

Lange termijn gedrag Westerschelde

definitiestudie
zeespiegelrijzing

Project: Verdieping

INHOUDSOPGAVE

Pag. nr.

Voorwoord	- 3 -
1. Inleiding	- 4 -
1.1 ONDERZOEKSPROGRAMMA VERDIEPING	- 4 -
1.2 PROBLEEMSCHETS	- 4 -
1.3 OPZET DEFINITIESTUDIE	- 5 -
1.4 BESCHRIJVING STUDIEGEBIED	- 5 -
1.5 OPBOUW VAN HET RAPPORT	- 6 -
2. Probleemanalyse	- 7 -
2.1 ALGEMEEN	- 7 -
2.2 HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN WESTERSCHELDE	- 7 -
2.3 WATERBEWEGING, MORFOLOGIE EN SEDIMENTHUISHOUDING	- 10 -
2.3.1 <i>Algemeen</i>	- 10 -
2.3.2 <i>Initiële verandering van de waterbeweging</i>	- 10 -
2.3.3 <i>Morfologische aanpassingen</i>	- 13 -
2.3.4 <i>Veranderingen in de sedimenthuishouding</i>	- 14 -
2.3.5 <i>Veranderingen in de uitwisseling met omliggende gebieden</i>	- 17 -
2.3.6 <i>Invloed natuurlijke morfologische veranderingen op de waterbeweging</i>	- 18 -
2.4 MENSELIJKE ACTIVITEITEN	- 18 -
3. Toekomstverkenning	- 21 -
3.1 ALGEMEEN	- 21 -
3.2 NATUURLIJKE ONTWIKKELINGEN	- 21 -
3.3 INVLOED MENSELIJKE ACTIVITEITEN	- 22 -
3.4 ONZEKERHEDEN IN DE PROGNOSE	- 22 -
4. Onderzoeksmethodieken	- 24 -
4.1 ALGEMEEN	- 24 -
4.2 BENADERINGEN	- 24 -
4.3 MEETGEGEVENS	- 25 -
4.4 MODELLEN	- 26 -
4.5 PARALLEL ONDERZOEK	- 26 -
5. Onderzoeksvoorstel	- 29 -
5.1 ALGEMEEN	- 29 -
5.2 PLAN VAN AANPAK	- 29 -
5.3 BUDGET EN PLANNING	- 32 -
5.4 AFSTEMMING MET ANDERE STUDIES	- 32 -
6. Conclusies	- 33 -
Referenties	- 34 -
Lijst van tabellen	- 35 -
Lijst van figuren	- 35 -
Lijst van bijlagen	- 35 -

Voorwoord

Het voorliggende rapport is de eindrapportage van de definitiestudie Zeespiegelrijzing Westerschelde. Deze studie is in opdracht van het RIKZ Middelburg uitgevoerd als onderdeel van het onderzoeksproject Verdieping. De centrale onderzoeksvragen zijn welke invloed de zeespiegelrijzing op het estuarium zal hebben en hoe realistisch de kans op *verdrinken van het estuarium door versnelde zeespiegelrijzing* is. Om de laatste vraag te kunnen beantwoorden zijn ook andere invloeden op het lange termijn gedrag van de Westerschelde bestudeerd.

Uit de definitiestudie is gebleken dat de komende honderd jaar versnelde zeespiegelrijzing geen bedreiging van de natuurfunctie van de Westerschelde tot gevolg zal hebben. De gevolgen van getijveranderingen en menselijke activiteiten als vaargeulbeheer en zandwinning kunnen even groot of zelfs groter zijn. De gevolgen van versnelde zeespiegelrijzing en menselijke activiteiten samen zouden op de lange termijn wel ongewenst kunnen zijn. Omdat deze ontwikkelingen elkaar wederzijds beïnvloeden is het bestuderen van de gevolgen van alleen versnelde zeespiegelrijzing niet zinvol. De titel van dit rapport is dan ook algemeen geformuleerd.

Het voorgestelde onderzoek is erop gericht om voor een aantal verschillende beleidsscenario's de lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde te kunnen bepalen, zodat de huidige functies van de Westerschelde ook op de lange termijn gewaarborgd kunnen worden.

Deze studie is uitgevoerd door Bram Blik, Arie de Gelder en Maarten Jansen (Svašek) en Tom Pieters (Bureau Getijdewateren) onder verantwoordelijkheid van eerstgenoemde. Hierbij willen wij Ad Langerak (RIKZ) bedanken voor zijn stimulerende begeleiding en Aline Arends, Bart Kornman, Piet Roelse en Jacques Vroon voor hun adviezen naar aanleiding van het concept rapport. Ook gaat onze dank uit naar John de Ronde (RIKZ) en diverse medewerkers van RIKZ Middelburg en Directie Zeeland voor de assistentie bij het verzamelen van de benodigde gegevens.

1. Inleiding

1.1 ONDERZOEKSPROGRAMMA VERDIEPING

De Westerschelde is een belangrijke vaarweg en een ecologisch uniek gebied. In dit estuarium beïnvloeden natuurlijke ontwikkelingen, menselijk ingrepen en hydrodynamica elkaar. Om Antwerpen bereikbaar te houden voor de scheepvaart wordt voortdurend gebaggerd. Momenteel wordt gewerkt aan een verdere verdieping van ondiepe gedeelten van de vaargeul om Antwerpen beter bereikbaar te maken voor grotere schepen. De morfologische ontwikkeling van het estuarium zal op korte en middellange termijn voornamelijk bepaald worden door deze verdieping. Op lange termijn kan naast de bagger- en stortactiviteiten (zandwinning en vaargeulbeheer) versnelde zeespiegelrijzing en toenemend getij een belangrijke invloed op de ontwikkeling van de Westerschelde hebben.

Om de beleidsuitvoering van Directie Zeeland ten aanzien van de Westerschelde te ondersteunen wordt door het RIKZ Middelburg het onderzoeksprogramma Verdieping uitgevoerd. In samenhang hiermee wordt een modelinstrumentarium ontwikkeld en worden studies uitgevoerd naar natuurlijkheid (morfologische dynamiek), veiligheid tegen overstromen en zeespiegelrijzing. Daarnaast wordt een monitoring van de verdieping uitgevoerd. *Het onderzoek naar zeespiegelrijzing moet leiden tot een morfologisch referentiekader op basis van natuurlijke externe invloeden waartegen de lange termijn effecten van eventuele menselijke ingrepen in het estuarium kunnen worden afgezet.*

1.2 PROBLEMSCHETS

In het beleidsplan Westerschelde staat dat er dient te worden gestreefd naar behoud van de Westerschelde als een waardevol natuurlijk watersysteem, met inachtneming van de scheepvaartfunctie en uiteraard de veiligheid tegen overstromen.

De natuurfunctie van de Westerschelde hangt nauw samen met de diversiteit van het estuarium: een ruimtelijke variatie in zoutgehalte en diepte. Een ongewenste lange termijn ontwikkeling is daarom het verdwijnen of verkleinen van ondiep water, plaat-, slik- en schorarealen. Minder belangrijk is de exacte lokatie van deze gebieden. Natuurlijke dynamiek is zelfs een waardevolle eigenschap. Wel is van belang dat deze gebieden in alle delen van het estuarium (zout, brak en zoet) aanwezig blijven.

Verdwijnen of verkleinen van de ondiep water, plaat-, slik- en schorarealen zou kunnen plaatsvinden door verlanden of verdrinken. Het lange termijn perspectief van verlanden is onderzocht binnen de Oostwest studies (Pieters, 1991 en Vroon, 1997). Van verdrinken is sprake als door versnelde zeespiegelrijzing en/of erosie genoemde arealen verdwijnen of afnemen. Verdrinking staat binnen deze studie centraal.

Zeespiegelrijzing is een zeer geleidelijk verlopend proces. De orde van grootte is 20 tot 100 cm per eeuw. Als gevolg van versnelde zeespiegelrijzing zou in grote lijnen het volgende kunnen gebeuren. De platen komen lager te liggen ten opzichte van gemiddeld zeeniveau en de geulen worden dieper. Door de initiële afname van de snelheden in de geulen zullen deze geulen gaan aanzanden. Als er niet genoeg zand wordt geïmporteerd om deze aanpassing mogelijk te maken, zal dit ten koste gaan van de ondiep water, plaat-, -slik- en schorgebieden, die hierdoor nog verder zullen verlagen ten opzichte van gemiddeld zeeniveau.

Naast een middenstandsverhoging zal de komende honderd jaar waarschijnlijk ook een getijslagtoename op de Noordzee van enkele centimeters optreden, waardoor de snelheden in de geulen zullen toenemen. De aanzanding van de geulen zal hierdoor worden beperkt of zelfs omslaan in verruiming.

Ook grootschalige menselijke activiteiten als vaargeulonderhoud, zandwinning en in- of ontpolderingen beïnvloeden de waterbeweging door de geulen. De lange termijn gevolgen hiervan op waterbeweging en morfologie kunnen even groot of zelfs groter zijn dan de zeespiegelrijzing en getijslagtoename.

De verschillende ontwikkelingen beïnvloeden elkaar wederzijds. Bij het ontwikkelen van een lange termijn visie op het gedrag van de Westerschelde dienen dan ook verschillende scenario's te worden bestudeerd. *Bij deze studie ligt de nadruk op de gevolgen van versnelde zeespiegelrijzing en getijslagtoename op de Noordzee in de komende honderd jaar.*

1.3 OPZET DEFINITIESTUDIE

Het doel van deze definitiestudie is om aan te geven hoe kan worden vastgesteld wat de gevolgen van versnelde zeespiegelrijzing voor het Westerschelde estuarium zijn en welke maatregelen genomen kunnen worden om eventuele ongewenste gevolgen te voorkomen.

De tijdschaal van de processen die in de studie naar zeespiegelrijzing worden bestudeerd is 50 tot 100 jaar. De processen met een tijdschaal tot 50 jaar worden binnen de studies naar natuurlijkheid (morfologische dynamiek) en veiligheid bestudeerd. Enige overlap is hierbij niet te vermijden omdat de getijbeweging de dominante drijvende kracht van de morfologische processen is.

De ruimteschaal die tijdens deze definitiestudie gehanteerd wordt is de Westerschelde en de uitwisseling hiervan met omliggende gebieden, het mondingsgebied en de Zeeschelde (zie figuur 1.1). Binnen de Westerschelde worden de volgende onderverdelingen gehanteerd (zie Huijs, 1996 en/of Vroon, 1997 voor de geografische ligging):

- a. diep water/ondiep water, plaat-, slik- en schorarealen;
- b. westelijk deel/middendeel/oostelijk deel.

Er wordt gezien de tijdschaal geen onderverdeling gemaakt in afzonderlijke geul- en plaatgebieden.

De definitiestudie bestaat uit een analyse van de problematiek op basis van bestaande kennis en gegevens. Op basis hiervan is een toekomstverkenning uitgevoerd, waarbij de omvang van de lange termijn gevolgen van natuurlijke ontwikkelingen en menselijke activiteiten is bepaald. Verder zijn de kennisleemten en beschikbare methodieken om deze prognose uit te werken geïnventariseerd. Tenslotte wordt een onderzoeksplan voorgesteld.

Deze onderdelen zijn uitgevoerd door het verzamelen en analyseren van relevante gegevens en literatuur, het interviewen van onderzoekers, enkele mathematische modelberekeningen en overleg met de opdrachtgever.

Tijdens de studie is duidelijk geworden dat de gevolgen van versnelde zeespiegelrijzing beperkt zijn en niet los van andere ontwikkelingen en menselijke ingrepen kunnen worden bepaald. Dit is de reden dat de titel van het rapport en het onderzoeksplan algemener zijn geformuleerd.

1.4 BESCHRIJVING STUDIEGEBIED

Het studiegebied, de Westerschelde is een onderdeel van het Schelde-estuarium. De oorsprong van de Schelde ligt in Frankrijk ca. 350 km van Vlissingen. 167 km van Vlissingen wordt de getij-invloed gestopt door een sluis bij Gentbrugge. Het Nederlandse deel van de Westerschelde is ongeveer 60 km lang en gemiddeld 5 km breed.

Het geulareaal (het gebied beneden NAP-5m) bedraagt ongeveer 170 km². Het overige deel bestaat uit ondiep water (tussen NAP-5m en NAP-2m, ca. 30 km²), platen, slikken of schorren (boven NAP-2m, ca. 75 km²). De waterinhoud van alle geulen inclusief het ondiep watergebied (onder NAP-2m) is ruim 2200 Mm³. Het zandvolume boven NAP-2m is ongeveer 100 Mm³.

Het vloedvolume bij Vlissingen is ruim 1000 Mm³ met een doottij/springtijvariatie van 20%. Bij de grens is het vloedvolume nog ruim 100 Mm³. De rivierafvoer bij Schelle schommelt tussen 180 m³/s in de winter en 50 m³/s in de zomer met een gemiddelde van 100 m³/s. Daarnaast wordt nog zo'n 50 m³/s in de Westerschelde afgewaterd. De zoetwaterafvoer tijdens een getij (maximaal 10 Mm³) is dus klein ten opzichte van de getijvolumina.

Het gemiddelde getijverschil neemt toe van ruim 3.8 m bij Vlissingen tot een maximum van ruim 5.2 m bij Schelle. Bovenstrooms van Schelle neemt het getijverschil snel af en bedraagt bij de sluis in Gentbrugge nog 1.9 m. Het water stijgt sneller dan het zakt en de maximale vloodsnelheden zijn hoger dan de maximale ebsnelheden.

Het zandtransport bestaat voornamelijk uit suspensietransport en is tijdens springtij 10 tot 20 keer groter dan tijdens doottij. Kwalitatief bestaat het volgende beeld: het residueel zandtransport volgt het patroon van de eb- en vloedgedomineerde stroming, hierdoor ontstaan circulatiecellen om de platen heen. Deze circulatiecellen wisselen zand uit, dit resulteerde de afgelopen honderd jaar in een netto landwaarts, vloedgedomineerd zandtransport. De laatste decennia wordt de zandhuishouding sterk beïnvloed door grote hoeveelheden zand die ten behoeve van vaargeulonderhoud en zandwinning in de Westerschelde worden gebaggerd en (gedeeltelijk) teruggestort.

Voor meer gegevens en details wordt verwezen naar Vroon, 1997.

1.5 OPBOUW VAN HET RAPPORT

In hoofdstuk 2 worden het lange termijn gedrag van de Westerschelde verder geanalyseerd. Na een algemene probleemanalyse (2.1) worden in 2.2 de huidige verwachtingen ten aanzien van zeespiegelrijzing en getijslagtoename beschreven. Vervolgens wordt stilgestaan bij de invloed hiervan op waterbeweging en morfologie (2.3), de invloed van eventuele beheersmaatregelen (2.4) en de historische ontwikkeling van de Westerschelde (2.5).

In hoofdstuk 3 wordt op basis van deze analyse een inschatting gemaakt van de gevolgen van de beschreven ontwikkelingen aan het eind van de volgende eeuw. Ook de gevoeligheid van deze voorlopige prognose voor verschillende scenario's en aannames is onderzocht.

In hoofdstuk 4 worden de beschikbare en te ontwikkelen onderzoeksmethodieken om de onzekerheden in de voorlopige prognose te verkleinen beschreven. Het rapport sluit af met een voorstel voor vervolgonderzoek (hoofdstuk 5) en algemene conclusies (hoofdstuk 6).

Een belangrijk deel van het rapport wordt gevormd door de bijlagen. Deze bijlagen bevatten een overzicht van de beschikbare literatuur, meetgegevens en modellen die voor de studie naar het lange termijn gedrag van de Westerschelde van belang zijn. In bijlage 4 zijn de opzet en resultaten van een aantal berekeningen met een mathematisch waterbewegingsmodel beschreven.

2. Probleemanalyse

2.1 ALGEMEEN

Om aan te kunnen geven hoe *realistisch* bepaalde veranderingen in gemiddeld zeeniveau en getij zijn worden in dit hoofdstuk de historische ontwikkelingen en toekomstverwachtingen beschreven.

Vervolgens wordt uitgewerkt hoe veranderingen in deze hydraulische randvoorwaarden doorwerken op de Westerschelde. Hierbij is gebruik gemaakt van theoretische beschouwingen, de resultaten van mathematische modelresultaten en ervaringsgegevens. Allereerst wordt de *initiële* aanpassing van de waterbeweging aan veranderende randvoorwaarden beschreven, vervolgens de morfologische aanpassingen. Morfologische aanpassingen zullen alleen optreden als er een herverdeling van zand binnen het estuarium of uitwisseling van zand met omliggende gebieden optreedt. De vraag is of en hoe het systeem deze zandtransporten kan realiseren. De interactie tussen veranderende waterbeweging, morfologie en zandtransporten is een geleidelijk verlopend en continu proces. Ter vereenvoudiging zijn de van belang zijnde invloeden en mechanismen eerst afzonderlijk beschreven. Bij de toekomstverkenning (hoofdstuk 3) worden een aantal aannames gedaan over het verband tussen de verschillende onderdelen, waardoor de gevolgen voor de komende eeuw kunnen worden bepaald.

Ook menselijke activiteiten beïnvloeden de waterbeweging, zandhuishouding en morfologie in de Westerschelde. De omvang van een aantal van deze activiteiten is zo groot dat ze ook op de lange termijn gevolgen op de morfologie hebben *en/of* het natuurlijke lange termijn gedrag kunnen beïnvloeden. Deze effecten en invloeden worden beschreven.

2.2 HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN WESTERSCHELDE

De informatie over historische ontwikkelingen en toekomstverwachtingen van het gemiddeld zeeniveau is grotendeels ontleend aan een recente publicatie van het RIKZ (De Ronde, 1998). Daarin wordt ook aandacht besteed aan veranderingen in getij, stormklimaat en rivierafvoeren.

Zeespiegelrijzing

Langs de Nederlandse kust worden al meer dan honderd jaar stijgende waterstanden gemeten. Dit wordt zowel veroorzaakt door stijging van de gemiddelde waterstand als daling van de bodem. We spreken dan ook van relatieve zeespiegelstijging. Deze relatieve zeespiegelstijging bedroeg over de laatste honderd jaar in Nederland gemiddeld zo'n 20 cm (Dillingh en Heinen, 1994). Uit genoemde studie blijkt echter ook dat er belangrijke verschillen tussen de verschillende meetstations zijn (zie figuur 2.2). Voor de Westerschelde zijn deze verschillen beperkt (zie figuur 2.3).

Op grotere schaal zijn de verschillen veel groter (zie figuur 2.1). Voor het gebied rond de Noordzee neemt naar het noorden toe de relatieve zeespiegelstijging af. Bij Noorwegen treedt zelfs een relatieve zeespiegeldaling op. Verschillen in bodemstijging en bodemdaling vormen de voornaamste verklaring voor deze ruimtelijke verschillen.

Naast bodemdalingen en -stijgingen speelt in de trends de zeespiegeltoename door veranderingen in de temperatuur een grote rol. Uit de analyse van vele metingen is gebleken dat de temperatuur op aarde de laatste honderd jaar gestegen is met ongeveer

0.6°C. Een toename van het broeikas effect (de belemmering van uitstraling van energie naar de ruimte buiten de atmosfeer) levert hieraan een belangrijke bijdrage. Deze toename van het broeikas effect komt o.a. doordat de CO₂-concentratie in de atmosfeer door de verbranding van fossiele brandstoffen de laatste decennia sterk is gestegen. Ook andere effecten van menselijke activiteiten spelen echter een rol. Door de uitstoot van zwaveldioxide neemt het vermogen van de atmosfeer om zonlicht te reflecteren toe. Dit leidt juist tot afkoeling.

De Ronde (1998) beschrijft verder de temperatuur- en zeespiegelstijgingen zoals die recent zijn berekend door het IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en het IMAU (Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek, Utrecht). Verwacht wordt dat de temperatuurstijging voor de komende eeuw aanzienlijk groter zal zijn dan de waargenomen temperatuurstijging in de afgelopen eeuw. De uitkomst van klimaatmodelberekeningen voor diverse emissiescenario's varieert tussen 1°C en 3°C (van 1990 tot 2100).

Ook de invloed van deze temperatuurstijgingen op het zeespiegelniveau zijn berekend voor de periode van 1990 tot 2100 en de resultaten variëren tussen 27 en 55 cm (zie figuur 2.4). Een groot deel van de waargenomen zeespiegelrijzing blijft echter onverklaarbaar met deze klimaatmodellen. De voorspelling voor de komende eeuw moet hiervoor gecorrigeerd worden met ca. 11 cm. Hoewel de voorspellingen daarmee lager zijn dan in het verleden (De Ronde e.a., 1988: 35 tot 85 cm) handhaaft Rijkswaterstaat, gezien de grote onzekerheden 60 cm als verwachte relatieve zeespiegelrijzing.

Uit de in Dillingh en Heinen (1994) gepresenteerde tijdreeksen blijkt dat de gemiddelde relatieve zeespiegelrijzing in de Westerschelde in grote lijnen overeenkomt met die van de andere Nederlandse stations (vergelijk figuur 2.2 en 2.3). Een opmerkelijk fenomeen is wel de daling van de gemiddelde zeestand bij Vlissingen rond 1880; een soortgelijke daling is ook bij IJmuiden goed waarneembaar. Hiervoor is tot nu toe geen goede verklaring gevonden. Misschien is in Vlissingen sprake geweest van een onjuiste aansluiting op het referentievlak.

In aansluiting op de beschreven verwachtingen voor Nederland kan ook voor de Westerschelde worden gesteld dat de relatieve zeespiegelrijzing, die de afgelopen eeuw 20 cm bedroeg, naar verwachting zal toenemen tot 60 cm voor de komende eeuw. *Gezien de onzekerheden t.a.v. deze verwachting is het echter wel belangrijk de gevolgen van verschillende scenario's van zeespiegelrijzing voor het estuarium te onderzoeken.*

Getijverandering

Het getij in de Noordzee wordt bepaald door het getij op de Atlantische Oceaan, de ligging van de kusten en de diepte (zie RIKZ, 1996). Er is sprake van drie amphidromische systemen. Het Noordzee getij langs de Nederlandse kust is te karakteriseren als een lopende getijgolf, die loopt van zuid naar noord. In de Westerschelde loopt de getijgolf naar binnen, waarbij de amplitude toeneemt tot bij Antwerpen, waarna de amplitude weer afneemt. Naast de gemiddelde zeestand is ook het getij aan verandering onderhevig. Het tijverschil neemt op bijna alle plaatsen in Nederland toe (gemiddeld zo'n 10 cm/eeuw. In de Eems-Dollard en de Westerschelde is de stijging nog sterker (zie figuur 2.5). Veranderingen in de morfologie, o.a. door menselijke verdieping van de vaargeulen lijkt de belangrijkste oorzaak te zijn van deze verschillen. De rol die de stijgende zeespiegel (toename diepte en voortplanting getijgolf) hierin speelt is waarschijnlijk gering. Op basis van Noordzee modelberekeningen (Bavelaar, 1987 en Langendoen, 1987) volgt uit een zeespiegelrijzing van 20 cm een getijslagtoename van ca. 2 cm (0.5%) en een vervroeging van ca. 10 minuten bij Vlissingen. Bij IJmuiden en Den Helder treedt in deze modelberekeningen zelfs een afname van de getijslag op t.g.v. een andere ligging van de amphidromische systemen. Opvallend is dat de waargenomen getijverschillen bij IJmuiden tot 1960 een geringe daling vertonen. Bij Den Helder is dit daarentegen niet het geval.

Ook in de Westerschelde zijn er sterke ruimtelijke verschillen in de ontwikkeling van de getijverschillen (zie figuur 2.6). Gemiddeld treedt voor alle stations een getijslagtoename op, die sterker wordt naarmate de stations verder landinwaarts liggen.

Gezien de vele onduidelijkheden over de oorzaken van de getijslagtoename is de pragmatische verwachting die voorlopig door Rijkswaterstaat wordt gehanteerd dat de veranderingen die zich de afgelopen honderd jaar in de zuidelijke Noordzee hebben voorgedaan, de komende eeuw zullen voortzetten.

In tegenstelling tot de zeespiegelrijzing laten de in Dillingh en Heinen (1994) gepresenteerde tijverschillen over de afgelopen eeuw voor de Westerschelde duidelijke verschillen zien. In grote lijnen een voor de laatste honderd jaar naar binnen toe steeds groter wordende getijslagtoename: van ca. 3% bij Westkapelle via Vlissingen (4%), Terneuzen (5%), Hansweert (7%) tot ca. 9% bij Bath (zie figuur 2.6). Het verloop van deze getijslagtoename in de tijd is echter voor elk van de stations verschillend. Opvallend is verder de toegenomen voortplantingssnelheid van de getijgolf in het Schelde-estuarium. Het hoogwater bereikt nu ten opzichte van Vlissingen Hansweert gemiddeld 15 minuten sneller en Antwerpen zelfs 40 minuten sneller dan in 1895 (Claessens en Meijvis, 1994 in Vroon, 1997).

De oorzaken van de getijslagtoename bij Vlissingen zijn alleen bij benadering bekend, morfologische veranderingen in het mondingsgebied o.a. verdieping van de Scheur/Wielingen lijken een rol te spelen (zie Langendoen, 1987). Daarnaast lijkt ook het getijsysteem van het bekken zelf een grote invloed te hebben. T.g.v. de verdiepingen binnen en buiten zou de getijgolf beter doordringen en de opslingering van het systeem versterken (Svašek, 1997). Dit laatste fenomeen verklaart ook de relatief grotere getijslagtoename naar binnen toe. Binnen het K2000*KOP onderzoeksprogramma wordt hier momenteel middels een getijreconstructie verder onderzoek naar gedaan.

Uitgaande van de huidige trends zal de volgende 100 jaar het getijverschil bij Vlissingen met 4% stijgen. De spreiding rond deze verwachting is echter groot. Omdat de Westerschelde verder verdiept wordt is het waarschijnlijk dat de getijslagtoename landinwaarts nog groter zal zijn. *Om te bepalen of de huidige trends inderdaad aan zullen houden zal verder onderzoek naar de oorzaken van de getijslagtoename moeten worden gedaan. Zolang deze nog niet bekend zijn zal ook voor verschillende scenario's van getijslagtoename de invloed op het estuarium moeten worden bestudeerd. Getijslagafname is niet waarschijnlijk, maar wel mogelijk.*

Stormen en afvoeren

In de laatste honderd jaar is de stormfrequentie in en rond de Noordzee niet toegenomen. Wel werd de omvang van depressies boven de Noord-Atlantische Oceaan groter en zijn een aantal depressies met zeer lage kerndrukken waargenomen. De verklaring hiervoor ontbreekt, daarom zijn conclusies omtrent eventuele veranderingen in windkracht en windrichting erg onzeker. Wel zijn er aanwijzingen dat t.p.v. de Noordzee het huidige patroon van depressies e.d. naar het noorden zal gaan verschuiven. *Binnen deze studie wordt een verandering van het stormklimaat niet verder bestudeerd. Voor de studie naar de veiligheid tegen overstromen is een verandering in stormklimaat op de lange termijn wel van belang.*

De gemiddelde afvoeren van de Nederlandse rivieren zijn wel duidelijk aan verandering onderhevig. Naar de huidige inzichten wordt geschat dat bijvoorbeeld de afvoer van de Maas met zo'n 20% zal toenemen. Een eventuele verandering van de afvoer van de Schelde zal invloed hebben op de zoet-zout verdeling binnen het estuarium.

Voor het Nederlandse deel van de Westerschelde is de invloed van het getij op de waterbeweging vele malen groter dan de afvoer van de Schelde. Daarom wordt een eventuele toe- of afname van de afvoer in deze studie voorlopig buiten beschouwing gelaten.

2.3 WATERBEWEGING, MORFOLOGIE EN SEDIMENTHUISHOUDING

2.3.1 Algemeen

Relatieve zeespiegelrijzing en getijslagtoename beïnvloeden direct de waterbeweging in de Westerschelde. De veranderende waterbeweging beïnvloedt door verplaatsing van zand de morfologie. De interactie tussen veranderende waterbeweging, morfologie en zandtransporten is een geleidelijk verlopend en continu proces. Ter vereenvoudiging worden de van belang zijnde invloeden en mechanismen afzonderlijk beschreven. Het verband tussen de verschillende onderdelen is geschematiseerd weergegeven in figuur 2.7. Een aantal begrippen worden toegelicht in figuur 2.10 t/m 2.12.

Naast theoretische beschouwingen zijn ook mathematische berekeningen (bijlage 4), verwerkte meetgegevens en empirische relaties gebruikt. De omvang van de te verwachten ontwikkelingen zijn geconfronteerd met waargenomen ontwikkelingen om het belang van de beschreven fenomenen aan te geven.

2.3.2 Initiële verandering van de waterbeweging

Randvoorwaarden

De directe invloed van relatieve zeespiegelrijzing is een verhoging van het middenstandsvlak (gemiddeld zeeniveau) en een getijslagtoename op de Noordzee (bij de mond van de Westerschelde). Daarnaast is een van de middenstandsverhoging onafhankelijke getijslagtoename aan de zeewaartse rand (bij Vlissingen) te verwachten. Allereerst zal alleen de invloed van een verandering van de middenstand (gemiddeld zeeniveau) op het getij worden beschreven. Vervolgens wordt apart aandacht aan de getijslagtoename op de Noordzee besteed.

Middenstandsverhoging

Verhoging van het middenstandsvlak in een estuarium werkt als volgt door:

- Het directe effect is verruiming van de doorstroomprofielen, toename van de diepte en een toename van de bergende breedte (zie figuur 2.10). Eerst wordt de invloed van verruiming besproken. Op de bergende breedte komen we later terug.
- Door de toename van de doorstroomprofielen verlagen de snelheden in de geulen en neemt de weerstand af.
- de getijvoortplanting op het bekken wordt beïnvloed door verandering van de verhoudingen tussen weerstand en traagheid en verandering van de verhouding tussen bekkenlengte en getijgolf lengte. Door afname van de weerstand neemt de damping van de getijgolf af, waardoor de getijslag in het bekken en dus de interne berging zullen toenemen (zie figuur 2.11). De invloed van de verhouding tussen bekkenlengte en getijgolf lengte ligt momenteel waarschijnlijk in de buurt van de waarde, waarbij de opslingering maximaal is. De invloed hiervan is dus niet kwalitatief aan te geven.
- Door de toename van de bergende breedte neemt de interne berging van het systeem toe.

- De invloed op de snelheden is dus niet eenduidig: door vergroting van de doorstroomprofielen zullen de snelheden afnemen, door de toename van de interne berging (horizontaal: bergende breedte en verticaal: getijslagtoename) wordt deze snelhedenafname beperkt.
- Als de toename van de bergende breedte erg groot is, zouden de snelheden netto zelfs groter kunnen worden. In dat geval neemt de wrijving toe en zal een getijslagafname en vertraging van het getij optreden. Hoewel de horizontale berging dan toeneemt zal de verticale berging dus afnemen.
- In alle gevallen zal de totale interne berging toenemen. De hieruit resulterende debietentoe name zal zeewaarts het grootst zijn, omdat alle landinwaarts optredende bergingstoename metellen. De uit de interne bergingstoename resulterende debietentoe name zal dus in landwaartse richting afnemen.
- De verdere ruimtelijke verdeling van snelhedenveranderingen en getijslagveranderingen is niet direct te bepalen. Hierin speelt de complexe geometrie een belangrijke rol. In een meergeulenstelsel als de Westerschelde is daarbij ook nog een herverdeling van debieten over de geulen (eb- vloeddominantie) mogelijk.

Om toch een indruk te krijgen van de resulterende veranderingen in de waterbeweging t.g.v. een middenstandsverandering is met het waterbewegingsmodel SCALWEST een experiment uitgevoerd (zie bijlage 4, run 1 ten opzichte van run 0). Ondanks de beperkingen van het gebruikte model voor deze toepassing (geen morfologische aanpassingen) zijn wel de volgende gevolgen van een middenstandsverhoging met 0.5 m aan te geven: een vervroeging van het getij bij Bath met ca. 3 minuten, een toename van de getijverschillen tussen Vlissingen en Bath van ca. 0.1%.

De geringe vervroeging en lichte getijslagtoename wijzen erop dat de snelheden en wrijving iets afnemen. De invloed van de verruiming van de doorstroomoppervlaktes op de snelheden overheerst dus t.o.v. de invloed van de toegenomen interne berging, maar is minimaal. De getijvolumina door een aantal raaien laten een toename van ruim 4% zien. Dit komt inderdaad ongeveer overeen met de verruiming van de geulen ($0.5 \cdot 170 \text{ km}^2$ ten opzichte van 2200 Mm^3).

Bij Antwerpen (Zeeschelde) en Westkapelle en Cadzand (mondingsgebied) is een lichte afname van het getijverschil te zien. Bij Antwerpen is de toename van de bergende breedte (horizontale berging) blijkbaar zo groot dat de snelheden en wrijving toenemen en hierdoor de verticale berging afneemt.

De reden van de afname in het mondingsgebied is minder duidelijk aan te geven.

Externe getijslagtoename

Het effect van een getijslagtoename op de Noordzee werkt door als een interne bergingstoename:

- Ingeval van afnemende snelheden wordt door getijslagtoename de debietenafname beperkt.
- Ingeval van toenemende snelheden wordt door getijslagtoename de snelhedentoe name versterkt.
- Ook door deze bijdrage aan de interne berging zal de snelheidstoename zeewaarts het grootst zijn en landinwaarts afnemen.

Berekeningen met een mathematisch model (zie bijlage 4, run 2 ten opzichte van run 1) geven de volgende gevolgen bij een getijslagtoename op de Noordzee van 4% aan: een verlating van het getij bij Bath met ongeveer 2 minuten en een landinwaarts afnemende toename van de getijverschillen van 4 tot 2%. De snelheden en weerstand nemen dus inderdaad toe.

Confrontatie met waargenomen veranderingen

De over de afgelopen eeuw waargenomen veranderingen zijn een zeespiegelrijzing van ca. 20 cm, een getijslagtoename van 4% bij Vlissingen tot 9% bij Bath en een vervroeging van 15 minuten bij Hansweert tot 40 minuten bij Antwerpen. Hierbij vergeleken zijn de zonder morfologische aanpassingen berekende veranderingen bij een middenstandsverhoging van 50 cm en getijslagtoename op de Noordzee van 4% zeer klein. In de afgelopen eeuw hebben dus andere invloeden over de invloed van zeespiegelrijzing en Noordzeegetij-veranderingen gedomineerd òf zijn de initiële veranderingen in de waterbeweging versterkt door morfologische aanpassingen.

Uit een recent uitgevoerde getijreconstructie uitgevoerd binnen KUST*2000 (Svašek, 1998) blijkt inderdaad dat de morfologische veranderingen van het mondingsgebied en de Westerschelde tussen 1970 en 1996 een niet te verwaarlozen invloed hebben op de getijverschillen (30 cm toename bij Bath). De zeespiegelrijzing is de afgelopen honderd jaar redelijk constant geweest (niet versneld!). De getijverschillen bij Bath zijn de afgelopen 25 jaar daarentegen wèl versneld toegenomen. Een verband met de in deze periode uitgevoerde vaargeulverdieping ligt voor de hand.

De invloed van een getijslagtoename op de Noordzee kan ook bepaald worden door een nadere bestudering van de doorwerking van de doottij/springtij cyclus en de 18,6 jarige cyclus t.g.v. de wenteling van het maansbaanvlak. Door de doottij/springtij cyclus varieert het getijverschil bij Vlissingen met meer dan 20%. Door de 18,6 jarige cyclus varieert het getij met ongeveer 4% (zie figuur 2.6). In tabel 2.1. zijn voor beide cycli en de modelruns de getijverschillen bij Vlissingen en Bath en de onderlinge relatie gegeven.

Bij Vlissingen is de invloed van de 18,6 jarige cyclus op de belangrijkste tweemaal daagse component van het verticale getij (M2) ongeveer de helft van de invloed op de oceaan. Bij Bath is de invloed op de getijverschillen weer duidelijk minder dan bij Vlissingen (respectievelijk 8 en 14 cm, zie figuur 2.6 en Scheldecommissie, 1984, bijlage 4.1.8 en 4.1.11).

De verklaring hiervoor is dat bij grotere getijverschillen tussen Vlissingen en Bath meer damping optreedt (hogere snelheden, meer wrijving). De springtij-doottij cyclus laat dit fenomeen duidelijk zien: bij springtij is de opslingering tussen Bath en Vlissingen maar 21% terwijl deze bij doottij 31% bedraagt (gebaseerd op RWS, 1994). Ook in het uitgevoerde modelexperiment (zie bijlage 4) blijkt bij een getijslagtoename aan de zee-waartse grens de opslingering iets af te nemen (getijverschilfactor Bath/Vlissingen 1.20 i.p.v. 1.21).

Een getijslagtoename op de Noordzee zal dus initieel naar binnen toe uitdempen. Morfologische aanpassingen (verdieping van de geulen) kunnen op termijn landinwaarts de getijverschillen doen toenemen.

	getijverschil Vlissingen	getijverschilfactor Bath/Vlissingen	getijverschil Bath
gemiddeld tij	3.86	1.25	4.83
gemiddeld springtij	4.47	1.22	5.45
gemiddeld doortij	3.02	1.31	3.97
18,6 jarige cyclus:			
maximaal	3.93	1.24	4.87
minimaal	3.79	1.26	4.79
model:			
run 0: fors springtij	4.75	1.21	5.76
run 1: run 0 + 0.5m	4.76	1.21	5.77
run 2: run 1 + 4%	4.93	1.20	5.92

Tabel 2.1 Getijverschillen Vlissingen en Bath (gebaseerd op RWS, 1994 en Scheldec commissie, 1984)

2.3.3 Morfologische aanpassingen

Algemeen

In deze paragraaf worden de morfologische aanpassingen aan een middenstandsverhoging en getijslagtoename op de Noordzee op basis van empirische evenwichtsrelaties beschreven. Morfologische aanpassingen aan veranderingen in de waterbeweging verlopen over het algemeen als volgt:

- Als de snelheden in een geul afnemen zal deze geul gaan aanzanden, als de snelheden in een geul toenemen zal deze geul gaan verruimen.
- Door aanzanding of verruiming van een geul zal herverdeling van sediment plaatsvinden. Bij aanzanding zal het zand in de omliggende geulen en overige delen geborgen worden, bij verruiming zal zand aan deze gebieden worden onttrokken.

Morfologische aanpassingen zullen alleen optreden als er een herverdeling van zand binnen het estuarium of uitwisseling van zand met omliggende gebieden optreedt (zie figuur 2.12). Deze aspecten zijn in paragraaf 2.3.4 en 2.3.5 uitgewerkt.

Aanpassing aan zeespiegelrijzing en getijslagtoename op de Noordzee

In paragraaf 2.2.3 zijn de initiële veranderingen van de waterbeweging ten gevolge van zeespiegelrijzing en getijslagtoename beschreven. Als er geen morfologische aanpassingen zouden plaatsvinden zouden de snelheden bij een zeespiegelrijzing van 0.5 m ongeveer gelijk blijven (licht afnemen), maar in combinatie met een getijslagtoename op de Noordzee toenemen.

Als alleen middenstandsverhoging optreedt zullen de geulen zich nauwelijks aanpassen. Als geen zandimport optreedt zal de bodem een halve meter lager komen te liggen ten opzichte van gemiddeld zeeniveau. *Indien de platen, slikken en schorren met de stijgende getijniveau's meegroeien zal het ondiep waterareaal waarschijnlijk toenemen. Dit vormt geen bedreiging voor de natuurfunctie, integendeel. Als de platen, slikken en schorren niet meegroeien zullen ze dieper komen te liggen en zullen vaker grotere delen overspoeld worden. Ook dit is niet per definitie een aantasting van de natuurfunctie. Volledig verdwijnen van de platen, slikken en schorren is niet waarschijnlijk.*

Als er naast een middenstandsverhoging van 0.5 m ook een getijslagtoename op de Noordzee van 4% optreedt zullen de snelheden in de geulen als geen morfologische aanpassingen plaatsvinden iets toenemen. De geulen zullen in werkelijkheid gaan verruimen tot de snelheden het oude niveau hebben bereikt. Bij een snelheidstoename van 3%, die leidt tot verruiming van de geulen met een waterinhoud van 2200 Mm³ onder NAP -2m zou dit ervan uitgaande dat al dit zand boven NAP -2m wordt geborgen, een toename van de zandinhoud boven NAP -2m van 88 Mm³ betekenen (een gemiddelde verhoging van 0.8m). *De initiële verlaging van de plaat-, slik- en schorgebieden ten opzicht van gemiddeld zeeniveau (0.5 m) kan dus volledig gecompenseerd worden. Zelfs overcompensatie is mogelijk.*

Confrontatie met waargenomen ontwikkelingen

De Westerschelde heeft zich vanaf 1650 tot 1968 ontwikkeld van een groot, breed, ondiep getijdebekken met meerdere laterale overstromingsgebieden tot een relatief smal trechtervormig estuarium. Dit is het gecombineerde effect van natuurlijke ontwikkelingen (sedimentatie van de overstromingsgebieden) en menselijke ingrepen (bedijkingen en inpolderingen) geweest. (zie figuur 2.8). Na 1968 zijn door de verdiepingen de geulen verder uitgediept en is met name in het oostelijk deel de natuurlijke dynamiek afgenomen waardoor een min of meer star systeem is ontstaan. De natuurlijke dynamiek in het oostelijk deel is afgenomen door een versteiling, waarbij het ondiep water areaal is afgenomen (Vroon, 1997). De afname van het ondiep waterareaal, die als negatief wordt beschouwd zal door de middenstandsverhoging worden gecompenseerd.

Om eventuele morfologische aanpassingen aan een getijslagtoename op de Noordzee te bepalen is een globale inventarisatie uitgevoerd van waarneembare morfologische veranderingen in de Westerschelde die samenvallen met de 18,6 jarige cyclus in het getij. Dit is gedaan op basis van eerder uitgevoerde studies naar morfologische ontwikkelingen (UitdenBogaard, 1995; Huijs, 1996, Tank, 1995 en Hoogeboom, 1996). Alleen in de ontwikkeling van de diepere delen van de geulen in het westelijk deel zoals gepresenteerd in UitdenBogaard (1995) zijn zwakke aanwijzingen voor een aanpassing aan de 18,6 jarige cyclus gevonden. Tijdens perioden met grotere getijverschillen (rond 1960 en 1980) neemt het oppervlak beneden -5 m NAP in het meest westelijke lodingsvak met ongeveer 2% toe ten opzichte van perioden met kleinere getijverschillen (rond 1970 en 1990). Over het algemeen lijken de ontwikkelingen meer door andere fenomenen dan deze periodieke toename en afname van getijverschillen bepaald te worden.

2.3.4 Veranderingen in de sedimenthuishouding

Algemeen

Eventuele morfologische veranderingen ten gevolge van veranderingen in de waterbeweging zullen gepaard gaan met een herverdeling van zand. De drijvende kracht achter deze herverdeling is in de Westerschelde het getij.

Hoewel over de omvang van de zandbeweging tijdens een getij geen duidelijk beeld bestaat bestaan er wel verschillende beschrijvingen van de getijresiduele zandtransporten in de Westerschelde. De van belang zijnde mechanismen zijn geïnventariseerd door Storm, 1996. De belangrijkste zijn:

- asymmetrie in de waterbeweging, door getijasymmetrie, getijgedreven residuele stroming en dichtheidsstroming
- asymmetrie in de sedimentlast door traagheidseffecten en ruimtelijke variatie van de hoeveelheid sediment in suspensie
- transport door golfwerking.

Het zandtransport in de Westerschelde bestaat voornamelijk uit suspensietransport en is tijdens springtij 10 tot 20 keer groter dan tijdens doottij. Kwalitatief bestaat het volgende beeld: het residueel zandtransport volgt het patroon van de eb- en vloedgedomineerde stroming en verloopt voornamelijk via circulatiecellen om de platen heen. Deze circulatiecellen wisselen zand uit, dit resulteerde de afgelopen honderd jaar in een netto landwaarts, vloedgedomineerd zandtransport. De laatste decennia wordt de zandhuishouding sterk beïnvloed door grote hoeveelheden zand die ten behoeve van vaargeulonderhoud en zandwinning in de Westerschelde worden gebaggerd en (gedeeltelijk) teruggestort.

In deze paragraaf worden een aantal verschillende benaderingen gebruikt om de invloed van zeespiegelrijzing en getijslagtoename op de zandhuishouding te beschrijven. In dit verband is de vraag van belang of het systeem in staat is om een initiële verlaging van de ondiep water-, plaat-, slik- en schorgebieden ten opzichte van gemiddeld zeeniveau met een orde van grootte van 0,5 m te compenseren. Dat wil zeggen: een transport van 50 Mm³/eeuw van geulen naar overige gebieden. Per getij betekent dit een transport van ca. 700 m³. Eventuele uitwisseling met aangrenzende gebieden (Noordzee en Zeeschelde) wordt in paragraaf 2.3.5 behandeld.

Overschots/tekort benadering

Bij de overschots/tekort benadering wordt voor de verschillende onderdelen van het systeem (geulen, platen, slikken en schorren, circulatiecellen of andere delen) een morfologisch evenwicht gedefinieerd. Als een verstoring van dit evenwicht optreedt zal aanpassing optreden. Hierdoor zal een horizontale herverdeling van beschikbaar zand tussen overschots- en tekortgebieden ontstaan.

Voor menselijke ingrepen (zandwinning, baggeren en storten) in de Westerschelde is op basis van deze benadering de herverdeling van zand bepaald met ASMITA en ESTMORF modellen, waarbij voor een beschrijving van het zandtransport een advectie-diffusie-relatie op basis van getijgemiddelde karakteristieken waterbeweging is gebruikt (zie bijlage 3).

Door Wang, (mei 1997) zijn de effecten van zeespiegelrijzing en getijslagtoename met het ASMITA model bepaald. Zeespiegelrijzing is gemodelleerd als een structurele onttrekking van zand, waardoor de zandhuishouding wordt beïnvloed. De resultaten van deze berekening zijn dan ook een geleidelijke toename van de import. Wel kan enige vertraging optreden, omdat ook in het mondingsgebied een zandvraag wordt opgelegd. Door deze vertraging treedt een verruiming van de geulen op.

Getijslagtoename is gemodelleerd als een evenredige toename van de getijvolumina/ evenwichtsvolumes en een toename van de evenwichtshoogte van de platen. De invloed van de getijvolumina blijkt het grootst te zijn. Doordat de geulinhoud van het mondingsgebied groter is dan die van de Westerschelde zelf, neemt bij procentuele toename van de geulinhoud de import van het estuarium toe.

Uit de theoretische beschouwingen in 2.3.2 en SCALWEST-berekeningen blijkt dat de waterbeweging complexer reageert dan in ASMITA-benadering wordt aangenomen. Veranderingen in de waterbeweging kunnen dan ook niet buiten beschouwing worden gelaten of lineair verondersteld. Wel maken de modelresultaten duidelijk dat de ontwikkelingen in het mondingsgebied niet buiten beschouwing kunnen worden gelaten.

Transportcapaciteit benadering

Bij de transportcapaciteitsbenadering wordt op basis van de waterbeweging bepaald hoeveel zand getransporteerd wordt. Naast de transportcapaciteit speelt echter ook de beschikbaarheid van sediment in suspensie een rol. De aanpassingslengte van het sedimenttransport in de Westerschelde is 2 à 3 km. Voor een bepaalde locatie betekent dit

dat de sedimentbeschikbaarheid en transportcapaciteit van de stroming tot 2 à 3 km stroomopwaarts van invloed zijn op de zandtransporten. Daardoor kan over- en onderverzadiging ten opzichte van de transportcapaciteit op deze locatie optreden.

Om het inzicht in de zandcirculatie tijdens een getij te vergroten kan de transportcapaciteit van de stroming worden berekend. Als wordt aangenomen dat onder- en oververzadiging verwaarloosbaar is kunnen de zandtransporten eenvoudig op basis van waterbewegingsmodellen bepaald worden. Ook voor de Westerschelde zijn hier aanzetten toe geleverd (De Gelder, 1996, Schaap, 1997 en Jansen, 1997b). Calibratie van de evenwichtstransportformuleringen is uitgevoerd met behulp van gemeten zandconcentraties. Voor het oostelijk deel kwamen de gemeten en berekende zandconcentraties over het algemeen goed overeen. Wel was de naijling in de tijd duidelijk zichtbaar. De formuleringen zouden hiervoor moeten worden aangepast. Gezien de aanpassingslengte van het sedimenttransport in de Westerschelde zal ook naijling in de ruimte een rol spelen. Voor de uitwisseling met het mondingsgebied dient daarnaast ook aandacht aan de invloed van golven te worden besteed (zie 2.3.5).

Een beperking van transportcapaciteitsbenadering is dat het berekenen van getijresiduele zandtransporten uitsluitend op basis van deze methode zeer gevoelig is. Algemeen wordt aangenomen dat het residueel transport het verschil is tussen grote eb- en vloedtransporten. Verder zijn de calibratiegegevens (zandconcentratie metingen) beperkt.

Ondanks deze beperking is inzet van deze methode gewenst. Omdat in tegenstelling tot de andere methoden de zandbeweging tijdens een getij kan worden beschreven en hier de transporten tot stand komen, zal toepassing van zandtransportformuleringen in combinatie met zandbalansen en overschot/tekortbenaderingen een belangrijke rol kunnen spelen in het verklaren en begrijpen van de zandcirculatie in de Westerschelde.

Om aan te kunnen geven of het systeem in staat is bepaalde zandtransporten te realiseren, zijn in een spreadsheet voor de raai Vlissingen-Breskens de evenwichtstransporten (Engelund-Hansen) berekend op basis van SCALWEST-resultaten (zie bijlage 4). De gebruikte coëfficiënten zijn bepaald op basis van calibratie van de formuleringen voor het oostelijk deel (zie De Gelder, 1996). Uit deze berekeningen volgt voor een fors springtij een transport tijdens eb en vloed samen van ca. 0.20 Mm^3 . De vloedcapaciteit is in deze berekening ca. 2 keer zo hoog als de ebcapaciteit, het netto transport zou dan 0.08 Mm^3 zijn. Als wordt aangenomen dat de gemiddelde transporten een factor 5 lager zijn dan de transporten tijdens springtij is de totale transportcapaciteit (eb en vloed) door deze raai ongeveer 30 Mm^3 zand per jaar en is het verschil tussen vloed- en ebcapaciteit ongeveer 10 Mm^3 zand per jaar.

Confrontatie met waargenomen ontwikkelingen

Uit een overzicht uit Storm (1996) volgt dat de uit gemeten zandconcentraties berekende zandtransporten door een raai sterk variëren: 3000 tot 125000 ton tijdens één getij (eb en vloed). Uitgaande van een gemiddelde van 25000 ton per getij betekent dit ongeveer 14 Mm^3 transport door een raai per jaar (droge stof 1250 kg/m^3). Deze transporten zijn vele malen groter dan de transporten die benodigd zijn om eventuele morfologische aanpassingen ten gevolge van zeespiegelrijzing en getijslagtoename te compenseren (voor de totale Westerschelde ca. $1000 \text{ m}^3/\text{getij}$).

Dit geldt ook voor de netto zandverplaatsingen die uit opgestelde zandbalansen volgen (orde $1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$).

2.3.5 Veranderingen in de uitwisseling met omliggende gebieden

Algemeen

Naast een herverdeling van zand binnen de Westerschelde kan ook uitwisseling van zand met de Noordzee en de Zeeschelde de ondiep water-, plaat-, slik- en schorgebieden beïnvloeden.

Overschots/tekort benadering

Indien het estuarium een tekort of overschot aan zand heeft zal op lange termijn (na interne herverdeling) uitwisseling met het mondingsgebied of de Zeeschelde plaatsvinden. Doordat de Scheldeafvoer relatief klein is t.o.v. het getij en in de Zeeschelde geen grote hoeveelheden zand beschikbaar zijn zal deze uitwisseling met name moeten plaatsvinden met het mondingsgebied. Ook dit mondingsgebied wordt beïnvloed door de zeespiegelrijzing en zal op haar beurt zand uitwisselen met de kusten en het zeegebied.

Zandtransportcapaciteit benadering

Zandimport of -export van het estuarium zal plaats moeten vinden via de hydraulische processen tussen mondingsgebied en estuarium (ongeveer de raai Vlissingen-Breskens, hals). Naast veranderingen in de stroming (m.n. getijasymmetrie) speelt hierbij evenals bij horizontale verplaatsingen binnen het estuarium ook de beschikbaarheid van sediment in suspensie een rol. De aanpassingslengte van het sedimenttransport in de Westerschelde 2 à 3 km, de veranderingen in lokale bodemligging en stroombeeld bepalen dus of en met welke snelheid een nieuw evenwicht tussen estuarium en monding zich instelt en de vertraging die hierbij optreedt. Voor het zandtransport in de hals is dus niet alleen de ontwikkeling van de Westerschelde zelf, maar ook dat van het mondingsgebied van groot belang. In tegenstelling tot de horizontale uitwisselingen in het estuarium speelt bij de overgang tussen estuarium en mondingsgebied de golfwerking een belangrijke rol. Doordat in het mondingsgebied meer opwoeling van sediment optreedt dan in het bekken zou bij volledig symmetrische waterbeweging en morfologie toch import van zand optreden.

Reconstructies

Naar veranderingen in de vorm van de debietkromme op lange termijn is onderzoek gedaan d.m.v. reconstructies (Van der Spek, 1994). Hieruit is geconcludeerd dat de getijasymmetrie in de monding (Vlissingen/Breskens) bij veranderingen in het Westerschelde bekken kan veranderen. Het zandtransport door de mond beïnvloedt dus het lange termijn gedrag van de Westerschelde, maar verandert zelf door veranderingen in de Westerschelde. *Daarom wordt het zandtransport door de mond niet als een randvoorwaarde, maar als een onderdeel van het systeem behandeld.*

Volgens Van der Spek (1996) zijn de ontwikkelingen van de Westerschelde tussen 1650 en 1968 gepaard gegaan met een afnemende getijasymmetrie, waarbij getijasymmetrie gedefinieerd wordt als de verhouding tussen maximale vloed- en ebsnelheden. Een afname van de getijasymmetrie (vloeddominantie) heeft over het algemeen een afname van de zandimport tot gevolg. Hierin speelt ook de duur van eb- en vloed en de sedimentbeschikbaarheid een rol. In dit verband is ook de veranderde vorm van de kromme (zie figuur 2.9) van belang. De huidige situatie laat voor springtij het volgende zien van vloed naar eb nemen de snelheden zeer snel af. In werkelijkheid blijven de zandtransporten daarom ook tijdens het begin van de ebfase nog enige tijd vrij hoog. Bij de kentering van eb naar vloed treedt dit niet zo sterk op. Het netto zandtransport wordt daarom in een aantal gevallen sterker door de eb gedomineerd dan de getijasymmetrie doet vermoeden. Als het bij netto transport gaat om kleine verschillen tussen grote eb- en vloedhoeveelheden kan dit

verschijnsel van groot belang zijn en zal de jaarlijkse import groter zijn dan de getijasy-metrie van de waterbeweging doet vermoeden.

Confrontatie met waargenomen ontwikkelingen

Over de periode van 1650 tot 1968 zou volgens Van der Spek een gemiddeld jaarlijks zandimport van 0.6 miljoen m³ zijn opgetreden, waarbij de transporten in de laatste jaren onder het gemiddelde liggen. De zandbalans van 1955 tot 1993 laat afwisselend import en export zien. Een uitzondering vormt de grote import rond 1970 (ca. 8 miljoen m³ per jaar). Na 1981 treedt afwisselend import en export op met een gemiddelde import van ca. 0.3 miljoen m³ per jaar.

De Westerschelde als geheel lijkt gezien de lage import- en exportcijfers die volgen uit de zandbalansen momenteel redelijk in evenwicht te zijn. In de nabije toekomst (15 jaar) zal waarschijnlijk wel een aanpassing aan de verdieping 48'/43' gaan plaatsvinden.

2.3.6 Invloed natuurlijke morfologische veranderingen op de waterbeweging

De invloed van de waterbeweging op de morfologie is nog onvoldoende gedetailleerd bekend om eventuele morfologische veranderingen met voldoende zekerheid te kunnen voorspellen. Ook de invloed van de veranderende morfologie op de waterbeweging is daarom nog onduidelijk. Eventuele veranderingen van de vorm van de getijkromme (verticaal) en de getijasy-metrie (horizontaal) zullen echter niet alleen het gevolg van de morfologische aanpassingen zijn, maar zullen deze aanpassingen ook beïnvloeden. Bij het bepalen van het lange termijn gedrag van het estuarium zullen deze tweede orde effecten niet verwaarloosd kunnen worden. Eventuele verdrinking van de gebieden boven NAP -2 m zal bijvoorbeeld gepaard gaan met toename van de bergende breedte, toename van de snelheden etc. *Verdrinking lijkt dus in principe geen zichzelf versterkend proces te zijn.*

2.4 MENSELIJKE ACTIVITEITEN

Algemeen

Eventuele beheersmaatregelen die in reactie op de gevolgen van zeespiegelrijzing kunnen worden uitgevoerd hangen nauw samen met gewenste situatie t.a.v. veiligheid, natuur-functie en vaarwegbeheer. In de loop der tijd zijn een aantal maatregelen voorgesteld. Hier wordt indien mogelijk beschreven welke rol deze maatregelen kunnen spelen in een eventuele verdrinking van de Westerschelde door versnelde zeespiegelrijzing. Voor de beschreven historische ontwikkelingen is gebruik gemaakt van de rapportages van het Project Oostwest (zie Vroon e.a., 1997).

Vaargeulbeheer

In het kader van de vaarwegfunctie zijn in het verleden **verdiepingen** van de ondiepere delen van de vaargeul (de drempels) voorgesteld en uitgevoerd. Deze verdiepingen hebben plaatsgevonden door baggeren, waarbij het gebaggerde materiaal voor een deel elders in het estuarium wordt teruggestort. Het sediment uit de geulen is mogelijk voor een belangrijk deel geborgen in het intergetijdegebied, waardoor de komberging afnam. Doordat de geulen dieper werden is het binnendringen van het getij versterkt, zodat de getijverschillen m.n. in het oostelijk deel zijn toegenomen. Hierdoor is de eventuele kombergingsafname gecompenseerd. Om verdere verlanding van het oostelijk deel van de Westerschelde tegen te gaan worden de gebaggerde hoeveelheden nu voornamelijk in het westelijk deel gestort. Door deze **bagger- en stortstrategie** wordt aan het oostelijk deel netto sediment onttrokken en in het westelijk deel netto sediment toegevoegd. De invloed van de verdere verdiepingen en de stortstrategie is waarschijnlijk als volgt:

- Een toename van de bergende breedte en geuldiepten in het oostelijk deel en een afname in het westelijk deel.
- Door de diepere geulen zal de getijgolf zich nog sneller voorplanten. Een doorgaan- de verondieping van het westelijk deel zou echter ook de wrijvingsinvloed kunnen doen toenemen waardoor de getijgolf vertraagd wordt en de toename van getijam- plitude en getijvolumina beperkt wordt.
- Als netto de komberging in het oostelijk deel toeneemt, zullen de getijvolumina zee- waarts toenemen, waardoor de wrijvingsverliezen groter worden en verdere getijslagtoename wordt beperkt.
- Door de groter wordende getijvolumina zullen de geulen uitschuren. Ook de plaatgebieden zullen zich aanpassen tot een nieuw evenwicht is bereikt.

Om uitschuring van geulen (verminderen baggerbehoefte) te bevorderen zijn in het verleden ook voorstellen tot **regulering** d.m.v. bijvoorbeeld strekdammen (hard) of storten in de neven geulen (zacht) gedaan.

- Aanzanding van de nevengeulen kan resulteren in een afname van de bergende breedte. Door de diepere hoofdgeulen kan echter ook een versnelde getijdoordrin- ging en dus een vergroting van de berging plaatsvinden.
- Afhankelijk van de schaal waarop de kanalisering gebeurt wordt het natuurlijk evenwicht verstoord en kan een meergeulensysteem veranderen in een ééngel- systeem en zal een heel ander nieuw evenwicht ontstaan.

Om de baggerhoeveelheden te beperken en de *natuurfunctie* te versterken zijn ook **ontpolderingen** voorgesteld. De invloed van ontpolderingen is waarschijnlijk als volgt:

- Door ontpolderingen neemt de berging toe en dus nemen de getijvolumina zee- waarts toe.
- De grotere getijvolumina hebben over het algemeen een demping van de getijgolf tot gevolg waardoor de kombergingstoename beperkt wordt.
- Na enige tijd zal aanpassing van de geulen, uitschuring plaatsvinden. Hierdoor zal de getijgolf weer sneller kunnen doordringen en de komberging weer toenemen.

Veiligheid

Om de veiligheid van de omliggende gebieden te vergroten zijn **dijkverzwaringen, gecon- troleerde overstromingsgebieden (GOG) en stormstuwen** voorgesteld. Deze maatregelen zijn erop gericht om de extreme hoogwaters af te vlakken. Deze ingrepen hebben een tijdelijk effect en zijn daarom binnen deze studie van minder belang, tenzij door de te bouwen constructies ook een permanente invloed wordt uitgeoefend. In een aantal gevallen kunnen ook **suppleties** worden toegepast om de veiligheid van bepaalde kustvak- ken te garanderen. Indien dit niet op zeer grote schaal gebeurt zullen de effecten verwaar- loosbaar zijn.

Zandwinning

Bijvoorbeeld ten behoeve van suppleties, maar ook voor gebruik in de bouw wordt zand gewonnen in de Westerschelde. Naast een lokale herverdeling van zand betekent dit ook *een structurele onttrekking van zand die ingeval het estuarium in evenwicht zou zijn tot een extra import van zand via de monding zou moeten leiden om de oude situatie te herstellen*. Zandwinning zal in het algemeen de gevolgen van een zeespiegelrijzing versterken. In de huidige studie zal dan ook aandacht aan zandwinning moeten worden besteed. Vanaf 1955 is in de Westerschelde ruim 100 miljoen m³ zand aan het estuarium onttrokken. De huidige en te verwachten zandwinhoeveelheden voor de komende eeuw zijn eveneens ongeveer 2.5 Mm³/jaar. Gemiddeld over het estuarium komt dit overeen met een bodemdaling van bijna 1 cm/jaar, ofwel 0,90 meter per eeuw. Dit is zelfs meer dan de verwachte zeespiegelrijzing (0,60 meter per eeuw).

Beheersmaatregelen

Uit de hiervoor besproken effecten van menselijke activiteiten blijkt dat de reactie van het systeem niet eenduidig is. Veranderingen in geulomvang en bergende breedte zullen afhankelijk van de lokatie en de ruimtelijke geometrie op dat moment de getijbeweging beïnvloeden en tot morfologische aanpassingen leiden. Combinaties van ingrepen zullen weer anders doorwerken dan de som van de invloeden van afzonderlijke ingrepen. De doorwerking van zeespiegelrijzing is hierin slechts één van de factoren en moet dan ook in samenhang met eventuele beheersmaatregelen worden bestudeerd.

De ecologisch waardevolle gebieden binnen de Westerschelde (ondiep water-, plaat-, slik- en schorgebieden) kunnen door diverse menselijke activiteiten worden beïnvloed. Ontpolderingen, verdiepingen en harde regulering zullen de sterkste lange termijn gevolgen hebben, omdat ze moeilijk omkeerbaar zijn. Ook vaargeulonderhoud en de zandwinning hebben grote gevolgen, maar door beleidswijzigingen kunnen de hiermee gepaard gaande bagger- en stortactiviteiten gewijzigd worden om ongunstige ontwikkelingen tegen te gaan of te vertragen.

3. Toekomstverkenning

3.1 ALGEMEEN

Om een eerste afschatting te maken van de gevolgen is van zeespiegelrijzing over 100 jaar in relatie tot andere lange termijn ontwikkelingen een aantal verschillende invloeden kwantitatief vergeleken.

Om verschillende ontwikkelingen getalsmatig met elkaar in verband te kunnen brengen is een aantal aannamen gedaan:

- de veranderingen in waterbeweging worden bepaald op basis van de resultaten van SCALWEST-runs
- de morfologie past zich over de totale periode aan deze veranderende waterbeweging aan, de invloed hiervan op de waterbeweging wordt buiten beschouwing gelaten
- binnen de Westerschelde wordt alleen onderscheid gemaakt tussen het geulengebied en de overige gebieden. *Herverdeling tussen andere delen (bijvoorbeeld westelijk en oostelijk deel) wordt niet bepaald.*

3.2 NATUURLIJKE ONTWIKKELINGEN

De verwachting voor de komend honderd jaar voor de hydraulische randvoorwaarden van de Westerschelde zijn:

- zeespiegelrijzing: 60 cm
- externe getijslagtoename: 4%

Omdat het vullen en legen van de Westerschelde tijdens een getij voornamelijk via de grotere geulen gebeurt is bij de gevolgde benadering ervan uitgegaan dat allereerst de diepe geulen zich aan zullen passen aan een toename van de getijvolumina. Zandoverschotten in de geulen zullen worden gecompenseerd door ophogen van andere gebieden in de Westerschelde (ondiep water, platen, schorren en slikken) of zandexport naar het mondingsgebied. Zandtekorten in de geulen zullen worden gecompenseerd door verlagen van andere gebieden in de Westerschelde of import vanuit het mondingsgebied.

Op basis van genoemde verwachtingen en relaties worden voor de Westerschelde de gevolgen als volgt ingeschat:

- Toename van de snelheden resulteert in een verdere verruiming van de geulen met 3%.
- Het zand dat uit de geulen beschikbaar komt is ruim voldoende om de ondiepwater- en plaatgebieden volledig op te bouwen gerelateerd aan het gestegen gemiddeld zeeniveau.

Met de gevolgde benadering is ook eenvoudig de gevoeligheid voor bepaald ontwikkelingen en aannamen te bepalen.

Als de externe getijslagtoename achterwege blijft zullen, als geen import van zand optreedt, de geulen i.p.v. uit te ruimen juist aan gaan zanden. In dat geval treedt verlaging van de ondiepwater-, plaat-, slik- en schorgebieden op. Door toename van de bergende breedte zal de snelheidsafname en aanzanding van de geulen beperkt blijven. De natuurfunctie zal dus niet direct in gevaar komen.

De verwachte zeespiegelrijzing en externe getijslagtoename zijn slechts gedeeltelijk onderbouwd. Op (inter)nationaal niveau wordt hier verder onderzoek naar gedaan. *Bij het ontwikkelen van een lange termijn visie voor de Westerschelde dienen in afwachting van verdere onderbouwing of bijstelling verschillende zeespiegelrijzingsscenario's te worden onderzocht. Ook verschillende scenarios m.b.t. de externe getijslagtoename zijn mogelijk. De oorzaak van de toename van de getijslag is onduidelijk. In de komende eeuw zou mogelijk zelfs een getijslagafname op kunnen treden. In dat geval zouden de plaatgebieden in het estuarium op termijn wel kunnen verdwijnen.*

De invloed van de onderzochte natuurlijke ontwikkelingen is vrij beperkt (vertaald in import of export een variatie van 1 Mm³ per jaar). De gevolgen van menselijke activiteiten kunnen even groot of zelfs groter zijn. De gemiddelde bodemdaling als gevolg van de huidige zandwinning (0,90 m per eeuw) is bijvoorbeeld groter dan de verwachte zeespiegelrijzing van 0,60 m per eeuw.

3.3 INVLOED MENSELIJKE ACTIVITEITEN

Hoe de Westerschelde zich zal ontwikkelen door de verdieping, bagger- en stortstrategiën, eventuele ontpolderingen e.d. is vooralsnog onduidelijk. Als door bijvoorbeeld storten in het westelijk deel van de Westerschelde gemiddeld zandexport op zou gaan treden zal dit een eventueel verdrinkingsproces versnellen.

Verschiedende beheerstrategiën t.a.v. zandwinning en andere grootschalige ingrepen zijn mogelijk. De effecten hiervan lijken te domineren over de gevolgen van zeespiegelrijzing. Ongewenste gevolgen van zeespiegelrijzing zullen in principe kunnen worden geneutraliseerd door aanpassing van de ingrepen (stopzetten zandwinning en/of aanpassen stortstrategie).

3.4 ONZEKERHEDEN IN DE PROGNOSE

Uitgaande van versnelde zeespiegelrijzing is de kans op verdrinken klein. Afhankelijk van de ontwikkelingen die werkelijk op zullen treden is ook verlanding mogelijk. Behoud van het huidige dynamische evenwicht is het meest waarschijnlijk. Hoe groot de kans op verdrinken of verlanden werkelijk is kan alleen worden vastgesteld als de kans op bepaalde zeespiegelstijgingen en getijslagtoenames, menselijk ingrijpen en de reactie van het systeem zijn vastgesteld.

Het horizontale zandtransport is de belangrijkste onzekere factor.

Momenteel zijn horizontale verplaatsingen van sediment, bijvoorbeeld de import en export van het estuarium alleen met een grote gebieds- en proceskennis vast te stellen en te voorspellen. Deze voorspellingen zullen door verschillen in inzicht tussen de betrokken onderzoekers niet altijd eenduidig zijn. M.n. de sedimentbeschikbaarheid in de zin van sediment in suspensie dient beter te worden beschreven. Deze wordt vrij sterk bepaald door de locale geometrie (in de Westerschelde is de aanpassingslengte ca. 2 km).

In deze definitiestudie worden aanpassingen van geulen en platen alleen globaal beschreven. Zowel voor de invloed op de waterbeweging als voor de functie van verschillende gebieden is echter ook de vormverandering van geulen en platen van belang. Een geulverruiming kan bijvoorbeeld zowel door verdieping als door verbreding plaatsvinden. Afname van de ondiepwater/plaatgebieden kan een volledige verdrinking, herverdeling of areaalafname zijn.

In veel beschouwingen wordt ervanuit gegaan dat de Westerschelde momenteel ongeveer in evenwicht is. Toch zijn er een aantal ontwikkelingen die een min of meer autonoom karakter lijken te hebben zoals de mogelijke doorbraak van de Schaar van Valkenisse, de afname van het Middeldgat en de toename van het Gat van Ossenisse en een mogelijke doorbraak van de Schaar van Spijkerplaat. Dit zou betekenen dat de Westerschelde momenteel niet in evenwicht is of bepaalde cyclische ontwikkelingen doormaakt. Hoewel het geulenpatroon in de Westerschelde in grote lijnen wel gelijk zal blijven moet bij lange termijn voorspellingen aandacht worden gegeven aan mogelijke structuurveranderingen. Ook extrapolaties van reacties van het estuarium op grootschalige ontwikkelingen en ingrepen moeten met het nodige voorbehoud worden uitgevoerd. Bij een verdere verdieping is bijvoorbeeld onduidelijk of de opslinging van het getij nog verder en in dezelfde mate kan toenemen, of dat de maximale opslinging reeds of bijna is bereikt (gerelateerd aan de verhouding golflengte-systeemplengte).

4. Onderzoeksmethodieken

4.1 ALGEMEEN

In hoofdstuk 2 is de invloed van versnelde zeespiegelrijzing en toename van het Noordzeegetij op de geometrie en waterbeweging in de Westerschelde beschreven. Op basis hiervan is in hoofdstuk 3 aangegeven wat de toestand van de Westerschelde over 100 jaar zou kunnen zijn. De invloed van de onderzochte natuurlijke ontwikkelingen blijkt beperkt te zijn. De effecten lijken volledig geneutraliseerd te kunnen worden door aanpassing van de huidige ingrepen (stopzetten zandwinning en verandering van de stortstrategie).

Dit wel echter niet zeggen dat de natuurfunctie van het estuarium en de veiligheid van omliggende gebieden op de lange termijn niet in gevaar kunnen komen. Onderzoek naar het lange termijn gedrag van de Westerschelde is daarom wel degelijk gewenst. Naast autonome ontwikkelingen (zeespiegelrijzing en toename van het Noordzeegetij) dienen daarbij ook de gevolgen van menselijke activiteiten te worden bestudeerd.

Bij het opstellen van het onderzoeksplan is, om de inspanningen te beperken, uitgegaan van beschikbare meetgegevens en modellen. Deze worden in dit hoofdstuk beschreven. Allereerst worden twee verschillende benaderingen om het morfologisch gedrag te beschrijven toegelicht. Dit hoofdstuk besluit met een overzicht van gerelateerde onderzoeksprogramma's.

4.2 BENADERINGEN

Om lange termijn morfologische veranderingen te voorspellen is een aantal verschillende benaderingen mogelijk. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen proces- en gedragsbenaderingen.

Bij een procesbenadering worden de fysische processen gedetailleerd beschreven. Met name voor een complex systeem als de Westerschelde kan dit eigenlijk uitsluitend met behulp van computermodellering worden gedaan. Voor de erosie dan wel sedimentatie van bepaalde gebieden moet naast de waterbeweging ook de ruimtelijke verdeling van eventuele onder- en oververzadiging en de ontwikkeling hiervan in de tijd worden vastgesteld. Om de invloed van dergelijke geleidelijk verlopende veranderingen in de waterbeweging voldoende accuraat te kunnen bepalen zijn zeer gedetailleerde procesberekeningen vereist. Hoewel krachtige waterbewegingsmodellen van de Westerschelde beschikbaar zijn, zijn lange termijn morfodynamische berekeningen voor een estuarium als de Westerschelde momenteel nog niet mogelijk.

Wel is een beschrijving van de huidige situatie mogelijk. Aanzetten daartoe met evenwichtstransportformuleringen lijken veelbelovend. Er is echter onvoldoende aandacht besteed aan naijling in ruimte en tijd. Voor de uitwisseling met het mondingsgebied dient ook aandacht aan de invloed van windgolven en deining te worden besteed. Calibratie van de formuleringen kan worden uitgevoerd met behulp van gemeten zandconcentraties. Toepassing van de gevonden zandtransportformuleringen in combinatie met zandbalansen zal het inzicht in de zandcirculatie in de Westerschelde vergroten.

Bij een gedragsbenadering worden de morfologische aanpassingen niet via lokale zandtransporten berekend, maar wordt een evenwicht en de aanpassing daaraan bepaald. Dit kan zowel voor het systeem als geheel als voor delen daarvan. Voor de Westerschelde is de systeemgedragsbenadering bijvoorbeeld toegepast door De Jong en Heemink, 1996. Hoewel hun methode wel geschikt is voor onder- en bovengrandsbenaderingen en een

analyse naar de gevoeligheid voor bepaalde parameters als getijamplitude en wrijving zijn zoveel aannames noodzakelijk dat een betrouwbare lange termijnvoorspelling hiermee niet te geven valt. Hierbij komt dat de Westerschelde in alle delen zeer specifiek is door verschillen in ontstaan (kusten, geometrie), bodemsamenstelling en ingrepen en dat menselijke ingrepen relatief grote invloed hebben.

Een andere gedragsbenadering die veel wordt toegepast en over het algemeen goede resultaten geeft is om op basis van een analyse van het gedrag van bepaalde delen van het estuarium (en andere estuaria) relaties tussen hydraulische en morfologische grootheden vast te stellen. Voor de Westerschelde zijn onder meer relaties opgesteld tussen de doorstroomoppervlaktes en getijvolumina van geulen en tussen de plaathoogtes en getijniveau's. Door ook relaties voor de ruimtelijke herverdeling van sediment tussen overschots- en tekortgebieden op te stellen kan het gedrag van het estuarium worden beschreven. Een voorbeeld hiervan is de ASMITA modellering. Een bezwaar van deze benadering is wel dat er van wordt uitgegaan dat het systeem zich altijd zo zal blijven gedragen als het zich in het verleden gedroeg. Met name bij zeer grootschalige ingrepen of veranderingen hoeft dit niet altijd het geval te zijn. Om hier toch uitspraken over te kunnen doen blijven procesbenaderingen noodzakelijk om de gedragsbenadering te ondersteunen. Dit kan door:

- bepaalde relaties in gedragsbenadering beter te beschrijven en te detailleren
- beperkingen te onderzoeken
- in geval van veranderend gedrag of systeem de gebruikte schematisatie of relaties te toetsen en eventueel aan te passen.

4.3 MEETGEGEVENS

Binnen de studie Oostwest is het historische gedrag van het estuarium m.b.t. hydraulica en morfologie uitgebreid geanalyseerd (zie Vroon e.a., 1997). Hierdoor is ook een uitgebreide set van meetgegevens ontstaan (zie bijlage 2). Op deze set kunnen een aantal bewerkingen van de meetgegevens worden uitgevoerd, die het inzicht in het lange termijn gedrag van het estuarium kunnen vergroten.

Momenteel worden binnen de studie naar het lange termijn gedrag van de Westerschelde een onderzoek uitgevoerd naar een aantal soortgelijke estuaria. Hoewel de Westerschelde door het intensieve gebruik altijd een eigen specifieke ontwikkeling zal kennen kan dit onderzoek wel inzicht geven in evenwichtssituaties en grenzen aan de extrapolatie van het gedrag in het (recente) verleden naar de toekomst.

In de Westerschelde zijn meerdere malen zand- en slibconcentratiemetingen uitgevoerd. *Oude en nieuwe sedimentconcentratiemetingen kunnen gebruikt worden om meer inzicht te krijgen in de hoeveelheid sediment in suspensie in relatie tot de lokale geometrie, stromingen en golven. Ook voor het calibreren en verifiëren van morfodynamische modellen zijn deze metingen van belang.*

De lodingsgegevens van de Westerschelde zijn overzichtelijk verzameld in het GIS-systeem bij RIKZ Middelburg. Deze data kunnen gebruikt worden bij het bepalen van evenwichtsvormen van geulen en platen.

Van het gemeten verticale en horizontale getij zijn vrij veel karakteristieke grootheden bepaald (hoog- en laagwaters, gemiddeld zeeniveau, getijverschil, getijvolumina e.d.). Hierbij is veel aandacht besteed aan het verloop in de tijd. De getijvoortplanting en onderlinge samenhang is voornamelijk met numerieke modellen bepaald. Binnen de deelstudie Veiligheid tegen Overstromen van het project Verdieping wordt momenteel een getijanalyse uitgevoerd om de onderliggende processen beter te kunnen begrijpen. Voorzover bekend zijn de meetgegevens van het horizontale en verticale getij nog niet uitputtend geanalyseerd.

4.4 MODELLEN

Voor de Westerschelde zijn een groot aantal mathematische modellen ontwikkeld. Deze modelontwikkeling is een voortdurend doorgaand proces. De huidige mogelijkheden en ontwikkelingen van een aantal modellen die een bijdrage kunnen leveren aan de studie naar de gevolgen van zeespiegelrijzing worden hier beschreven.

KARIN

Met dit model kan op basis van een 1D-benadering de lange termijn morfologische ontwikkeling van de Westerschelde worden bepaald. Een belangrijke beperking is dat alleen de doorwerking van M2 en M4 wordt bepaald, waardoor de getijbeweging tijdens springtij onvoldoende realistisch wordt gereproduceerd. Verder zijn de platen statisch gemodelleerd, terwijl de ontwikkeling van plaatgebieden juist een belangrijk te onderzoeken verschijnsel is. Om het realiteitsgehalte te verhogen zou vrij uitgebreide modelontwikkeling plaats moeten vinden. De inzet van andere, direct bruikbare modellen hebben daarom de voorkeur.

SCALWEST/SCALDIS

Met deze modellen (zie bijlage 3) kan de 2D- en/of 3D-waterbeweging tijdens enkele getijden voor een bepaalde bodemligging en bepaalde randvoorwaarden worden berekend. M.b.v. transportformules kunnen ook lokale initiële morfologische aanpassingen worden bepaald. Dynamische aanpassing van de bodemligging is niet mogelijk, omdat het doorrekenen van langere periodes te veel tijd vergt. Na het extern bepalen van morfologische veranderingen of getij bij de mond kunnen de bodemligging en/of de randvoorwaarden wel worden aangepast om de invloed hiervan op de waterbeweging te bepalen. Bij grootschalige veranderingen kan dit eventueel worden gedaan in combinatie met het KUSTSTROOK, ZUNOWAK en/of CSM model.

DUFLOW/IMPLIC

Met deze modellen (zie bijlage 3) kan de 1D-waterbeweging voor lange periodes worden berekend. Dynamische aanpassing van de geometrie en randvoorwaarden is niet mogelijk. Na het extern bepalen van morfologische veranderingen of getij bij de mond kunnen de bodemligging en/of de randvoorwaarden wel worden aangepast om de invloed hiervan op de waterbeweging te bepalen.

ASMITA/ESTMORF

Met deze modellen kan op basis van evenwichtsrelaties en een bepaalde evenwichtssituatie het effect van verstoringen op de morfologie worden berekend op een tijdschaal van decennia. Na afloop van de berekening (ASMITA) of tijdens de berekening (ESTMORF) kan ook het effect op de waterbeweging worden bepaald. M.n. de modellering van splitsingspunten, sedimentconcentraties, autonome ontwikkeling en het evenwicht van een meergeulensysteem verdient nog aandacht. Bij het bepalen van grootschalige morfologische structuurveranderingen die een versnelde zeespiegelrijzing eventueel zou kunnen veroorzaken dient ook aandacht aan het belangrijke uitgangspunt dat het systeem naar een bepaald evenwicht evolueert te worden geschonken.

4.5 PARALLEL ONDERZOEK

Alvorens een onderzoeksplan te formuleren is het van belang om vast te stellen naar welke van belang zijnde aspecten reeds binnen ander verband onderzoek wordt verricht en of er op korte termijn resultaten beschikbaar komen. Reeds opgeleverde resultaten zijn meegenomen in de probleemanalyse (zie hoofdstuk 2 en bijlage 1). De onderzoeksplannen en stand van zaken van een aantal gerelateerde projecten worden hieronder besproken.

Nationaal onderzoek naar zeespiegelrijzing (RIKZ Den Haag)

Door het RIKZ wordt in verschillende (internationale) verbanden onderzoek gedaan naar klimaatveranderingen en de invloed hiervan op de waterbeweging. Op korte termijn worden geen resultaten verwacht die direct een relatie hebben met de studie naar zeespiegelrijzing in de Westerschelde. Van het reeds uitgevoerde onderzoek is gebruik gemaakt om de grootschalige ontwikkelingen en veranderende randvoorwaarden voor de Westerschelde te beschrijven. Verder is in dit kader reeds uitgebreid studie gedaan naar de effecten van zeespiegelrijzing op de Waddenzee. Die hierbij ontwikkelde kennis en modellen kunnen gedeeltelijk ook bij de Westerschelde worden toegepast.

*KUST*2000 (RIKZ Den Haag)*

Het KUST*2000 onderzoeksprogramma bestaat uit kustmorfologisch onderzoek dat onder andere is gericht op een beschrijving en verklaring van de veranderende morfologie in het mondingsgebied van de Westerschelde. De te verwachten resultaten die een bijdrage kunnen leveren aan de zeespiegelrijzingsstudie zijn:

- kennis over de zandtransporten in de monding; deze kennis is nodig om het zandtransport tussen monding en estuarium voor de toekomst te voorspellen;
- kennis over het veranderende getij in het mondingsgebied en omgeving; dit getij is de drijvende kracht voor de hydraulische en morfologische processen in de Westerschelde zelf;
- een instrument waarmee het grootschalige gedrag voor verschillende beheersscenario's op een tijdschaal van decennia kan worden bepaald; waarschijnlijk zal deze tool ook het gedrag van de Westerschelde zelf moeten beschrijven; afstemming van de ontwikkeling hiervan ligt voor de hand; dit gereedschap kan misschien ook worden ingezet om het lange termijn gedrag te voorspellen.

Morfologische dynamiek (onderdeel Verdieping, RIKZ Middelburg)

Naar verwachting zal binnen deze studie meer kennis over de morfodynamische processen in het estuarium verkregen worden. Deze kennis is voor het lange termijn gedrag van belang met betrekking tot uitbreiding van de kennis over de bodemweerstand, het horizontaal zandtransport en de evenwichtsvormen van platen en geulen.

Veiligheid tegen overstromen (onderdeel Verdieping, RIKZ Middelburg)

Naar verwachting zal binnen deze studie meer kennis over de getijvoortplanting binnen het estuarium worden ontwikkeld. Deze kennis is voor het lange termijn gedrag van belang om de veranderende waterbeweging na grootschalige morfologische aanpassingen te kunnen bepalen.

MONitoring VERdieping (onderdeel Verdieping, RIKZ Middelburg)

Binnen deze studie worden de gevolgen van de verdieping 48'/43' die momenteel wordt uitgevoerd nauwlettend gevolgd. Hiermee zal de kennis van het systeem toenemen. Ook op lange termijn zouden de gevolgen van ingrepen in het algemeen en verdiepingen in het bijzonder kunnen domineren over de gevolgen van zeespiegelrijzing. De monitoring kan belangrijke gegevens (o.a. over zandtransporten) leveren voor kwantitatieve beschouwingen.

5. Onderzoeksvoorstel

5.1 ALGEMEEN

In het beleidsplan Westerschelde staat dat er dient te worden gestreefd naar behoud van de Westerschelde als een waardevol natuurlijk watersysteem, met inachtneming van de scheepvaartfunctie en uiteraard de veiligheid tegen overstromen.

De vragen die door de beheerder in dit verband zijn gesteld zijn:

- wat zijn de gevolgen van zeespiegelrijzing voor het Westerschelde estuarium;
- hoe realistisch is het lange termijn scenario van verdrinken van het estuarium ten gevolge van eventuele versnelde zeespiegelrijzing.

De uitgevoerde definitiestudie zeespiegelrijzing maakt duidelijk dat de gevolgen van menselijke activiteiten (bestuurbaar) voor de natuurfunctie even groot of zelfs groter kunnen zijn dan de gevolgen van autonome ontwikkelingen als zeespiegelrijzing en getijslagtoename. De gevolgen van bepaalde combinaties van natuurlijke ontwikkelingen en menselijke activiteiten zouden op lange termijn ongewenst kunnen zijn voor de in het beleidsplan genoemde functies (natuur, scheepvaart en veiligheid). De lange termijn effecten dienen dan ook voor verschillende scenario's te worden bepaald om het beheer van het gebied indien nodig bij te kunnen stellen.

Om de natuurfunctie te waarborgen moet minimaal de lange termijn ontwikkeling van ondiep water-, plaat-, slik- en schorarealen worden bepaald, onder invloed van versnelde zeespiegelrijzing, getijslagtoename op de Noordzee en diverse menselijke activiteiten. Verder dient met het oog op de veiligheid de lange termijn ontwikkeling van de getijbeweging in de Westerschelde te worden bepaald. Beide studies zijn onlosmakelijk verbonden. Om de getijbeweging te kunnen bepalen moet immers de geometrie bekend zijn.

Bij het opstellen van het onderzoeksplan is om de inspanningen te beperken uitgegaan van beschikbare meetgegevens en modellen.

5.2 PLAN VAN AANPAK

Het onderzoek naar de lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde dient antwoord te geven op de volgende vraag: wat is de geometrie en getij van de Westerschelde over honderd jaar voor diverse beleidsscenario's en natuurlijke ontwikkelingen.

Om dit antwoord te kunnen geven moet minimaal de zandtoevoer voor de komende 100 jaar en de interne herverdeling van zand bepaald worden.

Er wordt een gefaseerde studie voorgesteld. Na elke fase dient de volgende fase nader te worden gespecificeerd:

- fase 1 : procesbeschrijving (historische ontwikkeling en huidige situatie)
- fase 2 : gevoeligheidsanalyse (invloed hydraulische randvoorwaarden en morfologische veranderingen)
- fase 3 : morfodynamische modellering (doorrekenen beleidsscenario's).

Fase 1 Procesbeschrijving

Om de lange termijn morfologische processen te kunnen beschrijven en te koppelen aan waargenomen ontwikkelingen dient een drietal deelstudies te worden uitgevoerd:

1.a Koppeling zandtoevoer en hydraulica

Veranderingen in de hydraulica hebben verandering in de zanduitwisseling tussen Westerschelde en mondingsgebied tot gevolg. Momenteel zijn alleen kwalitatieve relaties beschikbaar.

Het zandtransport tijdens een getij tussen de deelgebieden in de Westerschelde en aangrenzende gebieden (zie figuur 5.1) dient voor gegeven hydraulische condities te worden bepaald. Uitgangspunt hiervoor zijn evenwichtstransport-formuleringen met een correctie voor naijling in ruimte en tijd en eventueel voor golven en de aanwezigheid van stroomresistente lagen. De formuleringen dienen te worden gecalibreerd met beschikbare zandconcentratiemetingen.

De gevoeligheid van de berekende residuele transporten voor coëfficiënten in de transportformuleringen dient te worden aangegeven.

Analyse van de verschillen tussen berekende en gemeten zandtransporten en de verschillen tussen getijresiduele transporten en uit zandbalansen afgeleide jaarlijkse transporten zal het inzicht in de zandhuishouding van de Westerschelde en de invloed van morfologische ontwikkelingen en menselijke activiteiten vergroten.

Belangrijk neveneffect van deze studie is dat als de gevonden zandtransportformuleringen in combinatie met de bestaande waterbewegingsmodellen (1D, 2D en 3D) worden ingezet eventuele onvolkomenheden van deze modellen zichtbaar worden. Afwijkingen in de snelheid worden immers uitvergroot in de transporten.

1.b Kombergingsgrafieken

De geometrie van de Westerschelde kan gekarakteriseerd worden door de kombergingsgrafieken per deelgebied (zie figuur 5.1). Hieruit is direct de omvang van ecologische waardevolle gebieden te bepalen.

Om historische ontwikkelingen in getij en menselijke activiteiten te kunnen confronteren met ontwikkelingen in de geometrie dienen kombergingsgrafieken voor verschillende jaren te worden bepaald, tussen 1800 en 1975 met stappen van 25 jaar en na 1970 met stappen van 5 jaar. De Westerschelde dient hierbij opgesplitst te worden in deelgebieden. Indien mogelijk dienen ook de kombergingsgrafieken van mondingsgebied en Zeeschelde te worden bepaald.

Ook de kombergingsgrafieken van de Oosterschelde kunnen worden bepaald om de invloed van veranderingen in het getij na de bouw van de stormvloedkering te koppelen aan de veranderingen in geometrie. Waar mogelijk dienen relaties gelegd te worden tussen de historische ontwikkelingen van de komberging en de ontwikkelingen van het getij en menselijke activiteiten.

1.c Bodemweerstand

Uit modelstudies blijkt dat bij morfologische modellen (De Jong, 1996) de resultaten van de berekeningen zeer gevoelig zijn voor de opgelegde bodemweerstand. Bij modelberekeningen wordt de ruwheidsparemeter meestal niet gevarieerd. Om te onderzoeken of dit bij getijveranderingen correct is, dient een waterbewegingsmodel zowel voor een doottij, gemiddeld getij als een springtij te worden afgeregeld met behulp van de ruwheidsparemeter.

De verschillen in ruwheid die daarbij worden gevonden geven een indicatie van de ruwheidsveranderingen bij getijveranderingen.

Fase 2 Gevoeligheidsanalyse

Om de gevoeligheid van de lange termijn ontwikkeling voor diverse zeespiegelrijzing-scenario's en menselijke activiteiten te bepalen, dient een gevoeligheidsanalyse te worden uitgevoerd met behulp van een waterbewegingsmodel en de zandtransport-formulering uit deelstudie 1. Door veranderingen in de schematisatie aan te brengen die natuurlijke ontwikkelingen en menselijke activiteiten representeren, kunnen de gevolgen voor de waterbeweging en zandhuishouding worden bepaald. De resultaten dienen te worden geconfronteerd met waargenomen ontwikkelingen. Dit zal het inzicht in de waterbeweging, zandhuishouding en morfologische ontwikkeling van de Westerschelde en de invloed van menselijke activiteiten vergroten.

Op basis van deze gevoeligheidsanalyse kunnen in overleg met de beheerder te onderzoeken beleidsscenario's worden vastgesteld.

Fase 3 Morfodynamische modellering

Om zowel de veranderingen in geometrie en getij te kunnen bepalen lijkt het inzetten van meerdere typen modellen in de nabije toekomst onvermijdelijk. Een gedragsmodel moet in ieder geval aan de volgende eisen voldoen:

- een groot modelgebied (minimaal Westerschelde, Zeeschelde en mondingsgebied);
- het model moet in staat zijn om de jaargemiddelde horizontale zandtransporten (m.n. de import danwel export) te beschrijven;
- het model moet in staat zijn om grootschalige geul en plaatontwikkelingen en de invloed hiervan op het getij en de zandtransporten te beschrijven;
- verschillende beleidsscenario's t.a.v. zandwinning, bagger- en stortactiviteiten, ontpoldering en andere grootschalige ingrepen moeten kunnen worden doorgerekend, in combinatie met verschillende zeespiegelrijzing- en getijslagtoename-scenario's.

Om de relaties in dit gedragsmodel goed te beschrijven en de resultaten te kunnen evalueren dient ontwikkeling en gebruik van het gedragsmodel te worden ondersteund met procesmodellering.

In eerste instantie zal een simpel morfologisch model (ASMITA of ESTMORF) in combinatie met waterbewegingsmodellen en zandtransportformuleringen voldoende zijn.

De relatie tussen de voorgestelde combinatie van morfologische en hydraulische modellen is weergegeven in figuur 5.2. De modellen worden achtereenvolgens ingezet. De overdracht van water/zand bewegingsmodel naar morfologisch model vindt plaats via bepaalde coëfficiënten. De overdracht van morfologisch model naar waterbewegingsmodel vindt plaats via de geometrie.

De onzekerheden t.a.v. het waterbewegingsmodel zullen kleiner zijn dan t.a.v. het morfologisch model.

Parallel of aansluitend op deze benadering kan, indien noodzakelijk, een geavanceerder morfologisch model worden ontwikkeld/ingezet. De noodzaak voor en aandachtspunten bij de ontwikkeling van dat model zullen volgen uit de beschreven benadering. Het realiteitsgehalte van het morfologisch model kan gecheckt worden door de veranderingen in water- en zandbeweging te vergelijken/analyseren.

5.3 BUDGET EN PLANNING

Om deze deelstudies te kunnen realiseren worden de volgende inspanningen voorzien:

activiteit	besteding (dagen)	budget (fl)	start (jj-mm)	oplevering (jj-mm)
1.a koppeling zandtoevoer en hydraulica	30	40.000	98-06	98-09
1.b opstellen kombergingsgrafieken	20	30.000	98-06	98-09
1.c bodemweerstand	20	30.000	98-06	98-09
2. gevoeligheidsonderzoek met waterbewegingsmodel en transportformulering	100	150.000	98-09	98-12
3. Morfodynamische modellering	afhankelijk van eerdere fasen		99-01	99-12

Tabel 5.1 Budget en planning onderzoeksplan

5.4 AFSTEMMING MET ANDERE STUDIES

Omdat morfologische ontwikkelingen plaatsvinden via de getijbeweging dienen om de morfologische ontwikkelingen op een tijdschaal van 50-100 jaar te kunnen beschrijven ook processen op een tijdschaal minder dan 50 jaar te worden bestudeerd. Hierbij zal veel aandacht aan de afstemming met andere deelstudies binnen Verdieping: MoVe, morfologische dynamiek en veiligheid moeten worden besteed.

Binnen de veiligheidsstudie wordt momenteel een statistische analyse van meetgegevens uitgevoerd om het optreden van extreme hoogwaters te kunnen beschrijven. Ontwikkelingen in de horizontale getijbeweging (snelheden) en geul-, plaat-, slik- en schoraanpassingen zullen hiermee niet kunnen worden bepaald. Wel zal er nauw verband bestaan met het bepalen van de invloed van verschillende menselijke activiteiten op het getij (fase 2).

De invulling van de studie naar morfologische dynamiek is momenteel nog niet bekend. Binnen deze studie zal waarschijnlijk wel meer inzicht in geul-, ondiepwater-, plaat-, slik- en schoraanpassingen aan veranderende waterbeweging worden ontwikkeld.

Omdat het lange termijn gedrag van het mondingsgebied van de Westerschelde en die van het bekken elkaar wederzijds beïnvloeden dient naast afstemming van de studies binnen Verdieping ook afstemming met het K2000*KOP onderzoek plaats te vinden. Vooral eventuele computermodellering (fase 3) verdient daarbij aandacht.

Over de achtergronden en verwachtingen van zeespiegelrijzing en getijverandering bestaan nog grote onzekerheden. Onderzoek hiernaar zal op nationaal en internationaal niveau moeten gebeuren. Vooral getijveranderingen zijn onderbelicht in vergelijking met zeespiegelrijzing.

6. Conclusies

De verwachte hydraulische randvoorwaarden voor de Westerschelde zijn voor de komende honderd jaar een zeespiegelrijzing van 60 cm en een getijslagtoename in het mondingsgebied van 3 tot 4%. De verwachte versnelde zeespiegelrijzing en getijverandering lijken geen bedreiging voor de natuurfunctie van de Westerschelde te vormen.

Uit waargenomen getijveranderingen, binnen deze studie uitgevoerde modelberekeningen, en een recent uitgevoerde getijreconstructie voor het mondingsgebied blijkt dat in de Westerschelde de morfologische veranderingen tijdens de laatste decennia meer invloed hadden op de getijslagtoename dan de hydraulische randvoorwaarden.

In de morfologische veranderingen spelen menselijke activiteiten als vaargeulbeheer en zandwinning een minstens zo grote rol als zeespiegelrijzing en externe getijslagtoename. Het effect van de huidige zandwinning (gemiddelde bodemdaling 0,90 m per eeuw) is bijvoorbeeld sterker dan dat van de verwachte zeespiegelrijzing (0,60 m per eeuw).

Het oorspronkelijke doel van de studie naar zeespiegelrijzing was een morfologisch referentiekader te geven op basis van natuurlijke externe invloeden waartegen lange termijn effecten van eventuele menselijke ingrepen in de Westerschelde kunnen worden afgezet. De processen en gevolgen van natuurlijke ontwikkelingen en menselijke activiteiten zijn echter zeer nauw verweven. Daarom wordt aanbevolen om de studie zeespiegelrijzing uit te breiden tot een studie naar het lange termijn gedrag van de Westerschelde. Deze studie moet uiteindelijk resulteren in het bepalen van de geometrie en het getij over honderd jaar voor diverse beleidsscenario's in combinatie met de natuurlijke invloeden.

Referenties

- Bavelaar, 1987 Verandering van de getijbeweging in de Noordzee t.g.v. zeespiegelrijzing, RWS notitie GWAO-87.205
- De Gelder, 1996 Morfologie en modellering van de Westerschelde, rapportage afstudeerproject TU Delft/Svašek
- De Jong en Heemink, 1996 A model for long-term morphodynamic behaviour of tidal basins, long estuaries, and tidal rivers, TU Delft
- De Ronde e.a., 1998 De keerzijde van ons klimaat (concept)
- Dillingh en Heinen, 1994 Zeespiegelrijzing, getijverandering en deltaveiligheid, RWS rapport RIKZ-94.026
- Hoogeboom, 1996 Modellering van het morfologische gedrag van slikken in het model ESTMORF, IMAU rapport 96-06
- Huijs, 1996 De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen 1955-1994, IMAU rapport 96-17
- Jansen, 1997a Bouw, calibratie en verificatie SCALWEST, Rapportage activiteit A, Svašek rapport 97420/1011
- Jansen, 1997b Validatie Triscal en aanzet sedimenttransport, Rapportage activiteit C, Svašek rapport 97420/1011
- Langedoen, 1987 Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen, TU Delft
- Langerak, 1997 Brondocument Zeespiegelrijzing, 16 januari 1997, RIKZ Middelburg
- RWS, 1994 Gemiddelde Getijkromme 1991.0, RIKZ, Den Haag
- Schaap, 1997 Testen en verbeteren van de WAMORF-routines, stage RIKZ/HTS-Hogeschool Zeeland, RIKZ/OS-97.802x
- Scheldec commissie, 1984 Studierapport Verdieping Westerschelde programma 48'/43', Technische Scheldec commissie, subcommissie Westerschelde, Antwerpen/Middelburg
- Svašek, 1995 Definitiestudie Westerscheldemon, RWS nota RKZ-256, Rotterdam
- Svašek, 1997 Getijanalyse Westerscheldemon, Svašek rapport 97428/1029
- Svašek, 1998 De rol van het getij in de ontwikkeling van de Westerscheldemon, een modelmatige onderbouwing, Svašek rapport 98154/1034 (concept)
- Van der Spek, 1997 Tidal asymmetry and long term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands, simulation of palaeo-tides in the Schelde-estuary, Marine Geology 141 (1997) 71-90
- Tank, 1997 Empirische relaties tussen de plaat- en slikhoogte en getijkarakteristieken in de Westerschelde, IMAU rapport 95-07
- UitdenBogaard, 1995 Resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1993, IMAU rapport 95-08
- Vroon e.a., 1997 Westerschelde, stram of struis?, Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische processen in een estuarium, RIKZ-97.023
- Wang, 1997a Morfologische interactie Westerschelde Estuarium en het mondingsgebied, WL Delft rapport 22253
- Wang e.a., 1997b Studie naar morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde, WL Delft rapport 22310
- RIKZ, 1996 Het Getij & Wij, honderd jaar getijtafels voor Nederland, ISBN 90 12 08409 1

Lijst van tabellen

(opgenomen in de tekst)

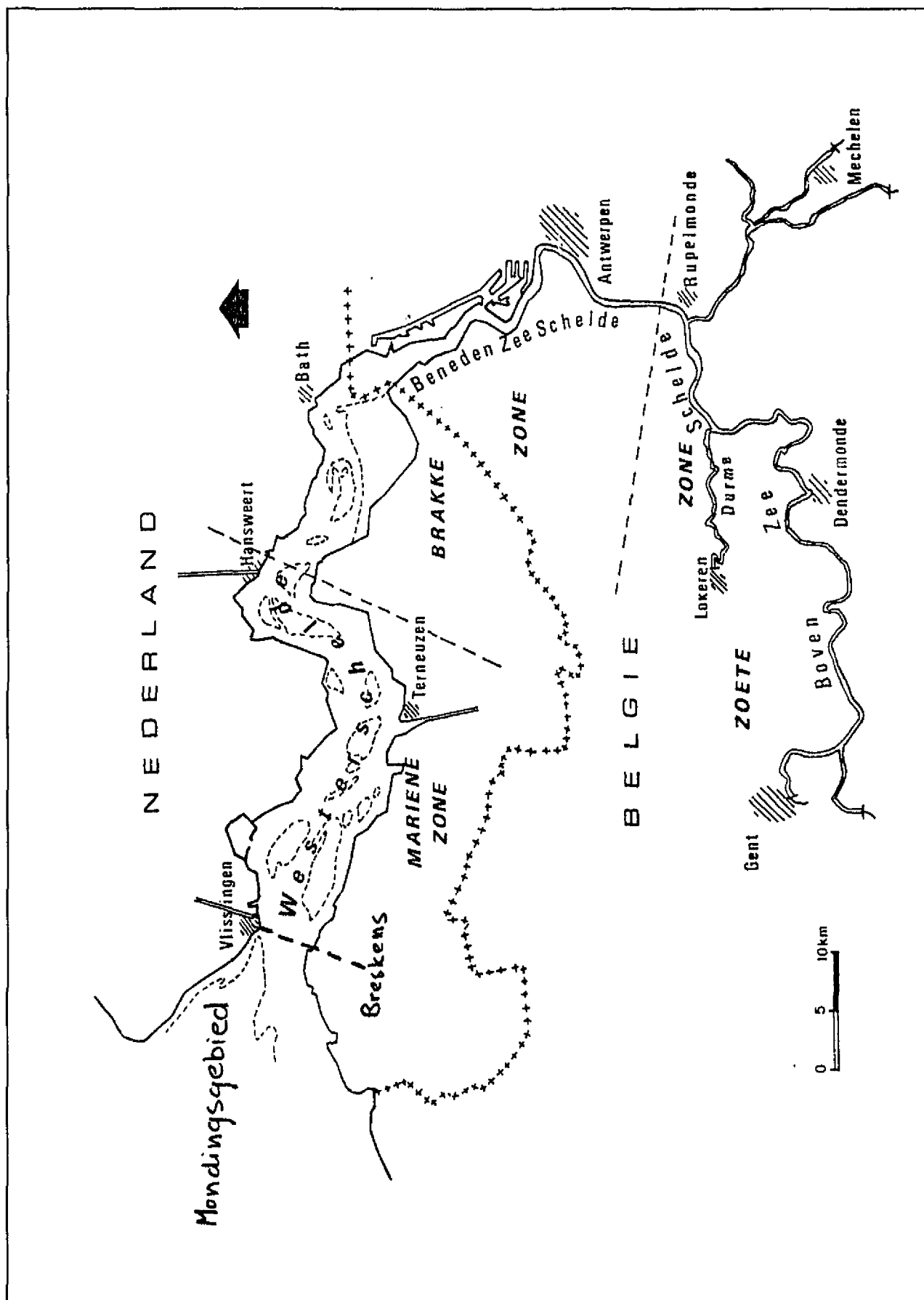
- 2.1 Getijverschillen Vlissingen en Bath
- 5.1 Budget en planning onderzoeksplan

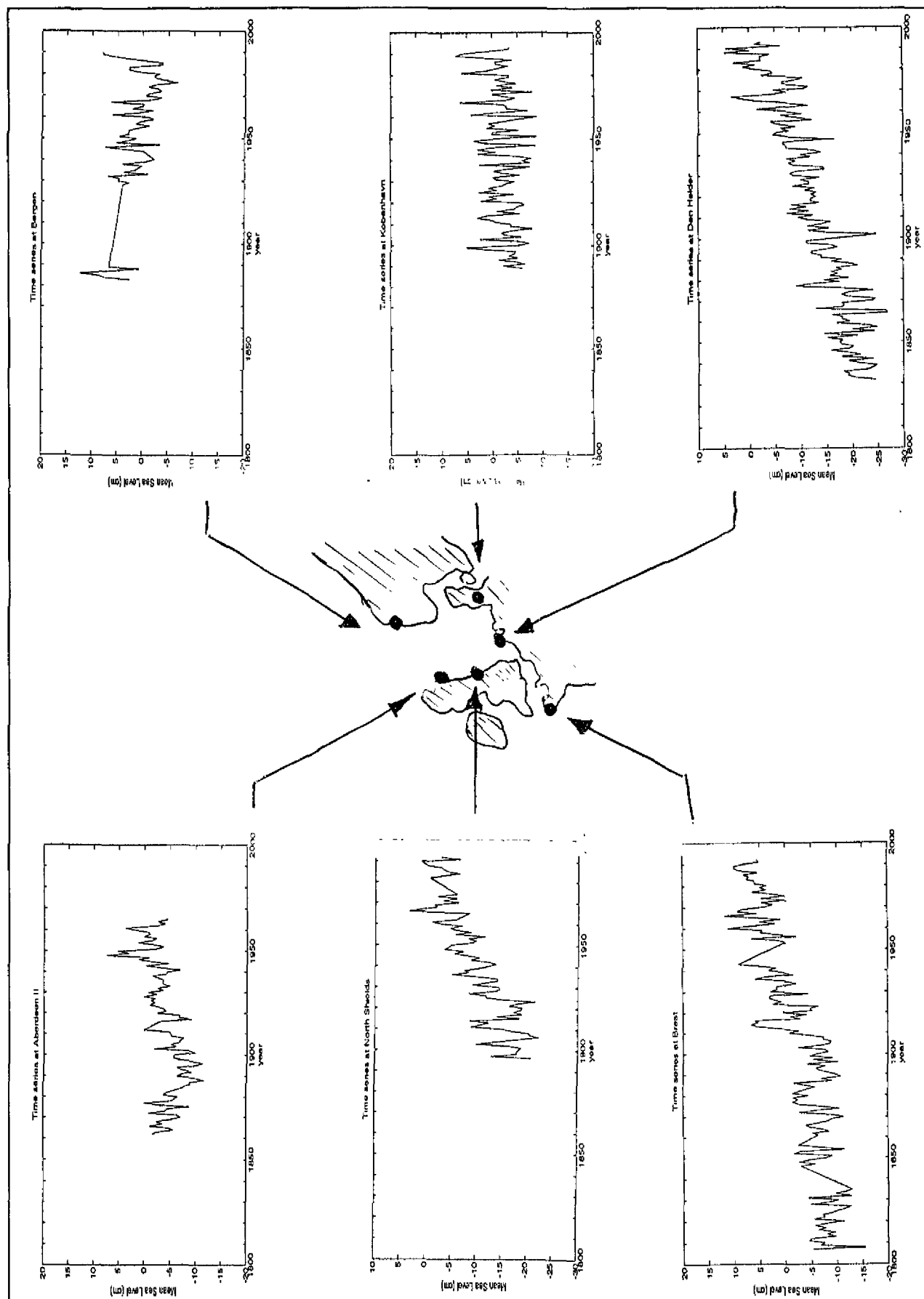
Lijst van figuren

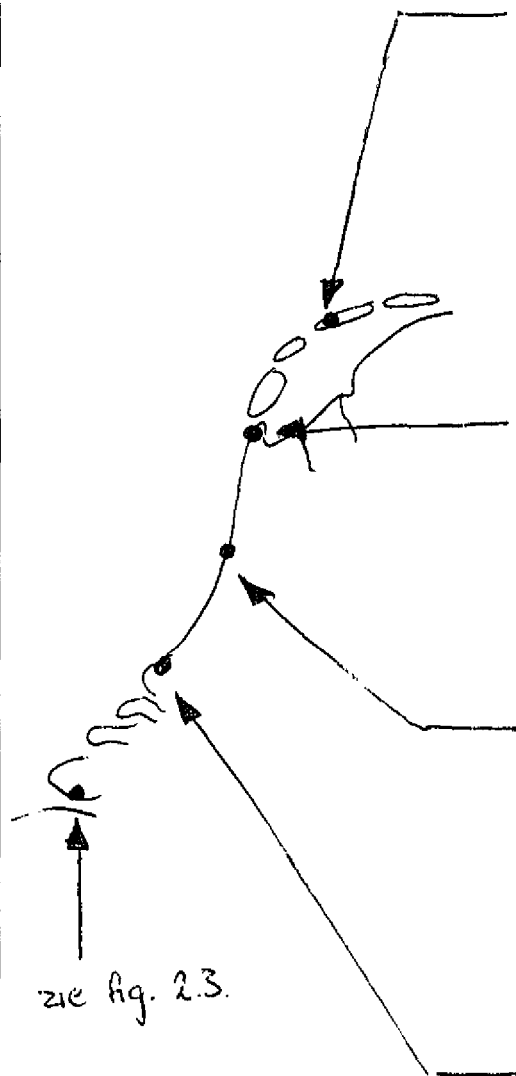
- 1.1 Studiegebied Westerschelde en omgeving
- 2.1 Gemiddeld zeeniveau, enkele stations rond de Noordzee
- 2.2 Gemiddeld zeeniveau, enkele stations in Nederland
- 2.3 Gemiddeld zeeniveau, enkele stations in de Westerschelde
- 2.4 Ontwikkeling mondiale zeespiegelstijging
- 2.5 Getijverschillen, enkele stations in Nederland
- 2.6 Getijverschillen, enkele stations in de Westerschelde
- 2.7 *Definitieschets invloeden lange termijn gedrag Schelde-estuarium*
- 2.8 Historische ontwikkeling Westerschelde
- 2.9 Gereconstrueerde debieten Westerscheldemonnd
- 2.10 Amphidromien Noordzeegetij
- 2.11 Definitieschets geulparameters
- 2.12 Definitieschets interne berging
- 2.13 Definitieschets zandverplaatsingen
- 5.1 Voorstel vakindeling
- 5.2 Koppeling morfologisch model met water/zandbewegingsmodel

Lijst van bijlagen

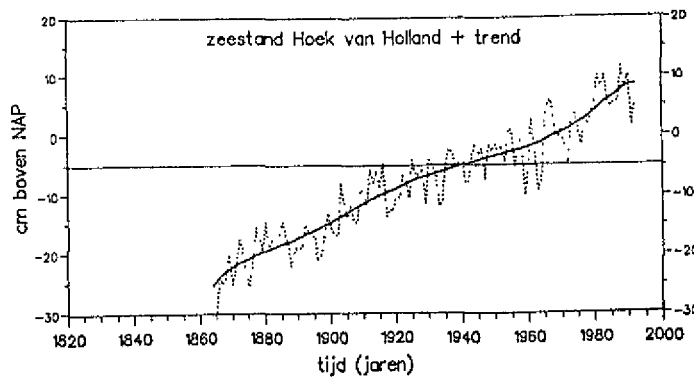
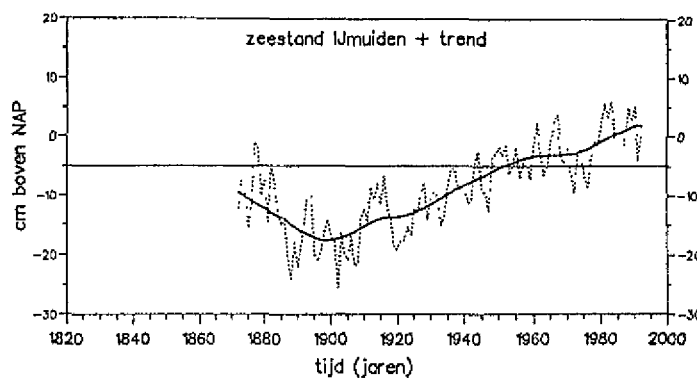
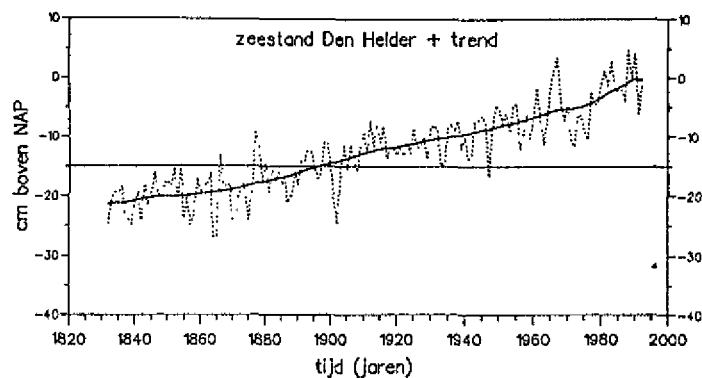
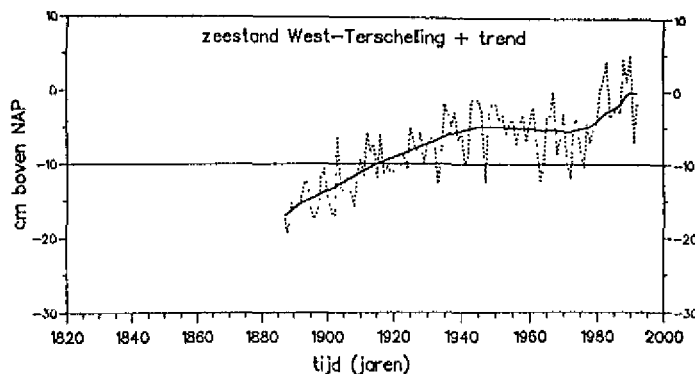
- Bijlage 1 Overzicht literatuur
- Bijlage 2 Overzicht meetgegevens Westerschelde
- Bijlage 3 Overzicht modellen Westerschelde
- Bijlage 4 SCALWEST experimenten

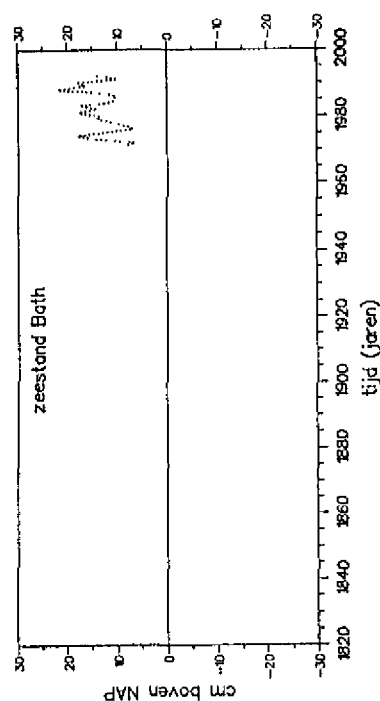
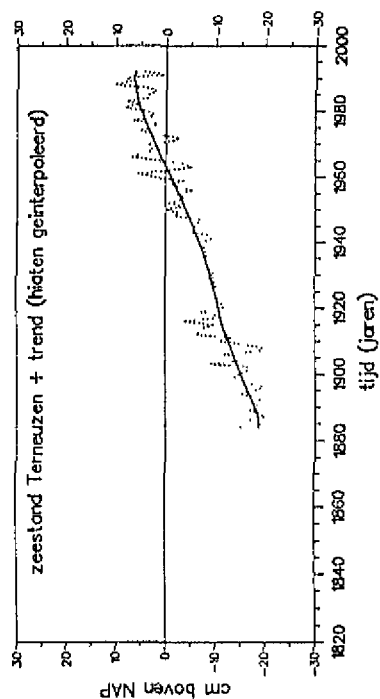
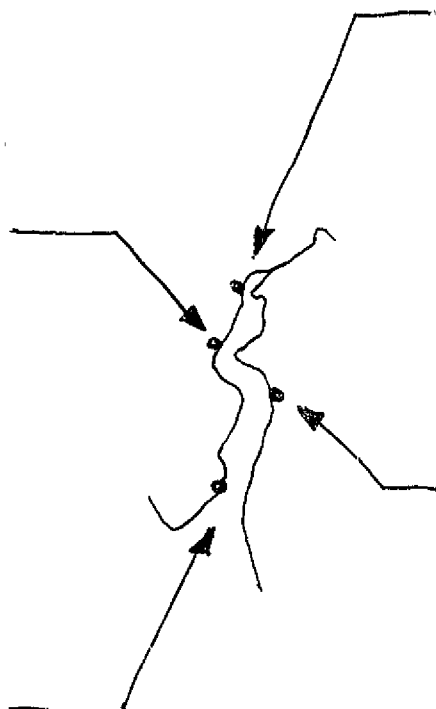
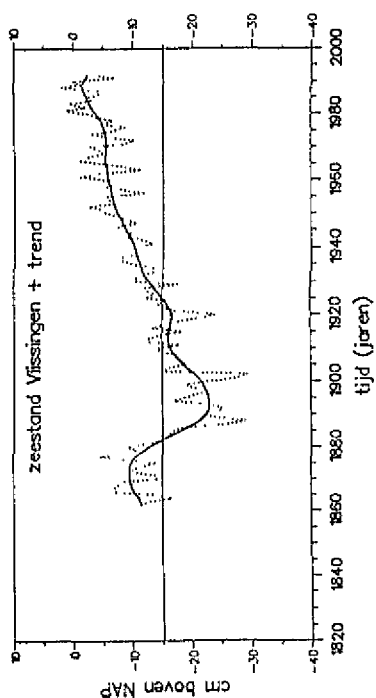
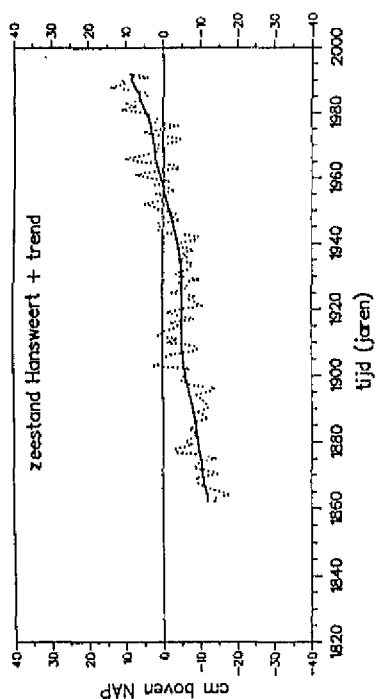


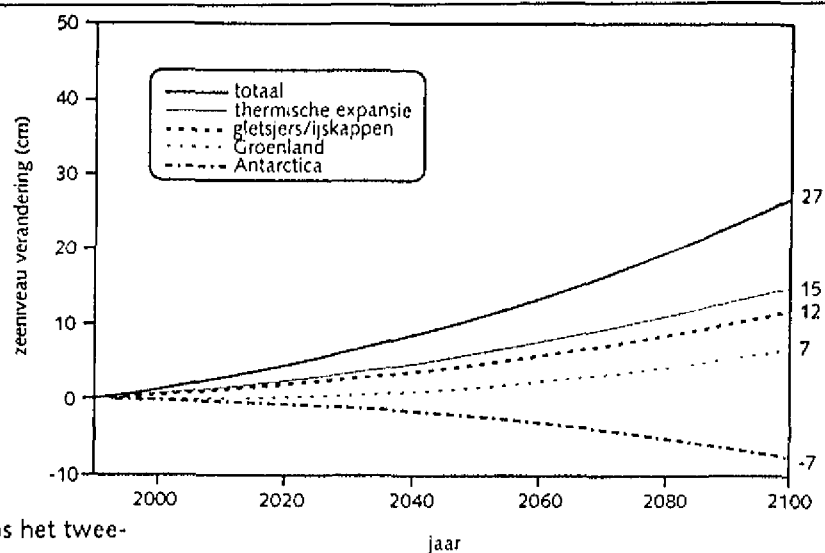




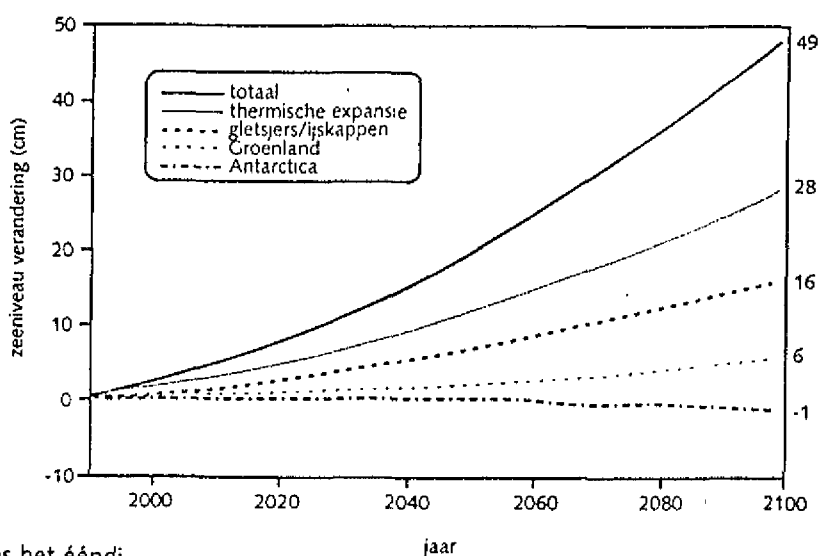
zie fig. 2.3.







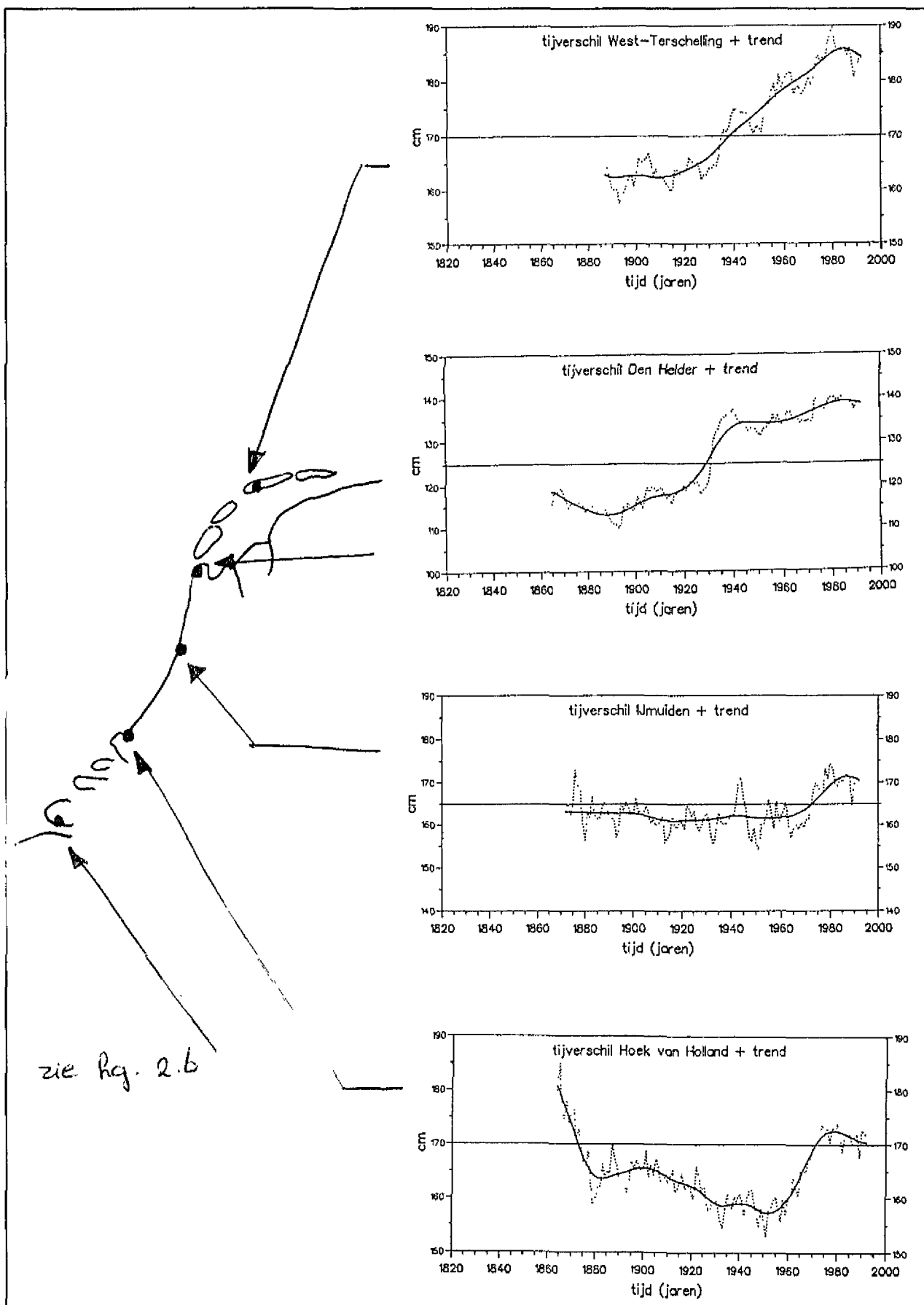
Voorspelde zeespiegelstijging volgens het twee-dimensionale IMAU-model.

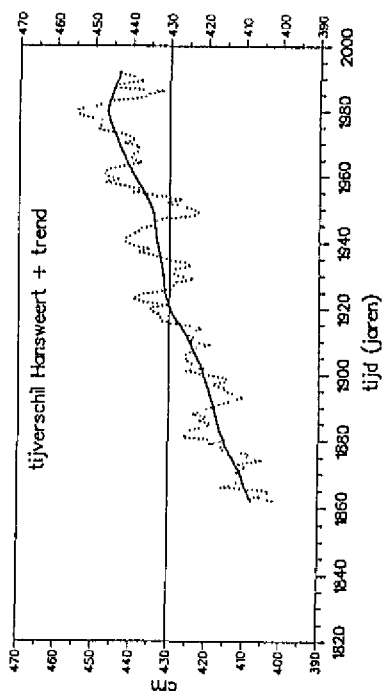
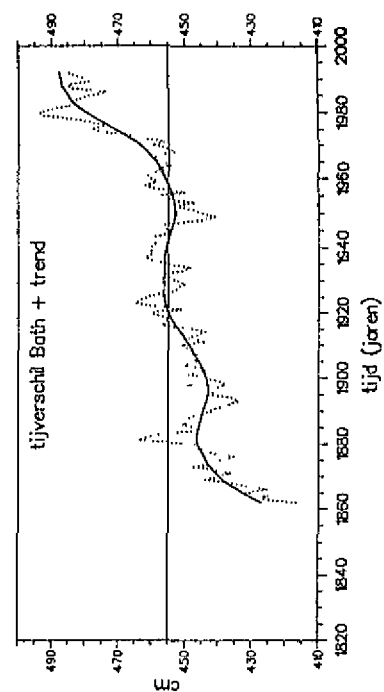
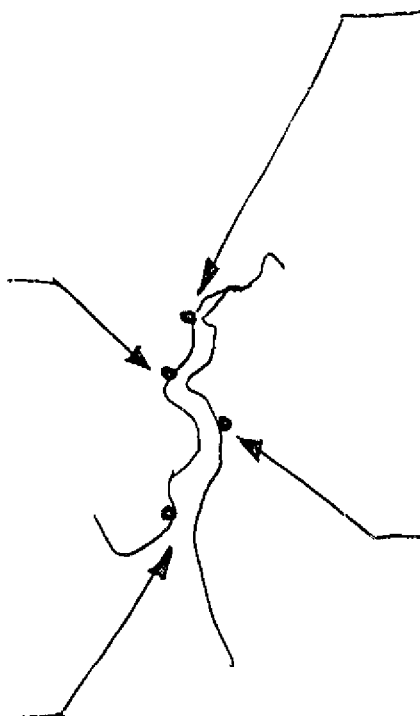
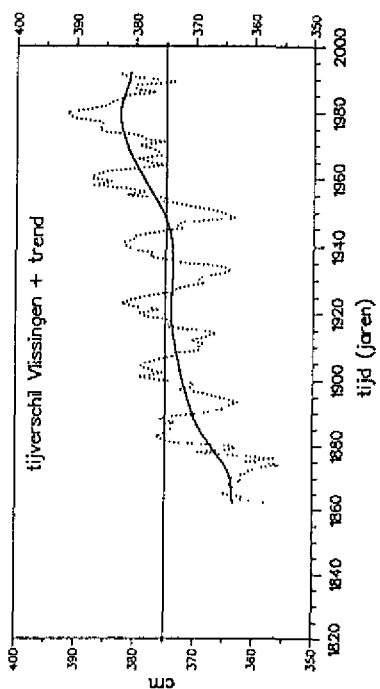
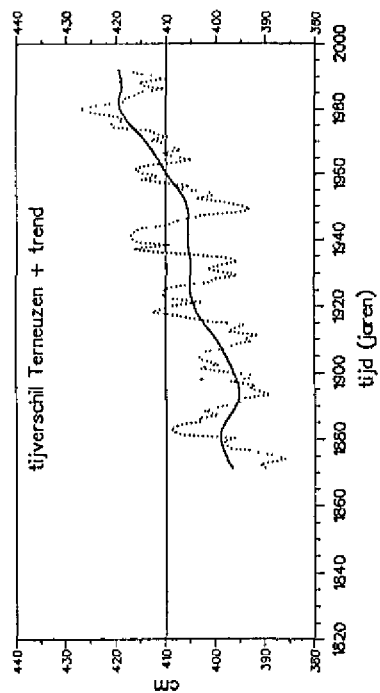


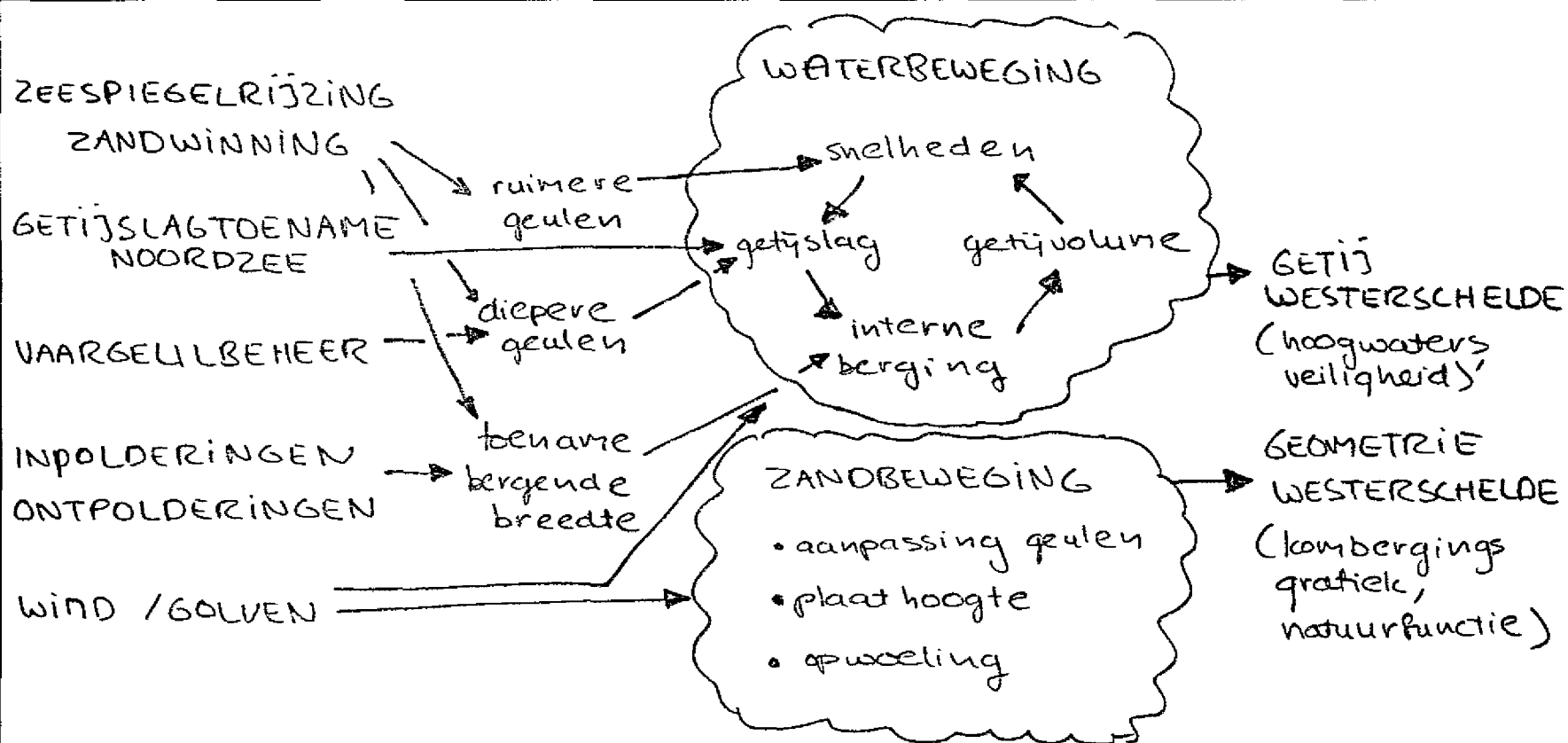
Voorspelde zeespiegelstijging volgens het één-dimensionale IPCC-model.

Model/Methode	Thermische	Gletsjers, expansie	Groenland ijskappen	Antarctica	TOTAAL
IPCC - 1 dim: const. aë	32	18	7	-2	55
IMAU-model: const. aë	17	15	10	-8	34
IPCC - 1 dim: toene. aë	28	16	6	-1	49
IMAU-model: toene. aë	15	12	7	-7	27

Berekende bijdragen en totale zeespiegelstijging voor de periode 1990-2100 voor het IS92a-scenario, met constante aerosolconcentraties (const. aë) en met toenemende aerosolconcentraties (toene. aë).







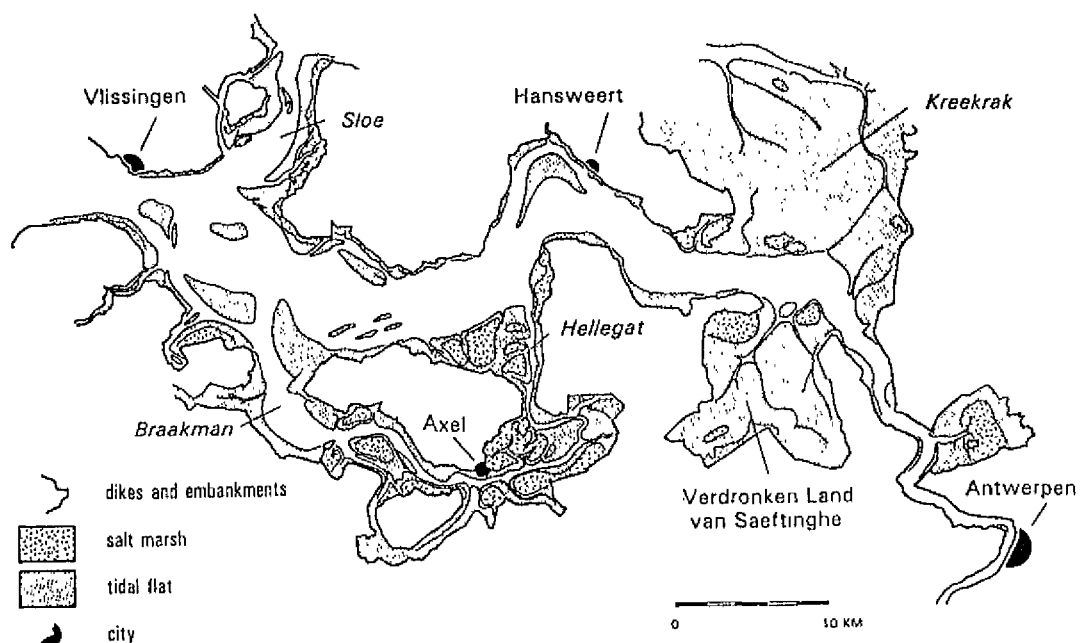


Figure 6.6 The Schelde estuary in 1650 AD. Reconstruction based predominantly on the map "Zelandia Comitatus Novissima" by Roman and Visscher (1655). After Van der Spek (1993.)

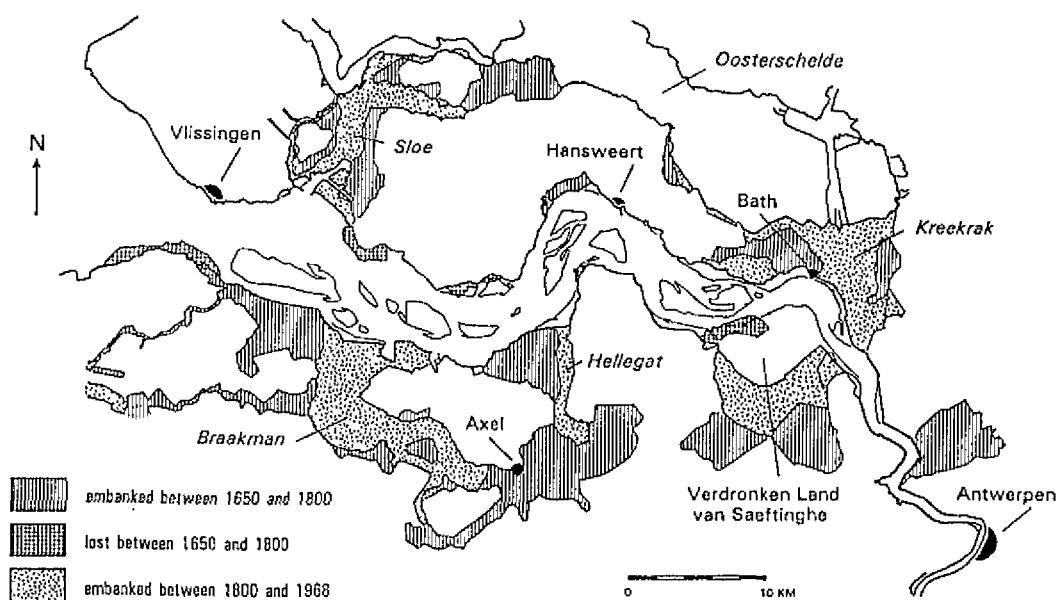


Figure 6.7 Map showing the accretion and subsequent embankment of the intertidal flats and marshes along the Schelde estuary between 1650 and 1968. The given intertidal morphology represents the situation in 1968.

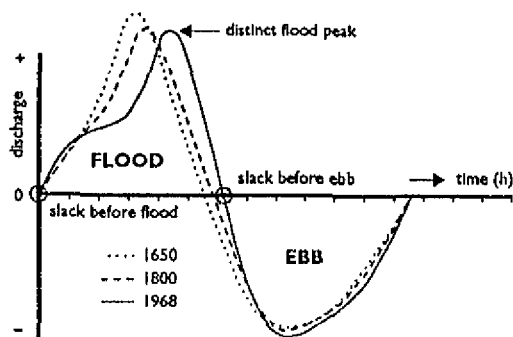


Fig. 14. Calculated discharge curves for Vlissingen for 1650, 1800 and 1968. The curves show an increase in flood duration and the development of an asymmetric discharge: the peak discharge occurs at the end of the flood in 1968. The latter is caused by the extension of the flood period and the swift rise in water level between mid-tide level and high water (see Fig. 15).

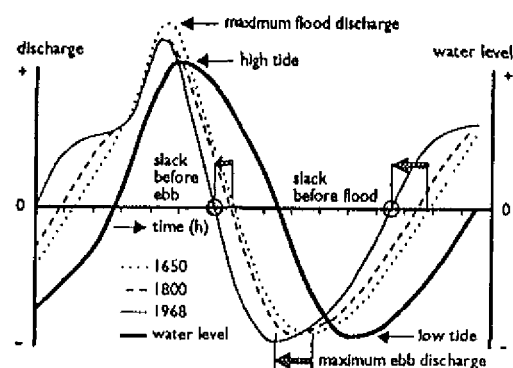


Fig. 15. Calculated tidal discharges at Vlissingen relative to the water level, for 1650, 1800 and 1968. N.B.: the discharges and water levels are not given in mutual correct proportions. The curves indicate that since 1650 the slack waters occur progressively sooner after high and low water. Moreover, the maximum ebb discharge occurs sooner after high tide, at a higher water level. The moment of maximum flood discharge remains the same. This is caused by the swift rise in water level between mid-tide level and high tide.

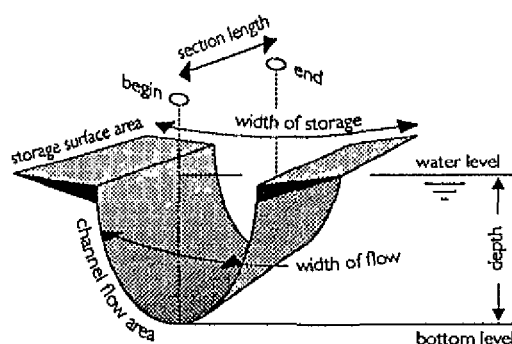


Fig. 9. Schematic representation of a DUFLOW model section and the parameters describing it. A model section consists of one channel with adjacent storage areas. The width of storage, the width of flow and the (cross-sectional) channel flow area depend on the water level. The storage surface area for a certain water level is the width of storage multiplied by the section length.

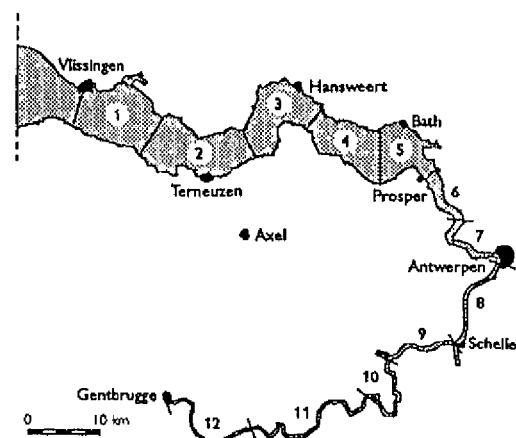
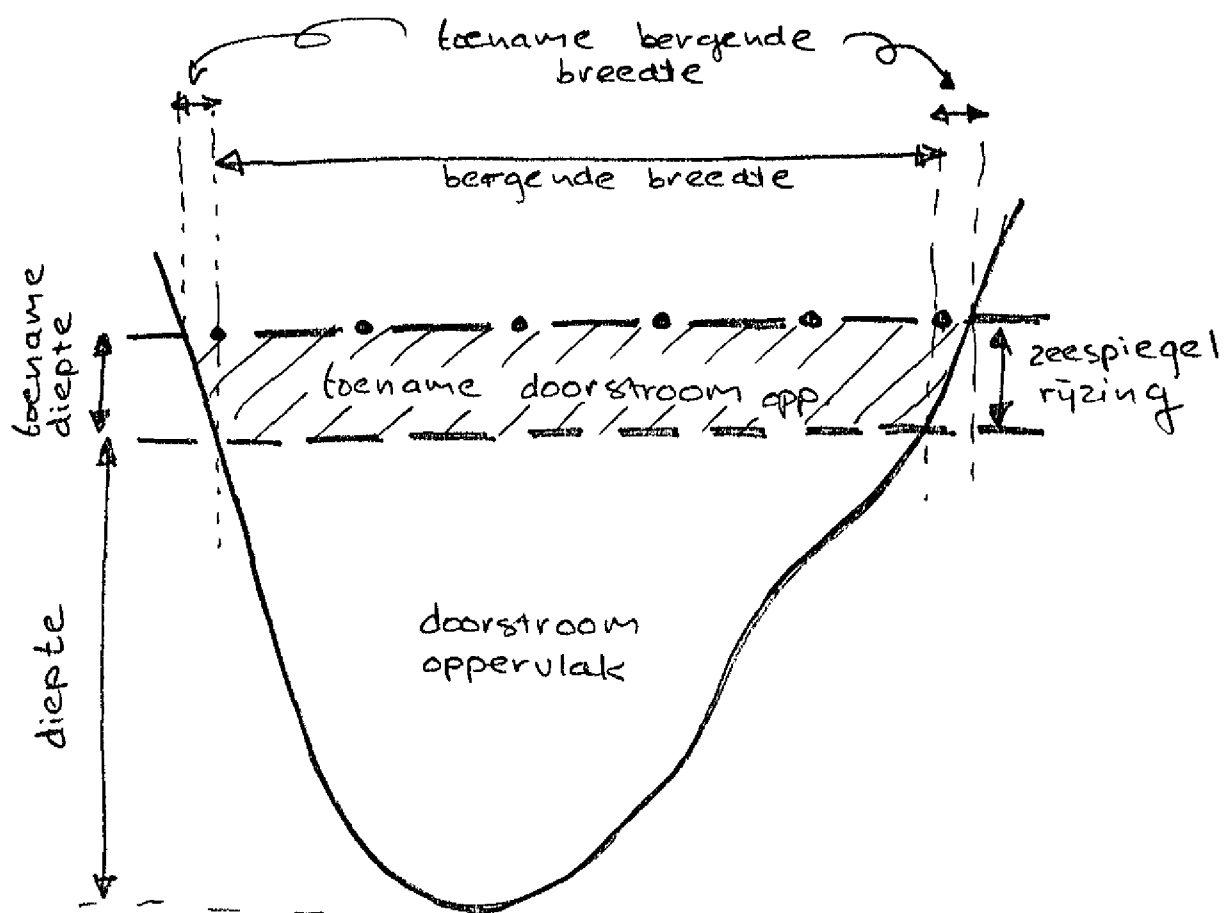


Fig. 10. The Schelde estuary from Vlissingen to Gentbrugge. The estuary has been subdivided into 12 sections. See Fig. 1 for location.

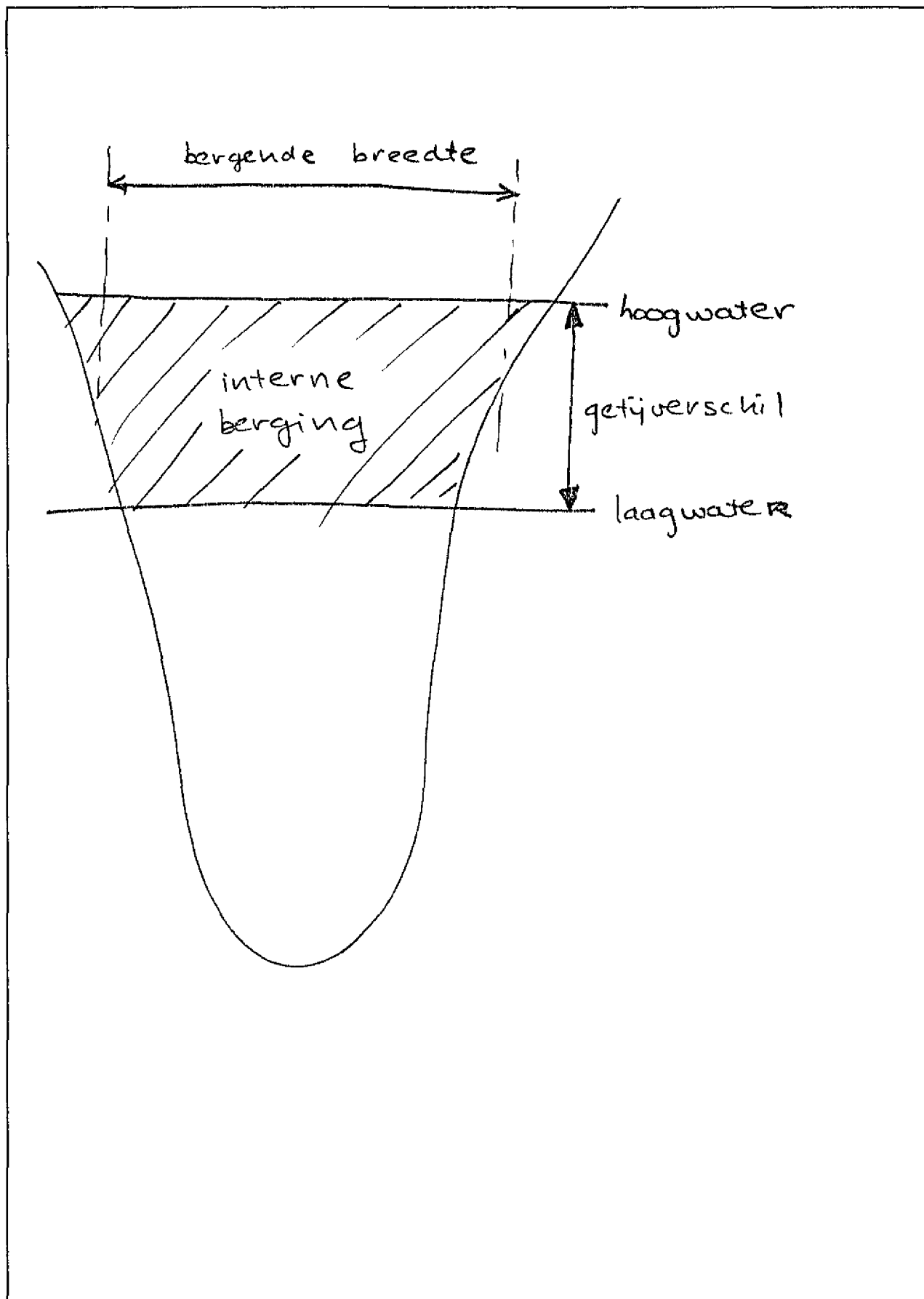
Table 1

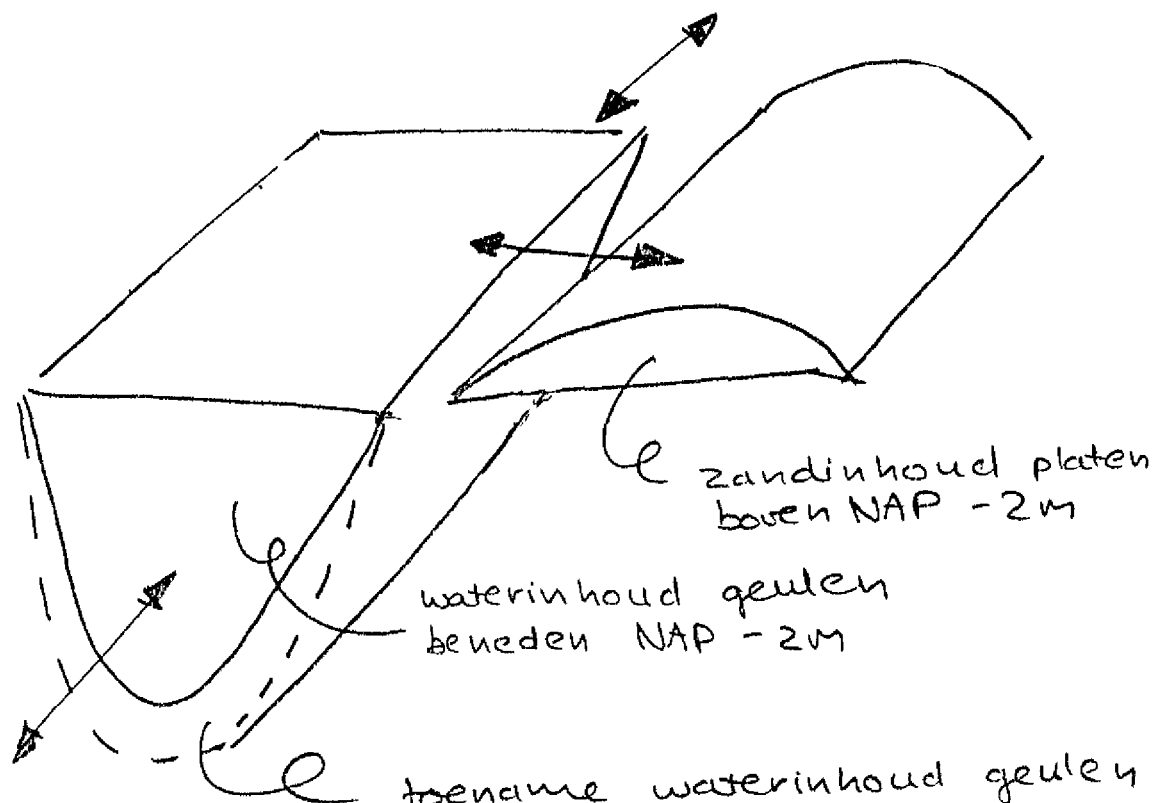
Results of tidal simulations for the Schelde for 1650 AD, 1800 AD and 1968 AD (the indicated reference values are after Coen, 1988; see Figs. 1 and 10 for locations)

	1650	1800	1968
Input parameters			
surface area estuary at MSL (million m ²)	422	345	281
average depth (m)	4.26	5.04	7.42
mean tidal range Vlissingen (m)	3.43	3.58	3.80
tidal range/average depth	0.81	0.71	0.51
mean sea level (m)	NAP-0.70	NAP-0.47	NAP-0.04
Modelling results			
tidal range Antwerpen (m)	3.47	3.95	5.29
reference value	3.18	3.82	5.21
phase difference Vlissingen-Antwerpen (min)	230	180	130
reference value	265	210	112
maximum tidal range (m)	3.60	4.04	5.35
Tidal celerity C, averaged over estuary			
high water (m s ⁻¹)	5.72	7.18	10.34
low water (m s ⁻¹)	4.62	5.46	7.75
C _{HW} /C _{LW}	1.24	1.32	1.33

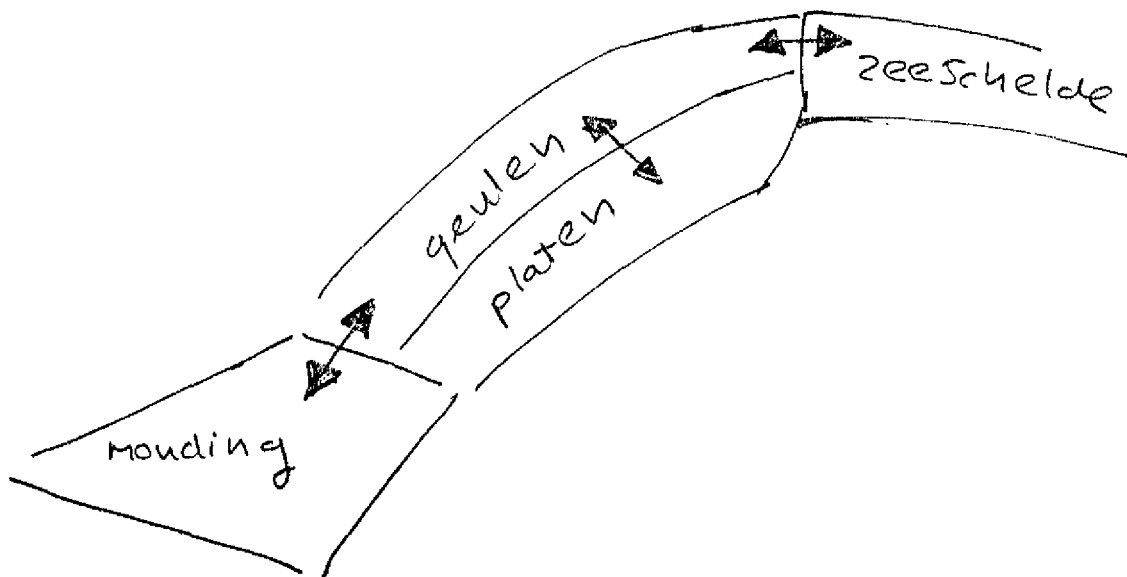


— • — • —
 — — — — — gemiddeld zeeniveau
 — — — — — bodemligging





= zandverplaatsing naar
omliggende gebieden

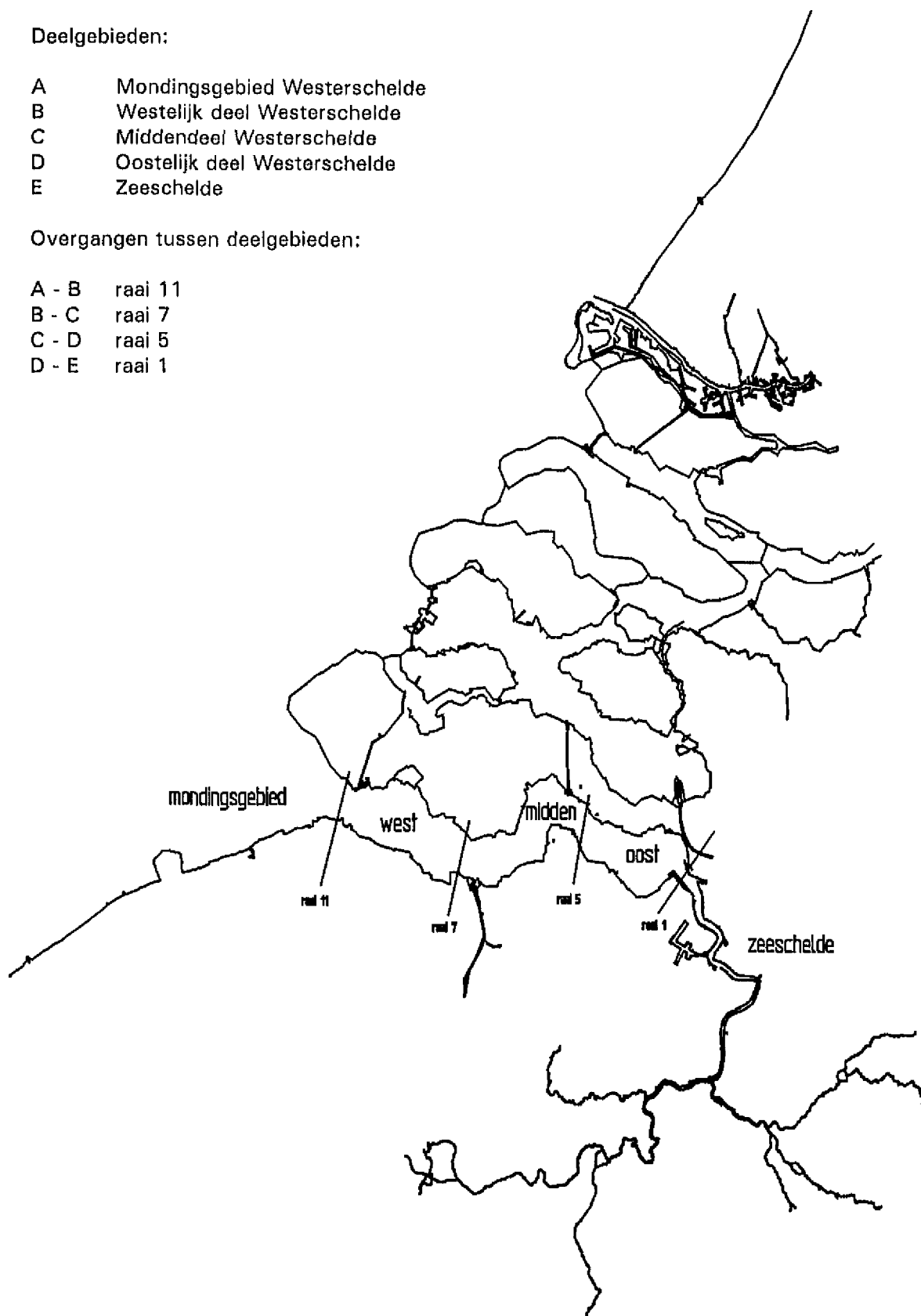


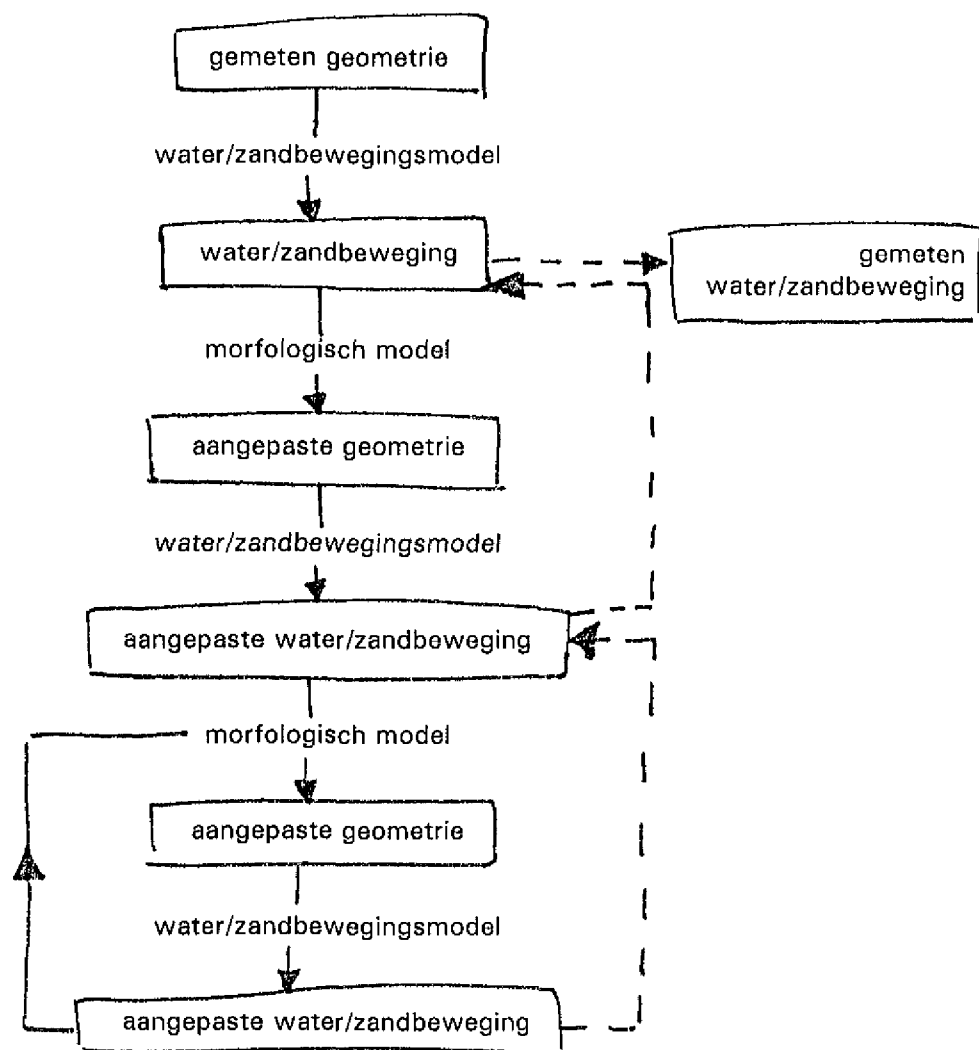
Deelgebieden:

- A Mondingsgebied Westerschelde
- B Westelijk deel Westerschelde
- C Middendeel Westerschelde
- D Oostelijk deel Westerschelde
- E Zeeschelde

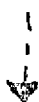
Overgangen tussen deelgebieden:

- A - B raai 11
- B - C raai 7
- C - D raai 5
- D - E raai 1





berekening



verificatie/betrouwbaarheidscheck

Bijlage 1 Overzicht literatuur

Als onderdeel van de in dit rapport beschreven definitiestudie Zeespiegelrijzing Westerschelde is een literatuurstudie uitgevoerd. In deze bijlage zijn is een gedeelte van de bestudeerde literatuur samengevat. Dit overzicht is bedoeld als een eerste ingang naar de voor de zeespiegelrijzing Westerschelde van belang zijnde literatuur. Daarom zijn vooral recente overzichtsrapporten opgenomen, waarin naar meer specifieke literatuur wordt verwezen of waarin meetgegevens en/of modelresultaten worden beschreven.

Klimaatverandering en zeespiegelrijzing

-FAIRBRIDGE, R.W., Eustatic changes in sea level, Reprinted from Physics and Chemistry of the Earth, Volume 4, Pergamon Press, 1961

Een samenvattend literatuuroverzicht van de kennis (in 1961) over wereldwijde veranderingen in gemiddeld zeeniveau en de oorzaken hiervan. Bevat o.a. de ontwikkeling van het zeeniveau t.o.v. NAP vanaf 1682 bij Amsterdam.

-RONDE, J.G. de, VOGEL, J.A., Technisch Rapport 6, Zeespiegelrijzing, Kustverdediging na 1990, Nota GWAO-88.015, Rijkswaterstaat, februari 1988

Rapport met een technische onderbouwing in het kader van een beleidsanalytische studie rond de discussienota "Kustverdediging na 1990". De verwachtingen zijn inmiddels iets bijgesteld (zie De Ronde, 1998).

Zeespiegelstijging wordt veroorzaakt door de stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde. Deze temperatuursverandering wordt veroorzaakt doordat door menselijk handelen meer broeikasgassen in de atmosfeer terecht komen. Het belangrijkste gas is CO₂, maar ook N₂O, CH₄, O₃ en CFK spelen een rol.

De afgelopen eeuw is de relatieve zeespiegelstijging ongeveer 20 cm geweest. Ook de getijverschillen zijn toegenomen. De oorzaak van deze getijslagtoename is grotendeels onbekend. Slechts een klein deel wordt door zeespiegelrijzing veroorzaakt.

De zeespiegelstijging wordt veroorzaakt door de volgende fenomenen:

- smelten gletschers
- uitzetten oceanen
- smelten ijskappen Noordpool en Groenland
- smelten/aangroeien van de ijskap bij Antarctica

Bij Antarctica treedt momenteel zelfs aangroei op doordat de neerslag toeneemt als gevolg van de klimaatverandering. De neerslag bevriest en overcompenseert het smelten van het ijs. De verwachtingen in dit rapport zijn dat de relatieve zeespiegel de komende eeuw tussen de 35 en 85 cm zal stijgen met een gemiddelde stijging van 60 cm.

Over wind en golven valt uit analyse van metingen uit het verleden, weinig te zeggen. De afgelopen eeuw is geen duidelijke trend te onderscheiden.

Drie scenario's zijn vastgesteld:

- beleidsscenario met de huidige 20 cm stijging
- anticiperend scenario met 60 cm stijging
- ongunstige scenario met 85 cm stijging van de zeespiegel

-RONDE, J.G., Wassend water, gevolgen van het broeikaseffect voor de waterstaat, Rijkswaterstaat nota GWAO 90.015, september 1990

Verslag ISOS-project (Impact of Sea level rise on Society). Gedeeltelijk een samenvatting en verdere uitwerking van het technisch rapport uit 1988. Voor de Waddenzee wordt uitgegaan van een verlies aan intergetijdegebied bij 60 cm stijging van 10% tot 20%. Voor de geulen zal weinig veranderen. Voor de Westerschelde worden geen gevolgen aangegeven. Voor het meest ongunstige scenario (85 cm zeespiegelrijzing en 10%

toename van stormen en rivierafvoeren) bedragen de kosten 85 miljoen voor de eerste tien jaren en 200 miljoen voor de tien volgende jaren.

-RONDE, J.G. (red.), De keerzijde van ons klimaat (concept), RIKZ en RIZA, 1998

Recente brochure (in conceptvorm) waarin de stand van zaken t.a.v. klimaatveranderingen, historische veranderingen, verwachtingen voor de toekomst en implicaties voor het beleid worden beschreven (zie paragraaf 2.1). De voor zeespiegelrijzing van belang zijnde processen worden uitgebreider en voorzien van literatuurverwijzingen beschreven in het technische rapport zeespiegelrijzing uit 1988. De verwachtingen zijn op basis van recente klimaatmodelberekeningen (IPCC 1996 en IMAU 1996: 23 tot 66 cm/eeuw) iets bijgesteld. Gezien de grote onzekerheden in de voorspellingen wordt de verwachte zeespiegelrijzing van 60 cm echter gehandhaafd. Zie ook 2.1.

Zeespiegelrijzing Waddenzee

-PHILIPART, M.E., Simulatie van de getijbeweging in de Westerlijke Waddenzee, Instituut voor meteorologie en oceanografie (IMAU), R 89-2, Rijksuniversiteit Utrecht, 1989

Met numerieke modellen (KAZUNO en ZEEWAD) is de getijbeweging in de Waddenzee onderzocht. Hiermee zijn de getijveranderingen als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee redelijk gesimuleerd. Ook de invloed van relatieve zeespiegelrijzing op de getijbeweging is onderzocht.

-LOUTERS, T. en F. GERRITSEN, The Riddle of the Sands, A tidal system's answer to a rising sea level, Report RIKZ-94.040, October 1994

Een samenvatting van de resultaten van het ISOS*WADDEN onderzoek (Impact of Sea Level Rise on Society). Dit onderzoek was ondermeer gekoppeld aan het Kustgenese onderzoek en de subgroep Coastal Zone Management van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). De opgedane ervaring en gebruikte methodieken vormen een goed uitgangspunt voor het onderzoek naar de effecten van versnelde zeespiegelrijzing op de Westerschelde.

De zandbalans van de Waddenzee is momenteel gesloten. De zandhonger (aanpassing aan zeespiegelrijzing) wordt gestild door de zandsuppleties aan de kusten. De Waddenzee kan de zeespiegelstijging van 20 tot 60 cm d.m.v. zandimport bijhouden. Bij een stijging van 85 cm verdrinken de platen. Gaswinning heeft alleen lokaal een verlaging van de bodem tot gevolg, zandwinning is een groter probleem.

-BUIJSMAN, M.C., The impacts of gas extraction and sea level rise on the morphology of the Wadden Sea, Application and extension of the model ASMITA, public version, June 1997

Een ASMITA-modelstudie binnen een studie van het WL in opdracht van de NAM. Uitgaande van de bestaande morfologische structuur en empirische evenwichtsrelaties voor de Waddenzee zijn verschillende scenario's doorgerekend. Hiermee zijn goede resultaten bereikt. De modellering van autonoom kustgedrag en veranderingen in de morfologische structuur verdienen nadere aandacht.

Waterbeweging en zeespiegelstijging (Noordzee en Westerschelde)

-BAVELAAR, A., Verandering van de getijbeweging in de Noordzee t.g.v. zeespiegelrijzing, RWS notitie GWAO-87.205, september 1987

Een globale verkenning naar de gevolgen voor de getijbeweging op de Noordzee van een zeespiegelrijzing van 2.5 en 5 m. Berekeningen zijn uitgevoerd met het Continental Shelf Model (met gelijkblijvende bodemruwheid). Bij stijgende zeespiegel nemen i.h.a. de getijamplituden toe, m.u.v. die plaatsen waar nabijgelegen amphidromische punten zich in de richting van dat station verplaatsen (b.v. IJmuiden en Den Helder). Tevens treedt een (niet geheel lineair verlopende) vervroeging van het getij op. Bevat naast beschrijving ook goed bruikbare tabellen en figuren met modelresultaten.

-BRAKER, J.G., Singular Spectrum Analysis of North Sea mean sea level time series, TU Delft, 1997

In dit rapport worden de achtergronden van de SSA-methode en de toepassing hiervan op tijdseries van msl-waarden uitgebreid beschreven. Verder worden de resultaten van ruim 75 waterstandstations rond de Noordzee gegeven. Langs de Nederlandse en Engelse kust is er een vrij constante zeespiegelrijzing. Langs Noorwegen treedt een daling op, bij Denemarken is msl vrijwel constant en bij Duitsland treedt wel een stijging op, maar minder sterk dan in Nederland.

-DILLINGH, D., P.F.HEIJNEN, Zeespiegelstijging, getijverandering en deltaveiligheid, Rapport RIKZ-94.026, RIKZ, juni 1994

In dit rapport wordt voor de verschillende perioden in het verleden, de verandering van de gemiddelde waterstand en de getijvorm langs de Nederlandse kust bepaald. De getijvorm wordt in geringe mate bepaald door zeespiegelrijzing en meer door menselijk ingrijpen. Hoogwaterstanden stijgen sneller dan gemiddelde waterstanden en de extreme hoogwaterstanden stijgen nog sneller. Dit komt door de baggeractiviteiten en de inpoldering en verlanding van schorren. De zeespiegelrijzing wordt minder sterk beïnvloed door menselijk ingrijpen dan de getijvorm.

Er wordt geen rekening gehouden met een versnelde zeespiegelrijzing. De verandering van de zeespiegelrijzing wordt bepaald met behulp van de SSA-methode. Hierin wordt rekening gehouden met fluctuaties t.g.v. wind, luchtdruk, watertemperatuur en saliniteit. Uit de analyse komt naar voren dat de gemiddelde stijging de afgelopen 20 jaar groter is dan daarvoor. Enkele resultaten zijn hier in tabelvorm gegeven, zie ook 2.1.

plaats	1900-1990	1940-1990	1975-1990
Vlissingen	22	17	24
Terneuzen	16	24	34
Hansweert	24	26	19

waterstandsstijging in cm/eeuw

plaats	gemiddelde waterstand	HW	LW	getijverschil
Bath		56	-7	63
Hansweert	24	43	22	21
Terneuzen	26	42	14	28
Vlissingen	17	29	14	15
Cadzand		8		
Westkapelle		18	16	2

stijgingen in de periode 1940-1990 in cm/eeuw

-LANGENDOEN, E.J., Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen, Faculteit der Civiele Techniek, TU Delft, 1987

Met numerieke modellen (ZUNOWAK en RANDDELTA II) zijn de oorzaken van de getijslagtoename bij Vlissingen onderzocht. Hierin is gekeken naar veranderingen in de Westerschelde, de monding van de Westerschelde, het Deltagebied en zeespiegelrijzing. Geconcludeerd wordt dat in deze modellen de veranderingen in de mond van de Westerschelde het grootste effect hebben (17.5 cm). Veranderingen in de Westerschelde hebben bij Bath en Hansweert (ca. 25 cm), Cadzand en Westkapelle (ca. 2 cm) getijslagtoenames tot gevolg, maar bij Terneuzen (ca. 0.5 cm) en Vlissingen (ca. 8 cm) juist getijslagafnames. Een verklaring voor deze getijslagafnames wordt niet gegeven. Zeespiegelrijzing heeft relatief weinig invloed (3 cm).

Morfologie Westerschelde

-UITDENBOOGAARD, L.A., Resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1993, IMAU rapport 95-08, Utrecht, 1995

Rapport met veel gedetailleerde informatie over de ontwikkelingen van ingrepen en volumina in de lodingsvakken. De zandimport lijkt tussen 1960 en 1980 te zijn afgenomen en kan zelfs zijn omgeslagen zijn in zandexport.

-TANK, F.T.G., Empirische relaties tussen de plaat- en slikhoogte en getijkarakteristieken in de Westerschelde, IMAU rapport 95-07, Utrecht, 1995

T.b.v. het morfologische model ESTMORF zijn voor de Westerschelde empirische relaties opgesteld tussen de evenwichtshoogtes van de hoge en lage platen en slikken. Dit zijn hogere waarden dan voor de Waddenzee. De relaties zijn gebaseerd op het westelijk deel. Voor het oostelijk deel verschillen de meetgegevens met deze relaties. Met name de hoge platen in het oostelijk deel lijken relatief steeds hoger te worden.

-HOOGBOOM, B., Modelleren van het morfologisch gedrag van de slikken in het model ESTMORF, IMAU rapport 96-06, Utrecht, 1996

Door middel van interpolatie zijn de door Tank (1995) opgestelde relaties door Hoogeboom aangevuld met relaties voor lage slikken en hoge slikken.

-STORM, C., Residuele zandtransporten in de Westerschelde, RIKZ Werkdocument OS-96.837X, Middelburg, 1996

De via verschillende methodieken afgeleide patronen van residuele zandtransporten (zandbalans, McLaren analyse, modelberekeningen en veldwaarnemingen) worden beschreven en blijken goed overeen te komen. De hiervoor van belang zijnde mechanismen worden beschreven. Bevat ook een tabel met samenvatting van berekende totale zandtransporten.

-HUIJS, S.W.E., De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen 1955-1994 IMAU R96-17, augustus 1996

Een overzichtelijke samenvatting van veel informatie over morfologie en ingrepen. Bevat verder o.m. een morfologische schematisatie van de Westerschelde op geul- en plaatgebiedenniveau.

-VERBEEK, H., F.T.G. TANK en M.D. GROENEWOUD, Drempels in de Westerschelde, natuur en mens samen aan het werk (concept), november 1997

Samenvatting van de belangrijkste resultaten van het drempelonderzoek, bestaande uit bureaustudie, veldonderzoek en modelonderzoek. Op basis hiervan wordt de invloed van baggerwerk op de morfologie beschreven.

-VROON, J., C. STORM en J. COOSEN, Westerschelde, stram of struis ?, Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium, RIKZ-97.023, mei 1997

De grootschalige dynamiek van het oostelijk deel van de Westerschelde blijkt door de zeer ingrijpende menselijke activiteiten (inpolderingen en vaargeulverdiepingen) te zijn verstard. Tegen de verwachting in blijkt er geen verlanding in de zin van vermindering van komberging van de hele Westerschelde en getijvolume in de mond op te treden. Verder blijken de hoogwaters m.n. in het oostelijk deel fors te zijn toegenomen. Hoe de situatie zich in de toekomst zal ontwikkelen is nog onduidelijk. Zeespiegelrijzing speelt momenteel een ondergeschikte rol, maar dat kan veranderen wanneer de zeespiegelrijzing versneld gaat stijgen.

-MOL, G., A.M. VAN BERCHUM en G.M. KRIJGER, De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43', MOVE rapport 1, Beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand, Rapport RIKZ-97.049, 1997

Beschrijft de huidige situatie en de aanwezige trends in de Westerschelde (T0-situatie)

-DE JONG, J. E.A., Beoordeling van de effecten van de verdieping 48'-43', Plan van Aanpak, MOVE rapport 2, Directie Zeeland, 1997

In dit rapport worden de verwachtingen van de toekomstige ontwikkelingen in de Westerschelde weergegeven in de vorm van toetsbare hypothesen. Verder bevat dit rapport een metingenplan.

Bijlage 2 Overzicht meetgegevens Westerschelde

Van het gemeten verticale getij zijn tijdreeksen vanaf 1970 (1910 bij Vlissingen) en hoog- en laagwaters vanaf 1860 digitaal beschikbaar bij het RIKZ.

Debietmetingen zijn beschikbaar vanaf 1930. Hiervan wordt een overzicht bij het RIKZ bijgehouden, de gegevens zijn beschikbaar bij de meetdienst Zeeland. In het meer recente verleden zijn zand- en slibconcentratiemetingen uitgevoerd. Zeer recent zijn hovercraft metingen van de sedimentconcentraties uitgevoerd. Momenteel wordt een gedeelte van deze sedimentconcentratiegegevens geanalyseerd bij RIKZ Middelburg.

Lodingsgegevens zijn beschikbaar vanaf 1931 en zijn overzichtelijk verzameld in het GIS-systeem bij RIKZ Middelburg. Hierin zijn ook gedigitaliseerde zeekaarten opgenomen.

Boringen die informatie over de ondergrond bevatten zijn uitgevoerd vanaf 1970 en beschikbaar bij TNO/NITG (voormalig RGD). De meeste informatie is geanalyseerd tijdens het KUSTGENESE project (zie Van der Spek, 1996)

Informatie over menselijke ingrepen wordt verzameld bij het RIKZ in Middelburg. Dit betreft o.a. zandsuppleties, baggerhoeveelheden, storthoeveelheden, drempeldieptes en zandwinhoveelheden.

Meetgegevens van het mondingsgebied (ten westen van Vlissingen-Breskens) van getij (waterstanden en snelheden), bodemligging en ingrepen zijn verzameld in het kader van K2000*KOP en beschikbaar bij RIKZ Den Haag.

Bijlage 3 Overzicht modellen Westerschelde

KARIN

Een numeriek 1D getijgemiddeld model dat de lange termijn morfodynamische processen in de Westerschelde beschrijft. M.n. ontwikkeld om het inzicht in de lange termijn processen te vergroten. Goed bruikbaar voor gevoeligheidsanalyses. Voor het geven van betrouwbare lange termijn voorspellingen moeten de processen beter worden beschreven. In het bestaande model zijn de platen bijvoorbeeld statisch. (De Jong en Heemink, 1996).

ASMITA Estuarium/Mondingsgebied

Gedragsgeorienteerde modellering van mondingsgebied van de Westerschelde inclusief bekken (6 elementen) waarin op basis van evenwichtsrelaties, een bepaalde evenwichtssituatie en advectie- en diffusieparameters de effecten van verstoringen (baggeren, storten en zandwinning) op de morfologie worden berekend (Wang, mei 1997 en Wang e.a., juli 1997).

ASMITA Geul/Plaat

Gedragsgeorienteerde modellering van het estuariumgebied (24 elementen) van de Westerschelde waarin op basis van evenwichtsrelaties, een bepaalde evenwichtssituatie en advectie- en diffusieparameters de effecten van verstoringen op de morfologie worden berekend (Wang e.a., juli 1997).

Door een koppeling met het 1D waterbewegingsmodel DUFLOW kan vervolgens ook het effect op de waterbeweging worden bepaald. Het ASMITA model wordt momenteel verder ontwikkeld door het WL en zal binnen enkele maanden beschikbaar komen voor verdere toepassingen.

ESTMORF Westerschelde

Gedragsgeorienteerde modellering van het estuariumgebied (ca. 200 elementen) van de Westerschelde waarin op basis van evenwichtsrelaties, een bepaalde evenwichtssituatie en advectie- en diffusieparameters de effecten van verstoringen op de morfologie worden berekend (Wang e.a., juli 1997).

Door een koppeling met het 1D waterbewegingsmodel IMPLIC kan vervolgens ook het effect op de waterbeweging worden bepaald.

In de ASMITA- en ESTMORF-modellen wordt momenteel verondersteld dat een zeespiegelrijzing geen verandering veroorzaakt in de berekende evenwichtsvolumes, omdat indien de bodem de zeespiegelrijzing kan volgen de waterbeweging niet verandert. Om de invloed van zeespiegelrijzing op de zandvraag in het systeem te modelleren worden momenteel de evenwichtsvolumes aangepast. Wat er gebeurt wanneer het systeem niet aan de zandvraag kan voldoen en de morfologische structuur verandert kan met deze modellen (nog) niet worden gesimuleerd.

CSM

Een numeriek, 2DH waterbewegingsmodel, gebaseerd op het programmapakket WAQUA om de waterbeweging op het continentale vlak van de Noordzee te simuleren. Met een oude versie is o.a. de invloed van zeespiegelrijzing op de waterbeweging in de Westerscheldemond bepaald (Bavelaar, 1987). De Westerschelde is zelf niet opgenomen.

ZUNOWAK

Een numeriek, 2DH waterbewegingsmodel, gebaseerd op het programmapakket WAQUA om de waterbeweging in de Zuidelijke Noordzee te simuleren. Met een oude versie is o.a. de invloed van zeespiegelrijzing op de waterbeweging in de Westerscheldemond bepaald. Het Westerscheldebekken is zeer grof opgenomen. Naast RANDDELTA (vervangen door KUSTSTROOK) gebruikt om o.a. de invloed van zeespiegelrijzing op het getijverschil bij Vlissingen te bepalen (Langendoen, 1987).

KUSTSTROOK

Een numeriek, 2DH waterbewegingsmodel, gebaseerd op het programmapakket WAQUA om de waterbeweging langs de Nederlandse kust te simuleren. Het KUSTSTROOK model is onderdeel van een serie modellen op verschillende schalen (SCALWEST, ZUNOWAK en CSM) die op termijn via domeindecompositie interactief aan elkaar gekoppeld zullen worden. Zeer recent is een nieuwe versie ontwikkeld dat momenteel binnen het KUST*2-000 programma wordt gebruikt om de inzicht in interactie tussen getij en morfologie te vergroten.

SCALDIS

Een numeriek, rechthoekig 2DH waterbewegingsmodel, gebaseerd op het programmapakket WAQUA om de waterbeweging in de Westerschelde te simuleren. Zowel SCALDIS100 (fijn) als SCALDIS400 (grof) worden gebruikt.

SCALWEST

Een numeriek, kromlijinig 2DH waterbewegingsmodel, gebaseerd op het programmapakket WAQUA om de waterbeweging in de Westerschelde te simuleren (Jansen, 1997). Het SCALWEST-model omvat de Westerschelde vanaf de rand Zeebrugge/Vlakte van de Raan/Westkapelle en de Schelde tot aan Gent. Dit model kan gebruikt worden om het inzicht in de hydraulische processen te vergroten en verschillende (alternatieve) situaties door te rekenen. Zowel een groffe als een fijne versie worden gebruikt. Het SCALWEST model is onderdeel van een serie modellen op verschillende schalen (KUSTSTROOK, ZUNOWAK en CSM) die op termijn via domeindecompositie interactief aan elkaar gekoppeld zullen worden.

TRISCAL

Een 3D waterbewegingsmodel op basis van SCALWEST met 7 lagen in de verticaal, gebaseerd op het programmapakket TRIWAQ om de stroming rond drempels te simuleren. Dit TRIWAQ-model omvat de Westerschelde tussen Baarland en Hedwigepolder (drempels van Hansweert, Valkenisse en Bath).

DUFLOW/IMPLIC/TRECOS/ECDUFLOW

1D waterbewegingsmodellen om de waterbeweging in de Westerschelde te simuleren. Ze worden o.a. samen met de ESTMORF- en ASMITA-modellen gebruikt om 'hydraulische' coëfficiënten te bepalen en de invloed op de waterbeweging door te rekenen. Ook kan de invloed van bijvoorbeeld ontpolderingen door veranderingen in de schematisatie aan te brengen bepaald worden. TRECOS is een schil rond DUFLOW modellen, die de in- en uitvoer versoepelt zodat snel schematische veranderingen zijn aan te brengen. ECDUFLOW is een schil rond DUFLOW modellen waarmee de resultaten inzichtelijk worden gepresenteerd.

Bijlage 4 SCALWEST experiment

opzet

Om een eerste indruk te krijgen van de veranderende waterbeweging in de Westerschelde ten gevolge van zeespiegelrijzing zijn met een 2DH-waterbewegingsmodel van de Westerschelde (SCALWEST) twee scenario's doorgerekend en vergeleken met de huidige situatie:

- scenario 0 huidige situatie
- scenario 1 0.5 m zeespiegelrijzing
- scenario 2 0.5 m zeespiegelrijzing en 4% getijslagtoename

invoer

De invoer bestaat uit de standaard SCALWEST-invoer (bodem 1996). De gebruikte periode voor deze berekening is het getij van 5 mei 1996. Dit betreft een springtij met een getijcoëfficiënt van 1.23 met weinig wind. Voor scenario 1 wordt het nulniveau van de run met 0.5 m verhoogd, de randvoorwaarden worden verder niet aangepast. Voor scenario 2 wordt naast het nulniveau ook de zeewaartse randvoorwaarde aangepast. Hiervoor worden de gemeten waarden waarmee het model wordt aangestuurd met een factor 1.04 vermenigvuldigd.

Opmerkingen:

- Om een realistisch zeespiegelscenario te berekenen zouden voor de aansturing van het model alle componenten aan de zeewaartse rand opnieuw berekend moeten worden met het CSM model, maar dat kan niet binnen de definitiestudie gerealiseerd worden.
- Ook de bodemligging wordt niet aangepast, hoewel dit in werkelijkheid wel zal zijn gebeurd als de gemiddelde zeespiegel al met 0.5 m is gestegen.
- Als de bodemligging zou veranderen heeft dit ook invloed op de zeewaartse waterbeweging, dus zouden de randvoorwaarden moeten worden aangepast.

uitvoer

De uitvoer bestaat uit ruimtelijke figuren van (verschillen in) maximale eb- en vloodsnelheden en getijverschillen en tijdreeksen van waterstanden en debieten. Een aantal figuren en tabellen met getijverschillen, eb- en vloodvolumina en transportcapaciteit in de monding zijn bijgevoegd.

analyse

Omdat zandimport en -export en morfologische veranderingen zelf niet kunnen worden bepaald heeft dit experiment geen voorspellende waarde, wel zijn gevoeligheden van het hydraulische systeem voor zeespiegelrijzing en getijslagtoename bepaald.

Bij de analyse van de resultaten is m.n. aandacht besteed aan de veranderende hydraulica in de mond (Vlissingen-Breskens) met het oog op zandimport en -export (2.3.3). De tijdstippen van de nuldoorgangen, getijverschillen en getijvolumina geven een indruk van de getijdoordringing als er geen morfologische aanpassingen plaatsvinden (2.3.1). Deze resultaten zijn ook gebruikt bij de voorlopige prognose.

De resultaten van de analyse zijn in genoemde paragrafen beschreven.

getijverschillen (in m)			
locatie	run 0	run 1	run 2
Zeebrugge	4.57	4.57	4.75
Westkapelle	4.26	4.25	4.44
Cadzand	4.64	4.63	4.81
Vlissingen	4.75	4.76	4.93
Terneuzen	5.19	5.20	5.38
Hansweert	5.41	5.43	5.60
Bath	5.76	5.77	5.92
Antwerpen	6.28	6.24	6.38

Tijdstip nuldoorgangen				
daling (minuten na 6.00u)		stijging (minuten na 13.00u)		
	Vlissingen	Bath	Vlissingen	Bath
run 0	22.1	118.5	15.7	64.8
run 1	20.5	115.6	15.2	61.7
run 2	20.9	117.4	15.5	64.0

vloedvolumina (in Mm ³)			
locatie	run 0	run 1	run 2
raai 2	270	283	287
raai 6 Middelgat	256	274	282
raai 6 Gat van Oss.	383	406	415
raai 11 Wielingen	1170	1213	1246
raai 11 Sardijngeul	196	209	215

ebvolumina (in Mm ³)			
locatie	run 0	run 1	run 2
raai 2	280	292	298
raai 6 Middelgat	305	329	338
raai 6 Gat van Oss.	355	372	381
raai 11 Wielingen	1223	1274	1307
raai 11 Sardijngeul	177	188	194

indicatie transportcapaciteit raai 11 (1000*m³)			
locatie	run 0	run 1	run 2
vloed	140	180	200
eb	60	80	90
residueel	80	100	110