verloop van jaargemiddelde zoutgehalten is uiteraard een heel andere “gradiënt” als het verloop van getij- of daggemiddelde waarden. De optimale vorm hangt af van het optredende temporele en ruimtelijke verloop van de zoutgehalten in het betreffende gebied, gecombineerd met het voor het gebruik gewenste temporele en ruimtelijke onderscheidende vermogen.

In deze historische analyse gaat het erom de in het verleden opgetreden ruimtelijke verdelingen zodanig te beschrijven, dat ze in eerste instantie globaal gerelateerd kunnen worden aan de fysische randvoorwaarden én aan de waargenomen levensgemeenschappen. Als compromis tussen deze doeleinden werd er in deze analyse naar gestreefd de zoutgehalteverdelingen uit te drukken in het ruimtelijke en temporele verloop van maandgemiddelde waarden. Dit bleek in het kader van deze studie slechts in beperkte mate mogelijk te zijn, vanwege het op zich beperkt beschikbaar zijn van dergelijke gegevens uit de langer geleden opgetreden fasen en vanwege de presentatievorm in de literatuur van de meer recente fasen. Van laatstgenoemde fase zijn vrijwel zeker wél de adequate basisgegevens aanwezig. De beschikbare doorlooptijd en capaciteit voor deze analyse lieten niet toe in substantiële omvang bewerkingen en herordeningen van basisgegevens uit te voeren. Er kon daarom vrijwel uitsluitend gewerkt worden met de in de beschikbare literatuur voorkomende presentatievormen.

IV-1 SITUATIE IN DELTAGEBIED VOOR UITVOERING DELTAWERKEN

Wolff (1973) voerde een uitgebreid onderzoek uit naar de relatie tussen fysische karakteristieken in het gebied tussen Haringvliet en Westerschelde, als specifieke delta van Rijn, Maas en Schelde, en de bodemdiergemeenschappen, in de situatie voorafgaande aan de grotere ingrepen in het kader van de Deltawerken. Behalve de karakterisering van estuariene typen is de in figuur 4.1 opgenomen indeling in “watertypen” van het gebied aan deze studie ontleend. De gegevens over de hydrologische en andere fysische aspecten ontleende Wolff vooral aan Peelen (1967, 1969, 1970).

Het overzicht is in dit rapport opgenomen omdat het een goede beschrijving vormt van het geheel van omliggende wateren, waarmee de Oosterschelde, behalve met de Westerschelde, vóór de uitvoering van de Deltawerken nog open natuurlijke verbindingen had. Ook komen er de vele in die fase nog aanwezige zout-zoetovergangen in tot uitdrukking.



		estuaria type	niveau zoutgehalte	variatie zoutgehalte	variatie temperatuur	slib- gehalte	veront- reiniging	zuurstof- gehalte
1	Kanaalwater	gemengd	hoog	klein	klein	laag	laag	hoog
2	kustwater	gemengd	hoog	klein	groot	matig	laag	hoog
3	mond Haringvliet	gedeeltelijk gemengd	brak	groot	groot	hoog	laag	matig
4a	west. deel Haringvliet	matig gelaagd	laag	groot	groot	hoog	matig	matig
5	centrale deel Haringvliet	gelaagd	laag	matig	groot	matig	matig	matig
6	Hollands Diep/ Rijn	homogeen zoet	zoet	klein	groot	matig	hoog	laag
7	Biesbosch/ Maas	homogeen zoet	zoet	klein	groot	matig	laag	matig
4b	samenkomst Hollands Diep, Haringvliet, Volkerak	gelaagd	laag	groot	groot	hoog	matig	matig
8	Volkerak/ Krammer	matig gelaagd	brak	matig	groot	matig	laag	matig
9	Grevelingen/ Keeten/ Krabbekreek/ Eendracht	redelijk gemengd	hoog	matig	groot	matig	laag	hoog
10	Oosterschelde/ Zandkreek	gemengd	hoog	klein	groot	laag	laag	hoog
11	westelijke deel Westerschelde	gemengd	hoog	klein	groot	hoog	laag	hoog
12	oostelijke deel Westerschelde	matig gelaagd	brak	groot	groot	hoog	hoog	matig

figuur 4.1 Watertypen in het Deltagebiet vóór uitvoering van de Deltawerken (Wolff, 1973)

Relevant als “directe randvoorwaarden” voor de Oosterschelde zijn het kustwater en de gebieden ten zuiden van de samenkomen Hollands Diep, Haringvliet en Volkerak(4b), waar de latere Volkerakdam en -sluizen werden gebouwd.

De gelaagdheid in het Hollands Diep werd veroorzaakt door de verzilting via het vloedoverschot vanuit het zuiden (paragraaf III-3, tabel 3.4), de zogenoemde achterwaartse verzilting vanaf Oosterschelde en Grevelingen via het Volkerak, en niet door zoutindringing via de mond van het Haringvliet. De omvang van deze achterwaartse verzilting werd sterk bepaald door de rivierafvoeren, die grote variaties in het zoutgehalte in het gebied veroorzaakten. Bij hogere afvoeren veranderde het vloedoverschot in een eboverschot met vrijwel zoet rivierwater. Vooral dan werd de “zoetwatervoorraad” van het Volkerak/Krammer aangevuld.

Van de zuidelijke wateren was vóór 1867, bij het nog openliggende Kreekrak, met name het oostelijke deel van de Westerschelde heel belangrijk als randvoorwaarde voor de Oosterschelde: matig gelaagd, brak en grote variaties in het zoutgehalte.

IV-2 ZOUTGEHALTEVERDELINGEN VOOR AANLEG VOLKERAK DAM, 1960–1969

Essentieel en onderscheidend voor deze fase is de open verbinding met het noordelijk Deltabekken via het Krammer/Volkerak. Daardoor worden niveau en variaties van de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde vrijwel geheel gedomineerd door de natuurlijke omvang en fluctuaties van de afvoeren van de grote rivieren de Rijn en, naarmate de afvoeren groter zijn, ook de Maas. Alleen bovengemiddelde afvoeren veroorzaken volgens de literatuur substantieel transport van zoet rivierwater naar het zuiden via het Volkerak/Krammer. Bij langduriger hogere afvoeren en noordelijke winden correleert deze invloed positief met verlaging van het kustwatergehalte, waardoor ze “dubbel” doorwerkt.

Zoals aangegeven in tabel 3.4 bedraagt de totale rivierwaterbelasting in deze fase, voorzichtig gesteld, tussen 50 en 100 m³/s. Dit is naar schatting de over een geheel jaar gemiddelde waarde, maar het dominante Rijn/Maas aandeel wordt alleen aangevoerd gedurende hogere afvoeren. In werkelijkheid bereikt ze derhalve gedurende korte perioden veel hogere waarden.

De totale zoetwateraanvoer is samengesteld uit:

- 50 á 100 m³/s rivierwateraanvoer van Rijn/Maas en Brabantse rivieren,
- 6 m³/s door neerslagoverschot en polderlozingen, inclusief die op het Krammer/Volkerak,
- 2 m³/s op het middengebied vanaf het Veerse Meer, via de Zandkreeksluis.

De belangrijkste veranderingen ten opzichte van de vorige fase, de situatie vóór de scheiding met de Westerschelde, zijn de omvang van de zoetwaterbelasting, die waarschijnlijk tenminste is gehalveerd, en de overname van de dominantie in de zoetwaterbelasting van de Scheldeafvoeren door de Rijn- en Maasafvoeren. Essentieel, vooral voor de Kom, is de verplaatsing van de plaats met de grootste zoetwaterbelastingen van Kom naar noordelijk tak.

De hoeveelheid waarnemingen, die een beeld geven van de zoutgehalteverdelingen in deze fase, is beperkt, zeker van het zuidelijke Deltabekken. Vanwege de verziltingsproblematiek was de meeste aandacht in die tijd gericht op het noordelijke Deltabekken en de mondingen van Nieuwe Waterweg en Haringvliet (Anonymus I, 1966; Anonymus II, 1968). Kwantitatieve informatie over de opgetreden zoutgehalten geven Peelen (1967), van der Burgh (1968) en van der Zaan (1982) (tabel 4.2). Van der Zaan en Peelen gebruikten verschillende waarnemingen, van der Burg vermeldt geen herkomst van de in het artikel gebruikte waarnemingen.

Van der Zaan en van der Burgh maken geen onderscheid in de situatie vóór en ná aanleg van de Grevelingendam. Van der Burgh besteedt er geen aandacht aan en Van der Zaan concludeert uit een vergelijking van waarnemingen vóór en na de aanleg dat er geen verschil waarneembaar is. De algemene teneur in de literatuur is dat de invloed beperkt moet zijn geweest.

Peelen geeft wél expliciet verschillende waarden voor beide situaties. Op het Volkerak zijn de verschillen klein, 1 á 2 g Cl/l bij alle afvoerniveau's. In de noordelijke tak zijn de verschillen bij lage en gemiddelde afvoeren respectievelijk nihil en gering, orde 1 g Cl/l, maar bij hoge afvoeren bedragen ze 3 tot 5 gram Cl/l. In deze analyse zijn de waarden van Peelen van de situatie zonder Grevelingendam opgenomen.

Van de Kom van de Oosterschelde is relatief weinig informatie over de zoutgehalten beschikbaar. Van der Hoeven bewerkte en publiceerde “in de vergetelheid geraakte” waarnemingen uit een visserijtijdschrift bij het RIVO (periode 1894 - 1924, locatie Gorishoek), waarnemingen uit de dissertatie van Korringa en van de visserijpolitie (periode 1921 - heden, locatie Lodijkse Gat) en eigen waarnemingen van het Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek / DIHO (periode 1924 - heden, locatie Yerseke).

De in tabel 4.2 weergegeven gegevens van van der Hoeven, Zaan, van der Burgh en Peelen zijn onderling redelijk consistent. Van der Burgh presenteerde waarden op

laagwaterkentering (LWK), wat relatief lagere waarden oplevert naarmate de longitudinale 2gradiënt groter is, zoals op het Volkerak. Peelen gebruikt een andere referentie voor lage, gemiddelde en hoge afvoeren. De niveaus moeten echter ongeveer overeenkomen met die van der Burgh. De “hoge afvoerwaarden” van van der Zaan zijn iets hoger dan die van beide andere onderzoekers, omdat ze zijn waargenomen bij minder hoge afvoeren.

Alle waarnemingen weergegeven in tabel 4.2 tonen de sterke zoutgehalteverlagingen, die in deze fase optraden bij bovengemiddelde afvoeren van de grote rivieren. Vanaf het niveau van gemiddelde afvoeren zijn de effecten niet alleen merkbaar in het noordelijke deel van de noordelijke tak, maar over de hele Oosterschelde.

Bij hoge afvoeren wordt het zoutgehalte op systeemniveau beïnvloed. Ook in de Kom, in het middengebied en in het westelijke deel treden in deze fase elk jaar lage gehalten van ruim beneden 15 g/l Cl op. Bij het ontwerp en de uitvoering van de Deltawerken werden criteria voor de zoutgehalten geformuleerd:

- het gehalte in de Kom moet tenminste 15.5 g/l Cl bedragen; een daling beneden deze waarde tot minimaal 13.5 g/l Cl is toelaatbaar, mits voor een korte periode;
- het gehalte in de Krabbekreek mag niet dalen onder 13.0 g/l Cl.

Tabel 4.2 Zoutgehalteverdelingen Volkerak en Oosterschelde vóór aanleg Volkerakdam (1969)

	Hoeven	van der Zaan			van der Burg			Peelen		
	jaar 1968	afvoer Rijn bij Lobith			afvoer Rijn bij Lobith			afv. Haringvliet bij Willemstad		
	max/min	1430	2360	3780	1000	2200	6000	350	1210	4000
Volkerak⇒Krammer										
Dintelsas		9.9	2.8	1.2				11	2	0.2
Volkerak		14.9	6.0	2.6	6.0	2.0	0.2	15	5.5	0.3
Mond St.Vliet		14.9	10.8	5.8				16.5	9	2
Oude.Tonge		16.1	14.5	8.2				16.5	12	3
noordelijke tak ⇒ mond										
P-dam-West								>16.5	13	5.5
Zijpe		16.4	15.3	10.8	17.0	14.6	8.5	>16.5	14	7
Mastgat		16.6	15.3					>16.5	15.5	9
Stavenisse		16.9	16.1	13.2	17.4	15.7	11.2	>16.5	16.5	11
Zeelandbrug-N					17.7	16.1	12.0	>16.5	>16.5	13
OS - 4								>16.5	>16.5	16
Kom ⇒ mond										
Marolle Gat								>16.5	>16.5	10 - 15
Lodijkse Gat								>16.5	>16.5	10 - 15
Yerseke	11.8/16.1							>16.5	>16.5	10 - 15
Gorishoek	11.7/16.3							>16.5	>16.5	10 - 15
Brab.Vaarw			15.6					>16.5	>16.5	10 - 15
Goese Sas		17.1	16.6	13.9				>16.5	>16.5	10 - 15
Zeelandbrug-Z			15.6					>16.5	>16.5	14
OS - 9								>16.5	>16.5	16
van der Hoeven (1983): minimaal en maximaal maandgemiddelde in 1968; uit gevonden “vergeten” meetreeksen van RIVO, Korringa/Visserijpolitie (locatie Lodijkse Gat) en DIHO (locatie Yerseke)										
van der Zaan (1982): globale analyse; waarden zijn gemiddelden van meer waarnemingen in verschillende getijfasen; afvoeren zijn gemiddelden van opgetreden afvoeren tijdens waarnemingen.										
Van der Burgh (1968): waarden, afgelezen uit figuur in publikatie, zijn gemiddelden over meerdere waarnemingen op LW-kentering bij gemiddeld getij.										
Peelen (1967): zoutgehalten tijdens halfij; waarden geïnterpoleerd uit isohalinenfiguren in publikatie; afvoeren samengesteld uit 40 % van Rijnaafvoer in Lobith 2 dagen eerder plus 100 % van Maasaafvoer in Lith 1 dag eerder.										

Over de zoutgehalten in de Kom en ook het middengebied in deze fase zijn er zoals genoemd weinig kwantitatieve gegevens. Van der Hoeven (1983) stelt dat de ruimtelijke verschillen in de Kom na de scheiding met de Westerschelde zó klein zijn, dat

zoutgehaltewaarnemingen in Gorishoek, Yerseke en Lodijkse Gat uitwisselbaar zijn. Uit waarnemingen op deze drie locaties stelde hij in 1983 over de periode 1894 - 1982 een zogenoemde homogene reeks Oosterschelde samen. Ook voor het middengebied wijzen de schaars beschikbare gegevens op betrekkelijk kleine ruimtelijke variaties. Zowel in Kom als middengebied treden wél aanzienlijke temporele variaties op.

Dit beeld is verklaarbaar uit de geconcentreerde aanvoer via de noordelijke tak van relatief grote hoeveelheden zoet water in korte tijd bij alleen de hogere afvoeren van de grote rivieren. De grootschalige menging in middengebied en Kom verdeelt het zoete water relatief snel over het hele gebied.

Samengevat zijn in deze fase de belangrijkste karakteristieken van de zoutgehalteverdeling in middengebied en Kom en van de variaties:

- de ruimtelijke variaties binnen en tussen de gebieden zijn klein, respectievelijk orde 0.5 g/l Cl en 1 tot 2 g/l Cl,
- in de Kom bedragen de temporele variaties binnen een jaar rond 5 g/l Cl; in het noordelijke en zuidelijke deel van het middengebied zijn deze variaties respectievelijk rond 6 en 4 g/l Cl.

Tabel 4.3 Ruimtelijke en temporele variaties zoutgehalten noordelijke tak vóór 1969

	optredende zoutgehalten bij verschillende afvoerniveau's			temporele variaties
	lage afvoeren	gemiddelde afvoeren	hoge afvoeren	door afvoervariaties
Zijpe	16.5	15	8 á 9	– 8 g/l Cl
Stavenisse	17.0	16	11 á 12	– 5 á 6 g/l Cl
ruimtelijke variatie	+ 0.5 g/l Cl	+ 1 g/l Cl	+ 3 g/l Cl	

In de noordelijke tak, waarlangs de zoetwateraanvoer plaatsvindt, treden de sterkste temporele en ruimtelijke variaties op. In tabel 4.3 zijn globaal de grootten van de temporele variaties in het Zijpe en Stavenisse en de ruimtelijke tussen beide locaties weergegeven:

- bij lage, gemiddelde en hoge afvoeren zijn de verschillen in zoutgehalte tussen Zijpe en Stavenisse respectievelijk rond 0.5, 1 en 3 g/l Cl,
- in het Zijpe en bij Stavenisse bedragen de verschillen tussen de hoogste en laagste zoutgehalten binnen een jaar respectievelijk rond 8 en 5 á 6 g/l Cl.

IV-3 ZOUTGEHALTEVERDELING TUSSEN AANLEG VOLKERAKDAM EN VOLTOOIING OOSTERSCHELDEWERKEN, 1969 - 1985

Onderscheidend voor deze fase is de nog steeds dominante rol van de zoetwateraanvoer vanaf het Volkerak voor de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde, maar nu zodanig dat de afvoervariaties van de grote rivieren niet meer rechtstreeks erin doorwerken. Wél werken nog door de variaties van de afvoeren van de Brabantse rivieren. Tot 1975 was dat in sterkere mate het geval dan erna. Toen werd het spuidebiet van de Volkeraksluizen afgestemd op deze afvoeren om gemiddeld in de tijd een ongeveer constante zoetwaterbelasting van 50 m³/s op het Volkerak/Krammer te realiseren. Incidenteel kunnen nog aanzienlijke, maar kortdurende variaties optreden, omdat de omvang van de afvoeren van de Brabantse rivieren niet altijd voorspelbaar is en onverwachte verhoogde afvoeren achteraf moeten worden gecompenseerd met verlaagde spuidebieten. Naast deze fluctuaties kan de zoutgehalteverdeling nog variëren door het zoutgehalte van het kustwater, die wél worden bepaald door de Rijn- en Maasafvoeren, en door extremere lokale meteorologische omstandigheden, die substantiële variaties in neerslag, verdamping of polderlozingen veroorzaken.

Zoals aangegeven in tabel 3.4 bestaat de totale zoetwaterbelasting van bijna 60 m³/s jaargemiddeld in deze periode uit de volgende bijdragen:

- 50 m³/s vanaf het Krammer/Volkerak, vanaf 1977, met een tijdelijke verhoging tot 1000 m³/s van november 1979 tot april 1980,
- 5 m³/s samen van de Zandkreeksluis op het middengebied (2 m³/s) en van de Kreekraksluizen (vanaf 1975) op de Kom (3 m³/s),
- 4 m³/s van neerslagoverschot en polderlozingen, op elk van de deelgebieden afgerond 1 m³/s.

In de voorliggende periode, zonder Volkeraksluizen, bedroeg, volgens de summiere gegevens hierover, de bij hoge afvoeren optredende zoetwaterbelasting uit het noorden jaargemiddeld 65 - 70 m³/s (Peelen, 1969; Wolf, 1973). De jaargemiddelde omvang lijkt derhalve weinig te zijn veranderd.

Belangrijk voor de zoutgehalteverdeling op de noordelijke tak is de nog aanwezige open verbinding met het Volkerak via het goed mengende Krammergebied en de toename ten opzichte van de vorige periode van de getijvolumes en dus de getijsnelheden door de noordelijke tak en het Krammer.

In deze periode is er zeer veel gemeten en onderzoek verricht naar de zoutgehalten op de Oosterschelde en het Krammer/Volkerak. In de tweede helft van de jaren zeventig werd een uitgebreid meetnet ingericht, het zg. HISTOS-net, waarbij continu werd gemeten vanaf een groot aantal meetpalen. In 1977 en in 1980 werden een tweetal zeer grote meetcampagnes met meetschepen op het Volkerak en de noordelijke tak uitgevoerd. De meting van 1977 werd uitgevoerd nadat de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde zich had ingesteld op het nieuwe spuibeheer voor de Volkeraksluizen, waarbij ernaar werd gestreefd de zoetwaterbelasting op het Krammer/Volkerak gemiddeld op ongeveer 50 m³/s te houden. Voorafgaand aan de meting in 1980 was deze belasting gedurende enkele maanden, tijdelijk als proef, op 100 m³/s gebracht.

Al deze onderzoeken en metingen hadden echter niet tot doel de zoutgehalteverdeling in de Oosterschelde in deze fase volledig en systematisch vast te leggen en te analyseren. Ze werden uitgevoerd om de zoutgehalteverdeling ná realisering van de Oosterscheldewerken te kunnen voorspellen. Er bestaan dan ook geen volledige beschrijvingen en systematische analyses van de zoutgehalteverdeling gericht op de hele Oosterschelde in de situatie voorafgaand aan de realisering van de Oosterscheldewerken.

Van de beide genoemde grote meetcampagnes en van de HISTOS-waarnemingen, vanaf de installatie in de tweede helft van de zeventiger jaren tot de ontmanteling van het grootste

deel van het meetnet rond 1990, zijn geen volledige integrale rapportages en analyses uitgebracht.

De meest brede en volledige beschrijving en analyse is van Dronkers (1980), op basis van de resultaten van de meetcampagne van 1977 en van nog slechts enkele jaren Histos-waarnemingen. De analyses zijn gericht op de situatie en de randvoorwaarden in het jaar 1978. In tabel 4.4 zijn voor een aantal locaties waarden opgenomen, die zijn afgelezen uit figuren in het concept-rapport met isolijnen van jaargemiddelde zoutgehalten en gehalten bij de hoog- en laagwaterkenteringen.

Van der Giessen en Kollé (1989) presenteerden de zoutwaarnemingen van het HISTOS-net over de periode 1977-1987. Deze rapportage en de interpretaties waren gericht op de invloed van de afvoeren van de grote rivieren op de kustwatergehalten.

Bij het ontbreken van informatie over voor deze fase representatieve jaren of omstandigheden zijn in tabel 4.4 betrekkelijk arbitrair de waarnemingen uit 1978 en 1984 opgenomen: 1978 is het jaar dat Dronkers analyseerde en 1984 is het laatste volledige jaar, waarin de geometrie nog slechts in beperkte mate is beïnvloed door de voltooiing van de Oosterscheldewerken. In de tabel zijn de hoogste en laagste opgetreden maandgemiddelde waarden in de gekozen jaren opgenomen.

Tabel 4.3 Zoutgehalteverdelingen Volkerak en Oosterschelde tussen aanleg Volkerakdam en voltooiing Oosterscheldedekering en compartimenteringsdammen, 1969 - 1985.

	Ockhuijsen, 1985	DONAR-bestanden, 1998		van der Giessen en Kollé, 1989		Dronkers, 1980				
	modelber.	MWTL-metingen		HISTOS - registrat.		HISTOS-registraties 1978 (+ meting 1977)				
	jaarl. var.	jaarlijkse variatie		jaarlijkse variatie		jaargem	HW - kentering		LW - kentering	
	1972/1981	1978	1984	1978	1984	boven	boven	onder	boven	onder
Volkerak ⇒Krammer										
Dintelsas	8.9/9.3					9.5	9.5	12.0	9.5	11.5
Volkerak					6/12	10.5	12.0	13.0	10.5	12.0
O. Tonge				12/14		13.5	15.0	15.2	11.5	13.3
noordelijke tak ⇒mond										
P-dam-WV					12/15					
Zijpe		13.4/15.1	13.3/15.7	14/16	13/16	14.8	16.7	16.9	13.9	14.4
Mastgat	14.8/15.4					15.2	17.1	17.1	14.5	14.8
Kr.kreek	14.8/15.4		13.1/15.5			14.5	15.0		14.0	
Stavenisse				16/17	15/17	16.0	17.5	17.5	15.4	15.8
ZeelandbN				16/17		16.4				
Zierikzee			15.5/17.0							
HammenO		16.4/17.3	15.9/17.4							
Roggeplaat	16.8/17.2		16.3/17.9							
OS - 4				17/18	16/19	17.5				
Kom ⇒ mond										
Marolle G.					15/16	15.5				
Mosselkr.				16		15.8				
Lod. Gat	15.1/16.3	15.6/16.4	15.2/16.4	15/16		16.0				
Yerseke			15.2/16.1							
Gorishoek				16		16.1				
Br. Vaarw.	15.6/16.5					16.3				
ZeelandbrZ				17	16/17	16.8				
Wissenk..	16.8/17.2	16.5/17.6	16.4/18.1							
OS - 9				16/18	17/19	17.6				

De zogenoemde MWTL-waarden zijn afkomstig van de ongeveer maandelijkse bemonsteringstochten naar de waterkwaliteit met meetschepen, voorheen ook wel de "routinetochten" of ook de "RIZA-tochten" genoemd. In de tabel zijn de hoogste en laagste waargenomen maandelijkse waarden in de jaren 1978 en 1984 gepresenteerd.

Een belangrijke reden om ze op te nemen is, dat deze waarnemingen tot op heden met een redelijke ruimtelijke dichtheid zijn voortgezet, terwijl het aantal HISTOS-lokaties rond 1990 sterk is beperkt.

Ockhuijsen (1985) berekende met het mathematische model SYSAN de maandgemiddelde zoutgehalten over de jaren 1972 t/m 1981, met de opgetreden natuurlijke randvoorwaarden als invoer, waaruit vervolgens over de hele periode gemiddelde maandgemiddelde waarden werden berekend. Hieruit ontstond een gemiddeld jaarverloop over deze periode, uitgedrukt in maandgemiddelden. Het laagste en het hoogste maandgemiddelde uit dit jaarverloop zijn gepresenteerd in tabel 4.4.

In tabel 4.3 wordt de zoutgehalteverdeling in deze fase aan de hand van de verschillende gepubliceerde gegevens op verschillende manieren beschreven.

De jaargemiddelde gehalten van Dronkers (1980) voor het jaar 1978 geven een indicatie van het ruimtelijke verloop van het gemiddelde niveau. De HWK- en LWK-waarden geven de temporele variatie binnen een getijcyclus op een vaste locatie én ze geven in feite ook een indicatie van het ruimtelijke verschil over de afstand die het water in halve getijcyclus aflegt, de zogenoemde getijweg.

Bij de interpretatie van de ruimtelijke verschillen is het belangrijk om in het oog te houden dat het hier om jaargemiddelde waarden gaat. De waarden van actueel optredende of uit kortere middelingstijden bepaalde ruimtelijke gradiënten kunnen en zullen in bepaalde gevallen hiervan significant verschillen. Dit geldt zeker ook voor de verticale gradiënten, die sterk bepaald worden door onder andere de actuele omvang van de zoetwateraanvoer en door de fase in de doottij-springtijcyclus.

De minimale en maximale binnen een jaar opgetreden maandgemiddelde gehalten geven een goede indicatie van de temporele en ook in enige mate van de ruimtelijke verschillen. In de Oosterschelde hebben meestal de hoogste en laagste maandgemiddelde waarde overal dezelfde oorzaak, zodat ze ook ongeveer in dezelfde periode optreden. Wél is nodig te weten hoe “gemiddeld” of “extreem” het betreffende jaar was. Van de hier gepresenteerde jaren 1978 en 1984 is dat niet precies bekend; ze lijken echter niet “extreme” situaties te representeren.

Ongeveer de meest optimale, en tegelijk ook nog praktisch hanteerbare, informatie zou bestaan uit het jaarverloop van de maandgemiddelde gehalten in een “zout”, een “gemiddeld” en een “zoet” jaar op een aantal over het bekken verdeelde, ruimtelijk aan elkaar relateerbare locaties.

De minimale en maximale maandgemiddelden van Ockhuijsen komen uit een “gemiddeld jaarverloop”, bepaald uit een “hindcast-berekening” met het mathematische model SYSAN over de periode 1972-1981. Het zal duidelijk zijn dat hieruit veel informatie is weggemiddeld en dat met name de temporele variatie klein wordt. Dit is ook te zien aan de gepresenteerde waarden. Deze jaarverlopen werden indertijd berekend als referentie voor de met dezelfde randvoorwaarden, die over 1972-1981, berekende jaarverlopen in de toekomstige situatie na voltooiing van de Oosterscheldewerken.

Karakteristiek voor deze fase is dat door de aanwezigheid van de Volkerakdam de grotere temporele variaties in de zoutgehalten door de afvoervariaties van de grote rivieren sterk zijn afgenomen. De afvoervariaties van de Brabantse rivieren spelen nu een grotere rol, evenals de ermee gecorreleerde (regionale) klimatologische variaties. Via de variaties in het kustwatergehalte hebben ook de afvoeren van de grote rivieren nog invloed.

Een aantal kenmerken van de zoutgehalteverdeling in deze fase, met de bijbehorende temporele variaties, zijn:

- de sterkste gradiënten treden ook in deze fase op in de noordelijke tak, sterk gecorreleerd met de zoetwateraanvoer vanaf het Volkerak: de laagste maandgemiddelden van Zijpe en Stavenisse verschillen met rond 2 g/l Cl het meest, de verschillen tussen de hoogste maandgemiddelden zijn kleiner, rond 1 g/l Cl;

- de ruimtelijke verschillen op de noordelijke tak ontstaan vooral door de sterkere temporele variaties, met de zoetwateraanvoer, van de gehalten in het Zijpe ten opzichte van die in Stavenisse; de temporele variaties binnen een jaar van de maandgemiddelden in Zijpe bedragen 2 á 3 g/l Cl en in Stavenisse 1 á 2 g/l Cl;
- in Stavenisse lijkt de invloed van de zoetwateraanvoer uit het noorden op gemiddelde niveau en variaties niet meer dominant te zijn: de gehalten komen sterk overeen met de overige locaties in het middengebied en het oostelijke deel van de monding; de variaties in Stavenisse worden sterker bepaald door die van het kustwatergehalte dan door aanvoervariaties uit het noorden; de hoogste maandgemiddelden zijn in Stavenisse hoger dan in de Kom;
- ondanks de kwantitatief lagere (lokale) zoetwateraanvoer naar de Kom, neerslagoverschot, polders en Kreekraksluizen, dan uit het noorden door de noordelijke tak, liggen maximale maandgemiddelden hier iets lager en zijn de variaties kleiner dan in Stavenisse; dit komt door de geringere uitwisseling met de rest van het bekken en het kustwater; de verblijftijd is in de Kom veel groter dan in de noordelijke tak: het geloosde zoete water “blijft er langer hangen”!
- in de noordelijke tak treden geringe verticale gradiënten in de zoutgehalten op; de verschillen tussen de jaargemiddelde waarden voor de laagwaterkentering zijn het grootst en bedragen rond 0.5 g/l Cl; bij de hoogwaterkentering zijn er alleen in het Zijpe nog zeer geringe verschillen tussen de gehalten aan oppervlakte en bodem; de actueel optredende verticale gradiënten zullen overigens groter zijn dan de verschillen tussen de hier gepresenteerde jaargemiddelde waarden.

In tabel 4.5 zijn de ruimtelijke horizontale en de temporele variaties in deze fase samengevat voor de noordelijke tak.

Tabel 4.5 Ruimtelijke en temporele variaties zoutgehalten noordelijke tak in periode 1969-1985

	minimale en maximale maandgemiddelden		temporele variaties
	1978	1984	binnen een jaar
Zijpe	13 / 15	13 / 16	2 á 3 g/l Cl
Stavenisse	16 / 17	15 / 17	1 á 2 g/l Cl
ruimtelijke variatie	2 á 3 g/l Cl		

De temporele variaties in en de ruimtelijke variaties tussen Zijpe en Stavenisse hebben nu vrijwel dezelfde grootte. Vergeleken met de periode vóór 1969 (tabel 4.3) zijn de ruimtelijke variaties vrijwel gelijk gebleven, maar zijn de temporele variaties op beide locaties veel kleiner geworden. Vóór 1969 veroorzaakten de toen periodiek optredende veel grotere aanvoeren sterkere verlagingen op beide locaties mét een ruimtelijke gradiënt. Nu ontstaat een ruimtelijke gradiënt van dezelfde grootte doordat Zijpe wél en Stavenisse nauwelijks reageert op de aanvoervariaties.

IV-4 ZOUTGEHALTEVERDELINGEN IN HUIDIGE SITUATIE (NA 1987)

Karakteristiek en onderscheidend voor de huidige situatie zijn de nog geringe en nog weinig variërende zoetwaterbelasting. De invloed van rivierafvoeren vanaf de landzijde is kwantitatief en kwalitatief verdwenen. Rivierwateraanvoer vindt alleen nog plaats in bepaalde perioden met het kustwater. Deze invloed, het rivierwatergehalte van het kustwater, is nu dominant voor het gemiddelde niveau en de variaties van de zoutgehalteverdeling op vrijwel de gehele Oosterschelde. Ondanks ook de afname van het getijvolume is de invloed van de zee relatief toegenomen.

Op lokaal niveau zijn op veel plaatsen nu de plaatselijke belastingen dominant geworden voor de maximale variaties. Dit is vooral het geval waar ook de uitwisseling en de stroomsnelheden zijn afgenomen, zoals in het oostelijke deel van de Kom en het noordelijke deel van de noordelijke tak.

Zoals in tabel 3.4 is vermeld bedraagt de totale zoetwaterbelasting nog rond 14 m³/s en is samengesteld uit:

- 4 m³/s afkomstig van neerslagoverschot en polderlozingen, ongeveer gelijkmatig verdeeld over de vier deelgebieden;
- 10 m³/s samen afkomstig van de Krammersluizen op de noordelijke tak (8 m³/s) en de Zandkreeksluis op het middengebied (2 m³/s).

Belangrijke verschillen met de voorgaande fase zijn naast de sterke afname van de zoetwaterbelasting de doorgaande afname van de stroomsnelheden in de richting van de compartimenteringsdammen.

De huidige zoutgehalteverdeling is nu, ruim tien jaar na de ingang van de nieuwe situatie, nog niet echt volledig geanalyseerd. Dit feit vormt een zeer groot contrast met de zeer omvangrijke inspanningen in het verleden om haar te voorspellen. De huidige situatie is alleen tweemaal globaal beschreven als onderdeel van algemene evaluaties (Anonymus VIII, 1991; Van Berchum en Wattel, 1997).

Omdat er nog geen systematische analyse is uitgevoerd naar de huidige situatie zijn er nog geen "representatieve jaren" voor deze fase bekend. Om toch enige referentie te hebben zijn uit de zogenoemde MWTL-metingen, de vroegere RIZA-waterkwaliteitsmetingen, voor enkele locaties over de periode 1972-1996 de jaargemiddelde zoutgehalten berekend. Over de meeste jaren werd ongeveer éénmaal per maand waargenomen. In figuur 4.1 is het verloop van de jaargemiddelden uitgezet. Om een indruk te geven van de variaties binnen een jaar is ook het verloop van de in elk jaar gemeten hoogste en laagste maandwaarde uitgezet. De locaties Zijpe en Hammen-Oost geven een indruk van de zoutgehalten in de noordelijke tak en langs de noordelijke oever en terwijl Lodijkse Gat en Wissenkerke een indruk geven van de niveau's in de Kom en langs de zuidelijke oever van de Oosterschelde.

Presentaties van het zoutgehalteverloop over deze lange periode zijn nog nergens in de beschikbare literatuur aangetroffen. Met name het verloop in de noordelijke tak en nog meer dat in de Kom vertonen een opmerkelijk geleidelijk verloop, waarbij er ook sprake lijkt te zijn van enige periodiciteit. In beide gebieden treden relatief hoge waarden op tegen het midden van de zeventiger jaren, relatief lage waarden in de eerste helft van de tachtiger jaren en weer relatief hoge waarden rond 1990. Laatstgenoemde hoge waarden hebben een wat hoger niveau dan die tegen het midden van de zeventiger jaren en dat zal te maken hebben met de aanwezigheid van Oosterscheldkering en compartimenteringsdammen. Het duidelijk hoge gemiddelde niveau rond 1990/1991 ligt echter maar ongeveer 1 tot 1.5 g/l Cl boven het relatief hoge niveau in de jaren tegen het midden van de zeventiger jaren.

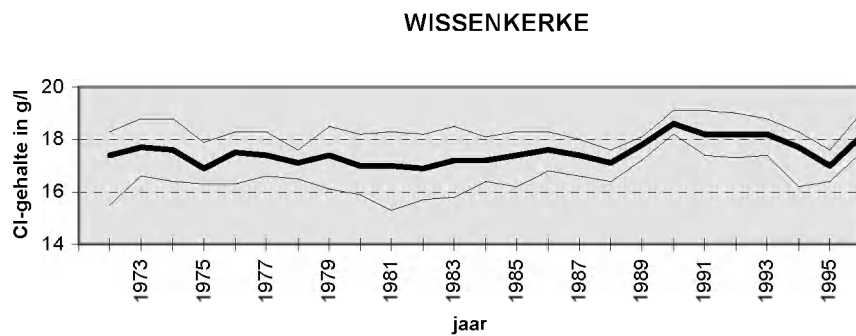
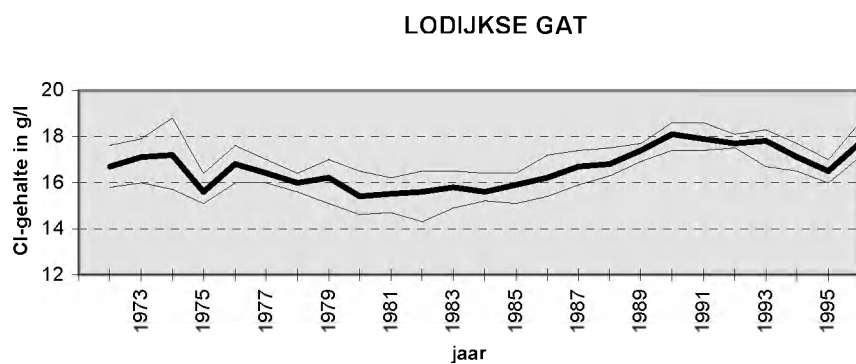
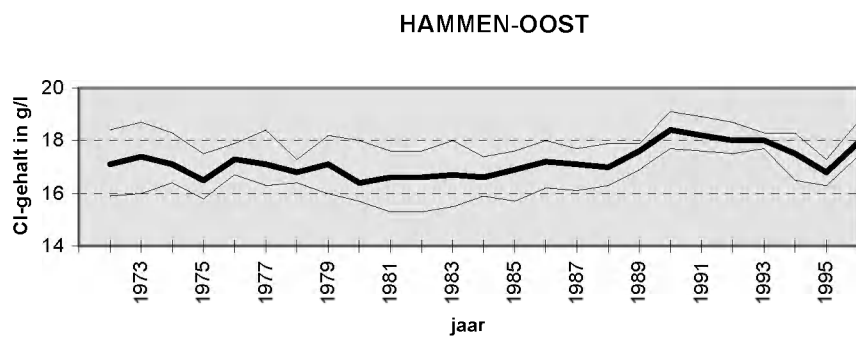
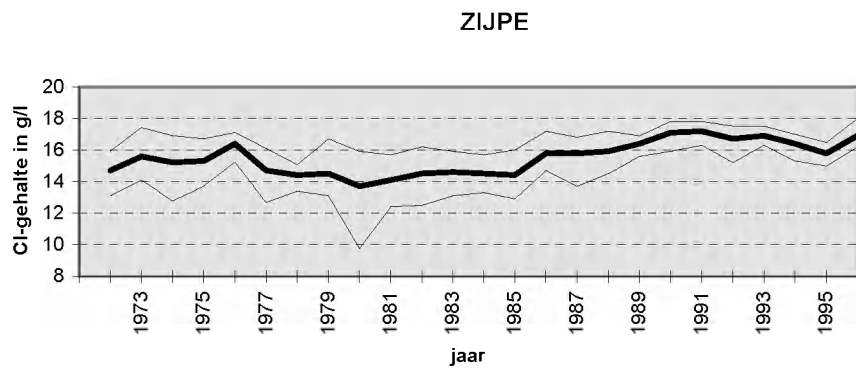


Fig. 4.1 Verloop jaargemiddelde zoutgehalte met minimale en maximale maandgemiddelden (berekend uit MWTL-waarnemingen)

De voltooiingsfase van de Oosterscheldewerken van 1985 tot 1987, is, heel opmerkelijk, nergens als discontinuïteit te onderscheiden en het verloop ervoor en erna vertoont consistent geleidelijk stijgende zoutgehalten. Wél zijn na 1987, met name in de Kom en de noordelijke tak, de fluctuaties rond het gemiddelde verloop duidelijk kleiner. Volgens mondelinge mededelingen wordt het beschreven verloop in eerste instantie toegeschreven aan droge en natte jaren en de variatie ook daardoor van het kustwatergehalte. Daarvoor lijkt het verloop echter te regelmatig. De jaren 1974 t/m 1976 zijn altijd beschouwd als redelijk representatief voor respectievelijk een droog, een nat en een gemiddeld jaar. Voor modelberekeningen zijn de hydrologische en meteorologische gegevens van die jaren vaak als zodanig gebruikt. Het jaargemiddelde verloop in figuur 4.1 laat zien dat de zoutgehalten in deze jaren fluctueren op het eerdergenoemde relatief hoge gemiddelde niveau in die jaren.

Voor zowel de Kom als de noordelijke tak zijn aannemelijke oorzaken te noemen voor de daling na het midden van de zeventiger jaren. In de Kom nam in 1975 de zoetwaterbelasting toe door de ingebruikneming van de Kreekraksluizen, terwijl in 1977 de belasting op het Volkerak op een gemiddeld niveau van 50 m³/s werd gebracht. Beide veranderingen zijn echter niet als discontinuïteit te herkennen. Zowel in de noordelijke tak als in de Kom gaat de daling van het gemiddelde niveau in de eropvolgende jaren door.

Als er géén geheel verschillende, toevallig vrijwel gelijk optredende oorzaken zijn voor het gelijkvormige verloop in de beide zeer verschillende gebieden, moet er sprake zijn van een zeer basale invloed op systeemniveau. Meer westelijk gelegen locaties vertonen het verloop ook enigszins, maar veel flauwer. Dit zou kunnen betekenen dat de verhouding tussen de invloed van het kustwater en de zoetwaterbelasting op het bekken geleidelijk en periodiek verandert.

De tijdsduur tussen de twee fasen met relatief hoge zoutgehalten is 15 á 20 jaar, wat doet denken aan de periode van de bekende 18,6-jaarcyclus, waarmee de sterkte van het getij varieert. Als dit de oorzaak is dan zou verwacht mogen worden dat de toppen in het zoutgehalteverloop overeenkomen met de toppen van de 18,6-jaarcyclus, als het getij, en daarmee de invloed van het kustwater, het sterkst is. Dit is niet het geval. De “nuldoorgangen” van het periodiek lijkende verloop van het zoutgehalte vallen ongeveer samen met de toppen en dalen van deze 18,6-jarige cyclus, zodanig dat de top van het zoutgehalteverloop ongeveer een kwart periode vroeger optreedt dan de top van de getijsterkte! Dit wijst in eerste instantie niet op een oorzakelijke relatie.

Een andere mogelijke verklaring voor het zeer geleidelijke verloop, waarbij er geen sprake hoeft te zijn van enige periodiciteit, zou kunnen zijn dat de aanpassingstijden van de zoutgehalten vooral in de Kom en de noordelijke tak, en vooral ook in de huidige nieuwe situatie, zeer veel langer zijn dan tot nu toe is aangenomen.

Een nadere analyse van de huidige situatie in het algemeen en bovengenoemd verschijnsel in het bijzonder aan de hand van de basisgegevens ligt buiten de doelstelling van deze historische analyse. De uitvoering ervan lijkt echter zeer de moeite waard en kan mogelijk leiden tot een aanzienlijke bijstelling van de in het verleden ontwikkelde inzichten in de bepalende factoren in de zoutgehalteverdeling op de Oosterschelde. Als basis voor de verkenning van de mogelijkheden door beheersmaatregelen weer sterkere gradiënten op de Oosterschelde te doen optreden is een dergelijke analyse eigenlijk noodzakelijk.

Tabel 4.4 Zoutgehalten Oosterschelde huidige situatie (1988 - 1995)

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max	jaargem min max
noordelijke tak en noordelijke oever									
Zijpe	15.9 14.5 17.2	16.4 15.6 16.9	17.1 15.9 17.8	17.2 16.3 17.8	16.7 15.2 17.5	16.9 16.3 17.5	16.4 15.3 17.0	15.8 15.0 16.5	16.9 16.2 18.0
Krabbe- kreek	16.4 15.2 17.3	16.9 16.1 17.3	17.6 16.6 18.1	17.6 16.9 18.2	17.3 16.8 17.8	17.3 16.1 17.9		16.1 15.4 16.8	
Zierik- zee	16.9 16.2 17.8	17.4 16.8 17.8	18.3 17.6 18.8	18.1 17.5 18.8	17.9 17.5 18.5	17.8 17.0 18.2		16.7 16.0 17.3	
Ham- men-O	17.0 16.3 17.9	17.6 16.9 17.9	18.4 17.7 19.1	18.2 17.6 18.9	18.0 17.5 18.7	18.0 17.7 18.3	17.5 16.5 18.3	16.8 16.3 17.3	17.9 17.4 18.7
Rogge- plaat	17.1 16.3 17.9	17.7 17.0 18.1	18.5 17.9 19.1	18.2 17.5 19.1	18.2 17.5 18.9	18.0 17.3 18.5		16.9 16.5 17.6	
Kom en zuidelijke oever									
Lodijk- se Gat	16.8 16.3 17.5	17.4 16.9 17.7	18.1 17.4 18.6	17.9 17.4 18.6	17.7 17.5 18.1	17.8 16.7 18.3	17.1 16.5 17.7	16.5 16.0 17.0	17.7 17.1 18.6
Yer- seke	16.8 16.3 17.4	17.4 16.9 17.8	18.2 17.4 18.7	18.0 17.5 18.6	17.8 17.5 18.0	17.7 16.7 18.2		16.5 15.8 17.1	
Wissenk erke	17.1 16.4 17.6	17.8 17.2 18.1	18.6 18.2 19.1	18.2 17.4 19.1	18.2 17.3 19.0	18.2 17.4 18.8	17.7 16.2 18.3	17.0 16.4 17.6	18.1 17.5 19.0

In tabel 4.4 zijn voor de situatie ná voltooiing van de Oosterscheldewerken voor meer locaties dan in figuur 4.1 de opgetreden jaargemiddelden en hoogste en laagste gemeten maandwaarden weergegeven. Uit beide presentaties, de figuur en de tabel, komen de volgende karakteristieken van de zoutgehalteverdeling en de variaties in de huidige situatie naar voren:

- de ruimtelijke gradiënten zijn zeer klein geworden; langs de noordelijke oever is de gradiënt in de jaargemiddelde waarden tussen Zijpe en Roggeplaat nog 1 á 1.5 g/l Cl en langs de zuidelijke oever tussen de Kom en Wissenkerke minder dan 0.5 g/l Cl,
- binnen de Kom is de verdeling homogeen, Lodijkse Gat en Yerseke tonen vrijwel gelijke gehalten,
- in de Krabbekreek zijn de gehalten nu vrij consistent rond 0.5 g/l CL hoger dan in het Zijpe,
- in de noordelijke tak bedragen de verschillen tussen hoogste en laagste maandwaarden binnen een jaar nog 1.5 á 2g/l Cl en in de Kom rond 1 g/l Cl,
- over perioden van meerdere jaren beschouwd kunnen de temporele variaties ongeveer tweemaal zo groot worden als alleen door de variaties binnen een jaar, door de vrij sterke geleidelijke variatie van het gemiddelde niveau, uitgedrukt in de jaargemiddelde waarden.

IV SAMENVATTING VERANDERINGEN IN ZOUTGEHALTEVERDELING

In deze paragraaf worden de in de verschillende perioden in het verleden en in de huidige situatie opgetreden zoutgehalteverdelingen onderling vergeleken.

In tabel 4.5 zijn daartoe de laagste en hoogste waarden in een jaar voor een tweetal jaren per periode samengevat. Voor de periode 1960-1969 was dat in die vorm niet mogelijk en zijn door combinatie van de gegevens uit de verschillende publikaties enigszins representatieve zoutgehalten voor lage en hoge afvoeren afgeschat.

Voor de beide perioden na 1969 is gebruik gemaakt van MWTL-waarnemingen en/of Histos-waarnemingen. De MWTL-waarnemingen waren meestal maandelijkse waarnemingen. De laagste en hoogste maandwaarneming binnen een jaar zijn voor de gekozen jaren gepresenteerd. Op de HISTOS-lokaties werd continu geregistreerd. Hiervan zijn de binnen een jaar optredende laagste en hoogste maandgemiddelde waarden opgenomen. In enkele gevallen, waar van een locatie in een jaar beide soorten waarnemingen beschikbaar waren, is vanwege de representativiteit de voorkeur gegeven aan de HISTOS-registraties.

Zoals in paragraaf 4.3 is toegelicht zijn uit de periode 1969-1985 om verschillende redenen de gepresenteerde jaren 1978 en 1984 gekozen. Uit figuur 4.2 is op te maken dat beide jaren iets "zoeter" waren, mogelijk "natter", dan de aangrenzende jaren en dat ze beiden, liggen in een meerjarige periode met relatief lage zoutgehalten; het laatste geldt voor 1984 nog iets sterker dan voor 1978.

De jaren 1988 en 1991 zijn respectievelijk ongeveer de zoetste en zoutste jaren tot nu toe in de huidige situatie. 1988 is het eerste volledige "ongestoorde" jaar na de voltooiing van de Oosterscheldewerken. 1984 was het laatste enigszins "ongestoorde" jaar ervóór en ligt al vrij ver in de opgaande tak van het langjarige verloop, na de lage gehalten in de eerste helft van de tachtiger jaren. Ten opzichte van de aangrenzende jaren lijkt 1988 ook "zoeter/natter".

Tabel 4.5 Overzicht veranderingen zoutgehalten in de Oosterschelde in de afgelopen halve eeuw

	vóór aanleg Volkerakdam	na aanleg Volkerakdam tot voltooiing Oosterscheldewerken		na voltooiing Oosterscheldewerken, huidige situatie	
	gehalten bij lage en hoge afvoeren	laagste en hoogste maandwaarneming of maandgemiddelde.		laagste en hoogste maandwaarneming of maandgemiddelde.	
	1960 - 1969	1978	1984	1988	1991
		rel+(abs) "zoet" jaar	rel+abs "zoet jaar"	rel+abs "zoet" jaar	rel+abs "zout" jaar
noordelijke tak ⇒mond					
P-dam-West	5 / 17		12 / 15		
Zijpe	7 / 17	14 / 16	13 / 16	15 / 17	16 / 18
Mastgat	9 / 17				
Kr.kreek	9 / 17		13 / 15	15 / 17	17 / 18
Stavenisse	11 / 17	16 / 17	15 / 17		
Zeelandbr-N	12 / 18	16 / 17			
Zierikzee			15 / 17	16 / 18	17 / 19
Hammen-O		16 / 17	16 / 17	16 / 18	18 / 19
Roggeplaat			16 / 18	16 / 18	17 / 19
OS - 4	16 / 19	17 / 18	16 / 19		
Kom ⇒ mond					
Marolle Gat	12 / 17		15 / 16	16 / 17	
Lodijkse Gat	12 / 16	15 / 16	15 / 16	16 / 17	17 / 19
Yerseke	12 / 16		16 / 16	16 / 17	17 / 19
Br.Vw/G.Sas	14 / 17				
Zeelandbr-Z	14 / 17	17	16 / 17	16 / 18	
Wissenkerke		16 / 18	16 / 18	16 / 18	17 / 19
OS - 9	16 / 19	16 / 18	17 / 19		
vanaf 1969 geldt:					
- waarden Zijpe, Krabbekreek, Zierikzee, Hammen-Oost, Roggeplaat, Lodijkse Gat, Yerseke en Wissenkerke zijn MWTL-waarnemingen; - waarden Philipsdam-West, Stavenisse, Zeelandbrug-Noord, OS-4, Marolle Gat, Zeelandbrug-Zuid en OS-9 zijn HISTOS-registraties;					

Samenvattend kunnen aan de hand van het overzicht in tabel 4.5 ten aanzien van de veranderingen van de zoutgehalten in de Oosterschelde in de afgelopen halve eeuw de volgende conclusies worden getrokken:

- de laagste gehalten die optreden zijn 5 tot 10 g/l Cl hoger geworden en de hoogste gehalten die optreden zijn 1 á 2 g/l Cl omhoog gegaan,
- de verschillen tussen de hoogste en laagste gehalten op eenzelfde locatie bedroegen vóór 1969 in de Kom rond 5 en in de noordelijke tak rond 10 g/l Cl en zijn in de huidige situatie nergens meer groter dan 2 g/l Cl binnen een jaar en 3 g/l Cl over langere perioden,
- de laagste gehalten die in de noordelijke tak kunnen optreden zijn verhoogd van 5 tot 10 g/l Cl vóór 1969 naar 10 tot 15 g/l Cl tussen 1969 en 1985 en naar rond 15 g/l Cl ná 1987,
- de laagste gehalten die in de Kom kunnen optreden zijn toegenomen van 10 tot 15 g/l Cl vóór 1969 naar rond 15 g/l Cl tussen 1969 en 1985 en naar rond 16 g/l Cl ná 1987,
- de hoogste waarden die kunnen optreden, zijn, na een geringe afname tussen 1969 en 1985, in de huidige situatie 1 g/l Cl hoger dan voorheen; bij de overgang van discontinue, hoge zoetwaterbelastingen vóór 1969 naar continue lagere erna, lijkt de genoemde afname niet onwaarschijnlijk; bij het concluderen hiertoe uit de cijfers is voorzichtigheid geboden, vanwege het “zoete karakter” van de beide gepresenteerde jaren 1978 en 1984;
- de ruimtelijke gradiënten werden in het verleden groter naarmate de zijdelingse zoetwateraanvoeren groter werden; met de afname van het niveau van de zoetwateraanvoeren zijn ook de ruimtelijke gradiënten sterk afgenomen; als mag worden aangenomen dat nu zowel de laagste als de hoogste maandwaarden over het hele bekken in ongeveer dezelfde tijdsperiode optreden, bedragen de ruimtelijke verschillen over het bekken, tussen zowel Kom als noordelijke tak en mond, nog maar rond 1 g/l Cl.

V CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

conclusies met betrekking tot de zoutgehalteverdelingen op de Oosterschelde in het verleden:

- Vanaf de scheiding tussen Oosterschelde en Westerschelde in de tweede helft van de vorige eeuw is de invloed van de grote rivieren op de Oosterschelde, waaronder de invloed op de zoutgehalten, doorgaand afgenomen. Deze ontwikkeling is in feite al heel veel eerder begonnen. De overname van de Scheldeafvoer van de Oosterschelde door de Westerschelde is in feite al gaande vanaf het ontstaan van de Westerschelde in de 11^e en 12^e eeuw in ongeveer haar huidige vorm. De toename van de invloed van Rijn en Maas heeft de afname van de Schelde-invloed waarschijnlijk nooit volledig, ook niet tijdelijk, gecompenseerd.
- Ten tijde van de scheiding van de Westerschelde in 1867/1871 was de invloed van de Schelde nog steeds groter dan die van Rijn en Maas, zodat met de scheiding tenminste een halvering van de totale “riviereninvloed” plaatsvond. Ook deze halvering is in de honderd jaar erna, tot de gereedkoming van de Volkerakdam, vrijwel zeker niet gecompenseerd door toename van aanvoer van Rijn- en Maaswater uit het noorden. Volgens de beperkte beschikbare kwalitatieve informatie hierover zijn is het gemiddelde niveau nooit meer zo laag geweest en zijn de fluctuaties nooit meer zo groot geweest als vóór de scheiding. In de Kom werd hierdoor de oesterteelt mogelijk.
- In de fase na de afscheiding van de Westerschelde en vóór de gereedkoming van de Volkerakdam in 1969 kwamen in de Kom alleen bij hoge afvoeren van Rijn en Maas nog tijdelijke dalingen voor van de gehalten naar waarden tussen 10 en 15 g/l Cl. Bij lagere dan gemiddelde rivierafvoeren was de rivierwateraanvoer naar de Oosterschelde klein en beperkte de invloed zich tot het Volkerak en het noordelijke deel van de noordelijke tak. Bij hoge afvoeren daalden de gehalten in de noordelijke tak tot waarden tussen 5 en 10 g/l Cl en namen de ruimtelijke verschillen toe tot 3 g/l Cl tussen Zijpe en Stavenisse. Door de dalingen van het zoutgehalte bij hoge afvoeren traden op laatstgenoemde locaties temporele variaties op van respectievelijk 8 en 5 á 6 g/l Cl.
- De aanleg van de Volkerakdam en -sluizen verminderde met name de dynamiek van de riviereninvloed heel sterk: van de sterk dóórwerkende afvoerstijgingen van de grote rivieren naar de veel kleinere, niet met de Volkeraksluizen gecompenseerde fluctuaties van de afvoeren van de Brabantse rivieren. De fluctuaties bedragen in deze fase nog 10 á 20 m³/s rond de jaargemiddelde zoetwaterbelasting vanaf het Volkerak van rond 50 m³/s, die vanaf 1977 met het spuibeheer van de Volkeraksluizen werd nagestreefd. Deze nagestreefde jaargemiddelde belasting betekende waarschijnlijk geen grote verandering ten opzichte van de uit globale schattingen bekende omvang in de fase met de nog open verbinding naar het Haringvliet.
- De invloed van de klimatologische variaties en die van het kustwatergehalte zijn nu relatief groter door de nivellerende werking van de Volkeraksluizen. De invloed van het kustwatergehalte is bovendien versterkt door de doorgaande toename van de getijvolumes in de mond en naar de noordelijke tak in de decennia rond en na het midden van deze eeuw. Hoge afvoeren van de grote rivieren hebben nu alleen nog via verlagingen van het gehalte van het kustwater in de mond, onder bepaalde omstandigheden, invloed op de zoutgehalten in de Oosterschelde.
- In de Kom dalen de zoutgehalten in deze fase, tussen de gereedkoming van de Volkerakdam en de voltooiing van de Oosterscheldewerken, vrijwel nooit meer beneden 15 g/l Cl. In de noordelijke tak zijn met name de maximale temporele gradiënten sterk afgenomen. Ze hebben nu ongeveer dezelfde grootte als de ruimtelijke, namelijk 2 á 3 g/l Cl.
- De realisering van de Oosterscheldewerken (1985/1987) maakte een einde aan zowel de eeuwenlange kwantitatieve dominantie van de invloed van de rivierwateraanvoer, als aan de beperkte nog doorwerkende afvoerfluctuaties van de Brabantse rivieren. De

zoetwateraanvoer vanaf het Volkerak via de Krammersluizen is zeer constant en bedraagt ongeveer de helft van de nog resterende totale zoetwaterbelasting op de Oosterschelde van tussen 10 en 20 m³/s jaargemiddeld. De temporele variaties worden nu uitsluitend bepaald door die van het kustwatergehalte en van de regionale klimatologische omstandigheden. Zoals eerdergenoemd kan het zoutgehalte van het kustwater ter hoogte van de Oosterschelde onder bepaalde omstandigheden rechtstreeks sterk worden beïnvloed door de afvoeren van de grote rivieren.

- Een globale analyse van een beperkte hoeveelheid geordende MWTL-gegevens laat zien dat in de huidige situatie de ruimtelijke gradiënten nog slechts zeer gering zijn: 1 á 1.5 g/l Cl tussen het Zijpe en de monding en minder dan 0.5 g/l Cl tussen Kom en monding. De zoutgehalteverdeling in de Kom is homogeen. De variaties van de maandgemiddelde waarden binnen een jaar bedragen in de noordelijke tak 1.5 á 2.0 en in de Kom rond 1 g/l Cl. De temporele variaties kunnen over meerdere jaren beschouwd nog oplopen tot 3 g/l Cl in het mondingsgebied tot 4 g/l Cl in het noordelijke deel van de noordelijke tak.
- Het gemiddelde niveau van de zoutgehalten vertoont, vanaf tenminste het begin van de zeventiger jaren tot nu, dus door verschillende “fasen” heen, vooral in de Kom en de noordelijke tak een opmerkelijk geleidelijk verlopende substantiële variatie. Gedurende meerdere jaren treden tegen het midden van de zeventiger jaren en rond 1990/1991 relatief hoge waarden op en gedurende eveneens meerdere jaren in de eerste helft van de tachtiger ligt het gemiddelde niveau significant lager. De overgangen ertussen verlopen relatief geleidelijk. Het lijkt onwaarschijnlijk dat dit geleidelijke verloop wordt veroorzaakt door een overeenkomstig geleidelijk langjarig verloop van de klimatologische omstandigheden of van het kustwatergehalte onder invloed van de afvoeren van de grote rivieren.

conclusies en aanbevelingen m.b.t. de uitvoering en de resultaten van deze historische analyse:

- Een belangrijke beperkende invloed op de resultaten van deze analyse had het feit dat er in het verleden vrijwel geen onderzoeken zijn uitgevoerd met het doel de toen actuele situatie breed en algemeen te beschrijven en te analyseren. Vrijwel alle onderzoeken waren gericht op het voorspellen van de situatie ná uitvoering van de Deltawerken. Om toch in deze historische analyse ook in enige mate kwantitatieve beschrijvingen van de opgetreden zoutgehalteverdelingen te kunnen geven, moesten veel deelbeschrijvingen uit verschillende publikaties worden gecombineerd en moest ook worden teruggegaan naar basiswaarnemingen. Binnen de opzet van en de beschikbare tijd voor deze literatuurstudie kostte een en ander veel tijd, waardoor geen evenwichtige verdeling van aandacht aan alle relevante aspecten kon worden gerealiseerd.
- Het waarnemingsmateriaal voor een bredere en algemene beschrijving en analyse is wel aanwezig. Dit is zeker het geval voor de huidige situatie en de aan de huidige situatie voorafgaande fase in de vorm van de HISTOS- en de MWTL-waarnemingen. Alleen al enkele relatief eenvoudige ordeningen, bewerkingen en interpretaties van deze grote hoeveelheden gegevens zullen een boeiend en leerzaam beeld opleveren van de mogelijke zoutgehalteverdelingen op de Oosterschelde.
- Een wenselijke en mogelijke beschrijving en analyse, die vanwege de genoemde beperkingen in deze historische analyse niet mogelijk was, zou kunnen inhouden:
 - Een beschrijving van het langjarige verloop op basis van jaargemiddelde waarden en hoogste en laagste maandgemiddelden/-waarnemingen op een aantal relevante locaties.

- Een bepaling van een gemiddeld, een nat/zoet en een droog/zout jaar per fase op basis van de analyse van het langjarige verloop van de jaargemiddelden en de bijbehorende bepalende randvoorwaarden.
- Een beschrijving van het jaarverloop op de gekozen relevante locaties op basis van maandgemiddelden/-waarnemingen voor de gemiddelde, de nat/zoete en de droog/zoute jaren.
- Een simultane presentatie van overeenkomstige jaarverlopen van ruimtelijk gerelateerde locaties, waartussen de ruimtelijke gradiënten relevant zijn.
- Selectie en presentatie van ruimtelijke gradiënten, op basis van simultaan opgetreden maandgemiddelde waarden.

Op deze wijze kunnen alle voor de ecologische aspecten relevante opgetreden absolute en relatieve, temporele en ruimtelijke gradiënten worden bepaald en worden gerelateerd aan de gewenste realiseerbare gradiënten in de toekomst.

- Een beschrijving en analyse van de huidige situatie ten aanzien van de optredende zoutgehalteverdelingen, met een bepaling van representatieve jaren, is het minste wat nodig is als basis voor de actuele plannen én zou bovendien in enige mate recht doen aan de zeer omvangrijke, in het verleden bestede capaciteit en inspanningen om ze te voorspellen.

LITERATUUR

- Anonymus I, (1966)
De Zoet- en Zoutwaterbeweging in het Mondingsgebied van het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg. In Driemaandelijks Bericht Deltawerken 38, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Anonymus II, (1968)
Experimenteel verziltingsonderzoek (vervolg). In Driemaandelijks Bericht Deltawerken 46, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Anonymus III, (1977)
De zout-zoetproblematiek van het Oosterscheldebekken. In Driemaandelijks Bericht Deltawerken 79, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Anonymus IV, (1978)
Inrichting Oosterschelde. Deelrapport Inventarisatie 1978. Coördinatiegroep Oosterschelde, red. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.
- Anonymus V, (1979)
Waterhuishoudkundige relaties in het Deltagebied. In Driemaandelijks Bericht Deltawerken 87, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Anonymus VI, (1982)
Toepasbaarheid ééndimensionaal model, een literatuurstudie. Rapport M896-41 deel I, Waterloopkundig Laboratorium, Delft.
- Anonymus VII, (1986)
De waterkwaliteit van de Oosterschelde. In Driemaandelijks Bericht Deltawerken 115, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Anonymus VIII, (1991)
Veilig getij. De effecten van de waterbouwkundige werken op het getijdemilieu van de Oosterschelde. Nota GWWS 91.088 / AX 91.091, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren / Directie Zeeland, Middelburg.
- Anonymus IX, (199?)
Turbulentie en Menging in zoet-zout water. Evaluatie van onderzoek over de periode 1986-1992, Ministerie van Verkeer en Waterstaat / Waterloopkundig Laboratorium Delft, Den Haag.
- Battjes, J.A., (1997)
Stroming in waterlopen, Collegehandleiding Ctw3310, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Vloeistofmechanica, Delft.
- Berg, J.H. van den, (1986)
Aspects of sediment- and morphodynamics of subtidal deposits of the Oosterschelde (the Netherlands). Rijkswaterstaat-communication 43, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Begeman, D., (1982)
Overzicht zoutregistraties 1972 -1978 kust zuidelijk deltabekken en Oosterschelde. Nota DDWT-82.013, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Den Haag.
- Berchum, A.M. van, Wattel, G., (1997)
De Oosterschelde, van estuarium naar zeearm. Rapport RIKZ - 97.034, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, Middelburg. ISBN 90-369-3481-8.
- Biggs, R.B., Cronin, L.E., (1981)
Special characteristics of estuaries. In: Estuaries and nutrients, Humana press, Clifton NJ, p. 3-23
- Bowden, K.F., (1984)
Turbulence and mixing in estuaries. In: The estuary as a filter, Academic Press, Inc.
- Bultman-Robaczewska, K., (1986)
Relatie tussen dispersiecoëfficiënt, getijsnelheid en zoetwatertoevoer. Notitie GWAO-86.346, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Den Haag.
- Burgh, P. van der, (1968)

- Prediction of the extent of salt water intrusion into estuaries and seas. *Journal of Hydraulic Research*, 6, p. 267-288.
- Cadee, N., (1994)
Typologie van estuariene systemen. Rapport RIKZ - 94.048, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.
- Dronkers, J., (1980)
Kwalitatieve interpretatie van zoutmetingen in de Oosterschelde bij constante zoetwateraanvoer op het Volkerak. Conceptnota DDWT - 80. , projectcode V790202, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Den Haag.
- Dronkers, J., Zimmerman, J.T.F., (1981)
Principles of mixing in tidal basins in the Netherlands. Nota DDWT-82.015, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Den Haag.
- Dyer, K.R., (1995)
Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo (1995).
- Fischer, H.B., ed., (1979)
Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, New York.
- Giessen, A. van der, Kollé, G.J., (1989)
De variabiliteit van het zoetwatergehalte voor de Zuidnederlandse kust en in de Deltawateren. Nota GWAO-89.002+appendix Nota GWAO-89.002, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag.
- Hoeven, P.C.T. van der, (1983)
Watertemperatuur en zoutgehaltewaarnemingen in de Oosterschelde 1894 - 1982. Wetenschappelijk Rapport WR 83-12, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.
- Hoeven, P.C.T. van der, Muijsert, J., (1983)
Watertemperatuur- en zoutgehaltewaarnemingen nabij het Lodijkse Gat (Oosterschelde) 1921 - heden. Technisch Rapport TR-40 (FM), Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.
- Karelse, M., Perrels, P., van der Wekken, A., (1986)
Zout-zoetproblematiek kompartimentering Oosterschelde. Rapport Z97(WL) / GWAO-86.001(RWS,DGW), Waterloopkundig Laboratorium, Rijkswaterstaat / Dienst Getijdewateren, Delft / Den Haag.
- Kreeke, J. van de, Robaczewska, K., (1989)
Effect of wind on the vertical circulation and stratification in the Volkerak Estuary. *Netherlands Journal of Sea Research* 23 (3), p. 239-253.
- Ockhuysen, C.P., Robaczewska, K., (1985)
Oriënterende berekeningen naar de zouttoestand op de Oosterschelde gedurende de aanleg van de compartimenteringsdammen. Nota DDWT-85.006, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Den Haag.
- Peelen, R. (1967)
Isohalines in the Delta area of the rivers Rhine, Meuse and Scheldt. *Netherlands Journal Sea Research*, 3, p. 575-597.
- Peelen, R., (1969)
Morfometrisch en hydrometrisch overzicht van het Deltagebied van Rijn, Maas en Schelde. Rep. Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek: 1-15, Mimeographed, Yerseke.
- Peelen, R., (1970)
Isohalines in the Delta area of the rivers Rhine and Meuse. Changes in salinity caused by the construction of the Haringvlietbridge, Grevelingendam and Volkerakdam. *Netherlands Journal Sea Research* , 5, p. 1-19.
- Perillo, G.M.E. (ed.) (1995)
Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Elsevier, Amsterdam.
ISBN 0-444-88170-0

- Pritchard, D.W., (1955)
Estuarine circulation patterns. Proc. Amer. Soc. Civil Engineers 81: 717.
- Pritchard, D.W., (1967)
Observations of circulation in coastal plain estuaries. In Estuaries, G.H. Lauff (ed.), Publ. Amer. Ass. Adv. Sci., 83, p. 37-44.
- Saeijs, H.L.F., (1982)
Changing estuaries. Rijkswaterstaat Communications, no.32/1982, Den Haag.
- Veen, J. van, (1944)
Schelderegiem en Schelderegie, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Vos, P.C., van Heeringen, R.M., (1997)
Holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland. In: Holocene evolution of Zeeland (SW Netherlands), Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, nr. 59, Haarlem.
- Wekken, A. van der, (1987a)
Evaluatie zout-zoetmetingen bij Tholense gatsluiting. Nota GWAO-87.025, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag.
- Wekken, A. van der, (1987b)
Evaluatie zout-zoetmetingen bij Krammersluiting. Nota GWAO-87.026, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag.
- Wolff, W.J., (1973)
The estuary as a habitat. Communication nr. 106, Delta Institute for Hydrobiological Research, Yerseke; Zoölogische Verhandelingen no. 126, Rijksmuseum van Natuurlijke Historie, Leiden.
- Zaan, H. van der, (1982)
Horizontale zoutgradiënten op het traject Hollandsch Diep - Oosterschelde vóór afsluiting van het Volkerak. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater, District Zuid-West, Lelystad.