

Waterbeweging in de Westerschelde

een literatuurstudie

Drs. J. de Kramer

ICG-rapport: 02/6
ISBN 90-77079-08-4

Waterbeweging in de Westerschelde

een literatuurstudie

Drs. J. de Kramer

ICG-rapport 02/6

ISBN 90-77079-08-4

Universiteit Utrecht
Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen
Vakgroep Fysische Geografie
Utrecht

In opdracht van:
Rijkswaterstaat - Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ)
Middelburg

Met dank aan dhr. dr. J.H van den Berg (Universiteit Utrecht, Utrecht), dhr. dr. M.G. Kleinhans (Universiteit Utrecht, Utrecht), mw. dr. A.W. Hesselink (Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg) en dhr. ir. T. Pieters (Bureau Getijdewateren, Vlissingen) voor redactioneel werk.

Deze literatuurstudie is onderdeel van het project 'Zeekennis' bij het RIKZ en staat daarbij bekend als product 2.1.

Contactpersonen bij het RIKZ te Middelburg:
Dhr. drs. B.A. Kornman: 0118 - 672 280
B.Kornman@rikz.rws.minvenw.nl

Dhr. ir. G.A. Liek: 0118 - 672 313
G.A.Liek@rikz.rws.minvenw.nl

Middelburg, oktober 2002

Jurgen de Kramer
Moulins2@netscape.net

Inhoudsopgave

1 SAMENVATTING	3
2 INLEIDING	5
3 HET SCHELDE-ESTUARIUM	6
3.1 Gebiedsbeschrijving.....	6
3.2 Belangrijke aandrijvende krachten van de waterbeweging in de Westerschelde	8
3.2.1 Het getij als belangrijkste aandrijvende kracht van de waterbeweging in de Westerschelde	8
3.2.2 Invloed van de grootte van de Schelde-afvoer op de waterbeweging in de Westerschelde	8
3.2.3 Invloed van de verdeling van zoet- en zoutwater op de waterbeweging in de Westerschelde.....	9
4 ACHTERGRONDEN VAN HET EVENWICHTSGETIJ	10
4.1 Ontstaan van het evenwichtsgetij.....	10
4.2 Getij door de maan en de zon.....	10
4.3 Variaties in het maans- en zonsgetij	11
4.3.1 De dagelijkse ongelijkheid	12
4.3.2 Spring- en doottijcyclus.....	13
4.3.3 18,61-jaren-cyclus en andere variaties met lange en zeer lange periodiciteiten.....	15
5 WERKELIJK OPTREDEND GETIJ IN DE WESTERSCHELDE EN DE RUIMTELIJKE VARIATIE HIERIN.....	16
5.1 Oorzaken voor het verschil tussen evenwichtsgetij en werkelijk optredend getij.....	16
5.2 WERKELIJK GETIJ IN DE NOORDZEE	18
5.2.1 Kenmerken van het Noordzegetij in de monding van de Westerschelde (Vlissingen)	18
5.3 Verticaal getij in de Westerschelde.....	20
5.4 Horizontaal getij in de Westerschelde.....	22
6 VERANDERINGEN IN DE TIJD IN HET GETIJ IN DE WESTERSCHELDE	28
6.1 Soorten getijveranderingen in de Westerschelde in de tijd.....	28
6.2 Veranderingen in de getijvoortplanting in de tijd.....	28
6.3 Veranderingen in het verticale getij in de tijd	28
6.3.1 Veranderingen in de waterstanden op de lange termijn	28
6.3.2 Meer recente veranderingen in de waterstanden.....	30
6.4 Veranderingen in het horizontale getij in de tijd	32

7 OORZAKEN VAN VERANDERINGEN IN HET GETIJ IN DE WESTERSCHELDE	34
7.1 Soorten oorzaken van getijveranderingen.....	34
7.2 Grootschalige veranderingen in estuariumdiepte en -inhoud door stormvloeden, dijkdoorbraken, verlanding en inpolderingen tussen 1000 en 1800	35
7.3 Zeespiegelstijging, toename van de getijslag nabij de monding	38
7.4 Natuurlijke ontwikkelingen in de geometrie op middellange termijn na 1800: eb- en vloedgeuldynamiek.....	38
7.5 Lokale menselijke ingrepen in de geometrie na 1800.....	41
7.5.1 Inhoudsveranderingen door inpolderingen, afdammingen, eventuele toekomstige ontpolderingen, zandwinning en zandwinning in relatie tot veranderingen in sedimentimport en -export	41
7.5.2 Veranderingen in de diepte van eb- en vloedgeulen door baggeren, storten en de aanleg van leidammen en oeversverdediging.....	44
8 SAMENVATTING VAN DE INVLOED PER INGREEP OP DE WATERBEWEGING	47
8.1 Invloed van natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen op de waterbeweging.....	47
9 KENNISLEEMTES EN AANBEVELINGEN VOOR ONDERZOEK	52
9.1 Soorten kennisleemtes	52
9.2 Aanbevelingen voor oplossen kennisleemtes rondom de waterbeweging in de Westerschelde	52
10 LITERATUUR.....	54
11 DEFINITIES.....	61

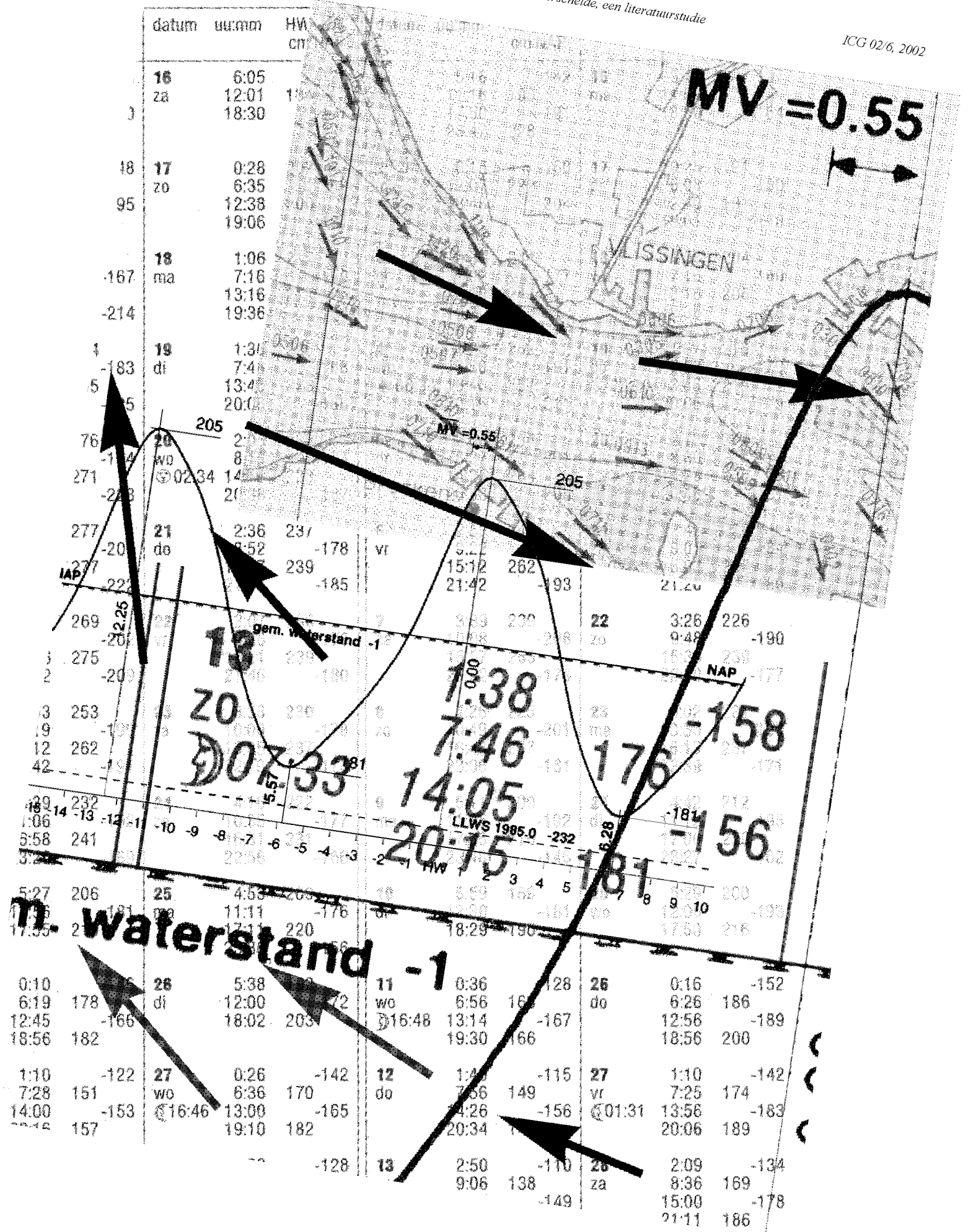
1 Samenvatting

Goed beheer van de Westerschelde staat of valt met een gedegen kennis van het systeem. Daarom is veel onderzoek gedaan naar de waterbeweging en hydrodynamica in de Westerschelde. Het resultaat is in een groot aantal verschillende rapporten terecht gekomen. In dit rapport wordt daarom een samenvatting gegeven van de belangrijkste literatuur, meetresultaten en modeluitkomsten over de waterbeweging in de Westerschelde. Ook worden de effecten van reeds uitgevoerde en voorgenomen ingrepen op de waterbeweging besproken.

De Westerschelde is onderdeel van het Schelde-estuarium. Behalve de Westerschelde horen ook de Zeeschelde (België) en de Westerschelde-monding hiertoe.

De verticale en horizontale waterbeweging in de Westerschelde ontstaan als gevolg van het getij op de Noordzee. Getijgolven worden gegenereerd door de aantrekkende krachten van maan en zon op de watermassa's in de oceanen. In de kleinere en ondiepere zeeën en estuaria worden ze vervolgens vertraagd en vervormd door shoaling, reflectie, wrijving en de draaiing van de aarde. Door reflectie ontstaan in de Westerschelde gedeeltelijk staande golven. Dit zorgt samen met shoaling voor het toenemen van de getij-amplitude van Vlissingen naar Antwerpen gaand. Wrijving zorgt voor golfdemping, waardoor de amplitude van de getijgolf in de Boven-Zeeschelde weer afneemt.

De waterbeweging in de Westerschelde is in de loop van de tijd veranderd. Dit is vóór 1850 veroorzaakt door de zeespiegelstijging en de grootschalige veranderingen in de geometrie, als gevolg van indijkingen, overstromingen en natuurlijke verdiepingen tijdens stormvloed. Tussen 1850 en 1950 zijn diverse veranderingen in de waterbeweging het gevolg van uitbochtelingen en afsnijdingen van ebgeulen. Na 1950 zijn de veranderingen vooral toe te schrijven aan verdiepingen als gevolg van baggerwerken. Het direct koppelen van bepaalde ingrepen aan een waargenomen verandering in de waterstanden of debieten is vaak niet mogelijk. Meerdere morfologische processen kunnen tegelijkertijd verlopen maar tegengestelde effecten hebben. Bovendien kunnen menselijke ingrepen een morfologisch proces in gang zetten dat nog jarenlang doorloopt.



2 Inleiding

Het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) te Middelburg werkt, merendeels in opdracht van Rijkswaterstaat Directie Zeeland, aan de beantwoording van beleidsvragen met betrekking tot het beheer van de Westerschelde en de (mogelijke) gevolgen van ingrepen. Gedegen kennis van de waterbeweging en de hydrodynamica in de Westerschelde is hierbij noodzakelijk. Daarom is door en in opdracht van het RIKZ al veel onderzoek verricht aan de waterbeweging in de Westerschelde. De uitkomsten van deze onderzoeken zijn in een groot aantal rapporten vastgelegd. Dit is weinig overzichtelijk. Het doel van deze literatuurstudie is een actueel overzicht te geven van de opgedane kennis over de waterbeweging in de Westerschelde en van de effecten van reeds uitgevoerde en voorgenomen ingrepen op de waterbeweging. Met dit overzicht kan snel in grote lijnen kennis worden genomen van de achtergronden van de waterbeweging en van de verwachte gevolgen van ingrepen.

Het rapport is bedoeld voor gebruik bij beheers- en beleidsvragen. Hierbij zijn vooral de grootschalige waterbewegingen interessant. Daarom staat in dit rapport de grootschalige waterbeweging in de Westerschelde centraal.

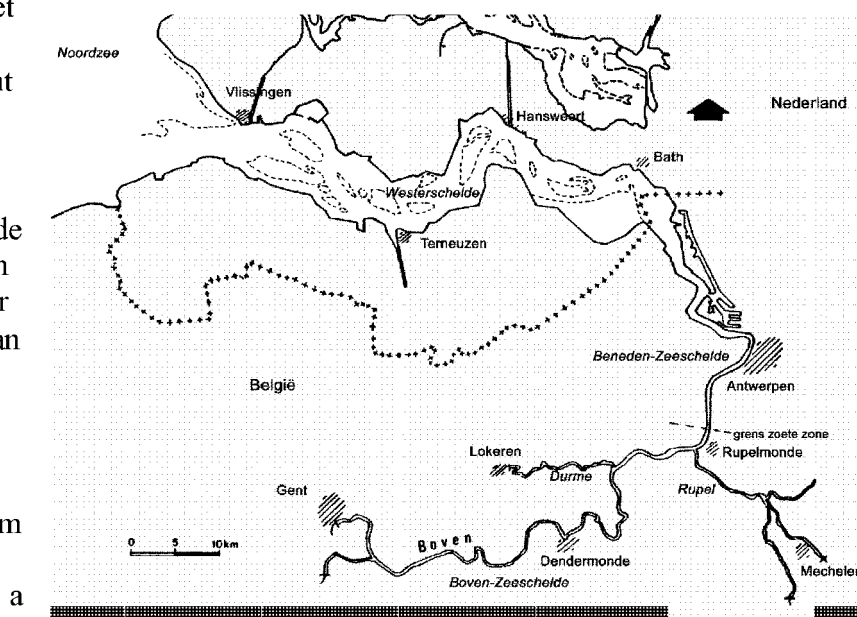
In het rapport wordt voornamelijk gebruik gemaakt van recente (vanaf begin jaren negentig) literatuur, meetresultaten en modelinformatie. Ook sommige oudere studies blijven actueel. Bijvoorbeeld de studies rondom de verdieping van de Westerschelde behorende bij het Programma 48'/43' (Technische Scheldecommissie, 1984) bevatten veel informatie en geven een beeld van de te verwachten gevolgen van een verdere verdieping van de vaargeul in de Westerschelde op de verandering van de morfologie en de waterbeweging.

In dit rapport wordt in hoofdstuk 3 als eerste een gebiedsbeschrijving van de Westerschelde gegeven. In dit hoofdstuk worden ook de belangrijkste factoren voor de waterbeweging in de Westerschelde besproken. In de daarop volgende hoofdstukken wordt ingegaan op de belangrijkste factor voor de grootschalige waterbeweging in de Westerschelde: het getij. Het ontstaan van getijgolven in theorie wordt behandeld in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de vervorming van het getij in de Westerschelde en de ruimtelijke variatie daarin. Vervolgens wordt gekeken naar de temporele variatie van het getij vanaf circa 1650, waarbij de nadruk ligt op veranderingen in de afgelopen honderd jaar (hoofdstuk 6). De invloed van natuurlijke veranderingen en antropogene beïnvloeding op de ruimtelijke en temporele variatie van het getij wordt besproken in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 volgt een synthese. Per natuurlijke verandering of menselijke ingreep worden de gevolgen voor de waterbeweging geschetst. Tenslotte worden een aantal kennisleemten omschreven (hoofdstuk 9). In hoofdstuk 11, na de literatuurlijst in hoofdstuk 10, zijn een aantal in dit rapport gebruikte begrippen uitgelegd.

3 Het Schelde-estuarium

3.1 Gebiedsbeschrijving

De Westerschelde maakt deel uit van het estuarium van de Schelde (Figuur 3.1). De rivier de Schelde ontspringt in Noord-Frankrijk en mondt 350 km stroomafwaarts bij Vlissingen uit in de Noordzee. Het totale oppervlak het stroomgebied van de Schelde is ruim 21000 vierkante kilometer. Hiervan ligt circa 1000 vierkante kilometer op Nederlands grondgebied. Het bovenstroomse deel van het Schelde-estuarium ligt in België en wordt vanaf Gent de Zeeschelde genoemd. Het Nederlandse deel van het Schelde-estuarium bestaat uit de Westerschelde en het mondingsgebied van de Westerschelde. Zie voor een gebiedsbeschrijving van de Westerschelde ook Werkgroep Waterbeheer Westerschelde (1989), Pieters *et al.* (1991) en Schelde Informatie Centrum (1999).



- **Figuur 3.1:** Het Schelde-estuarium. **a:** Overzicht van het Schelde-estuarium. Het wordt gevormd door het stroomafwaartse deel van het (hier niet geheel weergegeven) stroomgebied van de rivier de Schelde. **b:** Topografie van de Westerschelde (bron figuur b: Steijn en Adema, 2000).

De hoofdvorm van het Schelde-estuarium is trompetvormig. In stroomopwaartse richting convergeren de oevers en wordt het dwarsprofiel kleiner. Een verdere classificatie van het Schelde-estuarium is mogelijk op basis van de verhouding tussen het getijvolume en de rivierafvoer. Dalrymple *et al.* (1992) laat een indeling zien, die gebaseerd is op de aard van de dominante fysische processen, die samenhangen met rivierafvoer, getijstromingen en golfwerking. In het Schelde-estuarium worden drie verschillende zones onderscheiden op basis van zowel de geometrie als de dominantie van de voorkomende fysische processen, zie ook figuur 3.1:

- *Mondingsgebied.* Het mondingsgebied van het Schelde-estuarium ligt tussen Vlissingen, Westkapelle, Zeebrugge/Oostende en wordt ook wel benedenestuarium of zee-estuarium genoemd. Dit deel van het estuarium staat in vrije verbinding met de zee. Aan de landwaartse zijde in de van het estuarium bij Vlissingen kan de waterdiepte aanzienlijk zijn, terwijl de rest van het estuarium over het algemeen relatief ondiep is. Dit geldt ook voor de Westerschelde-monding;
- *Middendeel.* Het middendeel van het Schelde-estuarium komt overeen met de Westerschelde. Hier treedt een sterke menging van zoet- en zoutwater op. De Westerschelde is circa 60 kilometer lang. De breedte ervan is bij Vlissingen circa vijf kilometer en neemt geleidelijk af tot zo'n twee kilometer ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens. Bij de monding liggen twee tot drie grotere geulen met daartussen zandplaten. Ter hoogte van de grens is slechts één geul aanwezig. De geulen in de Westerschelde maken grote bochten. De ondiepste plaatsen in de stroomgeulen worden 'drempels' genoemd (Van Veen, 1950; Pieters *et al.*, 1991; Pieters, 1993). Langs de oevers bevinden zich slikken en schorren. De schorren zijn begroeid, in tegenstelling tot de slikken. In de geulen liggen zandplaten, die over het algemeen onbegroeid zijn. De slikken, zandplaten en vooral de schorren vormen in de Westerschelde een belangrijk deel van de gebieden waar extra water geborgen kan worden bij stormvloeden.
- *Riviersectie.* De riviersectie wordt ook wel het fluviatiele deel van het estuarium genoemd. Het is het bovenstroomse deel van het estuarium. Hier is het water zoet, maar er is nog wel getijwerking merkbaar. Het riviergedeelte komt overeen met de Zeeschelde. Vaak wordt voor de grens van een estuarium de grens genomen, tot waar de invloed van het getij merkbaar is. Voor het Schelde-estuarium is dat tot aan Gent, waar een stuw ligt. De Zeeschelde wordt onderverdeeld in een deel boven- en benedenstrooms van Rupelmonde, respectievelijk de Boven-Zeeschelde en de Beneden-Zeeschelde. In de Boven-Zeeschelde monden de Durme en Dender uit. In de Dender ligt ook een stuw, waardoor verder voortplanting van de getijgolf in dit zijriviertje van de Schelde wordt voorkomen. Bij Rupelmonde vloeien de Boven-Zeeschelde en de Rupel samen. Het deel van Gent tot aan de grens heeft een lengte van circa 105 kilometer. De estuariumbreedte neemt in stroomopwaartse richting verder af van ongeveer 2 kilometer bij de Belgisch-Nederlandse grens tot 400 meter te Antwerpen, 300 meter aan de Rupelmonding en 50 meter te Gent.

3.2 Belangrijke aandrijvende krachten van de waterbeweging in de Westerschelde

3.2.1 Het getij als belangrijkste aandrijvende kracht van de waterbeweging in de Westerschelde

Het getij is bepalend voor de waterbeweging in het Schelde-estuarium. Het bepaalt de hoogste waterstanden (hoogwater) en de laagste waterstanden (laagwater). Het verschil in hoogte tussen opeenvolgende hoog- en laagwaters op een bepaalde locatie is de getijslag. Hoe groot de getijslag is, is afhankelijk van de locatie in het estuarium. Bij springtij is de getijslag bij Vlissingen circa 4,5 meter, bij Antwerpen circa 6,0 meter en bij Gent circa 2,3 meter.

Het getij zorgt, naast waterstandsfluctuaties, ook voor een zeer sterk variërend stromingspatroon. Bij vloed (of eigenlijk: ongeveer in de periode tussen laag- en hoogwater) stroomt het water het estuarium in en bij eb (of eigenlijk: ongeveer in de periode tussen hoog- en laagwater) het estuarium uit. Het vloedvolume, de totale hoeveelheid water die tussen de eb- en vloedkentering van een getij door een zekere dwarsdoorsnede stroomt, is bij Vlissingen circa 1,1 miljard kubieke meter. Gedurende een getijcyclus bedraagt de totale hoeveelheid water, die de Westerschelde vanaf zee in- en uitstroomt dus circa 2,2 miljard kubieke meter water. Dit wordt het getijvolume genoemd.

Naast het astronomisch bepaalde getij spelen in de Westerschelde ook meteorologische condities, als wind en neerslag, een rol. Stormen zijn belangrijk en beïnvloeden zowel de verticale als de horizontale waterbeweging. Waterstandsverhogingen worden ook veroorzaakt door luchtdrukvariaties op oceanen en de Noordzee en door opstuwing door wind op de Noordzee en Westerschelde.

3.2.2 Invloed van de grootte van de Schelde-afvoer op de waterbeweging in de Westerschelde

Ondanks dat in de Westerschelde vooral de zee-invloed (getij, stormen) dominant is, heeft de Westerschelde ook te maken met de aanvoer van zoet Scheldewater. Gemiddeld is de afvoer van de Schelde te Schelle circa 110 kubieke meter per seconde. Omdat de Schelde een regenrivier is, is er een grote variatie in de grootte van de afvoer door het jaar heen (Holland en Smit, 1994). In de zomer, tussen april en oktober, zijn de afvoeren laag, zo was in het tweede en derde kwartaal van 2000 de afvoer te Schelle gemiddeld 88 en 58 kubieke meter per seconde (Taveniers, 2001). In de winter zijn de afvoeren hoog (in het eerste en vierde kwartaal van 2000 was de afvoer 169 en 121 meter per seconde). De Schelde-afvoer heeft een verwaarloosbare invloed op het getij en dus ook op de waterbeweging in de Westerschelde (Pieters *et al.*, 1993). Per getijcyclus voert de Schelde slechts circa vijf miljoen kubieke meter af. In dezelfde periode is het getijvolume circa 240 keer groter. Duidelijk merkbare invloed op de horizontale en verticale waterbeweging is daarom alleen in meer bovenstrooms gelegen delen van het Schelde-estuarium te verwachten, met name landwaarts van Antwerpen (Pieters *et al.*, 1993; Pieters en Verspuy, 1997). Dit blijkt ook uit modelstudies. Pieters *et al.* (1993) hebben de invloed van dergelijke afvoerfluctuaties op de waterstand in de Westerschelde aan modelonderzoek onderworpen. Tijdens springtij en een lage rivierafvoer (35 kubieke meter per seconde) zijn de hoog- en laagwaterstanden bij Rupelmonde (België) slechts circa vijf tot tien centimeter hoger respectievelijk lager dan tijdens sterk getij en een extreem hoge rivierafvoer (500 kubieke meter per seconde). De laagwaterstanden gaan door een hogere rivierafvoer meer omhoog dan de hoogwaters afnemen (Parker, 1991). De oorzaak hiervan is

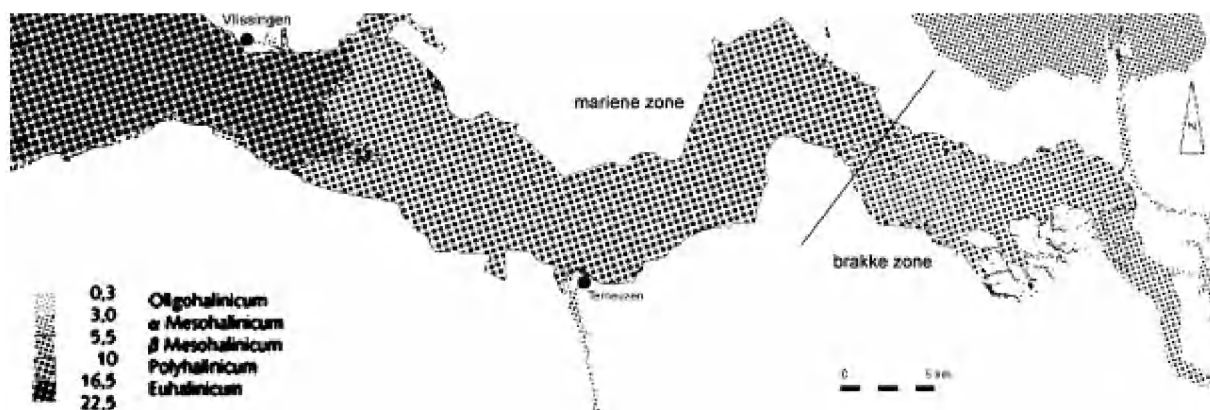
de verhoging, respectievelijk verlaging van de eb- en vloodsnelheden door de rivierafvoer en daarmee van de relatieve invloed van de weerstand.

3.2.3 Invloed van de verdeling van zoet- en zoutwater op de waterbeweging in de Westerschelde

Wisselwerkingen tussen het zoete rivierwater en het zoute zeewater kunnen het stromingspatroon in een estuarium beïnvloeden. Het zoute zeewater dringt door de grotere dichtheid normaal gesproken langs de bodem het estuarium binnen, tegen de zeewaartse stroom van het zoete rivierwater in. Dit heet zoutindringing. De afstand waarover het zoute water gemiddeld binnendringt, hangt af van de grootte van de zoetwaterafvoer. Menging treedt op door het getij en is afhankelijk van de verhouding waarin het zoute en het zoete water in het estuarium aanwezig zijn. Indien de zoetwateraanvoer klein is ten opzichte van het getijvolume, ontstaat een volledig gemengd estuarium. Het Schelde-estuarium is hiervan een voorbeeld. Dit blijkt uit het verloop van het zoutgehalte, uitgedrukt in de hoeveelheid gram chloride per liter. Het Noordzee- en Scheldewater hebben een gehalte van respectievelijk ruim 19 en minder dan 0,3 gram chloride per liter. Hiertussen neemt het jaargemiddelde chloridegehalte geleidelijk af (Peelen, 1967; Technische Scheldecommissie, 1984; Holland en Smit, 1994; Schelde Informatie Centrum, 1999), zie figuur 3.2.

Het Schelde-estuarium kan in zones worden onderverdeeld op basis van het verloop in het zoutgehalte. Er zijn drie zones te onderscheiden. Dit zijn de zoete (minder dan 0,3 gram chloride per liter), brakke (0,3 tot 10 gram chloride per liter) en mariene (meer dan 10 gram chloride per liter) zone. De zoete zone ligt bovenstrooms van Rupelmonde. De brakke zone loopt van Rupelmonde tot Hansweert (Pieters *et al.*, 1991). De mariene zone komt voor een groot deel overeen met de Westerschelde.

In de Westerschelde is het zoete en het zoute water goed gemengd. Hierdoor is de invloed van de dichtheidsverschillen op de waterbeweging klein en is de invloed op de waterstanden te verwaarlozen. Ook treden hierdoor geen dichtheidsstromingen door gelaagdheid in de verticaal op in de Westerschelde (Technische Scheldecommissie, 1984). Wel is er een kleine verticale zoutgradiënt. De chloridegehalten zijn namelijk aan het oppervlak in het algemeen iets lager dan aan de bodem. Dit geldt met name voor de omgeving van Bath.



- **Figuur 3.2:** Verdeling van zoet en zout water in de Westerschelde. Het zoutgehalte is uitgedrukt in de hoeveelheid gram chloride per liter water. De grens tussen de brakke en mariene zone ligt tussen Hansweert en Bath (naar: Schelde Informatie Centrum, 1999).

4 Achtergronden van het evenwichtsgetij

4.1 Ontstaan van het evenwichtsgetij

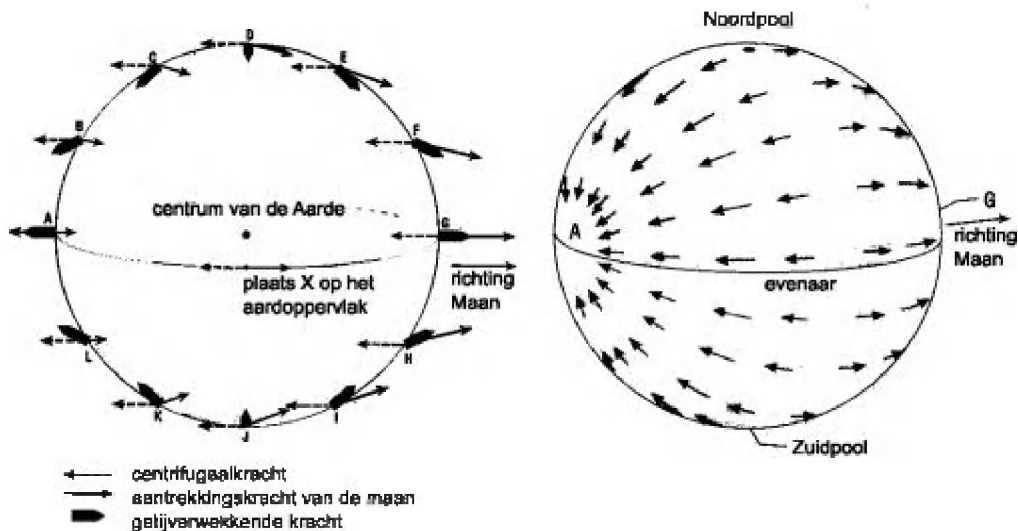
Voor het begrip van de getijden in de Westerschelde is enige achtergrond nodig hoe getijden in het algemeen ontstaan. Deze achtergrond wordt in dit hoofdstuk gegeven. In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de voortplanting en vervorming van het getij van de Atlantische Oceaan naar de Noordzee, waar de randvoorwaarde ontstaat voor de getijden in de Westerschelde.

Door de aantrekkingskrachten van de maan en zon op de aarde en de bewegingen ten opzichte van elkaar vervormt de waterschil op aarde. De aarde draait circa eenmaal per dag onder de vervormde schil door, wat in de dagelijkse getijden resulteert. Daarnaast ontstaan er ook allerlei variaties doordat de maan en de aarde zich in hun banen voortbewegen. Tenslotte veranderen ook deze banen op een nog langere tijdschaal. De overige planeten in het zonnestelsel staan te ver van de aarde vandaan om een merkbare invloed te hebben op het getij. Het getij uitsluitend als resultaat van de wisselende aantrekkingskrachten van maan en zon wordt 'astronomisch getij' genoemd. In het theoretische geval, wanneer de aarde geheel met een oceaan bedekt zou zijn, wordt het als 'evenwichtsgetij' aangeduid. Bij de hierna volgende beschrijving van de opwekking (generatie) van getijgolven wordt van de situatie van evenwichtsgetij uitgegaan. Voor een meer gedetailleerde uitleg wordt verwezen naar Von Arx (1962), Dronkers (1964), Kalkwijk (1976), Rakhorst (1988), Thurman (1978), Van Rijn (1994) en Burgers en Hisgen (1996) of elk ander handboek.

4.2 Getij door de maan en de zon

Door de aantrekkingskracht van de maan op de aarde ontstaat een waterbult aan de maankant van de aarde, omdat de aantrekkende kracht van de maan op de waterdeeltjes daar groter is dan de centrifugale kracht. Aan de andere kant van de aarde ontstaat ook een waterbult. Deze ontstaat doordat daar de centrifugale kracht groter is dan de aantrekkende kracht van de maan. Daar de aarde een veel grotere massa heeft dan de maan, ligt het gemeenschappelijke draaipunt dicht bij de aarde dan bij de maan. Het punt bevindt zich zelfs binnen het oppervlak van de aarde, maar wel aan de kant van de maan. Tijdens de rotatie van de aarde om dit punt wordt het water aan de tegenoverliggende kant (dus niet de maankant) het hardste naar buiten geslingerd, zodat daar de tweede waterbult ontstaat. De resultante van de aantrekkingskracht en de centrifugale kracht ('slingerkracht') wordt getijverwekkende kracht genoemd. De waterbulten aan beide zijden van de aarde vormen samen een ellipsoïde (figuur 4.1).

Aangezien de aarde als het ware onder de watermassa door draait, zijn er per dag op een willekeurige plaats op aarde ruwweg twee hoogwaters, met twee laagwaters daar tussen in. Dit getij heet het 'dubbeldaagse maansgetij' of 'tweemaaldaagse maansgetij'. Terwijl de aarde in 23 uur en 56 minuten om haar as draait, verplaatst de maan zich een stukje in haar baan om de aarde. De maan beweegt immers om de aarde in 27,32 dagen. Beide rotaties zijn in dezelfde richting, zodat het gemiddeld 24 uur en 50 minuten (maansdag genoemd) duurt voordat een punt op aarde weer dezelfde positie ten opzichte van de maan krijgt. Het dubbeldaagse maansgetij heeft dus een periode van gemiddeld 12 uur en 25 minuten.



- **Figuur 4.1:** De centrifugaalkracht en de aantrekkingskracht van de maan of de zon doen de waterschil van de aarde vervormen, in de theoretische situatie dat de aarde geheel met water bedekt is (naar: The Open University, 1989).

Het zonsgetij, dat ontstaat door de onderlinge aantrekkingskracht van de aarde en de zon wordt op vergelijkbare wijze gevormd. De aarde draait in 365,26 dagen om de zon. De omlooprichting van de aarde om de zon is gelijk aan de richting waarin de aarde om haar eigen as draait. Ten opzichte van een ver punt in de ruimte draait de aarde in 23 uur en 56 minuten om haar as. Na deze omwenteling bevindt de aarde zich echter nog niet in dezelfde positie ten opzichte van de zon. De aarde draait nog gedurende 4 minuten door om in dezelfde positie ten opzichte van de zon te belanden. Pas na 24 uur is de aarde in de oorspronkelijke positie terug. Het zonsgetij levert dus precies tweemaal per dag een hoog- en een laagwater. Elk hoogwater is dus 12 uur later dan het vorige.

De maan levert de grootste getijverwekkende kracht. De getijverwekkende kracht van de zon bedraagt maar ongeveer de helft van de bijdrage van de maan, ook al heeft de zon een veel grotere massa dan de maan. Dit komt omdat de zon 389 keer zo ver weg van de aarde staat en de sterkte van de getijverwekkende kracht voor een groot gedeelte afhangt van de afstand tussen de hemellichamen. Het evenwichtsgetij bestaat uit de combinatie van de ellipsoïde van de maan en de zon.

Alleen op oceanen kan een getij van enige amplitude, namelijk circa 50 centimeter, gegenereerd worden, omdat de oceanen voldoende groot daarvoor zijn (Kalkwijk, 1976; Van Rijn, 1994). De Middellandse Zee en de Noordzee zijn te klein voor de getijverwekkende kracht om een getij met behoorlijke amplitude op te wekken.

4.3 Variaties in het maans- en zonsgetij

Het getij vertoont een aantal vaste variaties in het maans- en zonsgetij. Tabel 4.1 geeft een aantal, waaronder de meest belangrijke, te onderscheiden variaties, periodiciteiten, van maans- en zonsgetij, die te maken hebben met variaties in de positie van de maan en de aarde ten opzichte van elkaar en van de zon. De belangrijkste variaties in het maans- en zonsgetij zijn de variaties, die zorgen voor de zogeheten 'dagelijkse ongelijkheid' in het getij, de 'springtij-doodtijcyclus' en de '18,61-jaren-cyclus'. In de volgende paragrafen worden deze periodiciteiten verder uitgewerkt. Zie voor meer achtergronden ondermeer Dronkers (1964) en Burgers en Hisgen (1996).

Aard van de periodiciteit**Periode****Maan:**

• cyclus van hoek maan met vlak door evenaar	27,21 dagen
• omloop om aarde	27,32 dagen
• variatie afstand aarde-maan	27,55 dagen
• spring- en doortijcyclus door samenwerking respectievelijk tegenwerking van invloed maan en zon	29,53 dagen
• inhaalslag van cyclus van hoek maan met vlak door evenaar op de maanmaand	376 dagen
• inhalen maanmaand door de periode van de omloop van de maan om de aarde	440 dagen
• draaiing ellips maanbaan	8,85 jaar
• 18,61-jaren-cyclus door draaiing maanbaansvlak	18,61 jaar

Aarde:

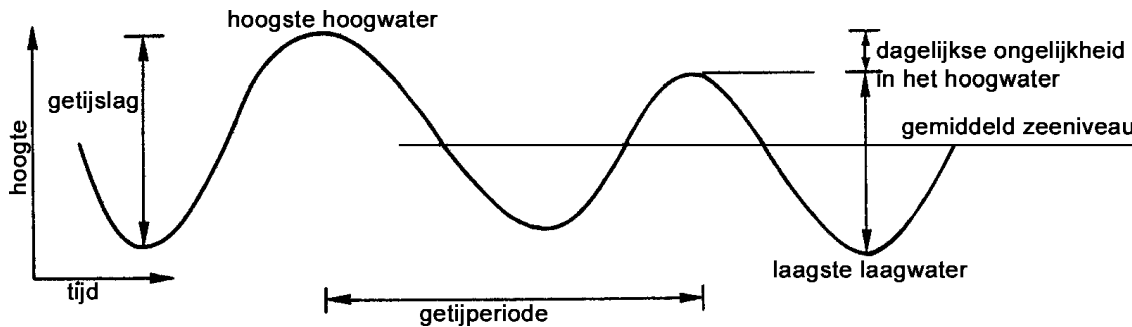
• dagelijkse ongelijkheid door aswenteling	23 uur 56 minuten 4,1 seconden
• omloop om zon	365,26 dagen

- **Tabel 4.1:** *Overzicht van de variaties in het maans- en zonsgetij die te maken hebben met variaties in de positie van de maan en de aarde ten opzichte van elkaar en van de zon (niet volledige lijst).*

4.3.1 De dagelijkse ongelijkheid

Twee opeenvolgende hoog- en laagwaters zijn niet aan elkaar gelijk. Ze verschillen in sterkte en daardoor in de resulterende waterstand, zie figuur 4.2. Dit wordt de dagelijkse ongelijkheid in het getij genoemd. Dit wordt veroorzaakt doordat de draaiingsas van de aarde niet loodrecht staat op de vlakken waarin de aarde om de zon (eclipticavlak) en de maan om de aarde (maanbaansvlak) bewegen. De twee getijbulten zijn hierdoor ten opzichte van de evenaar verschoven; een van de bulten bevindt zich meer op het noordelijk halfrond en de tweede meer op het zuidelijk halfrond. Bij de dagelijkse draaiing van de aarde ontstaat in Nederland eerst een hogere getijslag bij passage van de noordelijker bult, en daarna een lagere getijslag. De dagelijkse ongelijkheid in hoog- en laagwaters is vooral merkbaar op gematigde geografische breedtes, waar Nederland ook op ligt. Doordat de twee hoog- en laagwaters per dag verschillen, zijn er in getijwaarnemingen ook enkeldagse componenten aanwezig. De periode van de dagelijkse ongelijkheid voor zowel het maans- als zonsgetij is 23 uur, 56 minuten en 4,1 seconden.

De dagelijkse ongelijkheid varieert in de loop van een maand met de positie van de maan ten opzichte van de aarde. Hierdoor staat de maan de helft van de 27,21 dagen boven het vlak en de helft van de tijd eronder, en tweemaal in het vlak. Daardoor verplaatst de positie van beide getijbulten zich tussen het noordelijk halfrond en het zuidelijk halfrond. De periode van de variatie in de dagelijkse ongelijkheid is dus 27,21 dagen. Echter, de maanmaand duurt 29,53 dagen. Dat betekent dat de maan nog een deel van de baan moet inhalen. Deze inhaalslag is afgerond na ongeveer 13 maanmaanden, circa 376 dagen. Het verschil met de cyclus van 27,21 geeft dus een lange cyclus erbij van meer dan een jaar.



- **Figuur 4.2:** De dagelijkse ongelijkheid in het getij. Opeenvolgende hoog- en laagwaterstanden zijn niet gelijk (naar: Van Rijn, 1994).

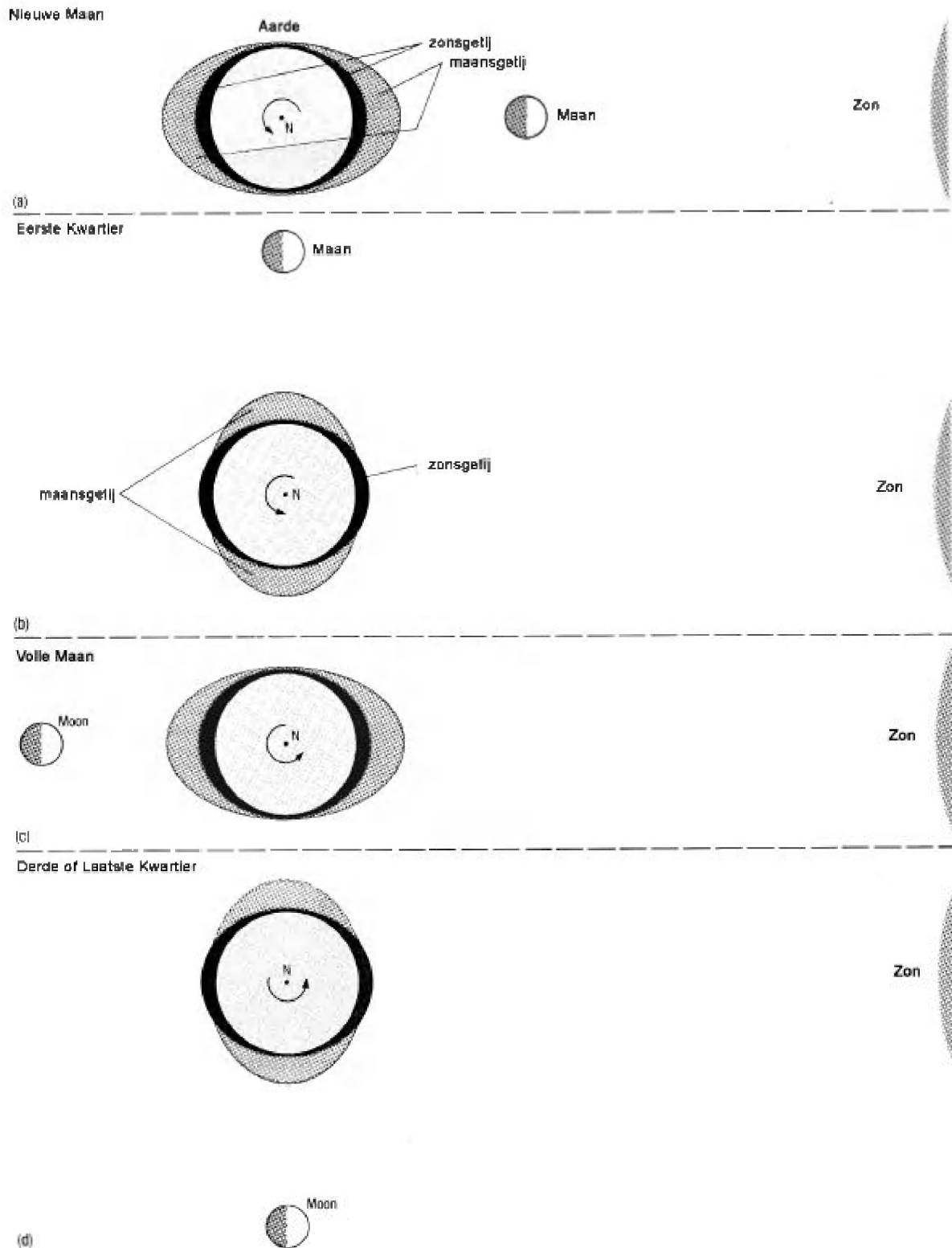
4.3.2 Spring- en doottijcyclus

Tussen de zons- en maansgetijden treden interacties op. De zon- en maansgetijcycli duren niet even lang, dus zullen elkaar afwisselend versterken (springtij) en verzwakken (doodtij), zie figuur 4.3. De grootste versterking, en daarmee het grootste verschil tussen hoog- en laagwater, treedt op tijdens nieuwe en volle maan als de zon, maan en aarde ongeveer op één lijn staan, zie figuur 4.3 a en c. Wanneer echter de zon en de maan onder een hoek van 90 graden ten opzichte van de aarde liggen, wordt van twee verschillende kanten aan het water getrokken met als gevolg dat het water veel minder stijgt dan gemiddeld. Aangezien de maan in een maanmaand (29,53 dagen) om de aarde draait, herhalen springtij en doottij zich twee keer per maanmaand.

De amplitude van het spring- en doottij varieert in de loop van de maand doordat de baan van de maan rond de aarde geen cirkel is, maar een ellips waarbij de aarde niet in het centrum ligt. Daardoor varieert de afstand van de aarde tot de maan en is de getijopwekkende kracht maximaal 20 procent meer of minder dan gemiddeld. De tijd tussen twee opeenvolgende tijdstippen van maximale of minimale aantrekkingskracht is 27,55 dagen.

Veranderingen in de afstand van de aarde tot de maan liggen ook ten grondslag aan de cycli van 0,56 en 8,85 jaar. Is de afstand van de aarde tot de maan minimaal tijdens volle of nieuwe maan, dan ontstaat een extra hoog springtij. Bij het daaropvolgende springtij is de afstand van de aarde tot de maan maximaal en een relatief laag springtij ontstaat. Ongeveer een kwart jaar later is de afstand van de aarde tot de maan gemiddeld. Dan zullen de dan optredende springtijden het gemiddelde springtij benaderen. De cyclusduur van dit verschijnsel bedraagt 0,56 jaar. De ellipsvormige maanbaan maakt daarnaast een volledige omwenteling om de aarde en zorgt zo voor een variatie met een periode van 8,85 jaar.

Aangezien de doottij-springtijcyclus niet alleen door de maan maar ook door de zon wordt veroorzaakt, zijn variaties in de afstand van de aarde tot de zon ook belangrijk. De springtijden zijn omstreeks 21 maart en 21 september extra sterk en de doottijden extra zwak. Daarnaast bestaat er door het jaar heen ook een verschil in de vloedstanden die overdag en 's nachts worden bereikt. Dit verschil is mede een gevolg van de hoek tussen het vlak van de baan van de aarde rond de zon met het vlak door de evenaar. Op het noordelijk halfrond zijn in de zomer de nachtvloeden hoger dan de dagvloeden. Als de aarde begin januari relatief dichtbij de zon staat, is dit effect op het getij groter dan wanneer de aarde in juli ver van de zon staat.



- **Figuur 4.3:** Schematische weergave van de interacties van de maans- en zonsgetijden, gezien vanaf een punt boven de Noordpool. De pijl geeft de aardrotatie weer. **a:** Nieuwe maan, springtij. **b:** Eerste kwartier, doortij. **c:** Volle maan, springtij. **d:** Derde (of laatste) kwartier, doortij (naar: The Open University, 1989).

Het is niet zo dat springtij bij nieuwe maan systematisch hoger is dan bij volle maan. Over een heel jaar genomen zijn er springtijden die bij nieuwe maan het hoogst zijn en er zijn springtijden die bij volle maan het hoogst zijn. Dit hangt samen met de periode van circa 27,32 dagen van de omloop van de maan om de aarde die de periode van de maanmaand van circa 29,53 dagen inhaalt. Na 440 dagen is de inhaalslag afgerond. Deze variatie van 440 dagen zorgt er samen met de variatie van 376 dagen (inhaalslag cyclus van hoek maan met vlak door evenaar op de maanmaand) voor, dat er ook springtijden met grote dagelijkse ongelijkheid bij volle maan en bij nieuwe maan voorkomen.

4.3.3 18,61-jaren-cyclus en andere variaties met lange en zeer lange periodiciteiten

De wenteling van het maanbaansvlak om een as, die loodrecht staat op het eclipticavlak, zorgt voor een variatie met de periode van 18,61 jaar. Tijdens de rotatie varieert de hoek van het maanbaansvlak met het equatorvlak. De variatie met een periode van 18,61 jaar veroorzaakt een herhaling van hogere en lagere getijden (in de orde van grootte van enkele centimeters) elke 9,3 jaar.

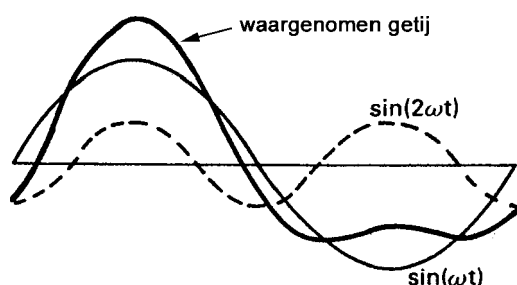
Door de rotatie van het maanbaansvlak ten opzichte van de sterren ontstaat er nog een getijvariatie met een periode van 1600 jaar. Daarnaast zijn er nog veel langere cycli door variatie in de stand van de aardas (25.800 jaar), de langgerektheid van de baan van de aarde (95.000 jaar) en de rotatie van het aardbaansvlak ten opzichte van de sterren (108.000 jaar). Deze worden in de getijberekeningen buiten beschouwing gelaten, maar spelen wel een rol in de klimaatvariaties en de daaraan gerelateerde zeespiegelstijging van de afgelopen duizenden jaren.

5 Werkelijk optredend getij in de Westerschelde en de ruimtelijke variatie hierin

5.1 Oorzaken voor het verschil tussen evenwichtsgetij en werkelijk optredend getij

Het evenwichtsgetij zou optreden als er geen continenten en ondiepe zeeën waren. De waterbeweging zoals die in de Westerschelde kan worden waargenomen, is het resultaat van veranderingen die de opgewekte getijgolven op de Oceanen (met name de Atlantische Oceaan), Noordzee en in de Westerschelde zelf hebben ondergaan. De periodiciteiten uit het theoretische, astronomische getij zijn nog als 'componenten' herkenbaar in de waargenomen waterbewegingen. De kenmerken van de componenten geven informatie over de mate van verstoring.

De methode die wordt gebruikt voor het opsplitsen van het getijsignaal in de afzonderlijke componenten waaruit het bestaat, wordt 'harmonische analyse' genoemd. Deze componenten zijn sinusfuncties, zie figuur 5.1. De harmonische analyse is ontwikkeld door Lorentz (1926). Elke getijcomponent heeft een internationaal overeengekomen afkorting. Zo wordt het zonsgetij gekarakteriseerd met de letter 'S' en het maansgetij met de letter 'M'. Het dubbeldaagse maans- en zonsgetij worden respectievelijk het M2- en S2-getij genoemd. Enkeldaagse fenomenen hebben het cijfer '1' achter de letter staan, dubbeldaagse '2'. Bijna overal op aarde is in de getijbeweging het aandeel van het dubbeldaags maans- en zonsgetij M2 en S2 dominant, maar vooral in gebieden met sterk vervormde getijbewegingen zijn in het getijsignaal hogere harmonische componenten te onderscheiden, en ook samengestelde componenten, de 'ondiepwatergetijden'. Zo levert de interactie tussen M2 en N2 (een component dat verband houdt met de ellipsvormigheid van de maanbaan) het MN2-getij op. Bovendien is vaak het aandeel van meerdaagse componenten groot, zoals de getijcomponent MS4, resultaat van een interactie tussen het M2- en S2-getij. Hogere harmonische componenten hebben een hoeksnelheid die een veelvoud is van de hoofdmaans- en zonsgetijden M2 en S2. Relatief belangrijke harmonische componenten in de Westerschelde zijn M4 en M6. Deze ontstaan doordat lokaal het M2-getij in ondiep water door ondiepwatereffecten respectievelijk wrijving de componenten M4 en/of M6 kan voortbrengen, waarin de asymmetrie als gevolg van wrijving in de M6-component wordt uitgedrukt. Andere, samengestelde, componenten zijn vooral vier- en zesmaaldaagse componenten, namelijk MS4, MN4, 2MS6, en 2MN6 (Gerritsen en Van den Boogaard, 1998), zie ook figuur 5.5.

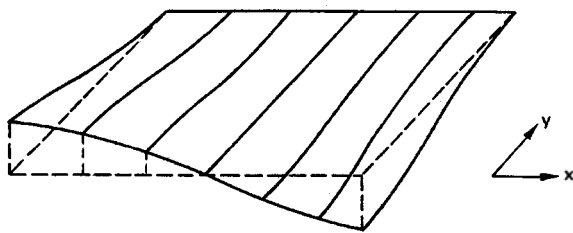


• **Figuur 5.1:** Uiteenrafeling van een waargenomen getij (dikke lijn) in de harmonische componenten waaruit het bestaat, bijvoorbeeld in M2 en M4 (naar: Van Rijn, 1994).

Het evenwichtsgetij kan niet optreden door twee algemene en drie locale factoren. De eerste algemene factor is een te lage getijvoortplantingssnelheid, dat is de loopsnelheid van de getijgolf. Deze getijvoortplantingssnelheid is te laag in vergelijking met de verschuivingen over de aarde van de bijbehorende sleepkracht, uitgeoefend door de maan en de zon. Het

werkelijke getij gaat in fase achterlopen bij de fase van de sleepkracht. De te lage getijvoortplantingssnelheid is het gevolg van de relatief te kleine diepte van de oceanen en zeeën.

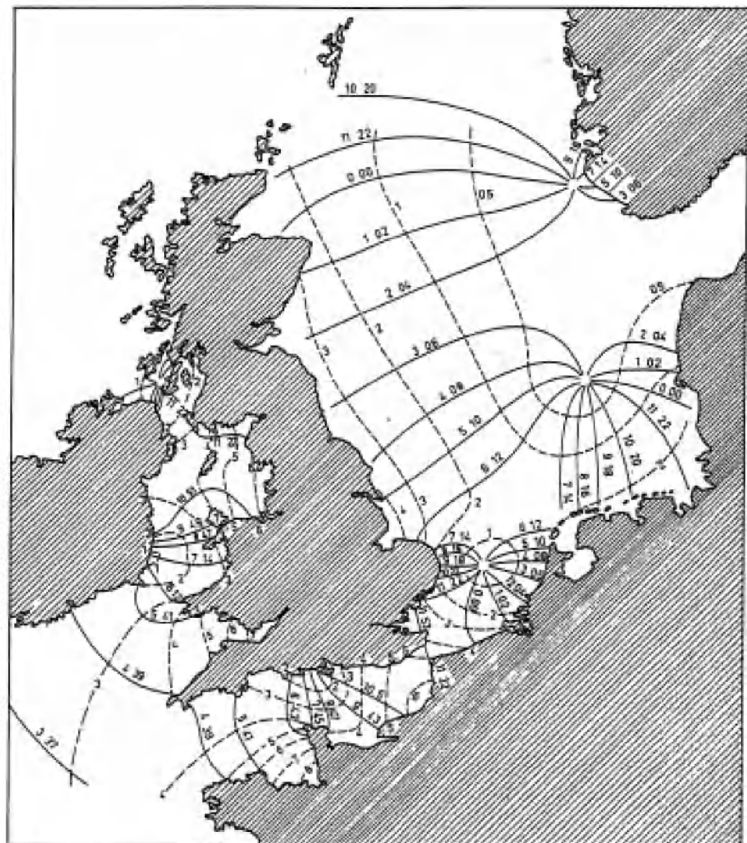
De tweede algemene factor is de invloed van de kracht van de aardrotatie, de Corioliskracht genoemd. De Corioliskracht ontstaat doordat de aarde onder de waterlaag (en ook de luchtlaag) doordraait. Op het noordelijk halfrond zullen de waterdeeltjes dan de neiging hebben af te buigen naar rechts in de richting van de stroming gezien, en vice versa op het zuidelijk halfrond. Dit resulteert in het ontstaan van een zogeheten 'Kelvingolf', zie figuur 5.2. In het geval van volledige golfreflectie aan de continenten bewegen twee Kelvingolven in tegengestelde richting. Er is een knooppunt, waar de amplitude van de waterspiegel (vrijwel) nul is. Zo'n plek heet 'amfidromie' of 'amfidromisch punt'. Op het noordelijk halfrond draaien de Kelvingolven hier tegen de wijzers van de klok omheen. De getijslag is het grootst in de verst van het knooppunt gelegen punten, dus aan de kust.



• **Figuur 5.2:** Kelvingolf (bron: Van Rijn, 1994).

Locale factoren zijn shoaling (invloed van het kleiner worden van de waterdiepte, een 'ondiepwatereffect'), reflectie (terugkaatsing) van de getijgolf tegen de kust (ocean, zee) of oever (estuarium), bodemwrijving (zee, estuarium) waardoor de energie van een getijgolf afneemt, en meteorologische invloeden zoals opstuwing door wind, variaties in luchtdruk, neerslag en aanvoer van neerslag van het land. De meteorologische invloeden zijn te herkennen als niet-periodische componenten in de waargenomen getijden. Als gevolg van de bodemwrijving en reflectie komen in de Noordzee meerdere amfidromische systemen naast elkaar voor, zie figuur 5.3.

- **Figuur 5.3:** Amfidromische systemen in de Noordzee die worden gegenereerd door het M2-getij. De getrokken lijnen verbinden punten van gelijke fase (in uren), de gestreepte lijnen verbinden punten met een gelijke getijslag (in meters) (bron: Kalkwijk, 1976).



5.2 Werkelijk getij in de Noordzee

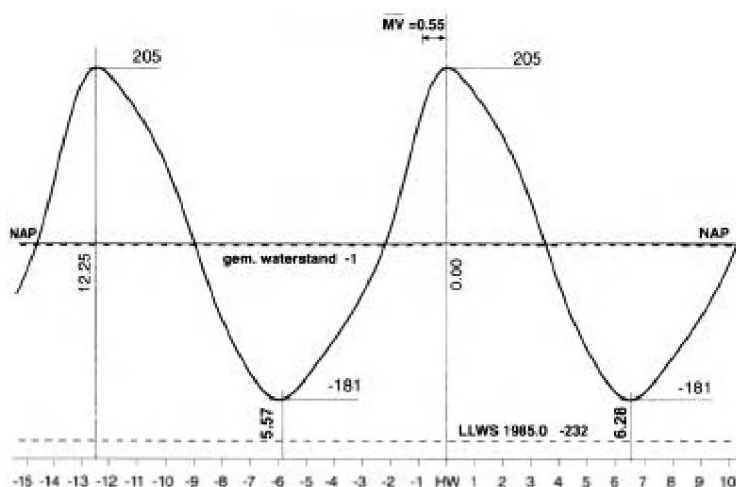
De getijgolf op de Noordzee vindt zijn oorsprong in de Atlantische Oceaan op het Zuidelijk Halfrond. Deze getijgolf zal in de Noordzee deels worden doorgelaten en deels worden gereflecteerd. Het deel van de getijgolf dat doorgelaten wordt, verandert door de kleinere waterdiepte van richting op de overgang van oceaan naar zee. Daarnaast wordt door shoaling de voortplantingssnelheid van de golf kleiner en de golfhoogte groter. De getijslag in de diepere delen van de Noordzee is dan ook vrijwel overal groter dan die in de Atlantische Oceaan, waar de getijslag gemiddeld circa 1 meter is. Als gevolg van enige bodemwrijving zal de getijgolf in de Noordzee ook een deel van zijn energie verliezen, waardoor de getijslag vervolgens weer wat afneemt. In het mondingsgebied van de Westerschelde is de afname van het getijfaseverschil door wrijving gering (Pieters, 2002). Er vindt namelijk hoofdzakelijk shoaling plaats.

Door shoaling en bodemwrijving wordt de getijgolf afgeremd. Omdat de golftop echter minder sterk wordt afgeremd dan het golfdal, krijgt het getij een asymmetrisch verloop. Doordat de vloedduur zich heeft verkort (top komt eerder aan dus snellere rijzing) en de ebduur zich heeft verlengd (langzamere daling) is het aan de Nederlandse kust langer eb dan vloed.

De Noordzee is groot genoeg voor een duidelijk merkbare invloed van de meteorologische condities op de getijgolf (Maas, 1980; Scheffers, 1981; De Ronde, 1985; Heinen en Hoogkamer, 1993; Koninklijke Marine | Dienst der Hydrografie, 2000). Een combinatie van elkaar versterkende astronomische en meteorologische condities leidt tot een extreme opzet van de waterspiegel, 'stormvloed' genoemd. De invloedrijke meteorologische condities zijn (een lage) luchtdruk, vooral op de oceaan, en wind op de Noordzee en in de Westerschelde.

5.2.1 Kenmerken van het Noordzeegetij in de monding van de Westerschelde (Vlissingen)

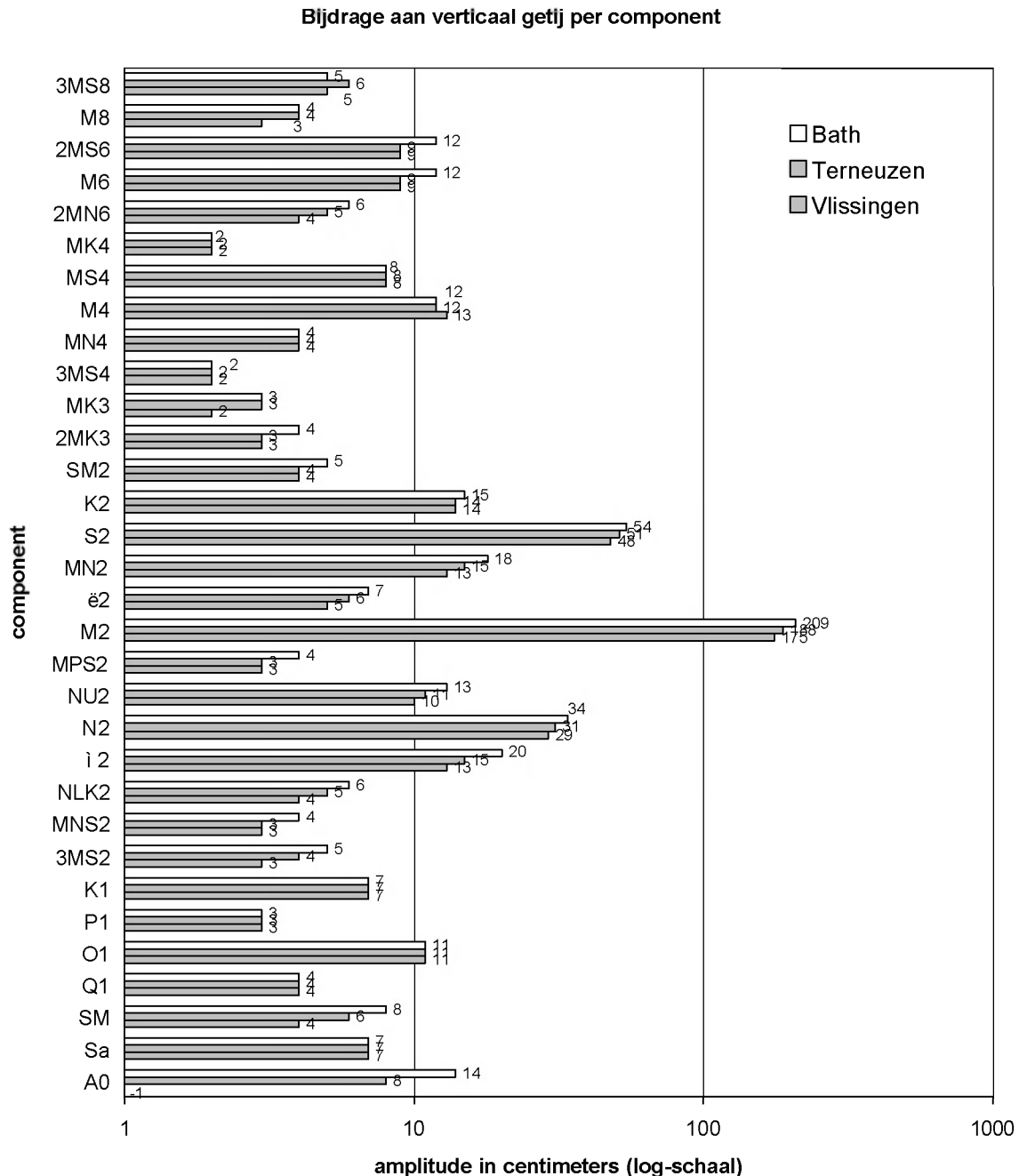
Langs de Nederlandse kust bestaan er verschillen in getijslag, looptijd, duur van eb en vloed en het tijdstip van hoog- en laagwater als gevolg van de vorm van de kust en de verschillen in afstand tot de amfidromische punten. Hierdoor is de getijslag bij Vlissingen gemiddeld 3,80 meter (figuur 5.4) en neemt in noordelijke richting af tot 1,40 meter bij Den Helder. Langs de Wadden neemt de getijslag weer toe. Zie voor de eigenschappen van het getij langs de



Nederlandse kust RIKZ (1994) en de jaarlijkse uitgaven 'Getijtafels voor Nederland' (RIKZ, 2001) en 'HP33-Waterstanden, stromen langs de Nederlandse kust en aangrenzend gebied' (Koninklijke Marine | Dienst der Hydrografie, 2000).

- **Figuur 5.4:** Gemiddeld verloop van de waterstand bij Vlissingen (bron: RIKZ, 2001).

De waterstand bij Vlissingen, vertoont een min of meer regelmatig verloop in de tijd (figuur 5.4). Het getij is dubbeldaags, omdat de hoofdcomponent van het Noordzeegetij het dubbeldaags maansgetij (M2) is (figuur 5.5). Ook het dubbeldaags zonsgetij (S2) heeft een relatief grote invloed op de karakteristieken van het getij bij Vlissingen. Voor een volledige karakterisering van het getij op een gegeven plaats en tijd en met een gewenste nauwkeurigheid zijn echter circa 100 getijcomponenten nodig (Gerritsen en Van den Boogaard, 1998).



- **Figuur 5.5:** Amplitudes van de 28 belangrijkste componenten van het getij bij Vlissingen (gegevens naar: RIKZ, 2001).

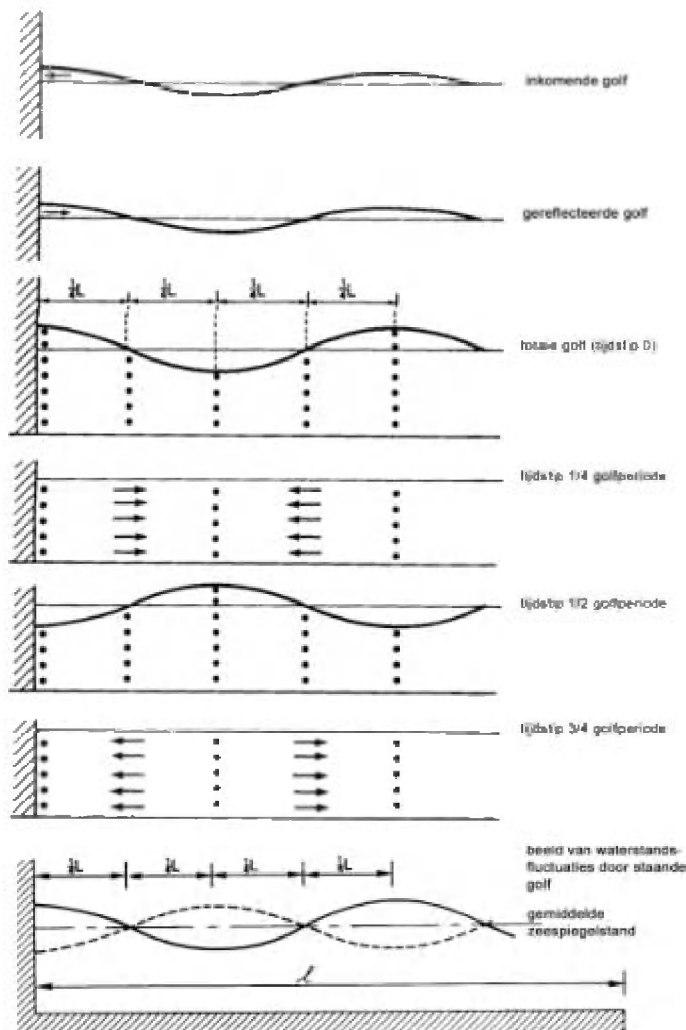
5.3 Verticaal getij in de Westerschelde

De getijgolf in het Schelde-estuarium is afkomstig uit de Noordzee. Het verticaal getij in het Schelde-estuarium is dubbeldaags als gevolg van het dubbeldaags maansgetij (M2) in de Noordzee. De grootte van het aandeel van het M2-getij in de waterstand blijkt uit figuur 5.5. Net zoals in de Noordzee heeft ook het dubbeldaags zonsgetij S2 een relatief grote invloed op het getijverloop (RIKZ, 2001). Het dubbeldaags verloop van het getij in de Westerschelde wordt versterkt door het N2-getij, zie ook figuur 5.5. Ondermeer Schönfeld (1951 en 1955), Van Rijn (1994), Battjes (1998 en 2001), Graas (2001) en Pieters (2002) gaan in op achtergronden van de voortplanting van getijgolven.

Door shoaling, reflectie en energieverlies door bodemwrijving wordt de getijgolf vervormd. Als de diepte van het estuarium in stroomopwaartse richting slechts zeer geleidelijk afneemt (een afname over een lengte die ongeveer gelijk is aan de getijgolfenlengte), treedt shoaling op (Lamb, 1932; Pieters, 2002). Hierbij gaat geen getijenergie verloren. Doordat de snelheid van de getijgolf en daarmee de getijgolfenlengte door het ondieper worden van het estuarium afneemt, zal de amplitude van de getijgolf toenemen.

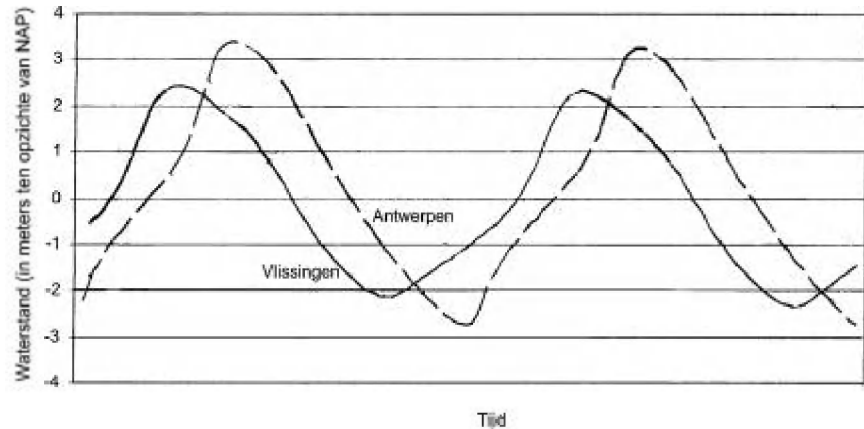
Reflectie is in de Westerschelde belangrijker dan wrijving. Reflectie in de Westerschelde treedt op tegen de randen van het estuarium en tegen de zandplaten (Van Enckevort, 1996) en bij andere profielveranderingen en op plaatsen waar de bodemweerstand verandert (Battjes,

1998). Als gevolg van de weerkaatsing ontstaan staande golven. Deze golven kunnen zich ontwikkelen als er twee lopende golven met dezelfde frequentie en dezelfde amplitude worden gesuperponeerd (Van Rijn, 1994), zie figuur 5.6. Als gevolg van de complexe geometrie van het Schelde-estuarium is er echter niet een eenduidig reflectiepunt aanwezig en wordt niet de gehele getijgolf gereflecteerd. De resulterende staande golf is dus niet zuiver. Er is dan ook geen sprake van een staande golf, maar van een samengestelde golf. Door de aanwezigheid van de samengestelde golven in de Westerschelde neemt de getijslag toe van gemiddeld 3,80 meter te Vlissingen tot maximaal gemiddeld 5,30 meter te Rupelmonde. Figuur 5.7 geeft een beeld van het verloop van de getijgolf.



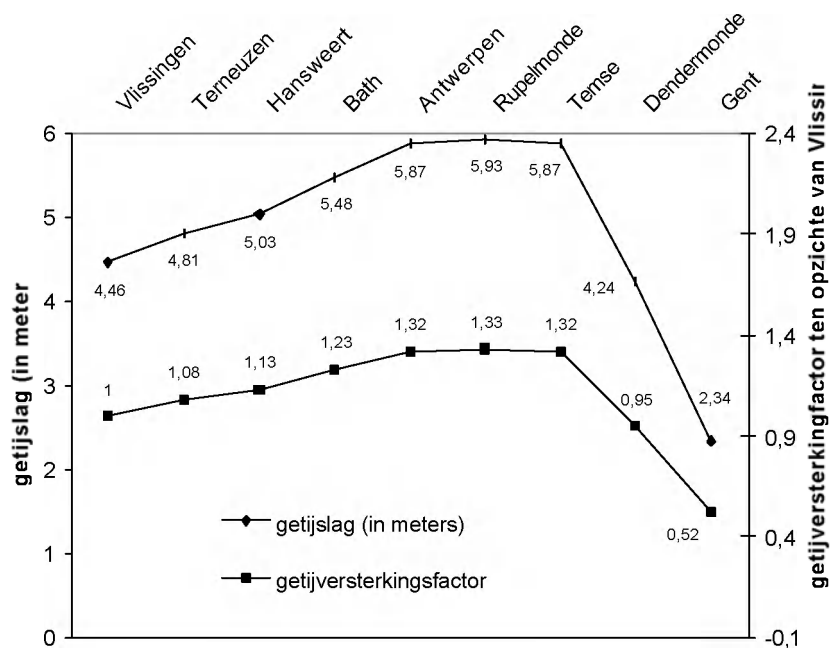
• **Figuur 5.6:** Staande golf (naar: Van Rijn, 1994).

- **Figuur 5.7:**
Waterstandsverloop
in het Schelde-
estuarium:
getijkromme van
Vlissingen en
Antwerpen. De
situatie is van 23
juni 2001 (naar:
Graas, 2001).



Doordat de geometrie van de Westerschelde nogal complex is, verschilt de getijgolf ter hoogte van de diverse stations in getijopbouw (Dronkers, 1964). Vooral de sterke vernauwing van het dwarsprofiel van het estuarium bij Bath, waar het meergeulensysteem overgaat in een enkelgeulensysteem (figuur 3.1), zorgt voor veel reflectie. Behalve smaller wordt de Westerschelde hier ook veel ondieper en reflecteert de getijgolf zowel tegen de randen van het estuarium als tegen de ondieptes in de geul.

Omdat de hoogwaterstanden toenemen en de laagwaterstanden afnemen, resulteert dit in een getijslag, die toeneemt in landwaartse richting. De stroomopwaartse toename van de getijslag kan worden uitgedrukt in een 'getijversterkingsfactor'. Dit is de verhouding tussen de lokale getijslag en die in Vlissingen (Claessens en Meyvis, 1994; Pieters en Verspuy, 1997), zie figuur 5.8. Bovenstrooms van Antwerpen vindt nauwelijks meer reflectie plaats, doordat de oevers van de Zeeschelde vrijwel parallel aan elkaar liggen. In de Zeeschelde neemt de getijslag door wrijving snel af tot circa 2,00 meter bij Gent, het zogenoemde 'vloedkuileffect' (Van Veen, 1944). Toch vindt ook hier op een aantal plaatsen veel reflectie plaats, zoals bij Rupelmonde, waar een versmalling is.

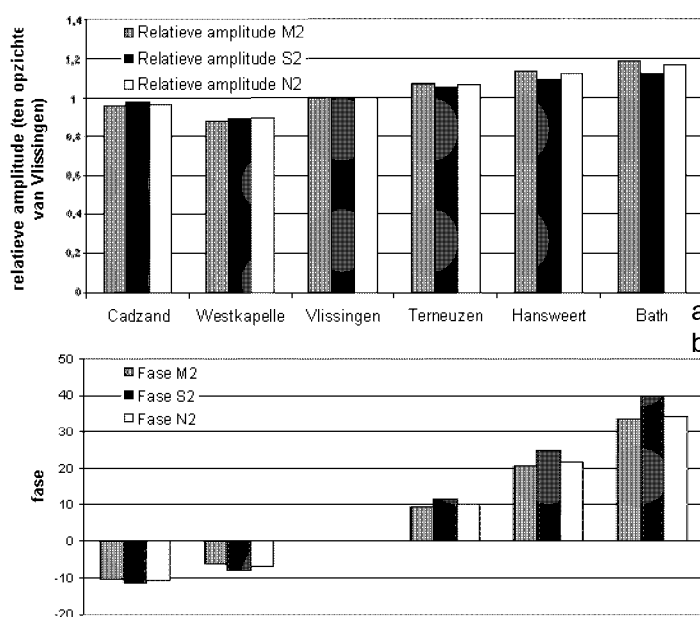


- **Figuur 5.8:**
Verloop in het
Schelde-estuarium
van de getijslag en
verhouding tussen
de getijslag ter
plaats en die in
Vlissingen voor een
aantal plaatsen bij
springtij (gegevens
van: Pieters en
Verspuy, 1997). De
waarden van de
getijversterkings-
factor zijn
overgenomen uit
Claessens en
Meyvis (1994).

Onder invloed van de bodemwrijving krijgt de getijgolf in de Westerschelde het karakter van een uitdempende lopende golf, waarbij de getijslag afneemt. De getijvoortplanting in de Westerschelde kan worden beschreven aan de hand van het amplitude- en fasegedrag van de afzonderlijke getijcomponenten (Gerritsen en Van den Boogaard, 1998), zie figuur 5.9 en ook figuur 5.5. Hieruit blijkt bijvoorbeeld, dat landinwaarts het M2-getij voor de waterstand dominanter wordt.

De getijgolf loopt tot Gent en Dendermonde, waar deze gestopt wordt door de aanwezige stuwen. In de diepe geulen van de Westerschelde ondervindt de getijgolf relatief weinig bodemwrijving. In de ondiepere delen van de geulen en op de platen ondervindt de getijgolf wel veel wrijving. Door shoaling en het energieverlies van de golfrog aan de bodem wordt de al asymmetrische getijgolf verder vervormd, waardoor de vloedduur vergeleken met die op de Noordzee nog sterker afneemt ten gunste van de ebduur (Van Rijn, 1994).

Stroomopwaarts van Bath neemt de voortplantingssnelheid voor het laagwater sterker toe dan dat voor het hoogwater. Van Vlissingen naar Antwerpen gaand, neemt de vloedduur namelijk af van 5 uur 55 minuten tot 5 uur en 20 minuten. Dit wordt veroorzaakt door de geringe waterdiepte van het estuarium. De golftop kan sneller lopen door de grotere waterdiepte dan het laagwater en loopt daardoor in op het golfdal. Overigens is er een temporele variatie in de getij-asymmetrie in de springtij-doodtij cyclus. De asymmetrie is groter in de periode van spring- tot doodtij dan in de periode van dood- tot springtij (Boon, 1988).



- **Figuur 5.9:** Ruimtelijke veranderingen van de drie hoofdcomponenten (M2, S2 en N2) ten opzichte van Vlissingen, gaande van west naar oost in de Westerschelde. **a:** Veranderingen in amplitudes. **b:** Veranderingen in fase. De gegevens zijn uit 1997 (gegevens naar: Gerritsen en Van den Boogaard, 1998).

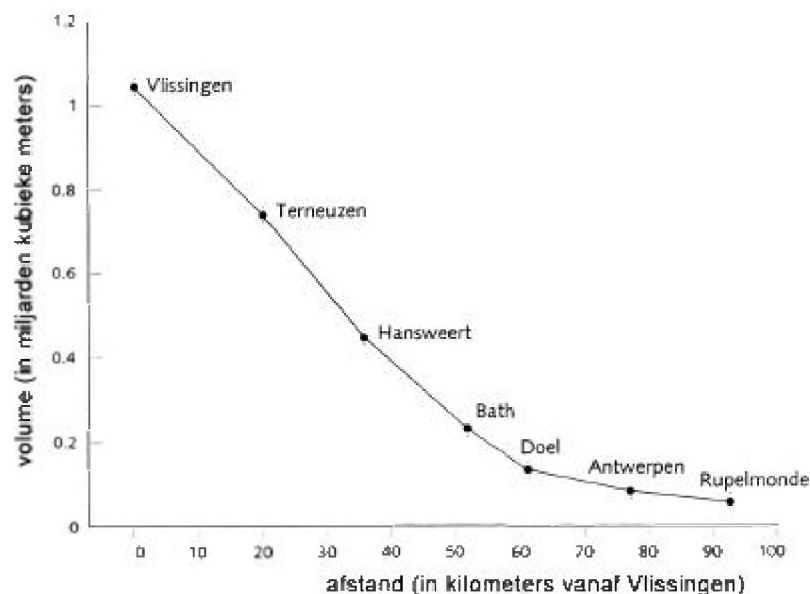
5.4 Horizontaal getij in de Westerschelde

De waterstandveranderingen door het getij op de rand van Noordzee en het Schelde-estuarium veroorzaken dat bij vloed het Schelde-estuarium wordt gevuld en bij eb weer leeg stroomt. Het verticale getij op de Noordzee vormt zo de motor van het horizontale getij. Belangrijke grootheden waarmee het horizontale getij in de Westerschelde kan worden beschreven, zijn eb- en vloedvolumes, getijvolumes, eb- en vloeddebieten en stroomrichtingen en -snelheden. Het plaatselijke vloedvolume is het totale watervolume, dat in een vloedperiode per doorsnede passeert. Het vloedvolume kan dus op meer plaatsen gemeten worden dan alleen aan het uiteinde van een estuarium. Het getijvolume is het totale volume water dat een doorsnede in een getijcyclus passeert, ongeacht de richting waarin dat gebeurt. De totale

hoeveelheid water die in (een deel van) het Schelde-estuarium tussen laag- en hoogwater kan worden geborgen, wordt aangeduid als 'komberging'. Komberging vindt niet alleen in de geulen plaats maar ook in de kombergingsgebieden boven de platen en slikken. Gedurende een getijslag stroomt meer dan een miljard kubieke meter water het estuarium in (vloedvolume) en daarna weer uit.

De komberging varieert langs het estuarium wat ook gevolgen heeft voor de horizontale waterbeweging. Het volume water dat tijdens vloed naar binnen gestroomd is, wordt vooral geborgen in de Westerschelde; slechts 15% stroomt door tot in de bovenstroomse Zeeschelde (Mol *et al.*, 1997). Van west naar oost gaande neemt het vloedvolume af, zie figuur 5.10. Bedraagt het bij Hansweert nog ruim 400 miljoen kubieke meter, bij Bath is dat nog maar 200 miljoen kubieke meter en bij Antwerpen slechts 100 miljoen kubieke meter (Pieters *et al.*, 1991). In de Zeeschelde is de afname een stuk geleidelijker omdat de breedte van het estuarium hier nauwelijks meer afneemt.

- **Figuur 5.10:** Afname van het vloedvolume in het Schelde-estuarium van de monding bij Vlissingen (links in de grafiek) tot Rupelmonde in België (rechts in de grafiek) (bron: Mol *et al.*, 1997).



Het water dat het estuarium instroomt, beweegt zich echter niet gelijkmatig over de gehele breedte het estuarium in, maar concentreert zich in geulen. In het oostelijke deel van de Westerschelde nemen de kombergingsgebieden ten opzichte van de geulen relatief veel ruimte in. In het westelijke deel zijn echter de geulen breder. Het stromingspatroon van de vloed is niet precies omgekeerd aan dat van de eb. Het water concentreert zich namelijk bij vloed en eb enigszins in verschillende geulen. Geulen waar meer water bij eb dan bij vloed doorheen stroomt, worden ebgeulen genoemd. Dit zijn de diepste geulen in het estuarium. Voorbeelden zijn de Honte, de Pas van Terneuzen en het Zuidergat. Geulen die vooral tijdens vloed gebruikt worden, zijn vloedgeulen, ook wel 'vloedscharen' genoemd. Voorbeelden van vloedgeulen zijn de Schaar van Spijkerplaat, de Schaar van Waarde, en de Schaar van Ossenis (figuur 3.1). In figuur 5.11 wordt dit patroon van dominante stromingsrichtingen van de geulen in de Westerschelde weergegeven.

- **Figuur 5.11:** Ligging van de hoofdstroming in de geulen in de Westerschelde en de dominante stromingsrichting (bron: Van den Berg *et al.*, 1996).



Het verloop van het eb- en vloeddebiet verandert per getijcyclus door shoaling, bodemwrijving en rivierafvoer. Bij een gemiddeld getij bedragen de maximale eb- en vloeddebieten bij Vlissingen respectievelijk circa 78.000 en 96.000 kubieke meter per seconde (De Jong, 1989). Bij de Nederlands-Belgische grens is dat circa 11.000 en 14.000 kubieke meter per seconde en bij Antwerpen circa 5000 en 6000 kubieke meter per seconde.

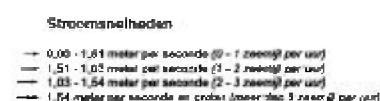
De ruimtelijke en temporele variaties in debieten leiden tot variaties in de stroomsnelheden (Steijn en Adema, 2000). Met 'stroomsnelheid' wordt hier de snelheid waarmee waterdeeltjes zich verplaatsen bedoeld, dus niet de voortplantingsnelheid van het getij in het Schelde-estuarium. In figuur 5.12 zijn de stroomrichtingen en -snelheden (in de bovenste waterlaag) van zes situaties gegeven gedurende een getijcyclus bij gemiddeld doottij en bij gemiddeld springtij. Het laat een verschil zien in voorkeur van het gebruik van de verschillende geulen bij eb en vloed. De maximale stroomsnelheden in het estuarium variëren tussen circa 1 en 2 meter per seconde in beide richtingen (het estuarium in en uit).

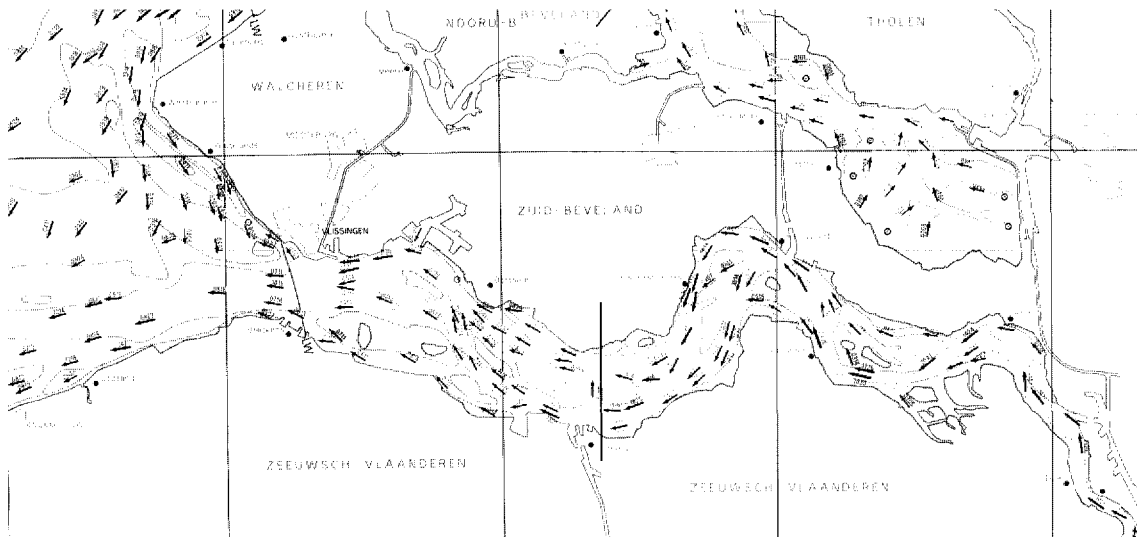
Door de getij-asymmetrie is de maximale snelheid van de vloedstroom vrijwel altijd hoger dan van de ebstroom in zowel de vloedscharen als de ebgeulen. De hoogste snelheden bij vloed worden circa een uur voor het hoogwater waargenomen (Koninklijke Marine | Dienst der Hydrografie, 2000). De kentering, als de stroomrichting omkeert en de snelheden nul zijn, valt gemiddeld circa een uur na hoog- of laagwater. Het horizontale en verticale getij lopen dus uit fase met elkaar (Pieters en Verspuy, 1997). Het verschil in eb- en vloed-snelheden is van groot belang voor het sedimenttransport en daarmee de snelheid van morfologische veranderingen, omdat het sediment transport niet-lineair, maar met een hogere macht van de stroomsnelheid toeneemt.

Van groot belang voor het stroombeeld zijn ook de korte termijn effecten van versnellingen of vertragingen van de stroom, zie figuur 5.12. Bij vloed wordt water in een steeds nauwer wordend zeegat gezogen, terwijl bij eb het water vanuit de relatief nauwe hals van het zeegat in een zich verbredend buitengebied wordt gespoten. De vloedstroom in open zee voor de Westerschelde wordt pas na het hoogwater maximaal door het faseverschil in het verticale getij binnen- en buitengaats. Hierdoor vindt er grotendeels ongestoorde in- en uitstroming plaats (Van den Berg, 1987). Het uitstromende water heeft voldoende snelheid om niet weg te worden gedrukt door stromingen buitengaats. Dit in tegenstelling tot de buitendelta's in de Waddenzee, in Noord Nederland.

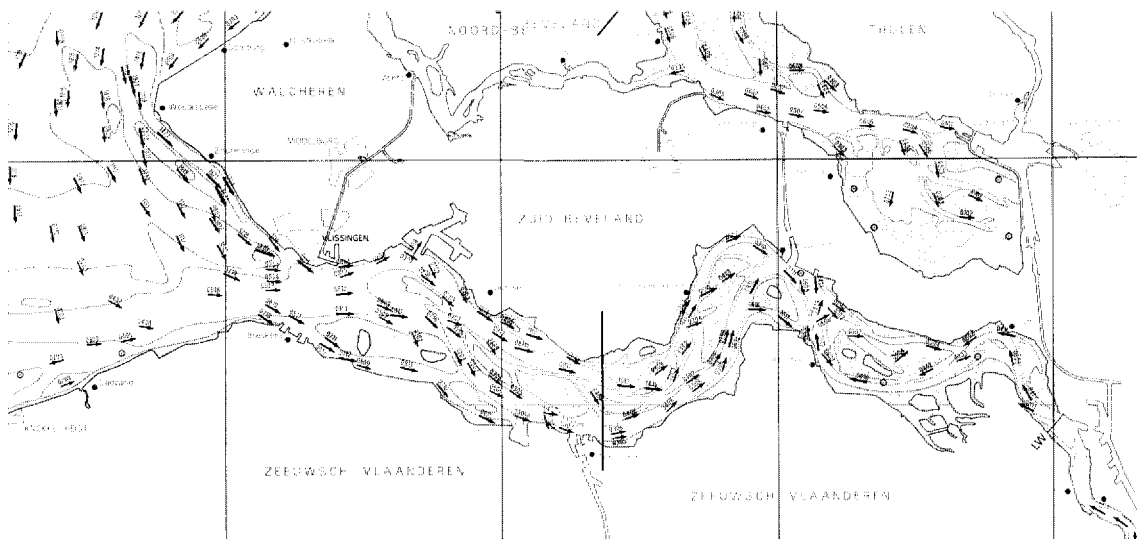
- **Figuur 5.12 (volgende bladzijden):** Veranderingen in stroomrichtingen en snelheden in de bovenste waterlagen in de Westerschelde gedurende een getijcyclus. Het midden van de pijlen is de plaats van de meting (bron: Koninklijke Marine | Dienst der Hydrografie, 2000).

Legenda:

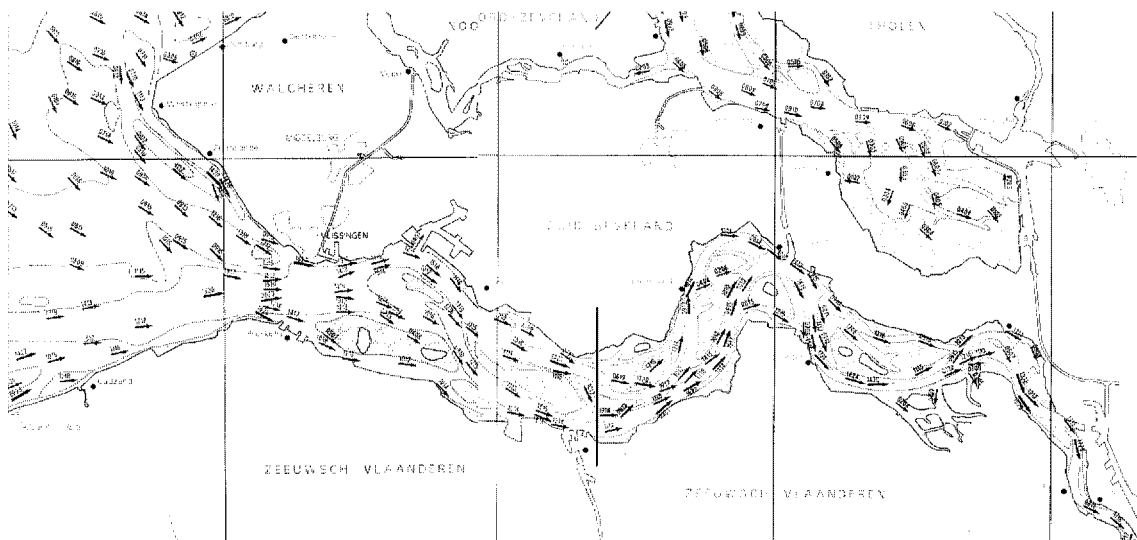




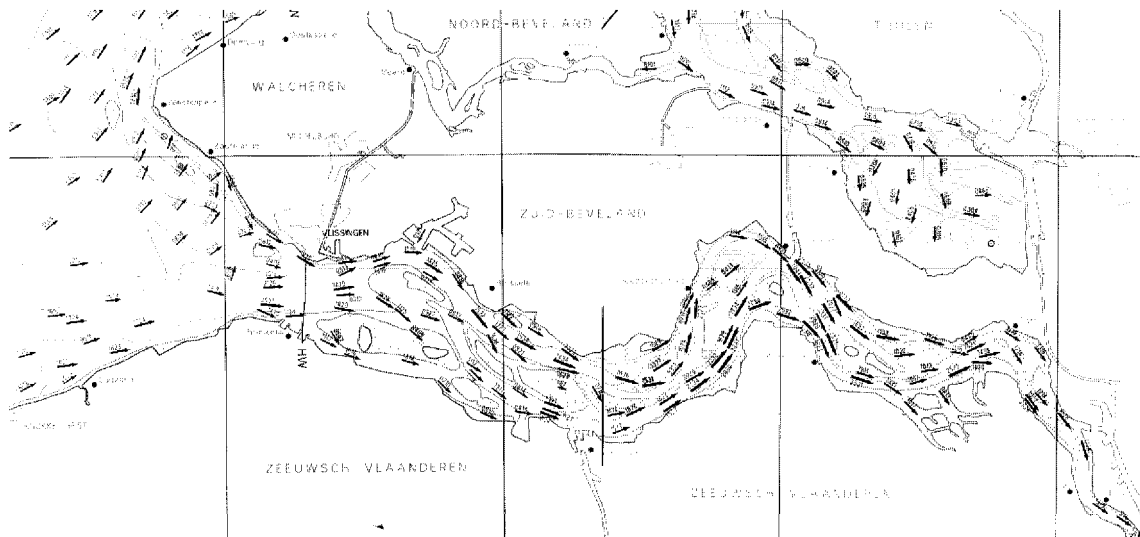
Situatie van 6 uur voor hoogwater. Bij Vlissingen ligt de grens tussen rijzend water (ten westen van Vlissingen) en vallend water (ten oosten van Vlissingen).



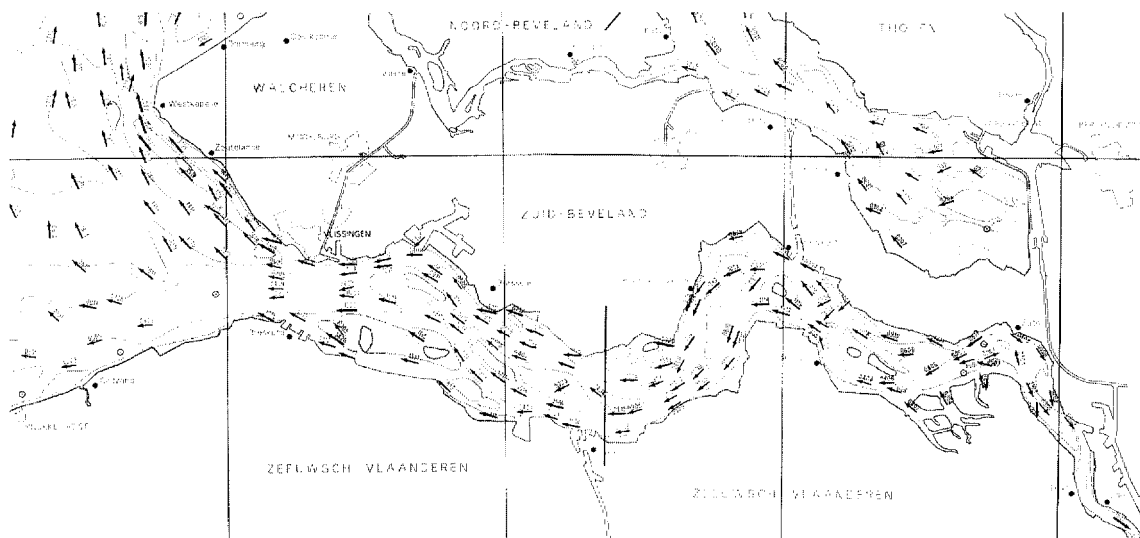
Situatie van 4 uur voor hoogwater. Overal in de Westerschelde is er sprake van rijzend water. De grens tussen rijzend en vallend water ligt namelijk nabij de Nederlands-Belgische grens. Ten westen van Hansweert is de stroming landwaarts gericht.



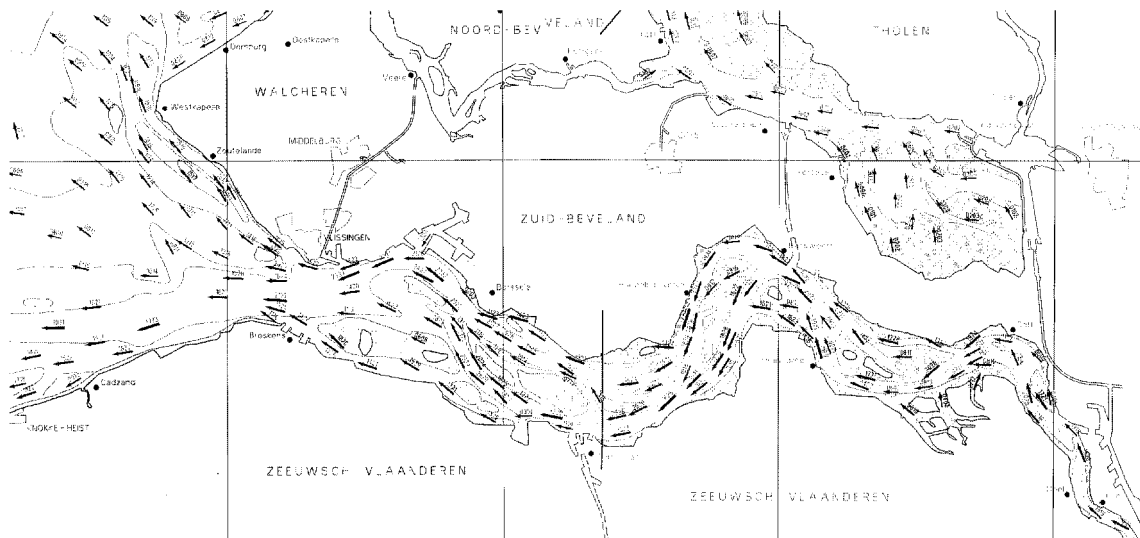
Situatie van 2 uur voor hoogwater.



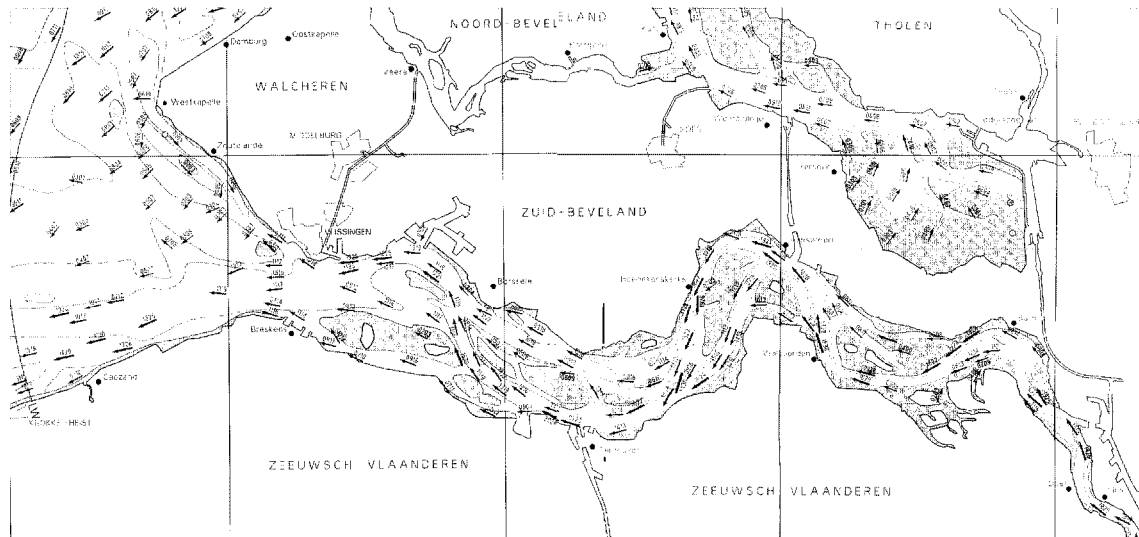
Situatie tijdens hoogwater. Bij Vlissingen ligt de grens tussen vallend en rijzend water (ten westen van Vlissingen) en rijzend water (ten oosten van Vlissingen).



Situatie van 2 uur na hoogwater. Overall in de Westerschelde is er sprake van vallen water. Ten westen van Bath is de stroming zeewaarts gericht.



Situatie van 4 uur na hoogwater.



Situatie van 6 uur na hoogwater. Bij Knokke-Heist (België) ligt de grens tussen rijzend water (ten westen van Knokke-Heist) en vallend water (ten oosten van Knokke-Heist). Deze situatie is die van circa 20 minuten voor de situatie van 6 uur voor hoogwater.

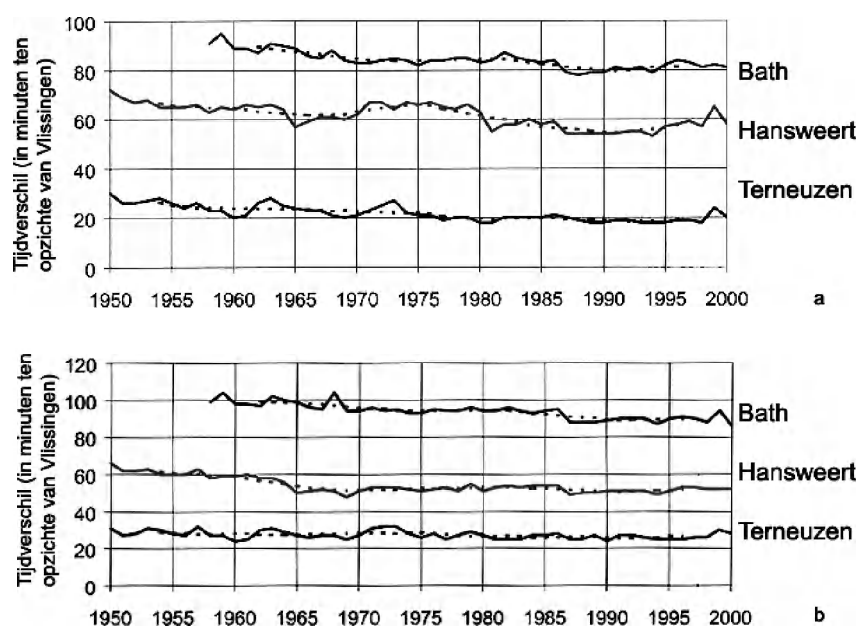
6 Veranderingen in de tijd in het getij in de Westerschelde

6.1 Soorten getijveranderingen in de Westerschelde in de tijd

Onder veranderingen in de tijd worden hier niet-cyclische veranderingen verstaan, die niet door het getij zelf worden veroorzaakt. In de tijd zijn zowel de getijvoortplanting als het verticale en het horizontale getij veranderd. Hierover zijn meetgegevens aanwezig vanaf het midden van de 19^e eeuw. De waterbeweging vanaf ongeveer 1650 is met behulp van historische data gereconstrueerd (Van den Berg *et al.*, 1996; Van der Spek, 1997). Voor inzicht in de wijze waarop het huidige Westerschelde-systeem op veranderingen zal reageren, zijn de ontwikkelingen van na 1950 het meest relevant, zie hiervoor Werkgroep Westerscheldecommissie (1984), Van Cauwenberghe (1993), Mol *et al.* (1997), Witteveen+Bos (1999), Dauwe (2001), Liek (2001) en Pieters (2002).

6.2 Veranderingen in de getijvoortplanting in de tijd

Vergeleken met de situatie in de 16^e eeuw is de mate waarin het getij het Schelde-estuarium kan binnendringen en de getijvoortplantingssnelheid toegenomen (Van den Berg *et al.*, 1996; Van der Spek, 1997). In de 16^e eeuw legde een getijgolf de afstand Vlissingen-Antwerpen in circa 4,5 uur af (Coen, 1988). Tegenwoordig gebeurt dat in slechts twee uur (Van den Berg *et al.*, 1996). De recente toename van de getijvoortplantingssnelheid is niet constant, zie figuur 6.1, en verschilt per locatie.



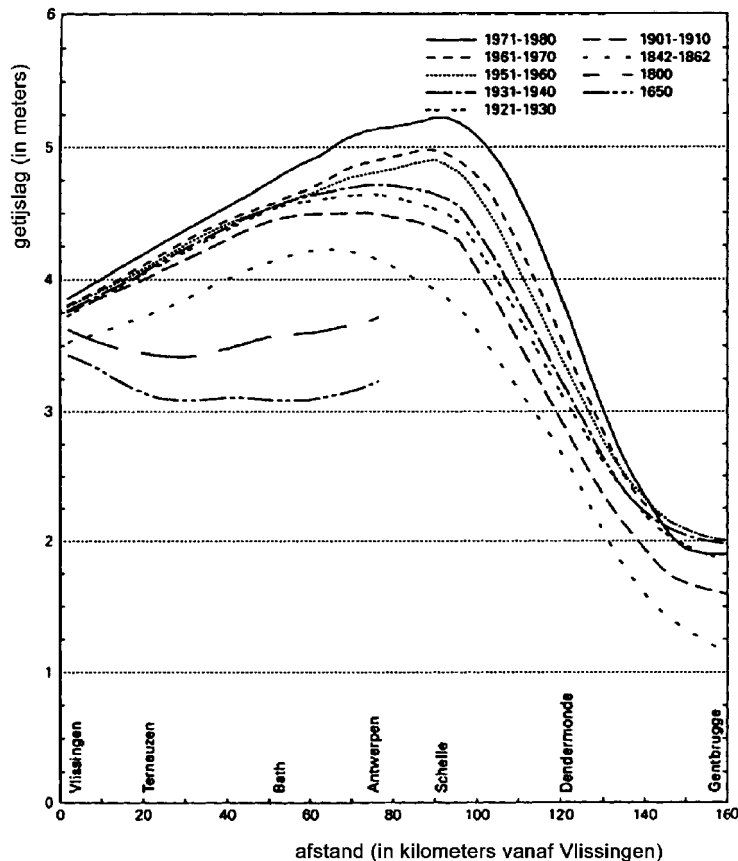
• **Figuur 6.1:**
Veranderingen in het tijdsverschil tussen het optreden van hoog- en laagwaters te Bath, Hansweert en Terneuzen ten opzichte van het tijdstip waarop de hoog- en laagwaters te Vlissingen optreden. a: Tijdsverschillen bij het optreden van hoogwaters. b: Tijdsverschillen bij het optreden van laagwaters.

6.3 Veranderingen in het verticale getij in de tijd

6.3.1 Veranderingen in de waterstanden op de lange termijn

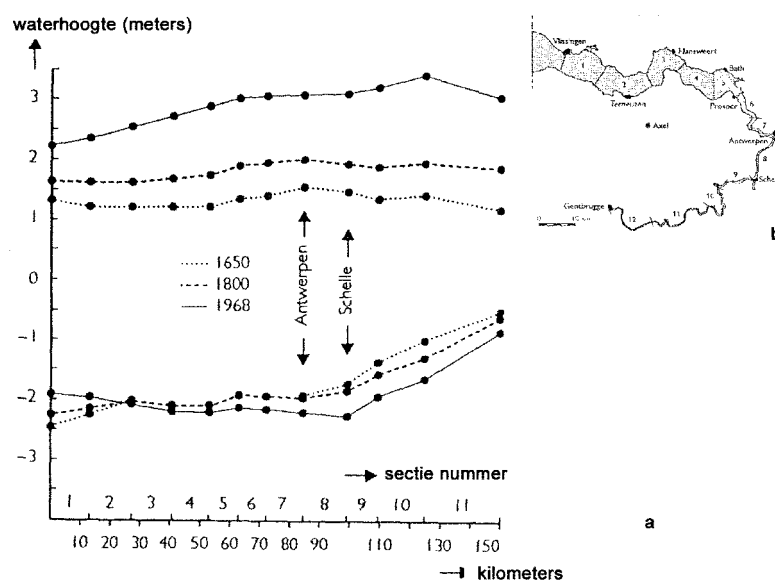
Omstreeks 1650 was de getijslag bij Vlissingen gemiddeld circa 3,43 meter (Van der Spek, 1997). In 1800 was dit toegenomen tot gemiddeld 3,58 meter en in 1968 tot gemiddeld 3,80 meter (figuur 6.2). Figuur 6.2 laat zien dat in de hele Westerschelde de getijslag is toegenomen. Uit figuur 6.3 blijkt ook dat de toename van de getijslag sinds 1650 groter was in het gebied in het midden en oosten van de Westerschelde en kleiner in het mondingsgebied

van de Westerschelde (Van den Berg *et al.*, 1996). De wijze waarop de getijslagtoename tot stand kwam verschilt ruimtelijk gezien (figuur 6.3). In het centrale en oostelijke deel van de Westerschelde is er sprake van een toename van de getijslag door zowel een toename van de hoogwaters als een in vergelijking met de grootte van de toename kleinere afname van de laagwaters. In het westelijk deel is de getijslagtoename alleen te danken aan het toenemen van de hoogwaterstanden. Daar nemen de laagwaterstanden juist toe en werken de getijslagtoename tegen.



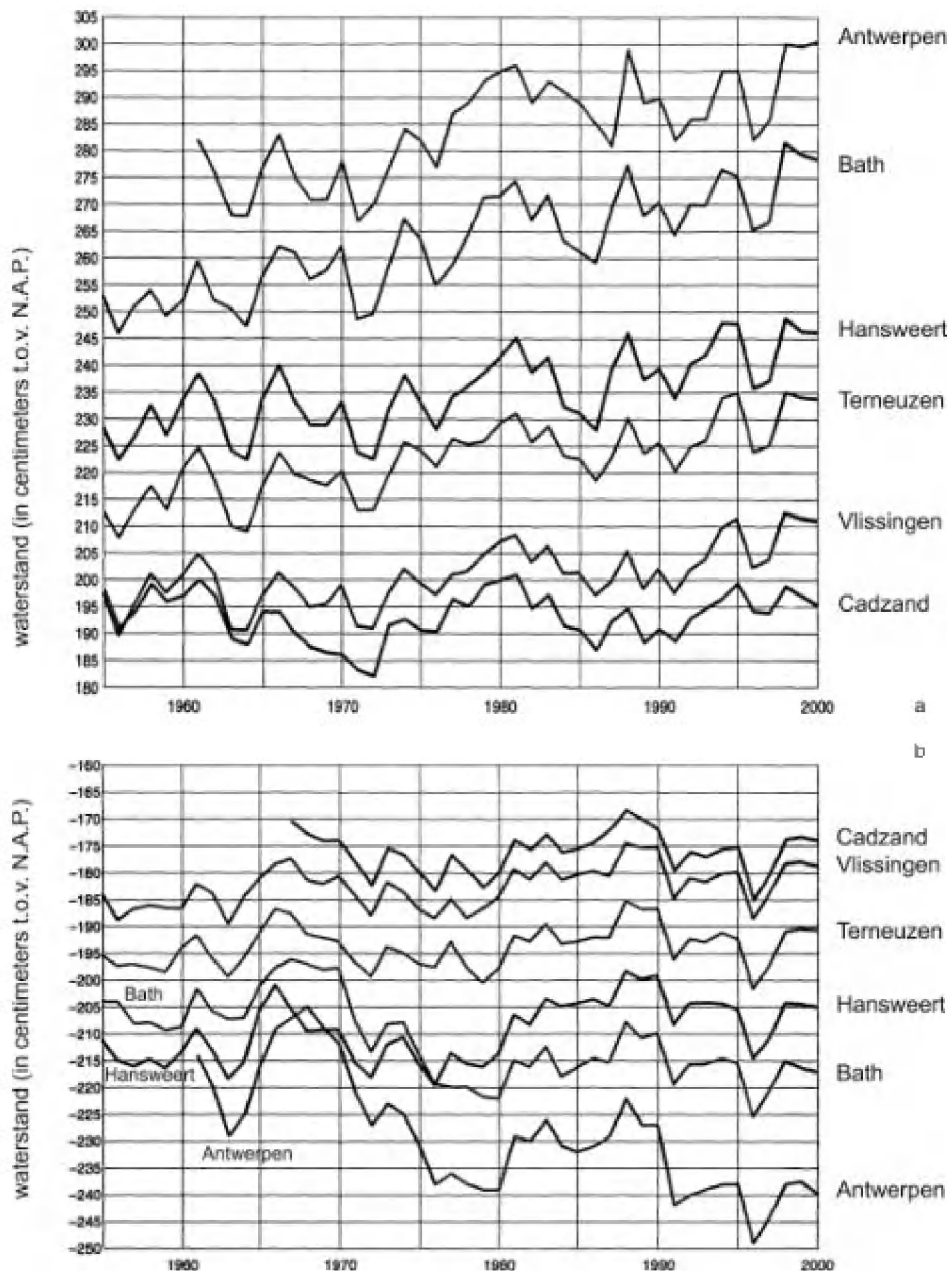
- **Figuur 6.2:** Verandering van de amplitude van de getijgolf in de Westerschelde vanaf 1650. De getekende lijnen van 1650 en 1800 zijn schattingen of basis van modelonderzoek. De overige lijnen zijn gebaseerd op metingen. Het zijn gemiddelden van perioden van steeds tien jaar (bron: Van den Berg *et al.*, 1996).

- **Figuur 6.3:** Lange termijn veranderingen in het verticale getij. **a:** Berekende hoog- en laagwaterstanden in het Schelde-estuarium voor de jaren 1650, 1800 en 1968, van west naar oost gaande. De waterstand is ten opzichte van NAP. De waarden van sectie 12 (zie b) zijn weggelaten vanwege onnauwkeurige modeluitkomsten. **b:** Ligging van de secties (bron: Van der Spek, 1997).



6.3.2 Meer recente veranderingen in de waterstanden

Tussen 1890 en 1970 vertonen zowel de hoog- als laagwaterstanden in de Westerschelde een min of meer gelijkmatig stijgende trend (Pieters, 2002). De toename van de hoogwaterstanden was toen groter dan die van de laagwaterstanden. Vooral tussen 1970 en 1990 treden de sterkste en meest opmerkelijke veranderingen op in de waterstanden (Pieters, 2002). De veranderingen in het laagwaterpeil waren vanaf minstens 1970 zowel ruimtelijk als temporeel variabeler dan de veranderingen van de hoogte van de hoogwaters. Figuur 6.4 laat de ontwikkelingen van de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden tussen 1955 en 2000 zien. Een deel van de fluctuaties door de jaren heen wordt veroorzaakt door het astronomische getij, met name de 18,61-jaren-cyclus (Witteveen+Bos, 1999).

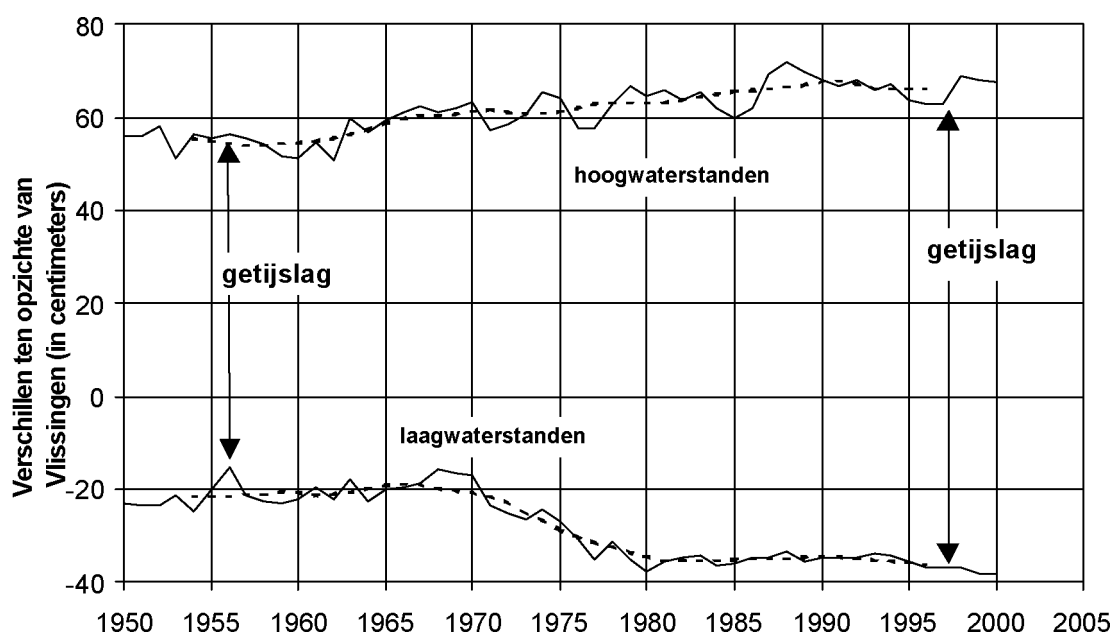


- **Figuur 6.4:** Veranderingen in de jaargemiddelde hoog- en laagwaterstanden bij enkele stations langs de Westerschelde tussen 1955 en 2000. **a:** Hoogwater. **b:** Laagwater (naar: Dekker, 2001).

Na 1955 was de toename in de hoogwaters in de Westerschelde gemiddeld zo'n 5 tot 15 centimeter, alleen in Bath en Antwerpen was deze toename groter. Alleen al in de periode 1970-1980 is het hoogwater in Bath gemiddeld circa 10 centimeter en in Antwerpen circa 15 centimeter hoger geworden. Ook tegenwoordig lijkt er bij Bath en Antwerpen opnieuw sprake te zijn van een extra verhoging van het hoogwater.

Sinds 1955 is de hoogte van het laagwater met zo'n 5 centimeter gestegen bij Vlissingen, Terneuzen en Hansweert. Bij Bath en Antwerpen was er in de perioden 1950-1970 en 1980-1990 sprake van een nagenoeg stabiel laagwater, maar in de periode 1970-1980 werd het laagwater in Bath en Antwerpen respectievelijk 10 en 15 centimeter lager. In Bath lijkt wederom sinds 1997 een verlaging van de laagwaters op te treden.

Met de ontwikkelingen in de hoog- en laagwaterstanden veranderde de getijslag, maar deze verandering is verschillend voor het oostelijke deel enerzijds en het centrale en westelijke deel van de Westerschelde anderzijds. In de jaren zestig en zeventig treedt in het oostelijke deel van de Westerschelde, en dan met name in het meest oostelijke deel stroomopwaarts van Bath, de sterkste toename van de getijslag in de 20^e eeuw op (Pieters, 2002). Figuur 6.5 toont de trend vanaf 1950 in de verschillen ten opzichte van Vlissingen van de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden en getijslag in het oostelijke deel van de Westerschelde.

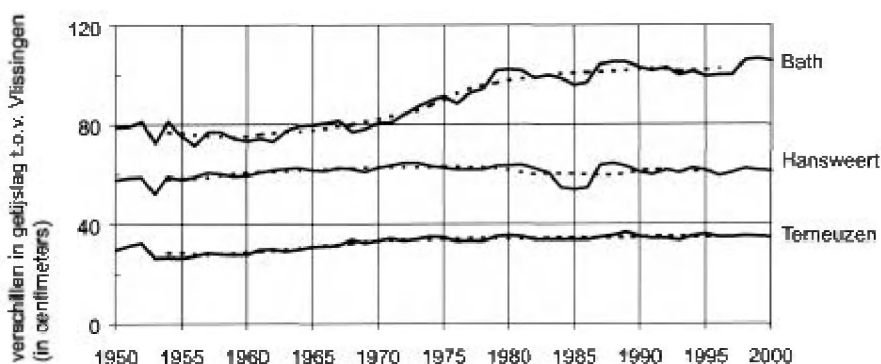


- **Figuur 6.5:** Gemiddelde trend in het verschil tussen de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden in het oostelijke deel van de Westerschelde en de hoog- en laagwaterstanden bij Vlissingen. Op basis van die trend, wordt ook de trend van de gemiddelde getijslag in het oostelijke deel ten opzichte van Vlissingen duidelijk. De gestippelde lijnen laten de over 9 jaar gemiddelde trend zien.

In het oostelijke deel was de vergroting van de getijslag ten opzichte van Vlissingen door de toename van de hoogwaterstanden geleidelijker dan door een afname van de laagwaterstanden (figuur 6.5). De bijdrage van de veranderingen in de laagwaterstanden aan de veranderingen in de getijslag wijzigde hier duidelijk begin jaren zeventig. De getijslagtoename in de jaren vijftig en zestig in het oostelijke deel kan vooral worden toegeschreven aan een stijging van de hoogwaterstanden, maar vanaf de jaren zeventig heeft ook de afname in de

laagwaterstanden hieraan veel bijgedragen. De toename van de getijslag was in de periode 1970-1980 in Bath en Antwerpen circa 20 tot 30 centimeter. Na circa 1980 vlakke de toename van de getijslag hier af (figuur 6.6), waarna deze sinds 1997 weer groter wordt (Dauwe 2001; Liek, 2001).

Dat er duidelijke ruimtelijke verschillen in getijslagtoename zijn, laat figuur 6.6 zien, waar de trends in de getijslag ten opzichte van Vlissingen in het westelijke (Terneuzen), centrale (Hansweert) en oostelijke deel (Bath) zijn weergegeven. De getijslagtoename in het centrale en westelijke deel van de Westerschelde is veel gelijkmatiger dan in het oostelijke deel. In het westelijke deel is de getijslag vanaf de jaren zeventig min of meer constant. Dit geldt ook voor het centrale deel, wel was er in de jaren tachtig bij Terneuzen een beperkte en kortdurende af- en toename in de getijslag.

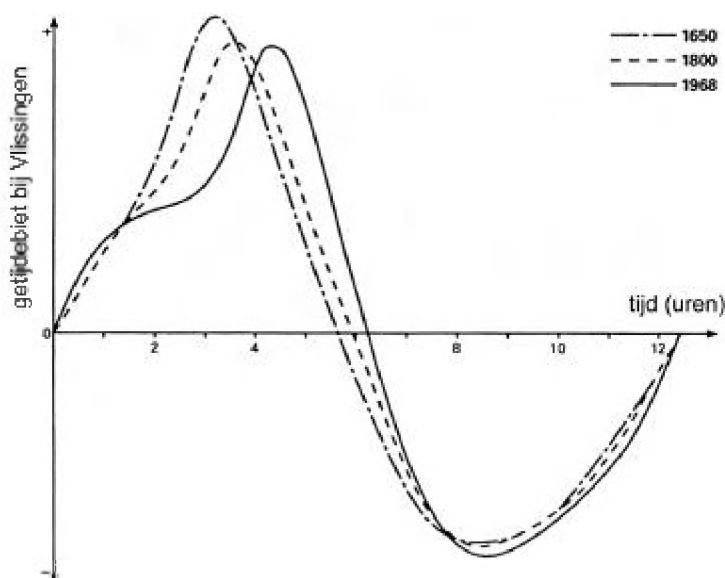


• **Figuur 6.6:** Trends in de getijslag ten opzichte van Vlissingen bij Terneuzen, Hansweert en Bath (naar: Liek, 2001).

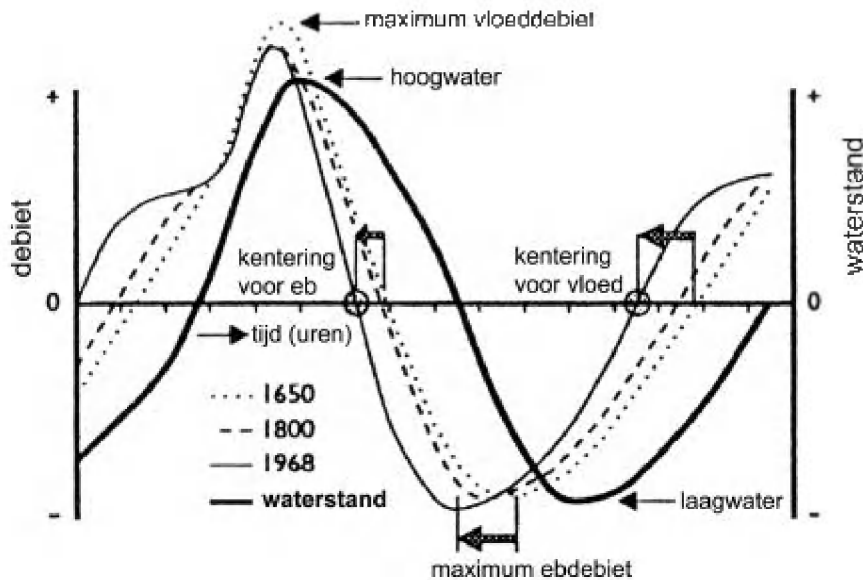
6.4 Veranderingen in het horizontale getij in de tijd

In de loop van de tijd is het verloop van het (momentane) debiet steeds minder asymmetrisch geworden (Van den Berg *et al.*, 1996; Van der Spek, 1997). Het oppervlak van de kombergingsbieden nam af sinds de 17e eeuw (Van der Spek, 1997). Daardoor nam de ebduur af ten opzichte van de door Van der Spek (1997) gereconstrueerde situatie van 1650 (Van den Berg *et al.*, 1996), zie figuur 6.7. In 1650 waren de maximale (momentane) vloeddebieten dan ook aanzienlijk hoger dan nu. Het netto resultaat is een verlenging van de vloedduur en een verkorting van de ebduur van 36 minuten. Hierdoor is tegenwoordig de eb- en de vloedduur bij Vlissingen min of meer gelijk. Figuur 6.8 toont dat de kentering vanaf 1650 eerder na hoog- of laagwater optreedt.

Ook het maximale vloeddebiet treedt vanaf 1650 eerder op na hoogwater en bij een hogere waterstand. Het moment waarop het vloeddebiet maximaal is, is echter gelijk gebleven.



• **Figuur 6.7:** Berekende debietkrommen voor Vlissingen voor de jaren 1650, 1800 en 1968 (naar: Van den Berg *et al.*, 1996).



- **Figuur 6.8:** Berekende debietkrommen voor Vlissingen voor de jaren 1650, 1800 en 1968 in relatie tot waterstandveranderingen door het verticale getij. De debieten en waterstanden zijn ten opzichte van elkaar niet in de juiste proporties weergegeven. (naar: Van der Spek, 1997).

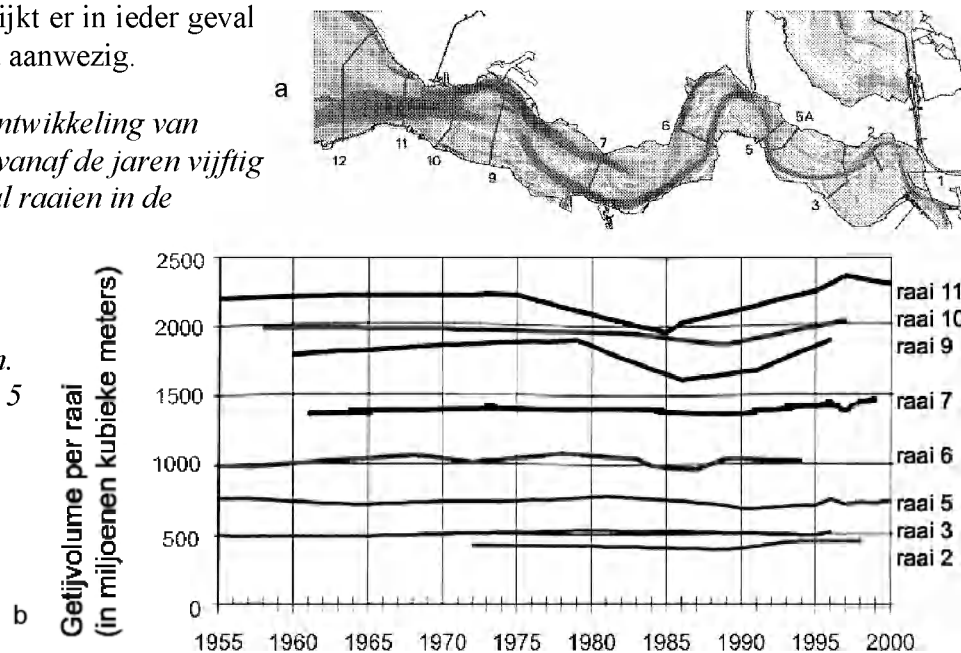
Meer recente trends in het horizontale getij zijn te ontdekken in de debietmetingen, die vanaf de jaren vijftig in tien raaien in de Westerschelde worden gedaan. Aan de hand van deze debietmetingen is de ontwikkeling van de getijvolumina bepaald (figuur 6.9). Hieruit blijkt, dat er in het oostelijke deel (raai 2, 3 en 5 (later 5a genoemd)) en in het centrale deel (raai 6) vanaf 1955 slechts weinig veranderingen in de getijvolumina zijn geweest. In het westelijk deel (raai 9, 10 en 11) zijn er daarentegen in de jaren tachtig wel schommelingen te zien. Vanaf circa 1985 lijkt er in ieder geval een stijgende trend aanwezig.

- **Figuur 6.9:** Ontwikkeling van getijvolumina vanaf de jaren vijftig voor een aantal raaien in de

Westerschelde.

a: Ligging van raaien voor de debietmetingen.

In 1990 is raai 5 verlegd en hernoemd tot 5a. **b:** Grafiek.



7 Oorzaken van veranderingen in het getij in de Westerschelde

7.1 Soorten oorzaken van getijveranderingen

De niet-cyclische veranderingen in de getijvoortplanting en het verticale en horizontale getij hebben deels natuurlijke en deels menselijke oorzaken. Onderscheid tussen afzonderlijke oorzaken is moeilijk, doordat er een grote verwevenheid bestaat tussen de effecten van de verschillende veranderingen in de Westerschelde. Zo staan natuurlijke veranderingen en daarmee de effecten ervan op de waterbeweging niet op zichzelf, maar worden beïnvloed door menselijke ingrepen. De waargenomen veranderingen in de waterbeweging zijn dan ook niet simpelweg een optelsom van de effecten van een aantal factoren (Arends, 1997).

De oorzaken voor veranderingen in de waterbeweging (hoofdstuk 6) spelen zich af op verschillende tijd- en ruimteschalen (Pieters, 1993; Stive *et al.*, 1998; Winterwerp *et al.*, 2000). Ook al kunnen in de praktijk de verschillende schalen waarin de veranderingen optreden niet strikt van elkaar gescheiden worden, toch is een globale indeling in tijdschalen en de daaraan gekoppelde ruimteschalen bruikbaar bij het beschrijven van oorzaken van veranderingen in de waterbeweging. Naarmate men verder in de tijd teruggaat, neemt de schaal, waarop de oorzaken van veranderingen in de waterbeweging in de Westerschelde waarneembaar zijn, in tijd en ruimte toe. De lange termijn veranderingen (decennia, eeuwen) zijn het duidelijkst zichtbaar in het wat verdere verleden. De factoren die voor veranderingen in waterbeweging hebben gezorgd tussen 1000 en 1800, zijn met name de grootschalige veranderingen in de geometrie en de zeespiegelstijging (Witteveen+Bos, 1999).

De oorzaken van korte termijn veranderingen (jaren tot decennia) in de waterbeweging zijn vooral goed waar te nemen na 1950. Vanaf toen zijn veranderingen in de waterbeweging goed gedocumenteerd. Het gaat hierbij om ontwikkelingen op locale schaal, die samenhangen met wijzigingen in de configuratie van platen en geulen. Dergelijke veranderingen kunnen zowel een natuurlijke als menselijke oorzaak hebben, maar tegenwoordig zijn vooral menselijke ingrepen, als baggeren en storten van specie, en de natuurlijke reacties daarop de oorzaak van de snelle locale veranderingen.

Veranderingen in de waterbeweging vanaf 1800 geven een goed beeld van natuurlijke ontwikkelingen op de middellange termijn (decennia) die meer dan alleen een lokaal effect hebben. Om de effecten van natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen op de waterbeweging goed te kunnen beschrijven worden hierna eerst de grootschalige veranderingen in estuariumdiepte en -inhoud door stormvloed, verlanding en inpolderingen tussen 1000 en 1800 beschreven.

Daarna worden de zeespiegelstijging en een toename van de getijslag nabij de monding besproken. Deze invloed heeft niet alleen effect gehad tussen 1000 en 1800, maar vindt nu en in de toekomst nog steeds plaats. De veranderingen in de waterbeweging op de middellange termijn worden geïllustreerd aan de hand van natuurlijke ontwikkelingen in de geometrie na 1800. De waterstandsveranderingen op de korte termijn worden daarna beschreven aan de hand van locale menselijke ingrepen in de geometrie na 1800. Hierbij komen ook de veranderingen in de zandimport en -export aan bod, omdat deze sterk worden bepaald door de menselijke ingrepen.

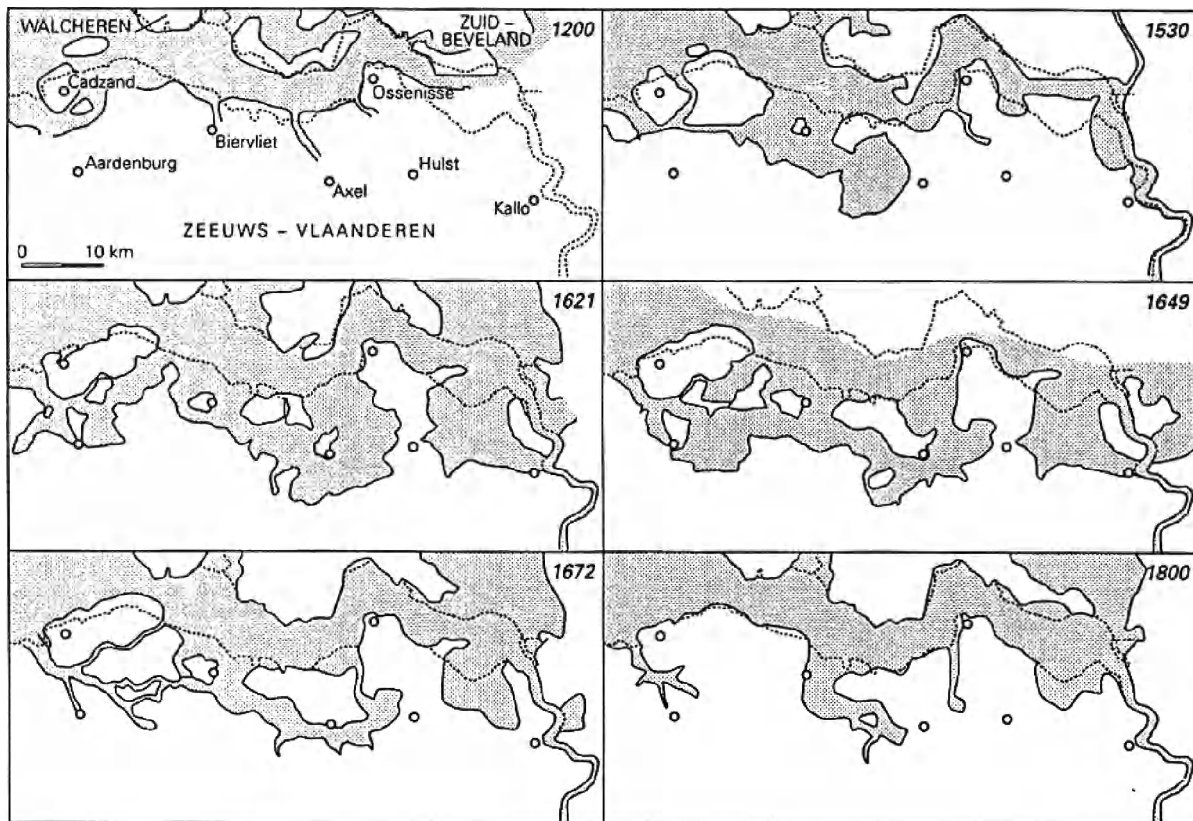
De oorzaken van waargenomen en gereconstrueerde veranderingen in de waterbeweging door de eeuwen heen zijn ondermeer beschreven door Coen (1988), Van der Spek (1993, 1994 en 1997), Van den Berg *et al.* (1996) en het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (1997). Morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde op diverse ruimte- en tijdschalen komen, naast in de hiervoor genoemde werken, onder meer ook aan de orde in Van Veen (1943, 1944 en 1950), Loeff en Verhagen (1986), Jeuken (1993, 1994 en 2000), Tank (1996 en 1997), Huijs (1996), Wang *et al.* (1997), Verbeek *et al.* (1998) en Arends *et al.* (1999). Theoretische benadering van morfologische ontwikkelingen in relatie tot waterbeweging is ondermeer onderzocht door Speer en Aubrey (1985). Toekomstige veranderingen als gevolg van voorgestelde menselijke ingrepen of te verwachten natuurlijke ontwikkelingen zijn aan de hand van modellen in te schatten. Achtergrondinformatie over het maken van modellen zelf komt aan bod in bijvoorbeeld Winterwerp en Kuijper (2002). Modelresultaten worden getoond in ondermeer Dekker en Bollebakker (1981) en Van Helvert (1999).

7.2 Grootschalige veranderingen in estuariumdiepte en -inhoud door stormvloeden, dijkdoorbraken, verlanding en inpolderingen tussen 1000 en 1800

De geometrische parameters van een estuarium als de Westerschelde, die het meest bepalend zijn voor de waterbeweging als gevolg van het getij, zijn de breedte en gemiddelde diepte (Speer en Aubrey, 1985; Friedrichs en Aubrey, 1988; Speer *et al.*, 1991; Wang *et al.*, 1999). Deze parameters en daarmee de grootschalige geometrie van de Westerschelde veranderen op tijdschalen van eeuwen voortdurend, deels door autonome ontwikkelingen en deels door menselijke ingrepen. Veranderingen in de geometrie leiden tot veranderingen in de mate van reflectie en wrijving en de grootte van de komberging. Dit leidt vervolgens tot veranderingen in de getijvoortplanting en getij-asymmetrie en daarmee ook in het verloop van de hoog- en laagwaterstanden in het estuarium (Speer en Aubrey, 1985; Dronkers, 1986; Friedrichs *et al.*, 1990). Bepalend voor grootschalige veranderingen in de geometrie in de periode tussen 1000 en 1800 waren de gecombineerde effecten van verlandingsprocessen, inpolderingen en stormvloeden.

Stormvloeden hebben een belangrijke rol gespeeld bij het ontstaan en de ontwikkeling van de Westerschelde en ook in de huidige situatie spelen stormvloeden een rol (Coen, 1988; Van den Berg *et al.*, 1996). Vermoedelijk in de 14e eeuw, maar ook in het begin van de 15e eeuw werd het mondingsgebied verruimd tijdens een periode van frequente stormvloeden. Dit leidde tot verdieping van de Westerschelde en het verdwijnen van diverse eilandresten. In de 14e eeuw was de Westerschelde al voldoende diep uitgeschuurd om als nieuwe scheepvaartroute dienst te doen (Denucé, 1993; Van der Spek, 1997; Van der Spek *et al.*, 1997) en die rol over te nemen van de Oosterschelde (Winterwerp *et al.*, 2000). Doordat de Westerschelde dieper was geworden, konden getijgolven gemakkelijker (minder energieverlies) het Schelde-estuarium inlopen. Mede als gevolg hiervan en door veranderingen in de verhouding tussen de estuariumlengte en de lengte van de getijgolf, waardoor de mate van opslinging en resonantie verandert, moet de getijslag in het estuarium geleidelijk zijn toegenomen. Hierdoor werd de dreiging van dijkdoorbraken steeds groter. Tijdens een aantal stormvloeden braken dijken door en kwamen grote gebieden onder water te staan. Omdat op veel plaatsen veen, dat dicht aan de oppervlakte lag, was gedolven en het land bovendien was verlaagd door inklinking als gevolg van kunstmatige ontwatering, vielen veel overstroomde gebieden bij laagwater niet of nauwelijks meer droog en was hernieuwde inpoldering een kostbare aangelegenheid. Doordat het gebied lange tijd bij oorlogshandelingen betrokken was (de 100-jarige oorlog tussen Engeland en Frankrijk en de

80-jarige oorlog met Spanje) kwam van herstel van dijken niets terecht. In sommige gevallen werden dijken zelfs moedwillig doorgestoken om de vijand de doorgang te beletten (Brand, 1985). De nieuwe geulen en de aangrenzende getijgebieden zorgden voor een vergroting van de komberging. Een grote inbraak, die lange tijd niet hersteld kon worden, was de Braakman in het centrale deel van Zeeuws-Vlaanderen. Omstreeks het midden van de 17e eeuw bereikte het kombergingsgebied van de Westerschelde haar grootste omvang, zie figuur 7.1.



• **Figuur 7.1:** Grootsschalige ontwikkelingen in de Westerschelde tussen 1200 en 1800 (bron: Van den Berg et al., 1996, oorspronkelijk naar Brand, 1985).

Na het midden van de 17e eeuw volgde een periode van opslibbing en schorvorming. Deze verlanding werd op de voet gevolgd door inpolderingen (Mol, 1995). Verlanding kwam niet alleen in het verleden voor, het vindt ook nu plaats. Zo is de hoeveelheid sediment die is afgezet in ondiepe gebieden langs de randen van de Westerschelde tussen 1880 en 1950 circa 100 miljoen kubieke meter. In de periode 1949-1992 is dat circa 25 miljoen kubieke meter (Krijger, 1993). Deze snelle sedimentatie leidde tot een vergroting van de schorren. Er zijn ruimtelijke variaties in de hoeveelheid sedimentatie. Zo verloopt sedimentatie in doodlopende zijgeulen sneller dan op de schorren.

Door de verlanding en indijking van grote schorgebieden en verlanding van geulen nam in de loop van de eeuwen de kombergingscapaciteit weer af (Coen, 1988). Tussen 1650 en 1968 is het volume van de Westerschelde afgenomen met 200 miljoen kubieke meter, wat correspondeert met een gemiddelde jaarlijkse sedimentimport van 0,6 miljoen kubieke meter (Van der Spek, 1994). De inpolderingen betroffen met name een aantal zeearmen die ter weerszijden van de Westerschelde waren ontstaan, zoals het Sloe, de Agger, en de Braakman. De inpolderingen in de Westerschelde bedroegen sinds 1650 circa 40.000 hectare (Mol, 1995). Vanaf 1800 is het oppervlak van de Westerschelde door inpolderingen van ondiepe

gebieden in totaal met circa een derde afgenomen, van zo'n 45.000 hectare tot circa 30.000 hectare (Pieters *et al.*, 1991). Volgens Allersma (1992) was hiermee een jaarlijkse sedimentafzetting ter grootte van 3 à 4 miljoen kubieke meter gemoeid. Dat is 5 tot 7 keer meer dan Van der Spek (1994) bepaalde (Winterwerp en Kuijper, 2002). De hier gepresenteerde vergelijkingen tussen de situaties van 1650, 1800 en 1968 gaan volgens Pieters (mond. comm., 2002) voorbij aan het feit, dat daartussen zeer grote tijdsperioden liggen. Hierdoor is het onterecht om doorgaande continue ontwikkelingen in de estuariumgeometrie en waterbeweging te veronderstellen tussen de drie situaties.

Door de bedijkingen door de eeuwen heen en door het verdwijnen van zijgeulen nam de komberging af, waardoor de gemiddelde diepte van het estuarium toenam. Het werd meer trechtervormig (Van den Berg *et al.*, 1996). Hierdoor werd de energie van de getijgolf minder verspreid en meer geconcentreerd, waardoor de getijslag kon toenemen. De toename van de gemiddelde waterdiepte zorgde ook voor de toename van de voortplantingssnelheid van de golf, zie ook paragraaf 6.2. De toenemende voortplantingssnelheid zorgde ervoor dat de natuurlijke periode van het estuarium (3,5 uur rond 1800) veel beter ging resoneren met de getijgolf. Een staande golf zou immers ontstaan als de natuurlijke periode overeenkomt met een kwart van de getijperiode en dat is bij 3,5 uur al bijna het geval. Door de betere resonantie en de door de toegenomen diepte verkleinde wrijving werd de getijslag steeds groter (Van den Berg *et al.*, 1996). Volgens Pieters (mond. comm., 2002) dient echter, gezien de grillige geometrie van het Schelde-estuarium, zeer voorzichtig omgegaan te worden met 'antwoorden' op de vraag hoe dicht 'de' estuariumlengte zit bij de voor resonantie kritieke waarde van een oneven veelvoud van een kwart van 'de' getijgolf lengte.

Ondanks dat sinds 1650 de oppervlakte van het intergetijdengebied in de Westerschelde vooral door inpolderingen is afgenomen met 44 procent, laten berekeningen door Van der Spek (1993) zien, dat het vloedvolume in de hals van het estuarium bij Vlissingen vermoedelijk slechts circa 13 procent afnam. Er lijkt 27 procent te zijn gecompenseerd door een toename van de getijslag en 4 procent door een toename van de voortplantingssnelheid van de getijgolf.

Niet alleen de getijslag en voortplantingssnelheid van de getijgolf namen toe, maar ook de verhangen en daarmee de stroomsnelheden. Alleen een toename van de stroomsnelheden kan namelijk verklaren dat de geulen in de loop der tijd dieper werden. Verdieping resulteerde op zijn beurt in de toename van de voortplantingssnelheid van de getijgolf en in een betere vulling van het estuarium bij vloed en daarmee voor een toename van het volume water dat het estuarium instroomt (Van den Berg *et al.*, 1996). De voortdurende verdieping van de geulen en de afname van het getijgebied boven laagwater zorgden niet alleen voor een grotere voortplantingssnelheid van de getijgolf maar ook voor een toename van de mate van asymmetrie van het getijverloop (Van der Spek, 1994; Van den Berg *et al.*, 1996; Gerritsen *et al.*, 1999).

Hierboven is verondersteld, dat de afname van het getijvolume in de monding altijd deels werd gecompenseerd door de toename van vooral de getijslag en de snelheid van de getijgolf. Uit onderzoek van Pieters en Verpuy (1997) blijkt echter, dat afhankelijk van plaats en omvang van bijvoorbeeld een afname van de bergende oppervlakte, het getijvolume in de hals van het estuarium bij Vlissingen zowel kan afnemen, waar meestal zonder meer van wordt uitgegaan, maar ook kan toenemen door de afname van de horizontale berging (Pieters, 2002b).

7.3 Zeespiegelstijging, toename van de getijslag nabij de monding

Zowel in de periode tussen 1000 en 1800 als in de periode na 1800 is er sprake van een stijging van de gemiddelde waterstand aan de estuariummonding door de zeespiegelstijging. Bij Vlissingen is de zeespiegelstijging meer dan 22 centimeter per eeuw (De Ronde, 1983). In de komende 100 jaar zal de zeespiegel naar verwachting met zo'n 65 centimeter stijgen (De Ronde en Vogel, 1988; Blik, 1995). Als gevolg van de zeespiegelstijging wordt de komberging van de Westerschelde groter, omdat het kombergend oppervlak groter wordt. Daarnaast neemt de diepte ten opzichte van de gemiddelde waterstand toe. De zeespiegelstijging resulteert in een stijging van de hoogwaters en een daling van de laagwaterstanden. Zeespiegelstijging heeft ook een weerstandsverlaging van het bekken tot gevolg met waarschijnlijk een verdere toename van het getijverschil in het oostelijke deel en een verdere afname van de getij-asymmetrie.

Naast zeespiegelstijging is er ook sprake van een toename van de getijslag op de Noordzee en dus ook nabij de monding van de Westerschelde. Zeespiegelstijging en de grotere getijslag nabij de monding gaan het effect van het dichtsedimenteren van zijgeulen, een verkleining van het estuariumvolume, tegen (Van den Berg *et al.*, 1996). Het totale getijvolume van de Westerschelde is mede hierdoor volgens Blik (1995) in de periode 1650-1968 binnen een marge van 10 procent gelijk gebleven. De zeespiegelstijging en een toename van de getijslag nabij de monding leiden tot een grotere komberging (Technische Scheldec commissie, 1984; Langendoen, 1987; Dillingh en Heinen, 1994; Blik, 1995; Arends, 1997; Svašek, 1998). Het estuarium wordt als het ware dieper. De hoogwaters stijgen en de laagwaterstanden dalen. Dit zorgt voor een vergroting van de getijslag. Dillingh en Heinen (1994) concludeerden dat in de laatste honderd jaar de getijslag bij Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath met respectievelijk circa 4, 5, 7 en 9 procent is toegenomen. Het verloop van de getijslagtoename is voor elk van de stations verschillend.

De effecten van inpoldering en zeespiegelstijging samen hebben geleid tot een verdieping van de geulen, waardoor de weerstand is afgenomen en het getijverschil bij Antwerpen sterker is toegenomen dan bij Vlissingen (Blik, 1995). Dit heeft op zijn beurt weer een positieve bijdrage geleverd aan de getijvolumes. De grote getijslag vergrootte de komberging en de weerstandsverlaging verkleinde de faseverschillen, waardoor het verschil tussen het vloedvolume en de totale komberging afneemt (Van der Spek, 1993 en 1994).

7.4 Natuurlijke ontwikkelingen in de geometrie op middellange termijn na 1800: eb- en vloedgeuldynamiek

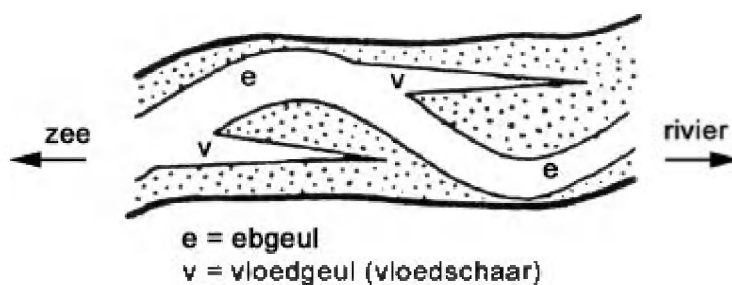
Belangrijke ontwikkelingen in de Westerschelde na 1800 op de middellange termijn (decennia) die meer dan alleen een lokaal effect hebben, zijn veranderingen in de ligging van eb- en vloedgeulen. In een ruim estuarium als de Westerschelde verloopt de eb- en vloedstroom gedeeltelijk in van elkaar gescheiden geulen. In vloedgeulen (paragraaf 5.4) is het vloedvolume groter dan het ebvolume. Voor ebgeulen geldt het omgekeerde.

Eb- en vloedgeulen verschillen in morfologie en dynamiek als gevolg van de getij-asymmetrie (Van den Berg *et al.*, 1996). Het maximum van de ebstroom treedt op bij een waterstand, waarbij de platen al zijn drooggevalen. Het water is daarom gedwongen de ebgeulen te volgen. Deze concentratie van water in de geulen zorgt ervoor dat er erosie van de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht plaats kan vinden. De bochten worden hierdoor groter of verplaatsen zich in de ebrichting. Vanuit het benedenstroomse deel van bochten van ebgeulen vormen zich vrijwel rechte vloedgeulen (Van Veen, 1950), zie figuur

7.2. Elke grote bocht van de belangrijkste ebgeul van de Westerschelde gaat gepaard met een vloedgeul. De vloedgeulen ontstaan doordat een deel van de vloedstroom de plaatgebieden overtrekt. De maximum vloedstroom treedt namelijk op als de platen onder water staan. De vloedgeulen zijn recht en worden in bovenstroomse richting van het estuarium gaand ondieper en smaller. De geul eindigt in een drempel op de plaats waar het weer samenvloeit met de hoofdstroom. De vloedgeulen verplaatsen zich alleen, als de ebgeul waar ze op aantakken zich verplaatst. Het repeterende patroon van eb- en vloedgeulen is ontstaan tussen 1800 en 1905. Dit resulteerde in zes bochtgroepen, estuariene secties van gekoppelde eb- en vloedgeulen, die nu nog aanwezig zijn (Jeuken, 2000). Op deze wijze heeft de Westerschelde zich ontwikkeld van een ondiep getijdebekken met een onregelmatig patroon van geulen en uitgestrekte intergetijdengebieden tot de huidige configuratie van een doorgaande ebgeul, die op veel plaatsen vastligt tegen oeververdedigingen, met een aantal vloedgeulen (Winterwerp en Kuijper, 2002).

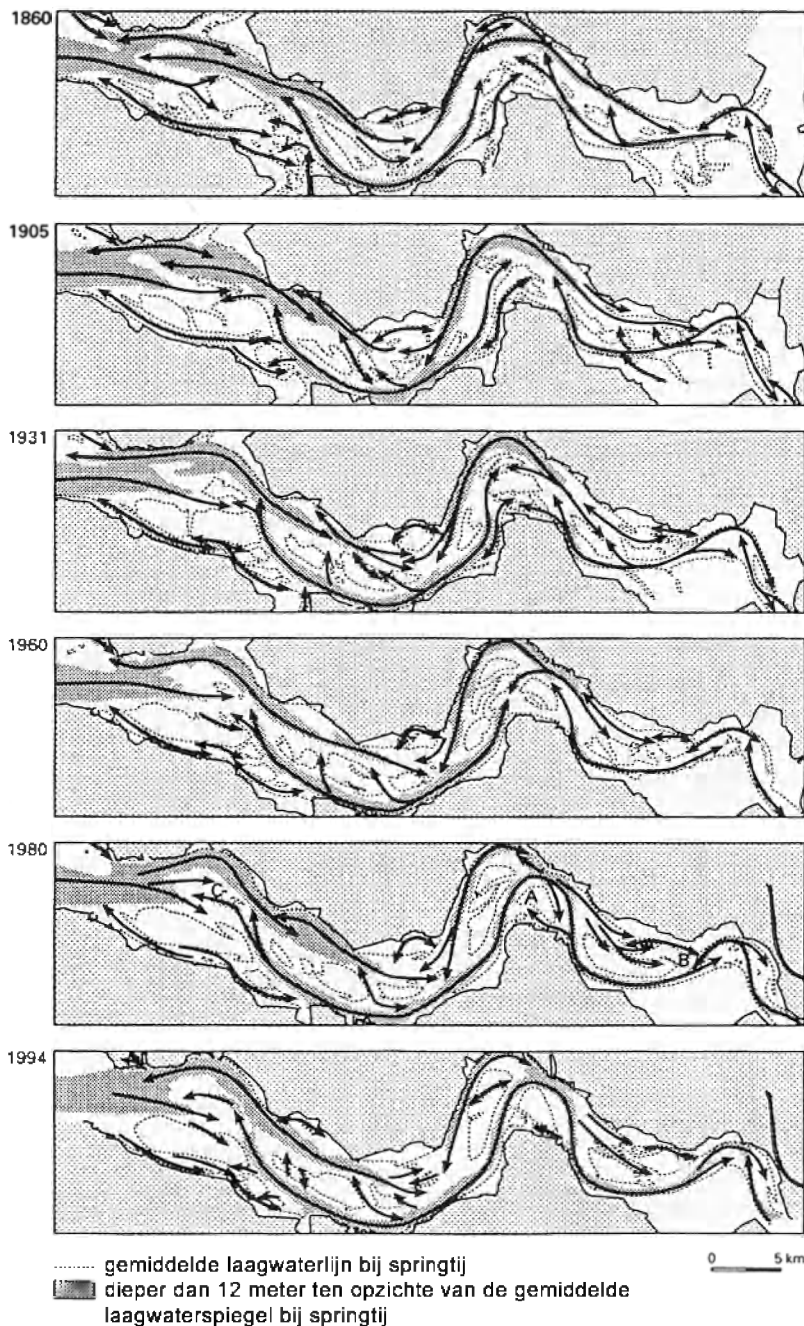
• **Figuur 7.2:**

Geschematiseerd patroon van eb- en vloedgeulen, zoals dat in de Westerschelde voor komt. De niet getekende estuariummonding bevindt zich rechts van de figuur (naar: Van Veen, 1950).



De concentratie van water in een geul leidde ook tot een veel uitgesprokener uitbochtting. Hierdoor treedt er verruiming op. Zo was de Westerschelde in de periode tot 1800 tussen het Land van Saeftinghe en Bath minder breed dan tegenwoordig. Vanaf 1800 valt er een grotere accentuering van de bochten waar te nemen. De ebgeulen komen dan dicht tegen de oevers aan te liggen (Coen, 1988). Veranderingen in de waterbeweging werden tussen 1800 en 1930 mede veroorzaakt door het zeewaarts verschuiven en uitbochten van enkele ebgeulen (Coen, 1988; Van den Berg *et al.*, 1996), zie figuur 7.3, met name van de Everingen. De migratiesnelheden van de ebgeulen bedroegen enkele tientallen meters per jaar. De veranderingen in de waterbeweging betreffen vooral veranderingen in het stroombeeld. Het stroombeeld geeft aan waar het meeste water wordt getransporteerd en met welke snelheid.

Bij de ontwikkeling van de bochten deden zich cyclische processen voor van een uitbochtting gevolgd door een bochtafsnijding. Dit kwam op diverse plaatsen in de Westerschelde voor op een aantal schaalniveaus. Een voorbeeld van een cyclus in de ligging van de hoofdgeul was te vinden ter hoogte van Hansweert, zie figuur 7.3 en 7.4. Hier leidde het uitbochten van de geulen enkele malen tot een bochtafsnijding. De cyclusduur was meer dan een eeuw (Van den Berg *et al.*, 1996).



• **Figuur 7.3:**
Verplaatsing van
geulen in de
Westerschelde tussen
1860 en 1994 (bron:
Van den Berg et al.,
1996).

Rond 1930 hadden de diverse geulen in de Westerschelde de oevers van het estuarium bereikt. Verdere migratie was onmogelijk. Na 1930 hebben ondermeer nog de volgende ontwikkelingen in het geulenpatroon plaatsgevonden:

- Het Gat van Ossensisse nam geleidelijk de functie over van het Middelgat, waardoor vanaf 1970 het Gat van Ossensisse officieel deel uitmaakt van de hoofdvaarroute (Van Kleef, 1994b; Huijs, 1996; Mol *et al.*, 1997). Door het baggerwerk zal de morfologische en stromingssituatie van nu in deze bochtgroep min of meer gehandhaafd blijven;
- De Schaar van de Spijkerplaat ontwikkelt zich sterk en breidt zich uit in de richting van de Pas van Terneuzen (Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989; Witteveen+Bos, 1999);
- Er treedt momenteel erosie op van een aantal schorranden, zoals die van de schorren bij Waarde en Bath. Dit zal bijdragen aan een verruiming en verdieping van het estuarium.



Figuur 7.4: Cyclische veranderingen in de positie van de hoofdgeul nabij Hansweert (naar: Coen, 1988).

7.5 Lokale menselijke ingrepen in de geometrie na 1800

Menselijke lokale ingrepen in de geometrie hebben vooral te maken met een inhoudsverandering door zandwinning, inpolderen en afdammingen en veranderingen in de diepte van de eb- en vloedgeulen door baggeren en storten. Ook eventuele ontpolderingen kunnen zorgen voor inhoudsveranderingen.

De periode waarover nauwkeurige gegevens van jaarlijkse bagger- en stortvolumina in de Westerschelde beschikbaar zijn, is aanzienlijk korter dan die voor inpolderingen, namelijk vanaf 1955. De veranderingen als gevolg van ingrepen deden zich vooral in het oostelijke deel van de Westerschelde voor (Dillingh en Heinen, 1994; Van den Berg *et al.*, 1996). Dat zal in de toekomst ook het geval zijn door verdere menselijk ingrijpen, zoals een nieuwe verdieping van de vaargeul (Witteveen+Bos, 1999).

7.5.1 Inhoudsveranderingen door inpolderingen, afdammingen, eventuele toekomstige ontpolderingen, zandwinning en zandwinning in relatie tot veranderingen in sedimentimport en -export

De inhoudsveranderingen door inpolderingen, afdammingen, zandwinning en toekomstige ontpolderingen en de gevolgen ervan op de waterbeweging komen als volgt tot stand:

- Tussen 1800 en 1980 werd nog ruim 15.000 hectare ingedijkt (Technische Scheldecommissie, 1984). Door inpolderingen neemt zowel het bergingsoppervlak als de breedte van het estuarium af. Het effect van de inpolderingen op het waterbergend vermogen was in de 19e eeuw nog niet zo groot, omdat de bodemhoogte van de ingepolderde gebieden gelijk of groter was dan gemiddeld hoogwater. In de 20e eeuw varieerde de mate van effect van de inpolderingen (Arends, 1997; Witteveen+Bos, 1999). Tot 1980 zijn steeds meer gebieden met een substantieel waterbergend vermogen ingepolderd, waardoor de komberging sterk is afgenomen. Toch is het niet zo dat inpolderingen automatisch leiden tot een verkleining van het getijvolume in de hals van het estuarium bij Vlissingen. Doordat de estuariumbreedte afneemt, neemt immers de snelheid van getijvoortplanting toe. Door dit effect wordt het estuarium beter 'gevuld' en neemt genoemd getijvolume juist toe. Bij de oorspronkelijke grotere breedte kan het water namelijk zijdelings wegstromen. Dit dempt de dagelijkse hoogwaterstanden. Een deel van het water dat bij het versmallen van het estuarium niet meer zijdelings kan afstromen,

zorgt voor een toename van de hoogwaterstanden (Witteveen+Bos, 1999), hetgeen ook tot een vergroting van het getijvolume bij Vlissingen leidt. Het netto effect van deze gedeeltelijk aan elkaar tegengestelde effecten is niet op voorhand evident en zal afhangen van de plaats in het systeem waar de inpoldering plaatsvindt (Van den Berg, mond. comm., 2002).

Doordat de hoogteligging van de ingepolderde gebieden bij inpoldering niet gelijk is, zijn er, parallel aan de hiervoor beschreven grootte van invloed op de komberging, ook verschillen in invloed op de jaargemiddelde hoogwaterstand. Met een toenemende hoogteligging van het ingepolderde gebied neemt de invloed op het jaargemiddelde hoogwater door inpoldering af. Omdat de inpoldering geen effect heeft op het niveau van laagwater, geldt de afnemende invloed ook voor de jaargemiddelde getijslag (Witteveen+Bos, 1999).

Effecten als gevolg van inpolderingen die pas later in de waterbeweging tot uiting komen, worden beschreven door Witteveen+Bos (1999). Er zijn aanwijzingen voor een verband tussen het verloop van de jaargemiddelde getijslag en het inpolderen van gebieden in het estuarium. Hierdoor acht Witteveen+Bos (1999) het mogelijk, dat er een periode is met een geleidelijke stijging van de jaargemiddelde hoogwaterstanden als gevolg van een grootschalige inpoldering. Zo'n (langdurige) toename van de getij-amplitude na een inpoldering lijkt Pieters (2002a en 2002b) echter niet aannemelijk. Als het proces van toename van de hoogwaterstanden namelijk niet steeds door nieuwe inpolderingen wordt gestimuleerd, neemt de toename van de jaargemiddelde getijslag geleidelijk weer af, of er kan zelfs een lichte daling optreden. Dit wordt als volgt verklaard. Bij afname van de bergende oppervlakte door inpoldering neemt initieel de getij-amplitude toe en nemen de stroomsnelheden in het direct zeewaarts gelegen gebied af. De initiële toename van de getijslag is het grootst in gebieden met een relatief hoge wrijvingsweerstand. In de periode erna zou het gebied door de verlaagde stroomsnelheden kunnen aanzanden en vernauwen, waardoor de stroomsnelheden weer toenemen. Bij een relatief lage wrijvingsweerstand in het gebied zal de getijslag na de initiële verandering als gevolg van de ingreep nauwelijks meer toe- of afnemen. Bij een relatief hoge wrijvingsinvloed zal door de stroomsnelheidstoename de damping weer toenemen en de getijslag weer afnemen (Pieters, 2002b). Na de initiële toename van de getijslag door de inpoldering, is het het meest waarschijnlijk dat in de periode erna bij een eventuele morfologische reactie de getijslag nauwelijks meer verandert (bij lage relatieve weerstand) of in een enkel geval misschien zelfs weer afneemt (bij hoge relatieve weerstand). Wat de reactie in een concreet geval van inpoldering precies zal zijn hangt af van de locatie en is niet zonder een daarop gerichte studie met stromingsmodellen op voorhand te zeggen.

Inpolderingen kunnen ook hebben geleid tot een verhoging van de extreme hoogwaterstanden. Voor de inpolderingen werden door berging van water in deze gebieden de extreme hoogwaterstanden afgevlakt (Arends, 1997).

- Afdammingen van kreken zorgden voor een vermindering van de inhoud van het estuarium en daarmee van de komberging (Coen, 1988; Huijs, 1995; Witteveen+Bos, 1999). Dat geldt vooral voor de scheiding tussen de Wester- en Oosterschelde door de afdamming van het Kreekrak in 1867 en de aanleg van de Sloedam in 1871. Van deze afdammingen kan vanwege hun omvang verwacht worden, dat ze merkbaar van invloed zijn geweest op de waterbeweging en morfologie in de Westerschelde (Witteveen+Bos, 1999). Door de afdamming van het Kreekrak namen het eb- vloedvolume af met

respectievelijk zo'n 12 en 32 miljoen kubieke meter. Bij Sloe zijn deze afnamen respectievelijk 10 en 32 miljoen kubieke meter (Van Veen, 1944). Dat komt overeen met een derde van het oppervlak van het intergetijdengebied dat in 1800 aanwezig was.

Door een afname van het estuariumvolume dalen ter hoogte van de ingreep de over eb en vloed gemiddelde stroomsnelheden. Dat leidt tot een reductie van de wrijvingsverliezen, waardoor de volumina weer wat zullen toenemen. Echter, lokaal blijft het een netto afname van de volumina, snelheden en wrijvingsinvloed (Pieters, mond. comm. in: Witteveen+Bos, 1999). Dat heeft in ieder geval lokaal invloed op de waterstand, afhankelijk van de relatieve wrijving ter plaatse. Het zal ook een morfologische aanpassing in gang zetten, waardoor het effect van de afdamming zich na verloop van tijd over een steeds groter gebied kan uitstrekken (Witteveen+Bos, 1999).

- In de toekomst kunnen gebieden worden ontpolderd in het kader van het realiseren van meer natuur en het beter kunnen waarborgen van de veiligheid tijdens stormvloeden (Pieters *et al.*, 1991). Ontpolderen heeft een positieve, locale, invloed op de aftopping van stormvloedstanden. De ontpoldering, inclusief het afgraven van het te ontpolderen gebied, zorgt namelijk voor meer komberging en daarmee voor grotere getijvolumina (Roovers, 1993; Kik en Karman, 1993; Van Kleef, 1994a; Storm, 1995; Schaap, 1998). Uit modelonderzoek van Pieters en Verspuy (1997) en Adema (1998) blijkt, dat direct zeewaarts van de plaats waar de komberging wordt vergroot, de debieten en de snelheden toenemen. Hierdoor worden ook de weerstand en de damping groter, waardoor de getijslag afneemt. Dit zorgt weer voor een kleinere interne (verticale) berging, die de initiële toename van de debieten en snelheden beperkt. Er is dus sprake van een terugkoppeling. Per saldo nemen ter plaatse de debieten en het getijvolume toe en wordt de getij-amplitude kleiner. In zeewaartse richting gaand wordt de toename van het debiet en getijvolume kleiner, door de compensatie door de afgenomen interne berging over een steeds grotere afstand (Pieters en Verspuy, 1997).
- Een inhoudsverandering in de Westerschelde kan ook worden veroorzaakt door zandwinning. De zandwinplaatsen worden zodanig gekozen, dat vaarweghandhaving of gewenste geul- of plaatontwikkelingen worden gestimuleerd. Door de veel kleinere omvang, namelijk zo'n 2,5 miljoen kubieke meter per jaar, is op korte termijn de invloed op de ruimtelijke structuur marginaal vergeleken met het directe baggerwerk ten behoeve van de scheepvaart (zie paragraaf 7.5.2). Echter, door cumulatie zal zandwinning op lange termijn een significante invloed hebben op de zandhuishouding van het estuarium (Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989; Pieters *et al.*, 1991). Het is waarschijnlijk dat de Westerschelde bij ongewijzigd zandwinningsbeleid de komende eeuw een groter volume krijgt (Bliek, 1995).

Ook al is er bij zandwinningen vaak naar gestreefd om niet meer zand weg te halen dan er bijkomt, zandwinning leidt, net als de baggerwerken, tot een andere hydraulische situatie. Daarnaast is de zandwinning van invloed op de zandbalans en de morfologie van de Westerschelde (Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989). Zo moet een compensatie voor zeespiegelstijging worden behaald uit natuurlijke aanvoer van zand. Daarnaast raakt in een aantal belangrijke geulen het evenwicht tussen doorstroomprofiel en maximum debiet verstoord, waardoor de natuurlijke uitwisseling van zand tussen verschillende gebieden in het estuarium verandert. Daarnaast stelde de Werkgroep Waterbeheer Westerschelde zo'n tien jaar geleden, dat een inhoudstoename van het estuarium als gevolg van zandonttrekking zal worden versterkt door natuurlijke processen, waardoor de

Westerschelde een eroderend bekken zou worden (Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989). Of dit nu al het geval is, is onduidelijk, de Westerschelde was in ieder geval in de afgelopen jaren een netto exporterend systeem (De Jong, 2000).

Over veranderingen in het sedimenttransport in de Westerschelde is niet zo veel bekend. Wel is duidelijk dat er meestal sprake was van sedimentimport vanuit zee. Zo was dat tussen 1878 en 1970 circa 130 miljoen kubieke meter (De Looft, 1983; Uit den Boogaard, 1995). De netto sedimentimport van de Westerschelde gedurende de afgelopen eeuw bedraagt gemiddeld bijna 1,4 miljoen kubieke meter per jaar (Van den Berg *et al.*, 1996). Dit komt overeen met een gemiddelde verticale sedimentatiesnelheid van circa 30 centimeter per eeuw. Dit is ongeveer 10 centimeter per eeuw groter dan de relatieve zeespiegelstijging. Vanaf 1970 gaat het baggeren een belangrijke rol spelen in berekeningen aan de zandtoevoer. De zandbalans voor de Westerschelde en het aangrenzende deel van de Noordzee in de jaren tachtig laat een accumulatie zien van zo'n 0,3 tot 3,3 miljoen kubieke meter per jaar (Stive en Eysink, 1989; Rijkswaterstaat, 1990). De laatste tien jaar is de import afgenomen en het lijkt erop, dat in de afgelopen tien jaar de Westerschelde sedimentexporterend is geworden (Rijkswaterstaat Directie Zeeland, 2001). Onduidelijk is nog, of dit een blijvende verandering zal zijn. De tegenwoordige instroom uit zee en van de rivier van anorganisch slib is circa 400 miljoen kilo per jaar (Vereeke, 1994; Verlaan, 1998). Dat komt overeen met zo'n 0,3 miljoen kubieke meter per jaar.

7.5.2 Veranderingen in de diepte van eb- en vloedgeulen door baggeren, storten en de aanleg van leidammen en oeververdediging

De eerste baggerwerkzaamheden op de drempel bij Bath dateren uit 1905. Tot de Eerste Wereldoorlog ging het om kleine hoeveelheden van ongeveer 1 tot 2 miljoen kubieke meter per jaar. Sinds 1925 is er sprake van een jaarlijks programma voor verdieping van de vaarroute naar Antwerpen (Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989). De gewenste diepteligging van de drempels is in de loop van de jaren aangepast aan de toenemende diepgang van de schepen die naar Antwerpen varen. Met deze verdiepingen is ook het onderhoudsbaggerwerk toegenomen. De toename was sterk. Was in de periode 1950-1960 het onderhoudsbaggerwerk op de drempels in de Zeeschelde en Westerschelde nog gemiddeld zo'n 4 à 5 miljoen kubieke meter per jaar (Witteveen+Bos, 1999), later werd dit maximaal ongeveer 12 à 13 miljoen kubieke meter per jaar. In de jaren negentig bedroeg het jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk ongeveer 8 à 10 miljoen kubieke meter per jaar (Arends, 1997; Witteveen+Bos, 1999). Tegenwoordig is dat meer, zo was tussen 1999 en 2001 het jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk gemiddeld 11,5 miljoen kubieke meter per jaar. De baggerspecie wordt elders in het estuarium teruggestort. Stortingen hebben aanvankelijk vooral in de nevengebieden, met name vloedgeulen, plaatsgevonden. Opvulling van de geulen was hiervan het gevolg, zodat, toen de geulen langzaam maar zeker vol raakten, er vanaf circa 1965, toen in het oostelijke deel gestart werd met een grootschalige verdieping, meer sediment elders in de hoofdgeulen wordt teruggestort. Vanaf 1997 wordt het onttrokken sediment uit het oostelijke deel ook in het midden en het westelijke deel van het estuarium gestort (Krijger, 1999). Het baggervolume in het oosten bedraagt meer dan het stortvolume en zorgt voor een verdieping van het oostelijke deel (Witteveen+Bos, 1999).

Het baggeren van de drempels in de ebgeul en het storten van de baggerspecie in de vloedgeulen versterkt de effecten van de verdieping, die door andere natuurlijke veranderingen of menselijke ingrepen worden veroorzaakt. De stroming wordt door het baggeren steeds meer geconcentreerd in een steeds diepere bedding. Samen met het storten in

de vloedgeulen leidde dit tot een stabilisatie van de vaargeul en een concentratie in de diepere ebgeul (Coen, 1988). Hierdoor trekt de hoofdgeul een groter debiet aan (Arends, 1997). Toch streeft volgens Van Kleef (1994b) de Westerschelde ernaar om de drempels weer ondieper te maken, terwijl de geuldelen tussen de drempels ruimer zullen worden. Door het baggeren zijn de drempels immers niet in evenwicht. Door de vaak hogere stroomsnelheden, en dus een groter sedimenttransport, wordt het verondiepen van de drempels versterkt. Opnieuw de drempel baggeren zal dan nodig zijn.

Per ingreep is de invloed lokaal, maar veel ingrepen verspreid over de Westerschelde tezamen zorgen voor veranderingen op grotere tijd- en ruimteschalen. Door de verdiepingen kon het getijvolume bij Vlissingen groter worden (De Looff, 1981; Huijs, 1996; Mol, 1997; Witteveen+Bos, 1999). Ook het niveau van de hoog- en laagwaterstanden is beïnvloed door de verdieping van de vaargeul. Als gevolg van de verdieping nemen in de Westerschelde de hoogwaterstanden toe (Doekes, 1986; Blik 1995; Witteveen+Bos, 1999). De afname van de laagwaterstanden, waarvan in de Westerschelde sprake is met uitzondering van het meest westelijke deel, is daarmee vergeleken klein (hoofdstuk 6). De toename in de hoogwaterstanden is ruimtelijk en temporeel gelijkmatiger dan de daling in de laagwaterstanden. Volgens Pieters (2002) is de oorzaak hiervan de grotere gevoeligheid van laagwaterstanden voor weerstandsveranderingen. Een mogelijke verklaring voor de toename van de getijslag is, dat door de verruiming in het oosten een reductie van de weerstand optreedt (Witteveen+Bos, 1999; Graas, 2001). Een deel van de veranderingen in de hoog- en laagwaterstanden na een verdieping is, net als de verdieping zelf, van tijdelijke aard, indien de verdiepte geul niet op diepte wordt gehouden.

In verschillende recente publicaties wordt verklaard, dat er nauwelijks of geen relaties te vinden zijn tussen de menselijke ingrepen in het kader van onderhoud en verdieping van de vaarweg en de veranderingen in het dagelijkse getij en nog minder met de toenemende doordringing van stormvloed (Taveniers, 1998; Peters, 2001; Technische Scheldec commissie, 2001; Blomme, 2001). Oorzaken van de veranderingen, ook toekomstige, die waarschijnlijker worden geacht en waaraan een grotere invloed wordt toegeschreven dan aan de vaarwegverdiepingen, zijn ondermeer de natuurlijke morfologische evolutie, inpolderingen en zeespiegelstijging. Pieters (2002) toont echter aan, dat de menselijke ingrepen in het kader van het vaarwegbeheer een dominante invloed hebben op de veranderingen in het dagelijks getij en de toenemende doordringing van stormvloed. Dat er waarschijnlijk ook andere oorzaken aan te wijzen zijn, blijkt uit modelberekeningen. Uit deze berekeningen volgt een kleinere toename van het hoogwaterniveau, dan uit metingen blijkt, waaruit kan worden afgeleid, dat ofwel de modellen niet nauwkeurig genoeg zijn, of dat er andere oorzaken zijn voor de stijging van het hoogwaterniveau. Uit modelberekeningen (Bollebakker, 1996) blijkt, dat het laagwaterniveau wel overeen komt met metingen (Dillingh en Heinen, 1994).

Ten gevolge van de vaargeulverruiming wordt het oostelijke deel verdiept. Er wordt hier relatief veel sediment onttrokken aan een gebied met een relatief klein oppervlak. Vergeleken met het oostelijke deel van het estuarium is de geometrie van het middendeel, het westelijke deel en in het mondinggebied door vaargeulverruiming weinig veranderd (Van der Slikke, 1997; Vroon *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1997; Witteveen+Bos, 1999).

Andere geometrieveranderende ingrepen zijn normalisatiewerken en erosiebestrijdende maatregelen, zoals leidammen (geleidedammen) en vooroeverbestortingen. De in het verleden aangelegde leidammen en oeververdediging zullen, net als het afdammen van geulen, verder

hebben bijgedragen aan concentratie van de stroming (Coen, 1988). Gedwongen concentratie in een diepere bedding door leidammen gaat gepaard met een lokale verhoging van de stroomsnelheden en een toename van de turbulentie. Dit heeft twee effecten op de getijslag die elkaar tegenwerken en waarvan de resultante (enige verkleining of vergroting van de getijslag) waarschijnlijk afhankelijk is van de lokale situatie. Enerzijds leidt de toename van de turbulentie tot een groter energieverlies, anderzijds leidt die toename van de turbulentie en de concentratie van de stroming tot grotere waterdiepten en daarmee tot een verkleining van de energieverliezen door bodemwrijving en dus tot een vergroting van de getijslag (Van den Berg, mond. comm., 2002). Echter, volgens Pieters (mond. comm., 2002) zorgen, net als de turbulenties, de hogere stroomsnelheden door de concentratie van stroming in een gedwongen dieper geworden geul juist per saldo voor meer energieverlies. Dit leidt tot een kleinere getijslag ter plaatse en stroomafwaarts van de ingreep en, door enige opstuwning, bovenstrooms tot een lichte stijging van de getijslag.

8 Samenvatting van de invloed per ingreep op de waterbeweging

8.1 Invloed van natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen op de waterbeweging

In de voorgaande hoofdstukken zijn de veranderingen in de waterbeweging en de oorzaken ervan besproken. Hierna wordt getracht een overzicht te geven wat de aard van de invloed per natuurlijke verandering of menselijke ingreep op de waterbeweging is. Voor dit overzicht is gebruik gemaakt van de informatie uit de voorgaande hoofdstukken. Om het overzicht te complementeren is daarnaast een analyse uitgevoerd naar overeenkomstige effecten binnen groepen van natuurlijke veranderingen of menselijke ingrepen, welke leiden tot een verandering in de komberging of in de diepte van het estuarium of van een geul. De aard van de effecten is in te schatten, door een aantal historische situaties vanaf de 17e eeuw te vergelijken met die van de 20e eeuw (Coen, 1988; Van der Spek, 1997).

De gevolgen van natuurlijke veranderingen zijn over het algemeen beter bekend dan die van de menselijke ingrepen. Volgens Pieters (1999) is de (vastgelegde) verklarende kennis over het Scheldegetij opmerkelijk beperkt. Heel vaak is er gerekend met mathematische modellen naar de gevolgen van afzonderlijke ingrepen. De uitkomsten werden echter achteraf meestal zeer summier 'verklaard' (Pieters, 1999), en van inzicht in het totale effect van alle ingrepen is dus weinig sprake.

In het algemeen kan worden gesteld dat de Westerschelde in de 17e eeuw relatief grote kombergingsgebieden had (paragraaf 7.2). Daarnaast waren het estuarium en de geulen in vergelijking met de huidige situatie ondieper. Door de verkleining van de komberging werd de getijgolf minder vertraagd en reisde sneller van Vlissingen naar Antwerpen. Daarnaast namen weliswaar de getijslag en de gemiddelde snelheden (Coen, 1988) wat toe, maar volgens Van der Spek (1997) namen de maximumsnelheden bij zowel vloed als eb af en ook het verschil in eb- en vloedduur nam af. Vroeger duurde de vloedperiode langer dan de ebperiode, terwijl dat nu vrijwel gelijk is (paragraaf 6.4).

Veranderingen in de waterbeweging zullen leiden tot veranderingen in het sedimenttransport en daarmee tot wijzigingen in de morfologie. Waterbewegingsveranderingen leiden met andere woorden tot veranderingen in het zogeheten 'morfodynamisch systeem'. Een veranderde morfologie heeft weer effect op de waterbeweging. De effecten van een natuurlijke verandering of menselijke ingreep kunnen door de morfologische terugkoppeling worden versterkt of verzwakt. De sterkte van de terugkoppelingen is niet goed bekend. Een voorbeeld van een terugkoppeling is het volgende. Door een verondieping zullen de maximale stroomsnelheden hoger worden, omdat in het algemeen geldt dat, om een gelijk volume water binnen een gelijke tijd door een geul te laten stromen, het water in een ondiepe geul harder moet stromen dan in diepe geul. Dit kan juist leiden tot een verdieping van de geul en daardoor een geringere toename van de maximum stroomsnelheden. Een ander voorbeeld is inpoldering, dat leidt tot een verkleining van het kombergingsgebied. Tevens kan dat leiden tot een vergroting van de getijslag. Dit laatste kan weer leiden tot geulverdieping en daarmee tot een verder toenemende getijslag. Hieruit blijkt ook dat veranderingen in de diepte van het estuarium of de geulen sterk met de veranderingen in de komberging zijn verweven. Het eeuwenlange proces van geulverdieping en verruiming van het estuarium is, kort gezegd, voor een belangrijk deel dan ook een gevolg van de afname van de kombergingsgebieden.

Tabel 8.1 vat de richting van de veranderingen samen. In de tabel staan '+' en '-' voor een toerepectievelijk afname. De omschrijvingen van de gebruikte termen staan in hoofdstuk 11. De verschillende natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen worden gegroepeerd op hun effect op de komberging en de verdieping of verondieping.

De komberging neemt toe door:

- dijkdoorbraken;
- ontpoldering.

De komberging neemt af door:

- verlanding (ophoging van platen en schorren, verzanding van kreken);
- inpoldering;
- afdamming van kreken.

Er is sprake van verdieping door:

- zandexport (dat ook als een gevolg van verdieping gezien kan worden);
- eb- en vloedgeuldynamiek: uitbochten en concentratie van stroming;
- baggerwerk op de drempels;
- zandwinning;
- verruiming/verdieping door stormvloeden;
- zeespiegelstijging en getijslagtoename op de Noordzee en dus aan de monding van de Westerschelde;
- leidammen, oeververdediging e.d. waardoor concentratie van stroming in een geul plaatsheeft.

Verondieping heeft plaats door:

- zandimport;
- eb- en vloedgeuldynamiek: bochtafsnijding en vorming van meerdere geulen;
- storten van baggerspecie.

Tabel 8.2 geeft aan of een natuurlijke verandering of menselijke ingreep een vergrotende of verkleinende invloed heeft op diverse getijkarakteristieken. Tabel 8.2 laat vooral veranderingen ter plaatse van de ingreep zien. Bij een meer precieze analyse van de effecten van een verandering of ingreep is het beter om onderscheid te maken in naast effecten ter plaatse ook die stroomop- en afwaarts ervan (Pieters, 2002b en 2002c). De mate van invloed is in de tabel niet aangegeven. Het is namelijk (nog) niet goed mogelijk om de effecten van verschillende veranderingen op de waargenomen waterbewegingen te scheiden, laat staan te kwantificeren. Welke verandering of ingreep voor de waterbeweging ingrijpender is dan een andere, hangt af van:

- De randvoorwaarden, welke ruimtelijk variëren, zodat de plaats waar de verandering of ingreep plaatsheeft van belang is. De opbouw van de Westerschelde is complex wat betreft de geometrie en de geologie (Pieters en Verspuy, 1997), zodat het effect van eenzelfde ingreep op de ene locatie met een bepaalde geometrie of lithologie anders kan uitpakken dan op een andere;
- De grootte van de verandering of ingreep zelf en de tijdschaal van aanpassing, en daarmee de tijdsperiode waarover men de effecten beschouwt. De effecten van een verandering of ingreep zullen in het begin groot zijn maar in de loop van de tijd afnemen, indien de verandering niet blijft voortduren en geen nieuwe veranderingen en ingrepen volgen. Als

- **Tabel 8.1: Effecten van kombergingsverkleining en -vergroting en van verdieping en verondieping op de getijvoortplantingssnelheid, getijvolume, kombergingsoppervlak en het verticale en horizontale getij.**
De tekens '+' en '-' staan respectievelijk voor 'toename' en 'afname' in absolute zin, '+'/'-' houdt in, dat er zowel van een toe- of afname sprake zou kunnen zijn.

factor	effect verandering		verticaal getij		horizontaal getij	
	getijvolume	kombergingsoppervlak	kombergingsoppervlak	getijvolume	getijvolume	getijvolume
typen veranderingen:						
kombergingsverkleining	+	-	+	+	+	+
kombergingsvergroting	-	+	-	-	-	-
verdieping	+	+	+	+	+	+
verondieping	-	-	-	-	-	-

factor	aard verandering		effect verandering		verticaal getij		horizontaal getij	
	schaaflniveau	getijvolume	kombergingsoppervlak	getijvolume	kombergingsoppervlak	getijvolume	kombergingsoppervlak	getijvolume
natuurlijke veranderingen:								
verandering (oplozing platen en schorren, verzanding trekken)	+	+	+	+	+	+	+	+
zeespiegelstijging en getijpegelname Noordzee	+	+	+	+	+	+	+	+
verzanding en verondieping door stormvloed	+	+	+	+	+	+	+	+
dijsloten	+	+	+	+	+	+	+	+
zandvoort	+	+	+	+	+	+	+	+
zandvoort 5)	+	+	+	+	+	+	+	+
60- en vloedgedrag	+	+	+	+	+	+	+	+
menselijke ingrepen:								
inlooping	+	+	+	+	+	+	+	+
afdamming krekken	+	+	+	+	+	+	+	+
ontdijking	+	+	+	+	+	+	+	+
begraafwerk op drempels	+	+	+	+	+	+	+	+
sorteren baggespecie	+	+	+	+	+	+	+	+
zandwinning	+	+	+	+	+	+	+	+
lediglaten, oeververdediging e.d.	+	+	+	+	+	+	+	+

- **Tabel 8.2: Synthese, op basis van gegevens uit hoofdstuk 5, 6 en 7 en aan de hand van tabel 8.1, van de effecten van natuurlijke veranderingen of menselijke ingrepen in de Westerschelde voor de getijvoortplanting, het getijvolume, het kombergingsoppervlak en de kenmerken van het verticale en horizontale getij.** De tekens '+' en '-' staan respectievelijk voor 'toename' en 'afname' in absolute zin, '+'/'-' houdt in, dat er zowel van een toe- of afname sprake zou kunnen zijn en '0' betekent dat er geen duidelijk effect te verwachten is.

de ingreep zeer groot is, zal het effect niet alleen in het begin zeer groot zijn maar ook veel langer merkbaar zijn;

- Andere ingrepen of natuurlijke veranderingen die (bijna) tegelijkertijd plaatsvinden. Tussen de ingrepen en natuurlijke veranderingen vinden interacties plaats, zodat sommige elkaar kunnen versterken en anderen elkaar kunnen opheffen. Zo heeft een enkele inpoldering alleen lokaal invloed op de waterbeweging, terwijl de serie gelijksoortige inpolderingen tussen 1000 en 1800 resulteerde in o.a. een diepere Westerschelde en een grotere getijvoortplantingssnelheid.

Enkele opmerkingen bij tabel 8.2 zijn de volgende:

- Tabel 8.2 is bedoeld om een globaal beeld te geven van de waargenomen en te verwachten effecten van natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen. Het is gebaseerd op de voorgaande hoofdstukken. De werkelijke effecten kunnen in sommige gevallen sterk afwijken van de hier gepresenteerde effecten. Dit komt deels doordat het weergeven van ingreep/verandering-gevolgrelaties als in tabel 8.2 (en ook in tabel 8.1), geen recht doet aan de ruimtelijke variabiliteit, de interacties tussen de delen en het niet-lineaire karakter van de getijbeweging in de Westerschelde (Pieters, 2002b). Zij gaan, zoals op zo'n manier gegenereerd en gegeneraliseerd, mogelijk alleen op voor eenvoudige of sterk geïdealiseerde, homogene, lineaire systemen. Dat is de Westerschelde niet. Het recht doen aan de ruimtelijke variabiliteit en de interactie tussen de delen vereist dan ook ondermeer een nadere specificatie wat er waar gebeurt. Zo kunnen in het westelijke deel van de Westerschelde de gevolgen van geulprofiel- of bergingsveranderingen ter plaatse en in de andere delen van de Westerschelde sterk verschillen met de gevolgen van gelijksoortige veranderingen of ingrepen in het middengebied, oostelijke deel of het gebied tussen de grens en Bath. Het recht doen aan het niet-lineaire karakter betekent dat beseft dient te worden dat een ingreep of eenzelfde verandering of ingreep in het verleden in de huidige situatie niet hetzelfde gevolg hoeft te hebben. Een voorbeeld is het volgende. Bij het verdiepen van geulen verandert de getijslag, vooral door veranderingen in de hoogwaterstanden. Echter, in gebieden of geulen, die in de loop van de tijd herhaaldelijk zijn verdiept, kan de weerstandsinvloed op een gegeven moment zover zijn afgenomen, dat er bij verdere verdieping door het diepteverschil de weerstand bij laagwater nog wel significant afneemt en bij hoogwater niet meer, waardoor alleen de laagwaterstanden nog veranderen. In het meest oostelijke deel is dit nu het geval.
- Verlanding in combinatie met verdieping van geulen leidt tot een toename van het tijdsverschil tussen het moment waarop het ebdebiet maximaal is en het moment van laagwater. Het verschil tussen het moment van maximaal vloeddebiet en het moment van hoogwater zal nagenoeg gelijk blijven (zie paragraaf 6.4). Deze effecten zijn alleen onderzocht bij de genoemde combinatie van gebeurtenissen, niet bij afzonderlijke factoren, en zijn daarom niet in de tabel opgenomen.
- Eb- en vloedgeuldynamiek kan zowel voor een verdieping als een verondieping zorgen, afhankelijk van de zeer locale condities. Het is dus niet mogelijk hier een eenduidige richting voor aan te geven. Dit toont aan, dat de geuldynamiek lokaal zeer belangrijk is maar het effect ervan onbekend. Op grotere schaal echter kan dit worden gezien als een ruisterm bovenop de grootschaliger en langschaliger ontwikkelingen.
- In de afgelopen eeuwen lijkt overwegend sprake te zijn geweest van een netto zandimport. Een mogelijke oorzaak voor een netto zandimport of -export is het verschil tussen de maximale vloed- en ebstroomsnelheid. Nu lijkt dit snelheidsverschil kleiner te zijn geworden. De zandimport was hierdoor vroeger dan waarschijnlijk ook groter dan tegenwoordig (Van den Berg *et al.*, 1996). Het lijkt nu zelfs (tijdelijk) te gaan neigen naar een sedimentexporterend systeem (De Jong, 2000).

- Voor de morfologische ontwikkeling van het estuarium is de waterstand van belang waarop het eb- of vloeddebiet maximaal is. Sinds 1650 is de tijd tussen hoogwater en het tijdstip waarop het ebdebiet maximaal is, verkort (Van der Spek, 1997). Het ebdebiet is daardoor nu maximaal bij een hogere waterstand. Het moment van het maximale vloeddebiet is niet veranderd.
- De meeste natuurlijke veranderingen spelen zich af op grote tijd- en ruimteschalen, in tegenstelling tot de menselijke ingrepen. Tezamen kunnen de menselijke ingrepen echter wel voor ontwikkelingen op een grote tijd- en ruimteschaal zorgen. Dit geldt met name voor de inpolderingen vanaf de 11e eeuw.
- De veranderingen in de hoogwaterstanden zijn vaak meer uitgesproken dan veranderingen in de laagwaterstanden. Zo is in de loop van de geschiedenis de hoogwaterstand aanzienlijk toegenomen, terwijl de laagwaterstand nauwelijks lager is geworden (Van der Spek, 1997).
- Zeespiegelstijging levert een kombergingsvergroting op, maar de effecten ervan voor de waterbeweging verschillen met die van de kombergingsvergrotenende factoren 'dijkdoorbraken' en 'ontpoldering'. Door de zeespiegelstijging worden laagwaterstanden lager ten opzichte van de gemiddelde waterstand (paragraaf 7.3), maar de gemiddelde waterstand stijgt, zodat de laagwaterstand toch omhoog kan gaan. Zeespiegelstijging kan daarom beter worden gezien als een verdieping, omdat immers de gemiddelde waterstand stijgt en de Westerschelde relatief ten opzichte van die waterstand lager komt te liggen.
- Geplande of voorgestelde ontpolderingen hebben naar verwachting minder invloed op de waterbeweging dan dijkdoorbraken, omdat de oppervlaktes die ermee gemoeid zijn vaak relatief klein zijn. Echter, de ontpoldering van de Hedwigepolder zal direct zeewaarts voor een toename van het vloedvolume van circa 15 miljoen kubieke meter zorgen. Op het aanwezige getijvolume van zo'n 100 miljoen kubieke meter is dat circa 15 procent. De mate van de invloed hangt dus zeker af van de grootte van de ingreep en de locatie. Dijkdoorbraken (meestal geïnitieerd door natuurlijke omstandigheden, soms uit militaire overwegingen) hebben meestal een duidelijk effect op de waterbeweging, maar dit effect verdwijnt weer bij het herstel van de dijken. In het verleden was dijkherstel echter niet altijd meer mogelijk, bijvoorbeeld in het Verdrongen Land van Saeftinge. Bij zulke grote oppervlakten is er wel een aanzienlijke invloed op de waterbeweging.

9 Kennisleemtes en aanbevelingen voor onderzoek

9.1 Soorten kennisleemtes

Met betrekking tot de werking van de grootschalige horizontale en verticale waterbeweging in de Westerschelde en de veranderingen hierin, zijn er diverse kennisleemtes. Deze hangen samen met de kennis over:

- het functioneren van het systeem 'Westerschelde' zelf;
- de afzonderlijke invloed van de diverse natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen.

Het is de kunst de stapgrootte van de vervolgstappen om de kennisleemtes op te lossen zo te kiezen dat deze klein genoeg zijn om te overzien en vooruit te komen, maar niet zo klein dat dit verzandt in theoretische detailstudies (Arends, 1999). Hierna worden diverse aanbevelingen geformuleerd voor vervolgonderzoeken, waarbij de nadruk ligt op onderzoeken die de grootschalige waterbeweging betreffen en die zinvol kunnen zijn voor het beheer.

9.2 Aanbevelingen voor oplossen kennisleemtes rondom de waterbeweging in de Westerschelde

De aanbevelingen met betrekking tot het vergroten van de kennis over de waterbeweging in de Westerschelde zijn de volgende:

- Meer aandacht voor verklarende kennis van het getij in de Westerschelde. Dit is relevant voor ondermeer de bagger- en stortstrategie afzonderlijk en in samenhang met het handhaven van de veiligheid van het estuarium. De volgende aspecten zijn hierbij van belang:
 - *Een systematische basale analyse van het Scheldegetij* (Pieters, 1999). De verklarende kennis is nu opmerkelijk beperkt, zeker gezien het brede en intensieve gebruik van het estuarium. Vaak is er gerekend met mathematische modellen naar de gevolgen van afzonderlijke ingrepen, maar de uitkomsten werden achteraf, meestal slechts zeer summier verklaard;
 - *Vergroten van de kennis van de effecten per natuurlijke verandering of menselijke ingreep*. Hierbij valt te denken aan inzicht in de gevolgen van de ingrepen voor de waterbeweging en morfologie, hun (relatieve) invloed en ontstaanssnelheid van de effecten. Daarnaast is relevant te weten hoe lang de effecten van natuurlijke veranderingen en menselijke ingrepen doorwerken en of er daarbij bijvoorbeeld terugwerkende of tegenwerkende effecten te zien zijn (D.C. van Maldegem, RIKZ, mond. comm., 2002);
 - *Werken met voorstellingen van het momentane, ruimtelijke verloop van de waterbeweging*. Dit om een beter fysisch inzicht te krijgen in de getijbeweging in de Westerschelde, in plaats van te denken in getijgemiddelde of anderszins geschematiseerde golfparameters, die versluierend of soms averechts werken voor het inzicht (Pieters, 2002). Daarnaast wordt aan de onderlinge ruimtelijke interacties tussen het getij in de verschillende delen van het estuarium op verschillende niveaus meer recht gedaan door presentatie van het ruimtelijke verloop van getijkarakteristieken en de eventuele temporele veranderingen daarin, dan met afzonderlijke voorstellingen van eventuele temporele veranderingen in lokale getijkarakteristieken (Pieters, 2002).

- Vergroten van de kennis over de uitgangspositie, en de mate van het morfologisch/hydraulisch evenwicht dat aanwezig is en verstoord kan worden. Een op gedegen kennis van het hydraulisch/morfologisch systeem gebaseerd beleid is nodig voor een doordachte zandwinning-, bagger- en stortstrategie. Nu is de kennis over de aard en toelaatbare of kritische grens van ingrepen daarvoor nog onvoldoende. Ondermeer van belang de reactie van het systeem op lange termijn. De kennis over de getij-asymmetrie en het effect daarvan op de sedimenthuishouding en de morfologie beperkt zich voornamelijk tot de huidige situatie, zoals bijvoorbeeld door Jeuken en Wang (2000) is beschreven. Voor effecten op langere termijn, en het effect van toename en afname van de komberging door in- en ontpolderen zou bepaald moeten worden, hoe de ontwikkeling van de getij-asymmetrie er in de tijd (eeuwen) heeft uitgezien en, als onderdeel van zo'n onderzoek, wat het effect van baggeren hierop is geweest (J.H. van den Berg, Universiteit Utrecht, mond. comm., 2002).
- Er dient meer aandacht te worden gegeven aan de relatieve bijdrage van de verschillende vormen van natuurlijke aandrijving van de waterbeweging. Nu is die nog onvoldoende gekwantificeerd (Stive *et al.*, 1998). Dit houdt in dat er, naast meer kennis over getijwerking, onder andere ook meer kennis benodigd is van:
 - *Het effect van stormen (golven) op de morfologie* (D.C. van Maldegem, RIKZ, mond. comm., 2002);
 - *De effecten van stormen en windvelden op de waterbeweging*. Vooral om die beter in de waterbewegingsmodellen te kunnen brengen (Jansen, 2002);
 - *De snelheid waarmee nu en in de toekomst de hoogwaterstanden stijgen in de Westerschelde en wat de oorzaken en de consequenties hiervan zijn* (Arends, 1999). Deze aspecten zijn relevant voor het kunnen waarborgen van de veiligheid langs de Westerschelde;
 - *De relatie tussen de ontwikkeling van het dagelijks getij en extreem hoogwater* (Arends, 1999). Zie hiervoor ook Pieters (2002). De vraag is namelijk of het systeem anders reageert onder extreme omstandigheden, dan onder 'normale omstandigheden'.

10 Literatuur

- * **Adema, J., 1998:** Effecten van kombergingsvergroting bij de grens op het getij in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport RIKZ/AB-98.835x.
- * **Allersma, E., 1992:** Studie inrichting Oostelijk deel Westerschelde. Analyse van het fysische systeem. Nota voor de Werkgroep OOSTWEST. Waterloopkundig Laboratorium, Delft. Rapport Z368.
- * **Arends, A.A., 1997:** Inventarisatie van de huidige kennis over de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport RIKZ/AB-97.857x.
- * **Arends, A.A., 1999:** Discussie getij, vragen vanuit het beheer. Presentatie. In: Svašek: Getij in de Westerschelde, Verslag van de discussies op 14 oktober 1999.
- * **Arends, A.A., P. Kamermans, E.C. Stikvoort en B. de Winder, 1999:** Monitoring van de effecten van de verruiming 48'-43', Een eerste evaluatie van de bagger- en stortstrategie, Rapport 4. Project Monitoring Verruiming Westerschelde (MOVE). Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport RIKZ-99.019.
- * **Arx, W.S. von, 1962:** An introduction to physical oceanography. Contribution number 1245. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts. Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, Massachusetts, USA.
- * **Battjes, J.A., 1998:** Vloeistofmechanica. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Vloeistofmechanica, Delft. Collegedictaat Ctme2100.
- * **Battjes, J.A., 2001:** Stroming in waterlopen. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Vloeistofmechanica, Delft. Collegedictaat CT3310.
- * **Berg, J.H. van den, 1987:** Toelichting bij de isallobatenkaart Voordelta 1975-1984. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Nota ZL 87.0020.
- * **Berg, J.H. van den, M.C.J.L. Jeuken, A.J.F. van der Spek, 1996:** Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary. K.F. Nordstrom en C.T. Roman (red): Estuarine shores: evolution, environments and human alterations. John Wiley & Sons Ltd, Chicester. Pag. 157-184.
- * **Bliek, A.J. (red.), 1995:** Autonome ontwikkeling Westerschelde. Svašek, Rotterdam. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Den Haag. Rapport nr. 976.
- * **Blomme, J., 2001:** Het belang van de Scheldeverdieping: economische, juridische en politieke context, ecologische impact en veiligheidsaspecten. Antwerp Port Authority, Antwerpen.
- * **Boogaard, L.A. uit den, 1995:** Resultaten zandbalans Westerschelde, 1955-1993. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R95-08.
- * **Boon, J.D., 1988:** Temporal variation of shallow-water tides in basin-inlet systems. D.G. Aubrey en L. Weishar (red.): Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets. Springer-Verlag, New York.
- * **Brand, K.J.J., 1985:** Zeeuws-Vlaanderen, een gebied met een lange en rijke bedijkingsgeschiedenis. Waterschapsbelangen 70, pag. 382-393.
- * **Burgers, E. en R. Hisgen, 1996:** Het getij en wij, Honderd jaar getijtafels voor Nederland. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Sdu Uitgevers, Den Haag.

- * **Cauwenberghe, C. van, 1993:** Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust: periode 1981-1990 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge. Hydrografische Dienst der Kust. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Dienst der Kusthavens - Hydrografie, Oostende. Rapport nr. 40.
- * **Claessens, J. en L. Meyvis, 1994:** Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1981-1990. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Antwerpse Zeehavendienst.
- * **Coen, I., 1988:** Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde. Water 43, pag. 156-162.
- * **Dalrymple, R.W., B. Zaitlin, R. Boyd, 1992:** Estuary facies models. Conceptual basis and stratigraphic implication. Journal of Sedimentary Petrology, 62 (6), pag. 1130-1146.
- * **Dauwe, B., 2001:** Monitoring van de effecten van de verruiming 48'/ 43', Samenvatting van de ontwikkelingen in de Westerschelde (tussenstand 2000), rapport 6. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport RIKZ/2001.025
- * **Dekker, L. en G.P. Bollebakker, 1981:** Getijberekeningen in verband met onderzoek naar de verdieping van de Westerschelde. Deel 1a: Matig springtij. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Vlissingen. Nota WWKZ-81.V008.
- * **Dekker, L., 2001:** MOVE: Datarapport getij en zout 2000. Memo.
- * **Dillingh, D. en P.F. Heinen, 1994:** Zeespiegelstijging, getijverandering en deltaveiligheid. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rapport RIKZ-94.026.
- * **Doekes, J., 1986:** De stijging van de hoogwaterstanden op de Westerschelde in de afgelopen eeuw. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren. Nota GWIO-86.014.
- * **Dronkers, J., 1986:** Tidal asymmetry and estuarine morphology. Netherlands Journal of Sea Research 20 (2/3), pag. 117-131.
- * **Dronkers, J.J., 1964:** Tidal computations in rivers and coastal waters. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- * **Enckevort, I. van, 1996:** Morfologisch onderzoek Westerschelde monding. Deel 1: inventarisatie beschikbare literatuur over en metingen in de Westerschelde monding. Deel 2: morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding sinds 1800. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), in het kader van project KUST*2000. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R96-21.
- * **Friedrichs, C.T. en D.G. Aubrey, 1988:** Non-linear distortion in shallow well mixed estuaries: a synthesis. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 27, pag. 521-545.
- * **Friedrichs, C.T., D.G. Aubrey en P.E. Speer, 1990:** Impacts of relative sea level rise on evolution of shallow estuaries. In: Cheng, R.T. (red.): Residual currents and long-term transport. Springer, New York. Coastal and estuarine studies, 38, pag. 105-122.
- * **Gerritsen, H. en H.F.P. van den Boogaard, 1998:** Getijanalyse Westerschelde. Datarapport getijkomponenten. Toepassing Principal Components Analysis. WL|Delft Hydraulics. Rapport Z2591.
- * **Gerritsen, H., Z.B. Wang, en A.W. van der Weck, 1999:** Morfologische interpretatie van de veranderingen in het getij van de Westerschelde. WL|Delft Hydraulics. Rapport Z2671.
- * **Graas, S., 2001:** Verloop van het getijverschil over het Schelde-estuarium. Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Hydrologie en Ecologie, Delft. Onderzoek uitgevoerd bij Resource Analysis, Delft. Afstudeerrapport.
- * **Heinen, P.F. en M.J.J. Hoogkamer, 1993:** Trends en meteorologische invloeden in gemiddelde zeeniveaus. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren / Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Rapport DGW-93.017.

- * **Helvert, M.A.G. van, 1999:** Onderzoek naar de effecten van baggeren, storten en zandwinning in de Westerschelde m.b.v. het ESTMORF-model i.h.k.v. MOVE. Rijkswaterstaat RIKZ, Middelburg. Werkdocument RIKZ/OS-99.817x.
- * **Holland, A.M.B. en H. Smit, 1994:** Zoet water in het Schelde-estuarium: veranderingen in de saliniteit. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Rapport DGW-93.057.
- * **Huijs, S.E.W., 1995:** Geomorfologische ontwikkeling van het intergetijdengebied in de Westerschelde, 1935-1989. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R 95-3.
- * **Huijs, S.E.W., 1996:** De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R 96-17.
- * **Jansen, M., 2002:** Verbeteren van het SCALWEST-model. Bouw SCALWEST2000-model. Eindrapport deel 2. Svašek, Royal Haskoning. Rapport 8D1206/R01513/GD/Rott2b.
- * **Jeuken, M.C.J.L., 1993:** Morfologische veranderingen van platen en geulen in de Westerschelde gedurende de periode 1965-1990. NWL-93.13.
- * **Jeuken, M.C.J.L., 1994:** Morfologische ontwikkelingen van de geulen en platen in het Valkenisse-gebied (Westerschelde) gedurende de periode 1986-1993. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Notitie NWL-94.15.
- * **Jeuken, M.C.J.L., 2000:** On morphological behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. Phd. thesis.
- * **Jeuken, M.C.J.L. en Z.B. Wang, 2000:** Tidal asymmetry and sediment transport in the Westerschelde estuary: a desk study. WL|Delft Hydraulics, Delft. Rapport Z2864.
- * **Jong, J.E.A. de, 2000:** Zandbalans Westerschelde en monding : periode 1955-1999 Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg. Notitie NWL-00.16.
- * **Jong, H. de, 1989:** Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932. Nota GWAO-89.1004 Rijkswaterstaat DGW, Middelburg.
- * **Kalkwijk, J.P.Th., 1976:** De analyse van getijden. Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, Delft.
- * **Kik, P. en R. Karman, 1993:** Onderzoek naar de mogelijkheden en gevolgen van kombergingsvergroting van het Schelde-estuarium.
- * **Kleef, A.W. van, 1994a:** Het toevoegen van komberging: mogelijke gevolgen voor de baggerhoeveelheden, de troebelheid en de morfologische dynamiek. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Notitie NWL 94.46.
- * **Kleef, A.W. van, 1994b:** Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middelgat. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Notitie NWL 94.119.
- * **Koninklijke Marine | Dienst der Hydrografie, 2000:** Waterstanden, Stroom, langs de Nederlandse kust en aangrenzend gebied, 2001. HP 33, 17e editie.
- * **Krijger, G.M., 1993:** Het verdronken land van Saeftinge komt weer boven water. Rijkswaterstaat, Middelburg. Rapport GWWS-93.838.
- * **Krijger, G.M., 1999:** Monitoring van de effecten van de verruiming 48' - 43'. Voortgangsrapportage periode 1997-1998. Rapport 3. Project Monitoring Verruiming Westerschelde (MOVE). Rijkswaterstaat - Directie Zeeland. Nota AXW-99.005.
- * **Lamb, H., 1932:** Hydrodynamics. Sixth edition. Cambridge At The University Press, Cambridge, UK. Eerste editie is verschenen in 1872.
- * **Langendoen, E.J., 1987:** Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Vloeistofmechanica, Delft. Rapport 5-87.
- * **Liek, G.A., 2001:** Monitoring van de effecten van de verruiming 48'/43'; Beschrijving van de fysische toestand van de Westerschelde t/m 2000. Project MONitoring VERRuiming

Westerschelde (MOVE) Rapport 5. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Rapport RIKZ/2001.02.

* **Looff, A.P. de en H.J. Verhagen, 1986:** Mondingsgebied van de Westerschelde: getijstromen, golfklimaatgegevens bodemligging en morfologische processen. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg. Nota GWWS-86.404.

* **Looff, D. de, 1981:** Onderzoeken gevolgen verdieping Westerschelde met betrekking tot morfologie, zandhuishouding, stortplaatsen en stabiliteit oevers. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Adviesdienst Vlissingen. Nota WWKZ-81.V018.

* **Looff, D. de, 1983:** Inhoudsveranderingen en zandbalans Westerschelde op basis van resultaten van vroeger, over de periode 1878-1971/1972 en recent, over de periode 1971/1972-1980, Uitgevoerde berekeningen. Rijkswaterstaat, Vlissingen. Rapport WWKZ-83.V003.

* **Lorentz, H.A., 1926:** Verslag van de Staatscommissie Zuiderzee. Algemene Landsdrukkerij, 's-Gravenhage.

* **Maas, L.R.M., 1980:** Verbetering van de harmonische getijvoorspelling te Vlissingen door correctie voor windopzet. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport V80-1.

* **Mol, G.J., 1995:** De Westerschelde, een resultaat van menselijke ingrepen. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Rapport RIKZ-95.030.

* **Mol, G.J., A.M. van Berchem en G.M. Krijger, 1997:** De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43', Rapport 1. Beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport RIKZ-97.049.

* **Open University, The, 1989:** Waves, tides and shallow-water processes. Prepared by an Open University Course Team. Pergamon, Oxford.

* **Parker, B.B., 1991:** The relative importance of the various non-linear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review). In: B.B. Parker (red.): Tidal hydrodynamics. John Wiley & Sons, New York. Pag. 237-268.

* **Peelen, R., 1967:** Isohalines in the Delta Area of the Rivers Rhine, Meuse and Scheldt. Classification of waters in the Delta Area according to their Chlorinity and the changes in these waters caused by hydro-technical constructions. In: Netherlands Journal of Sea Research 3/4.

* **Peters, J.J., 2001:** Improving navigation conditions in the Westerschelde and managing its estuarine environment. Expert Team appointed by the Port of Antwerp, Antwerpen.

* **Pieters, T., C. Storm, T. Walhout en T. Ysebaert (red.), 1991:** De Westerschelde, méér dan een vaarweg. Rapportage van een pilotstudie naar de ontwikkeling van de fysische structuur van het Schelde-estuarium, uitgevoerd door de projectgroep OOSTWEST. Rijkswaterstaat Directie Zeeland, Middelburg en Dienst Getijdewateren. Nota GWWS-91.081.

* **Pieters, T., 1993:** Het Schelde-estuarium, Beheren of beheersen? Samenvatting van actuele beleids- en beheersrelevante inzichten uit het project OOSTWEST, betreffende de fysische structuur van het Schelde-estuarium. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren en Directie Zeeland. Rapport DGW-93.032

* **Pieters, T., G.P. Bollenbakker en J. Vroon, 1993:** Berekeningen invloed geulverdiepingen en kombergingsvergroting op het getij Schelde-estuarium. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Werkdocument GWWS-93.862x.

* **Pieters, T. en C. Verspuy, 1997:** Getijanalyse Schelde-estuarium, Invloed plaatselijke veranderingen bergende oppervlakte op getij voortplanting. Een analyse met TRECOS-WESTERSCHELDE 1997. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Vlissingen, Delft. Rapport BGW-97.6.

- * **Pieters, T., 1999:** Het getij, de Schelde en wij. Presentatie. In: Svašek: Getij in de Westerschelde, Verslag van de discussies op 14 oktober 1999.
- * **Pieters, T., 2002a:** Het Scheldegetij, Beschrijving en analyse van het getij in het Schelde-estuarium. In opdracht van Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Bureau Getijdewateren, Vlissingen. Rapport BGW-0102.
- * **Pieters, T., 2002b:** Commentaar rapport “Waterbeweging in de Westerschelde” van drs. J. de Kramer. Bureau Getijdewateren, Vlissingen. In opdracht van Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg. Notitie BGW-011002/n.
- * **Pieters, T., 2002c:** Commentaar op de tabellen 8.1 en 8.2 in “Waterbeweging in de Westerschelde” van drs. J. de Kramer. Bureau Getijdewateren, Vlissingen. In opdracht van Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg. Notitie BGW-091002/n.
- * **Rakhorst, H.D., 1988:** Astronomische cycli in waterstanden. Rijkswaterstaat. Nota 88.ANP.010.
- * **Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), 1994:** Gemiddelde getijkromme 1991.0. Den Haag.
- * **Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), 2001:** Getijtafels voor Nederland, 2002. Sdu Uitgevers, Den Haag.
- * **Rijn, L.C. van, 1994:** Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. University of Utrecht, Department of Physical Geography, Utrecht. WL/Delft Hydraulics, Delft. Aqua Publications.
- * **Ronde, J.H. de, 1983:** Changes of relative mean sea level and of mean tidal amplitude along the Dutch coast. In: Ritsema, A.R. en A. Gürpınar (red.): Seismicity and seismic risk in the offshore North Sea Area. Reidel, Dordrecht. Pag. 131-141.
- * **Ronde, J.H. de, 1985:** Wisselwerking tussen opzet en verticaal getij. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren. Nota GWIO-85.003
- * **Ronde, J.H., de en J.A. Vogel, 1988:** Zeespiegelrijzing, Hydro metro scenario's, Technisch rapport 6. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren. Nota GWAO-88.015.
- * **Roovers, G., 1993:** De Hedwigepolder ontpolderd, de voor- en nadelen van het teruggeven van een polder aan de Westerschelde. RWS-Directie Zeeland. Afstudeerverslag. Werkdocument GWWS-93.861X
- * **Schaap, M., 1998:** Hedwigepolder als gecontroleerd overstromingsgebied, een verkennende studie. RWS-RIKZ. Werkdocument RIKZ: OS-98.882X.
- * **Scheffers, M.B.A.M., 1981:** Interactie tussen het astronomische getij en de windopzet te Vlissingen. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport V81-5.
- * **Schelde Informatie Centrum (SIC), 1999:** De Scheldeatlas, Een beeld van een estuarium. Schelde Informatiecentrum en Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Lno drukkerij/uitgeverij, Zierikzee.
- * **Schoeman, P.K., 2000:** Getijasymmetrie in de Westerschelde. Een 1D model onderzoek naar invloed van geometrie op getijasymmetrie. Technische Universiteit Delft en WL/Delft Hydraulics. Rapport Z2864.
- * **Schönfeld, J.C., 1951:** Propagation of tides and similar waves. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf, 's-Gravenhage. Proefschrift.
- * **Schönfeld, J.C., 1955:** Getijberekening door integratie langs karakteristieken. Rijkswaterstaat, Directie van de Waterstaat, Centrale Studiedienst, 's-Gravenhage. Rapport C.S.D. 55-14.
- * **Slikke, A. van der, 1997:** Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemonding (1969-1993). Een inventarisatie van de dieptegegevens (1800-1996). Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R 97-18.

- * **Speer, P.E. en D.G. Aubrey, 1985:** A study of non-linear tidal propagation in shallow tidal inlet/estuarine systems. Part II: Theory. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 21, pag. 207-224.
- * **Speer, P.E., D.G. Aubrey en C.T. Friedrichs, 1991:** Nonlinear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. In: B.B. Parker (red.): Tidal Hydrodynamics. J. Wiley & Sons, New York.
- * **Spek, A.J.F. van der, 1993:** Getij-simulatie voormalige getijdebekkens, Deel I: de Westerschelde in 1650 en 1800. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R93-10.
- * **Spek, A.J.F. van der, 1994:** Large-scale evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands. Proefschrift, Utrecht.
- * **Spek, A.J.F. van der, 1997:** Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of paleo-tides in the Schelde estuary. Marine Geology 141, pag. 71-90.
- * **Spek, A.J.F. van der, P.J. Frantsen, A. Menkovic en J.H.J. Ebbing, 1997:** De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Programma Kust*2000. Project K2000*KOP. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (NITG) TNO. Rapport NITG-97-284-B.
- * **Steijn, R.C. en J. Adema, 2000:** Stroomvoerend vermogen, getijdinantie en resttransporten: Een verkennend onderzoek toegespitst op de Westerschelde. Alkyon, Emmeloord, Marknesse. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport A569.
- * **Stive M.J.F. en W.D. Eysink, 1989:** Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090. Fase 3. Deelrapport 3.1: Dynamisch model van het Nederlandse kuststelsel. Delft Hydraulics, Delft. Rapport H825(3.1).
- * **Stive, M.J.F., Z.B. Wang, A.W. van der Weck, H.F.P. van den Boogaard en M.J. Baptist, 1998:** Definitiestudie morfologische dynamiek Westerschelde. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). WL|Delft Hydraulics. Definitiestudie Z2427.
- * **Storm, K, 1995:** Morfologische gevolgen van een kombergingsvergroting in het Schelde-estuarium: huidige Oostwest inzichten. RWS-RIKZ. Werkdocument RIKZ/OS-95.801X.
- * **Svašek, 1998:** Lange termijn gedrag Westerschelde, definitiestudie zeespiegelrijzing. Project: Verdieping.
- * **Tank, F.T.G., 1996:** Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Literatuurstudie en hypothesen. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport R96-07.
- * **Tank, F.T.G., 1997:** Empirische relaties tussen plaat- en slikhoogte en getijkarakteristieken in de Westerschelde. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht, Utrecht. Rapport 95-08.
- * **Taveniers, E., 1998:** Evolutie van het getij in het Zeescheldebekken. Water. Wijnegem, België. Nr. 102, pag. 304-308.
- * **Taveniers, E., 2001:** Zeescheldebekken: De afvoer van de Schelde in 2000. Departement leefmilieu en infrastructuur, Administratie waterwegen en zeewezen, Afdeling maritieme Schelde. Verslag AMS.2001.02.
- * **Technische Scheldecommissie, 1984:** Verdieping Westerschelde Programma 48'/43', Studierapport, Deel 1 en 2. Subcommissie Westerschelde, Middelburg en Antwerpen.
- * **Technische Scheldecommissie, 2001:** Langetermijnvisie Schelde-estuarium. Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Middelburg en Antwerpen.

- * **Thurman, H.V., 1978:** Introductory oceanography. Merill, Londen. Pag. 239-261.
- * **Veen, J. van, 1943:** Verdieping Scheldemondd. Rijkswaterstaat Directie Benedenrivieren.
- * **Veen, J. van, 1944:** Schelderegiem en Schelderegie. Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren, R677.
- * **Veen, J. van, 1950:** Eb- en vloodschaarsystemen in de Nederlandse getijwateren. Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, 2^e reeks. Deel 67, pag. 303-325.
- * **Verbeek, H., F.T.G. Tank en M.D. Groenewoud, 1998:** Drempels in de Westerschelde: natuur en mens samen aan het werk. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Rapport RIKZ-98.011.
- * **Verlaan, P.A.J., 1998:** Mixing of marine and fluvial particles in the Scheldt estuary. The research was funded by Ministry of Transport, Public Works and Water Management, National Institute for Coastal and Marine Management (RWS, RIKZ). Thesis Technical University Delft.
- * **Vroon, J., C. Storm en J. Coosen, 1997:** Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Middelburg. Rapport RIKZ-97.023.
- * **Wang, Z.B., P.M.C. Thoolen en R.J. Fokkink, 1997:** Studie naar morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde, Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). WL|Delft Hydraulics. Rapport Z2310.
- * **Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken en H.J. de Vriend, 1999:** Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries, A literature study and application to the Western Scheldt. WL|Delft Hydraulics. Rapport Z2749.
- * **Werkgroep Waterbeheer Westerschelde, 1989:** Beleidsplan Westerschelde. De ecologische ontwikkeling van de Westerschelde. Deelrapport 4: Morfologische structuur en dynamiek. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg en Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.
- * **Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A.J.F. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C Thoolen, Z.B. Wang, 2000:** Lange termijn visie Schelde-estuarium. Cluster Morfologie. Uitvoeringsfase. Deel 1: Hoofdrapport en Deel 2: Appendices. WL|Delft Hydraulics, Delft. Rapport Z2878.
- * **Winterwerp, J.C. en C. Kuijper, 2002:** Morfologisch model Westerschelde, Verkennende studie naar operationalisering. Opdrachtgever Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). WL|Delft Hydraulics. Verslag Z3222.
- * **Witteveen+Bos, 1999:** Getijanalyse Westerschelde. In opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Deventer. Rapport Rw741.1.

11 Definities

Dagelijkse ongelijkheid = Het hoogteverschil tussen de beide astronomische hoogwaterstanden (of laagwaterstanden) op een kalenderdag.

Debiet = De hoeveelheid water die per tijdseenheid door een doorsnede stroomt.

Doodtij = Het minst ontwikkelde van de getijden kort na het eerste of laatste kwartier (in het Nederlandse gebied na 2 à 3 dagen) door tegenwerking van de maan- en zoninvloed.

Drempel = Een ondiepte over de volle breedte van een geul, veroorzaakt door sedimentatie.

Eb = Afgaand water. a. De toestand waarin de ebstroom overheerst. b. Het dalen van de waterspiegel na de vloedkentering.

Ebdebiet = De hoeveelheid water die tijdens eb door een doorsnede stroomt.

Ebstroom = Stroom in de richting die overheerst bij zakkend water.

Ebgeul = Een getijgeul, die voornamelijk open ligt voor de ebstroom en die aan het zeewaartse einde een drempel heeft.

Ebvolume = De totale hoeveelheid water, die tussen de vloed- en ebkentering van een getijde door een zekere dwarsdoorsnede stroomt.

Gemiddelde getijslag = Het verschil tussen de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden.

Gemiddeld zeeniveau (gemiddelde zeestand, gemiddelde hoogte van de zeespiegel) = Het rekenkundig gemiddelde van de waterstand in een gebied over een bepaalde periode.

Getij (tij, getijde) = a. Het periodiek rijzen en dalen van het water als gevolg van de aantrekkingskrachten van maan en zon. b. De waterbeweging gedurende één volledige getijperiode.

Getij-asymmetrie = a. Verschil in eb- en vloedduur. b. Verschil tussen de amplitude bij hoog- en laagwater. c. Verschil in rijzings- en dalingsduur, dat wil zeggen het verschil tussen de tijd tussen laag- en hoogwaterkentering enerzijds en de tijd tussen hoog- en laagwaterkentering anderzijds.

Getijslag (getijverschil) = Het verschil in waterstand bij hoog- en laagwater van een bepaald getijde.

Getij-volume = Som van het eb- en vloedvolume.

Hoogwater = De toestand van de hoogste getijstand of de hoogste getijstand zelf.

Hoogwaterstand = De hoogste getijstand.

Horizontaal getij = Variaties in debieten en stroomsnelheden onder invloed van het getij.

Kentering = Het veranderen van de getijstroom van de ene hoofdrichting in de tegengestelde hoofdrichting.

Komberging = Inhoud waarin het water zich kan bevinden tussen hoog- en laagwater minus het volume van boven het laagwaterniveau uitstekende platen, slikken, schorren en eventuele constructies.

Kreek = Kleine natuurlijke waterloop in begroeid gebied, staand onder invloed van het getij.

Laagwater = De toestand van de laagste getijstand of de laagste getijstand zelf

Laagwaterstand = De laagste getijstand.

Normaal Amsterdams Peil (N.A.P) = Het Nederlandse standaard vergelijkingsvlak voor de hoogteligging.

Plaats = Hoog gelegen (zand)bank, die bij laagwater droogvalt.

Schor = Buitendijks aangeslibd land, dat bij een gewone vloed niet meer onderloopt en doorgaans begroeid is.

Sedimentatie = Het proces van bezinking van deeltjes in het water door de zwaartekracht.

Slik = Buitendijks aangeslibde, onbegroeide grond die bij vrijwel elk hoog water onderloopt.

Shoaling = De verandering die een golf ondergaat die geleidelijk in ondieper water komt. De verandering betreft met name die in de verhouding tussen de voortplantingssnelheid in het ondiepere water en in diep water en de verhouding tussen de golfhoogte in het ondiepere water en in diep water. Deze verhoudingen worden verondiepingscoëfficiënten genoemd.

Springtij = Het meest ontwikkelde van de getijden kort na nieuwe of volle maan (in het Nederlandse gebied na 2 à 3 dagen) door maximale samenwerking van de zon- en maaninvloed.

Staande golf = Golf, die zich niet in horizontale richting verplaatst. Het ontstaat uit twee gelijke maar in tegengestelde richting lopende golven. Het wateroppervlak oscilleert in verticale zin tussen zich niet verplaatsende knopen (resultaat van inkomende en volledig teruggekaatste golven).

Stormvloed = Een hoogwaterperiode in het gebied tijdens storm, gedurende welke het hoogwaterpeil een vastgestelde waarde bereikt of overschrijdt.

Verticaal getij = Waterstandsfluctuaties onder invloed van het getij.

Vloed = Opkomend water. a. De toestand waarin de vloedstroom overheerst. b. Het stijgen van de waterspiegel na de ebkentering.

Vloeddebiet = De hoeveelheid water die tijdens vloed door een doorsnede stroomt.

Vloedgeul (vloedschaar) = Een getijgeul, die voornamelijk open ligt voor de vloedstroom en die aan het landwaartse einde een drempel heeft.

Vloedstroom = Stroom in de richting die overheerst bij stijgend water.

Vloedvolume = De totale hoeveelheid water, die tussen de eb- en vloedkentering van een getijde door een zekere dwarsdoorsnede stroomt.

Grotendeels naar (deels aangepast):

* **Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO), 1986:** Verklarende hydrologische woordenlijst. Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, 's-Gravenhage. Rapporten en Nota's, No. 16.

* **Schelde Informatie Centrum (SIC), 1999:** De Scheldeatlas, Een beeld van een estuarium. Schelde Informatiecentrum en Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), LNO drukkerij/uitgeverij, Zierikzee.

* **Whittow, J. B., 1984:** The Penguin Dictionary of Physical Geography, Penguin Books.



INTERUNIVERSITAIR CENTRUM VOOR GEO-ECOLOGISCH ONDERZOEK

Het ICG onderzoekprogramma richt zich op de volgende thema's gebundeld in het onderzoekprogramma **"Patterns and Processes in Changing Environments"**.¹

1. "Dynamics and Palaeorecords of Depositional Environments"

- a. "Dynamics and evolution of river and coastal systems"
- b. "Palaeoclimatology and paleoecology of the Quaternary"

2. "Functioning of Landscape Ecosystems"

- a. "Processes and change in terrestrial ecosystems"
- b. "Processes and changes in geomorphological systems"

Bij vele onderzoeken wordt gebruik gemaakt van technieken van "Methods, data analysis and modelling". Een deel van de ICG medewerkers houdt zich bezig met ontwikkelen en uitvoeren van deze technieken.

De rapporten die in de ICG-reeks verschijnen worden in zeer beperkte oplage gedrukt en worden verspreid onder deelnemende onderzoeksgroepen en andere belangstellenden. Overname van gegevens en/of citeren is alleen toegestaan na overleg met de auteur(s) en/of leider(s) van het onderzoek. Losse afleveringen zijn verkrijgbaar bij onderstaande personen:

Fysische Geografie en Milieukunde
Universiteit Utrecht

Dr. J.H. van den Berg
(030-2532752)

IBED/Fysische Geografie en Bodemkunde
Universiteit van Amsterdam

Dr. Ir G.B.M. Heuvelink
(020-5257448)

IBED/Palynologie en Paleo/Actuo-ecologie
Universiteit van Amsterdam

Prof dr. H. Hooghiemstra
(020-5257857)

Kwartairgeologie en Geomorfologie
Vrije Universiteit Amsterdam

Dr. C. Kasse
(020-4447381)

Centrum voor Isotopenonderzoek
Rijksuniversiteit Groningen

Afdeling Geografie en Geologie,
Fysische Geografie en Regionale Geografie
Katholieke Universiteit Leuven, België

TOT NU TOE VERSCHENEN:

- 95/1 Zecberg, J.J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The nature and distribution of Late Pleistocene dunes in the European lowlands and on the Russian platform*
- 95/2 Dinter, M. van, Sorber, A.M. en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal en de Gelderse IJssel tijdens het hoogwater van januari en februari 1995*
- 95/3 Sorber, A.M. en G. de Vaan, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ruimtelijke variatie van de sedimentaire structuur en textuur van de bedding van de Grensmaas (stuw Borgharen, km. 15.5 - Maaseik, km. 52.7)*
- 95/4 Hessel, R., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Investigation of drought patterns - a case study in Southern Germany*
- 95/5 Meursing, L., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *De hydraulische ruwheid van doorstroomde vegetatie. Analyse van gepubliceerde model- en prototype metingen.*

¹ Research Programme 1999-2003

1996

- 96/1 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Suspended sediment concentrations during high discharge events in the river Rhine.*
- 96/2 Makaske, B. en M. Terlien, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Le développement géomorphologique de la partie méridionale du Delta intérieur du Niger.*
- 96/3 Van der Wateren-de Hoog, B., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Adaptation of a daily weather generator to represent long term precipitation persistence.*
- 96/4 Fehse, J. Universiteit van Amsterdam, Sectie Palynologie en Paleo/Actuo-ecologie: *The Chocó biogeographic region - high levels of biodiversity and endemism threatened in Colombia's Pacific lowland.*
- 96/5 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Grainsize characteristics used to identify sediment transport pathways on fine grained aggrading floodplains.*
- 96/6 Boer, A. de, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *(Semi)automatische meetsystemen voor het sedimenttransport in rivieren - literatuurstudie.*
- 96/7 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sediment transport in de Nederlandse rijntakken -verwerking metingen 1988-1995 en toetsing transportvergelijkingen.*
- 96/8 Hesselink, A.W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Eilanden en zandbanken in de Rijntakken rond 1850*
- 96/9 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sediment transport in the dutch Rhine branches - annual transport and interim sediment budget.*

1997

- 97/1 Asselman, N., van Deursen, W., Kwadijk, J., Middelkoop, H. en C. Wesseling (Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie) van Dijk, P. en F. Kwaad. Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Environmental change and the river Rhine, implications for discharge, sediment supply and water management - progress report 1*
- 97/2 Kabout, J.A.H., Hesselink, A.W. en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal tijdens het hoog water van februari en maart 1997.*
- 97/3 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: betrouwbaarheidsanalyse en meetstrategie.*
- 97/4 Bruinsma, M. en J.C.J. Kwadijk, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Uitbreiding Rhine Flow Model 1902 - 1980*
- 97/5 Storms, J. en J.C.J. Kwadijk, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Verandering van de kans op extreme afvoeren 1990 - 2100 voor het UKHI klimaat scenario.*
- 97/6 Hoek, W.Z., Vrije Universiteit, Sectie Kwartairgeologie en Laaglandgenese: *Reference list of Late glacial and Early Holocene pollen diagrams from The Netherlands and adjacent parts of Belgium and Germany.*
- 97/7 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater Maart 1997.*
- 97/8 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken.*
- 97/9 Ancker, J.A.M. van den en Jungerius, P.D., Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek, Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Eolische processen langs de Waal, zomer 1997.*

1998

- 98/1 Wateren, B. van der, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Een afvoer model gebaseerd op het probability distributed principe.*
- 98/2 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The impact of climatic change on suspended sediment transport in the river Rhine*
- 98/3 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Finding the most suitable slope stability model for the assessment of the impact of climate change on a landslide in South East France*
- 98/4 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The impact of climate change on a landslide in South East France, simulated using different GCM-scenarios and downscaling methods for local precipitation.*
- 98/5 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Modelling the impact of climate change on a landslide in the Italian Dolomites*
- 98/6 Dijk, P.M. van and Kwaad, F.J.P.M., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Estimation of suspended sediment supply to the stream network of the river Rhine under present-day climate and land use*
- 98/7 Hesselink, A.W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ontwikkeling van de uiterwaarden langs de Lek. Vanaf de 16e eeuw tot heden*
- 98/8 Imeson, A.C., Cammeraat, L.H. and Bergkamp, G., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Mediterranean Desertification and Land Use. Annual report for 1996*
- 98/9 Blom, J. van, Coppus, R., Dekker, L.C. and Sevink, J., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *De bodems van de loofbossen op de oudere duinen en strandwallen van de Nederlandse kust. Profielontwikkeling en bodemverzuring*
- 98/10 Lenders, R., Maren, B. van and Mol, J.-W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Wind-, golf-, en stormingsgeïnduceerd sedimenttransport in kribvakken langs de Waal*
- 98/11 Lev, T., M. van der Perk, A. Gillett, J.P. Absalom, N.M.J. Crout and G. Voigt, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *GIS-based modelling of radiocaesium transfer to agricultural food products in the Chernigov region, Ukraine.*
- 98/12 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Bodemtransport en duinontwikkeling tijdens afvoergolven in de Rijn en Waal.*
- 98/13 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Kalibratie van de Valbuis Fysische Geografie Utrecht.*
- 98/14 Cohen, K.M., S. Quartel en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Zanddikte op de oeverwallen van de Waal (km 900 - 910) een jaar na het hoogwater van 1997.*
- 98/15 Schans, H., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Representativiteit van kribvakmetingen uit 1996 en 1997 ten opzichte van de hele Waal.*
- 98/16 Schans, H., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Bed level development in Bovenrijn, Panmerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal.*
- 98/17 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Estimation of the sediment load in the lower Rhine basin using sediment rating curves.*
- 98/18 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The concept of a suite of linked models to simulate sediment transport in the Rhine basin.*
- 98/19 Wilbers, A.W.E., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ruimtelijke variabiliteit van duinkarakteristieken in de Waal tijdens een afvoergolf in 1997.*
- 98/20 Dijk, P.J.M. van, Kwaad F.J.P.M. Universiteit van Amsterdam, Fysische Geografie en Bodemkunde: *The Rhine basin sediment supply model: the quality of morphometric input parameters and snowmelt modelling.*

- 98/21 Hesselink, A.W., Universiteit Utrecht, Disciplinegroep Geomorfologie en Klimaat: *Beschrijving van steekboringen in twee uiterwaarden langs de IJssel en de Waal, Nederland. Data rapport.*
1999
- 99/1 Cohen K.M. & H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Inventarisatie van zand op oeverwallen van de Waal (km 900-917) na het hoogwater van November 1998.*
- 99/2 Tietema A., Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie en Bodemkunde: *Nitraatuitspoeling in een intrekegebied bestudeerd met een dynamisch GIS.*
- 99/3 Hiemstra J.F. & J.J.M. van der Meer, Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie en Bodemkunde. *Neogene Glacial History at the Allan Hills, Antarctica – Section Logs*
- 99/4 Moor J.J.W. , Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit der Aardwetenschappen, Kwartairgeologie en Geomorfologie: *Sub-arctic Rivers in Northern Russia. The influence of vegetation, landscape, climate and hydrology on the river morphology of two catchments areas in the Usa Basin in Northeast-European Russia.*
- 99/5 Dijk P.M. van & F.J.P.M. Kwaad, Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie en Bodemkunde: *The supply of sediment to the river Rhine drainage network*
- 99/6 Kleinhans M.G., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater november 1998*
- 99/7 Hesselink A.W., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Opzet digitale inventaris oude rivierkaarten: combineren van verschillende inventarissen van oude rivierkaarten.*
- 99/8 Wilbers A.W.E. & M.G. Kleinhans, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Gevoeligheidsanalyse dune tracking in 2 dimensies.*
- 99/9 Middelkoop, H. & A. Kroon: Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Analyse historische waterstanden Maas -Benedenrivierengebied.*
- 99/10 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Bodemtransport en duinontwikkeling in de Rijntakken: bodempeilingen hoogwater november 1998.*
- 99/11 Linden, S. van der, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Modelling runoff in arctic river systems: the impact of climate change.*
- 2000**
- 00/1 Tietema, A. & J. Kros, Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica, Fysische Geografie: *Modelling critical nitrogen loads and nitrate leaching in Dutch forest ecosystems.*
- 00/2 Tietema, A., Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica, Fysische Geografie: *Validatie van gemodelleerde nitraatuitspoeling in bossen.*
- 00/3 Dankers, R., Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Application of remote sensing in hydrological modelling of sub-arctic environments, a literature review.*
- 00/4 Middelkoop, H., N.E.M. Asselman, H. Buitenveld, M. Haasnoot, J.C.J. Kwadijk, J.A.P.H. Vermulst, W.P.A. van Deursen, P.M. van Dijk, and C. Wesseling, Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *The impact of climate change on the river Rhine and the implications for water management in the Netherlands.*
- 00/5 Kroon, A., S. Vermeer, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Eolische processen Millinger Duin.*
- 00/7 Veer J.A. , Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit Aardwetenschappen, Afdeling Kwartairgeologie en Geomorfologie: *Geochemical comparison of Lateglacial lacustrine deposits in the Weerterbos area (southern Netherlands)*
- 00/8 Middelkoop H. & B.G. Ruessink, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Analyse historische waterstanden Maas - Benedenrivierengebied II.*

- 00/9 Putten, M.J. van, Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit Aardwetenschappen, Afdeling Kwartairgeologie en Geomorfologie : *Fluvial response to climatic fluctuations in north eastern European Russia*.
- 00/10 Pebesma, E.J., R.N.M. Duin & A.M.F. Bio, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Spatial interpolation of sea bird densities on the Dutch part of the North Sea*.

2001

- 01/1 Bogaard, T.A. & M.R. Hendriks, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Hydrological pilot study of the Ijen caldera and Asembagus irrigation area*. Technical report. Visit 14-28 August 2000.
- 01/2 Dankers, R. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *TANAFLOW, a large-scale water balance model of the Tana river basin*.
- 01/3 Kleinhans, M. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Calibratie van bodem-transportmeetmethoden, literatuurstudie*
- 01/4 Lloyd Davies, Mark T. & Jaap J.M. van der Meer, Universiteit van Amsterdam, Faculteit NWI/IBED: *Neogene Glacial History of the Allan Hills. South Victoria Land, Antarctica-Field Report, 1999-2000*
- 01/5 Middelkoop, H. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Morfologische karakterisatie van het Nederlandse benedenrivierengebied, verkenning van parameters*.
- 01/6 Kleinhans, M.G., A.W.E. Wilbers & J.H. van den Berg, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Effect van het getij op het sedimenttransport in de Merwede: Proefmeting splitsingspunt, April 2001*. ISBN 90-77079-01-7
- 01/7 Wilbers, A.W.E. & J.H. van den Berg, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Beddingvormen en baggerwerk in de Waal*. ISBN 90-77079-02-5

2002

- 02/1 Frings, R.M. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Duinen, hydraulische ruwheid en bodemtransport in het zomerbed van de Maas bij Broekhuizen*. ISBN 90-77079-03-3
- 02/2 Perk, M. van der, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *"Evaluatie van het effect van vooroeververdediging op de ontwikkeling van de waterbodemkwaliteit van de vooroevers van de Lek"*. ISBN 90-77079-04-1
- 02/3 Lloyd Davies, M.T. & J.J.M. van der Meer: Universiteit van Amsterdam, Faculteit NWI/IBED: *The Glacial History of the East Antarctic Ice Sheet at Allan Hills and Mount Feather and contemporary Glacial processes at Blood Falls, Taylor Valley, Antarctica-Field Report, 2001-2002*. ISBN 90-77079-05-X
- 02/4 Pebesma, E.J. & A.M.F. Bio, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Landsdekkende interpolatie van aanwezigheid van plantensoorten*. ISBN 90-77079-07-6
- 02/5 Pebesma, E.J., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Interpolating sea bird densities: cokriging temporal changes and block aggregate estimates*. ISBN 90-77079-06-8
- 02/6 Kramer, J. de, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Waterbeweging in de Westerschelde, een literatuurstudie*. ISBN 90-77079-08-4