

**“Het Scheldegetij” (rapport
BGW-0102) met oplegnotitie.**

WERKDOCUMENT RIKZ/ZDA/2005.801.w

**Auteurs oplegnotitie :
Ir. D. Dillingh & Dr. J. Graveland
februari 2005**

**Auteur rapport ‘Het Scheldegetij’ :
Ir. T. Pieters, Bureau Getijdewateren
juni 2002**

Aan
Projectteam ZEEKENNIS
Belanghebbenden

Van
Douwe Dillingh, Jaap Graveland

Doorkiesnummer
070-3114356, 0118-672283

Datum
15 februari 2005

Nummer
RIKZ/ZDA/2005.801.w

Onderwerp
Rapport "Het Scheldegetij" (Rapport
BGW-0102) met oplegnotitie.

Project
ZEEKENNIS

Dit werkdocument bestaat uit twee delen. Het eerste deel bevat de door Douwe Dillingh en Jaap Graveland opgestelde oplegnotitie bij het rapport "Het Scheldegetij". In het tweede deel is het rapport 'Het Scheldegetij', auteur Tom Pieters Bureau Getijdewateren, opgenomen.

DEEL I

Oplegnotitie bij rapport "Het Scheldegetij"

Inleiding

RIKZ heeft in het kader van het project Zeekennis aan het Bureau Getijdenwateren van Tom Pieters gevraagd een rapport op te stellen over de ontwikkeling van het getij in de Westerschelde en over de achterliggende oorzaken van die ontwikkelingen. Door omstandigheden kon het rapport niet worden afgerond. Dat is her en der ten koste gegaan van de toegankelijkheid van het rapport. In deze oplegnotitie geeft RIKZ haar oordeel over de bruikbaarheid van het rapport in zijn huidige vorm voor het beleid, beheer en onderzoek aan het Schelde-estuarium.

Eerst wordt de inhoud van het rapport beknopt weergegeven (A). Daarna wordt commentaar gegeven op een aantal aspecten van het rapport (B). Tenslotte worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek (C).

A. De inhoud van het rapport

De in het rapport beschreven studie levert een bijdrage aan de verbetering van het fysisch inzicht in de getijbeweging in het Schelde-estuarium.

Na een samenvatting, voorwoord en inleiding wordt in **hoofdstuk 3** de fysica van het getij van oceaan naar estuarium beschreven. Besproken worden de fysische basiswetten, de astronomische oorsprong van de getijverwekkende krachten, de getijbeweging op de oceanen en het gedrag bij de voortplanting ervan naar ondiepe zeeën en estuaria zoals het Schelde-estuarium. Hierbij is aandacht voor de transmissie (voortplanting) en reflectie (terugkaatsing) van getij-energie van de getijgolf bij profielveranderingen in het estuarium voor een enkelvoudige sinusvormige getijgolf. Een belangrijk eerste resultaat is dat de toename van het getijverschil landinwaarts over een groot deel van het estuarium in het geval van het Schelde-estuarium niet, zoals vaak wordt gedacht,

het gevolg is van het zogenoemde “shoalen” van de getijgolf, maar van wat opgevat kan worden als soort reflectie. Hierdoor ontstaat een waterbeweging die zich bevindt tussen die van een lopende en een staande golf. Voor het inzicht en begrip van dit soort aspecten is de harmonische methode heel geschikt. Nadere uitwerking volgt in hoofdstuk 4.

In **hoofdstuk 4** wordt de waterbeweging in een getijgolf mathematisch verder uitgewerkt. Er is veel aandacht voor de harmonische methode. Deze methode maakt gebruik van de ééndimensionale en gelineariseerde continuïteitsvergelijking en bewegingsvergelijking. Doel ervan is niet om een nauwkeurige kwantitatieve analyse te maken van de getijbeweging, maar het inzichtelijk en begrijpelijk maken van de factoren en processen, die op systeemniveau de getijbeweging in het estuarium bepalen.

Bij een ééndimensionale benadering worden de complexe geometrie en waterbeweging geschematiseerd tot stroming van uniform water (b.v. geen zoet-zout-verschillen) in een stelsel van kanalen met constant dwarsprofiel en bodemwrijving. Linearisatie van de twee vergelijkingen waarmee de waterbeweging kan worden beschreven houdt in dat de kwadratische termen uit deze vergelijkingen worden vervangen door benaderende lineaire termen, dus zonder machtsverheffing, waardoor ook een analytische oplossing in de vorm van een wiskundige formule in een kanaal mogelijk is. De methode dient dan ook vooral voor kwalitatief inzicht. De volledige vergelijkingen laten zich alleen numeriek oplossen, waarbij de oplossing dus niet gegeven kan worden als een wiskundige formule. Hierbij zijn computers onontbeerlijk.

Hoofdstuk 5 beschrijft het optredende Scheldegetij en verklaart de voortplanting ervan van de Noordzee naar de Zeeschelde. Eerst wordt het getij op de Noordzee beschreven, gevolgd door een beschrijving van het optredende getij langs de Zuidnederlandse en Vlaamse kust. Vervolgens wordt de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium landinwaarts beschreven, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen het mondingsgebied, de Westerschelde en de Zeeschelde (het Belgische deel van de Schelde). Rode lijn is dat de geobserveerde veranderingen in het getij consistent, in relatie tot mogelijke oorzaken, geheel consistent zijn met de getijtheorie.

Mondingsgebied

De getijamplitude neemt af in noordoostelijke en zeewaartse richting als gevolg van het amfidromische systeem op de Noordzee. In een amfidromisch systeem draait de bult van een getijgolf bij hoogwater rond een punt, het amfidromische punt, waar geen verticale getijbeweging is. Lijnen van gelijke fase in het getij stralen als het ware vanuit dit punt. Het ontstaat door de gecombineerde werking van de vorm van de oceaan of zee en het effect van de zogenaamde Corioliskracht als gevolg van waterbeweging over een draaiend aardoppervlak. De invloed van de weerstand (bodempwrijving) in het mondingsgebied is gering. Daardoor zijn waterstand en snelheid nagenoeg in fase. Dat betekent dat maximale stroomsnelheden optreden op of dicht rond hoogwater en laagwater, terwijl de kentering op ongeveer de gemiddelde zeestand plaatsvindt.

Verhanglijnen Westerschelde en Zeeschelde

Het ruimtelijk verloop van de waterstand op een bepaald tijdstip vormt een zogenaamde waterstandsverhanglijn. De getijvoortplanting in Westerschelde en Zeeschelde wordt inzichtelijk gemaakt door waterstandsverhanglijnen te geven voor gemiddeld getij op hele uren na het tijdstip van hoogwater in Vlissingen. Ook worden lijnen van hoogwater- en laagwaterstanden gegeven voor gemid-

deld getij, gemiddeld springtij en gemiddeld doortij. De vervorming van het getij vanaf Vlissingen landinwaarts is helder waar te nemen uit deze lijnen. De belangrijkste zichtbare vervormingen zijn bij gemiddeld getij de toename van het tijverschil tot 80 à 100 km landinwaarts van Vlissingen (ongeveer tussen Antwerpen en Rupel) gevolgd door afname tot Gent, de afname van de loop-snelheid van top en dal landinwaarts, het steiler worden van het deel van de golf vóór de top en het sterk oplopen van de laagwaterstand landwaarts van Antwerpen. De invloed van de geometrie van het estuarium is hierbij heel bepalend.

Significante veranderingen van de getijkarakteristieken in het verleden

De ontwikkeling van het verticale getij (waterstanden) wordt beschreven aan de hand van de ontwikkeling in de tijd van het ruimtelijk verloop van de tienjarige gemiddelden van de hoog- en laagwaterstanden over de periode 1888-1990. De achtergrond van het gebruik van tienjarige gemiddelden is dat die nauwkeurig genoeg zijn om ontwikkelingen te tonen gedurende een eeuw, en anderzijds grof genoeg zijn om het tonen van ruimtelijke verschillen hanteerbaar te maken. Daarbij worden drie duidelijke karakteristieke fasen in de ontwikkeling van het getij in de vorige eeuw onderscheiden: de perioden 1890-1940, 1940-1970 en 1970-1990.

Periode 1890-1940

In deze periode stijgen de hoogwaterstanden over de gehele Westerschelde en Zeeschelde vrij gelijkmatig als gevolg van de gemiddelde zeespiegelstijging. De hoogwaterstanden stijgen daarbij iets sterker dan de gemiddelde zeespiegel, de laagwaterstanden iets minder sterk, of dalen zelfs in het Belgische deel. Deze ontwikkelingen worden deels verklaard vanuit de weerstand, die lager is bij hogere waterstanden. De daling van de laagwaterstanden op de Beneden-Zeeschelde wordt met name verklaard uit het nautisch baggerwerk en bergingsveranderingen door inpolderingen in het grensgebied.

Periode 1940-1970

Op de Westerschelde gaat in deze periode de gelijkmatige stijging van de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden als gevolg van de zeespiegelstijging door. In het grensgebied wordt dit beeld enigszins verstoord, mogelijk door het staken van de baggerwerken in de oorlogsjaren en de intensivering ervan daarna.

Periode 1970-1990

In deze periode treden de sterkste en meest markante veranderingen op. Overal dalen de laagwaterstanden t.o.v. het gemiddelde van 1960-1970, van Bath tot aan de monding van de Rupel zelfs sterk. Daar stijgen de hoogwaterstanden ook sneller dan zeewaarts van Bath. Samen levert dat de sterkste stijging van de getijslag over dit traject in de afgelopen eeuw. Het rapport verklaart dit uit de verruiming van het grensgebied en de Beneden-Zeeschelde, als eerste fase van de algehele verdieping van de vaargeul in de jaren zestig en zeventig. De sterke stijging van het gemiddelde hoogwater over de periode 1981-1990 ten opzichte van de periode 1971-1980 vanaf Bath landwaarts over de gehele Zeeschelde valt toe te schrijven aan verruiming in het Oostelijk deel van de Westerschelde.

Doordringing van stormvloed

De ontwikkeling van de doordringing van stormvloed in de afgelopen eeuw vertoont in grote lijnen een overeenkomstig beeld met de ontwikkeling van het gewone getij. De ontwikkeling wordt beschreven aan de hand van het ruimtelijk verloop van de hoogwaterstanden van de 18 zogenoemde buitengewone

stormvloeden - stormvloeden die een stand van tenminste TAW +7,00 m te Antwerpen bereiken - in het Schelde-estuarium in de periode 1906-1991. Evenals het gemiddelde getij dringen ook de stormvloeden in de periode 1906-1966 steeds verder door in het estuarium. Met name de stormvloeden na de Tweede Wereldoorlog veroorzaken vanaf Temse in de tijd steeds hogere hoogwaterstanden, overeenkomend met de ontwikkelingen voor het gemiddeld tij over de periode 1940-1970. Dit lijkt te worden veroorzaakt door de verruiming door de na de Tweede Wereldoorlog geïntensiveerde baggerwerken. De stormvloeden in de zeventiger jaren dringen sterker door op de Beneden-Zeeschelde vanaf de grens, het gebied dat rond 1970 met enkele meters is verdiept.

De stormvloeden in de tachtiger jaren krijgen tussen Hansweert en Bath al een grotere versterking. Het dagelijks getij vertoont dit gedrag ook. Dit wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door verdiepingen van de drempels en de verruiming van de geulen in dit gebied in het kader van de vaarwegverdieping in de zeventiger jaren. De stormvloeden van 1990 (drielingstorm) bevestigen dit.

Het rapport meldt dat verschillende publicaties in het recente verleden aangeven dat 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 stormvloeden.

In de LT-visie Schelde-estuarium (Technische Schelde Commissie, 2001) wordt geconstateerd dat op bijna alle plaatsen het getij toeneemt. Dit gebeurde in het verleden al door inpolderingen en gaat nog door, bijvoorbeeld door het verruimen van de vaargeul en het vaargeulonderhoud. Dit heeft echter geen invloed op de extreme stormvloedstanden. Het verder doordringen van het getij is ook in Antwerpen duidelijk merkbaar. Tot nu toe zijn er geen aanwijzingen dat dit van invloed is op de extreme hoogwaterstanden en het risico van overstromen.

Het rapport laat echter zien, aan de hand van de ontwikkelingen in de tijd van het ruimtelijk verloop van de tienjarige gemiddelden, dat de getij-ontwikkeling met zeer grote waarschijnlijkheid kan worden verklaard uit aanvankelijk zeespiegelstijging, de veranderingen in het middengebied en in de laatste halve eeuw uit geometrieveranderingen door vaargeulverdieping en onderhoud. Een belangrijk resultaat is ook dat aangetoond wordt dat alle invloeden die zichtbaar zijn in het dagelijkse getij ook terug te vinden zijn bij het ruimtelijk verloop van de stormvloedstanden, dit in tegenspraak met voorgenoemde publicaties.

Hoofdstuk 6 geeft de resultaten van een aantal computersimulaties van het Scheldegetij met behulp van het op de harmonische methode gebaseerde rekenmodel HARMSCHELDE. De versterking van het getijverschil ten opzichte van het getij in Vlissingen voor de situatie medio 1996 tot aan Antwerpen bleek goed te simuleren. De resulterende invloed van ingrepen en veranderingen in de afgelopen halve eeuw is onderzocht door het getij voor de situatie in 1965 te simuleren. De simulaties bevestigen het beeld van hoofdstuk 5.

Het rapport eindigt met een aantal conclusies en aanbevelingen in **hoofdstuk 7**.

B. Commentaar bij een aantal aspecten van het rapport

De doelgroep

Het rapport is bedoeld voor de bij onderzoek, beleid en beheer van het Schelde-estuarium betrokken adviseurs, morfologen en ecologen. De hoofdstukken 3, 4 en 6 zijn minder toegankelijk voor de hele doelgroep. Voor waterloopkundigen vormen de hoofdstukken 3 en 4 als het ware een goede geheugen opfrisser. Voor wie de materie nieuw is, zijn deze hoofdstukken niet eenvoudig te begrijpen.

De kern van het rapport wordt echter gevormd door hoofdstuk 5 en dit hoofdstuk is wel voor een brede groep toegankelijk.

Het doel

Het doel van de in het rapport beschreven studie is een bijdrage te leveren aan de verbetering van het fysisch inzicht in de getijbeweging in het Schelde-estuarium, door 1) het presenteren van basale proceskennis, 2) door na te gaan of waargenomen ontwikkelingen vanuit die proceskennis zijn te verklaren en 3) vervolgens te identificeren welke kennis ontbreekt. 4) Het verbeterd inzicht dient vervolgens ingebouwd te worden in het beschikbare voorspellingsinstrumentarium voor waterbeweging en morfologie. De expertkennis en simulatiemodellen kunnen vervolgens bijvoorbeeld worden ingezet voor het optimaliseren van hoeveelheden en locaties voor baggeren en storten, ecologische herstelmaatregelen, effectstudies of meer algemeen, voor het onderscheiden van natuurlijke en antropogene factoren bij veranderingen in waterbeweging en morfologie.

Onderstaande indeling in methoden, resultaten en conclusies is die van het rapport.

De methode

Gesteld wordt dat in verschillende publicaties in het recente verleden ten onrechte 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 toenevende doordringing van stormvloed. De auteur is van oordeel dat de onderbouwing van deze verklaringen ontbreekt, te summier is of ondeugdelijk. Het rapport geeft echter nog onvoldoende informatie over de argumentatie in die publicaties en over de redenen waarom ze al dan niet kloppen. Daarom wordt aanbevolen een eventueel vervolgonderzoek te beginnen met een overzicht en discussie van deze publicaties.

De presentatie van de ontwikkeling van het getij in de afgelopen eeuw geschiedt aan de hand van het ruimtelijk verloop van de tienjarige gemiddelden. Hiermee wordt een goed inzicht verkregen in de grote lijn van de ontwikkeling van het getij in de vorige eeuw. Het is echter wel een sterke schematisatie in de tijd. Er wordt ook niet aangegeven of het rekenkundige gemiddelden betreft of bijvoorbeeld slotgemiddelden (d.w.z. de waarde op een bepaald tijdstip, door gaans het slot van een decennium, volgens een meerjarige trendlijn, na correctie voor zowel korte toevallige schommelingen als meerjarige astronomische fluctuaties, zoals de 18,6-jarige cyclus). Mogelijk maakt het niet zoveel uit, maar bij vervolgdiscussies verdient dit wel enige aandacht.

Het inzicht zou nog verder vergroot kunnen worden door van zorgvuldig gekozen peilmeetstations tijdreeksen te presenteren van jaargemiddelde zeestanden (hoogwater, laagwater, gemiddelde waterstand en tijverschil). Daaruit valt beter af te leiden in welke zin en wanneer bij een bepaald station het getij verandert.

De beschreven ontwikkelingen zijn over het algemeen de som van meerdere veranderingen. Er is weinig of geen aandacht voor het effect van bedijkingen, afdammingen en inpolderingen. Ook een overzicht ervan ontbreekt. Het precieze effect van deze ingrepen afzonderlijk valt dan ook niet uit het rapport te halen. Het relatieve belang ervan voor de waterbeweging in de Westerschelde wordt niet duidelijk. Daarvoor zijn andere methoden nodig. Gevoeligheidsonderzoeken door simulatie van ingrepen met behulp van de "state-of-the-art" 2D- of 3D-modellen kan hier meer inzicht in geven.

In het rapport wordt veel aandacht geschonken aan de harmonische methode. De methode beperkt zich door de toegepaste benaderingen tot relatief lage golven. De getijgolf wordt verder geschematiseerd tot een sinusvorm en ook de geometrie wordt sterk geschematiseerd. De harmonische methode gaat uit van een ingespeelde periodieke toestand. Als deze vereenvoudigingen te ver van de werkelijkheid af liggen, zal men zijn toevlucht moeten nemen tot numerieke oplossingen van de complete vergelijkingen.

Bij beleidsgevoelige onderwerpen zoals de verandering van het getij in het Schelde-estuarium en de verschillen van mening daarover, kan niet worden volstaan met alleen een benaderende methode als deze, maar dienen de volledige vergelijkingen numeriek te worden opgelost.

Voor de doelstelling van het rapport, het verhogen van het inzicht in het Scheldegetij, kan de methode wel worden gebruikt. Men dient zich wel bewust te zijn van de beperkingen van de methode vanwege de toegepaste vereenvoudigingen.

Resultaten

Het rapport laat duidelijk zien dat de getijdoordringing onder zowel dagelijkse omstandigheden als bij stormvloeden in de afgelopen eeuw doorgaand is toegenomen. Ondanks het feit dat effecten van andere ontwikkelingen (zie boven) niet volledig werden geanalyseerd, wordt zeer aannemelijk gemaakt dat de toename kan worden verklaard uit aanvankelijk zeespiegelstijging, veranderingen in het middengebied en in de laatste halve eeuw uit geometrieveranderingen door vaargeulverdieping en onderhoud.

De resulterende invloed van ingrepen en veranderingen in de afgelopen halve eeuw is onderzocht door simulaties met de harmonische methode en vergelijking van het getij bij de bodemliggingen van 1964 en 1995. De uitkomsten bevestigen min of meer de analyses van de veranderingen uit de getijgegevens.

Bij de conclusies en aanbevelingen van het rapport

Het rapport levert een belangrijke en uitvoerige bijdrage aan het fysisch inzicht in de getijbeweging in het Schelde-estuarium. Dat de harmonische benadering het inzicht nog kan verbeteren lijkt twijfelachtig. Daarvoor zijn tegenwoordig ook betere instrumenten beschikbaar.

Geconcludeerd wordt dat de getijslag tussen Bath en de Rupelmonding het sterkst is toegenomen in de afgelopen eeuw rond 1970. Deze conclusie is gedaan op grond van tienjarige gemiddelden van getijparameters. Bestudering van het verloop in de tijd van jaarlijkse waarden van de getijparameters (zoals hoogwater, laagwater, gemiddelde stand of getijslag) kan zo'n uitspraak aanscherpen of nuanceren.

C. Noodzakelijke vervolgstappen voor beantwoording van de beheersvragen

- Van alle stations het verloop van de jaargemiddelden in de tijd laten zien, ook van na 1990; daaruit valt beter af te leiden in welke zin en wanneer bij een bepaald station het getij verandert.
- Van een aantal goed gekozen jaren (t.o.v. uitgevoerde werken) het ruimtelijk verloop presenteren. Dat wil zeggen presenteren van alle peilmeetstations tijdreeksen van jaargemiddelde zeestanden (hoogwater, laagwater, gemiddelde waterstand en tijverschil).
- Een overzicht van alle uitgevoerde werken die van belang zijn voor de ontwikkeling van het getij
- Gevoeligheidsonderzoeken door simulatie van ingrepen met behulp van de "state-of-the-art" 2D- of 3D-modellen;
- Een meer volledige bespreking van de literatuur, de daarin genoemde argumenten en de zwakheden daarin.
- Nagaan welke inzichten uit het rapport voldoende robuust zijn, en welke nog nader onderzoek vereisen;
- Inbouwen van de "zekere" inzichten in de gehanteerde voorspellingsmodellen;
- Met behulp van morfologische modellen de volledige periode doorrekenen, waarbij wel als input de ingrepen aangebracht moeten worden. Het model rekent dan zelf de morfologische aanpassingen en de hydraulische veranderingen uit. Het ESTMORF model (1D-gedrags model) zou hier zeer geschikt voor zijn. Hier zijn al deelperioden mee doorgerekend, waarbij de berekende veranderingen in de tijverschillen redelijk overeenkomen met de waargenomen getijverschillen. Er is inmiddels (januari 2005) een gecalibreerd en gevalideerd morfologisch 2D-model gereed van de Westerschelde. Met dit model kunnen perioden van 10 à 20 jaar doorgerekend worden. Er zijn vergevorderde plannen om zelfs 50 jaar door te rekenen (PROSES tussenfase).

Deel II
Rapport “Het Scheldegetij”
Beschrijving en analyse van het getij in het Schelde-estuarium

Rapport BGW-0102
Uitgevoerd in opdracht van Rijksinstituut voor Kust en Zee /
RIKZ door **Ir. T. Pieters (Bureau Getijdewateren)**

Juni 2002

Colofon

Uitgegeven door:

Rijksinstituut voor Kust en Zee / *RIKZ*
Vestiging Middelburg

Informatie: Douwe Dillingh

Telefoon: 070-3114356

Fax:

Uitgevoerd door: Tom Pieters; bewerkt door Harm Verbeek & Douwe Dillingh (RIKZ)

Bureau Getijdewateren
Waterbeweging en morfologie van estuaria en kustgebieden

Opmaak: Harm Verbeek

Rijksinstituut voor Kust en Zee / *RIKZ*

Vestiging Middelburg

Datum: Juni 2002 (BGW), februari 2005 (RIKZ)

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	9
SAMENVATTING	11
1 VOORWOORD	13
2 INLEIDING	16
2.1 DOEL EN INHOUD VAN DE STUDIE	16
2.2 OPZET EN AANPAK VAN DE STUDIE	17
2.3 DE INHOUD VAN DIT RAPPORT	19
3 DE FYSICA VAN HET GETIJ, VAN OCEAAN NAAR ESTUARIUM	20
3.1 DE INHOUD VAN DIT HOOFDSTUK	20
3.2 HET GLOBALE GETIJ: OPWEKKING, ONDERHOUDING, VOORTPLANTING EN UITDEMPING.....	21
3.2.1 <i>De fysische basiswetten van de getijbeweging</i>	21
3.2.2 <i>de krachten die de getijbeweging bepalen</i>	21
3.2.3 <i>zwaartekracht, getijverwekkende kracht en kracht van Coriolis</i>	22
3.2.4 <i>de getijverwekkende krachten</i>	23
3.2.5 <i>de getijbeweging op de oceanen</i>	24
3.2.6 <i>het Coriolis-effect</i>	25
3.2.7 <i>aanvoer, transport, reflectie en verlies van getijgolfenergie</i>	27
3.2.8 <i>shoaling en reflectie</i>	28
3.2.9 <i>opwekking, onderhoud, voortplanting en demping van het globale getij</i>	29
3.3 DE VOORTPLANTING VAN EEN GETIJGOLF	29
3.3.1 <i>de voortplanting van een storing in open water</i>	30
3.4 DE WATERBEWEGING IN EEN GETIJGOLF	31
3.5 DE EERSTE-ORDE VERVORMING VAN EEN AANVANKELIJK ZUIVERE LOPENDE PERIODIEKE GOLF.....	32
3.6 DE VOORTPLANTING VAN EN DE WATERBEWEGING IN EEN GETIJGOLF IN EEN ESTUARIUM.....	33
3.6.1 <i>de transmissie en reflectie bij profielveranderingen</i>	33
4 DE MATHEMATISCHE BESCHRIJVING VAN DE WATERBEWEGING IN EEN GETIJGOLF	35
4.1 MATHEMATISCH BESCHRIJVING EN KWANTITATIEVE BENADERING VAN DE GETIJBEWEGING VAN WATER.....	35
4.2 DE ÉÉNDIMENSIONALE LANGE-GOLFVERGELIJKINGEN: CONTINUÏTEITSVERGELIJKING EN BEWEGINGSVERGELIJKING.....	36
4.3 DE INVLOED VAN NIET-LINEAIRE MECHANISMEN OP DE GETIJVOORTPLANTING EN DE BESCHRIJVING DOOR HOGERE HARMONISCHEN EN SAMENGESTELDE PARTIËLE GETIJDEN.....	36
4.4 DE LINEAIRE BENADERING VAN DE GETIJBEWEGING MET DE HARMONISCHE METHODE.....	37

4.4.1	<i>mogelijkheden en beperkingen van de lineaire benadering met de harmonische methode</i>	37
4.4.2	<i>de ééndimensionale continuïteitsvergelijking en gelineariseerde bewegingsvergelijking</i>	37
4.4.3	<i>waterstandsverloop en debietverloop in ruimte en tijd volgens de harmonische benadering</i>	38
4.4.4	<i>eigenschappen inlopende en teruglopende golf</i>	39
4.4.5	<i>fysische verklaring</i>	40
4.5	EEN SIMULATIEMODEL VAN HET SCHELDEGETIJ OP BASIS VAN DE HARMONISCHE METHODE.....	42
4.5.1	<i>harmonische benadering van de getijvoortplanting met een netwerkmodel</i> 42	
5	BESCHRIJVING EN VERKLARING VAN HET SCHELDEGETIJ: OORSPRONG EN KARAKTERISTIEKEN	44
5.1	DE INHOUD VAN DIT HOOFDSTUK	44
5.2	HET GETIJ OP DE NOORDZEE	44
5.3	HET GETIJ LANGS DE ZUIDNEDERLANDSE EN VLAAMSE KUST.....	45
5.4	HET GETIJ IN HET MONDINGSGEBIED	47
5.5	DE GETIJVOORTPLANTING IN WESTERSCHELDE EN ZEESCHELDE.....	47
5.6	SIGNIFICANTE VERANDERINGEN VAN DE GETIJKARAKTERISTIEKEN IN HET VERLEDEN	51
5.6.1	<i>De ontwikkeling van het dagelijkse getij in de afgelopen eeuw</i>	51
5.6.2	<i>De ontwikkeling van de doordringing van stormvloed in de afgelopen eeuw</i>	58
6	ANALYSE VAN HET SCHELDEGETIJ UIT SIMULATIES MET DE HARMONISCHE METHODE	64
6.1	DE INHOUD VAN DIT HOOFDSTUK	64
6.2	ANALYSE VAN HET GETIJ IN DE HUIDIGE SITUATIE.....	64
6.3	ANALYSE VAN OPGETREDEN VERANDERINGEN IN HET GETIJ	69
6.4	BENADERINGEN VAN NIET-LINEAIRE INVLOEDEN	73
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	75
7.1	CONCLUSIES	75
7.2	AANBEVELINGEN.....	75
	LITERATUUR	77

Samenvatting

Het doel van deze studie is een bijdrage te leveren aan met name het fysisch inzicht in het complexe karakter van het Scheldegetij. De complexiteit komt vooral voort uit de specifieke geometrie van het estuarium. In tegenstelling tot estuaria, waar de geometrie zich min of meer vrij heeft kunnen vormen in wisselwerking met de waterbeweging, is de geometrie van het Schelde-estuarium veel meer gevormd door een drietal invloeden buiten de waterbeweging:

- het ontstaan van de verbinding tussen de zeearm de Honte en de rivier de Schelde,
- de ligging op de ruimtelijk sterk variërende geologische ondergrond
- de sterke beïnvloeding door menselijke ingrepen, zoals bedijkingen, afdammingen en inpolderingen en drempel- en geulverdiepingen.

Bij deze heterogene geometrie treden ruimtelijk sterke en snelle variaties op in de mechanismen en processen die de getijbeweging bepalen. Voor het fysisch inzicht in de getijbeweging in gebieden zoals het Schelde-estuarium is het goed zich steeds een voorstelling te maken van het momentane, ruimtelijke verloop van de waterbeweging. Het denken in getijgemiddelde of anderszins geschematiseerde parameters werkt voor dit doel vaak versluitend of soms averechts.

De voortplanting van de waterbeweging in een estuarium kan fysisch goed worden beschreven en begrepen aan de hand van twee processen: de bij de voortplanting in het estuarium optredende dissipatie door vooral bodem-wrijvingsweerstand en transmissie en reflectie bij veranderingen van doorstroomprofiel van de aan de monding aangevoerde getijgolfenergie.

Op deze beide processen is de zogenoemde harmonische benadering gebaseerd. Dit is een lineaire benadering, waarbij de optredende getijbeweging wordt beschreven als resultante van twee weerstandsgedempte, in onderling tegengestelde richting lopende enkelvoudige golven. Deze golven kunnen worden opgevat als een door de zeerandvoorwaarde opgelegde inlopende golf en een door de geometrie van het estuarium "gereflecteerde" teruglopende golf, beiden gedempt in de looprichting door bodemwrijving. Reflectie treedt niet alleen op aan gesloten einden van zeearmen en estuaria. Bij geleidelijke, maar toch relatief snelle ruimtelijke veranderingen van de karakteristieken, die de getijvoortplanting bepalen, treedt een proces op dat als een soort diffuse reflectie kan worden opgevat.

Vaak wordt in estuaria bij de veel voorkomende geleidelijke vernauwing ten onrechte uitgegaan van shoaling, terwijl veel vaker sprake is van reflectie. Bij shoaling plant alle getijgolfenergie zich voort in de golfvoortplantingsrichting, waarbij de golfamplitude groeit volgens een aan de veranderende breedte en diepte te relateren verband. Voorwaarde is dat de relatieve verandering van het profiel klein is over de getijgolf lengte. Getijgolven in estuaria hebben meestal golf lengten van meerdere honderden kilometers, ten opzichte waarvan de gebruikelijk optredende relatieve breedte- en/of diepte veranderingen zo groot zijn dat reflectie domineert. Bij reflectie wordt getijgolfenergie gereflecteerd, wat beschreven kan worden als een gereflecteerde, teruglopende golf. In tegenstelling tot shoaling werkt reflectie, bij niet dominant zijn van de weerstand, door in het hele estuarium. De gereflecteerde golf interfereert ook met een zeerandvoorwaarde, die eventueel oorspronkelijk het karakter had van een lopende golf.

In deze studie is intensief gebruik gemaakt van de mogelijkheden van de genoemde harmonische benadering. Op basis van de eraan te ontleen inzichten zijn in eerste in-

stantie het huidige getij en de opgetreden veranderingen in de afgelopen eeuw kwalitatief beschreven en geanalyseerd. In afwijking van wat meestal gebruikelijk is (namelijk het afzonderlijk analyseren voor een vaste lokatie van het temporele verloop van het momentane getij en van veranderingen van getijgemiddelde karakteristieken over lange perioden) is in deze studie vrijwel steeds de ontwikkeling in de tijd van het ruimtelijke verloop langs het estuarium van zowel het momentane getij als van getijgemiddelde karakteristieken geanalyseerd. Deze benadering doet veel meer recht aan de onderlinge beïnvloeding van het getij in de delen van het estuarium, zowel op lokaal als op systeemniveau.

Met de hiervoor beschreven benadering werden duidelijke relaties zichtbaar tussen de opgetreden veranderingen in het dagelijkse getij in de afgelopen eeuw en de grotendeels door menselijke ingrepen aangebrachte wijzigingen in de geometrie van het estuarium, met name die ten behoeve van het handhaven en verdiepen van de vaarweg. Na een relatief geringe toename van de getijdoordringing op de Zeeschelde, door zeespiegelstijging en beperkte baggerwerken in de eerste helft van de twintigste eeuw, veroorzaakte met name de verdieping van de Beneden-Zeeschelde zeewaarts van Antwerpen rond 1970, met twee tot drie meter, een sterke toename van de getijdoordringing en – versterking op de Zeeschelde. Vervolgens nam de getijslag verder toe in het oostelijke deel van de Westerschelde en het grensgebied, als gevolg van de verdieping van drempels en geulen in het kader van de in de jaren zeventig uitgevoerde algehele verdieping van de vaarweg. Hiermee nam als het ware de getijrandvoorwaarde voor de Zeeschelde toe. De kwalitatief onderkende resulterende invloed van de geometrieveranderingen tussen 1965 en 1995 op het dagelijkse getij kon kwantitatief worden onderbouwd met een eenvoudig, op de harmonische benadering gebaseerd simulatiemodel. Met dit model werd het gemiddelde getij gesimuleerd met de geometrieën van 1965 en 1995.

De toename van de doordringing van stormvloeden in de afgelopen eeuw vertoont grote overeenkomst met de ontwikkeling van de doordringing van het dagelijkse getij. Dit ondanks het veel grotere aantal beïnvloedende factoren buiten de geometrie op de doordringing van stormvloeden. De significante veranderingen in de doordringing van stormvloeden hebben als oorzaak duidelijk dezelfde veranderingen van de geometrie, die de veranderingen in het dagelijkse getij bepalen. Met name de onderkenning van de dominante invloed van de menselijke ingrepen in het kader van het vaarwegbeheer op de veranderingen van het dagelijkse getij, en vooral op de toenemende doordringing van stormvloeden, als conclusie van deze studie, wijkt significant af van de inzichten volgens meerdere, in de discussies rond het Schelde-estuarium frequent geciteerde, actuele publicaties. De toegepaste benaderingen bieden meer mogelijkheden tot analyses van de relaties tussen getij en geometrie dan konden worden toegepast in deze studie. Met name is het bijvoorbeeld mogelijk de invloed van de deelveranderingen in de geometrie tussen 1965 en 1995 en van de veranderingen in het middengebied van de Westerschelde rond het midden van de vorige eeuw afzonderlijk te analyseren. Hiermee zou een belangrijke verdere uitbreiding worden verkregen van het noodzakelijke inzicht in de relatie tussen de geometrie van het Schelde-estuarium en het Scheldegetij.

1. Voorwoord

Een in alle gewenste opzichten "gezonde" ontwikkeling van een prachtig gebied als het Schelde-estuarium is gebaat bij optimale kennis van en inzicht in het functioneren van het gebied bij de betrokkenen bij onderzoek, beleid en beheer. Dit geldt des te meer bij de huidige zware maatschappelijke aanspraken op het estuarium. De verwerving en het onderhoud van de soort kennis en inzicht die betrokkenen nodig hebben om binnen de huidige kleine marges tot creatieve, "integrale" oplossingen voor de vigerende vragen te komen staan sterk onder druk. Dit geldt zeker ook voor een vanouds Nederlandse specialiteit: de kennis van het (Schelde-) getij. Het leveren van een bijdrage aan de verlichting van deze druk, in het belang van het Schelde-estuarium, was het belangrijkste motief voor het uitvoeren van deze studie door ondergetekende.

De meest uitdagende en boeiende vraag voor de bij de fysica van het Schelde-estuarium betrokken onderzoekers en adviseurs is:

"Waar kan de rond 15 miljoen m³ sediment, die jaarlijks in het kader van het vaarwegonderhoud wordt gebaggerd, het beste worden gestort om zowel de veiligheid, als de toegankelijkheid, als de natuurlijkheid te waarborgen, c.q. te vergroten?"

Deze vraag illustreert fraai de zogenoemde "watersysteembenadering", het nieuwe, nagestreefde beleid rond en beheer van de watersystemen in Nederland, waarvoor de basis werd gelegd in de publicatie "Omgaan met water: naar een integraal waterbeleid" van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (MinVenW, 1985). Dit beleid werd ingezet in de tweede helft van de jaren tachtig met het uitbrengen van de 3^e Nota Waterhuishouding: "Water voor nu en later" (MinVenW, 1989).

Een mogelijk onderschatte factor bij de invoering van dit nieuwe beleid en beheer is dat de andere manier van omgaan met water en de watersysteem benadering ook een ander soort kennis en inzicht vereist.

"en laten er deskundigen aan rekenen met hun computers, maar een rivier is een levend iets en ge moet altijd maar afwachten wat haar eigen wil is!" (tijdschrift Zeilen, juli 1996) is in dit opzicht een toepasselijke uitspraak van Richard Bleyenbergh, die vrijwel zijn hele leven doorbracht in het oostelijke deel van de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde, de laatste decennia als gids in het Land van Saeftinge. Het verkrijgen en onderhouden door betrokkenen bij het Schelde-estuarium van juist deze kennis, een afgewogen combinatie van de basiskennis en -inzichten in de getijbeweging van water in het algemeen én van de optredende getijbeweging in en geometrie van het Schelde-estuarium in het bijzonder, staat door meerdere ontwikkelingen onder druk. Hiervoor zijn twee belangrijke, gedeeltelijk samenhangende oorzaken te onderkennen.

In de eerste plaats zijn er bij het vigerende personeels- en roulatiebeleid en het uitbestedingsbeleid van onderzoek onvoldoende tijd en mogelijkheden voor medewerkers om de noodzakelijke gebieds- en systeemkennis op te doen. Dit beleid is voor een substantieel deel gestimuleerd door de tweede te onderscheiden, ogenschijnlijk tegenstrijdige oorzaak: de geweldige ontwikkelingen van de geautomatiseerde gegevensinwinning en -verwerking en van de mogelijkheden van de mathematische modellering. Het laatste wordt hierna toegelicht.

De getijbeweging op de aarde wordt, vanaf de opwekking op de grote oceanen door de astronomische krachtwerkingen tot en met de voortplanting naar en waterbeweging in het Schelde-estuarium, bepaald door een beperkt aantal fysische natuurwetten. Vrijwel

elke beschouwing van het getij van deze tijd begint met het mathematisch beschrijven van de lokale en momentane getijbeweging van water met een tweetal differentiaalvergelijkingen, de zogenoemde continuïteitsvergelijking en bewegingsvergelijking, op basis van twee wetten, respectievelijk de wet van behoud van massa en de 2e wet van Newton. Na integratie van deze vergelijkingen naar ruimte en/of tijd kan de getijbeweging van water in grotere gebieden en/of over langere perioden worden gesimuleerd. Deze richting van benadering sloot goed aan bij de sterke uitbreiding van de mogelijkheden tot inwinning van en rekenen met zeer grote hoeveelheden data in de afgelopen decennia. In de huidige mathematische getijmodellen kunnen de bijna volledige vergelijkingen numeriek worden geïntegreerd in bijna zo gedetailleerd als gewenste schematisaties van de geometrie.

Het succes van de hiervoor geschetste benadering en ontwikkeling voor het vinden van kwantitatieve antwoorden op vragen over het getij geldt niet onverdeeld voor de ontwikkeling en het onderhoud van kennis van en inzicht in het getij in bredere kring. Dit geldt met name voor het veel grotere aantal mensen die met het getij te maken hebben, zoals bijvoorbeeld de betrokkenen bij onderzoeks-, beleids- en beheersvragen rond het Schelde-estuarium, dan de kleine groep hydraulisch en wiskundig geschoolden, die zich concentreren op de ontwikkeling van de mathematische modellen. De volledige continuïteits- en bewegingsvergelijkingen zijn niet zonder meer analytisch oplosbaar. Hierdoor is een zeer grote verscheidenheid ontstaan aan óf oplossingen voor sterk geïdealiseerde of zeer specifieke situaties óf oplossingen verkregen met zeer specifieke wiskundige technieken. De hieruit voortkomende veelheid aan benaderings- en beschrijvingswijzen ontlenen voor velen het zicht op het in wezen beperkte aantal fysische wetmatigheden, die, "onafhankelijk van deze beschrijvingswijzen", de werkelijke waterbeweging bepalen. Vaak gaat dit zover dat in de formuleringen beschrijving en werkelijkheid niet meer onderscheiden worden.

Vragen naar de getijbeweging die in een gebied optreedt of zal gaan optreden worden meestal randvoorwaardenproblemen genoemd en overeenkomstig behandeld. Er worden mathematische formuleringen gezocht, bijvoorbeeld "cosinusachtige" functies, die kunnen voldoen aan de basisvergelijkingen en aan de randvoorwaarden. De beschrijvende functies worden "gefit" op de randvoorwaarden. Vooral het feit dat het niet nodig is de beweging "op te bouwen" vanuit het ontstaan, het "inspelen" van de beweging te volgen, veroorzaakt vaak een té grote stap van de fysisch redelijk te begrijpen basisformuleringen naar een complexe optredende getijbeweging, zoals bijvoorbeeld het Scheldegetij. Het hiervoor geschetste probleem bestond al vóórdat de numerieke oplossingen "doorbraken" met het gebruik van de moderne rekenapparatuur. Het sterk toegenomen gebruik van met name de meerdimensionale mathematische getijmodellen heeft het probleem zeker niet verkleind. Terwijl de meer inzicht gevende "ambachtelijke/handmatige" benaderingen erdoor werden vervangen, vormen ze voor "niet-modelmensen" een "black-box". Enkele van de oude "ambachtelijke/handmatige" benaderingen, die behouden zijn gebleven, zoals de harmonische methode en vooral de methode van integratie langs karakteristieken ontlenden hun "inzichtgevende" waarde onder andere aan het feit dat zij wél laten zien hoe de beweging ontstaat (Schönfeld, 1955; Battjes, 2001).

De harmonische methode is ontwikkeld door de Staatscommissie Lorentz. Deze commissie had tot taak te onderzoeken wat de gevolgen zouden zijn van de afsluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk voor de getijbeweging in de Waddenzee in het algemeen en de veiligheid tegen overstromen in het bijzonder (Lorentz, 1926). De leden en medewerkers van de Staatscommissie Lorentz hadden in hun situatie problemen van heel andere aard, waardoor zij in hun studie een benaderingswijze moesten volgen die in meer opzichten bijna tegengesteld gericht was aan de nu gebruikelijke. In de eerste

plaats was het aantal natuurgegevens uit het te onderzoeken gebied nog zeer beperkt en niet te vergelijken met de huidige omvang aan informatie. Hetzelfde geldt voor de beschikbare informatie over elders uitgevoerde ingrepen in grotere getijgebieden, die als voorbeelden zouden kunnen dienen en kennis en inzichten zouden kunnen voeden. En tenslotte beschikten de onderzoekers nog niet over geavanceerde rekenapparatuur die omvangrijke numerieke berekeningen mogelijk maakten.

De Staatscommissie Zuiderzee moest de weinige beschikbare natuurgegevens optimaal benutten, zich concentreren op de basisprocessen, "zuinig zijn" met rekenwerk of wel de "juiste" berekeningen maken en de prognoses en adviezen baseren op een beperkt aantal meer als indicatief te karakteriseren berekeningen, wat een zwaar beroep deed op het "professional judgement" van de betrokkenen. Van de verschillen met nu was die in theoretische kennis waarschijnlijk het kleinst: de eerste druk van "Hydrodynamics" van Sir Horace Lamb kwam uit in 1879. De aanpak van de vraagstelling van de Staatscommissie Lorentz, indertijd "noodgedwongen", en de ontwikkelde kwantitatieve benadering, de harmonische methode, leverden veel inspirerende aanwijzingen en materiaal voor deze beschrijving en analyse van het Scheldegetij.

Vlissingen, mei 2002

Tom Pieters

2. Inleiding

2.1. doel en inhoud van de studie

Het doel van deze studie is een bijdrage te leveren aan de verbetering van het fysisch inzicht in de getijbeweging in het Schelde-estuarium van de bij onderzoek, beleid en beheer ervan betrokken adviseurs, morfologen en ecologen. Enerzijds is het voor niet-getijspecialisten juist door de beschikbaarheid van de steeds beter werkende meerdimensionale getijmodellen moeilijker geworden dit inzicht te ontwikkelen en te onderhouden. Anderzijds is juist bij de veranderde vraagstellingen volgens het "denken vanuit het systeem" dit soort inzicht bij direct betrokkenen en bij "kenners" van het estuarium nodig om tot creatieve, integrale antwoorden te kunnen komen. De hoofdstukken 3 en 4 bevatten respectievelijk een fysisch en een mathematisch georiënteerde brede beschrijving van de getijbeweging. Deze hoofdstukken bedoelen vooral bij te dragen aan een breder en dieper inzicht in de getijbeweging in estuaria in het algemeen. Hoofdstuk 5 en 6 bevatten respectievelijk kwalitatieve en kwantitatieve beschrijvingen en analyses van het huidige en in het recente verleden opgetreden Scheldegetij in het bijzonder.

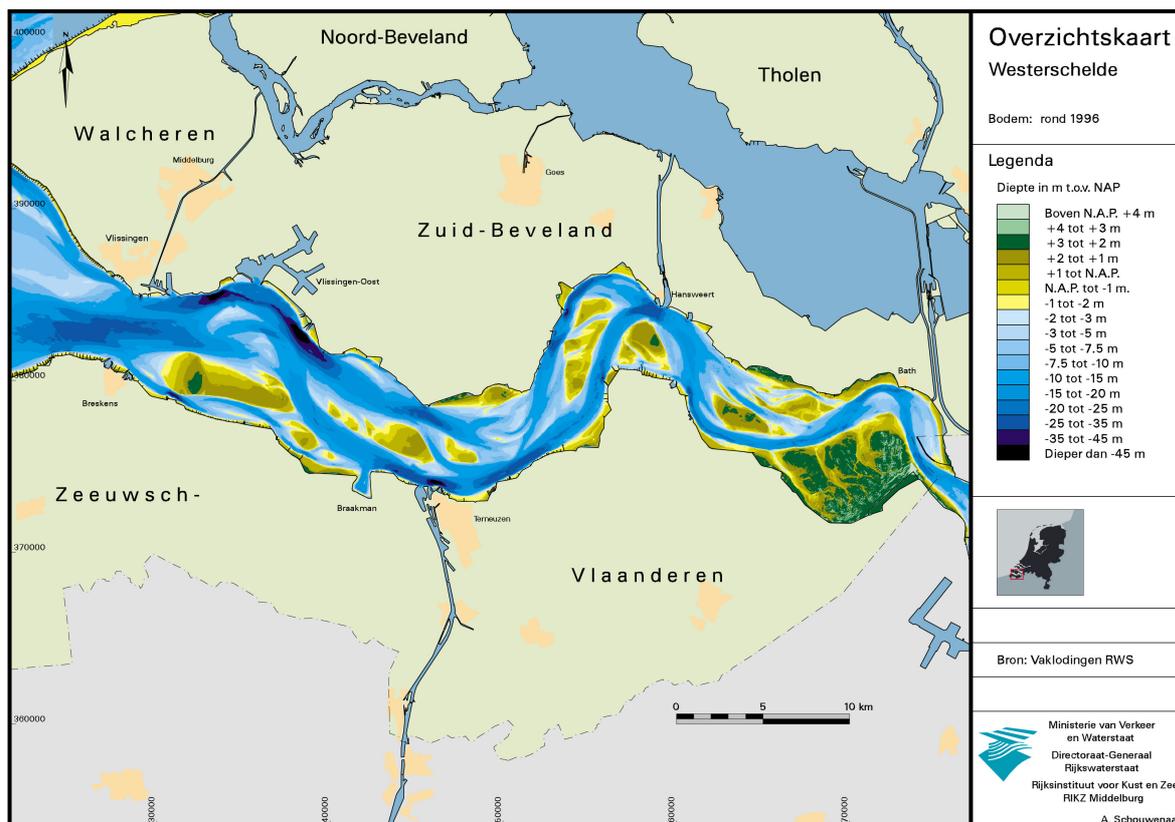


fig 2.1
de Westerschelde

Onder het Schelde-estuarium is in deze studie verstaan de Westerschelde, het Mondingsgebied, de Westerschelde, de Beneden-Zeeschelde en de Boven-Zeeschelde (fig. 2.1 t/m 2.3).

De meeste aandacht is besteed, vanwege de relevantie en ook vanwege de beschikbare gegevens, aan de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde.

2.2. opzet en aanpak van de studie

Om het doel te realiseren is voor zowel vorm als inhoud van de studie inzicht en inspiratie ontleend aan een "oude" studie, het "Verslag van de Staatscommissie Zuiderzee" (Lorentz, 1926), vaker aangeduid als het werk van de Staatscommissie Lorentz. Deze commissie had tot taak te onderzoeken wat de gevolgen zouden zijn van de afsluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk voor de getijbeweging in de Waddenzee in het algemeen en de veiligheid tegen overstromen in het bijzonder. Het "werk" bestond uit een studie van zeer hoog niveau, die in de vakwereld wereldberoemd is geworden. De aanpak van de Staatscommissie Lorentz kan worden gekarakteriseerd als achtereenvolgens het zeer zorgvuldig waarnemen en beschrijven van het optredende getij, het "ontdekken" van de werking van de fysische basisprocessen daarin, het vaststellen van de relatieve aandelen van elk daarvan, ruimtelijk en temporeel, en tenslotte het in een mathematische formulering samenbrengen van deze basisprocessen, waardoor een kwantitatieve beschrijving van de resulterende getijbeweging van water mogelijk wordt. Zo ontstond onder andere de zogenoemde "harmonische methode" of harmonische benadering, die een goede inzichtelijke eerste-orde benadering kan vormen van de basisprocessen in de beweging van water in een getijgebied.

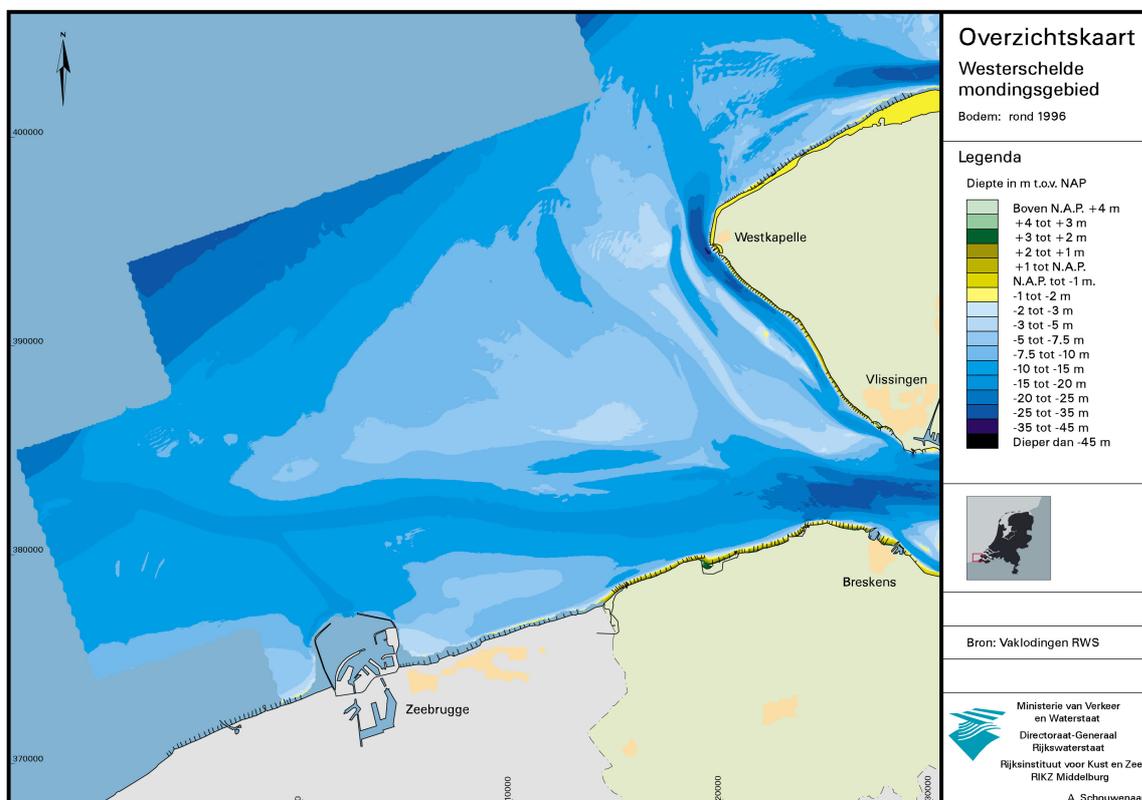
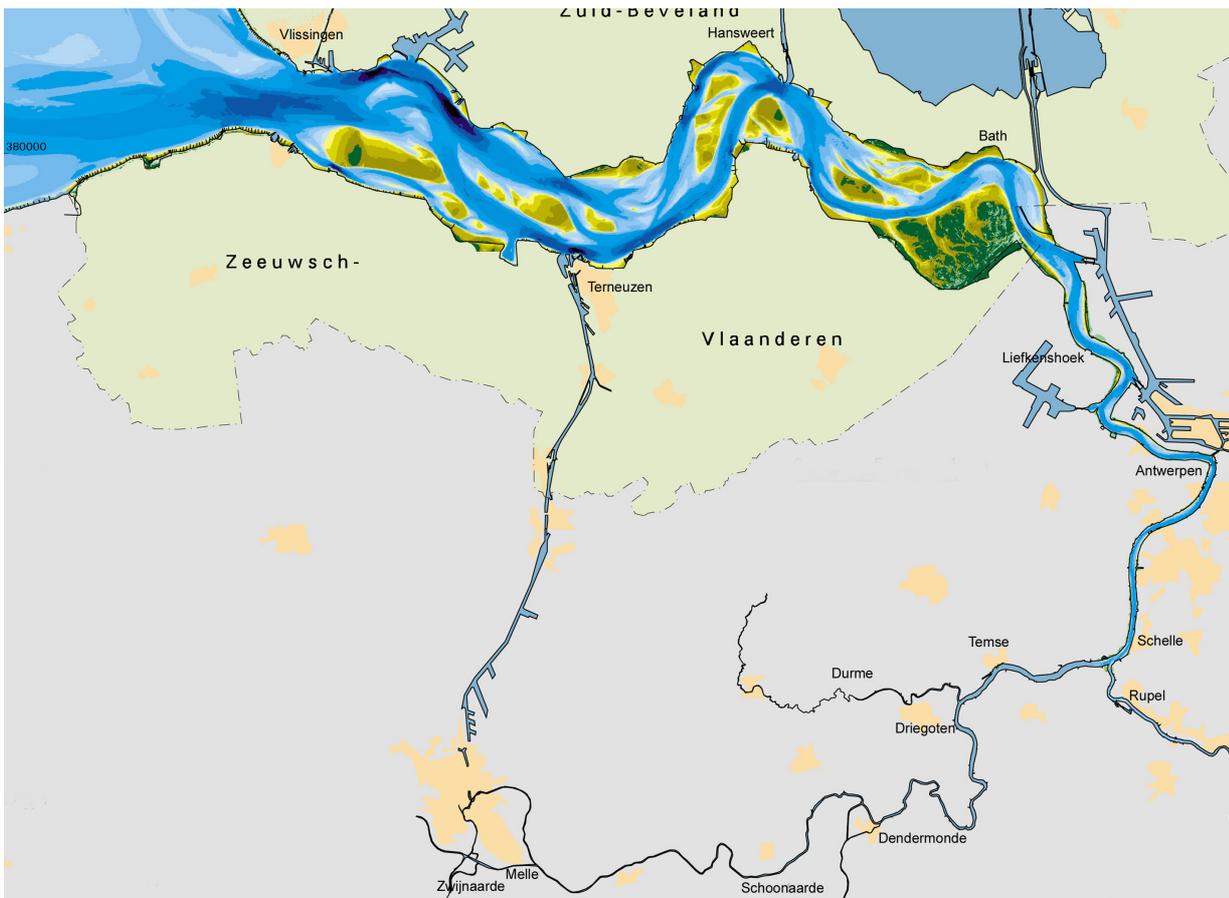


fig. 2.2
het Mondingsgebied

Bij lezing van het “Verslag van de Staatscommissie Zuiderzee” (Lorentz, 1926) blijkt hoe leerzaam de indertijd gevolgde volgorde van benadering (van optredend getij naar theorie, van globaal naar detail en van fysische beschrijving naar wiskundige formulering) werkt en hoe een eenvoudige, maar in voldoende vergaande mate fysisch realistische methode als de harmonische benadering daarbij behulpzaam is. Bij de in die tijd, vergeleken met nu, zeer bescheiden informatie en hulpmiddelen werd een zwaar beroep gedaan op het persoonlijke inzicht in de basisprocessen van het getij van commissieleden en medewerkers. Dit komt tot uitdrukking in het genoemde verslag (Lorentz, 1926), waarin telkens weer zeer zorgvuldig en volledig wordt geformuleerd waarom het gaat. Om deze reden vormt het een rijke informatiebron en, gezien het genoemde doel, een inspirerend voorbeeld voor deze studie van het Scheldegetij.



.....
fig 2.3
 de Westerschelde, de Beneden-Zeeschelde en
 de Boven-Zeeschelde

In deze studie zijn de genoemde benaderingsrichtingen nagevolgd: van globaal naar lokaal, van optredend getij naar theorie en van kwalitatief naar kwantitatief. Verder wordt voor zowel het beschrijven van het getij in algemene zin als voor het onderscheiden en nader kwantificeren van de basisprocessen intensief gebruik gemaakt van de beschrijvingen en berekeningswijzen volgens de genoemde “harmonische benadering”. Tenslotte is in de presentatie uitdrukkelijk gestreefd naar zorgvuldige en volledige formuleringen.

2.3. de inhoud van dit rapport

Ook in de presentatie van de resultaten van de studie in dit rapport zijn de genoemde benaderingsrichtingen aangehouden. De eerste is het verloop van de inhoud van de hoofdstukken 3 t/m 6: van een kwalitatieve beschrijving van de fysica van het getij in het algemeen in hoofdstuk 3 naar een kwantitatieve analyse van het Scheldegetij in het bijzonder in hoofdstuk 6. Daartussen worden in hoofdstuk 4 de in hoofdstuk 3 kwalitatief beschreven basisprocessen van het getij ook mathematisch geformuleerd en kwantitatief geïllustreerd en geanalyseerd. In hoofdstuk 5 wordt het Scheldegetij eerst kwalitatief beschreven en verklaard uit de in de hoofdstukken 3 en 4 behandelde basisprocessen. De tweede grote lijn die is aangehouden is de behandeling van globaal naar lokaal en van overzicht naar detail. In de globale getijbewegingen, zoals opwekking en voortplanting over oceanen en randzeeën, zijn als inleiding naar de sterker vervormde getijden in kustgebieden en estuaria duidelijker de basisprocessen te herkennen. Een tweede overweging om relatief veel aandacht te besteden aan deze globale getijden is dat ook de getijproblematiek "globaliseert", door klimaatveranderingen en zeespiegelstijging.

In hoofdstuk 3 komt laatstgenoemde "tweede grote lijn" expliciet naar voren. Van globaal naar lokaal worden de basisprocessen beschreven, waarvan de invloed op al deze niveau's kwalitatief dezelfde is maar kwantitatief verschilt. Voor het inzicht belangrijke aspecten die in dit hoofdstuk aan de orde komen zijn de verschillende vormen van horizontaal ééndimensionale getijgolven, de verschillende vormen van waterbeweging, die allen ruimtelijk of temporeel voorkomen in een getijcyclus, de zichtbaarheid van de basiswetten in een ruimtelijke temporele presentatie van een lange golf, de getijvoortplanting als de voortplanting van een continue reeks verstoringen, lopende en staande golven en tussenvormen en de belangrijkste basisprocessen in een horizontaal ééndimensionaal estuarium: demping door wrijvingsweerstand en getijversterking of verzwakking door geleidelijke of meer abrupte profiel- en weerstandsveranderingen.

De inhoud van hoofdstuk 4 loopt van de volledige mathematisch geformuleerde één-dimensionale lange golfvergelijkingen via de "golfvergelijking" met gelineariseerde weerstandsterm naar de harmonische benadering van de ééndimensionale getijbeweging en een simulatiemodel van het Scheldegetij op basis van deze benaderingswijze. Afzonderlijk wordt ingegaan op de invloed van de niet-lineaire termen.

In hoofdstuk 5 wordt het optredende Scheldegetij beschreven en verklaard, zoals het zich voortplant vanaf de Noordzee naar de Zeeschelde. De verklaring gebeurt door referentie aan de kwalitatieve en kwantitatieve beschouwingen van de basisprocessen van het getij in respectievelijk hoofdstukken 3 en 4. In verband met mogelijke veranderingen in de getijrandvoorwaarden van het Scheldegetij wordt relatief veel aandacht besteed aan het getij op de Noordzee. De opgetreden algehele toename van getijverschillen en stormvloed hoog-waterstanden in de afgelopen eeuw en enkele markante meer lokale veranderingen in het Scheldegetij worden afzonderlijk kwalitatief geanalyseerd.

Hoofdstuk 6 bevat de resultaten van een aantal analyses van het Scheldegetij op basis van simulaties met het model HARMSCHELDE. De simulaties en analyses betreffen de relatie tussen getijbeweging en geometrie in de huidige situatie bij dood, gemiddeld en springtij en van de veranderingen in de afgelopen halve eeuw. Met aan de harmonische benadering ontleende formuleringen worden enkele niet-lineaire invloeden zoals het middenstandsverhang benaderd.

3. De fysica van het getij, van oceaan naar estuarium

3.1. de inhoud van dit hoofdstuk

De "getijbeweging" op de aarde wordt, vanaf de opwekking op de oceanen door de astronomische krachtwerkingen tot en met de voortplanting en waterbeweging in bijvoorbeeld het Schelde-estuarium, bepaald door dezelfde fysische natuurwetten. Het is gebruikelijk om uitgaande van twee wetten (de wet van behoud van massa en de 2e wet van Newton) de lokale momentane getijbeweging van water te beschrijven in enkele differentiaal-vergelijkingen en vervolgens hieruit beschrijvingen, verklaringen en voorspellingen van de waterbeweging in en de voortplanting van getijgolven af te leiden. In dit hoofdstuk wordt, omdat het gaat om inzicht in de fysica van het getij in bijvoorbeeld een estuarium, een hieraan tegengestelde weg gevolgd. Het getij wordt gevolgd vanaf de opwekking en het onderhouden ervan door de astronomische krachten op de oceanen naar de getijbeweging van water in een estuarium. De basiswetten en de processen worden eerst fysisch in woorden en vervolgens eventueel mathematisch of kwantitatief beschreven. In hoofdstuk 4 worden vervolgens, waar nodig voor het inzicht en voor de kwantitatieve analyses in hoofdstuk 6, de formuleringen ook in mathematische of kwantitatieve termen besproken.

De op de oceanen gegenereerde getijgolven planten zich via randzeeën en kustgebieden voort tot in zeearmen, estuaria en rivieren. De veranderingen die deze "lange golven" daarbij ondergaan worden met de daarvoor verantwoordingelijke processen in dit hoofdstuk fysisch beschreven en verklaard. In de grootschalige getijbeweging op de oceanen kunnen de basisprocessen nog min of meer rechtstreeks worden herkend, waarna de meer gecompliceerdere waterbeweging en voortplanting in kustgebieden en estuaria beter kan worden begrepen. Van globaal naar lokaal worden de basisprocessen beschreven, waarvan de invloed op al deze niveau's kwalitatief dezelfde is maar kwantitatief verschilt. Voor het inzicht belangrijke aspecten die in dit hoofdstuk aan de orde komen zijn:

- de verschillende vormen van horizontaal ééndimensionale getijgolven en de relatie met het transport van golfenergie (3.2; 3.5);
- de getijvoortplanting als de voortplanting van een continue reeks verstoringen, opgelegd door een randvoorwaarde en de zichtbaarheid van de basiswetten in een ruimtelijke temporele presentatie van een lange golf (3.3);
- de verschillende vormen van waterbeweging, die allen ruimtelijk of temporeel voorkomen in een getijcyclus en die in feite allen te beschouwen zijn als bijzondere vormen van de niet-stationaire waterbewegingen zoals de getijbeweging (3.4);
- lopende en staande golven en tussenvormen, zonder en met weerstand (3.5);
- de belangrijkste basisprocessen in een horizontaal ééndimensionaal estuarium: demping door wrijvingsweerstand en partiële reflectie door profiel- en weerstandsveranderingen (3.6).

3.2. Het globale getij: opwekking, onderhouding, voortplanting en uitdemping

3.2.1. De fysische basiswetten van de getijbeweging

Er bestaan heel veel verschillende benaderings- en beschrijvingswijzen van zowel algemene als specifieke getijverschijnselen. Het is belangrijk bij het benaderen van vragen over het getij zich te blijven realiseren dat de getijbeweging van water overal op de aarde en op elk moment moet zijn terug te brengen tot de werking van een beperkt aantal fysische basiswetten. Dat zijn de wetten van behoud van massa en energie en de gravitatie- en bewegingswetten van Newton. Zo eenvoudig mogelijk geformuleerd voor de getijbeweging van water zijn dat:

- a) de gravitatiewet van Newton, die zegt dat, "materiële lichamen", van hemellichamen tot waterdeeltjes, elkaar aantrekken met krachten, die recht evenredig zijn met het product van hun massa's en omgekeerd evenredig zijn met het kwadraat van hun onderlinge afstand;
- b) de eerste wet van Newton, ook wel de wet van de traagheid of de wet van behoud van hoeveelheid van beweging genoemd, die zegt, dat grootte en de richting van de snelheid van een waterdeeltje, in een "absolute" ruimte, niet veranderen als er geen resulterende uitwendige kracht op werkt;
- c) de tweede wet van Newton, ook wel impuls wet genoemd, die zegt dat, als er wél een resulterende uitwendige kracht werkt op een waterdeeltje, de snelheid in de richting van die kracht per eenheid van tijd verandert, versnelt of vertraagt, en wel evenredig aan de per eenheid van massa uitgeoefende resulterende kracht;
- d) de wet van behoud van energie, die afgeleid kan worden uit de tweede wet van Newton en die voor de beweging van water zegt, dat de totale zogenoemde mechanische energie van een waterdeeltje, de som van kinetische en potentiële energie, alleen kan toe- of afnemen met de door een in of tegen de verplaatsingsrichting in werkende uitwendige kracht verrichte arbeid.
- e) de wet van behoud van massa, die voor "relatief" onsamendrukbaar open water zegt, dat verplaatsingen van watermassa's gepaard moeten gaan met overeenkomstige volumeveranderingen;

In de gebruikelijke beschrijvingswijzen van de lokale, momentane getij-beweging van water worden, uit met name de wet tot behoud van massa (a) en de tweede wet van Newton (d), de zogenoemde balansvergelijkingen voor respectievelijk volume en impuls geformuleerd. Zij vormen op hun beurt weer de basis voor de zogenoemde continuïteitsvergelijkingen en de bewegings-vergelijkingen. Vanwege het in eerste orde grotendeels ééndimensionale karakter van de getijbeweging in het Schelde-estuarium zal voor de beschrijving en analyses in deze studie meestal worden uitgegaan van de ééndimensionale vormen van deze vergelijkingen. Die staan bekend als de vergelijkingen van De Saint-Venant of ook wel ééndimensionale ondiepwatervergelijkingen (Battjes, 2001). Op deze vergelijkingen wordt teruggekomen in de paragrafen 3.3 en 4.1.

3.2.2. de krachten die de getijbeweging bepalen

De uitwendige krachten, die werken op de watermassa's aan de oppervlakte van de aarde en de grootschalige bewegingen zoals de getijbeweging bepalen, zijn (von Arx, 1962; Dronkers, 1964; Kalkwijk, 1976):

- a) de aantrekkende krachten van aarde, maan en zon, volgens de gravitatiewet van Newton; deze zogenoemde gravitatiekrachten zijn recht evenredig met het product van de massa's en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de onderlinge afstand van de beschouwde massa's; de gravitatiekrachten van aarde, maan en zon samen verwekken en onderhouden het getij, terwijl die van de aarde alleen (de zwaartekracht) de hoofdrol speelt in de voortplanting over de aarde;

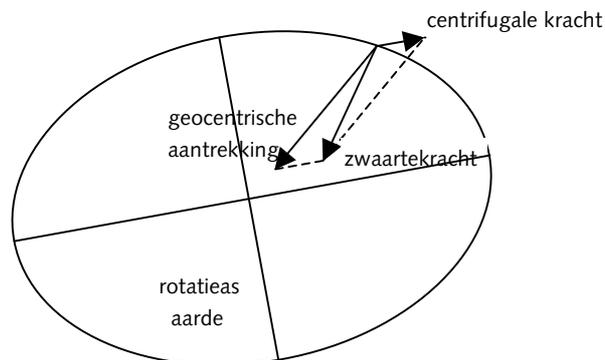
- b) de vervalkrachten, die voortkomen uit ruimtelijke drukgradiënten in de watermassa's en de aandrijvende krachten vormen voor de verplaatsingen ervan over de aarde;
- c) de wrijvingskrachten, die bodem en randen van oceanen, zeeën, zeearmen, estuaria en rivieren uitoefenen op het ten opzichte daarvan bewegende water; deze krachten werken tegen de relatieve beweging in en zijn evenredig met het kwadraat van de watersnelheden; zij zijn verantwoordelijk voor de afname van de mechanische energie van het water, de dissipatie van getijenergie;
- d) de traagheidskrachten, eigenlijk geen echte "krachten" maar ervaren als zodanig, als de weerstand van materie tegen verandering van beweging door uitwendige krachten; het kan gaan om transversale en/of centrifugale traagheidskrachten bij respectievelijk verandering van grootte en/of richting van de snelheid; ze zijn kwantitatief gelijk aan het product van massa en versnelling en tegengesteld gericht aan deze versnelling; een bijzondere typische traagheidskracht en relevant voor de getijbeweging is de nog aan de orde komende kracht van Coriolis.

In de genoemde bewegingsvergelijkingen vormen de onder a) t/m c) genoemde krachten een balans met de onder d) genoemde traagheidskrachten, die in die vergelijkingen de traagheidstermen worden genoemd.

3.2.3. zwaartekracht, getijverwekkende kracht en kracht van Coriolis

De aarde en de maan draaien om elkaar om hun gemeenschappelijke zwaartepunt. Het stelsel aarde-maan roteert weer om de zon. De aarde draait ook om haar eigen as. Uit de gravitatiekrachten van aarde, maan en zon (a) en de traagheidskrachten tengevolge van de bewegingen ten opzichte van elkaar en van de draaiing van de aarde om haar eigen as (c) resulteren drie belangrijke soorten krachten voor de getijbeweging van water op de aarde: de zwaarte-kracht, de getijverwekkende krachten en de krachten van Coriolis. Voor de materie aan de oppervlakte van de aarde zijn de gravitatiekracht van de aarde zelf, en de centrifugale krachten door de draaiing van de aarde om haar eigen as sterk dominant. Zij bepalen de ervaren zwaartekracht op de aarde. De gravitatiekracht is gericht naar ongeveer het centrum van de aarde. De, veel kleinere, centrifugale kracht werkt loodrecht op de draaiingsas van de aarde. Op een ronde aarde zou de gravitatiekracht de radiaal gerichte component van de centrifugale kracht kunnen leveren. Er zou dan echter als resultante een naar de evenaar gerichte transversale component van de centrifugale kracht overblijven. Alleen aan de polen en aan de evenaar zou deze kracht ontbreken: aan de evenaar hebben gravitatiekracht en centrifugale kracht tegengestelde richting en aan de polen ontbreekt de centrifugale kracht.

.....
fig 3.1
 invloed draaiing aarde op zwaartekracht



Onder invloed van de spanning, die deze component in de materie veroorzaakt, heeft de aarde haar vorm aangepast tot een ellipsoïde, zodanig dat de gravitatiekracht ook de

langs de aardoppervlakte component van de centrifugale kracht, of wel deze kracht helemaal kan leveren. De Newtonse gravitatiekracht, de zwaartekracht, werkt nu wél overal loodrecht op de gemiddelde omtrek van de aarde, maar is tussen polen en evenaar niet meer helemaal gericht naar het massacentrum van de aarde. De grootste afwijking bedraagt 11' op de 45°-breedtegraden. De sterkte wordt gereduceerd met de volledige centrifugale kracht: tussen polen en evenaar gemiddeld 0.3 % van de ongereduceerde waarde aan de polen. Naast de centrifugale kracht hebben ook de getijverwekkende krachten en de krachten van Coriolis-componenten die nog een, overigens geringe, invloed hebben op de zwaartekracht. De getij-verwekkende krachten ontstaan als resultanten van de gravitatiekrachten en traagheidskrachten van aarde, maan en zon op het water aan de oppervlakte van de aarde en genereren en onderhouden de schommelingen van de watermassa's in de oceanbekkens. Buiten de oceanen is hun directe invloed op de waterbeweging nog gering. Dit wordt duidelijk geïllustreerd door de Middellandse Zee, waar slechts een zeer geringe getijbeweging optreedt. De krachten van Coriolis ontstaan uit de draaiing van de aarde om haar eigen as. De invloed van deze krachten reikt ruimtelijk verder: ze beïnvloedt de stroompatronen op de oceanen tot die in brede zeearmen, estuaria en rivieren.

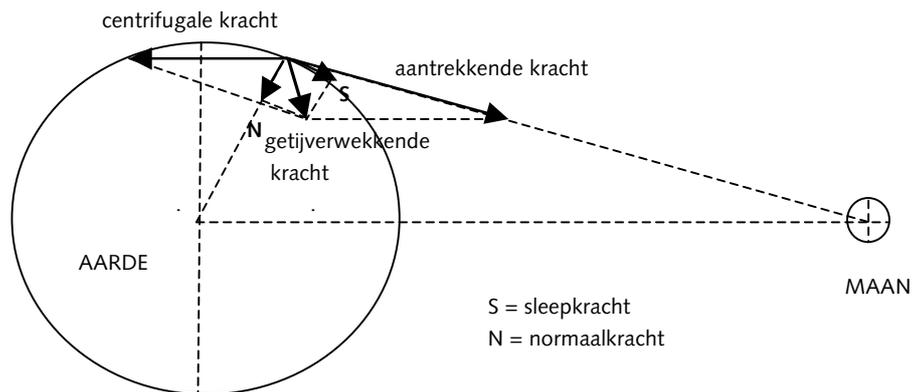
3.2.4. de getijverwekkende krachten

Voor aarde, maan en zon als geheel zijn de aantrekkende (gravitatie-)krachten in evenwicht met de centrifugale (traagheids-)krachten. Voor afzonderlijke materiële deeltjes buiten de zwaartepunten, zoals voor water aan de oppervlakte van de aarde, zijn er kleine afwijkingen van deze evenwichten. De verschilkrachten vormen de door maan en zon uitgeoefende getijverwekkende krachten, in principe beiden op dezelfde manier. Hierna wordt daarom alleen het ontstaan van de sterkste, die van de maan, beschreven. Ze variëren ruimtelijk over de aarde met de afstand tot de maan en temporeel met de rotatie van de aarde om haar eigen as en met de periodiek veranderende onderlinge afstanden van aarde, maan en zon. De aarde beschrijft in ongeveer 28 dagen een ongeveer ellipsvormige baan om haar gemeenschappelijke zwaartepunt met de maan. Deze beweging kan beschouwd worden als een translatie langs deze baan en een rotatie om haar eigen as. De rotatie om haar eigen as heeft dezelfde effecten als die van de dagelijkse rotatie, zoals hiervoor beschreven, alleen nog geringer door de kleinere hoeksnelheid. Tengevolge van de translatie beschrijven alle deeltjes op de aardoppervlakte dezelfde baan, met dezelfde "straal" als die van het zwaartepunt van de aarde en daarvan verschoven liggend over een afstand gelijk aan de straal van de aarde. De centrifugale versnellingen die "materiële" deeltjes op die posities ondergaan zijn dus op elk moment en overal gelijk in grootte en gericht naar de maan, evenwijdig aan de verbindingslijn tussen aarde en maan door het gemeenschappelijk zwaartepunt. Hetzelfde geldt dan ook voor de krachten die deze versnellingen zouden moeten realiseren.

De aantrekkende (gravitatie-)krachten tussen de maan en de afzonderlijke materiële deeltjes op de aarde zijn in grootte omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot en gericht naar het zwaartepunt van de maan. Grootte en richting van deze kracht varieert dus met respectievelijk de afstand tot de maan en de positie op de oppervlakte van de aarde. Voor bijna alle posities op het naar de maan toegekeerde deel ervan zijn deze krachten groter dan de gemiddelde waarde, die geldt voor ongeveer het centrum van de aarde, voor die op het ervan afgekeerde deel zijn ze kleiner. De aantrekkende kracht van de maan op het water op de oppervlakte van de aarde heeft daarom bijna nergens precies dezelfde grootte en richting om alleen de centrifugale versnelling te realiseren.

Er blijft een restkracht over die de waterdeeltjes een extra versnelling geeft boven de centrifugale. Dit wordt de getijverwekkende kracht genoemd. Ze kan worden ontbonden in een horizontale component (S), langs de oppervlakte, en een component loodrecht daarop (N), gericht naar het centrum van de aarde. Laatstgenoemde component versterkt of verzwakt in feite, echter in voor het getij verwaarloosbare mate, de zwaartekracht van de aarde. De horizontale component, de sleepkracht, zou aan een geheel met water bedekte aarde de vorm van een ellipsoïde geven, als de aarde steeds dezelfde oriëntatie ten opzichte van de maan zou houden en niet om haar eigen as zou draaien. Deze sleepkracht zou evenwicht maken met de verhangen volgens de ellipsoïde. Dit wordt het evenwichtsgetij genoemd.

fig 3.2
ontstaan getijverwekkende kracht door de maan



Zoals genoemd leveren zowel maan als zon een dergelijke "sleepkracht". Die van de maan is ongeveer tweemaal zo groot als die van de zon. Deze door maan en zon uitgeoefende krachten zijn zeer klein ten opzichte van de zwaartekracht van de aarde. Ze zijn orde tien miljoen maal zo klein maar toch groot genoeg om de getijbeweging op de aarde te onderhouden. De variatie in de tijd van de sleepkracht door de draaiing van de aarde om haar as "verstoorde" de evenwichten volgens de ellipsoïdevorm en brengt de watermassa's in beweging ten opzichte van de aarde. De continenten blokkeren en reflecteren deze waterverplaatsingen, terwijl de traagheid van de watermassa's en de door de diepte beperkte voortplantingssnelheden de waterbewegingen vertragen ten opzichte van de aandrijvende krachten. Zo ontstaan schommelingen van de watermassa's in de oceanbekkens met complexe ruimtelijke en temporele patronen, de oceaantijden.

3.2.5. de getijbeweging op de oceanen

Alleen de oceanen zijn groot genoeg om uit de getijverwekkende krachten een getijbeweging van substantiële sterkte tot ontwikkeling te laten komen. Benaderende berekeningen geven aan dat de relatief kleine getijverwekkende krachten slechts in staat zijn rechtstreeks een getij met een amplitude van enkele tientallen centimeters te genereren. Dat de orde van grootte van het werkelijke getij op aarde rond één meter bedraagt wordt veroorzaakt door het feit dat resonanties optreden in de oceanbekkens. Dit gebeurt doordat op meerdere plaatsen de eigen (slinger-)frequentie van delen van oceanbekkens in de buurt ligt van de frequentie van de sleepkracht(en) (Kalkwijk, 1976).

Zo zijn op de oceanen meerdere grotere en kleinere cellen te onderscheiden met elk een getijbeweging, die meestal is samengesteld uit een staande golfbeweging en een lopende golfbeweging. In de staande golfbeweging blijft de totale mechanische energie behouden: er wordt doorlopend, alleen onder invloed van de zwaartekracht, kinetische energie in potentiële energie omgezet en omgekeerd. Met het "lopende deel" van de

golfbeweging vindt een doorgaand transport van golfenergie (mechanische energie) plaats. Deze energie wordt aangevoerd in de vorm van de met de verplaatsingen van de watermassa's door de getijverwekkende krachten verrichte arbeid. Ze wordt afgevoerd via energieverliezen op de oceanen zelf en met zich uit de oceanen naar randzeeën voortplantende lopende getijgolven. In feite treden in randzeeën en in zeearmen en estuaria dezelfde samengestelde getijbewegingen op. Met de afname van de afmetingen, en vooral van de diepte, nemen de energieverliezen sterk toe. Een tweede verschil is dat de aanvoer van golfenergie naar deze gebieden met de door de randen binnenlopende getijgolven uit oceanen, respectievelijk randzeeën snel sterk dominant wordt ten opzichte van de directe overdracht door de getijverwekkende krachten.

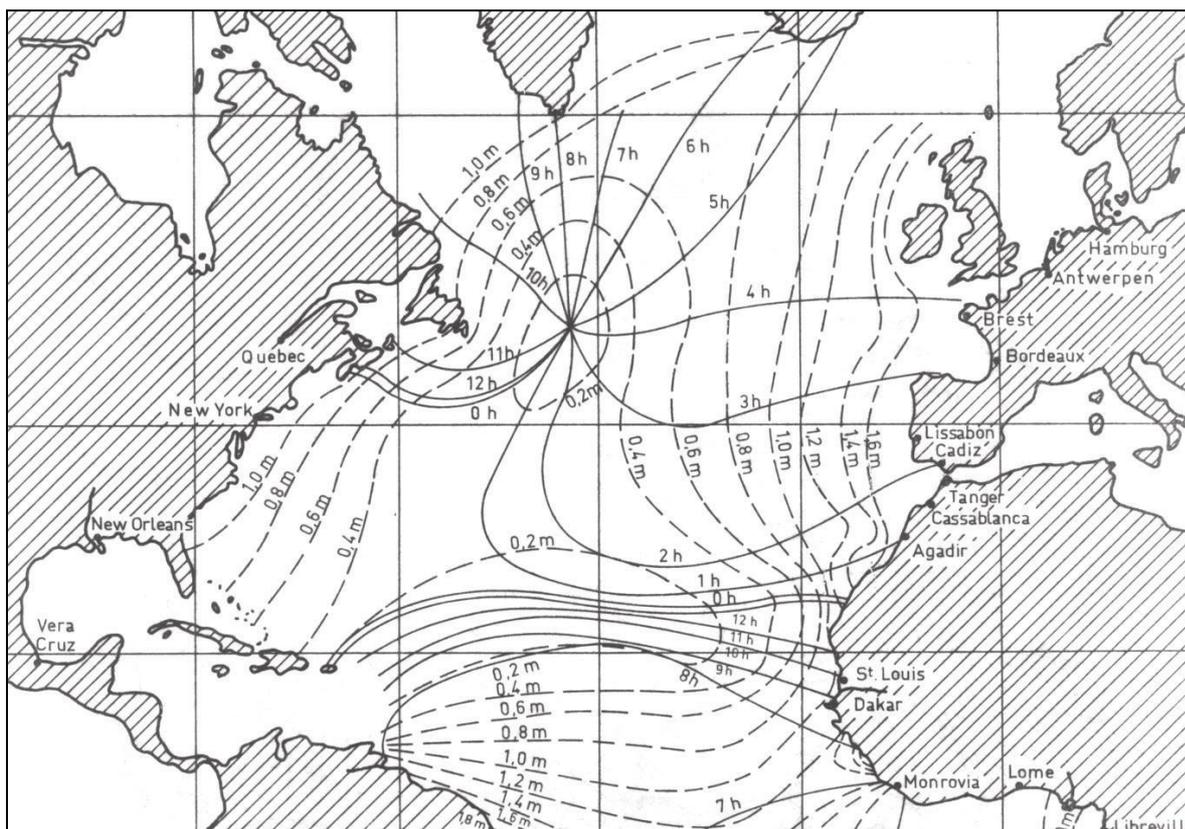


fig 3.3
getijbeweging op midden en noorden van
Atlantische oceaan (Kalkwijk, 1976)

Het is in feite de draaiing van de aarde om haar eigen as die in combinatie met de aantrekkende krachten van maan en zon de schommelingen van de watermassa's op de oceanen veroorzaakt. Naast deze invloed heeft de draaiing van de aarde via het zogenoemde Coriolis-effect nóg een heel belangrijke invloed. Op oceanen, en ook in randzeeën, versterkt dit effect bij op de kusten gereflecteerde getijgolven de genoemde celvorming. Op brede stromen in zeearmen en estuaria kunnen erdoor dwarsverhangen van dezelfde grootteorde als in de hoofdstroomrichting optreden.

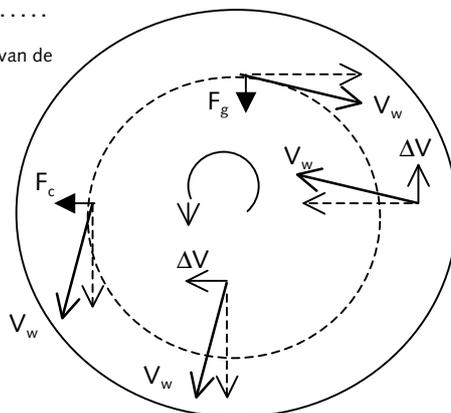
3.2.6. het Coriolis-effect

Het Coriolis-effect is sterk bepalend voor het Noordzeegetij en heeft ook invloed in het mondingsgebied en de Westerschelde zelf. Het wordt hierna algemeen en bij de beschrijvingen van het Noordzeegetij en het getij in het mondingsgebied meer specifiek

verklaard. In het voorgaande is de invloed van de rotatie van de aarde om haar eigen as op de materie op de aarde-oppervlakte beschreven. De aarde heeft onder invloed van de centripetale krachten haar vorm zodanig aangepast dat overal op de aarde de gravitatiekrachten de door de rotatie op de materie werkende centripetale krachten kunnen opnemen. De resultante van beide krachten, de ervaren zwaartekracht, staat overal loodrecht op de gemiddelde aarde-oppervlakte ter plaatse (fig.3.2). Voor een met de lokale omtreksnelheid van de aarde meebewegend, dus ten opzichte van de aarde niet-bewegend, materiëel deeltje, is er evenwicht tussen de werking van de zwaartekracht, het gewicht, en de bodemspanning of hydrostatische waterdruk ter plaatse. Water in rust ten opzichte van de aarde wordt door de aardrotatie niet versneld of vertraagd. Er kan nu worden afgeleid dat wél ten opzichte van de aarde bewegend water door de draaiing van de aarde wél een versnelling krijgt. De baan van dat bewegende water krijgt erdoor een afbuiging, in de bewegingsrichting gezien op het noordelijk halfrond naar rechts en op het zuidelijke halfrond naar links. Of wel stromend water ondervindt op het noordelijke halfrond in de stroomrichting gezien een kracht naar rechts en op het zuidelijke halfrond naar links. Als deze afbuiging door kusten of oevers wordt verhinderd bouwt zich een tegenverhang op. Dit is het zogenoemde Coriolis-effect. Het is typisch een traagheidseffect, dat als volgt kan worden begrepen.

De traagheid van materie geldt ten opzichte van een absolute ruimte. Met de omtreksnelheid van de aarde bewegend materie aan de aardoppervlakte zou in die absolute ruimte een rechte baan in de richting van de momentane snelheid willen volgen. In het voorgaande is beschreven hoe een deel van de gravitatiekrachten de centripetale versnellingen leveren zodanig dat ten opzichte van de aarde niet-bewegende materie "bij de aarde blijft". Variaties in de radiaal gerichte component van de centripetale kracht kunnen gemakkelijk door de veel grotere gravitatiekrachten worden opgebracht. Met de langs de aardoppervlakte gerichte component is dat niet het geval. Om materie op haar plaats op de aarde te houden heeft immers de aarde zich moeten omvormen tot een ellipsoïde. Ten opzichte van de aarde bewegend water heeft een andere absolute snelheid als de aarde ter plaatse. De met het kwadraat van de snelheid evenredige centripetale kracht is dus ongelijk aan die waarmee de gravitatiekracht ter plaatse evenwicht kan maken en ten opzichte van de aarde niet bewegend materie op haar plaats kan houden. Als de snelheid van water ten opzichte van de aarde een component heeft in oostelijke richting, dus in de draaiingsrichting van de aarde, dan is de snelheid en daarmee de centripetale kracht "te groot". Het water zal een ruimere baan zoeken, of wel de baan zal afbuigen in de richting van de evenaar, naar rechts op het noordelijke halfrond en naar links op het zuidelijke. Bij naar het westen bewegend water is de gravitatiekracht "te groot" en de beweging wordt afgebogen in de richting van de polen, ook weer naar rechts op het noordelijke en naar links op het zuidelijke halfrond.

fig 3.4
Coriolis-effect op noordelijk halfrond van de aarde



Op een bepaald moment zuiver noord-zuid of zuid-noord bewegend water heeft in tangentiële richting een impuls behorend bij de omtreksnelheid van de aarde ter plaatse. Op het noordelijke halfrond beweegt het naar posities met respectievelijk hogere of lagere omtreksnelheid en zal respectievelijk gaan achterlopen of voorlopen ten opzichte van de bewegende aarde, of wel de baan zal naar rechts worden afgebogen. Op het zuidelijke halfrond geldt het omgekeerde. Omdat hiermee ook weer de snelheid in de draairichting van de aarde verandert, treedt hierdoor ook weer een tweede orde afbuiging naar het noorden of zuiden op. Afgeleid kan worden dat overal tengevolge van beide effecten de afbuiging loodrecht op de snelheid ten opzichte van de aarde staat, naar rechts op het noordelijke en naar links op het zuidelijke halfrond, en dat de grootte van de kracht die de afbuiging veroorzaakt per eenheid van massa als volgt kan worden berekend:

$$F_c = f \cdot V = (2\omega \sin \varphi)V \quad (3.1)$$

waarin $f = 2\omega \sin \varphi$ de zogenoemde Coriolis-parameter, V = snelheid ten opzichte van de aarde, ω = de hoeksnelheid van de rotatie van de aarde ($\cong 0,73 \times 10^{-4}$ rad/s) en φ = breedte in graden.

Het is goed te realiseren dat de Coriolis-kracht in eerste instantie een afbuiging veroorzaakt die meetbaar wordt over grotere afstanden en bij voldoende grote stroomsnelheden. Een verhang kan alleen worden ontwikkeld als de afbuiging verhinderd wordt door kusten of oevers. De Corioliskracht is orde 10 tot 100 maal zo sterk als de relevante component van de getijverwekkende kracht, de sleepkracht. Daarom heeft de sleepkracht alleen substantiële invloed over grote afstanden op de oceanen, terwijl de Coriolis-kracht al een rol gaat spelen in brede estuaria. Golfverschijnselen waarbij de Coriolis-kracht dezelfde orde van grootte heeft als de verhangkrachten worden Kelvin-golven genoemd. Zij komen veel voor op de oceanen, in randzeeën en brede zeearmen en estuaria, waar substantiële stroomsnelheden optreden. Als ook substantiële reflecties optreden ontstaan zogenoemde amphidromische systemen, waarin de voortplanting van bijvoorbeeld het hoogwater langs sterk gebogen of rondgaande banen verloopt (fig. 3.3). Op 50° Noorderbreedte kan het Coriolis-effect bij een snelheid van 1 m/s een dwarsverhang ontwikkelen van $\approx 1 \times 10^{-5}$, of wel een verval van 0.01 m per km breedte van de stroom. Een normaal verval in de stroomrichting in getijstromen bedraagt enkele centimeters per km. Ondiepten met lage stroomsnelheden tussen parallelgeulen beperken de sterkte van deze dwarsverhangen.

3.2.7. aanvoer, transport, reflectie en verlies van getijgolfenergie

Met de arbeid die zij verrichten om de watermassa's in de oceanen te verplaatsen dragen de aantrekkende krachten van maan en zon mechanische energie over aan dit water. Gemiddeld in de tijd wordt er als arbeid van deze krachten evenveel mechanische energie op deze watermassa's overgedragen als er op de aarde door allerlei processen wordt afgenomen. Tijdens het transport van de oceanen naar estuaria met lopende getijgolven kan getijgolf-energie ruimtelijk accumuleren of zich verspreiden, gereflecteerd worden of dissiperen. Deze processen treden in feite binnen een estuarium in geconcentreerde vorm en gelijktijdig op. Welk proces optreedt hangt af van de omvang en de snelheid van de verandering van de geometrie bij het naderen van de continenten en binnenlopen in randzeeën en estuaria. Meestal treedt in eerste instantie versterking op door "shoaling" of door reflectie.

Als de diepteafname ruimtelijk zeer geleidelijk verloopt, dat wil zeggen als de relatieve diepteverandering over een afstand van de orde van de getijgolf lengte klein is, treedt

shoaling op. Alle getijgolfenergie, afgezien van eventuele energiedissipatie door wrijvingsweerstand, blijft getransporteerd worden in de golfvoortplantingsrichting, zij het met een lagere transportsnelheid door de afnemende diepte. Of wel er accumuleert ruimtelijk golfenergie over een kleinere golflengte, waardoor de golfhoopte toeneemt. De amplitudetoename kan berekend worden uit het "behoud" van de getijgolfenergie. Dit is de wet van Green (Lamb, 1872, 1932). Wanneer de ruimtelijke relatieve diepte- verandering, of relatieve profielverandering in bijvoorbeeld een randzee of estuarium, groot is in relatie tot de getijgolflengte treedt reflectie van getijgolfenergie op. Dit gebeurt aan oceaan- en randzeekusten en vrijwel altijd in zeearmen en estuaria en zeker aan gesloten einden ervan.

3.2.8. shoaling en reflectie

In de literatuur over de getijgolfvoortplanting in estuaria wordt ten onrechte weinig aandacht besteed aan de essentiële verschillende invloed op de getijgolf van shoaling en van reflectie. Lamb (1872, 1932) besteedt er enige aandacht aan. Bij shoaling en reflectie is er sprake van lopende en van samengestelde golven (par. 3.5). In een zuivere lopende golf is er in ruimte en tijd een constante evenredigheid tussen de grootte van het debiet en de waterstands-uitwijking en is het debiet eventueel over een eveneens in ruimte en tijd constante fasehoek verschoven ten opzichte van de waterstandsuitwijking. De evenredigheid in grootte wordt bepaald door de lokale geometrie, de eventuele faseverschuiving door de verhouding weerstand / traagheid. Een samengestelde golf kan beschouwd worden als de resultante van twee zuivere in tegengestelde richting lopende golven, waarbij genoemde evenredigheid en faseverschuiving ruimtelijk kunnen variëren. Van deze beschrijvingswijze wordt gebruik gemaakt bij de zogenoemde harmonische methode (par. 4.4).

Bij shoaling blijft er sprake van een lopende golf, waarvan de golfamplitude en de golflengte geleidelijk veranderen in de voortplantingsrichting vanaf de plaats waar de diepte- of profielverandering begint. In principe beïnvloedt de diepte- of profielverandering de golf niet, vóórdat de lopende golf deze plaats heeft bereikt. Zolang aan de genoemde voorwaarden voor shoaling voldaan blijft worden, hebben derhalve ook veranderingen in de tijd van het doorstroom-profiel, op natuurlijke wijze ontstaan of kunstmatig aangebracht, géén invloed op de waterbeweging aan de aanloopzijde ervan. Bij reflectie heeft de meer abrupte profielverandering wél invloed op de waterbeweging aan de aanloopzijde. Een deel van een "oorspronkelijk" lopende golf loopt door als "lopende" golf en een deel wordt gereflecteerd door de profielverandering en interfereert met de "oorspronkelijke lopende golf. Aan de aanloopzijde ontstaat een samengestelde golf. De "gereflecteerde lopende golf" brengt als het ware de invloed van de profielverandering in in de samengestelde golf, aan de aanloopzijde van ervan. Bij reflectie heeft een dergelijke ruimtelijke profielverandering dus wél invloed op de waterbeweging in het gebied aan de aanloopzijde.

Schönfeld (1951) besteedt zeer uitgebreid aandacht aan deze reflectie als een eerste orde beschrijvingswijze van een samengestelde golfbeweging. ... geeft een voorbeeld van het verschil tussen de werking van shoaling en reflectie bij een diepteovergang van oceaan naar randzee met diepten van 4000 m en 200 m. Van een normaal op de dieptelijnen inlopende golf met een amplitude van 1 m groeit deze amplitude bij shoaling, waarbij de diepteafname zo geleidelijk verloopt dat geen golfenergie wordt gereflecteerd, naar een waarde van 2.10 m. Bij een relatief abrupte diepteafname van 4000 naar 200 m geeft een oorspronkelijk inlopende golf met een amplitude van 1.00 m een gereflecteerde golf van 0.64 m en een doorgelaten golf van 1.64 m. Bij shoaling bestaat er dus een golf met een amplitude van 1 m die vanaf de diepteovergang groeit naar 2.10

m; bij reflectie bestaat er dus over het hele gebied een golf met een amplitude van 1.64 m, die vanaf de diepteverandering overgaat van een samengestelde golf in een lopende golf. Vaak wordt in estuaria ten onrechte uitgegaan van shoaling, terwijl veel vaker sprake is van reflectie. Getijgolven in estuaria hebben meestal golflengten van meerdere honderden kilometers, ten opzichte waarvan gebruikelijk optredende relatieve breedte- en/of diepte-veranderingen zo groot zijn dat reflectie domineert. In het Schelde-estuarium bepaalt het proces, dat zoals in het voorgaande met het begrip reflectie kan worden beschreven, samen met de energiedissipatie, door vooral de wrijvingsweerstand, in feite in eerste orde de getijvoortplanting.

3.2.9. opwekking, onderhoud, voortplanting en demping van het globale getij

De getijbeweging op de aarde als geheel maakt deel uit van een "globaal" proces van overdracht naar, transport door en verlies van mechanische energie van de watermassa's op aarde. Een golfbeweging bevat een hoeveelheid kinetische en potentiële energie, samen mechanische energie genoemd. Met de arbeid die zij verrichten om de watermassa's in de oceanen te verplaatsen dragen de aantrekkende krachten van maan en zon mechanische energie over aan dit water. Gemiddeld in de tijd wordt er kennelijk evenveel mechanische energie op deze watermassa's overgedragen als er op de aarde door allerlei processen wordt afgenomen. Immers, op normale menselijke tijdschaal gezien neemt de totale op de aarde aanwezige getijenergie niet waarneembaar toe of af. In de ruime, diepe oceaanbekkens is de directe afname van getijenergie relatief gering. Een belangrijk deel van de aanwezige getijenergie wordt ook opgeslagen in de deels uitstaande golfbewegingen bestaande schommelingen van de watermassa's. Naast de directe dissipatie van getijenergie aan de oceaankusten van de continenten vindt een belangrijk deel van de afname plaats door weglekken naar randzeeën en verder naar zeearmen, estuaria en rivieren. De vanuit de oceanen naar deze gebieden lopende getijgolven zorgen voor het transport van deze getijenergie.

Het getij in de randzeeën wordt bepaald door de interactie van het aan de randen opgelegde oceaangetij met de geometrie van het gebied. Van de astronomische invloeden heeft zoals beschreven buiten de oceanen alleen het zogenoemde Coriolis-effect, veroorzaakt door de draaiing van de aarde, nog rechtstreekse invloed op de waterbeweging. In de randzeeën neemt in het algemeen de energiedissipatie toe, doordat de kleinere waterdiepten en eventueel vernauwingen de watersnelheden en de wrijvingsweerstand vergroten. Zoals de arbeid van getijverwekkende krachten op de watermassa's in de oceanen de afname van getijenergie op de hele aarde compenseert wordt de landwaarts van de oceaandrands gedissipeerde energie weer aangevuld door het transport van getijenergie met van de oceaan komende lopende getijgolven. Een soortgelijke balans treedt op tussen randzeeën enerzijds en ondiepe kustengebieden, zeearmen, estuaria en getijrivieren anderzijds. Laatstgenoemde gebieden bevinden zich aan het einde van het traject van transport van getijenergie. Gerelateerd aan de hoeveelheid getijenergie die deze gebieden bereikt is hier de energiedissipatie het sterkst. Over voldoende grote afstanden kan de getijbeweging in ondiepe gebieden uitdempen.

3.3. De voortplanting van een getijgolf

Aan de oceaandrands van een randzee of de zeerand van een zeearm, estuarium of rivier wordt een waterbeweging, "een getij", opgelegd aan respectievelijk randzee of zeearm, estuarium of rivier. Vervolgens breidt deze beweging zich uit over deze gebieden. Of geformuleerd in de gebruikelijke terminologie: het oceaangetij of randzee levert een randvoorwaarde voor respectievelijk randzee of estuarium en de daarmee op die plaats gedefinieerde waterbeweging plant zich als een getijgolf voort de randzee of het estua-

rium in. Vragen naar de getijbeweging die in een gebied optreedt of zal gaan optreden worden meestal randvoorwaardenproblemen genoemd en overeenkomstig behandeld. Er worden wiskundige formules gezocht, bijvoorbeeld harmonische functies, die kunnen voldoen aan de basisvergelijkingen en aan de randvoorwaarden. De beschrijvende functies worden "gefit" op de randvoorwaarden. Vooral het feit dat het niet nodig is de beweging "op te bouwen" vanuit het ontstaan, het "inspelen" van de beweging te volgen, veroorzaakt vaak een té grote stap van de fysisch redelijk te begrijpen basisformuleringen naar een complexe optredende getijbeweging, zoals bijvoorbeeld het Scheldegetij. Benaderingen als de harmonische methode en vooral de methode van integratie langs karakteristieken ontleen hun "inzichtgevende" waarde aan het feit dat zij wél laten zien hoe de beweging ontstaat. Vooral laatstgenoemde methode maakt duidelijk waar de veel gebruikte begrippen (getij-)randvoorwaarde en getijvoortplanting in de werkelijkheid voor staan (Schönfeld,1955; Battjes,2001). Hierna wordt beschreven hoe een opgelegd getij aan een rand als randvoorwaarde en de getijvoortplanting "werken"!

3.3.1. de voortplanting van een storing in open water

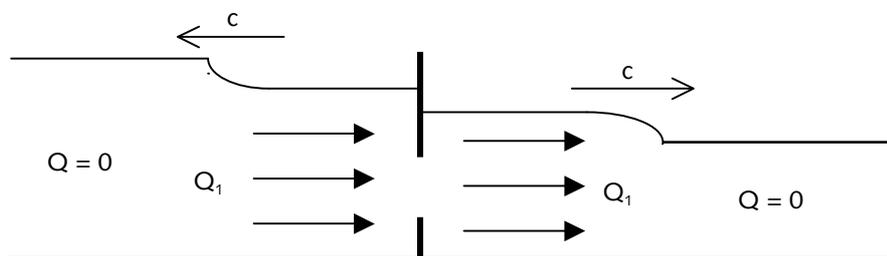
Schönfeld (1955) geeft als definitie en beschrijvingen van het begrip voortplanting: "We zullen van voortplanting spreken wanneer een gebeurtenis op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip van invloed is op wat er op een andere plaats enige tijd later gebeurt" en "We zullen dan van voortplanting kunnen spreken, wanneer we een direct verband kunnen leggen tussen de twee beschouwde bewegingstoestanden H_1, Q_1 op plaats x_1 en tijdstip t_1 , en de bewegingstoestand H_2, Q_2 op plaats x_2 op een later tijdstip t_2 ".

Een lopende getijgolf kan worden beschouwd als een cumulatieve, aaneengeschakelde reeks zich in de ruimte voortplantende enkelvoudige "verstoringen", veroorzaakt door een op een bepaalde plaats "optredende" reeks waterstands- of debietveranderingen. Met een "verstoring" wordt hier een verandering van een bewegingstoestand bedoeld. Vanwege het belang voor het inzicht in de getijbeweging wordt hierna, op een mogelijk triviaal overkomende manier, zeer precies gevolgd wat er gebeurt bij de opwekking en voortplanting van een enkelvoudige verstoring in open water (Battjes, 2001).

Een kering met een beweegbare schuif verdeelt een lang relatief diep kanaal met gelijkblijvend dwarsprofiel in twee panden met verschillende waterstand. Als de schuif wordt geopend ontstaat er een debiet van het hoge naar het lage pand. Door de onttrekking van water aan het hoge pand treedt daar een waterspiegeldaling op die zich vanaf de kering in bovenstroomse richting voortplant. In het lage pand ontstaat door de toevoeging van water een waterstandsverhoging op die zich vanaf de schuif voortplant in beneden-stroomse richting.

fig 3.5a

ontstaan van een enkelvoudige verstoring

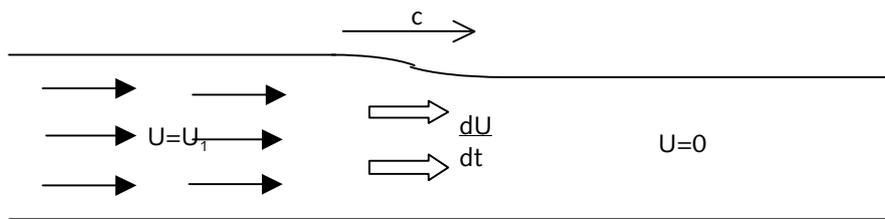


Met het openen van de schuif ontstaat in de opening een drukverschil, dat het water ter plaatse in beweging brengt, versnelt, in de richting van het hoge naar het lage pand. Het verder van de schuif verwijderde water is nog in rust. Uit de schuif water direct bovenstrooms van de schuif wordt aan de schuifzijde water onttrokken, terwijl er wat verder

bovenstrooms (nog) geen water wordt toegevoerd. De waterspiegel daalt ter plaatse. Aan de benedenstroomse kant van de schuif stijgt de waterstand omdat er aan de schuifzijde water wordt toegevoerd, terwijl er aan de benedenstroomse zijde nog geen water wordt afgevoerd. Deze verschijnselen demonstreren de wet van behoud van massa (volume), kwantitatief geformuleerd in de continuïteitsvergelijking. De bewegingsvergelijking werkt hier als volgt. Direct na het openen van de schuif is de door het verval veroorzaakte kracht op het water ter plaatse groter dan de door de nog kleine watersnelheden bepaalde stromingsweerstand over de opening. De resultante van vervalcracht en weerstandskracht versnelt het water en de stromingsweerstand neemt toe. Met het dalen en stijgen van de waterstanden aan weerszijden van de schuif neemt het verval af. Als de vervalcracht en de weerstand even groot zijn geworden nemen de watersnelheden ter plaatse van de opening niet meer toe en krijgt het debiet een constante waarde. Door de stromingsweerstand over de schuif, de verliezen, blijft er een waterstandsverschil over de schuif bestaan.

Zolang de watersnelheden in de opening nog toenemen, en daarmee het debiet, varieert de grootte van het debiet van nul op enige afstand bovenstrooms naar een maximum in de opening tot weer nul op enige afstand benedenstrooms. Deze gradiënt in het debiet doet de waterspiegel afnemen in de richting van het toenemende debiet, bovenstrooms naar de schuif toe, en toenemen in de richting van het afnemende debiet, benedenstrooms van de schuif af. Als de snelheden in de opening de constante waarde hebben bereikt en daarmee ook de debieten aan weerszijden van de schuif, wordt de ruimtelijke debietgradiënt gelijk nul en blijft de waterstand ook constant. Dit alles volgens de wet van behoud van massa, en voor relatief onsamendrukbaar water, de wet van behoud van volume. Aan weerszijden van de schuif ontstaat in beide panden een debietverandering van $Q = 0$ naar $Q = Q_1$. Eerst wordt de voortplanting in het benedenstroomse pand gevolgd. In het golffront is dank zij de helling van de waterspiegel een verhangkracht werkzaam die het water eronder versnelt in de richting van hoge naar lage waterspiegel. Het water benedenstrooms van het front is aanvankelijk in rust. Tijdens het passeren van het front wordt het water ter plaatse door de verhangkracht versneld en krijgt een steeds hogere snelheid. Is het front voorbij en is de waterspiegel weer horizontaal dan is de verhangkracht nul en blijft de inmiddels opgebouwde hoeveelheid van beweging behouden, ofwel het water blijft de opgebouwde snelheid houden.

fig 3.5b
voortplanting van een enkelvoudige verstoring



3.4. De waterbeweging in een getijgolf

De waterbeweging in een getijgolf wordt bepaald door twee fysische basiswetten: de wet tot behoud van massa en de wet tot behoud van hoeveelheid beweging (2^e wet van Newton).

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = -B \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) = -gA_s \frac{\partial h}{\partial s} - c_f \frac{|Q|Q}{A_s R} \quad (3.3)$$

Op open water, zoals in een getijgolf, waar wordt uitgegaan van de relatieve onsamendrukbaarheid van water, komt de wet tot behoud van massa er op neer dat het volume van een bepaalde massa water onder alle omstandigheden behouden blijft.

3.5. de eerste-orde vervorming van een aanvankelijk zuivere lopende periodieke golf

Met een aanvankelijk zuivere lopende golf wordt hier een getijgolf bedoeld, die zich onvervormd voortplant met gelijkblijvende amplitude en waarvan waterstandsuitwijking en debiet in fase zijn, zoals beschreven in de paragrafen 3.3 en 3.4. Onder de eerste-orde vervorming van een dergelijke golf wordt hier de resulterende vervorming tengevolge van twee verschillende processen verstaan: de afname in de voortplantingsrichting van golfenergie door wrijvingsverliezen en de golf(-energie)reflectie door relatief abrupte veranderingen van dwarsprofiel en/of weerstand. Door de energieverliezen neemt de golfamplitude af en door de reflectie ontstaat een golfbeweging die ligt tussen een lopende en een staande golf. De relatief autonoom cyclisch variërende waterstand in het mondingsgebied veroorzaakt overeenkomstige variaties van de debieten in de hals van de Westerschelde. Op te vatten als een continue reeks kleine verstoringen, zoals beschreven in paragraaf 3.3, planten deze waterstands- en bijbehorende debietveranderingen zich voort het estuarium in, met een *in eerste orde* van het doorstroomprofiel, de bergende breedte en de weerstand afhankelijke "fasesnelheid". Bij een prismatisch verloopend "voldoende" ruim en diep dwarsprofiel hebben alle achtereen volgens "verstuurde" verstoringen van waterstand en debiet dezelfde fasesnelheid. Op elke lokatie in het estuarium wordt de randvoorwaarde gereproduceerd met een tijdsvertraging gelijk aan de afstand gedeeld door de fasesnelheid, of wel de hele reeks "verstoringen", de golf, plant zich ruimtelijk, zoals eerdergenoemd, onvervormd voort.

De relatie tussen de zich voortplantende waterstands- en debietveranderingen wordt bepaald door de wet van behoud van massa, mathematisch geformuleerd in de continuïteitsvergelijking, en de tweede wet van Newton, uitgedrukt in de impulsvergelijking of bewegingsvergelijking. De eerste zegt dat de waterspiegel stijgt zolang het debiet in de richting van het bewegende water afneemt, gelijk blijft als het debiet ruimtelijk constant is en daalt als het debiet in de bewegingsrichting toeneemt. Volgens de bewegingsvergelijking veranderen de watersnelheden evenredig met een eventueel aanwezige resulterende uitwendige kracht op de beschouwde massa en veranderen ze niet als de uitwendige krachten in evenwicht zijn. In de getijbeweging van water is het waterstandsverhang de belangrijkste uitwendige kracht, het is de aandrijvende kracht van de beweging. In de hiervoor beschreven situatie van de zich onvervormd voortplantende lopende golf planten de vanaf de rand "verstuurde" waterstandsveranderingen zich met dezelfde fasesnelheid voort. Voor alle "deelverstoringen" geldt de voor gelijkblijvend doorstroomprofiel A_s en bergende breedte B_b uit continuïteits- en bewegingsvergelijking af te leiden fasesnelheid:

$$c = \sqrt{\frac{g * A_s}{B_b}} = \sqrt{g * d} \quad \text{met } d = \text{de gemiddelde diepte over } B_b \quad (3.4)$$

Of wel, de bij elk deel van de golf aan de rand behorende hellingen van de waterspiegel (de waterstandsverhangen) houden dezelfde waarde bij de voortplanting het estuarium in.

Bij een "niet voldoende" ruim en diep, niet-prismatisch verloopend dwarsprofiel, zoals in werkelijkheid in het Schelde-estuarium, verschillen de fasesnelheden van de afzonderlijke verstoringen waaruit de golf opgebouwd gedacht kan worden. Bij een relatief kleine waterdiepte veroorzaken de bij de afzonderlijke verstoringen behorende verschillende waterdiepten verschillen in fasesnelheid. Bovendien varieert de fasesnelheid van de af-

zonderlijke verstoringen bij het passeren van dwarsprofielen met variërend doorstroomprofielen A_s , bergende breedten B_b en weerstandseigenschappen. De hellingen van de waterspiegel veranderen ten opzichte van de golf aan de rand: de golf vervormd! Hydrodynamisch gezien relevant is dat de waterstandsverhangen veranderen bij het naar binnenlopen van de golf. Uiteraard veranderen deze verhangen niet "omdat de fasesnelheden ruimtelijk veranderen".

3.6. de voortplanting van en de waterbeweging in een getijgolf in een estuarium

De voortplanting van en de waterbeweging in een getijgolf in een estuarium kan fysisch goed worden beschreven en begrepen aan de hand van twee processen: de dissipatie door turbulenties en vooral wrijvingsweerstand en de transmissie en reflectie bij veranderingen van doorstroomprofiel van de aan de monding aangevoerde getijgolfenergie bij de voortplanting in het estuarium.

3.6.1. de transmissie en reflectie bij profielveranderingen

Vanaf de Noordzee naar de Waddenzee neemt de getijamplitude sterk af. De Staatscommissie Zuiderzee noemde dit de "afzuiging" (Lorentz, 1926). In zijn proefschrift "Propagation of tides and similar waves" besteedt Schönfeld (1951) zeer veel aandacht aan het verschijnsel. Hij behandelt het als de partiële transmissie en reflectie van getijgolfenergie. In het Schelde-estuarium treedt in feite hetzelfde proces op, maar met tegengesteld uiterlijk resultaat: over een groot deel van het estuarium neemt de getijamplitude significant toe. Als de relatieve breedte-, diepte en/of weerstandsverandering van het doorstroomprofiel klein is ten opzichte van de (getij-)golflengte blijft alle getijgolfenergie behouden. De verandering van de getijgolfamplitude kan berekend worden "uit dit behoud", volgens de wet van Green (Lamb, 1932). Bij een relatief abrupte verandering van doorstroomprofiel treedt partiële reflectie van getijgolfenergie op, of wel partiële golfreflectie.

Het is zeer leerzaam de partiële reflectie van een enkelvoudige lopende golf te beschouwen. In eenvoudige vorm kan die als volgt worden beschreven, waterstandsuitwijking:

$$h(x, t) = \hat{h} \cos(kx - \omega t) \quad (3.5)$$

bijbehorend debiet:

$$Q(x, t) = B_b \hat{c} \cdot \cos(\omega t - kx) = B_b c \cdot h(x, t) \quad (3.6)$$

Als een dergelijk golf aanloopt op een verandering van doorstroomprofiel, kunnen uit de voorwaarden van continuïteit van debiet en waterstand aan weerszijden van de profielverandering worden afgeleid dat de factor

$$\gamma = \frac{B_{b2} * c_2}{B_{b1} * c_1} \quad (3.7)$$

bepalend is voor de transmissie en de reflectie van de oorspronkelijke lopende golf. De indices 1 en 2 verwijzen naar bergende breedte en fasesnelheid in het gebied vóór en voorbij de profielverandering. Als ook de weerstands-eigenschappen veranderen wordt de reflectiefactor

$$\gamma = \frac{B_{b2} * c_2 * \cos \delta_2}{B_{b1} * c_1 * \cos \delta_1} \quad (3.8)$$

waarin δ volgens de harmonische benadering de zogenoemde weerstandshoek is. De weerstandshoek is het door weerstand veroorzaakte faseverschil tussen debiet en waterstandsuitwijking van een enkelvoudige lopende golf. Het debiet van de enkelvoudige

golf wordt in een dergelijke situatie gereduceerd met $\cos \delta$, of wel de relatie tussen waterstandsuitwijking en debiet wordt

$$Q(x, t) = B_b c \cdot \cos \delta * h(x, t) \quad (3.9)$$

Bij een profielverandering met veranderende weerstandseigenschappen verschuift bovendien de fase van de waterstandsuitwijking ten opzichte van de resulterende golf ten opzichte van de oorspronkelijke, enkelvoudige inlopende golf met een hoek $\delta_2 - \delta_1$. De amplituden van de gereflecteerde golf vóór en van de doorgelaten enkelvoudige golf voorbij de profielverandering kunnen nu worden berekend met respectievelijk

$$r_t = \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \text{ en } r_d = \frac{2}{1 + \gamma} \quad (3.10)$$

Hierna zijn als voorbeeld enkele berekeningen uitgevoerd voor verschillende waarden van veranderingen van de relevante eigenschappen van doorstroomprofielen (tabel 3.1).

tabel 3.1

Voorbeelden reflectie en transmissie lopende golf bij relatief abrupte profielveranderingen (r_t – gereflekteerde golf, r_d – doorgelaten golf)

	γ	r_t	r_d	
vb. Schelde-estuarium	0,2	0,7	1,7	positieve reflectie
$B_{b2} * c_2 * \cos \delta_2 \leq B_{b1} * c_1 * \cos \delta_1$	0,8	0,1	1,1	positieve reflectie
vb. Waddenzee	1,2	-0,1	0,9	negatieve reflectie
$B_{b2} * c_2 * \cos \delta_2 \geq B_{b1} * c_1 * \cos \delta_1$	1,8	-0,3	0,7	negatieve reflectie

De kolom r_d geeft de versterking aan van de amplitude van de waterstands-uitwijking van de golf die ontstaat, ten opzichte van de oorspronkelijk enkelvoudige lopende golf. Vóór de profielverandering is dat een samen-gestelde golf, als resultante van oorspronkelijk inlopende en gereflecteerde golf, voorbij de verandering is dat de een enkelvoudige "doorgelaten" lopende golf. Een relatieve vernauwing, zoals in de Westerschelde geeft een versterking van de getijamplitude, bij overigens een afname van de amplitude van het debiet. Bij een relatieve verruiming, zoals van Noordzee naar Waddenzee via de zeegaten, geeft een verzwakking van de amplitude van de waterstands-uitwijking. In bijlage III is een voorbeeld opgenomen van een complexe berekening van de reflectie als ook sprake is van verandering van weerstandseigenschappen, waarbij ook een faseverschuiving optreedt.

4. De mathematische beschrijving van de waterbeweging in een getijgolf

4.1. mathematisch beschrijving en kwantitatieve benadering van de getijbeweging van water

De beweging van water in open wateren in de natuur wordt op macroschaal mathematisch en kwantitatief meestal beschreven in waterstanden en stroomsnelheden, die weer kunnen worden uitgedrukt als functie van drie ruimtecoördinaten en de tijd. Bij het beschouwen van deze bewegingen is het nodig of gekeken wordt naar een vast volume in de ruimte, de meest gebruikelijke Eulerse benadering, of voor het volgen van een zich verplaatsend volume water, de beschouwing van Lagrange. De lokale, momentane getijbeweging van water kan worden beschreven met de zogenoemde continuïteitsvergelijkingen en bewegingsvergelijkingen. Het zijn de mathematische formuleringen in de vorm van differentiaalvergelijkingen van respectievelijk de wet van behoud van massa en de tweede wet van Newton, ook wel de versnellingswet genoemd. Voor het inzicht in de getijbeweging, en vaak ook bruikbaar in praktische getijbenaderingen, vormt het zogenoemde ééndimensionale model een toegankelijke benadering. Het volgens dit model geformuleerde stelsel van continuïteits- en bewegingsvergelijking staat bekend als de vergelijkingen van De Saint-Venant of de ééndimensionale ondiepwatervergelijkingen (Battjes, 2001). In deze studie zal waar dat aan de orde en toepasbaar is van deze vergelijkingen worden uitgegaan.

De beide volledige vergelijkingen kunnen voor de algemene situatie niet analytisch worden opgelost. In mathematische modellen kunnen de oplossingen voldoende nauwkeurig numeriek worden benaderd. Soms kunnen voor specifieke situaties in delen van de getijcyclus of in delen van het systeem de waterstands- en/of de snelheidsveranderingen in de tijd en/of de ruimte al of niet korttijdelijk of lokaal worden verwaarloosd. Als daardoor de vergelijkingen, zoals dat genoemd wordt kunnen worden gereduceerd, zijn wel vaak analytische oplossingen mogelijk.

Als uiteindelijk de getijbeweging in een watersysteem wordt benaderd met een gereduceerde of gelineariseerde (§ 4.4, 4.5) benadering is het nodig uitgaande van de volledige vergelijkingen (§ 4.2) vast te stellen in welk ruimtelijk of temporeel bereik dat realistisch is en welke processen en effecten niet zichtbaar kunnen worden (§ 4.3). In dit hoofdstuk wordt dit nagegaan voor het Schelde-getij. De inhoud van hoofdstuk 4 loopt van de volledige mathematisch geformuleerde ééndimensionale lange golfvergelijkingen (§ 4.2) via de "golf-vergelijking" met gelineariseerde weerstandsterm naar de harmonische benadering van de ééndimensionale getijbeweging (§ 4.4) en een simulatiemodel van het Scheldegetij op basis van deze benaderingswijze (§ 4.5). Van de volledige ééndimensionale lange golfvergelijkingen wordt de kwalitatieve en kwantitatieve betekenis van de verschillende termen geanalyseerd, waarbij afzonderlijke wordt ingegaan op de invloed van de niet-lineaire termen (§ 4.2). Het laatste gebeurt enerzijds om de invloed ervan te kunnen herkennen in het optredende getij (hfst.5) en anderzijds om vast te stellen welke invloeden niet tot uitdrukking kunnen komen in de lineaire harmonische benadering in het algemeen (§ 4.4) en in de benadering van het Scheldegetij (§ 4.5). De werking en de calibratie bij gemiddeld getij van het simulatiemodel van het Scheldegetij volgens de harmonische benadering wordt beschreven.

4.2. de ééndimensionale lange-golfvergelijkingen: continuïteitsvergelijking en bewegingsvergelijking

De continuïteitsvergelijking en de bewegingsvergelijking volgens De Saint-Venant hebben als differentiaalvergelijkingen de volgende vorm:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = -B \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) = -gA_s \frac{\partial h}{\partial s} - c_f \frac{|Q|Q}{A_s R} \quad (4.2)$$

waarin:

Q = debiet door de stroomvoerende dwarsdoorsnede A_s , B = breedte op de waterspiegel, h = waterstand tov. Referentieniveau, R = hydraulische straal, c_f = wrijvingsparameter

4.3. de invloed van niet-lineaire mechanismen op de getijvoortplanting en de beschrijving door hogere harmonischen en samengestelde partiële getijden

In ondieper water, als de getijamplitude relatief groot wordt ten opzichte van de waterdiepte, gaan ondiep watereffecten een rol spelen. De niet-lineaire termen in de bewegingsvergelijkingen krijgen daar niet meer verwaarloosbare waarden. De belangrijkste effecten van deze niet-lineaire invloeden zijn vervormingen van de oorspronkelijk ongeveer sinusvormige diepwatergetijden en het optreden van middenstandsverhangen. Er worden twee soorten ondiepwatergetijden gegenereerd, zogenoemde hogere harmonischen en samengestelde getijden. Voorbeelden van eerstgenoemden zijn M4 en M6, van laatstgenoemden 2MN2 of 2MN6 (zie ook tabel 5.1).

De hogere harmonischen ontstaan rechtstreeks uit de afzonderlijke primaire astronomische getijden. Ze zijn eraan gekoppeld met hoeksnelheden, die exact een veelvoud zijn van die van het primaire partiële getij. Zo beschrijven ze een voor een bepaalde plaats op de korte termijn constante, karakteristieke vervorming van het primaire getij, waarvan sterkte en aard worden bepaald door respectievelijk amplitude en faseverschil met het primaire getij. Sterkte en aard variëren geleidelijk in de ruimte. Variaties in de tijd duiden op veranderingen in hydraulische randvoorwaarden of geometrie van het systeem. De samengestelde getijden ontstaan als niet-lineaire effecten uit de interacties tussen de primaire astronomische getijden. Zij hebben hoeksnelheden, die lineaire combinaties vormen van de primaire veroorzakende getijden en beschrijven zo de periodieke variaties van de niet-lineaire effecten.

Het ondiepwatergetij M4 wordt gegenereerd als de verhouding getijamplitude tot waterdiepte zo groot wordt, dat de variatie van de waterstand binnen de getijcyclus substantiële veranderingen van het bergende en/of stroomvoerende profiel of de weerstand tot gevolg heeft. Bijvoorbeeld de voortplantingssnelheid en de wrijvingsweerstand hebben dan dermate verschillende waarden bij hoog- en laagwater, ofwel onder top en dal, waardoor in deze zin asymmetrische vervormingen van de getijkromme, ofwel het golfprofiel, ontstaan. Het M6-getij beschrijft juist min of meer symmetrische vervormingen van de getijkromme, dus vervormingen door niet-lineaire invloeden, die voor laag- en hoogwater en/of voor de eb- en vloedfase ongeveer dezelfde sterkte hebben. Deze komen voort uit de doorwerking van de kwadratische invloed van de snelheid op de

weerstand van de variatie van de snelheid binnen een getijcyclus, cq. onder het golfprofiel. Bij maximum eb- of vloedstroom, bij een lopende golf in de buurt van de laag- of hoogwaters, zijn de wrijvingsverliezen groter en de voortplantingssnelheden kleiner dan rond de kenteringen (Parker, 1991). De samengestelde ondiepwatergetijden beschrijven van dezelfde soort niet-lineaire invloeden de periodiek variërende sterkte, als gevolg van het periodiek variërende faseverschil tussen de betreffende astronomische partiële getijden.

4.4. De lineaire benadering van de getijbeweging met de harmonische methode

4.4.1. mogelijkheden en beperkingen van de lineaire benadering met de harmonische methode

Het verloop van amplituden en fasen bij de voortplanting van lage periodieke golven zoals getijgolven kan, ook als zowel berging als weerstand als traagheid een rol spelen, in veel situaties goed worden benaderd met een lineaire benadering. Eventuele berekeningen worden uiteraard nauwkeuriger naarmate de niet-lineaire invloeden kleiner zijn. Het laatste is globaal gesteld het geval naarmate de getijgolfamplitude kleiner is dan de waterdiepte. Met name vervormingen van het golfprofiel of verhangen van de middenstand, wat specifieke effecten zijn van niet-lineaire invloeden, komen niet rechtstreeks in de oplossingen voor. Een belangrijk voordeel van de lineaire benaderingen is echter dat relatief eenvoudige, inzichtelijke formuleringen worden verkregen, die bovendien vaak bruikbaar zijn om ook niet-lineaire effecten te benaderen. Bij de hierna globaal beschreven lineaire benadering worden oplossingen voor de vergelijkingen gezocht die een waterbeweging beschrijven die, onder invloed van een periodieke randvoorwaarde en na een inspeelperiode, geheel periodiek is geworden en benaderd kan worden met sinusvormige functies. De oplossingen hebben de vorm van gedempte harmonische functies en de methode wordt daarom de "harmonische methode" genoemd. Zoals elders al is genoemd is de methode ontwikkeld en toegepast door de Staatscommissie Lorentz, om onder andere te voorspellen hoe de getijden op de Waddenzee zouden veranderen door de aanleg van de Waddenzee (Lorentz, 1926). De beschrijving van de harmonische methode in deze paragraaf is grotendeels ontleend aan Lorentz (1926), Dronkers (1964) en Battjes (2001).

4.4.2. de ééndimensionale continuïteitsvergelijking en gelineariseerde bewegingsvergelijking

Als alle afhankelijke variabelen, de waterbewegingsvariabelen h en Q en de profielvariabelen B , A_s en R , volledig zijn uitgeschreven naar de onafhankelijk variabelen s en t zien de volledige ééndimensionale continuïteitsvergelijking en bewegingsvergelijking er als volgt uit:

$$\frac{\partial Q(s, t)}{\partial s} = -B(s, t) \frac{\partial h(s, t)}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial Q(s, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{(Q(s, t))^2}{A_s(s, t)} \right) = -gA_s(s, t) \frac{\partial h(s, t)}{\partial s} - c_f \frac{|Q(s, t)|Q(s, t)}{A_s(s, t)R(s, t)} \quad (4.4)$$

Bij linearisering volgens de harmonische methode krijgen de vergelijkingen de volgende vorm:

$$\frac{\partial Q(s, t)}{\partial s} = -B \frac{\partial h(s, t)}{\partial t} \quad (4.5)$$

$$\text{en } \frac{\partial Q(s, t)}{\partial t} = -gA_s \frac{\partial h(s, t)}{\partial s} - \kappa Q(s, t) \quad (4.6)$$

met $\kappa = 8/(3\pi)c_f \hat{U}/R$ als gelineariseerde weerstandsfactor.

Het lineariseren van ééndimensionale continuïteitsvergelijking en de bewegingsvergelijking volgens de harmonische benadering betekent dus dat:

- de advectieve traagheidsterm, die de verandering van hoeveelheid van beweging door eventuele verandering van de stroomsnelheid in de voortplantingsrichting in rekening brengt, niet wordt meegenomen;
- de twee niet-lineaire werkingen van de weerstand, de kwadratische afhankelijkheid van de snelheid en de variatie van doorstroomprofiel en hydraulische straal met de actuele waterstand, worden uitgeschakeld, door vervanging van de weerstandsterm door het product van constante weerstandsfactor en debiet;
- de profielgrootheden bergende breedte B , stroomvoerend profiel A_s , hydraulische straal R en de weerstandsfactor onafhankelijk zijn van de momentane waterstand en stroomsnelheid, of wel als onafhankelijken in de tijd worden beschouwd.
- dezelfde profielgrootheden, bergende breedte B , stroomvoerend profiel A_s en hydraulische straal R en de weerstandsfactor als constanten in de voortplantingsrichting, dus als onafhankelijken van de plaats, worden beschouwd.

De werkelijke variatie in de langsrichting van de geometrische profiel grootheden, de ruwheid en de amplitude van het debiet in het systeem is voor al deze aan de harmonische methode inherente lineariserings meer of minder bepalend voor de mate waarin recht wordt gedaan aan de werkelijkheid, en daarmee voor de kwaliteit van de benadering van de getijvoortplanting met de harmonische methode. Om deze reden zullen natuurlijke, grilliger gevormde systemen meestal, overigens afhankelijk van de gewenste mate van benadering in kwalitatieve en/of kwantitatieve zin, verdeeld moeten worden in een netwerk van vakken, waarlangs deze grootheden als constanten kunnen worden beschouwd. De consequenties voor de berekening en de interpretatie van die situaties komen aan de orde in paragraaf 4.5 bij de beschrijving van het simulatiemodel voor het Scheldegetij. Hierna wordt voor de duidelijkheid eerst de getijvoortplanting volgens de harmonische methode besproken voor systemen, waarvoor een verdeling in vakken niet nodig is, namelijk voor relatief korte systemen, kort ten opzichte van de getijgolf lengte, met een zogenoemd prismatisch verlopend dwarsprofiel en een beperkte variatie van de ruwheid.

4.4.3. waterstandsverloop en debietverloop in ruimte en tijd volgens de harmonische benadering

De gelineariseerde continuïteitsvergelijking (4.5) en bewegingsvergelijking (4.6) kunnen door eliminatie van Q worden gecombineerd tot de zogenoemde telegraafvergelijking, waarin alleen de waterstand als functie van tijd t en plaats s voorkomt:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta t^2} - c_0^2 \frac{\delta^2 h}{\delta s^2} + \kappa \frac{\delta h}{\delta t} = 0 \quad (4.7)$$

waarin c_0 de voortplantingssnelheid is bij afwezigheid van weerstand (par.3.2):

$$c_0 = \sqrt{\frac{gA_s}{B}} \quad (4.8)$$

en κ de gelineariseerde weerstandsfactor is
$$\kappa = \frac{8}{3\pi} c_f \frac{\hat{U}}{R} \quad (4.9)$$

De telegraafvergelijking zonder de laatste term, de weerstandsterm, is de zogenoemde algemene golfvergelijking, die ook in paragraaf 3.3 is besproken. Evenals deze algemene golfvergelijking beschrijft de telegraafvergelijking een golfbeweging die in het algemene geval bestaat uit twee in tegengestelde richting lopende enkelvoudige golven, die nu echter, vanwege de weerstand, exponentieel dempen in de voortplantingsrichting. Het waterstandsverloop in ruimte en tijd voor een periodieke golfbeweging, die wordt bepaald door de telegraafvergelijking, en het bijbehorende debietverloop kunnen als volgt worden geformuleerd:

$$h(s, t) = h_i(s, t) + h_t(s, t) \quad (4.10)$$

$$= H_i(s) \cos(\omega t - ks + \varphi_i(o) + H_t(s) \cos(\omega t + ks + \varphi_t(o)))$$

$$\text{met } H_i(s) = H_i(o)e^{-\mu s} \text{ en } H_t(s) = H_t(o)e^{+\mu s} \quad (4.11)$$

$$Q(s, t) = Q_i(s, t) + Q_t(s, t) \quad (4.12)$$

$$= \hat{Q}_i(s) \cos(\omega t - ks + \varphi_i(o) + \delta) - \hat{Q}_t(s) \cos(\omega t + ks + \varphi_t(o) + \delta)$$

$$\text{met } \hat{Q}_i(s) = Bc \cdot \cos \delta \cdot H_i(s) \text{ en } \hat{Q}_t(s) = Bc \cdot \cos \delta \cdot H_t(s) \quad (4.13)$$

Het optredende waterstandsverloop $h(s,t)$ en het debietverloop $Q(s,t)$ zijn de resultanten van waterstanden en debieten van twee in tegengestelde richting lopende exponentieel dempende enkelvoudige golven. Elke harmonische golfbeweging tussen zuiver lopend en zuiver staand kan bestaan als combinatie van deze twee golven en voldoet aan de continuïteitsvergelijking en de bewegingsvergelijking. Het ruimtelijke verloop van de beide afzonderlijke golven, en derhalve van de optredende golfbeweging als som ervan, wordt bepaald door de zogenoemde voortplantingsconstanten, de fasesnelheid c , het golfgetal k , de dempingsconstante μ en de weerstandshoek δ . Deze voortplantingsconstanten, die in de volgende subparagraaf nader worden besproken, hebben een constante waarde over de geul of het (deel van het) systeem en worden bepaald door het dwarsprofiel en de weerstandeigenschappen ervan en door de periode van de beschouwde getijcomponent.

4.4.4. eigenschappen inlopende en teruglopende golf

In deze paragraaf wordt beschreven hoe de zogenoemde voortplantingsconstanten (de dempingsconstante μ , het golfgetal k en de weerstandshoek δ) de karakteristieke eigenschappen bepalen van de inlopende en teruglopende golf. De herkomst en de berekeningswijze wordt verderop beschreven aan de hand van een rekenvoorbeeld. Afzonderlijk en volledig uitgeschreven hebben de inlopende en teruglopende golf de volgende vorm:

$$\text{inlopende golf } h_i(s, t) = H_i(s) \cos(\omega t - ks + \varphi_i(o)) \quad (4.14)$$

$$\text{met } H_i(s) = H_i(o) \exp(-\mu s) \quad (4.15)$$

$$Q_i(s, t) = \hat{Q}_i(s) \times \cos(\omega t - k \times s + \varphi_i(o) + \delta) \quad (4.16)$$

$$\text{met } \hat{Q}_i(s) = B \times c \times \cos \delta \times H_i(s) \quad (4.17)$$

$$\text{teruglopende golf } h_t(s, t) = H_t(s) \times \cos(\omega t + k \times s + \varphi_t(o)) \quad (4.18)$$

$$\text{met } H_t(s) = H_t(o) \times \exp(-\mu \times s) \quad (4.19)$$

$$Q_t(s, t) = -\hat{Q}_t(s) \times \cos(\omega t + k \times s + \varphi_t(o) + \delta) \quad (4.20)$$

met
$$\hat{Q}_t(s) = B \times c \times \cos \delta \times H_t(s) \quad (4.21)$$

Hierin is μ de relatieve amplitudereductie, κ is de zogenoemde dempingsconstante en δ wordt wel de weerstandshoek genoemd.

De afzonderlijke en de resulterende golfbeweging hebben de volgende kenmerken:

- de amplitude van zowel de waterstandsuitwijking als het debiet van zowel de inlopende als de teruglopende golf variëren alleen met de plaats: ze nemen beiden exponentieel af in de voortplantingsrichting;
- de fase van zowel waterstandsuitwijking als debiet van de inlopende golf varieert met $(\omega t - ks)$; de fase blijft constant als $\omega \Delta t = k \Delta s$, of wel, als met de fasesnelheid $c = \Delta s / \Delta t = \omega / k$ wordt meebewogen; van de teruglopende golf blijft de fase constant als met de fasesnelheid $s/t = -\omega/k = -c$ wordt meebewogen;
- $\omega = 2\pi/T$ is de hoeksnelheid en $k = 2\pi/L$ is de faseverandering per eenheid van lengte;

Op elke plaats wordt de amplitude van de waterstandsuitwijking van de resulterende beweging bepaald door de amplituden en het faseverschil van de afzonderlijke golven ter plaatse. Ook de fase van de resulterende beweging wordt bepaald door de fasen van de in- en teruglopende golf. Elk van de beide golven afzonderlijk is bepaald in ruimte en tijd door de amplitude van de waterstandsuitwijking en de fase in $s=0$: respectievelijk $H_{i,t}(0)$ en $\phi_{i,t}(0)$, over een gedefinieerd traject. Met deze twee golven kan in eerste orde een samengestelde golfbeweging worden beschreven. Dat wil zeggen een waterbeweging, die zich bevindt tussen die van een zuivere lopende en een zuivere staande golf, zoals die in vrijwel alle getijdegebieden en ook in het Schelde-estuarium optreedt.

De inlopende golf en de parameters μ , k en δ zijn belangrijke, karakteristieke parameters in de golfbewegingsformulering volgens de harmonische benadering. De belangrijkste kenmerken van de beschrijving van de getijbeweging volgens de harmonische benadering zijn:

- de amplituden van inlopende en teruglopende golf, respectievelijk $H_i(s) = H_i(0) \times \exp(-\mu \times s)$ en $H_t(s) = H_t(0) \times \exp(+\mu \times s)$ variëren alleen met de plaats; ze nemen respectievelijk af en toe in positieve s -richting, of wel in de voortplantingsrichting af van de beide enkelvoudige lopende golven;
- de factor μ is de zogenoemde dempingsconstante

4.4.5. fysische verklaring

Het optreden van de beide in tegengestelde richting lopende golven is fysisch goed voorstelbaar in de veel voorkomende situatie van een zogenoemd eenzijdig gesloten bekken. Daar is meestal aan de open (zee-)zijde het waterstandsverloop bepaald en aan het "gesloten" (land-)einde het debietverloop. De vanuit zee binnenlopende getijgolf reflecteert tegen het gesloten einde en de in tegengestelde richting lopende gereflecteerde golf vormt samen met de inlopende golf de optredende getijbeweging in het systeem. De aard en de sterkte van de getijbeweging die nu, in dit systeem bij deze randvoorwaarden, optreedt wordt bepaald door twee grootheden: de relatieve weerstand en de relatieve systeemplengte. Zij kwantificeren voor deze eenvoudige situatie de werking van de twee voor de getijvoortplanting in eerste orde bepalende processen: de energiedissipatie door de weerstand en de interactie met de geometrie van het systeem. De relatieve weerstand reduceert de amplitude in de looprichting en verlaagt de fasesnelheid van beide golven.

	formule	Noordzeerland	Scheur	GvO/Mgat	Vaarw b Bath	BenZeeschelde	BovZeeschelde	fysische betekenis
geometrische parameters systeemdelen								
As	in 1000 m ²	125,0	83,2	37,6	14,0	5,1	0,6	stroomvoerend profiel
Bs	in m	5000	5000	2500	1300	650	140	gem. breedte over As
ds	As/Bs m	25,0	16,6	15,0	10,8	7,8	4,3	gem. diepte over As
R	nat opp./n.omtr.	25,0	16,6	15,0	10,8	7,8	4,3	hydraulische straal
Bb	in m	5000	5000	4000	2000	650	140	bergende breedte
dg	As/Bb m	25,0	16,6	9,4	7,0	7,8	4,3	gem. diepte over dwarsprof
hydraulische parameters zonder weerstandsinvloed								
co	$\sqrt{gAs/Bb}$ m/s	15,7	12,8	9,6	8,3	8,8	6,5	fasesnelheid
ko	ω/co rad/m	0,9E-05	1,1E-05	1,5E-05	1,7E-05	1,6E-05	2,2E-05	faseverloop in looprichting
Lo	$2\pi/ko$ km	700	570	430	370	390	290	golflengte
hydraulische parameters met weerstandsinvloed								
cf		3,2E-3	3,2E-3	3,2E-3	3,2E-3	3,2E-3	3,2E-3	weerstandscoefficient
\hat{U}	in m/s	0,70	1,00	1,10	1,00	1,00	1,00	gem. amplitude snelheid
κ	$8/(3\pi)*cf*\hat{U}/R$	0,76E-4	1,7E-4	2,0E-4	2,5E-4	3,5E-4	6,3E-4	coëf. gelin. weerstandsterm
σ	$\kappa*\omega$	0,54	1,16	1,41	1,80	2,46	4,51	verh. weerstand/traagheid
δ	$\frac{1}{2}\arctan\sigma$ gr	14	25	27	30	34	39	faseversch. debiet opp.uitw.
	$\tan\delta$	0,25	0,47	0,52	0,58	0,67	0,80	
	$\sqrt{(1-\tan^2\delta)}$	0,97	0,88	0,86	0,81	0,74	0,60	
c	$co/\sqrt{(1-\tan^2\delta)}$ m/s	15,1	11,4	8,2	6,7	6,5	3,9	fasesnelheid
k	$ko/\sqrt{(1-\tan^2\delta)}$ r/m	0,9E-5	1,2E-5	1,7E-5	2,1E-5	2,2E-5	3,6E-5	fasetoename in looprichting
L	$c*T=2\pi/k$ km	680	500	370	300	290	170	golflengte
faseverloop, damping amplitude en reductie debiet in enkele lopende getijgolf met weerstand								
$\Delta\phi$	$k*(180/\pi)*10000$	5	7	10	12	12	21	faseverschil over 10 km
μ	$k*\tan\delta$ 1/m	2,3E-6	5,6E-6	8,9E-6	12E-6	15E-6	29E-6	"dempingsconstante" (ampl)
$\Delta\zeta$	$\exp(-\mu*10000)$	0,98	0,94	0,92	0,88	0,86	0,75	relatieve damping amplitude over 10 km
ΔQ	$\cos\delta$	0,97	0,91	0,89	0,86	0,83	0,78	reductie debiet tov. situatie zonder weerstand
versterking getijamplitude in resulterende getijbeweging in eenzijdig gesloten bekken								
"s1"	$=\sigma = \kappa*\omega$	0,54	1,16	1,41	1,80	2,46	4,51	verhouding weerst./traagh.
l	in km		40	60	40	40	60	"systeemplengte"
"s2"	$ko*l = 2\pi*/L$		0,4	0,9	0,7	0,6	1,3	2[] maal verhouding systeemplengte/golflengte
r(l)	$\zeta(l)/\zeta(0)$		1,1	1,3	1,2	1,1	0,33	versterking amplitude aan gesl. einde tov open einde
M2-getij: T = 12h 25min = 44700sec, $\omega = 1.405*E-4$ rad/s								

tabel 4.2 Voorbeeld berekening getijgolfparameters volgens harmonische methode.

Bij een gesloten einde zonder bovenafvoer en geen weerstand ontstaat een staande golf als resultante van inlopende en volledig gereflecteerde golf. De amplitude, de hoeksnelheid en de fasesnelheid van beide golven is gelijk en constant in ruimte en tijd. Bij grote weerstand en/of lengte van het bekken kan de golf vrijwel zijn uitgedempt voordat het gesloten einde wordt bereikt, en bestaat de golfbeweging alleen uit één lopende golf.

Door Dronkers (1964) is op basis van de harmonische methode de getij-versterking / -verzwakking berekend die zich instelt aan het afgesloten einde van een bekken ten opzichte van het andere open einde, waar een periodiek variërende waterstand is opgelegd. De verhouding tussen de amplituden van het verticale getij aan beide einden kan bepaald worden met een gelijkblijvend dwarsprofiel. De getijversterking op systeemniveau kan voor gebieden zoals het Schelde-estuarium in eerste orde en sterk vereenvoudigd worden begrepen als te worden bepaald door de combinatie van twee factoren: de verhouding tussen weerstand en traagheid, de zogenoemde s_1 -waarde, en de verhouding tussen systeemplengte en getijgolflengte, de zogenoemde s_2 -waarde. De versterking is groter naarmate s_1 kleiner is, dus naarmate de weerstand kleiner is ten opzichte van de traagheid en s_2 de waarde $1/4$ of een oneven veelvoud ervan benadert, ofwel naarmate de systeemplengte in de buurt ligt van een vierde deel van de getijgolflengte of een oneven veelvoud daarvan. Een enigszins exacte kwantitatieve toepassing van deze benadering op een grillig gevormd en heterogeen samengesteld systeem als het Schelde-estuarium is niet mogelijk, maar aan een relatieve, kwalitatieve toepassing kunnen betrouwbare en bruikbare inzichten worden ontleend.

4.5. Een simulatiemodel van het Scheldegetij op basis van de harmonische methode.

4.5.1. harmonische benadering van de getijvoortplanting met een netwerkmodel

De getijbeweging in een geul kan worden gekarakteriseerd door de amplituden en de nulfasen van de waterstanduitwijkingen en de debieten aan het begin en aan het einde van de geul. Als het dwarsprofiel, de watersnelheden en de overige weerstandbepalende parameters in de langsrichting niet te sterk variëren kan met de in paragraaf 4.4 genoemde vierpoolvergelijkingen het waterstands- en debietverloop over de hele geul worden berekend, als op twee plaatsen amplitude en nulfase van het waterstand- of debietverloop bekend is. Als nu een lang, ééndimensionaal systeem in zodanig korte vakken wordt verdeeld dat per vak de vierpoolvergelijkingen kunnen worden toegepast ontstaat een seriegeschakeld netwerkmodel. De berekende, aanvankelijk onbekende waterstand- en debietparameters aan het einde van een sectie vormen de bekende in te voeren gegevens aan het begin van de volgende sectie.

Op deze manier is in MS-EXCEL het HARMSCHELDE-simulatiemodel gebouwd voor het getij in het Schelde-estuarium vanaf het zeegebied voor de monding van het Scheur tot de mond van de Rupel boven Antwerpen. In het Mondingsgebied is alleen het Scheur/Wielingencomplex gesimuleerd, omdat de harmonische benadering alleen geldt voor een ééndimensionale getijbeweging. Het laatste betekent dat het waterstand- en debietverloop op een beschouwde plaats bepaald moet worden gedurende de hele getijcyclus. Dit sluit niet aan bij de berekeningswijze. Het mondingsgebied is niet gekoppeld aan het binnengebied vanwege het horizontaal tweedimensionale karakter van de waterbeweging in het gebied en van het negeren van de aan- en afvoeren over de Vlakte van de Raan en door Geul van de Walvischstaart en Oostgat kunnen geen kwantitatief nauwkeurige uitkomsten worden verwacht. Wél wordt een indruk verkregen van de aard van de waterbeweging. Hetzelfde geldt voor de Beneden-Zeeschelde, vooral voor het gebied boven Antwerpen. Hier zijn de oorzaken de sterker wordende niet-lineaire

effecten, vooral door de kleiner wordende verhouding getijamplitude/waterdiepte én de toenemende invloed op het getij van de rivierafvoeren van Durme, Rupel en Schelde.

Het beschouwde gebied is verdeeld in langssecties van maximaal ongeveer 5 km lengte. De geometrie is ontleend aan de GIS-bestanden van RIKZ-Middelburg. Ingevoerd zijn volgens ProfielGis het stroomvoerende profiel A_Q , de stroomvoerende breedte B_Q , de stroomvoerende gemiddelde diepte H_Q en als bergende breedten B_b de breedte op NAP bij gemiddelde omstandigheden en die op NAP +2.50m bij stormvloeden. Profielen van meerdere parallelgeulen zijn tot één profiel omgerekend door uit te gaan van de gezamenlijke stroomvoerende breedte en de diepten te wegen volgens $h^{5/3}$. Per sectie werden met de complexe vierpoolvergelijkingen amplituden en nulfasen van waterstands-uitwijking en debiet aan het landwaarts gelegen einde van de sectie berekend uit de overeenkomstige gegeven waarden aan het zeewaarts gelegen einde (zie paragrafen 4.4 en 4.5). De berekende waarden aan het landwaarts gelegen einde van een sectie vormen de gegeven waarden aan het zeewaarts gelegen einde van de volgende sectie. Als externe randvoorwaarden werden alleen ingevoerd amplituden en nulfasen van waterstanden en debieten op de lokaties Wandelaar en Vlissingen. Om de in het voorgaande genoemde redenen werden de berekende waarden aan het landwaartse einde van de laatste sectie in het Mondingsgebied niet doorgevoerd als gegeven waarden van de bij Vlissingen beginnende sectie.

Met het berekenen van waterstand en debiet aan het landwaartse einde van de sectie uit die aan het begin van de sectie wordt van buiten naar binnen gerekend. Naast de gegeven waarden van de amplituden van waterstand en debiet moeten ook de nulfasen van waterstand en debiet worden meegegeven. In feite gaat het hier om het faseverschil van horizontaal en verticaal getij dat moet worden meegegeven. Met (de verhouding tussen) de amplituden van waterstand en debiet bepaalt dit faseverschil bij de vakconstanten de aandelen van inlopende en teruglopende golf, of wel het karakter van de golfbeweging tussen lopende en staande golf. In feite bevat zo de zeewaartse randvoorwaarde al de informatie over de geometrie van het landwaarts gelegen gebied. Een praktisch probleem bij deze werkwijze is dat waar enerzijds dit faseverschil als randvoorwaarde in bepaalde situaties een zeer scherpe invloed kan hebben op het waterstands- en debietverloop over het systeem, er anderzijds weinig empirische informatie over beschikbaar is.

5. Beschrijving en verklaring van het Scheldegetij: oorsprong en karakteristieken

5.1. de inhoud van dit hoofdstuk

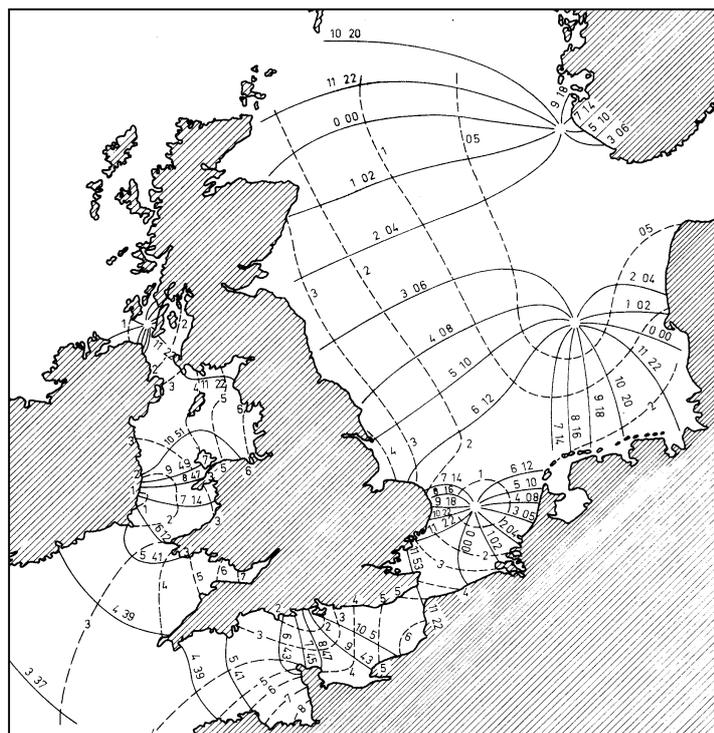
In dit hoofdstuk wordt het optredende Scheldegetij beschreven en verklaard, zoals het zich voortplant vanaf de Noordzee naar de Zeeschelde (§ 5.2 t/m 5.5). De verklaring gebeurt door referentie aan de kwalitatieve en kwantitatieve beschouwingen van de basisprocessen van het getij in respectievelijk hoofdstukken 3 en 4. In verband met mogelijke veranderingen in de getijrandvoorwaarden van het Scheldegetij wordt relatief veel aandacht besteed aan het getij op de Noordzee (§ 5.2). De opgetreden algehele toename van getijverschillen en stormvloedhoogwaterstanden in de afgelopen eeuw en enkele markante meer lokale veranderingen in het Scheldegetij worden afzonderlijk kwalitatief geanalyseerd (§ 5.6).

5.2. Het getij op de Noordzee

de amphidromische systemen op de Noordzee

Het Noordzeegetij, dat het getij in het Schelde-estuarium aan de zeezijde aandrijft, is ruimtelijk complex van samenstelling. Het lijkt te worden bepaald door twee oscillaties met een dubbeldaagse basisfrequentie. De eerste is de dubbeldaagse hoofdcomponent van het oceangetij. De tweede is heel direct gekoppeld aan de eerste: het is de werking van het in paragraaf 3.2 beschreven Coriolis-effect op de door het oceangetij in het Noordzeebekken opgewekte waterverplaatsingen. De om Schotland van de Atlantische Oceaan komende getijgolf onderhoudt in het Noordzeebekken, na reflectie op de Wadden- en Kanaalkusten in het zuiden, een oscillatie met een staande golfkarakter, ongeveer in noord-zuidrichting.

fig 5.1
de amphidromische systemen in de Noordzee



Door de Coriolis-werking krijgen bewegende watermassa's op het noordelijke halfrond in de stroomrichting gezien een component naar rechts. In de Noordzee krijgen dus de zuidgaande golf een component in westelijke en de noordgaande golf een component in oostelijke richting, waardoor een tweede oscillatie nu in oost-west richting ontstaat (§ 3.2). De beide oscillaties vormen zo in de Noordzee een drietal zogenoemde amphidromische systemen, waarin de getijgolf rondloopt om een knoop: een amphidrome. In het Noordzee-bekken loopt het HW rond, tegen de beweging van de wijzers van de klok in, langs de Engelse kust van noord naar zuid en langs de Nederlandse kust van zuid naar noord. De stromen gedragen zich overeenkomstig en hebben op hoogwater dezelfde richting als de golftop. Het type van de getijbeweging is hiermee dat van een lopende golf. De lijnen van gelijke fase verlopen ongeveer radiaal vanuit het amphidromisch punt, waarbij de getijamplitude toeneemt vanaf nul tot maximaal aan de kusten (Kalkwijk, 1976).

Het Noordzeegetij ter hoogte van de Scheldemondingen behoort tot de meest zuidelijke van de drie amphidromische systemen in het Noordzeebekken. Het amphidromisch punt hiervan ligt ter hoogte van IJmuiden ongeveer midden tussen de Engelse en Nederlandse kust. De lijnen van gelijke fase en kustwaarts toenemende getijamplitude verlopen tussen dit punt en de kusten van Vlaanderen en Zuidwest-Nederland vrijwel recht en bereiken de kust ongeveer loodrecht. Omdat de afstand van de kust tot het amphidromisch punt naar het noorden toe korter wordt, neemt in die richting langs de kust ook de getijamplitude af. Vanaf IJmuiden neemt ze weer toe.

de samenstellende getijcomponenten

Het Noordzeegetij wordt gedomineerd door de astronomische dubbeldagse partiële getijden: het hoofdmaansgetij M₂, het hoofdzonsgetij S₂, het zogenoemde elliptische getij N₂ en het declinatiegetij K₂ (tabel 5.1). De hoofdgetijden M₂ en S₂ ontstaan rechtstreeks uit de krachtenwerking tussen aarde en maan, respectievelijk aarde en zon, gecombineerd met de draaiing van de aarde. De partiële getijden N₂ en K₂ corrigeren voor de ellipsvormige maansbaan ten opzichte van een cirkelvormige, respectievelijk het niet in hetzelfde vlak liggen van maansbaan en equator. Ook μ_2 en NU₂ verzorgen dergelijke correcties. Het S₂-getij en de andere partiële getijden brengen modulaties aan, periodieke variaties van amplitude en fase, op het hoofdmaansgetij. De enkeldagse getijden O₁ en K₁ zijn ook declinatiegetijden en veroorzaken de dagelijkse ongelijkheid. Door de declinaties van maan en zon zijn de hoogwaters bij een bovendoorgang en bij een benedendoorgang niet gelijk (Dronkers, 1964).

5.3. Het getij langs de Zuid Nederlandse en Vlaamse kust

De getijden in de kuststations aan open zee ten zuiden en ten noorden van de Scheldemondingen, Oostende en Hoek van Holland, benaderen de samenstelling van het Noordzeegetij (tabel 5.1). De ondiepwaterinvloed is wel zichtbaar aanwezig. In Vlissingen en Roompot-buiten is het getij substantieel beïnvloed door de voorliggende ondiepe onderwaterdelta's én door het getij in de bekkens van Westerschelde, respectievelijk Oosterschelde. In Bath is dit uiteraard nog sterker het geval. Vergelijking van de samenstelling van het getij in partiële getijden op de minder en meer lokaal beïnvloede lokaties levert aanwijzingen over de getijvoortplanting in de te onderzoeken gebieden. De gegevens van Oostende en van de Nederlandse stations komen uit verschillende bronnen; getalsmatige vergelijking moet daarom voorzichtig gebeuren. Langs de Vlaamse en zuid-Nederlandse kust nemen de amplituden van de dubbeldagse partiële getijden af bij de voortplanting in noordelijke richting. De sterke afname die hier optreedt komt (helemaal)

voort uit het staande golfkarakter van de beide beschreven, voor de getijbeweging op de Noordzee bepalende oscillaties.

partiële getij		Getiistations					hoek- snelheid	oorsprong en effect van partiële getij
		Oostende	Vlissingen	Bath	Roompot	HvHolland		
A0			- 1	14	- 1	7		Middenstand
O1	ampl	10	11	11	11	11	13.943	declinatie maan; dagelijkse ongelijkheid
	fase	168	195	215	193	191		
K1	ampl		7	7	7	8	15,041	declinatie maan en zon;
	fase		10	33	5	359		
M2	ampl	181	175	210	136	79	28.984	krachtwerking maan-aarde en draaiing aarde, bepaalt sterkte dubbeldaags getij
	fase	5	59	93	64	86		
S2	ampl	53	48	54	36	19	30.000	zon, draaiing aarde, dubbel- daags getij
	fase	58	117	157	121	147		
N2	ampl	31	29	33	22	12	28,440	variatie afstand maan - aarde tov. Cirkelbeweging
	fase	340	35	69	38	59		
K2	ampl	15	14	16	10	6	30.082	variatie declinatie maan
	fase	58	117	156	122	147		
2MN2	ampl	12	13	18	11	7	29.528	
	fase	201	257	288	266	290		
μ2	fase	10	13	20	11	8	27.968	
	ampl	111	161	183	174	200		
NU2	ampl	9	9	12	8	5	28.513	
	fase	334	26	51	32	52		
M4	ampl	11	13	12	13	17	57.968	opgewekt door M2 door diepteverschil top en dal
	fase	332	120	172	129	165		
MS4	ampl	7	9	8	9	11	58.984	
	fase	38	181	234	186	222		
M6	ampl	7	9	13	7	5	86.952	gegenereerd door M2 door weerstand
	2	fase	295	109	255	84		
2MS6	ampl	7	9	12	7	4	87.968	
	fase	344	161	309	137	188		

Oostende: 1980-1998, Ned. stations: 1991-1994; amplituden in cm, fasen in graden, hoeksnelheden in graden/uur.

tabel 5.1
belangrijkste getijcomponenten langs kust
zuidwest-Nederland en Vlaanderen (van
Cauwenberghe, 1993 RIKZ, 1998)

Op open zee zijn in het algemeen de ondiepwater- en weerstandseffecten klein, door de relatief kleine verhouding getijamplitude/waterdiepte, grote diepte en lage snelheden, tenzij ze over grote afstanden werken. Op het laatste wijst de groei van de amplitude van het ondiepwatergetij M4 tussen Oostende en Hoek van Holland. Deze component beschrijft onder andere de vervorming van de getijgolf (het sneller lopen van top dan dal) door de grotere water-diepte. De viermaaldaagse componenten nemen wél licht toe tussen Oostende en Vlissingen, maar niet tussen Vlissingen en Bath. De amplituden van de astronomische hoofdgetijden dalen aanvankelijk ook, volgens het eerder beschreven patroon, langs de Vlaamse kust vanaf Oostende, maar nemen vervolgens doorgaand toe naar Vlissingen en naar Bath (zie ook fig. 5.2). Deze stijging wordt duidelijk veroorzaakt door de geometrie van mondingsgebied en Scheldebekken. Ze is vooral het resultaat van de gecombineerde werking van traagheid en doorstroomprofielverandering. De middenstand bij Bath is 15 cm hoger dan aan de kust; bij Terneuzen is dat 9 cm. Dit is een mid-

denstands-verhang, dat kan optreden bij significante verschillen in weerstandinvloed tussen de eb fase en de vloed fase. De oorzaak hiervan kan zijn dat de maximale eb debieten optreden bij een lagere waterstand dan de maximale vloed debieten, dus bij een kleinere diepte met veelal grotere snelheden. Het ondiepwatergetij M6 beschrijft verandering door weerstand van het primaire getij.

5.4. Het getij in het mondingsgebied

Langs de zeerland van de mondingsgebieden van Westerschelde en Oosterschelde manifesteert het Noordzegetij zich als een tweemaal daags in noordoostelijke richting met afnemende amplitude lopende getijgolf.

De weerstand heeft geringe invloed, waardoor de waterbeweging vooral wordt bepaald door waterstandsverhang en traagheid, zodat waterstandsverloop en snelheden vrijwel in fase zijn. De maximale snelheden treden op dicht rond hoogwater in noordoostelijke richting en rond laagwater in zuidwestelijke richting, terwijl de kenteringen op ongeveer gemiddelde zeestand plaatsvinden. Dit is de waterbeweging langs de noordwestelijk rand van het mondingsgebied, in het zuiden en midden zuidoostelijk van respectievelijk Akkeartbank en Westpit en in het noorden in het Steendiep. De bodem ligt daar op NAP -20 á -25 m. Volgens de karakteristieken van het beschreven amphidromisch systeem, waardoor het getij in het kustgebied wordt bepaald, nemen de getijamplituden en getijverschillen in noordoostelijke en zeewaartse richting sterk af.

waarden in cm en in cm tov. NAP	2 * ampl M2	getijverschillen			hoogwaters			laagwaters		
		doodtij	gemtij	springtij	doodtij	gemtij	springtij	doodtij	gemtij	springtij
Meetpaal 7	340									
Oostende	362	290	385	456	144	198	239	-146	-187	-217
Zeebrugge	332	275	362	430	139	190	230	-136	-172	-200
Vlissingen	348	302	386	447	155	205	243	-147	-181	-204
Westkapelle	306	263	336	391	134	179	216	-129	-157	-175
OS 11	264									
Roompot buiten	272	231	288	329	117	155	186	-114	-133	-143

Belg. stations: Cauwenberghe (1993,1999); Ned. stations: RIKZ (1994); M2 : Svasek (1997-I) voor jaar 1992.

tabel 5.2

verloop amplituden M2, getijverschillen en hoog- en laagwaters rond en in mondingsgebied

5.5. De getijvoortplanting in Westerschelde en Zeeschelde

De cyclische waterstandsvariatie bij Vlissingen in de hals van het estuarium stuurt de waterbeweging in de Westerschelde en op de Zeeschelde. Landwaarts van Antwerpen krijgt ook de rivierafvoer van de Schelde en de zijrivieren in toenemende mate invloed op de waterbeweging. Het verloop in ruimte en tijd van de waterstanden in het estuarium onder invloed van deze "sturing" geeft het meest directe en duidelijke, fysische beeld van de getijvoortplanting op Westerschelde en Zeeschelde. Het ruimtelijke verloop op een bepaald tijdstip vormt een zogenoemde waterstandverhanglijn. Aan de vorm en de verandering in de tijd van deze waterstandsverhanglijn is goed de voortplanting van de getijgolf af te lezen. Voor een op systeemniveau horizontaal ééndimensionale waterbeweging representeert de verhanglijn in de langsrichting van het estuarium naast eventueel de zwaartekracht op elk tijdstip de aandrijvende kracht van de momentane, lokale getijbeweging van water. Uit de veranderingen in de tijd van de verhanglijn gedurende een getijcyclus zijn de variërende relatieve invloeden van weerstand en traagheid, waarmee de verhangkracht doorlopend in balans is, af te lezen. Het ruimtelijk verloop geeft informatie over de invloed van de geometrie daarop. In figuur 5.2 zijn voor gemiddeld getij de op hele uren na het tijdstip van hoogwater in Vlissingen optredende verhanglij-

nen weergegeven. De omhullenden van de verhanglijnen vormen de meetkundige plaats van de HW- en LW-standen langs het estuarium. Naast die voor gemiddeld getij zijn ook dit HW- en LW-verloop voor dood- en springtij weergegeven. Eerst wordt de getijbeweging bij gemiddeld getij beschreven en fysisch geanalyseerd. De weerstand is afhankelijk van de geometrie, de "ruwheid" en de watersnelheden. Bij dood- en springtij veranderen ten opzichte van gemiddeld getij in principe alleen de watersnelheden. In "eerste orde" komen de verschillen in de getijvoortplanting tussen dood, gemiddeld en springtij voort uit de alleen door de veranderde watersnelheden veranderde weerstand. Dit is op verhelderende wijze zichtbaar bij vergelijking van de verhanglijnen bij dood-, gemiddeld- en springtij (figuur 5.3 en 5.4).

De getijbeweging bij gemiddeld getij

Tengevolge van een uitsluitend door het Noordzeegetij bepaalde variërende waterstand in de mond zou bij een prismatisch verlopend, voldoende diep en ruim dwarsprofiel en een oneindige lengte van Westerschelde en Zeeschelde een zuivere, zich onvervormd voortplantende lopende golf ontstaan. Bij de relatief grillig verlopende geometrie in het Schelde-estuarium is dit niet het geval (fig.5.2). De getijgolf heeft duidelijk een "lopend karakter", maar er treedt aanzienlijke vervorming op.

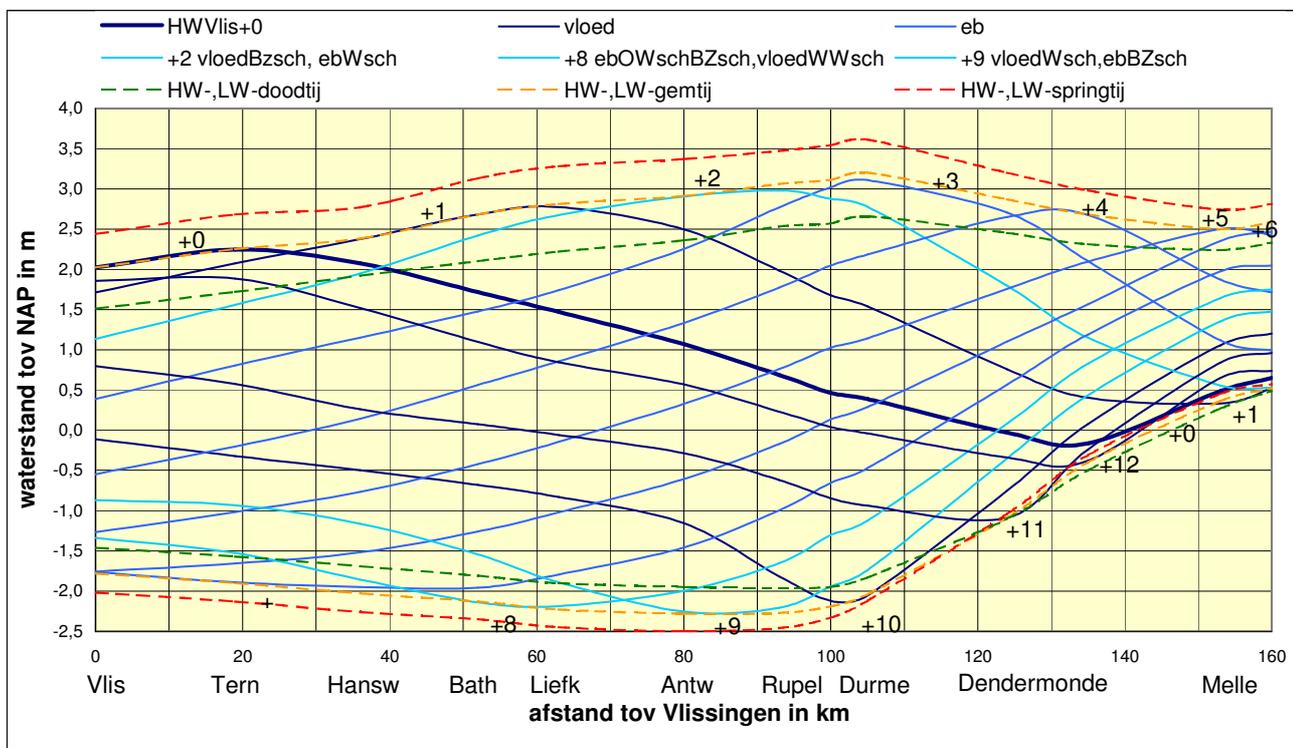


fig. 5.2
waterstandsverhanglijnen gemiddeld getij en
HW- en LW-verloop dood-, gemiddeld en
springtij op hele uren na het tijdstip van HW
in Vlissingen

De belangrijkste zichtbare vervormingen zijn de toename van het getijverschil tot 80 à 100 km landinwaarts van Vlissingen en vervolgens de doorgaande afname tot Gent, het afnemen van de loopsnelheid van top en dal landinwaarts, het steiler worden van het deel van de golf vóór de top, in de golfvoortplantingsrichting gezien, ten opzichte van het deel achter de top en tenslotte het sterk oplopen van de laagwaterstand landwaarts van Antwerpen. Van Veen (1944) noemde het verschijnsel van het na de toename landinwaarts weer afnemen van het getijverschil de "vloedkuil" en het gebied waar

het gebeurt het "vloedkuilgebied". Hierna wordt hierop nader ingegaan. De verklaringen van deze verschijnselen kunnen op verschillende manieren worden geformuleerd. Een gebruikelijke verklaring van het achtereenvolgens toe- en afnemen van het getijverschil is dat over het eerste deel de traagheid domineert en over het tweede deel de weerstand. Een andere, minder gebruikelijke formulering is dat het verloop van de geometrie zodanig is dat over het eerste deel positieve partiële reflectie van de golfenergie optreedt en over het tweede deel negatieve. Dit zijn formuleringen waarbij in feite getij-gemiddelde eigenschappen van de waterbeweging zijn samengevat tot karakteristieke getijgolfparameters. Hierna wordt de getijvoortplanting vanuit de momentane waterbeweging beschreven.

De relatief autonoom cyclisch variërende waterstand in het mondingsgebied veroorzaakt overeenkomstige variaties van de debieten in de hals van de Westerschelde. Op te vatten als een continue reeks kleine verstoringen, zoals beschreven in paragraaf 3.3, planten deze waterstands- en bijbehorende debietveranderingen zich voort het estuarium in, met een in eerste orde van het doorstroomprofiel, de bergende breedte en de weerstand afhankelijke "fasesnelheid". Bij een prismatisch verlopend "voldoende" ruim en diep dwarsprofiel hebben alle achtereenvolgens "verstuurde" verstoringen van waterstand en debiet dezelfde fasesnelheid. Op elke lokatie in het estuarium wordt de randvoorwaarde gereproduceerd met een tijdsvertraging gelijk aan de afstand gedeeld door de fasesnelheid, of wel de hele reeks "verstoringen", de golf, plant zich ruimtelijk, zoals eerdergenoemd, onvervormd voort. De relatie tussen de zich voortplantende waterstands- en debietveranderingen wordt bepaald door de wet van behoud van massa, mathematisch geformuleerd in de continuïteitsvergelijking, en de tweede wet van Newton, uitgedrukt in de impulsvergelijking of bewegingsvergelijking. De eerste zegt dat de waterspiegel stijgt zolang het debiet in de richting van het bewegende water afneemt, gelijk blijft als het debiet ruimtelijk constant is en daalt als het debiet in de bewegingsrichting toeneemt. Volgens de bewegingsvergelijking veranderen de watersnelheden evenredig met een eventueel aanwezige resulterende uitwendige kracht op de beschouwde massa en veranderen ze niet als de uitwendige krachten in evenwicht zijn.

In de getijbeweging van water is het waterstandsverhang de belangrijkste uitwendige kracht, het is de aandrijvende kracht van de beweging. In de hiervoor beschreven situatie van de zich onvervormd voortplantende lopende golf planten de vanaf de rand "verstuurde" waterstandsveranderingen zich met dezelfde fasesnelheid voort. Voor alle "deelverstoringen" geldt de voor gelijkblijvend doorstroomprofiel A_s en bergende breedte B_b uit continuïteits- en bewegingsvergelijking af te leiden fasesnelheid:

$$c = \sqrt{\frac{g * A_s}{B_b}} = \sqrt{g * d} \quad \text{met } d = \text{gemiddelde diepte over } B_b \quad (5.1)$$

Of wel, de bij elk deel van de golf aan de rand behorende hellingen van de waterspiegel, de waterstandsverhangen, houden dezelfde waarde bij de voortplanting het estuarium in. Bij een "niet voldoende" ruim en diep, niet-prismatisch verlopend dwarsprofiel, zoals in werkelijkheid in het Schelde-estuarium, verschillen de fasesnelheden van de afzonderlijke verstoringen waaruit de golf opgebouwd gedacht kan worden. Bij een relatief kleine waterdiepte veroorzaken de bij de afzonderlijke verstoringen behorende verschillende waterdiepten verschillen in fasesnelheid. Bovendien varieert de fasesnelheid van de afzonderlijke verstoringen bij het passeren van dwars-profielen met variërende doorstroomprofielen A_s , bergende breedten B_b en weerstandseigenschappen. De hellingen van de waterspiegel veranderen ten opzichte van de golf aan de rand: de golf vervormt! Hydrodynamisch gezien relevant is dat de waterstandsverhangen veranderen bij het naar binnenlopen van de golf.

Rond anderhalf uur voor het bereiken van HW in Vlissingen nadert het vloeddebiet in de hals van de Westerschelde de maximale waarden treden in de hals van het estuarium bij Vlissingen de maximale vloeddebieten op. Aannemende dat ongeveer tegelijk de watersnelheden maximaal zijn, betekent dit dat omstreeks dat tijdstip de verhangkrachten ongeveer in evenwicht zijn met de weerstandskrachten. Immers gedurende korte tijd blijven de ongeveer maximale watersnelheden gelijk.

De getijbeweging bij dood-, gemiddeld- en springtij

In fig. 5.3 en 5.4 wordt een vergelijking gemaakt van de getijbeweging bij dood-, gemiddeld- en springtij voor respectievelijk de vloedfase en de eb fase.

fig. 5.3
waterstandsverhanglijn vloedfase HW- en LW-verloop dood-, gemiddeld en springtij

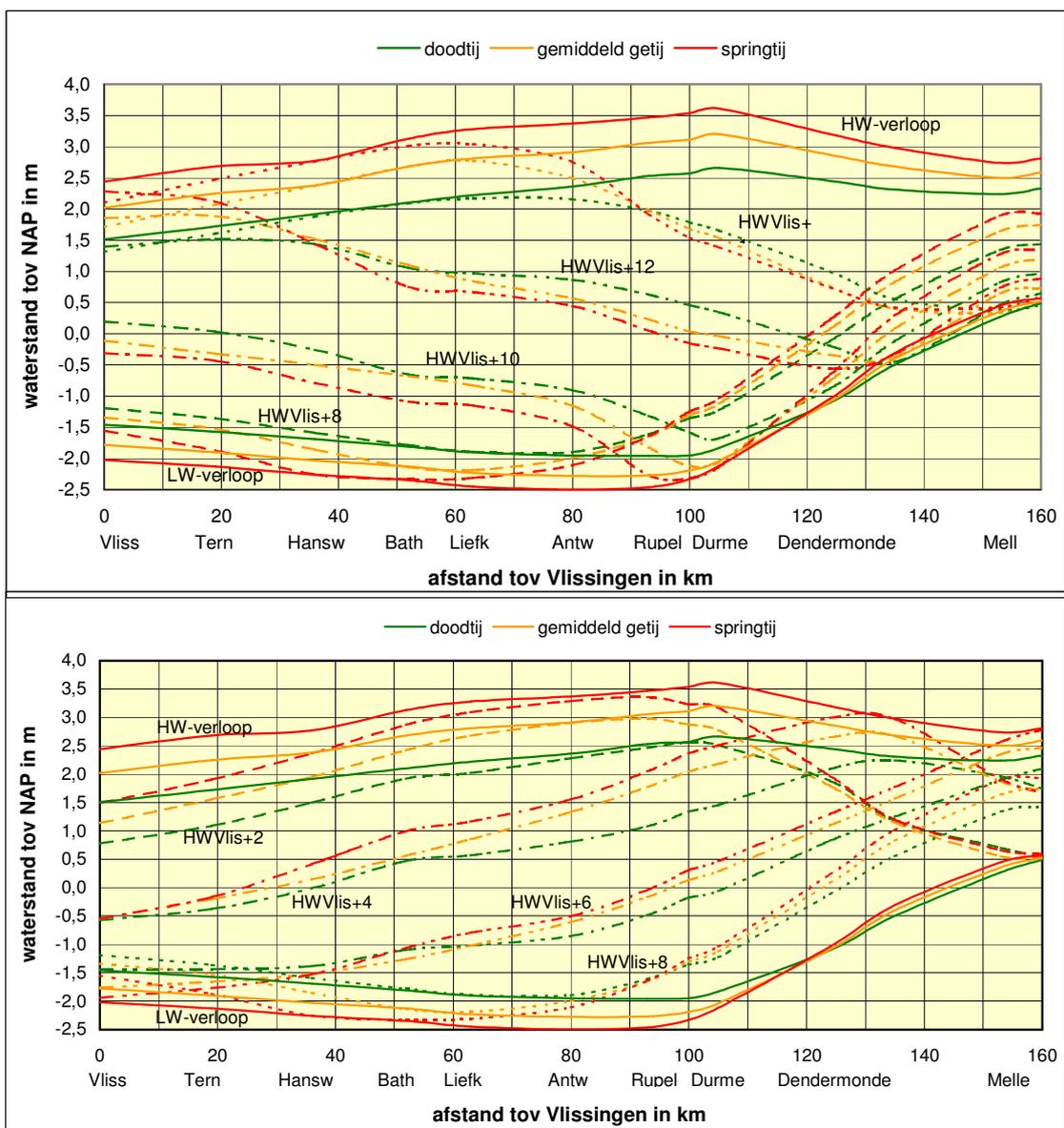


fig. 5.4
waterstandsverhanglijn eb fase HW- en LW-verloop voor dood-, gemiddeld en springtij

5.6. significante veranderingen van de getijkarakteristieken in het verleden

In de afgelopen eeuw is de getijdoordringing onder zowel dagelijkse omstandigheden als bij stormvloed door gaand toegenomen. Met name na het midden van de eeuw is de toename sterker geworden. In verschillende publicaties in het recente verleden wordt verklaard dat 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 (Tavenier, 1998; Peters, 2001; Technische Schelde Commissie, 2001 en Blomme, 2001). Oorzaken van de veranderingen, ook toekomstige, die waarschijnlijker worden geacht en waaraan grotere invloed wordt toegeschreven dan de vaarwegverdiepingen zijn:

- de natuurlijke morfologische evolutie,
- de inpolderingen,
- de zeespiegelstijging,
- de veranderingen in het middengebied van de Westerschelde rond het midden van de vorige eeuw,
- de toenemende frequentie van stormvloed,
- te verwachten klimaatveranderingen.

In de Langetermijnvisie Schelde-estuarium (Technische Schelde Commissie, 2001) wordt geconstateerd: "op bijna alle plaatsen in het Schelde-estuarium neemt het getijverschil toe. Dit gebeurde in het verleden al door inpolderingen en gaat nog door, bijvoorbeeld door het verruimen van de vaargeul en het vaargeulonderhoud. Dit heeft echter geen invloed op de extreme stormvloedstanden." en "het verder doordringen van het getij is ook in Antwerpen duidelijk merkbaar. Tot nog toe zijn er geen aanwijzingen dat dit van invloed is op de extreme hoogwaterstanden en het risico van overstromen."

In paragraaf 5.6.1 wordt de ontwikkeling over de periode 1888 -1990 van het dagelijkse getij beschreven en kwalitatief geïnterpreteerd aan de hand van de "tienjarige gemiddelden" van HW- en LW-standen (Claessens & Meyvis, 1994; van Cauwenberghe, 1993). Uit een genuanceerde beschouwing van de ontwikkeling in de tijd van het ruimtelijke verloop van deze tienjarige gemiddelden blijkt dat de meest significante veranderingen van het getij in de afgelopen eeuw, met zeer grote waarschijnlijkheid fysisch kunnen worden verklaard uit aanvankelijk zeespiegelstijging, de veranderingen in het middengebied van de Westerschelde en vooral, met name in de laatste halve eeuw, uit de door vaargeulverdieping en onderhoud veroorzaakte geometrie-veranderingen. In hoofdstuk 6 worden laatstgenoemde relaties ook kwantitatief onderbouwd met een eenvoudig simulatiemodel.

Aan de hand van de tussen 1901 en 1990 opgetreden 18 zogenoemde buitengewone stormvloed, dat zijn stormvloed waarbij in Antwerpen het niveau van TAW +7.00 m werd bereikt (Claessens & Meyvis, 1994; van Cauwenberghe, 1993), komen in paragraaf 5.6.2 de veranderingen in de doordringing van stormvloed aan de orde. Ondanks de specifieke variabiliteit van stormvloed zijn alle invloeden die zichtbaar zijn in de ontwikkeling van het dagelijkse getij, behalve uiteraard die van de zeespiegelstijging, ook te onderscheiden in de ontwikkeling in de tijd van het ruimtelijke verloop per stormvloed van de stormvloed hoogwaterstanden langs het estuarium. Deze bevindingen wijken sterk af van de uitspraken en conclusies in bovengenoemde publicaties.

5.6.1. De ontwikkeling van het dagelijkse getij in de afgelopen eeuw.

De ontwikkeling van het verticale getij wordt meestal beschreven in termen van de getijslag, het getijverschil of de getijamplitude. Het is goed te realiseren dat deze parameter in feite "slechts" een rekengrootte is, het verschil tussen hoog- en laagwater. Als de hoog- en laagwaterstanden zich in bepaalde perioden verschillend ontwikkelen, zoals in

het Schelde-estuarium gebeurt, wordt inzichtgevende informatie gemist als alleen naar het getijverschil wordt gekeken. Juist een verschillende ontwikkeling van HW en LW versterkt het inzicht in de oorzaken. Hierna worden het verloop van de hoog- en laagwaterstanden afzonderlijk en in samenhang beschouwd. In grote lijnen heeft de toename van de hoogwaterstanden een grotere bijdrage geleverd aan de bekende toename van het getijverschil dan de veranderingen in de laagwaterstanden (fig. 5.5, 5.6, 5.7).

fig. 5.5

Ontwikkeling 1888-1990 LW- en HW-standen bij gemiddeld getij langs Schelde-estuarium

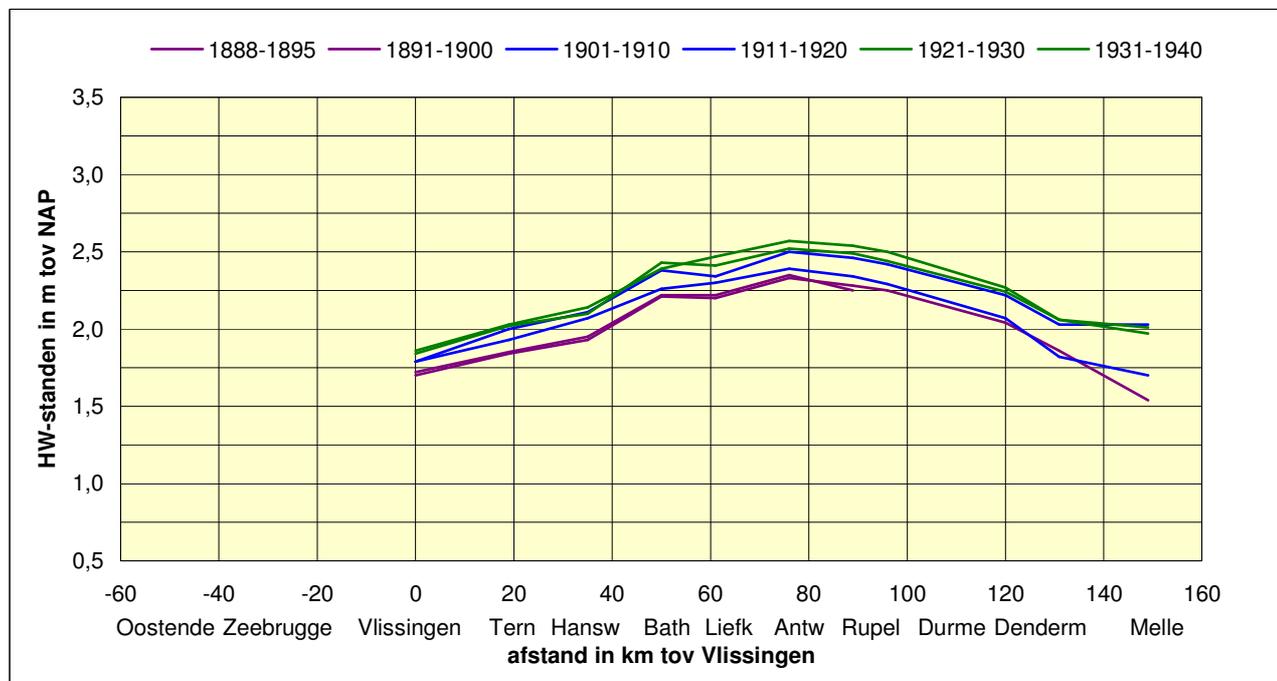
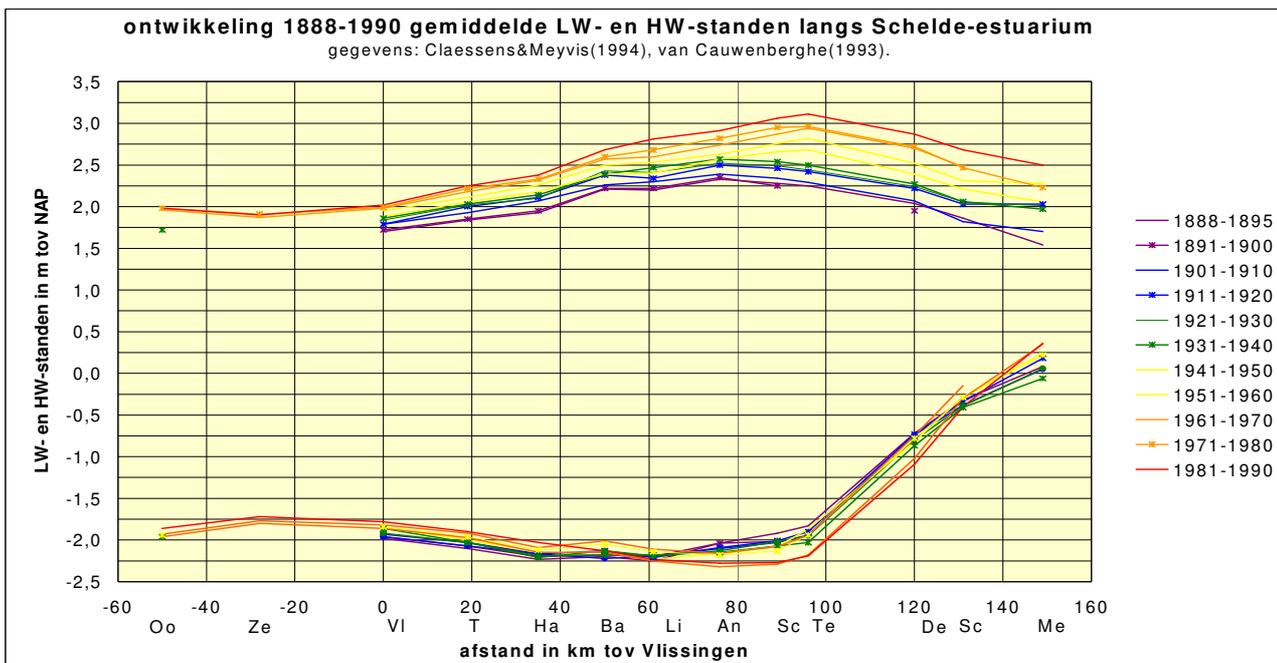


fig. 5.6

ontwikkeling HW-standen gemiddeld getij tussen 1888 en 1940

De hoogwaterstanden zijn over vrijwel de hele Westerschelde en Zeeschelde doorgaand toegenomen, terwijl de veranderingen van de laagwaterstanden ruimtelijk en temporeel een veel onregelmatiger verloop vertonen. De oorzaak hiervan is de grotere gevoeligheid van de laagwaterstanden voor weerstandsveranderingen, vooral op de Zeeschelde. Die weerstand veranderde door waterdiepteveranderingen, als gevolg van geometrieveranderingen ter plaatse en veranderingen van de gemiddelde zeestand, door veranderingen van de watersnelheden als gevolg van doorstroomprofiel- of bergingsveranderingen in andere delen van het systeem of, vooral boven Antwerpen, door afvoer veranderingen van de rivier de Schelde en de zijrivieren. De ontwikkeling in de afgelopen eeuw vertoont duidelijk drie karakteristieke fasen, die zich voltrokken in de perioden 1890 - 1940, 1940 - 1970 en 1970 - 1990.

de periode 1890 –1940

Tussen 1890 en 1940 stijgen de hoogwaterstanden over de gehele Westerschelde en Zeeschelde min of meer gelijkmatig (fig. 5.6). Over de Westerschelde stijgen op dezelfde wijze, maar minder sterk, ook de laagwaterstanden (fig. 5.7). De stijging van de hoogwaterstanden bestaat voor een deel uit de directe doorwerking van de zeespiegelstijging en voor een deel uit de kleinere demping door de afname van de relatieve weerstand bij de toegenomen waterdiepte. De laagwaterstanden stijgen minder, omdat de doorwerking van de stijging van de gemiddelde zeestand gereduceerd wordt door de daling door de kleinere weerstand. Bovendien werkt de afname van de relatieve weerstand bij de laagwaterstanden sterker door, zodat deze reductie groter is dan de invloed van de bijdrage van de weerstandsafname op de stijging van de hoogwaterstanden.

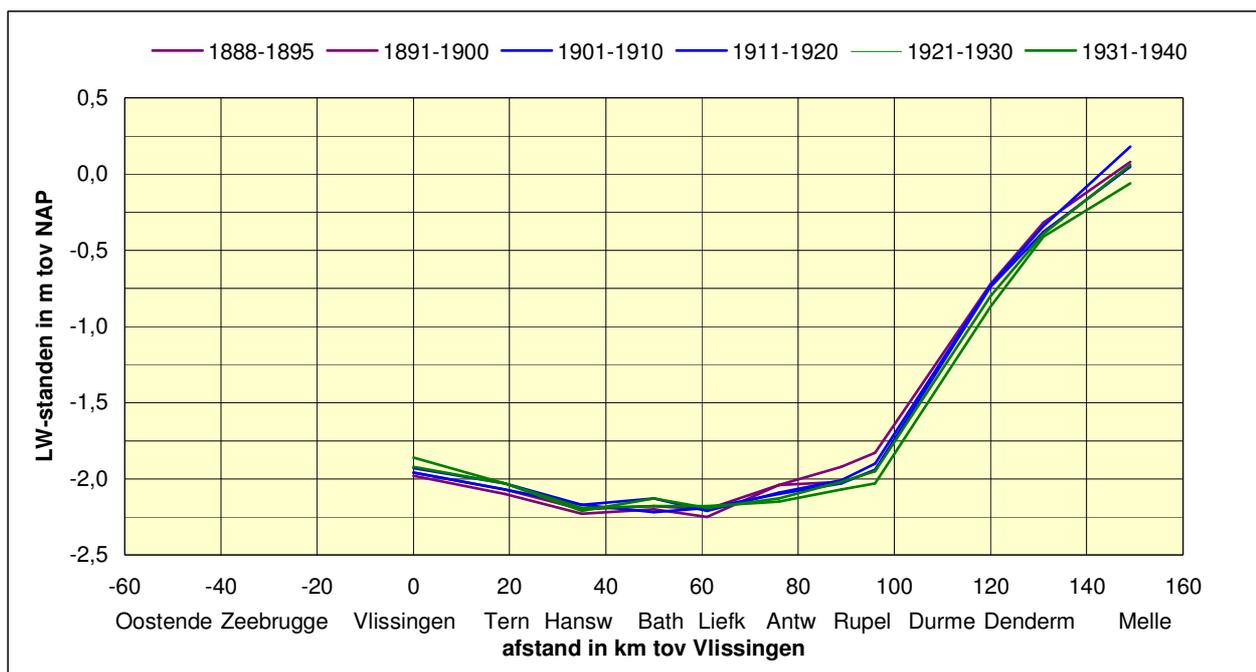


fig. 5.7
ontwikkeling LW-standen gemiddeld getij
tussen 1888 en 1940

Het is goed om te realiseren dat, omdat, zoals hiervoor beschreven, met de stijging van de gemiddelde zeestand de hoogwaterstanden sterker stijgen dan de laagwaterstanden, de gemiddelde waterstand in dit deel van het estuarium sterker stijgt dan de gemiddelde zeestand. Vanaf de grens zijn op de Zeeschelde de laagwaterstanden gedaald (fig.5.7). Hier speelt de relatieve weerstand een grotere rol dan in de Westerschelde. Het laatste is ook te zien aan het oplopen van de laagwaterstanden in landwaartse richting. De verlaging door de afname van de weerstand is hier groter dan de directe doorwerking van de stijging met de gemiddelde zee-

stand. Mogelijk een even grote invloed op de verlaging van de laagwaterstanden op de Beneden-Zeeschelde heeft de verruiming van het gebied rond de B-N-grens door het nautische baggerwerk gehad. Op de drempel van Bath wordt gebaggerd vanaf rond 1900. Dit is ook enigszins te zien in de toename van de hoogwaterstanden na 1901-1910 over het traject Hansweert-Bath-Liefkenshoek (fig.5.6). De fluctuaties in het verloop van zowel HW- als LW-standen in dit gebied worden waarschijnlijk mede veroorzaakt door de bergingsveranderingen door de inpolderingen rond Bath die in deze periode werden uitgevoerd.

de periode 1940-1970

fig. 5.8
ontwikkeling HW-standen gemiddeld getij
1941-1970 vergeleken met 1891-1940

In de periode 1941 – 1970 gaat op de Westerschelde de gelijkmatige stijging van zowel HW- als LW-standen als gevolg van de stijging van de gemiddelde zeestand door (fig. 5.8, 5.9). In het grensgebied

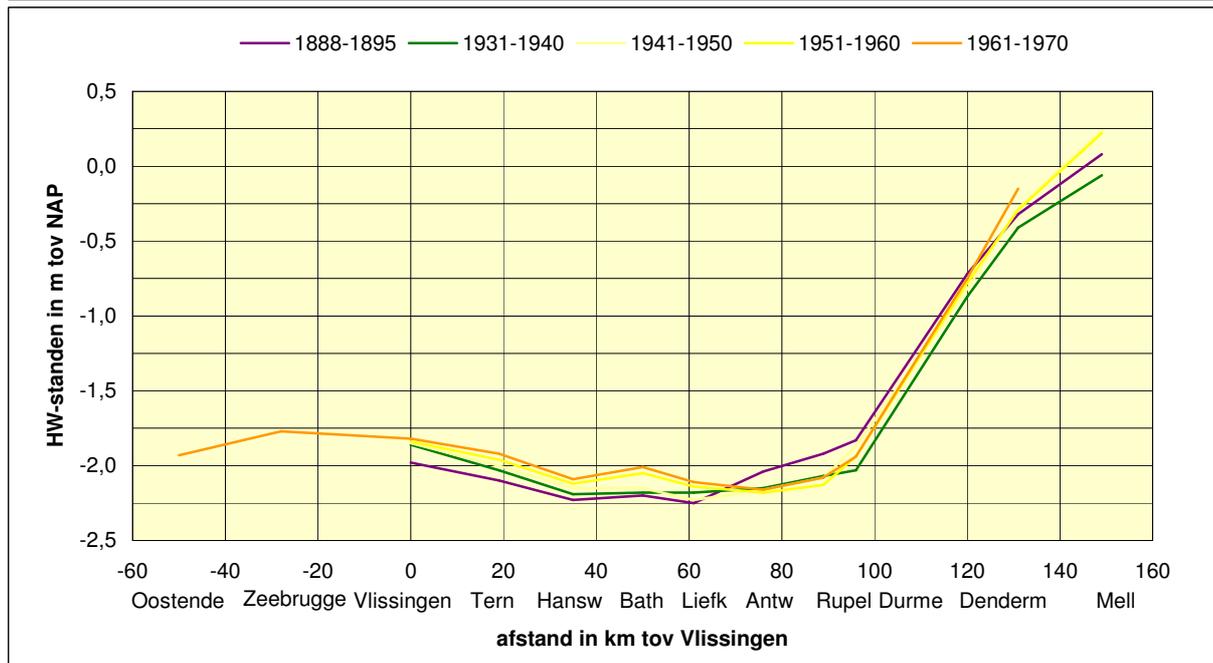
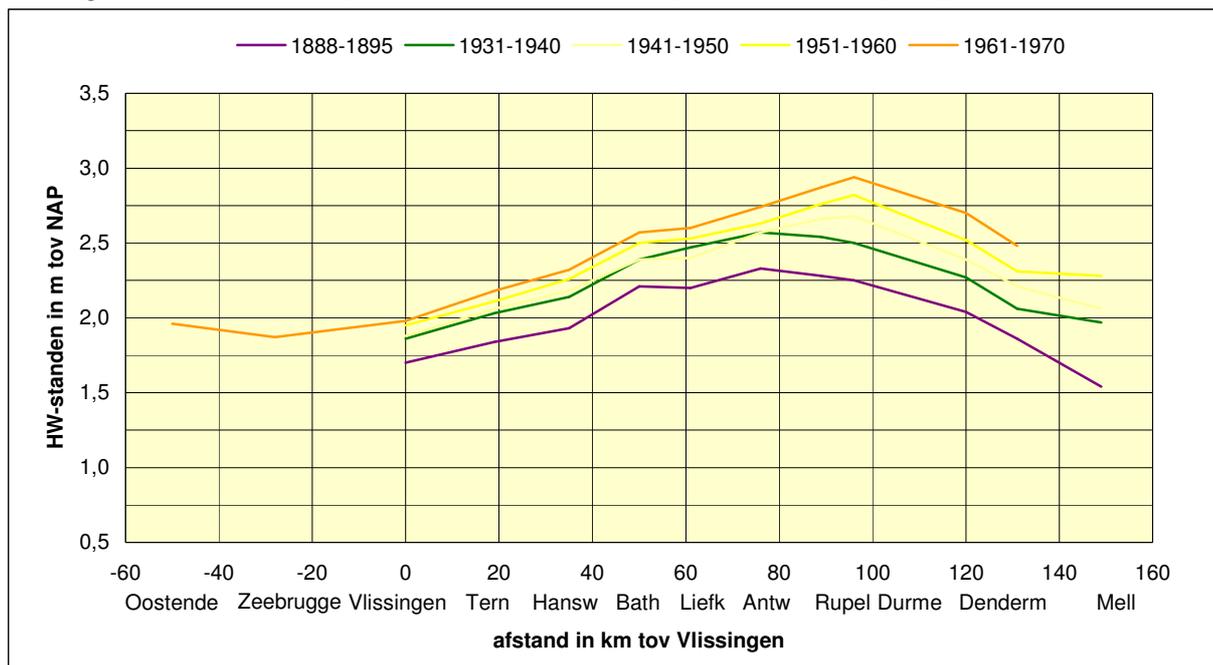


fig. 5.9
ontwikkeling LW-standen gemiddeld getij
1941-1970 vergeleken met 1891-1940

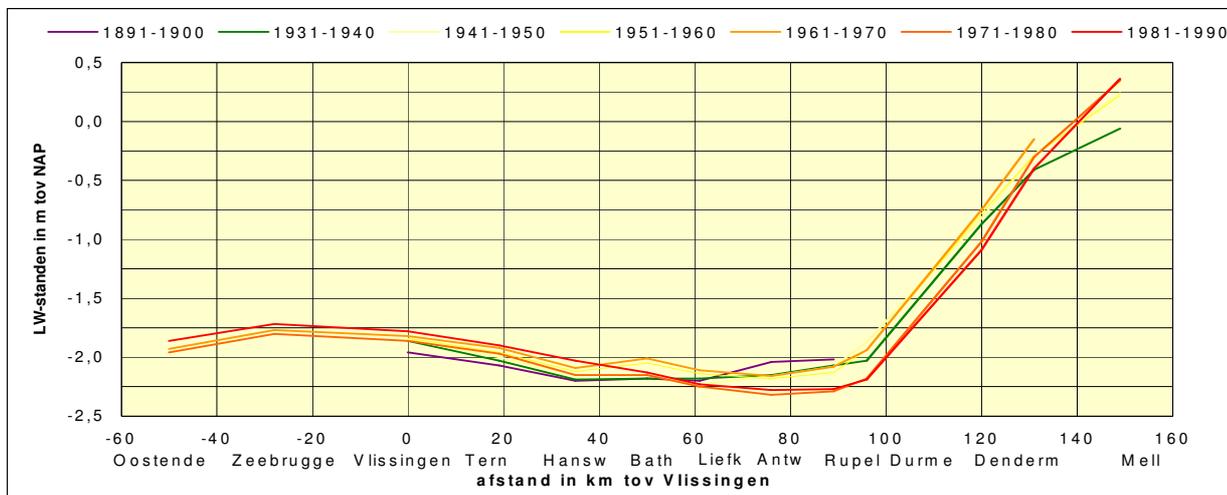
neemt in deze periode aanvankelijk de versterking van het hoogwater af terwijl ze landwaarts van Antwerpen toeneemt. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk het verondiepen van het grensgebied door het staken van de baggerwerken in de oorlogsjaren, waardoor de debieten naar de Beneden-Zeeschelde afnamen. Bij de verlaagde watersnelheden door de kleinere debieten bij dezelfde geometrie in het landwaarts gelegen gebied is de relatieve weerstand kleiner en de verlaging van de laagwaterstanden groter.

Na de Tweede Wereldoorlog is het baggerwerk in het grensgebied en op de Beneden-Zeeschelde geïntensiveerd. De debieten naar en op de Beneden-Zeeschelde worden groter door de verruiming, waarbij over het grootste deel de relatieve weerstand afneemt en de getijversterking toeneemt. Over de gehele Beneden-Zeeschelde wordt de getijversterking groter: de versterking compenseert de stijging van de laagwaterstanden, terwijl de hoogwaterstanden sterk toenemen. Aanvankelijk nam alleen boven Antwerpen de relatieve weerstand af en de versterking toe door de afname van debieten en snelheden ter plaatse als gevolg van de afname van de debieten naar de Beneden-Zeeschelde door de verlanding van het grensgebied. Vervolgens neemt, nu over het grootste deel van de Beneden-Zeeschelde de relatieve weerstand verder af en de versterking toe door de verruiming van het gebied. Alleen in het grensgebied gaan de grotere debieten gepaard met zodanig grotere watersnelheden dat hier de relatieve weerstand groter wordt, wat vooral tot uitdrukking komt in de verhoging van de laagwaterstanden in Bath en Liefkenshoek. Ondanks de ook hier uitgevoerde verruimingen neemt de getijversterking in de periode 1940-1960 in dit gebied af (fig. 5.8, 5.9).

de periode 1970 -1990

In de periode 1970-1990 treden de sterkste en meest markante veranderingen op in de ontwikkeling van het Scheldegetij in de afgelopen eeuw. Over 1970-1980 dalen overall, nu ook op de Westerschelde, de laagwaterstanden ten opzichte van 1961-1970. Oostelijk van Hansweert, van Bath tot de Rupelmonding, is de daling zeer sterk. Ook in het mondingsgebied treedt een lichte daling op (fig. 5.10). Zeewaarts van Bath stijgen de hoogwaterstanden licht, tussen Bath en de Rupelmonding is de stijging groter (fig. 5.11). Samen resulteren deze beide ontwikkelingen in een sterke toename van de getijslag tussen Bath en de Rupelmonding, de sterkste in de afgelopen eeuw (zie ook fig. 5.12). De oorzaak is de verruiming van het grensgebied en de Beneden-Zeeschelde, als eerste fase van de algehele verdieping van de vaargeul in de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw. Met het op een dieper niveau onderhouden van de drempel van Bath werd begonnen in het midden van de jaren zestig. In elk van de perioden 1960 –1970 en 1970 – 1974 werd op de Beneden-Zeeschelde ongeveer 25 miljoen m³ sediment gebag-

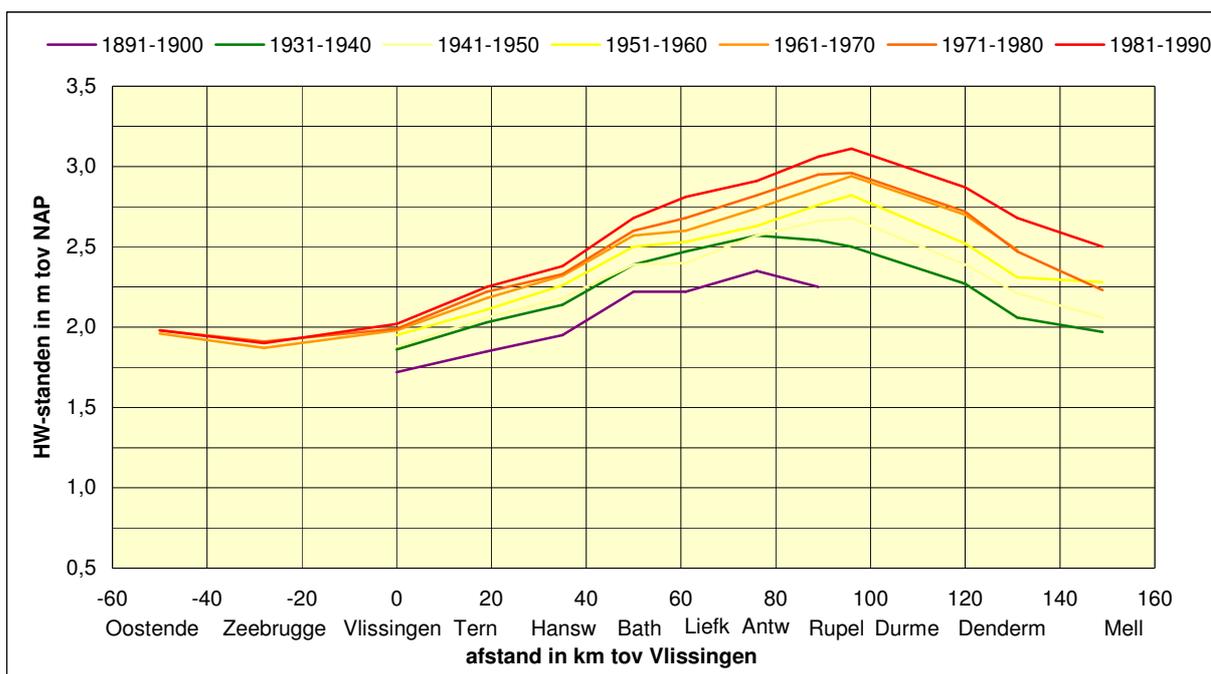
fig. 5.10
ontwikkeling LW-standen 1970-1990,
vergeleken met 1891-1970



Dit resulteerde in verdiepingen van 2 tot 3 m over vrijwel de hele Beneden-Zeeschelde zeewaarts van Antwerpen. Als in gebieden waar de relatieve weerstand een substantiële rol speelt de debieten kunnen toenemen door verruiming van de doorstroomprofielen, waarbij de watersnelheden niet significant toenemen, neemt de relatieve weerstand af, of wel de verhouding weerstand/traagheid wordt kleiner, en wordt de getijversterking groter. Dit gebeurde in het grensgebied en op de Beneden-Zeeschelde.

Van 1971 – 1980 naar 1981 – 1990 nemen de hoogwaterstanden vanaf Bath landwaarts over de gehele Zeeschelde sterk toe (fig. 5.11). De oorzaak ligt nu niet in eerste instantie op de Beneden-Zeeschelde, maar in het oostelijke deel van de Westerschelde en in het grensgebied. De toename van de versterking van de hoogwaterstanden treedt op over de trajecten Hansweert – Bath – Liefkenshoek.

fig. 5.11
ontwikkeling HW-standen 1970-1990,
vergeleken met 1891-1970



De verhoging van de “hoogwaterstandvoorwaarde” voor de Beneden-Zeeschelde kan zich over het hele gebied tot Gent onverzwakt voortplanten. Dit is een duidelijk andere verandering dan de toename van de versterking over Bath - Rupelmonding tussen 1961 – 1970 en 1971 – 1981, die vooral werd bepaald door de verruiming ter plaatse. Opmerkelijk is de significante, relatief gelijkmatige verhoging tussen 1970 en 1990 van de laagwaterstanden in het mondingsgebied op de Westerschelde tot en met Hansweert. De toename van de hoogwaterversterking over Hansweert – Bath – Liefkenshoek heeft te maken met de voortzetting van de algehele verdieping van de vaargeul tussen 1970 en 1980. De verandering van het gemiddelde getij tussen 1961 – 1971 en 1981 – 1990 over het estuarium tussen Vlissingen en Antwerpen blijkt kwalitatief goed te simuleren uit de opgetreden veranderingen in de geometrie tussen 1965 en 1995 met een eenvoudig lineair model, gebaseerd op de harmonische methode. Uit deze simulatie volgt een significante afname van de zogenoemde dempingsconstante over het estuarium vanaf Hansweert tot in het gebied landinwaarts van Antwerpen. Dit is consistent met de opgetreden toename van de getijversterking over dit gebied. In hoofdstuk 6 wordt hierop nader ingegaan.

samenvatting veranderingen in het gemiddelde getij over 1890 – 1990

De veranderingen in de versterking van het getijverschil ten opzichte van Vlissingen als resultaat van de hiervoor beschreven ontwikkelingen zijn samengevat in onderstaande figuur 5.12.

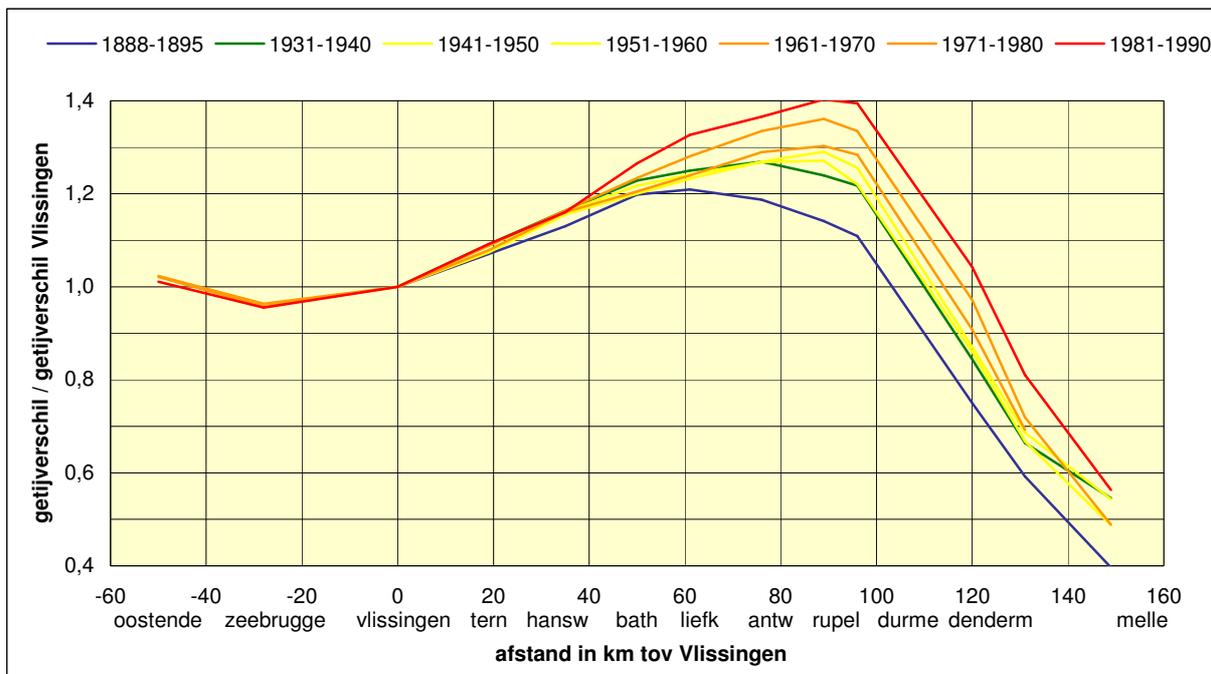


fig. 5.12
de versterking van het getijverschil bij gemiddeld getij ten opzichte van Vlissingen; ontwikkeling over 1941-1990 vergeleken met 1888-1940

De belangrijkste waar te nemen veranderingen in het gemiddelde getij over 1890 – 1990 zijn:

- Over de periode 1890 – 1940 stijgen de hoogwaterstanden min of meer gelijkmatig direct met de zeespiegelstijging en indirect door de kleinere weerstand door de grotere waterdiepte. Over de Westerschelde dalen en op de Zeeschelde stijgen de laagwaterstanden, in beide gebieden als resultaat van de stijging met de gemiddelde zeestand en de daling door de lagere weerstand. Waarschijnlijk werd de afname van de weerstand ook bevorderd door de het nautische baggerwerk in het grensgebied en op de Beneden-Zeeschelde;
- In het eerste decennium van de periode 1940 – 1970 neemt de getijversterking in het grensgebied af en op de Beneden-Zeeschelde toe, waarschijnlijk door de verondieping van het grensgebied door het staken van de baggerwerken in de oorlogsjaren. In de beide volgende decennia worden de baggerwerken geïntensiveerd en neemt de getijslag op de hele Beneden-Zeeschelde sterk toe, ook zeewaarts van Antwerpen. Met het sterk toenemen van de verticale berging op de Beneden-Zeeschelde nemen de debieten en watersnelheden en daarmee de weerstand rond Bath en in het grensgebied toe, wat tot uitdrukking komt in het omhoog komen van de laagwaterstanden en de middenstand in dit gebied.

- Tussen 1961 – 1970 en 1971- 1980 treedt tussen Bath en de Rupelmonding de sterkste toename op van de getijslag in de afgelopen eeuw, met zowel een sterke daling van de laagwaterstanden als een stijging van de hoogwaterstanden. De oorzaak is de sterke verruiming van grensgebied en Beneden-Zeeschelde rond 1970, als eerste fase van de algehele vaarwegverdieping. Aan de Beneden-Zeeschelde werden meerdere tientallen miljoenen m³ sediment onttrokken wat resulteerde in verdiepingen over grote delen van 2 tot 3 m. Tussen 1971 – 1980 en 1981 – 1990 nemen de hoogwaterstanden significant verder toe, relatief gelijkmatig over het hele estuarium landinwaarts van Bath. Deze stijging wordt veroorzaakt door een toename van de versterking over het oostelijke deel van de Westerschelde vanaf Hansweert. Deze toename moet te maken hebben met de voortzetting van de algehele verdieping van de vaarweg tussen 1970 en 1980. Benaderende berekeningen bevestigen dat door de geometrieveranderingen tussen 1965 en 1995 tussen Hansweert en de Rupelmonding de zogenoemde dempingsconstante significant is afgenomen.

5.6.2. De ontwikkeling van de doordringing van stormvloeden in de afgelopen eeuw

de doordringing van stormvloeden

De ontwikkeling van de doordringing van stormvloeden in de afgelopen eeuw laat in grote lijnen een overeenkomstig beeld zien met de ontwikkeling van het dagelijkse getij (fig. 5.13). Dit ondanks het feit dat de doordringing van stormvloeden, naast de geometrie, door significant meer, per stormvloed variërende factoren wordt beïnvloed, dan het gemiddelde dagelijkse getij. Fysisch kan de doordringing van een stormvloed in het Schelde-estuarium in eerste orde worden beschouwd als het binnenlopen van het astronomische hoogwater bij een verhoogde middenstand, of wel bij een grotere waterdiepte. Deze verhoging heeft ook het karakter van een golf, zij het met een grotere periode dan de dubbeldaagse getijgolf. Belangrijk is het faseverschil tussen de toppen van de "opzetgolf", de astronomische getijgolf en eventueel het windveld. Bij de grotere waterdiepte, orde 1 á 2 m in het Schelde-estuarium, is de geometrisch bepaalde weerstand kleiner, waardoor de amplitudeversterking kan toenemen. Ook kan de versterking bevorderd worden door minder demping door wrijvingsweerstand, door afname van de watersnelheden bij de grotere doorstroomprofielen. De snelheden kunnen echter ook toenemen, eventueel plaatselijk, door toename van de verticale berging en mogelijk ook de horizontale berging bij het hogere waterstandsniveau. Vaak domineert de snelheidsafname (Parker, 1991). Bij de sterk variërende geometrie van het Schelde-estuarium treden vrijwel zeker plaatselijk bepaald zowel afnamen als toenamen van de snelheden op. Waar de stormvloedhoogwaterstanden welke hoogten bereiken wordt dan in zeer sterke mate bepaald door eerdergenoemde faseverschillen tussen de toppen van opzetgolf, getijgolf en windveld.

globaal verloop doordringing stormvloeden over periode 1906 -1991

Tussen 1906 en 1991 traden er 18 zogenoemde buitengewone stormvloeden op in het Schelde-estuarium. Dit zijn stormvloeden die een niveau van TAW + 7.00m bereiken in Antwerpen. In Vlissingen, Terneuzen en Hansweert liggen de hoogwaterstanden van deze stormvloeden min of meer random verdeeld, afgezien van de bekende hoge stormvloeden van 1906, 1953, 1976 en 1990(1) (fig. 5.13). In Hansweert liggen de hoogwaterstanden van alle 14 eerstgenoemde stormvloeden tussen NAP + 4.00m en NAP + 4.25m. In Antwerpen, en vooral in Schelle en Temse, bereiken alle 9 vanaf 1973 opgetreden buitengewone stormvloeden significant hogere hoogwaterstanden dan die van alle ervoor, behalve van die van 1906 en 1953 in Antwerpen en van 1953 en 1966 in Schelle en Temse. Vanaf 1973 wordt de versterking van de stormvloedstanden tussen Hansweert en Bath significant sterker, waardoor nog relatief "lage stormvloeden" zee-

waarts van Hansweert, zoals bijvoorbeeld die van 1973, 1984 en 1986, bij Bath en op de Beneden-Zeeschelde duidelijk hogere stormvloedstanden veroorzaken dan vergelijkbare, eerder opgetreden stormvloeden.

de periode 1906 – 1966

In de periode 1906 – 1966 veroorzaakten, afgezien van de stormvloed van 1953, die van 1906 zeewaarts en die van 1966 landwaarts van Antwerpen de hoogste stormvloedstanden (fig. 5.14). In Antwerpen zelf veroorzaakte de elders niet extreem hoge stormvloed van 1930 de hoogste waterstand na die van 1953. In het algemeen liggen in deze periode de hoogste stormvloedstanden per stormvloed minder ver landinwaarts dan de hoogste hoogwaterstanden bij gemiddeld getij.

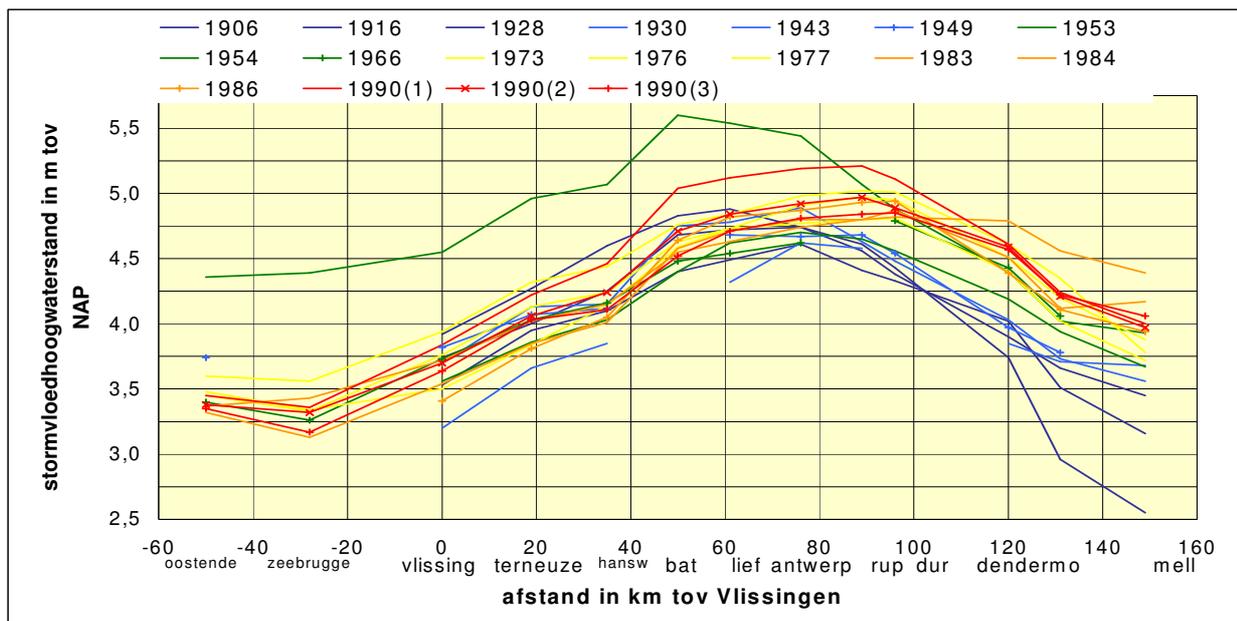


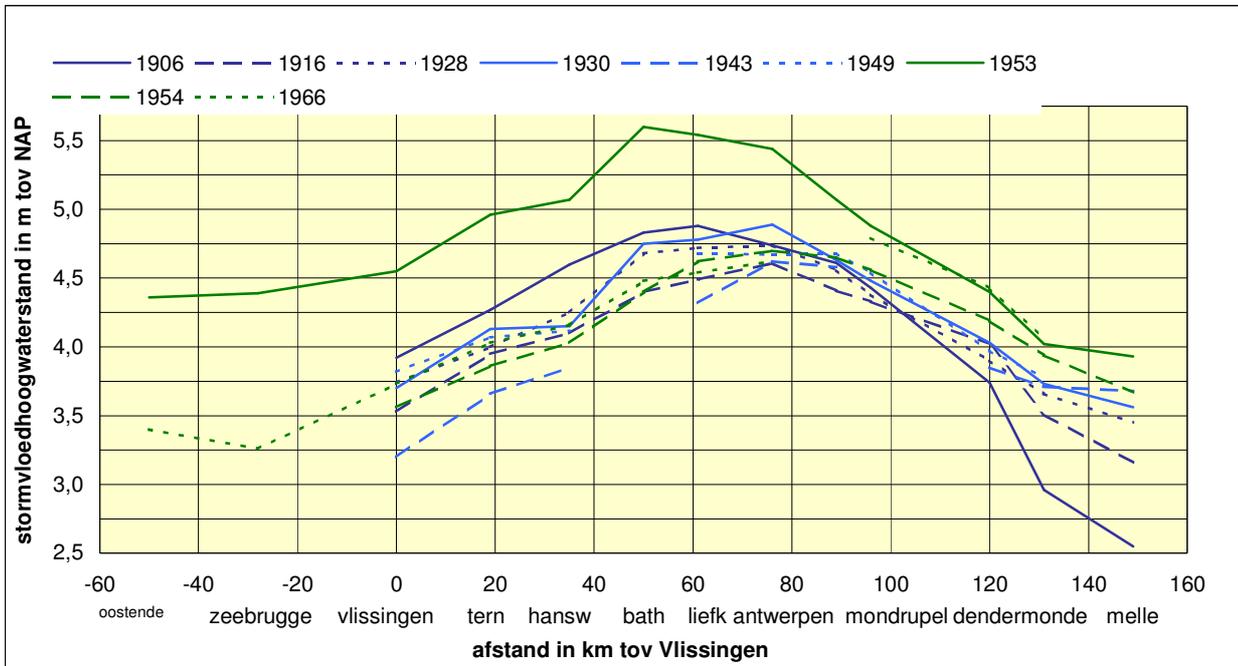
fig. 5.13
ontwikkeling verloop stormvloed hoogwaterstanden langs Schelde-estuarium (18 buitengewone stormvloeden 1901-1990)

De meeste stormvloeden bereiken hun hoogste waterstand zeewaarts van Antwerpen (fig. 5.14), terwijl de top van de dagelijkse hoogwaterstanden over 1890 – 1940 bij Antwerpen (fig. 5.6) en over 1940 – 1970 bij de mond van de Rupel ligt (fig. 5.8). Evenals het gemiddelde getij dringen ook de stormvloeden in deze periode in de loop van de tijd steeds verder door in het estuarium, met name landwaarts van Antwerpen en op de Boven-Zeeschelde (tabel 5.3).

Aangenomen moet worden dat niet zoals bij het gemiddelde getij de zeespiegelstijging enige rol speelt, maar dat de sterkere doordringing geheel veroorzaakt is door de genoemde verruiming door de na de Tweede Wereldoorlog geïntensiverde baggerwerken.

In Hansweert en Antwerpen vertoont de rangschikking naar bereikte hoogwaterstand van de in deze periode opgetreden 9 buitengewone stormvloeden geen relatie met de de tijd. Vanaf Temse is dat duidelijk wel het geval. Het zijn met name de stormvloeden die na de Tweede Wereldoorlog optraden die op deze locaties in de tijd steeds hogere hoogwaterstanden veroorzaakten. Deze ontwikkeling komt overeen met die voor het gemiddelde getij over de periode 1940 – 1970.

fig. 5.14
doordringing in het Schelde-estuarium van
buitengewone stormvloeden in de periode
1906-1966



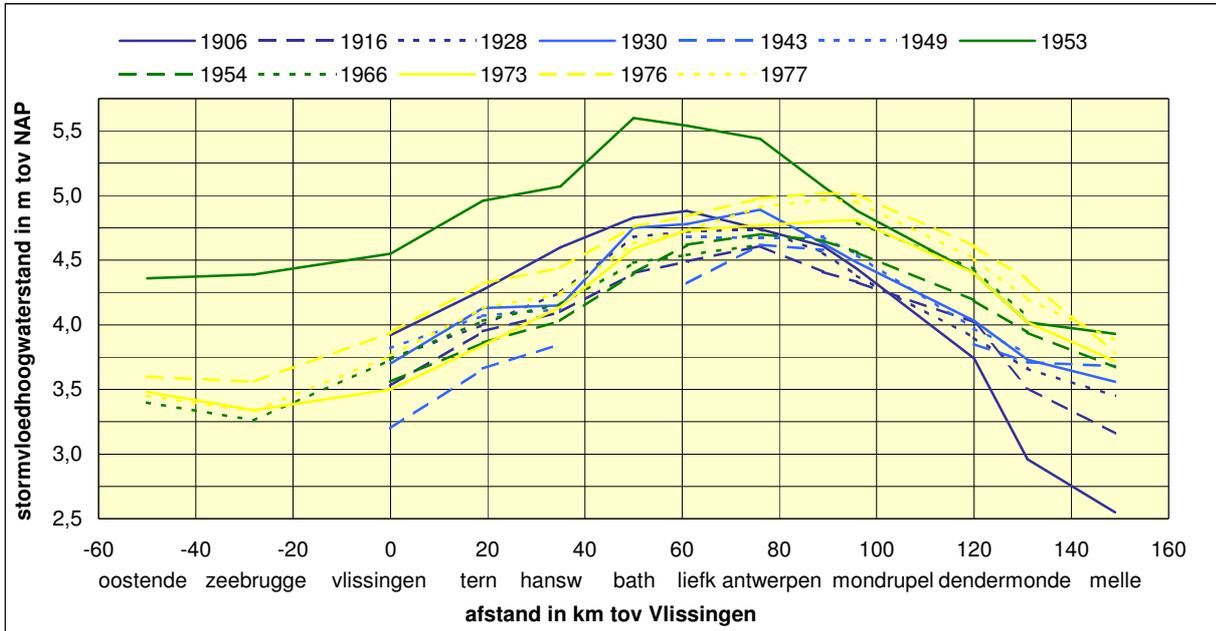
tabel 5.3
tussen 1906 en 1966 opgetreden buitenge-
wone stormvloeden gerangschikt naar hoog-
waterstand

	laagste	2	3	4	5	6	7	8	hoogste
Hansweert	1943	1954	1916	1949	1930	1966	1928	1906	1953
Antwerpen	1916	1943	1966	1949	1954	1906	1928	1930	1953
Temse	1916	1928	1906	1930		1949	1954	1966	1953
Dendermonde	1906	1943	1928	1949	1916	1930	1954	1953	1966
Schoonaarde	1906	1916	1928	1943	1930	1949	1954	1953	1966

de stormvloeden van 1973, 1976 en 1977

De in de jaren zeventig opgetreden stormvloeden drongen ten opzichte van de voorgaande periode met name sterker door op de Beneden-Zeeschelde vanaf de grens, het gebied dat rond 1970 met enkele meters is verdiept (fig. 5.15). De hoogste waterstanden treden nu op nabij de mond van de Rupel.

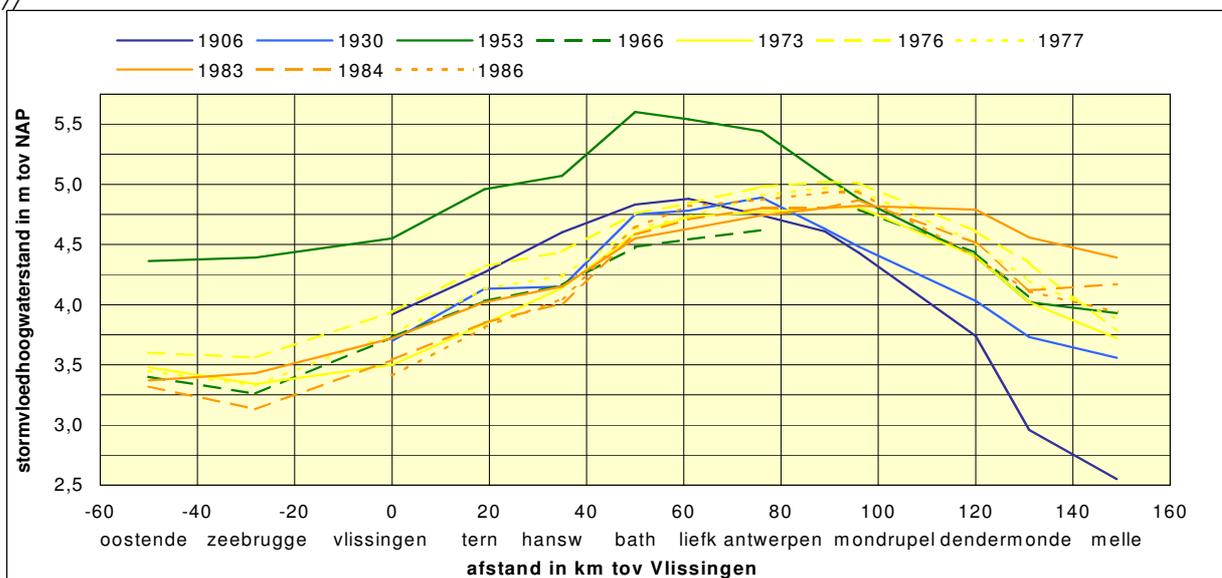
fig. 5.15
doordringing in het Schelde-estuarium van buitengewone stormvloeden 1973, 1976 en 1977 vergeleken met doordringing in periode 1906 - 1966



de stormvloeden van 1983, 1984 en 1986

De in mondingsgebied en Westerschelde enigszins lagere stormvloeden in de jaren tachtig veroorzaken op de Beneden- en Boven-Zeeschelde stormvloedhoogwaterstanden van gelijk niveau als de stormvloeden in het vorige decennium (fig. 5.16). Dit komt omdat deze stormvloeden nu al in het oostelijke deel van de Westerschelde en het grensgebied een grotere versterking krijgen. De versterking tussen Hansweert en Bath van al deze drie stormvloeden is groter dan die van 11 van alle 12 eerder, tussen 1906 en 1982, opgetreden buitengewone stormvloeden. Het dagelijkse getij vertoont dezelfde toename van de versterking over dit traject in deze periode (par. 5.5.1).

fig. 5.16
doordringing in het Schelde-estuarium van buitengewone stormvloeden van 1983, 1984 en 1986, vergeleken met doordringing in periode 1906-1977

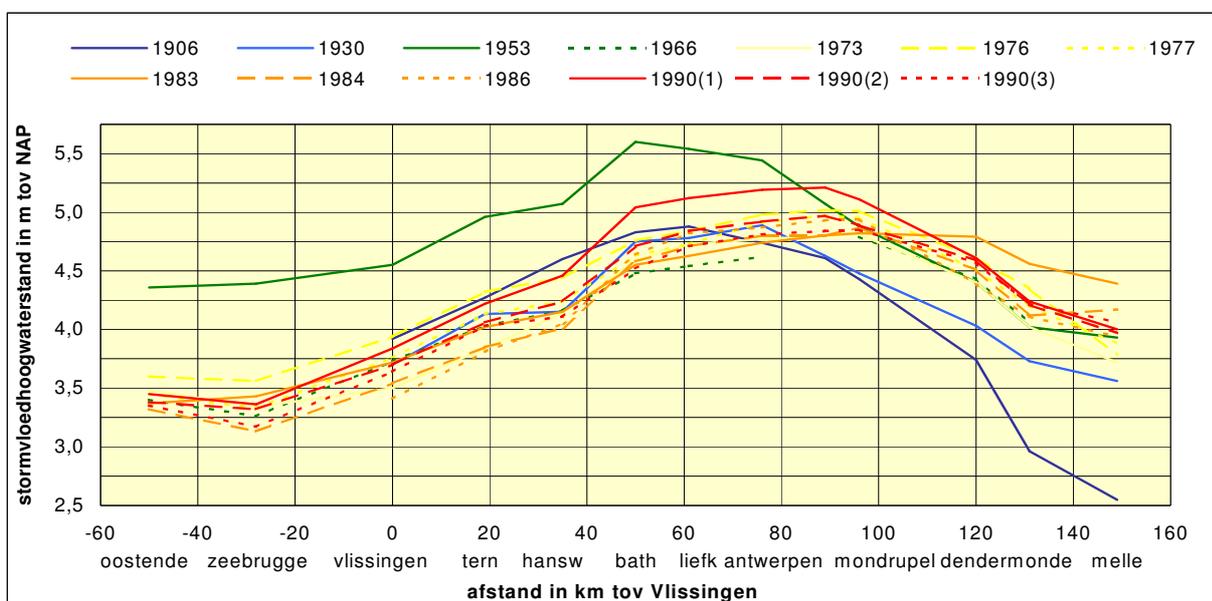


Het is uiterst waarschijnlijk dat ook de versterking van de stormvloed over dit traject veroorzaakt is door de verdiepingen van de drempels en de verruiming van de geulen in het kader van de samenhangende grote vaarwegverdieping in de jaren zeventig. De interpretatie dat het niet om een toevallige overeenkomende karakteristiek gaat van deze drie stormen, maar dat de oorzaak in de geometrie moet liggen wordt ondersteund door het gedrag van de stormen van 1990.

de stormvloed van 1990

Ook de stormvloed van 1990 ondergaan de grootste versterking over het traject Hansweert - Bath (fig. 5.17). De versterking is van gelijke orde als die van de stormvloed in de jaren tachtig, maar duidelijk groter dan die in de jaren daarvoor.

fig. 5.17
doordringing in het Schelde-estuarium van buitengewone stormvloed in 1990 (3x), vergeleken met de doordringing in de periode 1906-1986



De storm van 1990 kan een soort drielingstorm worden genoemd. Het gelijkvormige verloop van de drie "deel-stormvloed" wijst erop dat in het Schelde-estuarium ook bij enkelvoudige stormvloed van deze sterkte waarschijnlijk de weerstand afneemt door de grotere doorstroomprofielen, met grotere diepte/hydraulische straal en niet sterk verhoogde of mogelijk verlaagde watersnelheden. De verschillen in de versterking over de verschillende trajecten zijn gering. Als de andere in het begin van deze paragraaf beschreven mogelijkheid in het Schelde-estuarium zou optreden, namelijk dat door de sterk toenemende verticale en eventueel horizontale berging de watersnelheden en daarmee de demping door wrijvingsweerstand substantieel zou toenemen, zou dit tot uitdrukking komen in grotere verschillen in versterking tussen de eerste en de beide volgende stormvloed van 1990. Bij de eerste moest het estuarium "zich nog vullen"; bij de tweede en derde lagen de laagwaterstanden al op NAP-niveau.

samenvatting veranderingen doordringing van stormvloeden en vergelijking met het dagelijkse getij

- De ontwikkeling in de afgelopen eeuw van de doordringing van de stormvloeden in het estuarium vertoont hetzelfde beeld als de ontwikkeling van de doordringing van het dagelijkse getij. Afgezien van de zeespiegelstijging zijn alle significante oorzaken van de veranderingen in het dagelijkse getij ook te herkennen in de ontwikkeling van de doordringing van stormvloeden.
- Over de hele periode 1906 – 1966 ligt van alle stormvloeden de hoogste hoogwaterstand bij Antwerpen of zeewaarts ervan. Tot 1940 was dit ook het geval met de hoogste hoogwaterstand van het dagelijkse getij. In de periode 1940 – 1970 verschuift deze top echter naar de Rupelmonding, als gevolg van zeespiegelstijging en verruiming. De stormvloedstanden nemen landwaarts van Antwerpen en op de Boven-Zeeschelde vooral over deze periode wél doorgaand toe.
- Met de stormen van 1973, 1976 en 1977 verschuift de plaats met de hoogste stormvloedstanden zich nu ook naar de Rupelmonding. Evenals bij het dagelijkse getij is met name de versterking op de Beneden-Zeeschelde vanaf het grensgebied toegenomen, als gevolg van de in dit gebied rond 1970 uitgevoerde verdiepingen met enkele meters.
- Ook de stormvloeden van 1983, 1984, 1986 en 1990 leveren de hoogste stormvloedstanden nabij de Rupelmonding. Het verschil met de stormen in de vroege jaren zeventig is dat de versterking in het oostelijke deel van de Westerschelde sterker is geworden, wat evenals bij het dagelijkse getij moet worden toegeschreven aan de verruiming in het kader van de algehele verdieping van de vaarweg in de jaren zeventig.

6. Analyse van het Scheldegetij uit simulaties met de harmonische methode

6.1. de inhoud van dit hoofdstuk

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van een aantal kwantitatieve analyses van het Scheldegetij, die zijn uitgevoerd met op de harmonische methode gebaseerde rekenmodellen en formuleringen. De gebruikte rekenmodellen zijn de in paragraaf 4.4 beschreven modellen HARMSCHELDE65 en -95. Dit zijn ééndimensionale simulatiemodellen in EXCEL van het Scheldegetij met bodemschematisaties van respectievelijk 1964/1965 en 1996. Het model strekt zich ruimtelijk uit van de monding van het Scheur tot Rupelmonde. In paragraaf 6.2 worden de resultaten gepresenteerd van op simulaties van dootij, gemiddeld tij en springtij gebaseerde analyses van het getij in de huidige situatie. In paragraaf 6.3 komen de resultaten aan de orde van simulaties en analyses van de ontwikkelingen in het verleden. Onderzocht werden de veranderingen in de getijversterking bij gemiddeld getij, zoals beschreven en kwalitatief geanalyseerd in paragraaf 5.4, aan de hand van de geometrieën van ongeveer 1965 en 1995. Als niet-lineaire effecten worden in paragraaf 6.4 de resultaten van de analyses van de vaak besproken middenstandsveranderingen bij Bath en de opmerkelijk abrupte verlaging van de laagwaterstanden in het oostelijke deel in het midden van de zeventiger jaren besproken.

6.2. Analyse van het getij in de huidige situatie

de uitvoering van de simulaties met HARMSCHELDE

Met HARMSCHELDE95 zijn simulaties uitgevoerd van het getij in het Schelde-estuarium vanaf het zeegebied voor de monding van het Scheur tot ongeveer de mond van de Durme. Zoals is aangegeven in paragraaf 4.4 mag aan simulatieuitkomsten van het mondingsgebied en van de Zeeschelde boven Antwerpen geen nauwkeurige kwantitatieve waarde worden gehecht. (bovendien is de monding nog niet echt afgeregeld) Het simulatiemodel rekent vanaf de zeezijde landinwaarts. Het berekende getij aan het landwaartse einde van een sectie, amplitude en nulfase van waterstandsuitwijking en debiet, is de beginwaarde voor de berekening van de volgende sectie. Ingevoerd zijn alleen beginwaarden in het zeegebied voor de monding van het Scheur, lokatie Wandelbaar, en in Vlissingen. De berekende waarde aan het landwaartse eind van de laatste sectie in het mondingsgebied is niet doorgekoppeld als beginwaarde van de volgende bij Vlissingen beginnende sectie. Vanaf Vlissingen is wél de gehele berekening doorgekoppeld tot aan het begin van de Boven-Zeeschelde.

simulaties en analyse van het getij medio 1996

Het getij is gesimuleerd bij de geometrie van medio 1995 van het gebied vanaf het zeegebied voor de monding van het Scheur tot ongeveer de mond van de Durme op de Boven-Zeeschelde.

Afgezien van een profiel over Middelgat/Gat van Ossensisse, dat aanvankelijk juist over de diepste putten van beide geulen lag, is de primair ingevoerde geometrie naar aanleiding van de simulatieresultaten niet meer gewijzigd. Omdat het gaat om de processen en interacties in grote lijnen en niet om een nauwkeurige kwantitatieve simulatie is de Manning-coëfficiënt over het gehele gebied gelijk gehouden en wel op 0,0250. Een goede simulatie van het doot-, gemiddeld- en springtij bleek mogelijk met de voor Vlissingen ingevoerde in tabel 6.1 weergegeven slotgemiddelde amplituden, maximale

debieten en faseverschillen tussen horizontaal en verticaal getij. De slotgemiddelde waterstandsamplitude is een gegeven waarde die is vastgehouden. Met de amplitude van

tabel 6.1

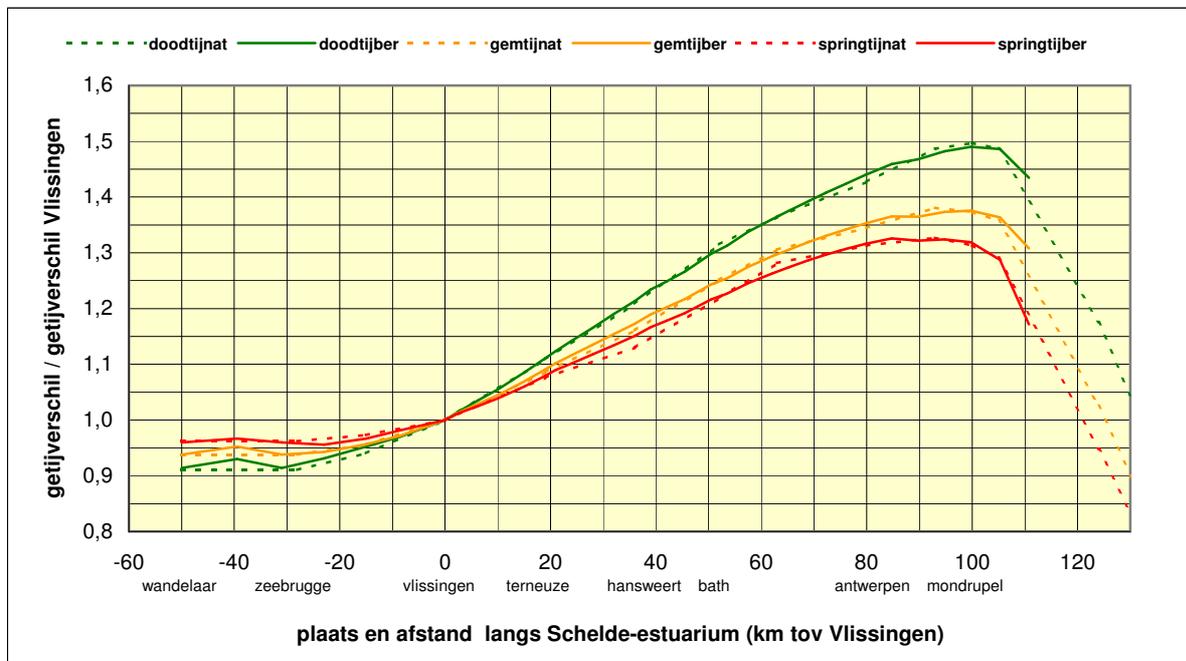
ingevoerde / berekende waarden dood-, gemiddelde en springtij 1995 en gemiddeld tij 1965 in / met HARMSCHELDES

het debiet en het faseverschil tussen waterstandsuitwijking en debiet in Vlissingen werd vervolgens het verloop langs het estuarium van amplituden en fasen van waterstandsuitwijking en debiet "gefit" aan eventueel bekende waarden langs het systeem.

	Doodtij	gemiddeld getij	gemiddeld getij	springtij
	1995	1965	1995	1995
Vlissingen				
Amplitude waterstand	1,51	1,93	1,93	2,24
Maximum debiet	65300	79300	80500	91450
faseverschil debiet-waterst	73	67	71	70
Amplitude inlopende golf	1,15	1,61	1,50	1,76
Amplitude teruglopende golf	0,64	0,77	0,76	0,85
faseverschil inl.g. – terugl.g.	68	77	67	66
Terneuzen				
Amplitude waterstand	1,68	2,09	2,10	2,42
Maximum debiet	40500	49100	49400	55670
faseverschil debiet-waterst	74	69	72	72
Amplitude inlopende golf	1,18	1,61	1,51	1,75
Amplitude teruglopende golf	0,72	0,84	0,85	0,95
faseverschil inl.g. – terugl.g.	57	67	56	56
Hansweert				
Amplitude waterstand	1,83	2,25	2,26	2,60
Maximum debiet	23700	28500	28600	32000
faseverschil debiet-waterst	77	68	75	76
Amplitude inlopende golf	1,42	1,96	1,81	2,09
Amplitude teruglopende golf	0,71	0,71	0,83	0,93
faseverschil inl.g. – terugl.g.	66	75	67	68
Bath				
Amplitude waterstand	1,98	2,37	2,42	2,75
Maximum debiet	11330	13700	13500	14800
faseverschil debiet-waterst	75	70	74	75
Amplitude inlopende golf	1,41	1,84	1,77	2,00
Amplitude teruglopende golf	0,76	0,72	0,88	1,00
faseverschil inl.g. – terugl.g.	51	50	51	51
Antwerpen				
Amplitude waterstand	2,17	2,46	2,61	2,95
Maximum debiet	4080	4800	4800	4810
Faseverschil debiet-waterst	67	74	66	66
Amplitude inlopende golf	1,68	2,32	2,06	2,23
Amplitude teruglopende golf	0,72	0,83	0,81	0,94
Faseverschil inl.g. – terugl.g.	55	90	55	47
mond Rupel				
Amplitude waterstand	2,24	2,70	2,65	2,97
Maximum debiet	2470	2880	2900	2700
faseverschil debiet-waterst	66	97	66	60
Amplitude inlopende golf	1,64	1,78	1,98	2,09
Amplitude teruglopende golf	0,73	1,25	0,83	0,95
faseverschil inl.g. – terugl.g.	41	54	42	29

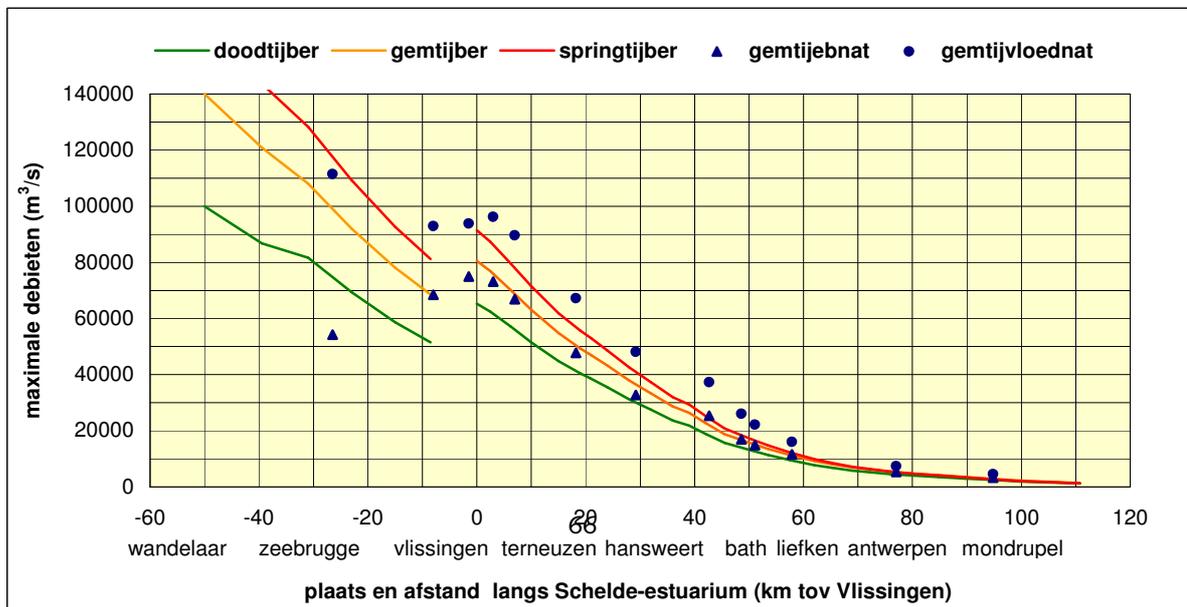
Voor een aantal relevante lokaties zijn de berekende waarden opgenomen in tabel 6.1. In deze tabel zijn ook de waarden voor de simulatie van 1964 bij gemiddeld getij met HARMSCHELDE65 opgenomen. De tabel bevat de waarden voor de berekende inlopende en teruglopende golven waaruit volgens deze rekenwijze de resulterende golf ter plaatse is samengesteld. Alle waarden na de ingevoerde waarden voor Vlissingen in de eerste drie regels in deze tabel zijn dus berekende waarden met de beide modellen.

fig. 6.1
simulaties getijversterking dood-, gemiddeld en springtij 1995 met HARMSCHELDE95



De versterking van het getijverschil ten opzichte van het getij in Vlissingen bleek goed te simuleren (fig. 6.1). De simulaties vertonen kleine afwijkingen ten opzichte van het in de natuur optredende getij. (mondingsgebied is nog niet serieus gefit, evenals 1965 boven Antwerpen). De verschillen tussen simulatieuitkomsten en natuur zijn klein ten opzichte van de onderlinge verschillen tussen dood-, gemiddeld- en springtij in de natuur, behalve voor gemiddeld en springtij over een deel van de Westerschelde.

fig. 6.2
simulaties maximale debieten dood-, gemiddeld en springtij 1995 met HARMSCHELDE95

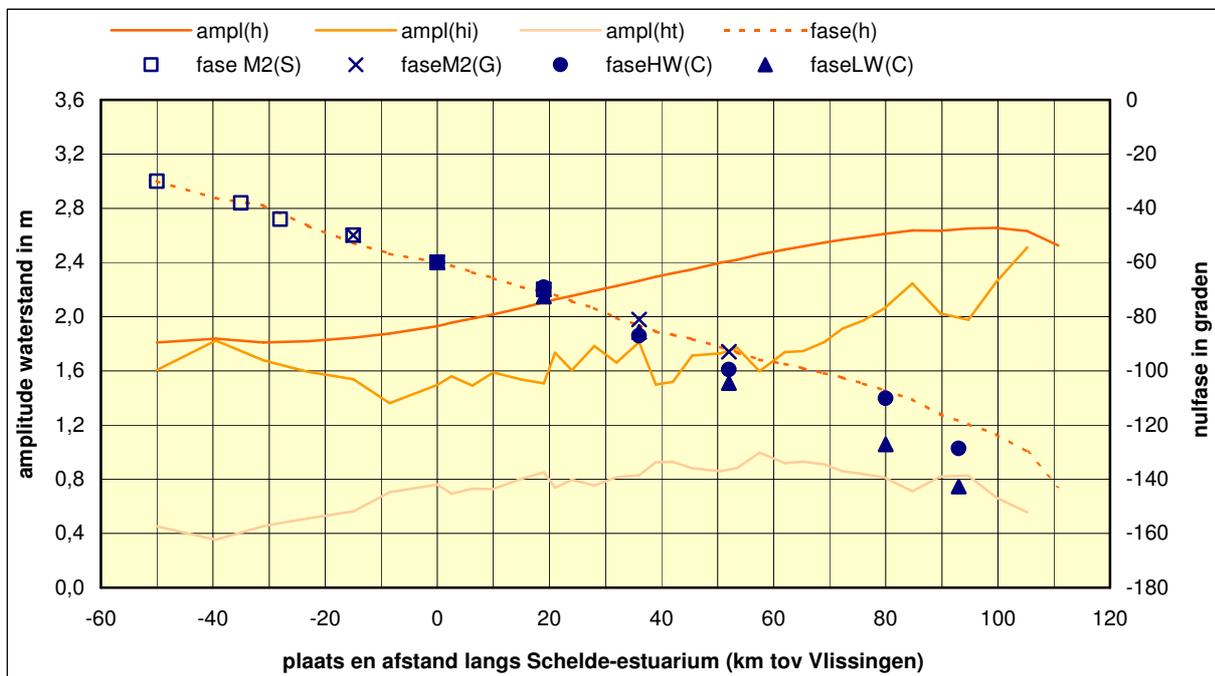


Voor deze beide simulaties ligt de berekende lijn iets te hoog. Dit verschil ontstaat al direct bij Vlissingen en is het gevolg van een nog niet optimale schematisatie van de geometrie ter plaatse. In figuur 6.2 is het verloop van de amplitude van het debiet, of wel het maximale debiet, opgenomen, met de meetwaarden van maximale eb- en vloeddebieten bij gemiddelde getij. De berekende waarden liggen in het algemeen rond de waarden van de ebdebieten in de natuur.

Het nulfaseverloop van de waterstandsuitwijking van de resulterende getijgolf bij gemiddeld getij is vergeleken met het faseverloop van de M2-component uit harmonische analyses van Svasek(1997-II) en Gerritsen(1998) en de naar faseverschillen omgerekende vertraging ten opzichte van Vlissingen van de hoogwaters en laagwaters volgens Claessens & Meyvis (1994) (fig. 6.3). In het Mondingsgebied en de Westerschelde komt het gesimuleerde faseverloop goed overeen met de het faseverloop van het M2-getij. Over de Westerschelde tot en met Hansweert is dit ook het geval voor de hoog- en laagwaters. Vanaf de grens gaan vooral de laagwaters sterker vertragen. Dit zijn de ondiepwater effecten die niet tot uitdrukking kunnen komen in deze lineaire benadering. De weergegeven fasegegevens van M2 en HW's en LW's zijn in tabelvorm eerder gepresenteerd in de paragrafen 5.3 en 5.4.

De amplitude van de "teruglopende golf" heeft een substantiële waarde over het hele estuarium (fig. 6.3).

fig. 6.3
simulaties verloop amplituden inlopende en teruglopende golf en amplitude- en faseverloop resulterende golf bij gemiddeld getij met HARMSCHELDE; faseverloop vergeleken met optredende getij

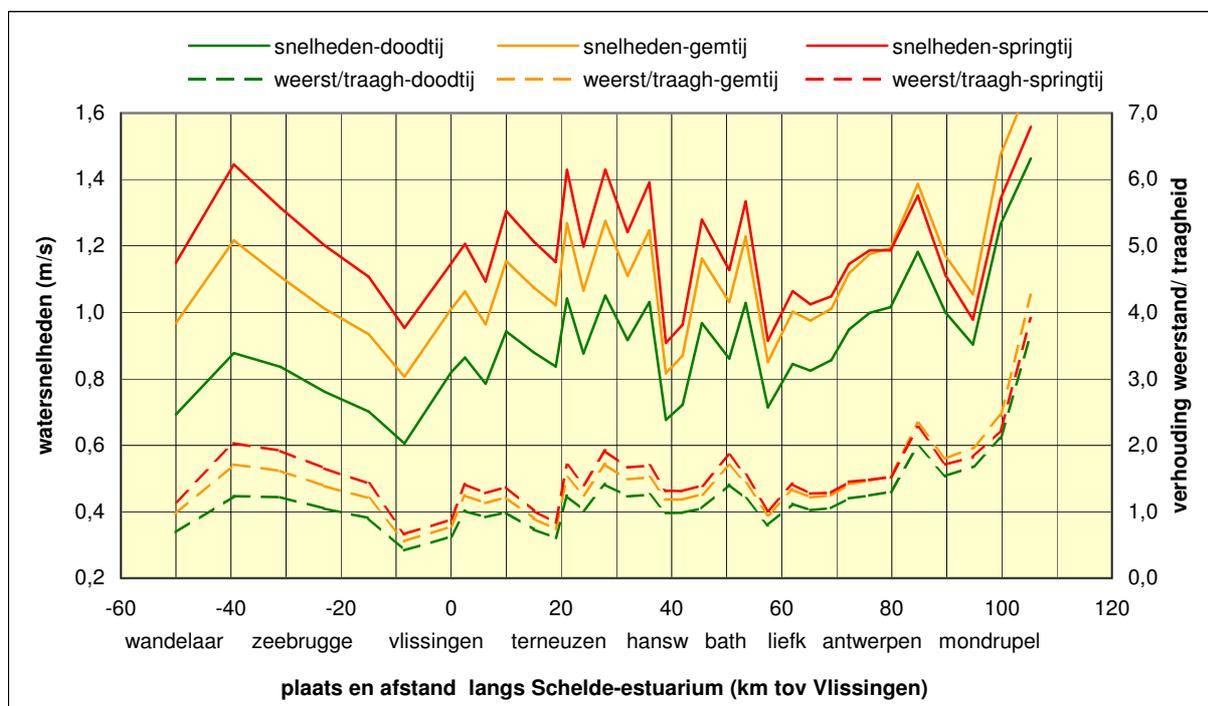


Op de Westerschelde loopt volgens de simulatie het debiet rond 75^o vóór op de waterstandsuitwijking (fig. 6.5). Dit betekent dat de getijgolf sterk afwijkt van een zuivere lopende golf, of wel dat er een substantiële reflectie optreedt, zoals in algemene zin is beschreven in de paragrafen 3.4 en 3.5. Verschillen in de getijvoortplanting in het estua-

rium tussen dood-, gemiddeld- en springtij worden in eerste orde bepaald door de verschillen in debieten en watersnelheden die in het estuarium optreden als gevolg van de aan de mond opgelegde van doortij naar springtij toenemende amplitude van de waterstands-uitwijking. De verschillen in debieten en watersnelheden veroorzaken verschillen in de verhouding weerstand/traagheid, of wel in de relatieve weerstand, waardoor zowel de demping als de reflectie kan worden beïnvloed.

Opmerkelijk voor Westerschelde en vooral Beneden-Zeeschelde is het relatief kleine verschil in watersnelheden tussen gemiddeld getij en springtij en de sterke afname van dit verschil in de Bocht van Bath en de Beneden-Zeeschelde. (*Realiteit moet nog nader worden getoetst aan (schaarse?) natuurgegevens*). Het verschil in de verhouding weerstand / traagheid tussen gemiddeld getij en springtij wordt vanaf de grens op de Beneden-Zeeschelde heel klein (fig. 6.4).

fig. 6.4
simulaties watersnelheden en verhouding
weerstand / traagheid bij dood-, gemiddeld
en springtij, met HARMSCHELDE95



Tussen doortij enerzijds en gemiddeld en springtij anderzijds bestaat er in dit gebied wel een significant verschil in de verhouding weerstand / traagheid. Deze verschillen komen tot uitdrukking in de in eerste orde de getijvoort-planting bepalende factoren als de dempingsconstante en de "reflectiefactor" $Bx\cos(d)$ (fig. 6.5). De dempingsconstante bepaalt volgens de harmonische benadering de relatieve demping van de amplitude van de waterstands-uitwijking van een enkelvoudige lopende golf. De verandering van de "reflectiefactor" bij een relatief abrupte dwarsprofielverandering bepaalt de reflectie- en de transmissiecoëfficiënt van een enkelvoudige lopende golf. De weerstands-/traagheidsverhouding bevindt zich op de Beneden-Zeeschelde in een gevoelig traject van de invloed van de niet-lineaire wrijvingsweerstand. Relatief kleine veranderingen in de geometrie ter plaatse of in de water-snelheden ter plaatse door geometrieveranderingen elders hebben snel significante invloed op de getijvoortplanting.

Dit blijkt vooral ook uit de variaties in het verleden van vooral het verloop van de laagwaterstanden. Markant is de relatie tussen en het verschillende gedrag van het grensgebied, het deel van de Beneden-Zeeschelde zeewaarts van Antwerpen en het deel landwaarts (par. 5.5, 6.2).

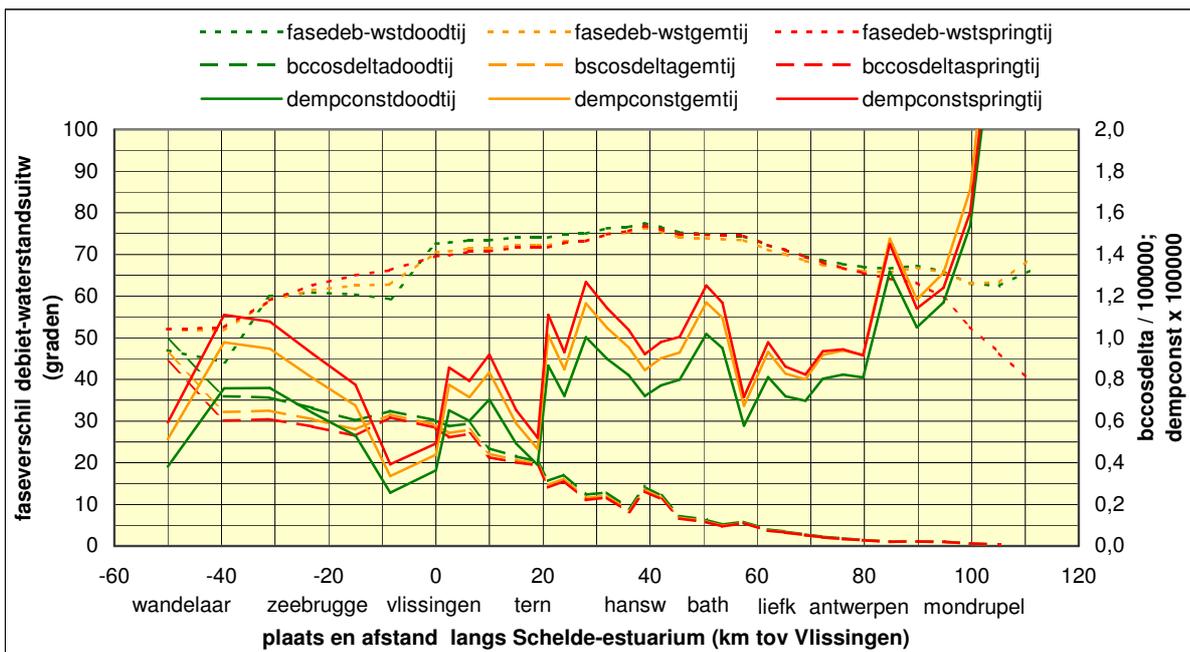
6.3. Analyse van opgetreden veranderingen in het getij

veranderingen van het getij in de afgelopen eeuw en mogelijke oorzaken

De meest duidelijke veranderingen van het getij in het verleden zijn de doorgaande toename in de afgelopen eeuw van de versterking van zowel het dagelijkse getij als van de hoogwaterstanden bij stormvloed. Deze ontwikkeling is beschreven in paragraaf 5.6. Naast een doorgaande trend gedurende de gehele eeuw zijn ook perioden te onderscheiden waarin plaatselijk de veranderingen sterker zijn. Waarschijnlijke oorzaken zijn de stijging van de zeespiegel, de nog beperkte baggerwerken in de eerste helft van de twintigste eeuw, de morfologische veranderingen in het middengebied in de decennia rond het midden van de twintigste eeuw, de omvangrijke onttrekkingen van sediment aan het meest zeewaartse deel van de Beneden-Zeeschelde rond 1970 en de algehele

samenhangende verdieping van de vaarweg in de jaren zestig en zeventig. In deze paragraaf is in eerste instantie de resulterende invloed van de ingrepen en veranderingen in de afgelopen halve eeuw op het getij onderzocht door simulaties en vergelijking van het getij bij de bodemliggingen van 1964 en 1996.

fig. 6.5
simulaties faseverschil debiet – waterstands-
uitwijking van resulterende golf en van enkele
lopende golf (delta) bij dood-, gemiddeld en
springtij volgens HARMSCHELDE95



geometrie veranderingen tussen 1965 en 1995

Tussen 1965 en 1990 is de bodemligging van vooral Westerschelde en Beneden-Zeeschelde significant veranderd. In het middengebied was in 1965 de al in de eerste helft van de twintigste eeuw begonnen verondieping van het Middelgat nog steeds gaande. Vanaf 1970 kreeg na enig baggerwerk in de Overloop van Hansweert het Gat van Ossensisse de functie van hoofdvaarwater. Rond 1965 werd met het verdiepen van de drempel van Bath begonnen aan de voorlaatste grote verdieping van de hoofdvaargeul in het Schelde-estuarium. Het omlaagbrengen van de drempels naar een grotere onderhoudsdiepte duurde tot rond 1975. Aangenomen wordt dat de morfologische

aanpassingen van de aanliggende geulen voortduurden tot in de loop van de tachtiger jaren. Tussen 1967 en 1974 werden grote hoeveelheden sediment onttrokken aan de Beneden-Zeeschelde (Technische Schelde-commissie, 1984; Uit den Boogaerd, 1995), waardoor het deel zeewaarts van Antwerpen met enkele meters verdiepte. Tussen 1967 en 1970 werd de leidam over de Ballastplaat aangelegd waardoor het Vaarwater boven Bath sterk versmalde en aanzienlijk dieper werd (zie ook par. 6.3).

de simulaties met HARMSCHELDE65 en -95

Het slotgemiddelde gemiddelde getij 1981-1990 is gesimuleerd met het HARMSCHELDE95-model dat de bodemligging van 1995/1996 bevat. Met het HARMSCHELDE65-model zijn simulaties uitgevoerd van de getijvoortplanting bij de bodemligging van rond 1964/1965 met het slotgemiddelde getij 1951/1960 als randvoorwaarde. Met beide modellen kon met de ingevoerde bodemliggingen het in de betreffende perioden in de natuur optredende getij goed worden benaderd (fig. 6.6). Gesimuleerd is het getij in het gebied tussen Vlissingen en Antwerpen. Vanaf het gebied boven Antwerpen werkt de benadering minder goed vanwege het sterker wordende niet-lineaire karakter van het getij en door de significant wordende, niet in de benadering meegenomen invloed van de rivierafvoer.

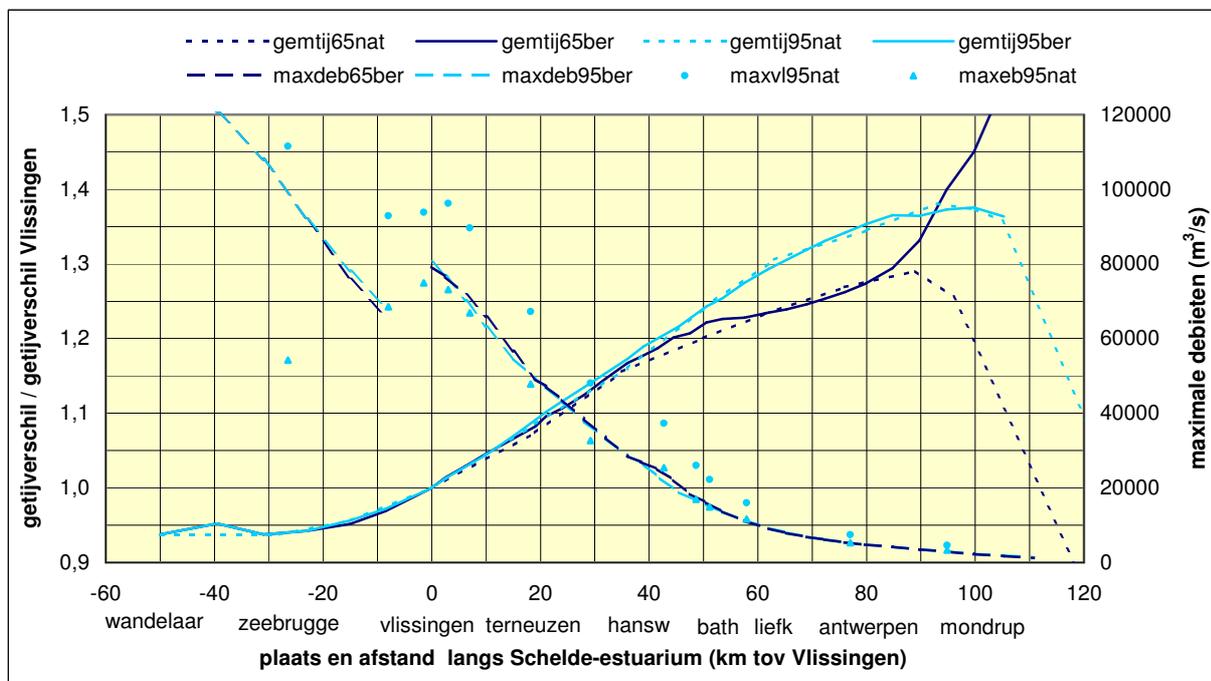


fig. 6.6
simulaties Scheldegetij 1965 en 1995 voor
gemiddeld getij met HARMSCHELDE65/95

de veranderingen van het gemiddelde getij tussen 1965 en 1995

Tussen 1965 en 1995 zijn de voor de getijvoortplanting relevante geometrische karakteristieken van het gebied duidelijk veranderd (fig. 6.7). Significante veranderingen zijn de resulterende afname van de diepte en daarmee de hydraulische straal in het middengebied, tussen Terneuzen en Hansweert, de toename ervan in het oostelijke deel van de Westerschelde en de zeer sterke toename in de Beneden-Zeeschelde beneden Antwerpen. Vanaf het middengebied van de Westerschelde tot landwaarts van Antwerpen zijn

fig. 6.7
 veranderingen 1965-1995 diepte / hydraulische straal, doorstroombroef en met HARMSCHELDES gesimuleerde snelheden

de watersnelheden afgenomen. De oorzaken verschillen voor enerzijds het middengebied en anderzijds het oostelijke deel, grensgebied en Beneden-Zeeschelde.

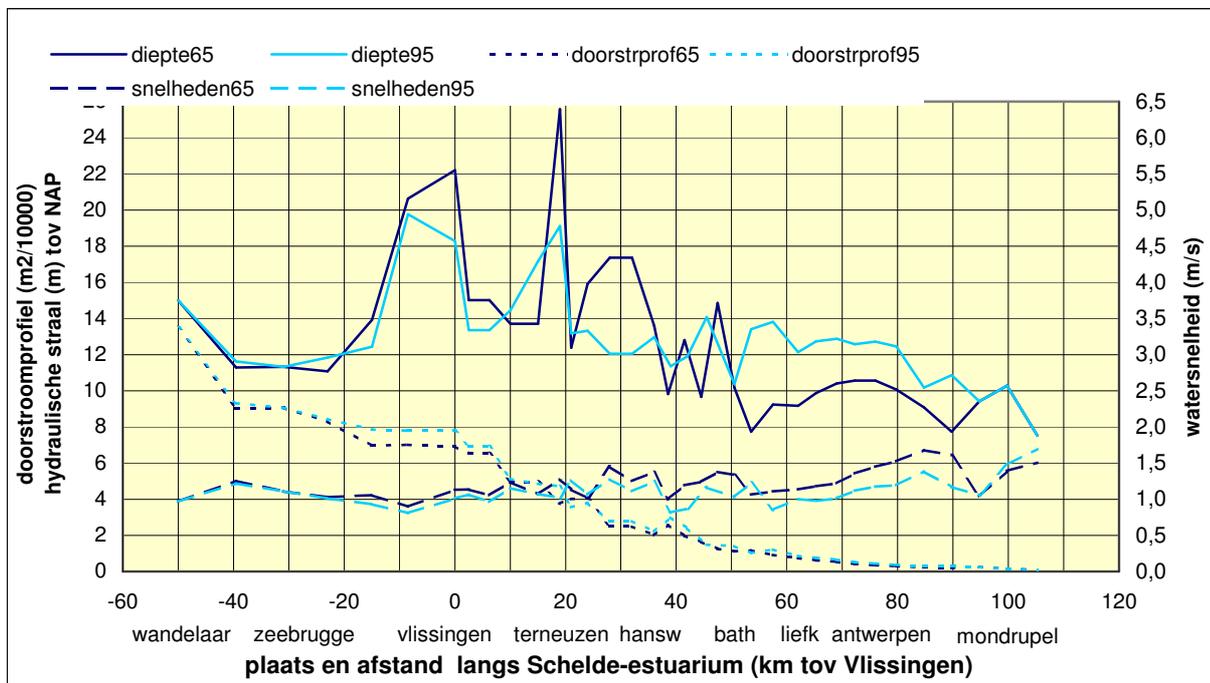
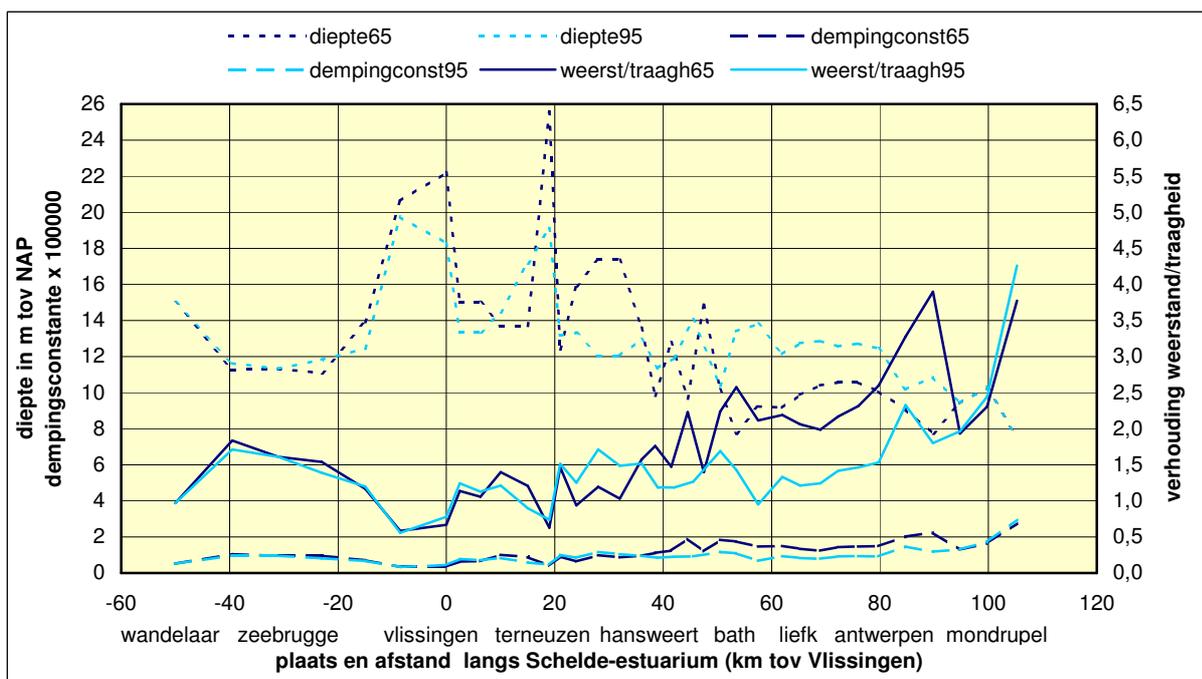


fig. 6.8
 veranderingen 1965-1995 van diepte / hydraulische straal en met HARMSCHELDES gesimuleerde veranderingen van dempingsconstante en golfgetal

In het middengebied is de verhouding weerstand / traagheid toegenomen (fig. 6.8), of wel de relatieve weerstand, door de sterk afgenomen diepte / hydraulische straal in vooral het Middelgat (fig. 6.7).



Omdat het totale doorstroomprofiel groter werd, mede door de door baggeren bevorderde verruiming van de Overloop van Hansweert, bleven de (maximale) debieten bij de afgenomen snelheden op hetzelfde niveau. Landwaarts van het midden-gebied zijn de watersnelheden overal afgenomen door de verruimingen. Hier nam door zowel de grotere diepte/hydraulische straal als door de lagere watersnelheden de relatieve weerstand sterk en daarmee de demping sterk af, waardoor de getijversterking tussen 1965 en 1995 sterk toenam. Deze ontwikkeling werd ook beschreven in paragraaf 5.5. De toename van het getijverschil landwaarts van het middengebied is waarschijnlijk ook de oorzaak van het niet significant afnemen van de debieten in het middengebied, ondanks de toegenomen weerstand daar. Het voorgaande wordt ook inzichtelijk geïllustreerd in het verloop van de dempingsconstante. De dempingsconstante bepaalt de relatieve afname van de amplitude van een enkele lopende golf door de wrijvingsweerstand en wordt op haar beurt bepaald door de relatieve weerstand. In het middengebied neemt de dempingsconstante toe door de sterk afgenomen hydraulische straal. Over het hele landwaarts gelegen deel van het estuarium tot boven Antwerpen neemt ze af door de grotere hydraulische straal en de lagere watersnelheden.

Over de Westerschelde, het grensgebied en een deel van de Beneden-Zeeschelde is over 1965 - 1995 het faseverschil tussen waterstandsuitwijking en debiet toegenomen (fig. 6.9). Dit wijst op een verdere verschuiving in de richting van een staande golfbeweging en is consistent met de beschreven toename van de getijversterking over een groot deel van het estuarium. In de in deze paragraaf gepresenteerde resultaten is relatief veel aandacht besteed aan de kwantitatief meest opvallende veranderingen van geometrie en waterstandsamplitude op de Beneden-Zeeschelde. Bij het uitvoeren van de simulaties is gebleken dat op dezelfde manier ook de opgetreden amplitude- en faseveranderingen op de Westerschelde zichtbaar gemaakt kunnen worden. Met name is het mogelijk en inzichtvergroten om de invloeden van de geometrieveranderingen in middengebied, drempel van Hansweert, oostelijke deel Westerschelde en de bocht van Bath en Beneden-Zeeschelde afzonderlijk te simuleren en analyseren

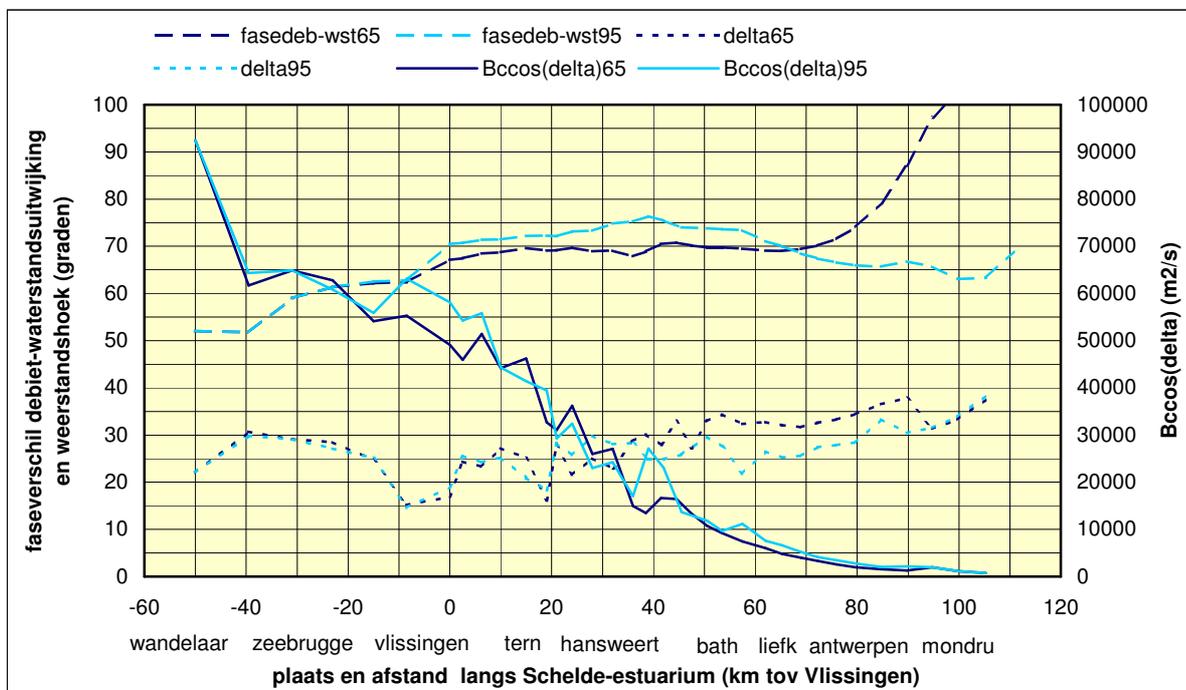


fig 6.9
veranderingen 1965-1995 faseverschil tussen
debiet en waterstandsuitwijking, reflectie-
factor en weerstandshoek, gesimuleerd met
HARMSCHELDE96/95

6.4. Benaderingen van niet-lineaire invloeden

een benadering voor het middenstandsverhang

In het oostelijke deel van de Westerschelde bij Bath en op de Beneden-Zeeschelde treden duidelijke middenstandsverhangen op, die in het verleden significante variaties vertoonden. Middenstandsverhangen treden op als hoog- en laagwaterstanden ruimtelijk verschillend veranderen. Een middenstand ongelijk nul kan onder andere ontstaan door de verschillende invloed van de weerstand bij hoog- en laagwater. Battjes (2001) noemt dit één van de geometrische niet-lineariteiten in ondiep-water getijdegebieden, ter onderscheid van de niet-lineaire effecten die voortkomen uit de niet-lineaire termen in de bewegings-vergelijkingen. Stroom en waterstand zijn deels in fase: de (maximale) vloedstroom treedt meestal op bij hogere waterstanden dan de (maximale) ebstroom. Tijdens de vloed zijn daardoor de waterdiepten en doorstroom-profielen gemiddeld groter dan in de ebfase, waardoor een asymmetrie ontstaat tussen vloed- en ebfase. Door de grotere snelheden en kleinere diepte is bij eb het weerstandsverhang, evenredig met U^2/d , groter dan bij vloed, waardoor de middenstand naar binnen toe oploopt. Battjes (2001) geeft een benaderende formule voor het middenstandsverhang door weerstand, onder andere gebruik makend van formuleringen volgens de harmonische benadering.

$$\frac{\overline{dh_w}}{dx} = \frac{4}{\Pi} \left[c_f \frac{\hat{U}^2}{gd_o} \right] \frac{\hat{\zeta}}{d_o} \cos(\alpha - \beta)$$

In de formule zijn drie invloeden herkenbaar:

- Het deel tussen de haken is het weerstandsverhang voor een eenparige stroming met snelheid U .
- De volgende term, de verhouding tussen de amplitude van de waterstandsuitwijking en de waterdiepte, brengt (verborgen) de asymmetrie tussen eb- en vloedfase tot uitdrukking.
- De laatste term, die afhankelijk is van het faseverschil tussen horizontaal en verticaal getij, brengt tot uitdrukking dat de asymmetrie groter wordt naarmate de voor de weerstand bepalende hogere stroomsnelheden dichter bij de hoog- en laagwaterstanden optreden.

Met de benaderende formule zijn een aantal berekeningen uitgevoerd voor de Bocht van Bath en het Vaarwater boven Bath (tabel 6.4). Kwalitatief geven de berekeningen een goede indruk van de verschillen in middenstandsverhangen tussen dood-, gemiddeld en springtij en de oorzaken van de variaties in de middenstandsverhangen bij de ontwikkeling van de geometrie tussen van 1965 en 1995, zoals beschreven in paragraaf 5.5. De verschillen tussen dood-, gemiddeld- en springtij worden vooral bepaald door de verschillen in water-snelheden, die de sterkte van de weerstand beïnvloeden, en de verhouding tussen de amplitude van de waterstandsuitwijking en de waterdiepte. De verschillen tussen 1965 en 1995 voor gemiddelde getij worden in de Bocht van Bath naast de kleinere diepte vooral bepaald door de hogere watersnelheden in 1965, waardoor de weerstand aanzienlijk groter was. Naast het directe effect hiervan had de getijbeweging wat meer het lopende karakter van een dempende getijgolf, met een kleiner faseverschil tussen waterstandsuitwijking en stroom, wat de asymmetrie versterkte. In het Vaarwater boven Bath wordt het verschil in weerstand en middenstandsverhang meer uitsluitend bepaald door de veel kleinere waterdiepte in 1965. In 1967 is hier de leidam over de Ballastplaat aangelegd, waardoor de geometrie hier ingrijpend veranderde. Dit is de oorzaak van het zeer grote verschil in bepalende waterdiepte in dit gebied.

	doodtij 1995		Gemiddeld getij 1965		gemiddeld getij 1995		springtij 1995	
	BochtvB	VaarwbB	BochtvB	VaarwbB	BochtvB	VaarwbB	BochtvB	VaarwbB
	invloed sterkte van de weerstand							
weerstandsfactor c_f	0,0028	0,0026	0,0028	0,0031	0,0028	0,0026	0,0028	0,0026
Snelheid U	0,86	1,03	1,32	1,06	1,03	1,23	1,13	1,33
diepte d_0	9,3	12,6	8,1	6,8	9,3	12,6	9,3	12,6
	2,27	2,23	6,14	5,22	3,25	3,18	3,91	3,72
	invloed verhouding waterstandsamplitude / diepte							
amplitude waterstand	1,96	1,98	2,36	2,37	2,40	2,42	2,72	2,75
amplitude / diepte	0.211	0.157	0.291	0.348	0.258	0.192	0.292	0.218
	invloed faseverschil verticaal horizontaal getij							
beta-alpha	75	75	70	70	74	74	75	75
$\cos(b - a)$	0,259	0,259	0,342	0,342	0,276	0,276	0,259	0,259
	Berekend middenstandsverhang in cm / km							
middenstandsverhang	0.12	0,11	0,78	0,79	0,29	0,21	0,38	0,27
	vergelijkingen tussen berekening en natuur							
middenstandsversch. Hansw-Bath, 16 km, ber			12,5 cm	12,6 cm	4,6 cm	3,4 cm		
middenstandsversch. Hansw-Bath, 16 km, nat			16 cm (1961-1970)		10 cm (1981-1990)			
middenstandsversch. bath-Liefk, 11 km, ber			8,6 cm	8,7 cm	3,2	2,3		
middenstandsversch. Bath-Liefk, 11 km, nat			5 cm (1961-1970)		0 cm (1981-1990)			

tabel 6.4

benaderende berekening middenstandsverhang omgeving van Bath

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1. conclusies

- Met een kwalitatieve, fysische gerichte benadering, gebaseerd op natuurwaarnemingen (hoofdstuk 5) en eenvoudige, inzichtelijke simulatiemodellen (hoofdstuk 6) is het mogelijk het inzicht in het Scheldegetij significant te verbeteren. Met name de harmonische benadering verschaft hiertoe goede mogelijkheden.
- Met de toegepaste benadering zijn met name de ingrepen in het Schelde-estuarium ten behoeve van het vaarwegbeheer als dominante oorzaken herkenbaar in de ontwikkeling van het dagelijkse getij in de afgelopen eeuw (par. 5.5.1). Deze conclusie wijkt ten aanzien van dit aspect sterk af van de conclusies in meerdere publicaties, waarop mede de actuele discussies rond het Schelde-estuarium zijn gebaseerd.
- In de afgelopen eeuw zijn de getijdoordringing en het getijverschil vrijwel doorgaand toegenomen door vooral de zeespiegelstijging en beperkt baggerwerk in de eerste helft van de vorige eeuw, de intensivering van de baggerwerken na de tweede wereldoorlog, de grootschalige onttrekkingen en verdiepingen van de Beneden-Zeeschelde rond 1970 en de algehele vaarwegverdieping in vooral het oostelijke deel van de Westerschelde en het grensgebied (par. 5.5.1).
- De sterkste toename in de afgelopen eeuw van de getijslag tussen Bath en de Ruppelmonding, met zowel een sterke daling van de laagwaterstanden als een stijging van de hoogwaterstanden, trad op rond 1970 met de sterke verruiming van grensgebied en Beneden-Zeeschelde zeewaarts van Antwerpen (par. 5.5.1).
- Met de algehele verdieping van de vaarweg in de jaren zeventig nam vervolgens de getijversterking over het oostelijke deel en het grensgebied toe, met als gevolg een vergroting van de getijslag over de hele Zeeschelde (par. 5.5.1).
- De toename van de doordringing van stormvloed en heeft hetzelfde patroon als die van het dagelijkse getij en kan vrijwel geheel aan dezelfde geometrieveranderingen door ingrepen worden toegeschreven (par. 5.5.2). Deze conclusie wijkt in nog sterkere mate af van de conclusies in eerdergenoemde actuele publicaties dan die ten aanzien van de oorzaken van de toename van de doordringing van het dagelijkse getij.

7.2. aanbevelingen

- Voor het fysisch inzicht in de getijbeweging in gebieden zoals het Schelde-estuarium is het goed zich steeds een voorstelling te maken van het momentane, ruimtelijke verloop van de waterbeweging. Het denken in getijgemiddelde of anderszins geschematiseerde golfparameters werkt voor dit doel vaak versluitend of soms averechts.
- Het is dringend nodig, juist bij de beschikbaarheid van uitstekend werkende, nauwkeurige, meerdimensionale getijmodellen, de kennis en vaardigheden van eenvoudige benaderingen zoals de harmonische methode beschikbaar te houden.
- De kennis van en het inzicht in het Scheldegetij, relevant voor het vinden van oplossingen voor de actuele vragen, kan met name voor de Westerschelde substantieel worden uitgebreid door de in deze studie uitgevoerde simulaties uit te breiden met

onder andere simulaties en analyses van de "deelveranderingen" in de geometrie in de tweede helft van de vorige eeuw en van de veranderingen in het middegebied van de Westerschelde rond het midden van die eeuw.

- Aan de onderlinge ruimtelijke interacties tussen het getij in de verschillende delen van het estuarium op verschillende niveau's wordt meer recht gedaan door presentatie van het ruimtelijke verloop van getijkarakteristieken en eventueel de temporele veranderingen daarin, dan met afzonderlijke presentaties van eventuele veranderingen in lokale getijkarakteristieken.

Literatuur

- von Arx W.S., 1962.
An introduction to physical oceanography.
Contribution Number 1245, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts; ISBN 0-201-08174-1, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, Massachusetts, USA.
- Bakker W.T., de Vriend, H.J., 1995.
Resonance and morphological stability of tidal basins.
Marine Geology (p.5-18) 126, Elsevier.
- Battjes J.A., 1997.
Vloeistofmechanica.
Collegehandleiding Ctme2100, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Vloeistofmechanica, Delft.
- Battjes J.A., 2001.
Stroming in waterlopen.
Collegehandleiding CT3310, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Vloeistofmechanica, Delft.
- Blomme J., 2001
Het belang van de Scheldeverdieping: economische, juridische en politieke context, ecologische impact en veiligheidsaspecten.
Antwerp Port Authority, Antwerpen.
- Claessens J., L. Meyvis, 1994.
Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1981-1990.
Ministerie van de Vlaams Gemeenschap, Antwerpse Zeehavendienst.
- Cauwenberghe C. van, 1993
Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust: periode 1981-1990 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge.
Rapport nr. 40 van de Hydrografische Dienst der Kust, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Dienst der Kusthavens - Hydrografie, Oostende.
- Cauwenberghe C. van, 1999.
Relative sea level rise along the Belgian coast: Analysis and conclusions with respect to the high water, the mean sea and the low water levels.
Rapport nr. 46 van de Hydrografische Dienst, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Waterwegen Kust - Hydrografie, Oostende.
- Dronkers J.J., 1964.
Tidal computations, in rivers and coastal waters.
Uitg. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Dronkers J., 1986.
Tidal asymmetry and estuarine morphology.
Netherlands Journal of Sea Research (p.117-131) 20(2/3).
- Dronkers J., 1998
Morphodynamics of the Dutch Delta.
In Dronkers&Scheffers (ed.): Physics of Estuaries and Coastal Seas (p.297-304).
Uitg. Balkema, Rotterdam.

- Ferguson H.A., 1947.
 Inleiding tot de getijberekening.
 Geen nummer, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Gerritsen H., van den Boogaard H., 1998.
 Getijanalyse Westerschelde, Datarapport getijkomponenten, Toepassing Principal Component Analysis.
 Project Z2591, WL delft hydraulic, Delft.
- Gerritsen H., Wang Z.B., van der Weck A., 1999.
 Morfologische interpretatie van de veranderingen in het getij van de Westerschelde.
 Projectnr. Z2671, WL delft hydraulic, Delft.
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlayson B.L., 1992.
 Stream hydrology: an introduction for ecologists. ISBN 0-471-93084-9, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England
- Graas S., 2001.
 Verloop van het getijverschil over het Schelde-estuarium.
 Afstudeerrapport TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Hydrologie en Ecologie; onderzoek uitgevoerd bij Onderzoeks- en Adviesbureau Resource Analysis, Delft.
- Jallah A.N., Bakker W.T., 1994.
 Lorentz on PC.
 Inter. Rep. Coastal Genesis Project, TU Delft / Netherlands Centre for Coastal Research, Delft.
- de Jong H., 1989.
 Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932.
 Nota GWAO-89.1004, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg.
- Kalkwijk J.P.Th., 1976.
 De analyse van getijden.
 College "Getijden" (B75), Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, Delft.
- Lamb H., 1932.
 Hydrodynamics.
 Sixth Edition, Cambridge At The University Press, Cambridge (UK).
- Langendoen E.J., 1987.
 Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen.
 Rapport nr. 5-87, TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Vloeistofmechanica, Delft.
- de Looff A.P., Verhagen H.J., 1986.
 Mondingsgebied van de Westerschelde: -getijstromingen, -golfklimaatgegevens, -bodemplugging en morfologische processen.
 Nota GWWS-86.404, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg.
- Lorentz H.A., 1926.
 Verslag van de Staatscommissie Zuiderzee.
 Algemene Landsdrukkerij, 's-Gravenhage.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1985.
 Omgaan met water; naar een integraal waterbeleid.
 Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1989.
 derde Nota Waterhuishouding: Water voor nu en later.
 Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Parker B.B., 1991.
 The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review).
 In B.B. Parker (ed.): Tidal hydrodynamics (p.237-268), J. Wiley & Sons, New York.

- Peters, J.J., a.o., 2001.
Improving navigation conditions in the Westerschelde and managing its estuarine environment.
Expert Team appointed by the Port of Antwerp, Antwerpen.
- Prandle D., 1991.
Tides in estuaries and embayments (review).
In B.B. Parker (ed.): Tidal hydrodynamics (p.125-152), J. Wiley & Sons, New York.
- RIKZ, 1994.
Tienjarig overzicht 1981-1990: presentatie van afvoeren, waterstanden, watertemperaturen, golven en kustmetingen.
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, ISBN 90-369-0064-6, Den Haag.
- RIKZ, 1998.
Getijtafels voor Nederland 1999.
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, Rijkswaterstaat, Uitgave SDU, ISBN 90-120-8664-7, Den Haag.
- Savenije H.H.G., 2001.
A simple analytical expression to describe tidal damping or amplification.
Journal of Hydrology (p.205-215) 243, Elsevier.
- Schönfeld J.C., 1951
Propagation of tides and similar waves.
Proefschrift, Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf, 's-Gravenhage. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Bibliotheek (Den Haag), C-3041/512.
- Schönfeld J.C., 1955
Getijberekening door integratie langs karakteristieken.
Rapportnummer C.S.D. 55-14, Centrale Studiedienst, Rijkswaterstaat, Directie van de Waterstaat, 's-Gravenhage.
- Svasek, 1995.
Kust*2000, Definitiestudie Westerscheldemond.
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, nota RKZ-256, Den Haag.
- Svasek, 1997-I.
Getijanalyse Westerscheldemond, deel 1, project K2000*KOP.
Rapport 97428/1029, Svasek B.V., Rotterdam.
- Svasek, 1997-II.
Getijanalyse Westerscheldemond, deel 2, project K2000*KOP.
Rapport 97462/1029, Svasek B.V., Rotterdam.
- Svasek, 1997-III.
Oriëntatiefase getijreconstructie Westerscheldemond.
Rapport 97467/1034, Svasek B.V., Rotterdam.
- Svasek, 1998.
De rol van het getij in de morfologische ontwikkeling van de Westerscheldemond - een modelmatige onderbouwing - eindrapport getijreconstructie Westerscheldemond.
Project K2000*KOP. Rapport 98154/1034, Svasek B.V., Rotterdam.
- Taveniers, E., 1998.
Evolutie van het getij in het Zeescheldebekken.
WATER nr. 102, september/oktober 1998, blz. 304 – 308, ISSN 0770-7193, Wijnegem, België.
- Technische Schelde Commissie, 1984.
Verdieping Westerschelde, studierapport programma 48'/43'.
Subcommissie Westerschelde, Antwerpen-Middelburg.
- Technische Schelde Commissie, 2001.
Langetermijnvisie Schelde-estuarium

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat / Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap,
Middelburg/antwerpen
- Uit den Bogaard L.A., 1995
Resultaten zandbalans Westerschelde 1955 – 1993.
Rapport R95-08, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht,
Utrecht.
- van Veen J., 1936.
Onderzoekingen in de Hoofden, in verband met de gesteldheid der Nederland-
sche kust.
's Gravenhage.
- Van Veen J., 1944.
Schelderegiem en Schelderegie.
In beperkte oplage (her-)uitgegeven in 1993; exemplaar aanwezig in bibliotheek
RWS/RIKZ.
- Vroon J., Storm C., Coosen J., 1997.
Westerschelde, stram of struis?
Rapport RIKZ-97.023, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ,
ISBN 90-369-3441-9, Middelburg.