

Rijksinstituut voor Kust en Zee

getijanalyse Westerschelde



C-2319 712

getijanalyse Westerschelde

registratie	projectcode	status
j:\secw\rap-74-719	Rw741.1	definitief
projectleider	projectdirecteur	datum
Ir. T.J. Ziltman	Ir. C.J. van Hassel	99-10-05
autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	Ir. T. J. Ziltman	

Witteveen+Bos

Van Twickelstraat 2

postbus 233

7400 AE Deventer

telefoon 0570 69 79 11

telefax 0570 69 73 44



De kwaliteits systemen van Witteveen+Bos zijn gecertificeerd volgens
NEN-EN-ISO 9001

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	1
2. PROJECTBESCHRIJVING	2
2.1. Achtergrond	2
2.2. Doelstelling	2
2.3. Methodiek	2
2.4. Beschikbare gegevens	5
3. ANALYSE VAN WAARGENOMEN WATERSTANDEN	6
3.1. Inleiding	6
3.2. Aandeel van het astronomische getij	7
3.3. Identificatie van incidenten	9
4. VERANDERINGEN IN HET ESTUARIUM	11
4.1. Inleiding	11
4.2. Menselijke ingrepen in het estuarium	12
4.2.1. Inpolderingen	12
4.2.2. Afdamming	13
4.2.3. Vaargeulverruiming	13
4.2.4. Zandwinning	15
4.2.5. Erosiebestrijdende maatregelen	15
4.3. Slijkgras	16
4.4. Autonome morfologische ontwikkelingen in het estuarium	16
4.5. Ingrepen buiten het estuarium	16
4.5.1. Op de Noordzee en langs de kust	17
4.5.2. Westerscheldemond	17
5. VERBANDEN TUSSEN WATERSTANDEN EN GEOMETRIE	19
5.1. Inleiding	19
5.2. Fenomenologie op grote tijdschaal	19
5.3. Inpoldering	22
5.4. Vaargeulverruiming	23
5.5. Afdamming en erosiebestrijdende maatregelen	26
6. NUMERIEKE SIMULATIES	27
6.1. Inleiding	27
6.2. Het Westerscheldemodel	28
6.3. Referentie-simulatie	29
6.4. Definitie van drie typen bodemverandering	30
6.5. Resultaten van de simulaties	31
6.6. Conclusies	31
7. CONCEPTUEEL MODEL	34
7.1. Inleiding	34
7.2. Inventarisatie kenmerken	34
7.2.1. Geometrische kenmerken	34
7.2.2. Hydrodynamische kenmerken	37
7.2.3. Meteorologische kenmerken	39

7.3. Structurering van de kenmerken	40
7.3.1. Inleiding	40
7.3.2. Het conceptuele model niveau 1	40
7.4. Afbakening en definities	41
7.5. Effecten van de geometrische veranderingen	41
7.5.1. Inpoldering	41
7.5.2. Vaargeulverruiming	42
7.5.3. Autonome ontwikkeling	43
7.5.4. Het conceptuele model niveau 2	43
8. BESCHRIJVING VAN EXTREMEN	45
8.1. Inleiding	45
8.2. Statistische beschrijving	45
8.3. Fysica	46
8.4. Analyse van veldgegevens	47
Conclusie	48
9. SYNTHESE	50
REFERENTIES	54
laatste bladzijde	51

BIJLAGEN	aantal bladzijden
I Gedetailleerde gegevens van inpolderingen in de Westerschelde	2
II Bagger- stort en zandwinhoeveelheden in de Westerschelde 1955-1995	1
III Bodemverschilkaarten van de Westerschelde voor verschillende perioden	4
IV Rol van het astronomische getij	3
V Verwijdering van de 18,6 jarige cyclus	13
VI Statistische extrapolatie	3
VII Van WAQUA naar Delft3D	2

1. INLEIDING

Mede als gevolg van menselijke ingrepen in de Westerschelde geven waterstanden een gestage stijging te zien. De verwachting is dat deze stijging zich in de toekomst zal voortzetten en waarschijnlijk zelfs versterkt wordt door verder menselijk ingrijpen, zoals verdieping van de vaargeul.

Voor het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ vormde deze constatering tijdens de Oost-West studie de aanleiding om een studie te initiëren naar de veiligheid tegen overstromen van de gebieden rond dit estuarium. Bij brief d.d. 24 maart 1998, kenmerk RIKZ/ABE985456, heeft het RIKZ opdracht verleend aan Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs BV om de eerste fase van deze studie uit te voeren. Kort samengevat omvat deze eerste fase een analyse van het getij in de Westerschelde alsmede een plan van aanpak voor een vervolg op die analyse.

In het kader van deze studie is de opdrachtgever vertegenwoordigd door de productleider Veiligheid, mevrouw Ir. A.A. Arends. Voor Witteveen+Bos heeft de heer Ir. T.J. Zitman opgetreden als projectleider.

Omdat in de organisatie van de opdrachtgever met betrekking tot de Westerschelde veel kennis en ervaring aanwezig is die relevant is bij de uitvoering van het onderhavige project, is bij aanvang van het project voorgesteld om een klankbordgroep samen te stellen. De volgende heren hebben zitting genomen in deze klankbordgroep: A. Langerak, T. Pieters, P. Roelse, J. de Ronde, J. Vroon en E. Taveniers. Allen zijn werkzaam bij het RIKZ, met uitzondering van de heer Taveniers. Hij is werkzaam bij de Meet- en Studiedienst in Antwerpen en was uitgenodigd om het belang van de Zeeschelde in de ontwikkeling van de Westerschelde naar behoren te kunnen belichten. Aan het begin van het project is de klankbordgroep eenmaal bijeen geweest om te adviseren over het verloop van de studie. Tevens heeft de klankbordgroep de concepten beoordeeld. Daarnaast zijn de individuele leden van deze groep benaderd voor specialistisch advies.

Naast deze klankbordgroep heeft Witteveen+Bos prof. dr. ir. H.J. de Vriend, hoogleraar aan de universiteiten van Twente en Delft, uitgenodigd om als adviseur op te treden bij de uit te voeren analyse. Zijn inbreng is geconcentreerd rond de koerswijziging gedurende het verloop van deze studie, zie hoofdstuk 2.

De samenwerking met de directe vertegenwoordigers van de opdrachtgever, de leden van de klankbordgroep en de adviseur heeft een waardevolle bijdrage geleverd aan het verloop van de studie en is door de opdrachtnemer bijzonder op prijs gesteld.

2. PROJECTBESCHRIJVING

2.1. Achtergrond

Recent is uit studie naar voren gekomen dat de waterstanden in de Westerschelde een geleidelijke stijging vertonen (Arends, 1997). Dit verschijnsel doet zich langs de gehele Nederlandse kust voor, maar in het Schelde estuarium is het sterker dan elders. Op termijn kan dit significante gevolgen hebben voor de veiligheid tegen overstromen van de gebieden rond het estuarium. Met het oog op de toekomst is de vraag gerechtvaardigd of die veiligheid voldoende is gewaarborgd (in de zin van wettelijk vastgelegde criteria) en zo nee, welke maatregelen genomen kunnen worden om aan die ongewenste ontwikkeling een positieve wending te geven.

Om die vraag te kunnen beantwoorden, is het nodig om inzicht te hebben in de mechanismen en processen die ten grondslag liggen aan de kennelijke stijging van de waterstanden. Met dat inzicht moet het mogelijk worden om toekomstige ontwikkelingen met betrekking tot de stijging van waterstanden en derhalve de veiligheid tegen overstromen in kaart te brengen en om zonodig maatregelen te ontwerpen (en op effectiviteit te beoordelen) die erop gericht zijn om die veiligheid te waarborgen.

Om het benodigde inzicht te verwerven is een studieprogramma geïnitieerd naar oorzaken en omvang van de stijging van de waterstanden in de Westerschelde, namelijk totale veiligheidsstudie van de Westerschelde. Deze veiligheidsstudie bestaat uit de volgende onderdelen:

1. getijanalyse;
2. onderzoek naar de morfologische terugkoppeling;
3. definitie van maatregelen ter waarborging van de veiligheid;
4. kosten/baten analyse;
5. toekomstverkenning.

Het eerste deel, de getijanalyse, is het onderwerp van onderhavige studie. De resultaten van deze analyse zullen (mede) bepalend zijn voor de inrichting van volgende delen van de veiligheidsstudie.

2.2. Doelstelling

Het doel van de voorgestelde getijanalyse is het identificeren van en het verkrijgen van inzicht in de invloed van geometrische veranderingen in de Westerschelde op deesignaleerde verandering van de hoogwaterstanden in de Westerschelde en de achterliggende fysische processen. In onderhavige studie worden de geometrische veranderingen in beschouwing genomen, die zijn veroorzaakt door Ingrepen die in het verleden door de mens zijn gepleegd en door autonome morfologische ontwikkelingen. Daarmee wordt een solide basis gelegd voor verantwoorde prognose van die verandering in relatie tot toekomstige ontwikkeling van het estuarium.

2.3. Methodiek

In de oorspronkelijke opzet is de getijanalyse erop gericht om inzicht te verwerven in de fysische mechanismen die ertoe leiden dat waterstanden instantaan reageren op ingrepen in het estuarium. In dit verband wordt met 'instantaan' bedoeld dat de duur van de periode waarover een verandering in de waterstand zich manifesteert, even groot is als de duur die nodig was om de ingreep te realiseren, die de betreffende verandering in de waterstand heeft geïnduceerd (zie paragraaf 3.3 voor een nadere toelichting op het begrip instantane respons).

Voor identificatie van de relevante fysische mechanismen is een verband gezocht tussen in het verleden opgetreden geometrische veranderingen en de uit waarnemingen afgeleide lange-termijn ontwikkeling van waterstanden. Hiertoe zijn de uit waarnemingen afgeleide jaargemiddelde waterstanden gecorrigeerd voor verschijnselen die direct aan bekende fysische fenomenen kunnen worden gerelateerd in hoofdstuk 3.

Om de oorzaken van veranderingen in hoogwaterstanden vanuit de fysica van het estuarium inzichtelijk te maken, zal de ontwikkeling van waterstanden zoals deze uit waarnemingen is afgeleid, worden geconfronteerd met geometrische veranderingen in het estuarium die zich hebben voorgedaan. Hiertoe worden in hoofdstuk 4 de geometrische veranderingen binnen en buiten het estuarium geïnventariseerd.

Om ruis afkomstig van meteorologische effecten in de waargenomen waterstanden te voorkomen wordt het verschil tussen hoogwater en laagwater gebruikt in de confrontatie. Additioneel voordeel is dat eventuele fouten in het referentieniveau worden geëlimineerd. De confrontatie van het tijverskil met ingrepen is erop gericht om inzicht te verwerven in de fysische mechanismen die ertoe leiden dat waterstanden instantaan reageren op ingrepen in het estuarium. In dit verband wordt met 'instantaan' bedoeld dat de duur van de periode waarover een verandering in de waterstand zich manifesteert, even groot is als de duur die nodig was om de ingreep te realiseren, die de betreffende verandering in de waterstand heeft geïnduceerd (zie paragraaf 3.3 voor een toelichting op het begrip instantane respons).

Bij de uitvoering van deze studie is naar voren gekomen dat hoewel de ontwikkeling van het estuarium weldegelijk wordt beïnvloed door menselijke ingrepen, er in de historische gegevens geen duidelijke instantane respons van waterstanden op die ingrepen kan worden onderscheiden.

Deze bevinding vormde aanleiding om de koers van de onderhavige studie aan te passen. Deze koerswijziging houdt in dat niet langer gezocht is naar een instantane respons van waterstanden op geometrische veranderingen (discontinuïteit in de ontwikkeling), maar naar aanwijzingen dat een lopende ontwikkeling van waterstanden als gevolg van een ingreep is verstoord (trendbreuk of een geleidelijke verandering van een trend). In hoofdstuk 5 wordt door confrontatie van het tijverskil met de gepleegde ingrepen naar deze aanwijzingen gezocht.

Bij zulke verstoringen manifesteert het effect van een geometrische verandering op de waterstand zich niet instantaan, maar in de loop van de tijd. Dat houdt direct in dat er in dat effect naast een hydrodynamische ook een morfologische component aanwezig zal zijn. De formulering van het beoogde conceptuele model wordt daardoor beduidend complexer dan voorzien en reikt tot in een volgende fase van de Veiligheidsstudie waarvan de onderhavige analyse deel uitmaakt (onderdeel 'morfologische terugkoppeling'). In het conceptuele model, zoals dat in hoofdstuk 7 van het voorliggende rapport wordt afgeleid, komt alleen de hydrodynamische component aan de orde.

Vanwege de morfologische component in het effect van ingrepen dienen deze op een daarbij passende tijdschaal te worden onderzocht. Als die tijdschaal niet klein is ten opzichte van de duur tussen opeenvolgende ingrepen (of veranderingen in het estuarium met een andere oorzaak dan gericht menselijk handelen), dan zijn ingrepen niet los van elkaar te zien. In plaats daarvan zal dan moeten worden gekeken naar het gezamenlijke effect van een reeks van ingrepen.

Bij deze koerswijziging werd een dergelijke samenhang tussen ingrepen op voorhand waarschijnlijk geacht. Tegen deze achtergrond is er toen voor gekozen om met behulp van diagnostische numerieke modellering de bijdrage te kwantificeren die een bepaald type ingreep heeft geleverd over aan de ontwikkeling van de waterstand over een periode van enkele jaren.

De diagnostische aanpak houdt in dit geval in dat met een numeriek stromingsmodel is bepaald hoe de waterstanden zouden zijn veranderd in de beschouwde periode als daarin uitsluitend ingrepen van een bepaalde soort in het estuarium zouden zijn gepleegd, zoals vaargeulverruiming of reductie van de komberging (inpoldering). Op die manier krijgt men een kwantitatieve impressie van aard en omvang van het effect van het betreffende soort ingreep op de tijdsafhankelijke ontwikkeling van waterstanden. De diagnostische modellering is gerapporteerd in hoofdstuk 6.

Op basis van specifiek inzicht in het estuarium, verkregen uit de resultaten van hoofdstukken 5 en 6 en hoofdzakelijk op basis van theoretische kennis over de fysica is een conceptueel model geformuleerd in hoofdstuk 7. Dat is een schematische afbeelding van de werkelijke samenhang tussen factoren en mechanismen die gezamenlijk de oorzaak zijn van het tot stand komen van waterstanden in de Westerschelde. Met behulp van dit model wordt een beeld verkregen van de invloed van de ingrepen en autonome morfologische ontwikkelingen op hoog- en laagwater.

Voor de veiligheid tegen overstromen is de extreme waterstand het meest van belang. In hoofdstuk 8 worden de extremen beschreven. Bij het beschrijven van extreme hydrodynamische condities wordt in eerste instantie vaak gedacht aan een statistische aanpak. In de onderhavige studie wordt dit echter, gezien de schaal waarop sinds jaren in de geometrie van het estuarium wordt ingegrepen, niet als de aangewezen weg beschouwd om te extrapoleren naar toekomstige omstandigheden. Statistische methoden zijn namelijk gebaseerd op historische waarnemingen en die zijn vanwege de continue veranderingen in het systeem niet vanzelfsprekend representatief voor de huidige of toekomstige situatie. Om toch een schatting te kunnen maken van potentiële extreme condities, is dus ook kennis van de fysica van het estuarium nodig.

Momenteel wordt wel gebruik gemaakt van statistische technieken om extreme condities te kwantificeren. Ten opzichte van de gebruikelijke aanpak wordt daarbij een correctie uitgevoerd om de toegepaste techniek te accommoderen voor kennelijke veranderingen in het systeem en in de daarbij behorende extremen. Deze correctie, die 'lineair doorvertalen' wordt genoemd, gebeurt vaak in praktijksituaties als bijvoorbeeld een berekening voor een verdieping wordt gemaakt. Lineair doorvertalen zal flankerend aan de onderhavige analyse op hoofdlijnen worden geëvalueerd op toepasbaarheid in bijlage RVI.

In hoofdstuk 9 vindt een synthese plaats van de uitgevoerde studie. Hierin wordt onder meer de historie van de getijanalyse besproken, de resultaten samengevat en de betekenis van de resultaten en de daarbijbehorende conclusies beschouwd en aanbevelingen voor vervolg gegeven.

2.4. Beschikbare gegevens

In tabel 2.1 zijn de gegevens samengevat die voor de onderhavige studie beschikbaar zijn gesteld door het RIKZ.

Tabel 2.1 Overzicht van beschikbare gegevens

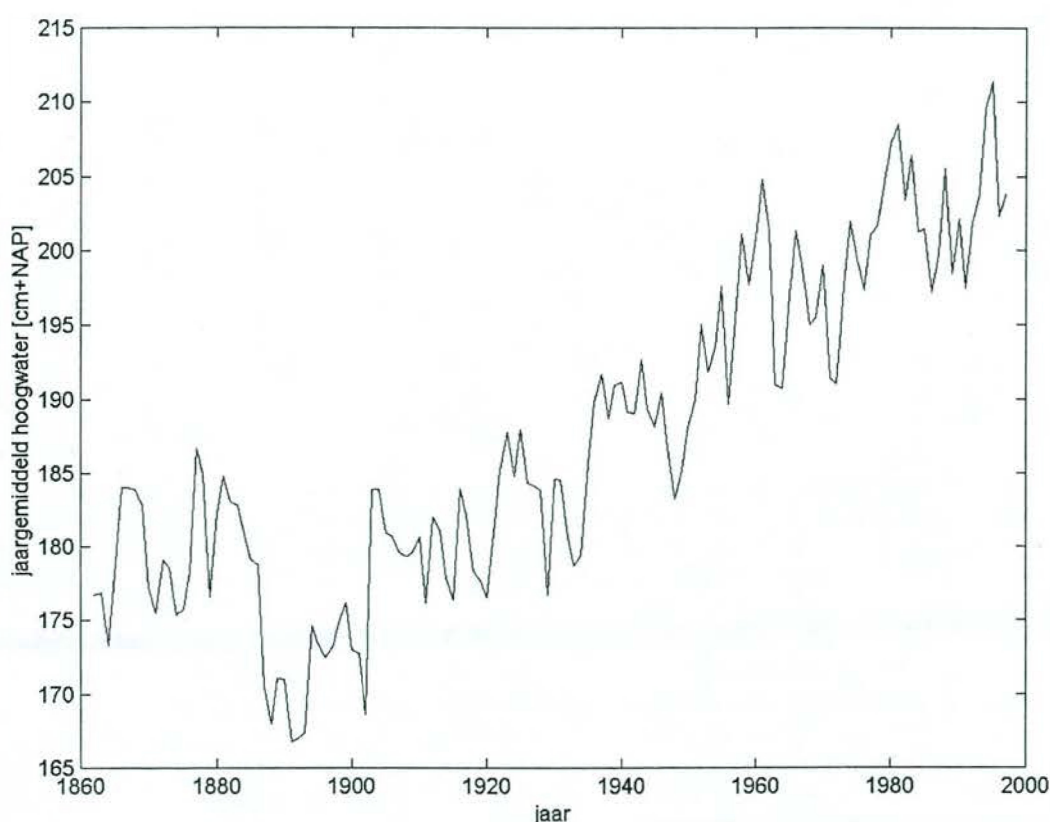
Gegevens	Locatie	periode
Jaarlijks gemiddeld laagwater	Cadzand	1880-1997
	Westkapelle	1880-1997
	Vlissingen	1862-1997
	Terneuzen	1871-1997
	Hansweert	1862-1997
	Bath	1862-1997
	Prosper	1950-1995
	Antwerpen	1950-1990
Jaarlijks gemiddelde zeestand	Cadzand	1884-1997
	Westkapelle	1971-1997
	Vlissingen	1862-1997
	Terneuzen	1884-1997
	Hansweert	1862-1997
	Bath	1971-1997
	Prosper	1950-1995
	Antwerpen	1950-1990
Jaarlijks gemiddeld hoogwater	Cadzand	1880-1997
	Westkapelle	1880-1997
	Vlissingen	1862-1997
	Terneuzen	1871-1997
	Hansweert	1862-1997
	Bath	1862-1997
	Prosper	1950-1995
	Antwerpen	1950-1990
Dieptemeting	Westerschelde	1955
		1960
	Westerschelde + monding	1968 (1967-1969)
		1972 (1972-1974)
		1978 (1977-1978)
		1982 (1981-1982)
		1986 (1985-1986)
		1990 (1989-1990)
		1994 (1992-1994)
		1996 (1996-1997)

3. ANALYSE VAN WAARGENOMEN WATERSTANDEN

3.1. Inleiding

Uit registraties van de waterstanden in diverse meetstations in de Westerschelde en langs de kust van de Noordzee valt af te leiden dat het jaargemiddelde hoogwater over de afgelopen eeuw een duidelijk stijgende tendens vertoont (Dillingh en Heinen, 1994). Daaromheen worden fluctuaties met uiteenlopende periode aangetroffen. Ter illustratie is in afbeelding 3.1 het uit waarnemingen afgeleide verloop van het jaargemiddelde hoogwater voor Vlissingen gegeven.

Afbeelding 3.1 Uit waarnemingen afgeleid jaargemiddeld hoogwater (Vlissingen)



Algemeen wordt aangenomen dat in ieder geval de waargenomen tendens en waarschijnlijk ook een deel van de fluctuaties niet zo maar een manifestatie zijn van interacties tussen de harmonische componenten van het astronomisch getij. Een verklaring voor het waargenomen gedrag zou eerder gezocht moeten worden in zaken als de autonome morfologische ontwikkeling van het estuarium, menselijke ingrepen in het estuarium, stijging van de zeespiegel, verandering van het windklimaat en veranderingen in het getij op de Noordzee.

Ten opzichte van bijvoorbeeld zeespiegelstijging en autonome morfologische ontwikkeling hebben menselijke ingrepen een vrij plotseling karakter. Zo heeft de afsluiting van de Braakman bij Terneuzen in relatief kort tijdbestek geleid tot een substantiële afname van de komberging in het estuarium. De verwachting is dat zo'n ingreep op een overeenkomstig korte termijn een effect te zien geeft op de waterstanden in de Westerschelde. In verband met een morfologische repons kan een ingreep daarnaast ook een lange-termijn effect hebben.

Om zulke effecten in signalen als die in afbeelding 3.1 te kunnen identificeren, is het zinvol om dat signaal eerst te ontdoen van verschijnselen die direct aan bekende (fysische) fenomenen kunnen worden gerelateerd. Een voorbeeld daarvan is de 18,6 jarige cyclus in de getijamplitude die het gevolg is van een geleidelijke verschuiving van het snijpunt van de evenaar en het vlak waarin de maan om de aarde draait.

Vanuit deze redenering is de onderhavige analyse van waarnemingen als volgt opgebouwd. In de eerste plaats wordt onderzocht welk deel van de waargenomen ontwikkeling van waterstanden kan worden verklaard uit het astronomische getij. Dat deel wordt uit de waarnemingen verwijderd om vervolgens het residu te evalueren op aanwezigheid van incidenten, zoals niet-periodieke fluctuaties (discontinuïteiten en trendbreuken) en vooralsnog onverklaarde oscillaties.

De analyse is gericht op jaargemiddelde waterstanden (hoogwater en laagwater). Zonder dat daar onderzoek naar is gedaan, wordt verondersteld dat deze jaargemiddelden een voldoende hoge resolutie in de tijd geven van de ontwikkeling van waterstanden om de gezochte effecten te kunnen identificeren.

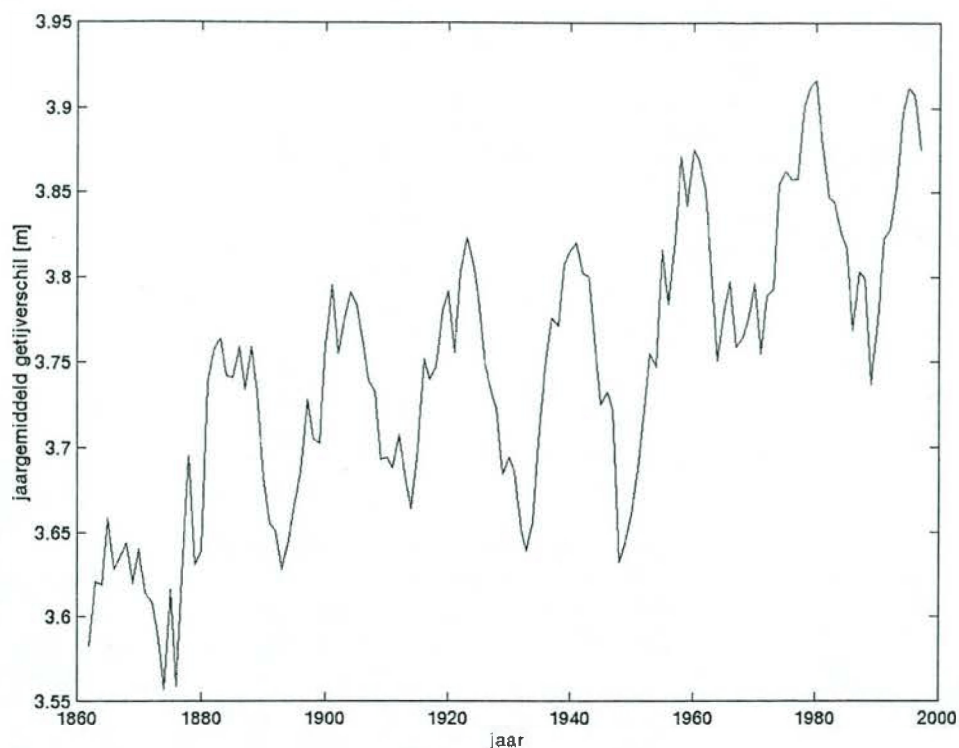
3.2. Aandeel van het astronomische getij

In het navolgende wordt een schatting gemaakt van het aandeel van het astronomisch getij in de gevonden variaties in het jaargemiddelde hoogwater. Dat is gedaan door uit waarnemingen afgeleide jaargemiddelde hoogwaters te vergelijken met een synthetische tijdreeks die verwacht mag worden als waterstanden alleen door variaties in astronomisch getijcomponenten zouden worden bepaald.

Zoals uit afbeelding 3.1 blijkt, vertoont het verloop van het jaargemiddelde hoogwater te Vlissingen een stijgende trend vanaf circa 1890. In de 30 jaar daarvoor is die trend niet evident. Over de oorzaak daarvan lopen de meningen uiteen. Er zou sprake van kunnen zijn dat de waarnemingen van voor 1890 zijn gebaseerd op een ander referentieniveau dan latere waarnemingen. Dat lijkt echter te worden tegengesproken doordat reeksen voor enkele andere meetstations (buiten het estuarium, langs de Noordzeekust) soortgelijk gedrag vertonen, zie Dillingh en Heinen (1994)

Om een eventuele storende invloed van dit verschijnsel met onduidelijke herkomst te voorkomen, is het aandeel van het astronomisch getij niet direct uit hoogwaters afgeleid, maar uit getijverschillen. Een additioneel voordeel is dat daardoor ook meteorologische invloeden voor een deel worden geëlimineerd. Het verloop van de jaargemiddelde getijslag bij Vlissingen is gegeven in afbeelding 3.2.

Afbeelding 3.2 Uit waarnemingen afgeleide jaargemiddelde getijslag (Vlissingen)



De analyse van de rol van het astronomisch getij in het waargenomen verloop van het getijverschil is in detail gegeven in bijlage IV. Daarin is met behulp van spectraalanalyse gezocht naar de dominante periodieke componenten in het betreffende signaal. Vervolgens is gecontroleerd in hoeverre een interactie tussen deze dominante componenten de stijgende tendens kan verklaren.

Voor meetpunt Vlissingen zijn geen aanwijzingen naar voren gekomen dat de kennelijke stijgende tendens in de waargenomen getijslag een toevallige interactie is van componenten van het astronomische getij. Aangenomen wordt dat deze bevinding ook geldig is voor andere locaties in de Westerschelde.

Echter, zoals aangegeven in bijlage IV, vertoont het spectrum van het in afbeelding 3.2 gegeven signaal een prominente piek rond een frequentie van één per 18,2 jaar. Deze piek hoort vrijwel zeker bij de bekende getijcomponent met een periode van 18,6 jaar. De verschuiving van 0,4 jaar wordt veroorzaakt door het beperkt oplossend vermogen in het frequentiedomein van het spectrum.

Gezien de energie die in het spectrum rond deze piek is geconcentreerd, zal een groot deel van de fluctuaties in het verloop van het getijverschil door de bijbehorende getijcomponent worden verklaard. Om te voorkomen dat door de aanwezigheid van deze sterke component identificatie van gezochte incidenten in het verloop van waterstanden wordt bemoeilijkt, is dat verloop voor deze component gecorrigeerd (zie bijlage V). Op voorspraak van J. de Ronde (lid van de klankbordgroep, zie hoofdstuk 1) is die correctie op pragmatische wijze uitgevoerd. Aan het signaal van jaargemiddelde getijverschillen is een sinus met een periode van 18,6 jaar in kleinste kwadraten zin aangepast en vervolgens op het originele signaal in mindering gebracht. Het resultaat van deze operatie, residu genoemd, is gebruikt voor verdere analyse.

De identificatie van incidenten bouwt voort op het gecorrigeerde verloop van waterstanden (jaargemiddeld hoogwater, laagwater en getijverschil) voor de locaties Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Bath, Prosper en Antwerpen.

3.3. Identificatie van incidenten

In de onderhavige analyse van waterstanden zijn incidenten geïdentificeerd als discontinuïteiten, trendbreuken, geleidelijke verandering van een trend of niet vanuit het astronomisch getij te verklaren oscillaties in de langjarige ontwikkeling van de waterstand. Om zulke incidenten te kunnen identificeren, hebben we uit reeksen van jaargemiddelde waterstanden (hoogwater, laagwater en tijverschil) voor diverse locaties in de Westerschelde de in het oog springende astronomische component met een periode van 18,6 jaar verwijderd (zie bijlage V).

We veronderstellen dat in de zo gecorrigeerde reeksen, residuen genoemd, effecten van ingrepen op de waterstanden duidelijker tot uitdrukking komen dan in de originele reeksen. Deze effecten uiteten zich als de hiervoor bedoelde incidenten. In de beoordeling van de residuen (hoofdstuk 5) onderscheiden we op hoofdlijnen zes typen ontwikkelingen. Deze zijn in grafische vorm weergegeven in afbeelding 3.3. Hierin zijn ontwikkelingen in de tijd (horizontale as) gegeven van fictieve waterstanden (gehoekte lijn met puntjes) en de bijbehorende 'grote lijn' in die ontwikkeling (getrokken lijn).

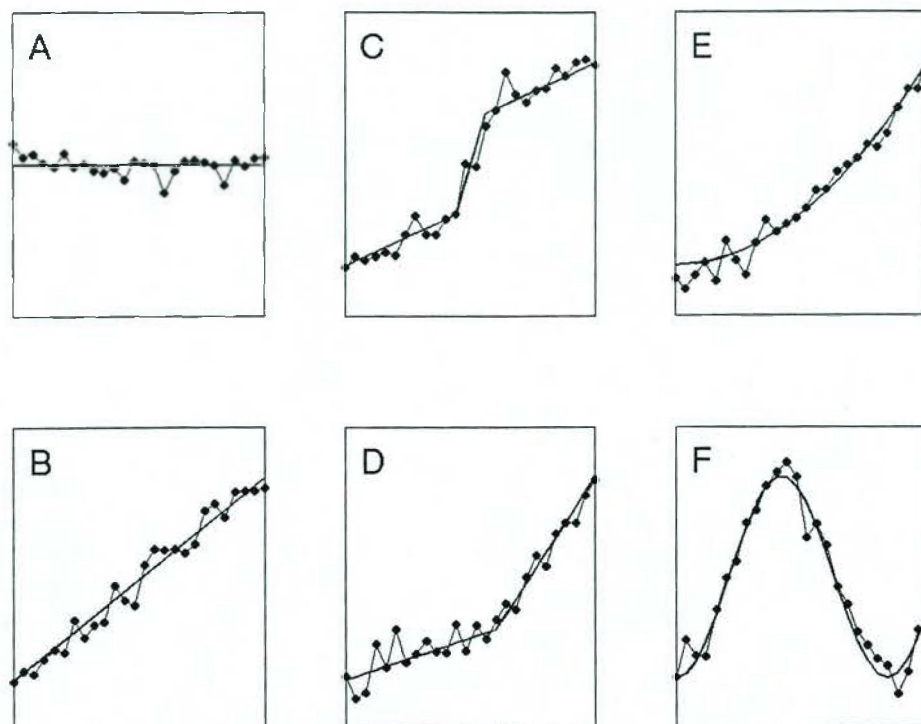
Bij type A gaat het om een stationaire situatie en type B staat voor een ongestoorde trendmatige verandering. In geen van beide gevallen zijn incidenten herkenbaar. Dat kan zijn omdat die zich in de beschouwde periode niet hebben voorgedaan, of omdat ze klein zijn ten opzichte van de fluctuaties rond de grote lijn in de uitgebeelde langjarige ontwikkeling.

Typen C en D geven een plotselinge verstoring te zien van een lopende ontwikkeling. Type C is een discontinuïteit zoals die verwacht wordt bij een instantane respons van de waterstand op een ingreep. Bij type D (trendbreuk) reageert de waterstand niet instantaan, maar wordt een proces geïnitieerd waardoor de langjarige ontwikkeling van de waterstand vrij plotseling een ander verloop krijgt.

Een ontwikkeling als geschetst onder type E (en varianten daarop zoals een asymptotisch afnemende verandering in de tijd) kan ontstaan als gevolg van een enkele ingreep, maar het kan ook een uiting zijn van een cumulatie van effecten van ingrepen die na elkaar zijn uitgevoerd. Dat is ook een potentiële oorzaak van type F (oscillatie).

Alleen aan incidenten van het type C (discontinuïteit) ligt een instantane respons van de waterstand ten grondslag. In alle andere gevallen (D, E en F) is sprake van een procesmatige respons. Voor de formulering van het conceptuele model (hoofdstuk 7) waarmee de directe gevolgen van een ingreep voor de waterstand vanuit de fysica worden beschreven, is specifiek gezocht naar discontinuïteiten. De reden daarvoor is dat procesmatige veranderingen (B, D, E en F) gepaard zullen gaan met een al of niet lokale morfologische aanpassing in het estuarium. Zo'n interactie met de morfologie is geen onderwerp van de onderhavige studie, maar maakt deel uit van een vervolgfase van de Veiligheidsstudie (morfologische terugkoppeling).

Afbeelding 3.3 Illustratie van zes typen ontwikkelingen



4. VERANDERINGEN IN HET ESTUARIUM

4.1. Inleiding

Als gevolg van verschillende menselijke ingrepen en autonome ontwikkelingen in en nabij de Westerschelde is het niveau van de hoogwaterstand de afgelopen eeuw gestegen. Dit verschijnsel doet zich langs de gehele Nederlandse kust voor, maar vooral in het oostelijke deel van de Westerschelde is het sterker dan elders (Dillingh en Heinen, 1994). De verwachting is dat deze sterkere stijging zich in het Oostelijk deel van de Westerschelde in de toekomst zal voortzetten en waarschijnlijk zelfs wordt versterkt door verder menselijk ingrijpen, zoals verdieping van de vaargeul.

De onderhavige studie is bedoeld om bij te dragen aan een onderbouwing en kwantificering van deze verwachting. Daartoe maken we onder meer een inventarisatie van gebeurtenissen die van invloed kunnen zijn (geweest) op de ontwikkelingen van waterstanden op de Westerschelde. Immers, die waterstanden (of meer algemeen: de waterbeweging in het estuarium) is de uiting van een interactie tussen hydraulische randvoorwaarden in de monding en de geometrie van het estuarium. Overigens kan in het estuarium de waterbeweging ook door andere factoren dan de geometrie worden beïnvloed (wind, buistoten en -oscillaties, afvoer op en berging in de Zeeschelde e.d.), maar die spelen over het algemeen een geringe rol in verhouding tot de beide eerstgenoemde factoren.

De hydraulische randvoorwaarden kunnen in de loop van de tijd wijzigen onder invloed van bijvoorbeeld zeespiegelstijging, verandering van het getij op de Noordzee en de (autonome en/of door de mens gestuurde) morfologische ontwikkeling van de monding van de Westerschelde en nabij gelegen kustgebieden. Voor de morfologie van het estuarium zijn deze randvoorwaarden van belang omdat ze een rol spelen bij de interne distributie van sediment en omdat ze mede sturend zijn voor de uitwisseling van sediment met de buitendelta.

De geometrie van het estuarium verandert voortdurend. Dat is deels het gevolg van autonome processen. Een voorbeeld daarvan is het proces van verlanding dat wereldwijd in veel estuaria wordt gesignaleerd. Daarnaast is sprake van menselijke ingrepen in de geometrie. Voor een deel hebben die een min of meer instantaan karakter (zoals bij de aanleg van een polder). Echter, een ingreep kan ook een morfologisch proces in gang zetten zodat het effect van die ingreep zich over vele jaren uitstrekt. Bij het relatief trage tot stand komen van zo'n effect past een betrekkelijk grote ruimteschaal. Een trage respons zal dus niet beperkt blijven tot de directe omgeving van de ingreep, maar zal zich over een betrekkelijk groot gebied manifesteren.

Gezien de schaal waarop de mens in het verleden in de geometrie van het estuarium heeft ingegrepen en dat ook nu nog doet, is de feitelijke morfologische ontwikkeling altijd een combinatie van autonome en opgelegde processen. Mede door het tempo waarmee ingrepen elkaar opvolgen en de volharding waarmee de mens enkele opgelegde veranderingen in stand houdt (vaargeulverruiming), krijgt het estuarium niet de gelegenheid om te ontwikkelen tot een evenwichtssituatie. Het verkeert continu in een overgangstoestand (De Vriend, mondelinge communicatie).

In het onderhavige hoofdstuk beschrijven we de historische ontwikkeling van de geometrie van de Westerschelde door middel van een inventarisatie van relevante menselijke ingrepen en autonome processen. In het volgende hoofdstuk (hoofdstuk 5) onderzoeken we in hoeverre deze ingrepen en processen op één of andere manier herkenbaar zijn in de langjarige ontwikkeling van de waterstanden in het estuarium.

Bij de inventarisatie maken we onderscheid tussen:

- menselijke ingrepen in het estuarium (zogenoemde interne ingrepen);
- menselijke ingrepen in de omgeving van het estuarium (externe ingrepen);
- (autonome) morfologische ontwikkeling van het estuarium.

Deze drie elementen komen in de navolgende drie paragrafen aan de orde.

4.2. Menselijke ingrepen in het estuarium

Allereerst worden de menselijke ingrepen besproken die in het verleden in de Westerschelde (zogenaamde interne ingrepen) zijn uitgevoerd. Daarbij maken we onderscheid tussen:

- inpolderingen;
- afdamming: afsluiting van geularmen en van verbindingen met de Oosterschelde;
- verdieping en onderhoud van de vaargeul;
- zandwinning;
- erosiebestrijdende maatregelen;
- verlandingsmaatregelen door introductie Engels Slijkgras.

Deze categorieën van ingrepen worden achtereenvolgens beschreven in de navolgende paragrafen.

4.2.1. Inpolderingen

Voor het ontstaan van de huidige Westerschelde zijn met name de Inpolderingen van Zeeuws-Vlaanderen, Walcheren en Zuid-Beveland van belang geweest. Voor zover bekend en te achterhalen zijn rond het jaar 1100 de eerste feitelijke Inpolderingen uitgevoerd. De grootste activiteiten vonden plaats in de 17e eeuw. Dan is een snelle groei te zien van ingepolderde oppervlakten, zie afbeelding 4.1 (Mol, 1995).

Van het estuarium is in vergelijking met 1600 nog slechts de helft over. In totaal is vanaf 1800 het oppervlak van de Westerschelde door inpolderingen van ondiepe gebieden met eenderde afgenomen, van circa 45.000 ha tot circa 30.000 ha. Sinds 1800 zijn veel gegevens bekend en bewaard betreffende de Westerschelde. Derhalve is vanaf 1800 een gedetailleerd overzicht van de inpolderingen in de Westerschelde verkrijgbaar (Mol, 1995). Het betreft de inpolderingen in de omgeving van:

- Braakman;
- Hellegat;
- Saeftinge;
- Sloe;
- Bath.

De inpolderingen in de omgeving van Braakman, Hellegat en Saeftinge betreffen inpolderingen van Zeeuws Vlaanderen, de ingepolderde gebieden in de omgeving van Sloe en Bath maken nu deel uit van Zuid-Beveland, zie afbeelding 4.2.

Het effect van de inpolderingen op het waterbergend vermogen was in de vorige eeuw nog niet zo groot, omdat de ingepolderde gebieden reeds boven gemiddeld hoogwater lagen (Arends, 1997). In deze eeuw varieert dit effect. De inpolderingen bij Bath zijn grotendeels bij bodemliggingen boven hoogwater uitgevoerd. Hierbij dient de aanwezigheid van krekens in de ingepolderde gebieden niet buiten beschouwing gelaten te worden. Daarentegen is bij Braakman een zeer groot deel beneden hoogwater ingepolderd.

In tabel 4.1 is een overzicht van de oppervlakten van de Inpolderingen voor een periode van 50 jaar weergegeven. De meer gedetailleerde gegevens zijn opgenomen in bijlage I.

Tabel 4.1 Totaal ingepolderd gebied in de Westerschelde (ha) (Mol, 1995).

periode	Sloe	Braakman	Hellegat	Saeftinge	Bath
1800-1850	96	2434	54	1639	-
1850-1900	518	1394	409	1061	1515
1900-1950	481	835	132	316	620
1950-1995	200	1673	-	-	782
Totaal	1295	6336	595	3016	2917

Het tegenovergestelde van inpolderen heeft zich in de Tweede Wereldoorlog voorgedaan. In 1944 is de dijk rondom Walcheren door geallieerden gebombardeerd en is circa 16.000 ha overstroomd. Aangezien deze dijk binnen korte tijd weer hersteld is, wordt deze gebeurtenis hier buiten beschouwing gelaten.

In principe is het beter inpoldering te karakteriseren met afname van bergingsvolumina (m³) in plaats van afname van nat oppervlak (m²). Echter voor 1970 zijn gebieden ingepolderd die een bodemhoogte hadden gelijk aan of hoger dan gemiddeld hoogwater. De veranderingen in de bergende breedte, die door deze inpolderingen worden veroorzaakt, zijn daardoor minder ingrijpend dan bij inpoldering van lager gelegen gebieden. Als gevolg hiervan is de directe invloed op de waterbeweging beperkt. In deze studie wordt de ingreep inpoldering uitgedrukt in oppervlakte ingepolderd gebied.

4.2.2. Afdamming

Een belangrijke mijlpaal in de door menselijke ingrepen bepaalde ontwikkeling was de scheiding tussen de Wester- en Oosterschelde met de afdamming van het Kreekrak in 1867 en de aanleg van de Sloedam in 1871, zie afbeelding 4.2. Naar schatting is het vloedvolume bij Kreekrak door de afdamming afgenomen met zo'n 32 mln m³ en het ebvolume met 12 mln m³. Bij Sloe zijn deze afnames respectievelijk 32 en 10 mln m³ (Van Veen, 1944). Door de afname van de getijvolumina zullen lokaal de overvloed en eb gemiddelde stroomsnelheden dalen. Dat kan leiden tot een reductie van de wrijvingsverliezen, waardoor de volumina weer een beetje zullen toenemen. Echter, het netto effect blijft lokaal een afname van de volumina (Pieters, mondelinge communicatie). Dat heeft in ieder geval lokaal invloed op de waterstand. Het zal ook een morfologische aanpassing in gang zetten, waardoor het effect van de afdamming zich na verloop van tijd over een steeds groter gebied kan uitstrekken.

4.2.3. Vaargeulverruiming

Baggeren

Om de vaarweg naar Antwerpen op de vereiste diepte te houden, worden reeds sinds circa 1900 baggerwerkzaamheden in de Westerschelde uitgevoerd. Tot de eerste wereldoorlog ging het om kleine hoeveelheden van ca. 1 tot 2 miljoen m³ per jaar. Vanwege de groter wordende en dieper liggende schepen die de haven van Antwerpen wilden bereiken moest de vaargeul worden verdiept. De baggerhoeveelheden namen toe tot 4 à 5 miljoen m³ in de zestiger jaren (Arends, 1997).

Tussen 1965 en 1975 is een grootschalige verdieping van de hoofdgeul met 3 à 4 meter uitgevoerd. Hierdoor wordt de baggeromvang tijdelijk verdrievoudigd tot ongeveer 12 à 13 miljoen m³ per jaar. Na ongeveer 15 jaar heeft de geul zich min of meer aangepast aan het grotere getijvolume (Mol, 1997). Voor de 48/43 verdieping bedraagt het onderhoudsbaggervolume ongeveer 8 à 10 miljoen m³ per jaar. In tabel 4.2 zijn de baggervolumina per jaar voor een periode van 5 jaar weergegeven. Meer gedetailleerde baggergegevens staan in bijlage II.

Tabel 4.2 Totale baggervolume per jaar voor een periode van 5 jaar in de Westerschelde

Periode	'55-'60	'60-'65	'65-'70	'70-'75	'75-'80	'80-'85	'85-'90	'90-'95
Baggervol. (mln m ³ /jr)	3,4	4,5	4,6	8,0	11,3	9,4	10,0	7,8

In het begin van de baggeractiviteiten vond het verdiepen en vervolgens op diepte houden van de vaarweg voornamelijk plaats op de drempels in de vaargeul. In tabel 4.3 zijn de drempels vanaf de Belgische grens naar de monding van de Westerschelde weergegeven met daarbij het jaartal waarop begonnen is met baggeren en de tot en met 1955 gebaggerde hoeveelheden, gemeten in miljoenen m³ (Mol, 1995).

Tabel 4.3 Gebaggerde drempels in de Westerschelde

Drempel	Gestart met baggeren	Baggerhoeveelheid tot 1955 (mln m ³)
Drempel van Bath	1905	42
Drempel van Valkenisse	1907	11
Platen van Walsoorden	1932	5
Drempel van Hansweert	1927	12
Overloop van Hansweert	1975	-
Drempel van Baarland	1969	-
Put van Terneuzen	1980	-
Drempel van Borssele	1973	-

Vanwege de groter wordende schepen zijn er ook baggerwerkzaamheden in scherpe binnenbochten en in de tussenliggende geulvakken uitgevoerd. De gehanteerde baggerstrategie is dat geulen, die in de buitenbochten worden aangetroffen, met elkaar worden verbonden. Vanwege de geometrie van het estuarium liggen die buitenbochten, gezien in de lengterichting van de Westerschelde, afwisselend aan noord en zuidzijde. In de overgang van twee opeenvolgende bochten met verschillende richting, ligt een drempel. Door deze drempel is een geul gebaggerd die de geulen in de beide buitenbochten met elkaar verbindt. Door de aanleg van een geul door de drempel is de stroming ter plaatse van de gebaggerde geul in de breedte geconcentreerd (er vindt geen uitwaaiing dwars op de as van het estuarium meer plaats over de drempel). Dit effect op de stroming is relevant voor de morfologie.

In afbeelding 4.3 is een overzicht van de baggerlocaties gegeven.

Storten

Stortingen hebben aanvankelijk vooral in de nevengebieden plaatsgevonden. Opvulling van nevengeulen was hiervan het gevolg. Door stortingen is er sprake van een relatief groot sedimentaanbod. Welke van beide ingrepen (storten of baggeren) het grootste regulerend effect op de waterbeweging heeft is volgens Huijs (1996) nog niet duidelijk, maar Pieters (1991) stelt dat verdiepen van geulen en aansluitende geuldelen het grootste effect heeft. Omdat de nevengeulen door het storten langzaam maar zeker vol raakten, heeft men in de jaren zeventig besloten meer sediment in de hoofdgeulen terug te storten. Dit gebeurt in het algemeen ten westen van de baggerlocaties. In afbeelding 4.3 zijn tevens de stortlocaties weergegeven.

Vanaf 1955 is bekend waar en hoeveel gestort is in de Westerschelde en het mondingsgebied. De totale jaarlijkse stortvolumes over een periode van 5 jaar zijn weergegeven in tabel 4.4 en in bijlage II is een overzicht van de jaarlijkse stortvolumes per locatie opgenomen.

Tabel 4.4 Totale stortvolume per jaar over een periode van 5 jaar in de Westerschelde

Periode	'55-'60	'60-'65	'65-'70	'70-'75	'75-'80	'80-'85	'85-'90	'90-'95
Stortvolume (miljoen m ³ /jr)	3,3	4,4	3,7	5,8	9,6	9,3	9,9	7,3

Naast het storten van materiaal gebaggerd uit de Westerschelde wordt in het estuarium materiaal gestort afkomstig uit havens en diverse kanalen op de Zeeschelde in België en uit het Kanaal door Zuid-Beveland, zie bijlage I (Mol, 1995).

4.2.4. Zandwinning

In de Westerschelde vindt zandwinning voor zowel de handel (derden) als voor overheden (concessiehouders) plaats. Van deze zandwinningen zijn de hoeveelheden en locaties bekend vanaf 1955. Naast de reguliere zandwinning worden incidenteel ook grote hoeveelheden sediment aan de vaarweg onttrokken. Dit wordt op het land gestort, zowel in Nederland als België.

De zandwinning voor overheden betrof (excl. reguliere handel) in de zestiger en zeventiger jaren soms aanzienlijke hoeveelheden. Het maximum van netto 4,3 miljoen m³ trad op in 1969. Daarna nemen deze hoeveelheden stelselmatig af. Vanaf 1992 zijn ze gereduceerd tot 0. De zandwinning ten behoeve van de reguliere handel laat, overeenkomstig het vastgestelde beleid, vanaf ca. 1990 een stabilisatie zien van rond de 2 miljoen m³ (Mol e.a., 1997). In bijlage II zijn de zandwinhoeveelheden voor de periode 1955-1995 weergegeven.

Er wordt naar gestreefd niet meer zand te onttrekken dan de jaarlijkse natuurlijke import. De winplaatsen worden zodanig gekozen dat vaarweghandhaving, gewenste geul- of plaatontwikkelingen worden gestimuleerd. Daardoor is op de korte termijn de invloed op de ruimtelijke structuur marginaal vergeleken met het directe nautische baggerwerk. Echter, door cumulatie zal zandwinning op lange termijn een significante invloed hebben op de zandhuishouding van het estuarium (Pieters e.a., 1991).

4.2.5. Erosiebestrijdende maatregelen

Geulwandverdediging

Ter voorkoming van het verder inscharen van de vaargeul in de (voor)oever en het handhaven van een vloeiende belijning ten behoeve van de scheepvaart zijn in de Westerschelde geulwandverdedigingen toegepast. De constructie van de geulwandverdedigingen bestaat uit steenachtig materiaal, dat wordt afgedekt met staalslakken.

In het kader van de vorige verdieping zijn in de periode 1988-1994 ter hoogte van de oevergedeelten Nauw van Bath, Walsoorden (Zuidergat), Gat van Ossensisse, Kruiningen-Hansweert, Verdrongen land van Saeftinge (zinkers, oostrand Saeftinge) en Baalhoek geulwandverdedigingen aangelegd over een totale lengte van 7,75 km (Anonymous, 1996). In afbeelding 4.4 is de situatie van de oeververdedigingen in de Westerschelde weergegeven.

Geleidedammen

Om de vaargeul beter bevaarbaar te houden werd in de jaren zestig in het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden voor geleidedammen. Op basis van de resultaten van dit onderzoek werd aanbevolen 4 geleidedammen aan te leggen. Twee van deze dammen zijn ook daadwerkelijk aangelegd. Allereerst werd in de periode 1966-1969 de twee km lange geleide-dam op de plaat van Doel aangelegd. Vervolgens is in de periode 1968-1971 de 2,8 km lange geleidedam op de Ballastplaat gerealiseerd. De twee andere dammen aan de stroomafwaartse uiteinden van de vloedgeulen van de platen van Saeftinge en de platen van Valkenisse zijn nooit aangelegd (Mol, 1995).

4.3. Slijkgras

Slijkgras is een pioniersplant die effectief zand en slib invangt. In 1925 is deze plant geïntroduceerd. Verlandings van het Land van Saeftinge heeft vooral in de periode 1931 – 1963 plaatsgevonden. Vanaf '63 is de verlanding in de grote geulen opgetreden. Het effect van Slijkgras op de geometrie van het estuarium wordt in deze studie verder buiten beschouwing gelaten.

4.4. Autonome morfologische ontwikkelingen in het estuarium

Autonome morfologische ontwikkelingen zijn ontwikkelingen in de bodemligging die hebben plaatsgevonden zonder directe bemoeienis van mensen. In de Westerschelde zijn de volgende autonome morfologische ontwikkelingen te onderscheiden:

- functiewisseling van Gat van Ossenissee en Middelgat;
- toename van de Schaar van Spijkerplaat;
- verlanding of erosie aan de randen van het estuarium.

In het middendeel van de Westerschelde neemt het Gat van Ossenissee geleidelijk de functie over van het Middelgat. Tussen 1955 en 1971 heeft verondieping in het middengebied sterk de overhand gehad als gevolg van de betekenisafname en verondieping van het Middelgat onder invloed van de doorbraak van de Overloop van Hansweert. Het Gat van Ossenissee is door hetzelfde proces verruimd. Vanaf 1970 maakt het Gat van Ossenissee officieel deel uit van de hoofdvaarroute. De verondieping van het Middelgat vergt meer sediment dan er vrijkomt uit de verruiming van het Gat van Ossenissee. Dit is het gevolg van het verschil in lengte tussen beide geulen, waardoor er bij een vergelijkbare profielverandering in het Middelgat meer sediment wordt opgenomen dan uit het Gat van Ossenissee wordt verwijderd. Bovendien is de externe dominantie van de geulen afgenomen, waardoor met een kleiner doorstroomprofiel kan worden volstaan bij hetzelfde getijvolume (Van Kleef, 1994).

Vanaf 1971 worden de stortingen van gebaggerd materiaal in het Gat van Ossenissee sterk opgevoerd. Dat bepaalt sindsdien het resulterende transport van sediment uit de geul. Als gevolg van de stortingen wordt de geul te krap ten opzichte van de waterbeweging en het overtollige materiaal dat in de geul is gestort, wordt afgevoerd. Er vindt vrijwel geen permanente berging van sediment plaats. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de Schaar van Valkenisse, waar de stortingen tot verondieping hebben geleid. De inlopen van het Middelgat bij Hansweert en Baarland zijn sterk verondiept. In het centrale deel van het Middelgat verloopt dit proces langzamer (Huijs, 1996).

Naast ontwikkelingen in het middendeel zijn ook veranderingen opgetreden op de Schaar van Spijkerplaat. Deze trekt naar de Pas van Terneuzen en is met 50 miljoen m³ toegenomen.

Aan de randen van het estuarium heeft in het verleden verlanding plaatsgevonden, waardoor inpoldering van deze gebieden mogelijk was. Daarnaast treedt momenteel erosie op van een aantal schorranden, bijv. de schorren bij Waarde en Bath.

4.5. Ingrepen buiten het estuarium

Naast ingrepen in het estuarium wordt het getij in de Westerschelde beïnvloed door ingrepen in de omgeving van het estuarium, zgn. externe ingrepen. Aan de westelijke zijde wordt het estuarium begrensd door de Westerscheldemondd. Ingrepen die hebben plaatsgevonden op de Noordzee en voor de kust beïnvloeden het getij en waterbeweging in het Westerschelde estuarium via de Westerscheldemondd. Daarnaast vormt de rivier de Schelde de bovenstroomse randvoorwaarde. In het onderstaande worden de ingrepen die zijn gepleegd in de Westerscheldemondd, op de Noordzee (en langs de kust) en in de Schelde behandeld.

4.5.1. Op de Noordzee en langs de kust

In het verleden zijn diverse belangrijke menselijke ingrepen langs de Nederlandse kust gepleegd, waaronder een groot aantal in het kader van het Deltaplan. Met uitzondering van de Afsluitdijk zijn binnen het Deltaplan de volgende constructies gerealiseerd, zie afbeelding 4.5:

- Afsluitdijk (1932);
- Stormvloedkering Hollandse IJssel (1958);
- Zandkreeksdam met scheepvaartsluis (1960);
- Veerse-gatdam (1961);
- Grevelingendam (1965);
- Volkerakdam met scheepvaart- en inlaatsluizen (1970);
- Haringvlietdam met uitwateringssluizen en scheepvaartsluis (1971);
- Brouwersdam met doorlaatsluis (1972);
- Markiezaat met Markiezaatsdam (1983);
- Oosterschelddam met stormvloedkering en scheepvaartsluizen (1986);
- Oesterdam met scheepvaartsluis (1986);
- Philipsdam met scheepvaartsluizen (1987);
- lozingsmiddel Zoommeer (1987);
- Kreekraksluizen;
- Zoommeer (1987).

De invloed van de bouw van de stormvloedkering in de Hollandse IJssel op het getij in de Westerschelde wordt verwaarloosbaar verondersteld.

Het afsluiten van de Grevelingen en het Haringvliet blijken slechts een geringe invloed te hebben gehad op het verticale getij in Vlissingen. Door het geheel of gedeeltelijk sluiten van de stormvloedkering in Oosterschelde kan een extra vergroting van het getijverschil verwacht worden (Langendoen, 1987). Bij het volledig sluiten van de stormvloedkering kan er voor Vlissingen een extra vergroting van het getijverschil van 5 cm verwacht worden. Uit berekeningen van Bollebakker (1987) volgt een verschil kleiner dan 2,5 cm tussen gesloten kering en geen kering bij een storm vergelijkbaar met die van 1953.

In tabel 4.5 worden de oorspronkelijke getijvolumina van de verschillende gebieden waar civiele werken zijn uitgevoerd weergegeven. Alleen in de Oosterschelde het getijvolume is door de werken niet gereduceerd tot nul.

Tabel 4.5 Getijvolumes v. gebieden van civiele werken buiten het estuarium (Van de Ven, 1993)

Getijvolume	miljoen m ³
Afsluitdijk Zuiderzee	575
Veerse Gat	70
Haringvliet	260
Brouwershavense Gat	365
Oosterschelde	1.100

4.5.2. Westerscheldemondd

Baggeren en storten

Ten behoeve van de bereikbaarheid van de havens van Zeebrugge en Antwerpen vinden baggeractiviteiten plaats in het mondingsgebied van de Westerschelde, zie afbeelding 4.6a. In de periode 1960-1992 is circa 634 mln m³ specie gebaggerd en vervolgens gestort, ofwel gemiddeld circa 20 mln m³ specie per jaar. De jaarlijkse hoeveelheid loopt op van minder dan 5 mln m³ in 1960 tot circa 45 mln m³ begin tachtiger jaren. Daarna is weer een afname opgetreden tot circa 20 mln m³ per jaar, zie afbeelding 4.6b (Svasek, 1995).

In 1960 werd door de Belgische autoriteiten de ondiepte tussen de Bol van Heist en de Bol van Knokke gebaggerd. Hiermee kreeg de Wielingen een directe aansluiting met het Scheur. Het tracé Wielingen-Scheur is vervolgens door baggeren geschikt gemaakt voor de vaart met grote schepen. Daarbij is bovendien een aftakking gemaakt naar de haven van Zeebrugge, die veel baggerwerk met zich meebracht (Pas van 't Zand). Ook bij de havenontwikkeling zelf is veel baggerspecie vrijgekomen.

De specie is grotendeels gestort op de zeewaartse rand van de ebdelta ten noorden van het Scheur. Hierdoor is de Droogte van Schooneveld verder in zeewaartse richting uitgebouwd.

Uitbouw haven Zeebrugge

Tegelijkertijd met de toename van de baggervolumes tot circa 45 mln m³ per jaar in de periode 1980-1985 is de haven van Zeebrugge zeewaarts uitgebreid. De uitbreiding in de vorm van nieuwe havendammen reikt circa twee km verder in zee dan de oude havenhoofden die zijn aangelegd in 1906 en circa één km in zee staken.

Zeeschelde

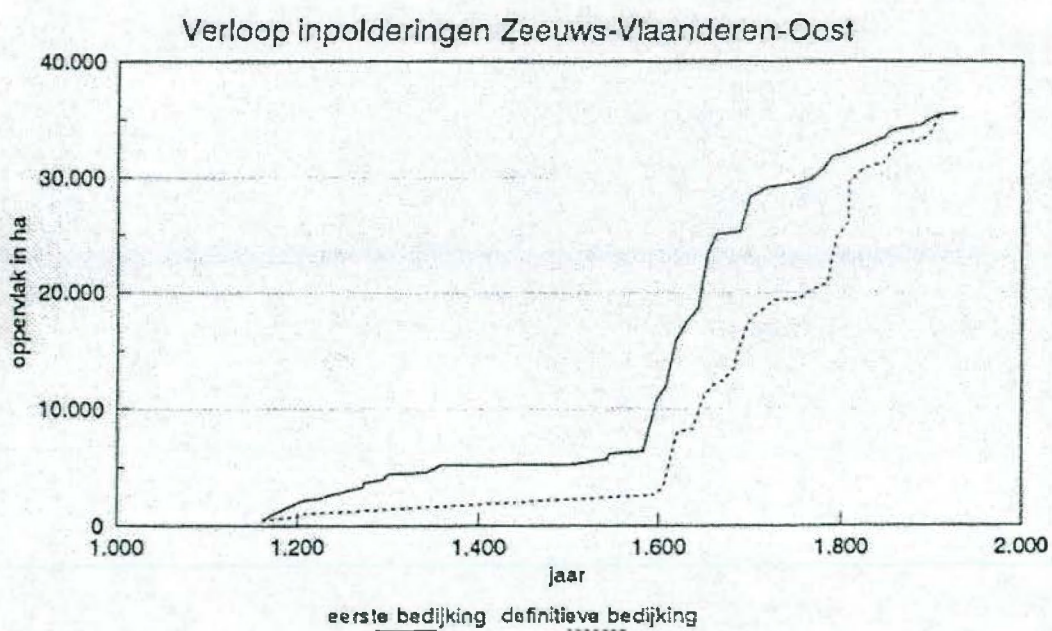
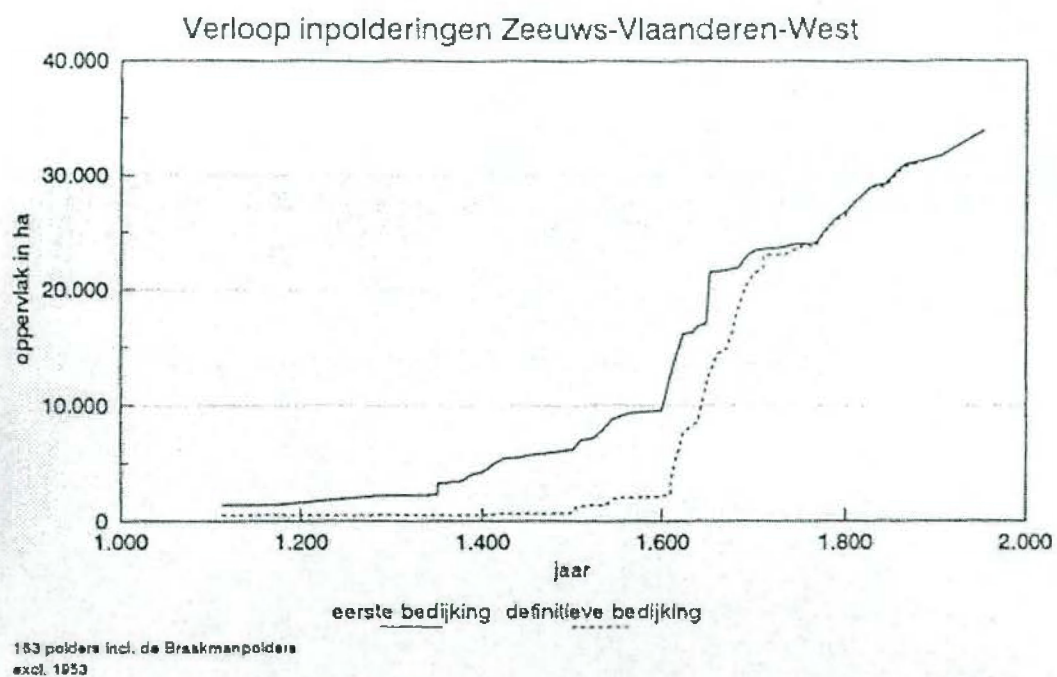
De oostelijke rand van de Westerschelde vormt de rivier de Zeeschelde. In deze paragraaf worden de relevante ingrepen die op en in de Schelde rivier hebben plaatsgevonden beschreven.

Langs de Zeeschelde is het areaal aan intergetigebied afgenomen. Sinds 1900 is het oppervlak aan zoetwater-slikken en -schorren gereduceerd tot eenderde deel, van 750 ha naar 250 ha. Zo is onder meer Prosperpolder ontstaan. In de afgelopen decennia is nog een afname opgetreden door de verslibbing van het bed van de Durme na de afdamming bij Lookeren, door de sedimentatie op de Ballastplaat/Bui-ten-schoor achter de daar aangelegde geleidedam en door de inname van een deel van het Galgen-schoor door de nieuwe containerterminal (Pieters e.a, 1991).

Vanaf 1950 is de Zeeschelde sterk uitgeruimd. Exacte gegevens zijn echter niet beschikbaar.

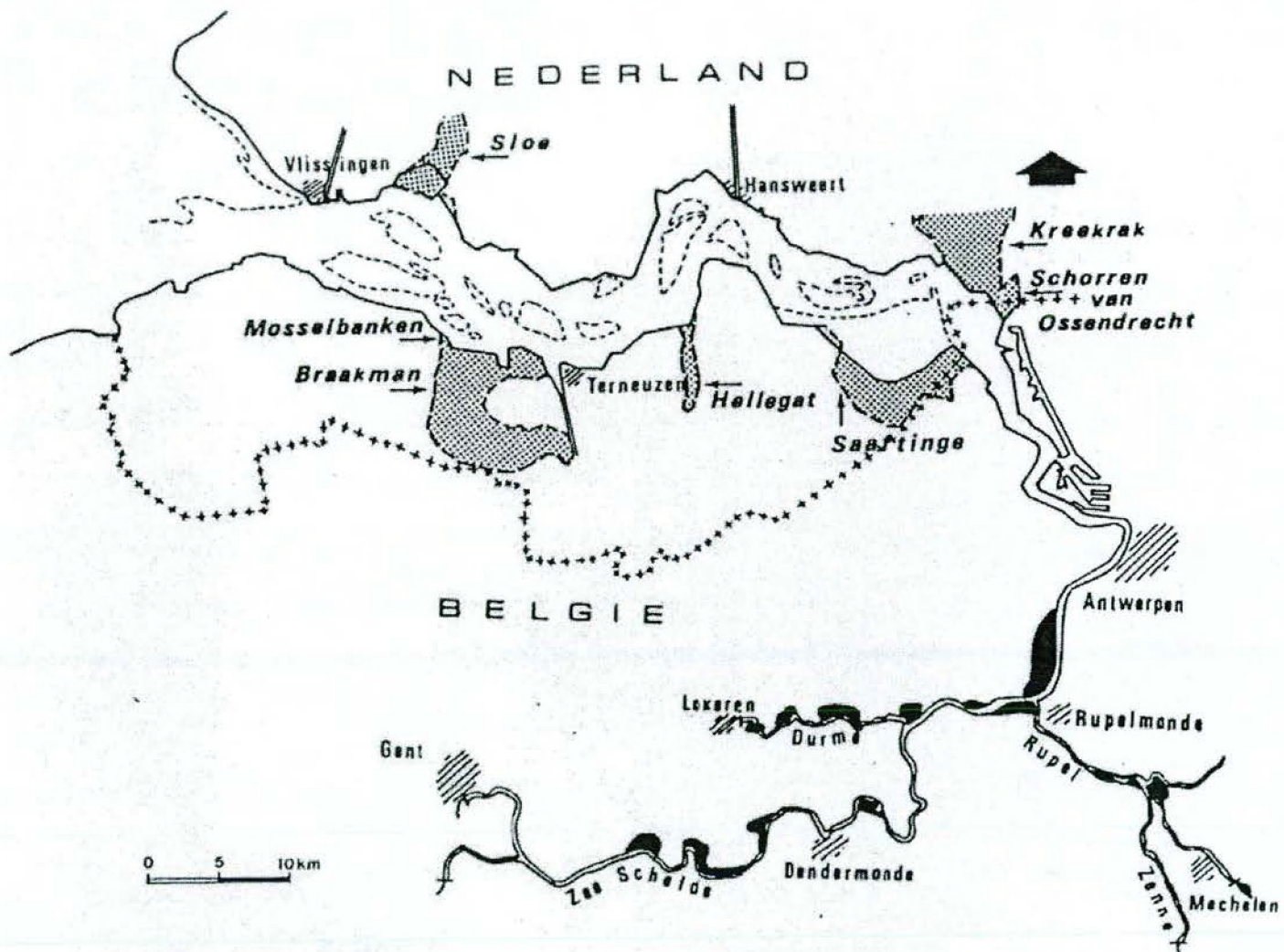
Ter verhoging van de veiligheid van het Zeescheldebekken tegen stormen vanuit de Noordzee en omdat een afdoende verhoging van de dijken langs de Zeeschelde niet overal mogelijk of wenselijk is, wordt in België gestreefd naar verlaging van de hoogwaterstanden door de aanleg van zogenaamde potpolders (Sigma-plan). Dit zijn gecontroleerde overstromingsgebieden, die alleen overlopen bij sterk verhoogde waterstanden. Daardoor zullen de hoogwaterstanden ter plaatse en stroomopwaarts gereduceerd worden. In 1996 was in totaal 571 ha als zodanig ingericht, zie afbeelding 4.2 (Kerstens, 1996). In totaal zullen hiervoor valleien, vroegere winterbeddingen, met een oppervlak van ongeveer 1500 ha worden geselecteerd. In 1991 zijn voor ongeveer 80% de dijkverhogingen volgens het Sigma-plan voltooid (Pieters, 1991).

Afbeelding 4.1. Inpolderingen Zeeuws-Vlaanderen



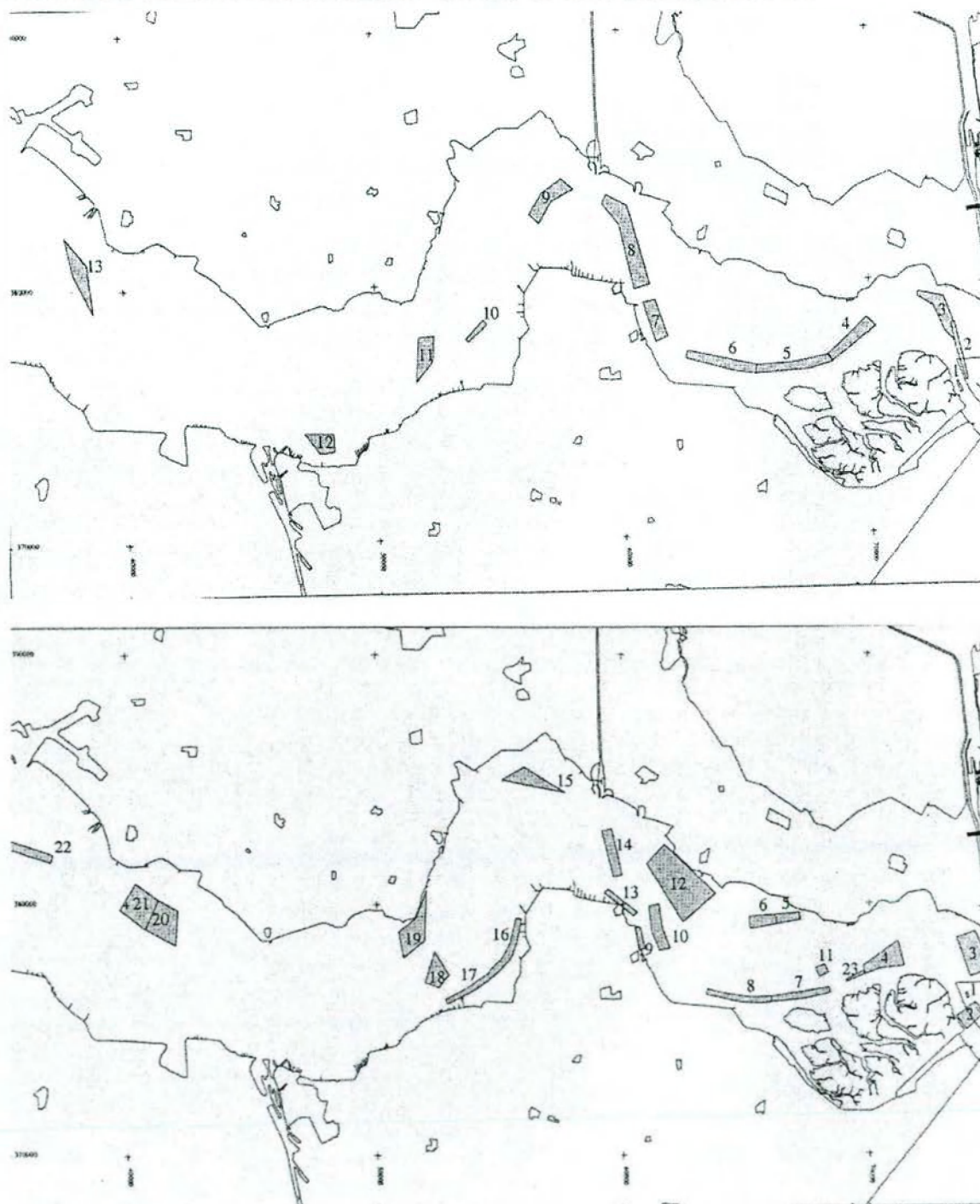
(uit: Mol, 1995)

Atbeelding 4.2. Potentiële potpolders (zwart) langs de Zeeschelde en sinds 1800 ingepolderde gebieden (grijs) langs de Westerschelde



(naar Pieters et al, 1991)

Afbeelding 4.3. Overzicht van bagger- (boven) en stort- (onder) gebieden

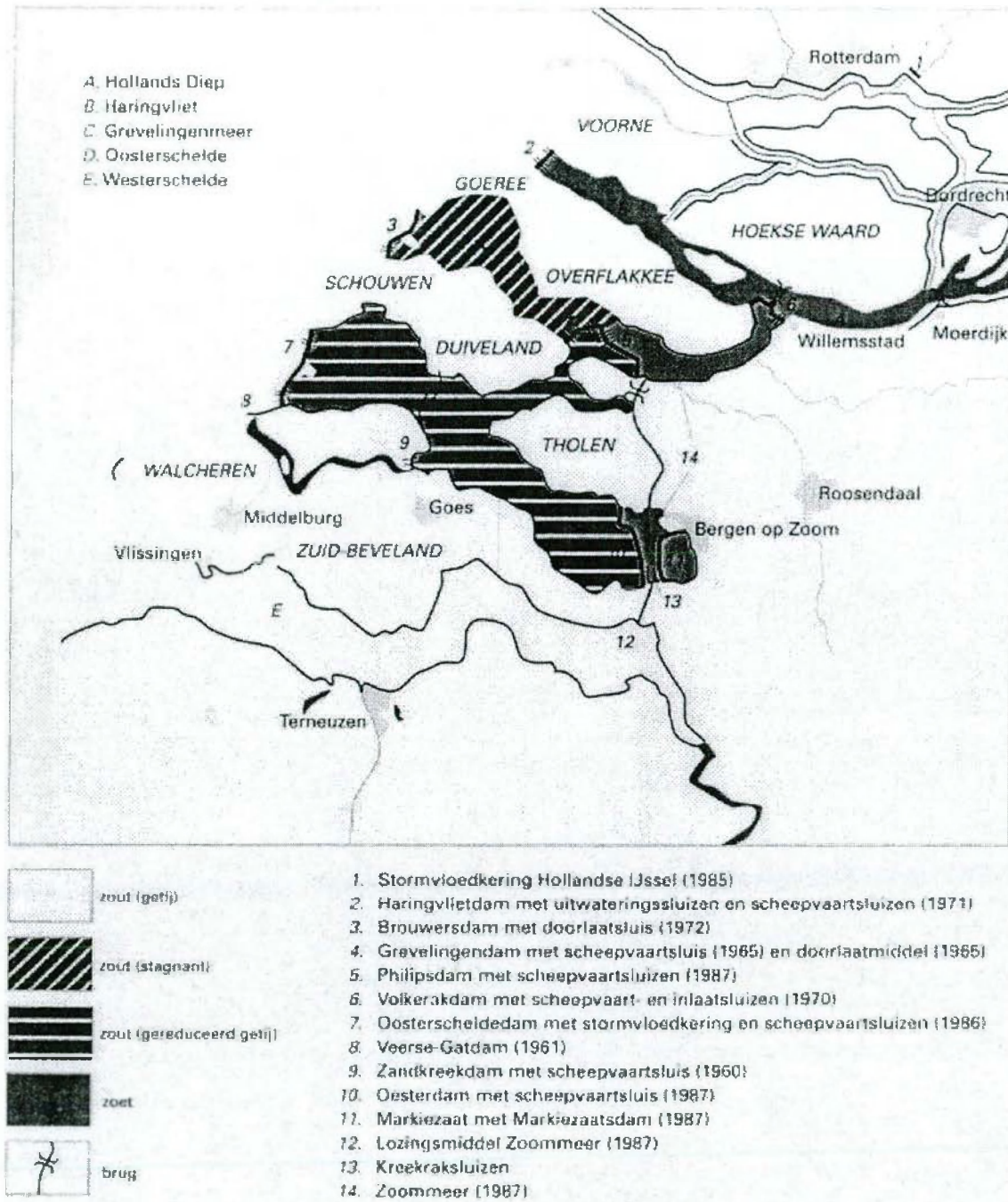


(uit Mol, 1995)

Benaming van bagger- en stortgebieden in afbeelding 4.3

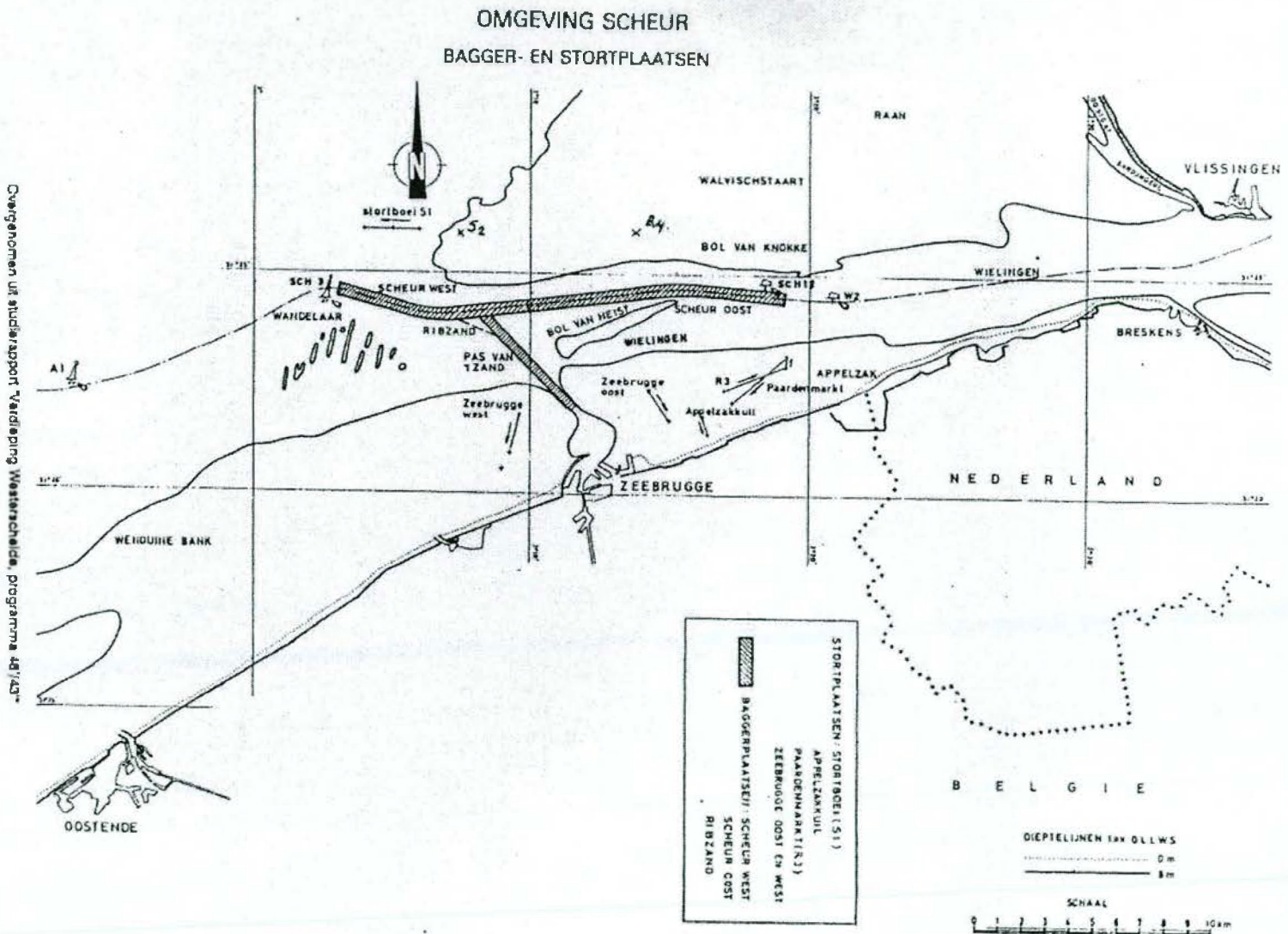
nummer	Baggergebied (bovenste figuur)	Stortgebied (onderste figuur)
1	Zuid-Saeftinge	Leidam Ballastplaat
2	Vaarwater boven Bath en de Ballastplaat	Zinker Grens
3	Drempel van Bath	Appelzak
4	Drempel van Valkenisse	Schaar van de Noord
5	Overloop van Valkenisse	Zimmermangeul Eb
6	Platen van Valkenisse	Zimmermalgeul Vloed
7	Platen van Walsoorden	Konijnenschor
8	Drempel van Hansweert	Baalhoek en Boei
9	Overloop van Hansweert	Slikken van de Walsoorden
10	Platen van Ossenissee	Schaar van Walsoorden
11	Drempel van Baarland	Schaar van Valkenisse
12	Put van Terneuzen	Schaar van Waarde
13	Drempel van Borssele	Perkpolder
14		Platen van Ossenissee
15		Molenplaat
16		Gat van Ossenissee Eb
17		Gat van Ossenissee Vloed
18		Rug van Baarland
19		Ebschaar Everingen
20		Vloedschaar Everingen Eb
21		Vloedschaar Everingen Vloed
22		Schaar van de Spijkerplaat
23		Marlemonsche Platen

Afbeelding 4.5. Ingrepen buiten de Westerschelde



(uit Van de Ven, 1993)

Atbeelding 4.6a. Bagger- en stortlocaties omgeving Scheur

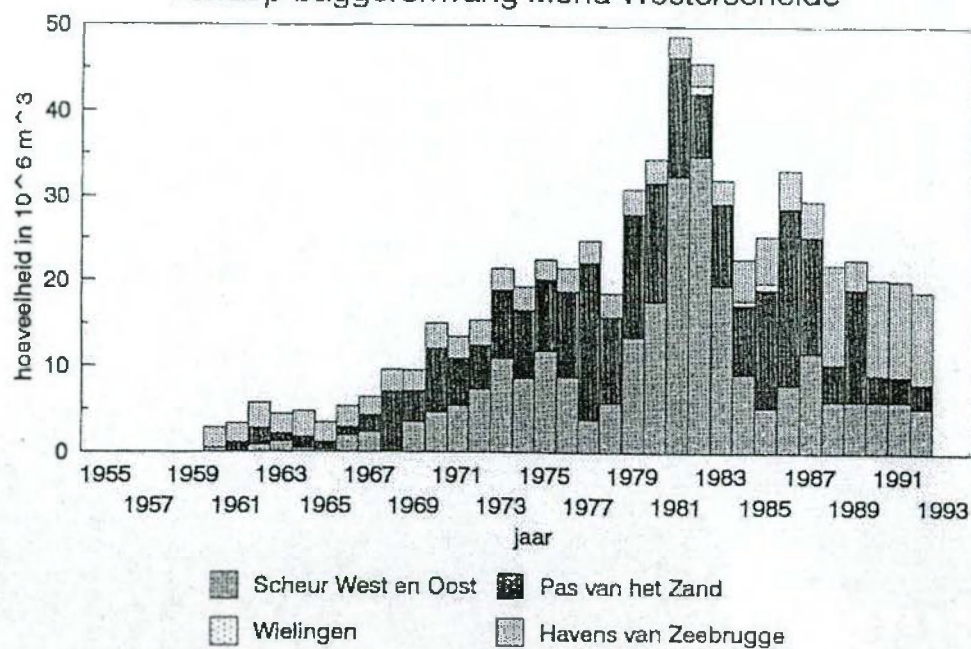


(uit Mol, 1995)

Overgenomen uit studierapport 'Vandieping Westerschelde, programma 48/49'

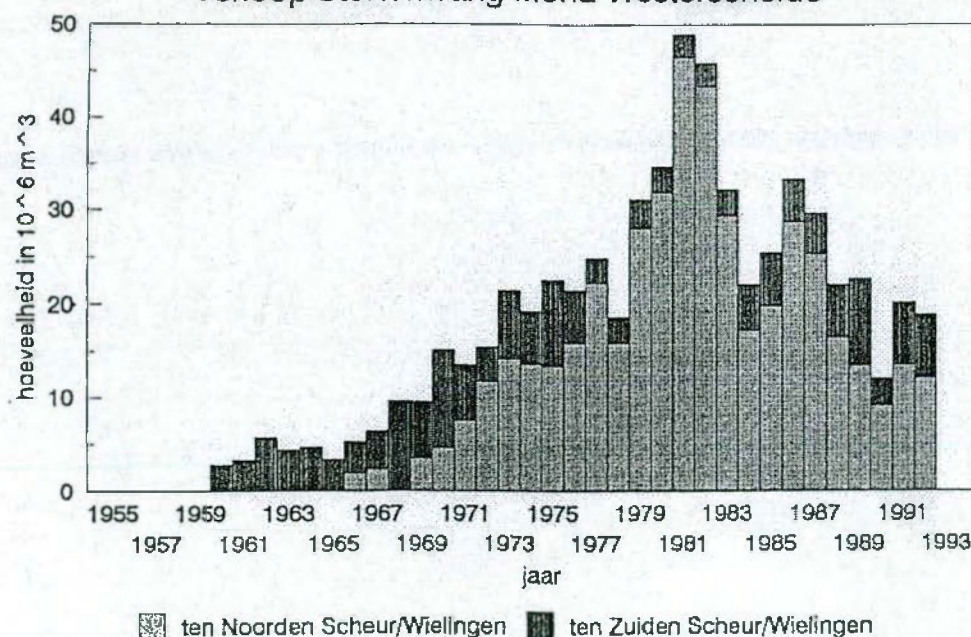
Afbeelding 4.6b. Verloop bagger- en stortomvang mond westerschelde

Verloop Baggeromvang Mond Westerschelde



1955 - 1981 kalenderjaar
 1982 - 1992 1 april tot 31 maart

Verloop Stortomvang Mond Westerschelde



1955 - 1981 kalenderjaar
 1982 - 1992 van 1 april - 31 maart

(uit Mol, 1995)

5. VERBANDEN TUSSEN WATERSTANDEN EN GEOMETRIE

5.1. Inleiding

Verbanden tussen de langjarige ontwikkeling van waterstanden en geleidelijke of plotselinge veranderingen in de geometrie van de Westerschelde worden in het onderhavige hoofdstuk onderzocht.

Dit onderzoek naar verbanden komt erop neer dat is gekeken of:

- momenten waarop (periodes waarin) ingrepen in de geometrie van het estuarium tot stand zijn gekomen (zie inventarisatie Hoofdstuk 4); min of meer samenvallen met significante incidenten (zie Hoofdstuk 3) in de ontwikkeling van waterstanden;
- er in dergelijke gevallen vanuit kwalitatieve theoretische overwegingen aanwijzingen zijn voor een oorzakelijk verband.

Dit onderzoek naar verbanden richt zich op het verloop van het tijverschil dat voor een aantal meetstations bekend is. Deze stations zijn:

- in de Zeeschelde:
 - Antwerpen (antw);
 - Prosper (pros).
- in de Westerschelde:
 - Bath (bath);
 - Hansweert (hans);
 - Terneuzen (tern);
 - Vlissingen (vlis).
- in de monding van de Westerschelde:
 - Cadzand (cadz);
 - Westkapelle (west).

Beide laatste locaties spelen een relatief onbelangrijke rol in het onderzoek omdat ze minder representatief zijn voor wat zich in het estuarium en op de Zeeschelde afspeelt dan de andere locaties.

Allereerst wordt een fenomenologische beschrijving op betrekkelijk grote tijdschaal gegeven van de residuen voor de voornoemde meetstations (paragraaf 5.2). Het gaat daarbij om de vraag of en zo ja, hoe duidelijk, incidenten in de residuen herkenbaar zijn. In daaropvolgende paragrafen concentreren we ons op de mogelijke relatie met inpolderingen (paragraaf 5.3) en andere soorten ingrepen (paragraaf 5.4).

5.2. Fenomenologie op grote tijdschaal

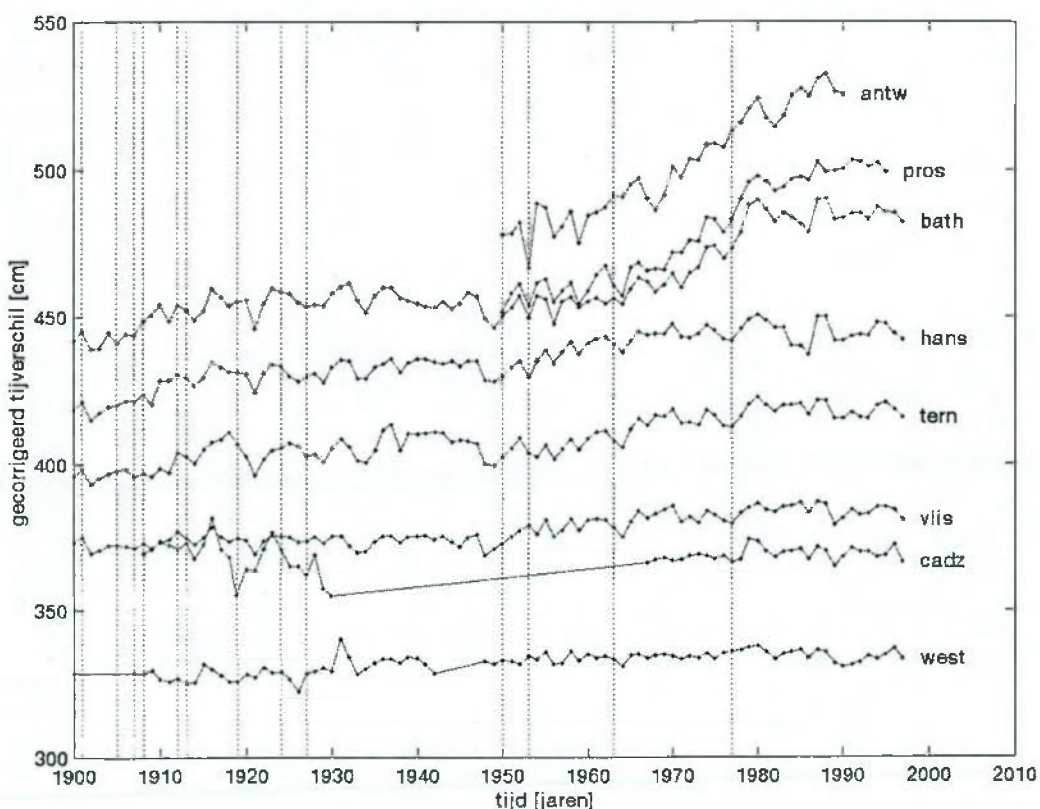
Conform de oorspronkelijke opzet van de studie, zijn de residuen allereerst onderzocht op het voorkomen van discontinuïteiten in het tijverschil. Omdat die niet konden worden herkend in de waarnemingen, is vervolgens in meer algemene zin gezocht naar incidenten in de residuen om zo een indruk te krijgen van het effect van ingrepen op het verloop van waterstanden in de Westerschelde. Het verloop van het gecorrigeerde jaargemiddelde tijverschil voor de acht hierboven vermelde meetstations is weergegeven in afbeelding 5.1.

Zoals aangegeven bij het bepalen van de residuen (bijlage V), bestaat er op hoofdlijnen een duidelijke overeenkomst in het gedrag van het verloop van het tijverschil tussen de locaties Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath. Ook op relatief kleine tijdschaal gaat die overeenkomst op. Een groot deel van de fluctuaties rond de 'grote lijn' in de langjarige ontwikkeling van het tijverschil is, gezien over de vier locaties, vrij goed in fase. Voor zover de beschikbaarheid van waarnemingen dat toelaat, kan worden gesteld dat de overeenkomst er ook is met het getijverschil dat is waargenomen bij Antwerpen en Prosper (zie afbeelding 5.1).

Voor alle meetstations geldt dat de gecorrigeerde signalen (residuen) over het gehele tijdsdomein fluctuaties vertonen met periodes variërend van 3 tot circa 8 jaar. De herkomst van deze fluctuaties is niet duidelijk. Het zou kunnen gaan om elkaar snel opvolgende discontinuïteiten in en om de Westerschelde, maar die veronderstelling is niet consistent met aard, omvang en aantal geïnventariseerde ingrepen (zie het voorgaande hoofdstuk). Er zijn namelijk minder ingrepen in en buiten het estuarium gepleegd dan er afwisselingen zijn van kortdurende stijgende of dalende tendensen in het verloop van de waterstanden.

Een andere mogelijkheid is dat er wel discontinuïteiten zijn, maar dat ze niet herkenbaar zijn in de residuen omdat hun omvang niet toelaat dat ze worden onderscheiden van overige fluctuaties in de ontwikkeling van de waterstand. Een voor de hand liggende derde mogelijkheid is dat er geen discontinuïteiten zijn in de langjarige ontwikkeling van het tijverschil.

Afbeelding 5.1 Verloop van gecorrigeerd jaargemiddeld tijverschil



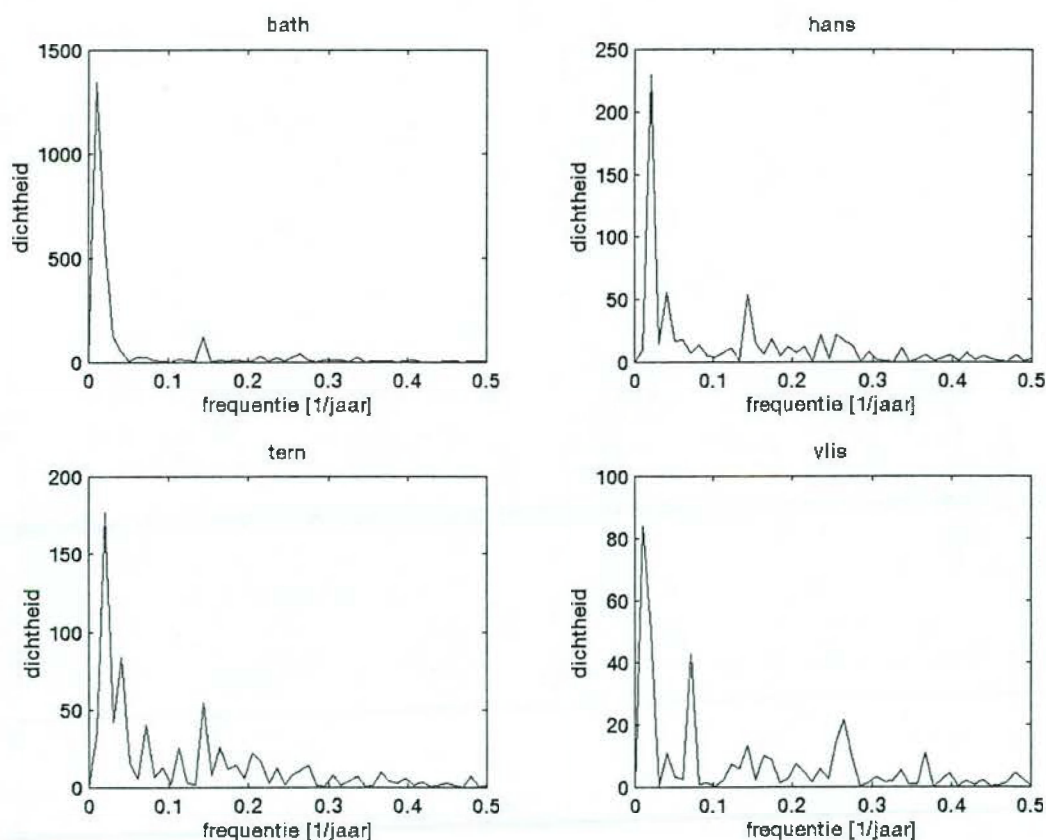
Op een wat grotere tijdschaal dan die van de hiervoor bedoelde fluctuaties zijn aanwijzingen te vinden voor trendbreuken en zijn duidelijke gelijkmatige veranderingen van de trend aanwijsbaar. De signalen voor de locaties Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath kenmerken zich door een stijgende tendens met daarop gesuperponeerd een golfbeweging met een periode van 50 à 100 jaar. De stijgende tendens in het gecorrigeerd tijverschil wordt naar het oosten toe (dus van Vlissingen in de richting van Bath) steeds sterker. Dat geldt ook voor de amplitude van de golfbeweging. Ter illustratie van dit laatste zijn in afbeelding 5.2 spectra gegeven die zijn afgeleid van de signalen voor de vier locaties.

De combinatie van trendmatige verandering en golfbeweging uit zich voor alle vier stations als een stijging van het tijverschil in de eerste circa 25 jaar van deze eeuw. Dan volgt een ongeveer even lange periode waarin het jaargemiddelde tijverschil vrijwel constant blijft (Vlissingen, Hansweert, Terneuzen) of enigszins afneemt (Bath).

Na 1950 doet zich voor alle vier locaties een stijging voor van het tijverschil die sterker is dan in de eerste kwart van de eeuw. Die relatief sterke stijging lijkt naar het einde van de eeuw toe af te nemen, alsof sprake is van asymptotisch gedrag in de ontwikkeling van het tijverschil.

Omdat voor de onderhavige studie de jaargemiddelde waterstanden voor Prosper en Antwerpen alleen voor de tweede helft van deze eeuw beschikbaar zijn, is analyse van het verloop van het tijverschil in deze twee plaatsen beperkt tot de tweede helft van de eeuw. In deze periode treedt een sterke stijging op van het jaargemiddelde tijverschil. Daarmee lijkt de ontwikkeling van de waterstand op de Zeeschelde in overeenstemming met die op de Westerschelde. Het schijnbaar asymptotische gedrag van de ontwikkeling van het tijverschil aan het einde van de eeuw is bij Prosper beter herkenbaar dan bij Antwerpen.

Afbeelding 5.2 Spectra van de residuen voor vier locaties



In algemene zin kan worden gesteld dat het jaargemiddelde tijverschil van west naar oost consequent toeneemt. Dat geldt voor alle jaren waarvoor gegevens beschikbaar zijn gesteld voor de onderhavige studie. Daarnaast valt op dat van west naar oost zowel relatief kortstondige fluctuaties in het tijverschil als de grootschalige golfbeweging in intensiteit toenemen. Het verloop van het jaargemiddelde tijverschil voor West Kapelle is vlakker dan dat voor Vlissingen, en het verloop bij Vlissingen is op zijn beurt weer vlakker dan het verloop dat bij Bath. Jaargemiddeld hoogwater vertoont overeenkomstig gedrag (Dillingh en Heinen, 1994).

5.3. Inpoldering

Tot in het begin van de jaren 20 van deze eeuw is in het oostelijke en het westelijke deel van de Westerschelde fragmentarisch ingepolderd (zie afbeelding 5.1, waarin de verticale stippellijnen jaren markeren waarin inpolderingen zijn gerealiseerd). In de periode 1900-1925 laat het verloop van het jaargemiddelde tijverschil voor de locaties Terneuzen, Hansweert en Bath een geleidelijke stijging zien. Na 1925 volgt een periode van ongeveer 25 jaar waarin niet of nauwelijks is ingepolderd. In deze periode is sprake van een ongeveer gelijkblijvend (west en midden) tot licht dalend (oost) jaargemiddeld tijverschil.

In 1949 is ca. 500 ha ingepolderd (Sloe), gevolgd door nog eens ongeveer 1500 ha (Braakman) in 1953. Deze ingrepen van substantiële omvang vallen samen met het begin van een periode waarin het jaargemiddelde tijverschil niet langer constant blijft of daalt, maar waarin een duidelijke stijging valt waar te nemen. Bij de monding van de Westerschelde is die stijging betrekkelijk gering, maar ze neemt in oostelijke richting consequent toe.

De mate van stijging lijkt rond 1961 bij de inpoldering van 200 ha in het Sloegebied nog toe te nemen. Echter, een oorzakelijk verband is hier mogelijk minder voor de hand liggend dan men zou denken naar aanleiding van het effect van de inpolderingen rond 1950. Een van de redenen hiervoor is dat het om een betrekkelijk klein gebied gaat dat is ingepolderd. Een andere reden is dat zo'n versterkend effect niet consistent is met de waarneming dat de stijging in het jaargemiddelde tijverschil vanaf ca. 1976 weer wat afneemt. In dat jaar is totaal ruim 900 ha ingepolderd (148 ha bij Braakman en 782 ha bij Bath).

De geleidelijke afname van het tempo waarin het jaargemiddelde tijverschil sinds begin jaren 50 is gestegen, kan ook een uiting zijn van een asymptotische morfologische aanpassing van het estuarium aan de omvangrijke inpolderingen die toen zijn gerealiseerd.

In vergelijking tot de respons van het systeem (uitgedrukt in termen van veranderingen in het jaargemiddelde tijverschil) op de inpolderingen van voor 1925, is op de inpolderingen in de periode rond 1950 veel heftiger gereageerd. Dat kan te maken hebben met het ingepolderde oppervlak (1000 ha tussen 1900 en 1925 tegen 2000 ha rond 1950) en het tempo waarmee de inpolderingen zijn uitgevoerd. Daar staat tegenover dat de periode 1900-1925 geen clustering van inpolderingen markeert zoals dat rond 1950 is opgetreden. Ook voor 1900 is geleidelijk maar vrij continu ingepolderd.

Voor het verschil in respons is waarschijnlijk wel van belang dat voor 1925 veel gebieden zijn ingepolderd die als gevolg van (autonome) morfologische processen in het estuarium reeds rond het niveau van gemiddeld hoogwater terecht zijn gekomen. Voor de gebieden die rond 1950 zijn ingepolderd geldt dat niet.

Door de doodtij-springtij cyclus varieert het niveau van hoogwater met een periode van 14 dagen. Als gevolg daarvan zal het aantal hoogwaters dat wordt beïnvloed door de inpoldering van een gebied afnemen naarmate dat gebied op het moment van inpolderen hoger ligt. Dit vertaalt zich direct in de invloed op het jaargemiddelde hoogwater. Met toenemende hoogteligging van het ingepolderde gebied neemt de invloed op het jaargemiddelde hoogwater af. Omdat de inpoldering geen effect heeft op het niveau van laagwater, geldt de afnemende invloed ook voor het jaargemiddelde tijverschil.

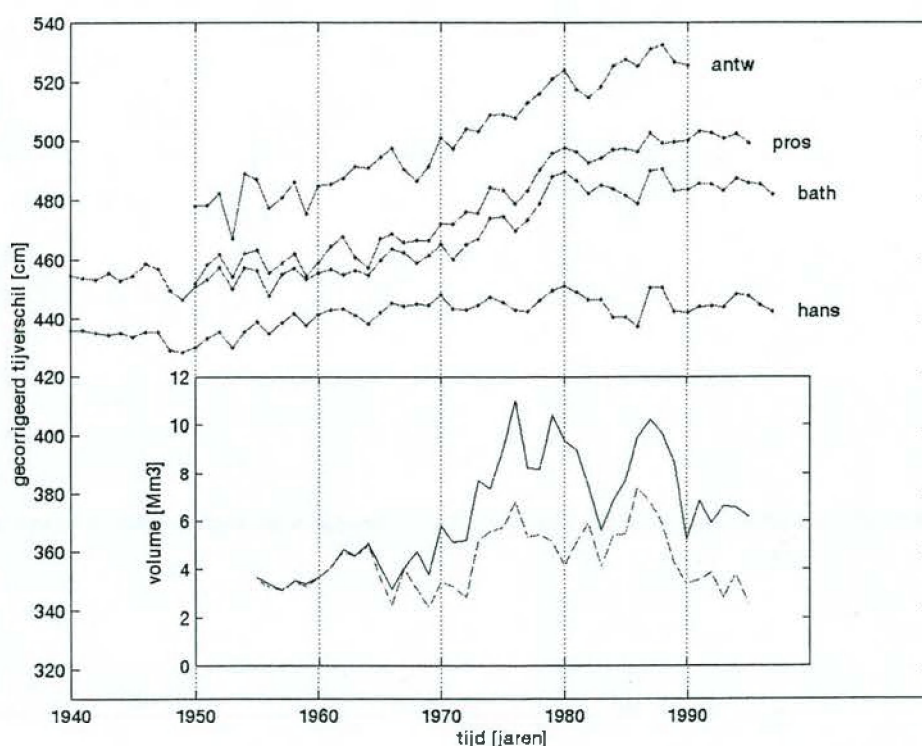
Met het bovenstaande zijn er aanwijzingen voor een verband tussen het verloop van het jaargemiddelde tijverschil en het inpolderen van gebieden in het estuarium. Een inpoldering (verkleining van de komberging) lijkt een proces in gang te zetten dat leidt tot een geleidelijke stijging van het jaargemiddelde tijverschil. Als dat proces niet door steeds nieuwe inpolderingen wordt gestimuleerd, neemt de toename van het jaargemiddelde tijverschil geleidelijk af en kan zelfs een lichte daling optreden. De tijdschaal waarop de waterstanden kennelijk reageren op inpolderingen, duidt op het belang van een morfologische terugkoppeling in dit proces.

5.4. Vaargeulverruiming

De periode waarover gegevens van jaarlijkse bagger- en stortvolumina in de Westerschelde beschikbaar zijn, is aanzienlijk korter dan die voor inpolderingen, namelijk vanaf 1955.

In afbeelding 5.3 zijn de jaarlijkse bagger- en stortvolumina in het oostelijke deel onder het gecorrigeerde jaargemiddelde tijverschil op de Zeeschelde (Antwerpen en Prosper), in het oostelijke deel (Bath) en in het middelste deel (Hansweert) geplaatst. Uit deze afbeelding blijkt dat in de periode 1955-1965 in het oosten nagenoeg evenveel sediment is gebaggerd als gestort; er is geen zand onttrokken. Vanaf omstreeks 1965 wordt in het oostelijke deel gestart met een grootschalige verdieping. Vanaf dat moment bedraagt het baggervolume in het oosten meer dan het stortvolume. Met andere woorden, vanaf 1965 wordt door vaargeulverruiming het oosten verdiept.

Afbeelding 5.3 Gecorrigeerd jaargemiddeld tijverschil en baggervolume (doorgetrokken lijn) en stortvolume (gestippelde lijn) in het oosten

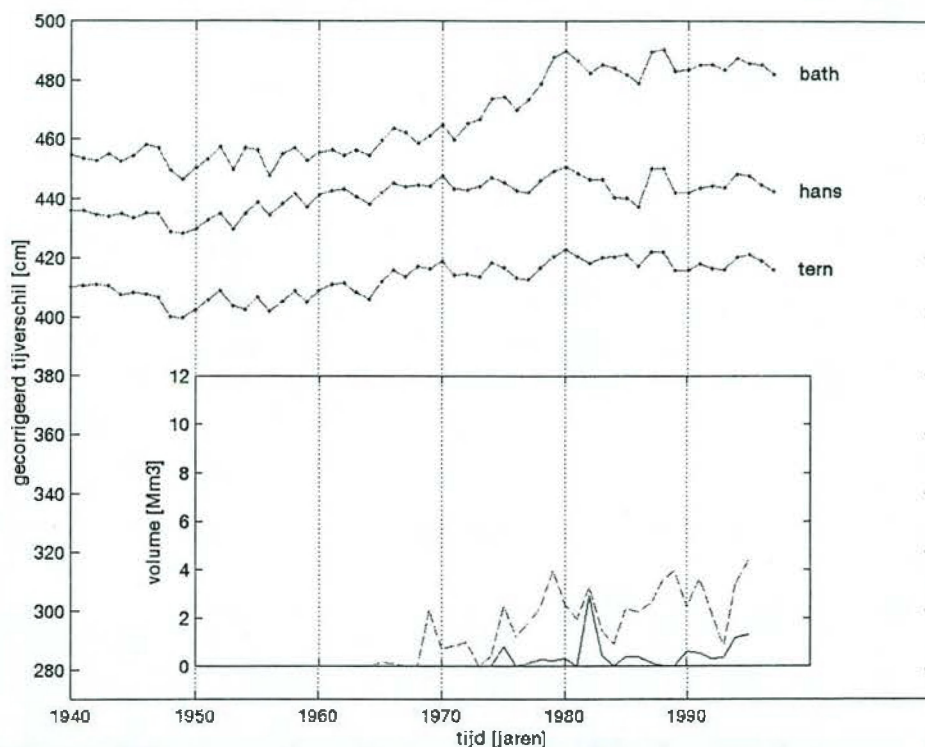


Het onttrokken sediment uit het oostelijke deel wordt in het midden en het westelijke deel van het estuarium gestort. In afbeelding 5.4 zijn de jaarlijkse bagger- en stortvolumina in het midden geplaatst onder de gecorrigeerde tijverschillen in het oosten, midden en westen. De volumina gebaggerd en gestort in het westelijke deel zijn samen met de tijverschillen in het midden en westen van het estuarium, en in de monding weergegeven in afbeelding 5.5. Uit deze afbeeldingen valt af te lezen dat in het midden of westen tot 1969 nauwelijks tot geen bagger- of stortwerkzaamheden hebben plaatsgevonden. Van af 1969 is in het midden van het estuarium netto sediment gestort.

In het westelijke deel van de Westerschelde wordt gedurende de eerste grootschalige vaargeulverruiming in het oosten (tot 1955-1976) meer gebaggerd dan gestort. Hierna draait het om en wordt net zoals in het midden van het estuarium netto materiaal gestort.

Uit het bovenstaande blijkt dat ten gevolge van de vaargeulverruiming het oostelijke deel wordt verdiept, terwijl het midden en westelijke deel van het estuarium verondiepen. De mate van ver(on)dieping in de Westerschelde verschilt per deelgebied. In de eerste plaats wordt in het oosten relatief veel onttrokken aan een relatief klein gebied (klein oppervlak), terwijl in het westen minder wordt gestort op een groter oppervlak.

Afbeelding 5.4 Gecorrigeerd jaargemiddeld tijverschil en baggervolume (doorgetrokken lijn) en stortvolume (gestippelde lijn) in het midden



Ongeveer gelijktijdig met het moment dat de eerste grootschalige verdieping (en onttrekking van materiaal) in het oosten wordt uitgevoerd, is in hetzelfde deel een toename van het gecorrigeerde getijverschil ten opzichte van het tijverschil in het midden en westen waargenomen. Ook aan de Belgische grens bij Prosper en bij Antwerpen is een toename van het tijverschil zichtbaar. In het midden en westen treedt nauwelijks een verandering in het tijverschil op tijdens deze verdieping. De gestorte en/of gebaggerde hoeveelheden zijn in deze twee deelgebieden klein ten opzichte van die in het oosten.

De stijging van het gecorrigeerde tijverschil lijkt rond 1980 na afname van de baggeractiviteiten in het oosten om te slaan in een daling. Een vergelijkbare daling vindt plaats in het midden van het estuarium bij Hansweert. Bij Terneuzen, Vlissingen en in de monding treedt nauwelijks een verandering in het getijverschil op.

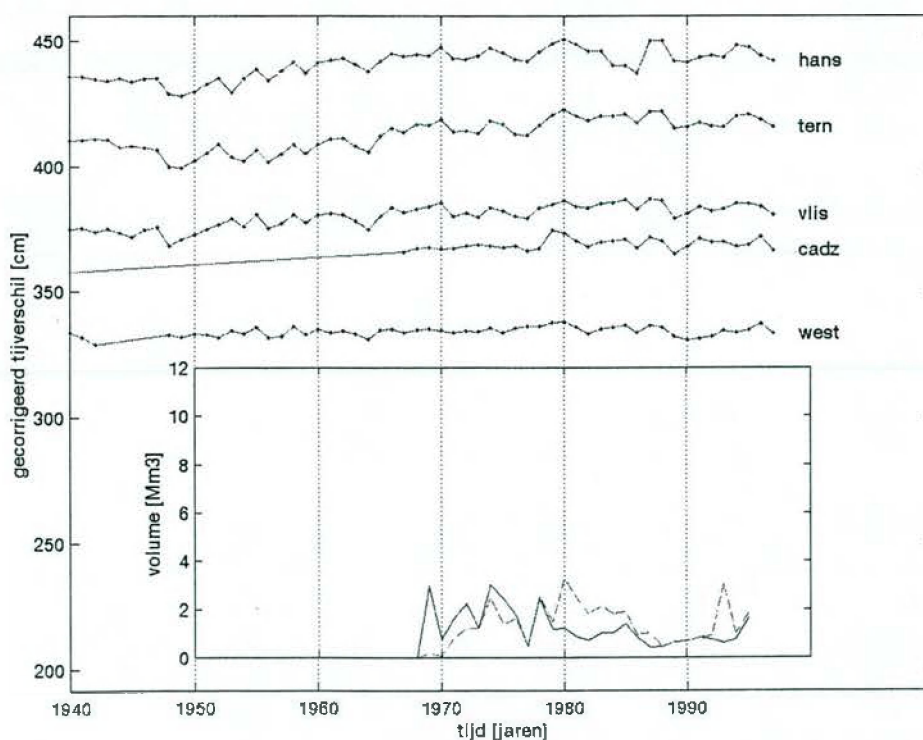
Eind jaren 80 vindt in het oostelijke deel een toename van de baggerinspanning plaats. Deze baggerinspanning is echter van korte duur ten opzichte van bovengenoemde grootschalige verruiming. Bij alle beschouwde meetstations vindt gelijktijdig een kortstondige toename in jaargemiddelde tijverschil plaats. Bij Bath en Hansweert is de toename in de getijslag ongeveer van gelijke grootte. Van de gepleegde baggerinspanning vindt een relatief groot deel plaats bij de Drempel van Hansweert. In westelijke richting neemt de toename van de getijslag af. Nadat de baggerinspanning vervolgens weer afneemt, treedt tevens bij alle meetstations in meer of mindere mate een afname van het tijverschil op.

Uit afbeeldingen 5.4 en 5.5 blijkt dat in het midden, westen en de monding de geometrie van het estuarium door vaargeulverruiming weinig is veranderd ten opzichte van de geometrie in het oosten. Als nu wordt gekeken naar de toename van de getijslag in deze deelgebieden blijkt dat de getijslag in het midden, westen en monding minder toeneemt dan in het oosten en op de Zeeschelde.

Opmerkelijk is dat in 1976, het jaar waarin in het oosten de grootste hoeveelheid zand wordt gebaggerd, een tijdelijke daling van het tijverschil optreedt. In de jaren daaropvolgend daarentegen treedt gelijktijdig met een toename van de baggerinspanning, een toename van de getijslag op. In 1976 vindt tevens inpoldering plaats van bijna 800 ha bij Bath en 150 ha bij Braakman.

Op basis van het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat er aanwijzingen zijn voor een verband tussen het verloop van de getijslag en grootschalige vaargeulverruiming. Dit verband lijkt alleen aanwezig ter plaatse van de grootschalige vaargeulverruiming in het oosten en in de daarvan landwaarts gelegen Zeeschelde. Naarmate het proces van vaargeulverruiming in het oostelijke deel in de loop der tijd vordert, vertoont de getijslag aldaar een toename. Deze toename komt niet, of in ieder geval niet met die intensiteit, voor in het midden en het westelijke deel. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat door de verruiming in het oosten een reductie van de weerstand optreedt. De getijgolf wordt daardoor minder gedempt dan voor de verruiming. In het midden en westelijke deel lijkt de getijgolf minder invloed van de vaargeulverruiming te ondervinden. Waarschijnlijk houdt dit verband met het verschil in volume zand dat is onttrokken of gestort en het horizontale oppervlak van het deelgebied. Vergelijkbaar met inpolderingen geldt dat als dit proces niet door steeds nieuwe verruiming wordt gestimuleerd, de toename van de gecorrigeerde tijverschil afneemt en tot een afname kan leiden.

Afbeelding 5.5 Gecorrigeerd jaargemiddeld tijverschil en baggervolume (doorgetrokken lijn) en stortvolume (gestippelde lijn) in het westen



5.5. Afdamming en erosiebestrijdende maatregelen

Van de afdammingen die eind vorige eeuw bij Sloe en Kreekrak zijn uitgevoerd, kan vanwege hun omvang verwacht worden dat ze van invloed zijn op de waterbeweging en morfologie in de Westerschelde. Het is echter niet mogelijk om die invloed op verantwoorde wijze af te leiden uit de beschikbare gegevens over de ontwikkeling van waterstanden in het estuarium. De reden daarvoor is dat die gegevens betrekking hebben op een periode die rond het moment van afdammen begint. Van voor die tijd is geen informatie beschikbaar. Een tweede reden is dat in de reeksen van jaargemiddelde waterstanden een soort sprong voorkomt met onduidelijke herkomst. Volgens sommigen gaat het om een werkelijk opgetreden verschijnsel omdat het ook wordt aangetroffen bij enkele meetstations langs de Nederlandse kust. Anderen achten het echter niet onwaarschijnlijk dat sprake is van een verandering van het referentie-niveau dat is gebruikt bij registratie van waterstanden.

Erosiebeschermende maatregelen hebben geen directe invloed op waterstanden. Ze onderbreken echter (in ieder geval deels) een morfologisch proces, waardoor de ontwikkeling van waterstanden een gewijzigd verloop te zien kan geven. Ook hiervoor geldt echter dat een eventueel effect zich kennelijk niet laat onderscheiden van de alom aanwezige kortstondige fluctuaties.

6. NUMERIEKE SIMULATIES

6.1. Inleiding

Zoals eerder in dit rapport is aangegeven, is het directe effect op de waterbeweging van veranderingen die in de afgelopen eeuw zijn opgetreden in de geometrie van de Westerschelde niet uit de beschikbare tijdreeksen van jaargemiddelde hoog- en laagwaters valt af te leiden. Dat heeft niet geleid tot twijfel over het bestaan van zo'n effect, maar het is gezien als een indicatie dat analyse van jaargemiddelde waterstanden niet de meest aangewezen methode is om het effect te identificeren. Een mogelijke reden daarvoor is dat de jaargemiddelde waterstanden zijn afgeleid uit waarnemingen en dus informatie bevatten over het totaal aan al of niet simultaan opgetreden geometrische veranderingen. Een andere mogelijke reden is dat het gezochte effect zich niet instantaan manifesteert als een aanpassing van de waterstand, maar dat de waterstand zich aanpast in samenhang met een morfologisch proces dat door een wijziging in de geometrie van het estuarium wordt verlegd of geïnitieerd.

Tegen deze achtergrond is ervoor gekozen om door middel van diagnostische modellering inzicht te verwerven in het geïsoleerde effect (uitgedrukt in termen van veranderingen in waterstanden) van een beperkt aantal specifieke ingrepen in de geometrie van de Westerschelde. Dat wil zeggen dat met behulp van een fysisch-mathematisch stromingsmodel de voortplanting van het getij in de Westerschelde is gesimuleerd voor een serie van realistische, doch fictieve geometrieën. Het fictieve zit daarin dat elke simulatie is gebaseerd op een werkelijke bodemtopografie waarin langs kunstmatige weg een specifieke ingreep is aangebracht. Door de modeluitkomsten voor de diverse simulaties te vergelijken met die voor een bodem waarop geen ingrepen zijn gepleegd, wordt een beeld verkregen van het effect van de betreffende ingrepen op waterstanden.

Om zo goed mogelijk te bereiken dat de diagnostische modeloefeningen representatief zijn voor de Westerschelde, is een werkelijke bodemgeometrie als uitgangspunt gebruikt. Daarvoor is de bodem aangehouden zoals die in 1968 is opgemeten, aangevuld met schattingen ten aanzien van de gebieden die in dat jaar niet zijn bemeten. De diagnostische modelberekeningen zijn toegespitst op gematigde getij- en meteorologische condities. Er is niet gekeken naar springtij of doottij. De randvoorwaarden voor de modelberekeningen worden gevormd door het getij zoals dat begin april 1989 in de monding van de Westerschelde is waargenomen. Voor de diagnostische modellering dient de combinatie van de aangevulde bodem van 1968 en de (getij-)randvoorwaarden voor 1989 als een referentie (zie paragraaf 6.3). Effecten van ingrepen zijn beschreven in termen van de afwijking die zij ten opzichte van deze referentie veroorzaken in hoogwaterstanden.

De ingrepen die bij de modellering in beschouwing zijn genomen, zijn ontleend aan de veranderingen die zich in werkelijkheid in de periode 1968-1978 hebben voorgedaan in de geometrie van de Westerschelde. Voor een deel is deze keuze ingegeven door beschikbaarheid van (veld)gegevens. Daarnaast onderscheidt deze periode zich van andere periodes waarvoor gegevens voorhanden zijn, door een grotere diversiteit en intensiteit aan geometrische veranderingen (zie bijlage 3). De diagnostische modellering is toegespitst op drie typen veranderingen, te weten:

- Verkleining van de komberging als gevolg van inpoldering;
- Vergroting van het stroomvoerend oppervlak door verruiming van de vaargeul;
- Autonome morfologische veranderingen¹.

Ook voor de combinatie van deze drie veranderingen wordt een modelberekening gemaakt. Een en ander wordt nader toegelicht in paragraaf 6.4.

¹ De betekenis van 'autonoom' is dat de beschouwde verandering in de geometrie geen resultaat is van direct menselijk handelen, zoals baggeren en inpolderen.

Vanwege de combinatie van een met de hand gecompleteerde en/of aangepaste bodemtopografie en een getijrandvoorwaarde voor 1988, maakt dat de modeluitkomsten geen afspiegeling zijn van de werkelijkheid. Het is daarom niet op z'n plaats om te verwachten dat de modeluitkomsten nauwkeurig overeen zullen stemmen met waarnemingen. Voor de beoogde diagnostische modellering is dat overigens geen bezwaar. Het gaat er daarbij om een globaal beeld te krijgen van het effect (aard en orde van grootte) van een ingreep in de geometrie van het estuarium, los van interactie met andere ingrepen.

In het navolgende wordt eerste een toelichting gegeven op het gebruikte Westerscheldemodel (paragraaf 6.2). Dit model is door het RIKZ aangeleverd in een WAQUA structuur. Omdat Witteveen+Bos beschikt over het softwarepakket Delft3D-Flow (diepte-gemiddelde stroming), is het aangeleverde model omgezet naar een passende structuur. Het omzetten van de randvoorwaarden, de bodemschematisatie en diverse instellingen wordt in bijlage 7 besproken. Ter verificatie van het deze omzetting worden rekenresultaten die met Delft3D-Flow zijn bereikt, vergeleken met veldwaarnemingen en uitkomsten van het oorspronkelijke WAQUA model (paragraaf 6.2).

In paragraaf 6.5 worden modelresultaten gepresenteerd en de daaruit getrokken conclusies zijn opgenomen in paragraaf 6.6.

6.2. Het Westerscheldemodel

Het Westerscheldemodel waarmee de effecten van bodemveranderingen zijn gesimuleerd, is afgeleid van een bestaand WAQUA model van het RIKZ. De wijze waarop dit is gebeurd, alsmede de aanpassingen die zijn gedaan, zijn in paragraaf 6.3 en Bijlage 7 vermeld.

Met het aldus verkregen model is een simulatie uitgevoerd om te verifiëren of het omzetten vanuit de WAQUA structuur correct is geschied. Hiertoe is het door Delft3D en door WAQUA gesimuleerde waterstandsverloop ter plaatse van de meetstations Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Baalhoek en Bath in de periode 2-10 april 1989 vergeleken met de aldaar waargenomen waterstanden. In de afbeeldingen 6.1a-e zijn de tijdreeksen van modeluitkomsten en waarnemingen grafisch weergegeven. In tabel 6.1 worden de absolute verschillen gegeven voor het hoog- en laagwater op 3 april 1989 's middags en in tabel 6.2 staan de relatieve verschillen vermeld. De WAQUA resultaten in deze tabel zijn overgenomen uit Adema (1998).

Tabel 6.1. hoog en laagwaterstanden (m + NAP) en getijslag (m) op 3 april 's middags

	gemeten			WAQUA			Delft3D		
	HW	LW	getijslag	HW	LW	getijslag	HW	LW	getijslag
meetstation									
Vlissingen	1,83	-1,99	3,82	1,827	-2,008	3,835	1,77	-1,98	3,75
Terneuzen	2,05	-2,11	4,16	2,041	-2,185	4,226	1,95	-2,14	4,09
Hansweert	2,18	-2,29	4,47	2,164	-2,332	4,496	1,99	-2,23	4,22
Baalhoek	2,42	-2,34	4,76	2,319	-2,439	4,758	2,1	-2,31	4,41
Bath	2,47	-2,41	4,88	2,416	-2,499	4,915	2,2	-2,34	4,54

Tabel 6.2 Verschillen met gemeten getij in procenten

meetstation	WAQUA			Delft3D		
	HW	LW	getijslag	HW	LW	getijslag
Vlissingen	0,2%	0,9%	0,4%	3,1%	1,4%	2,2%
Terneuzen	0,4%	3,6%	1,6%	4,5%	2,1%	3,2%
Hansweert	0,7%	1,8%	0,6%	8,0%	4,4%	6,1%
Baalhoek	4,2%	4,2%	0,0%	9,4%	5,3%	7,3%
Bath	2,2%	3,7%	0,7%	8,9%	6,4%	7,6%

De afbeeldingen laten zien dat de voortplantingssnelheid van de getijgolf door de modellen goed wordt gereproduceerd. Er treden geen faseverschillen op tussen het gemeten en het gesimuleerde getij. De hoogwaters worden in het oostelijke deel van de Westerschelde door zowel WAQUA als Delft3D te laag berekend, waarbij de afwijking van Delft3D gemiddeld genomen een factor twee groter is dan de afwijking van WAQUA. In procenten geldt voor WAQUA een maximale afwijking van 4,2% en voor Delft3D een maximale afwijking van 9,4%. Voor de laagwaters geldt voor WAQUA een maximale afwijking van 4,2 % en voor Delft3D een maximale afwijking van 6,4%. Het laagwater bij Terneuzen wordt door Delft3D beter gesimuleerd (2,1% afwijking) dan door WAQUA (3,6% afwijking).

De getijslag wordt door Delft3D met een maximale afwijking van 7,6% ten opzichte van de gemeten getijslag berekend. Voor WAQUA geldt een maximale afwijking van 1,6%, wat vrij laag is omdat de afwijkingen in hoogwater en laagwater elkaar in veel gevallen opheffen (Adema 1998).

De verschillen tussen de resultaten van Delft3D en van WAQUA zijn maximaal voor het hoogwater bij Bath. Het verschil bedraagt daar 6,7% van het gemeten hoogwater. Het is erg onwaarschijnlijk dat dit verschil te wijten is aan een onjuiste modellering van de fysica van het estuarium. Daarvoor is het verschil met het gekalibreerde WAQUA model te klein. Dit verschil kan zeer waarschijnlijk worden gereduceerd door verdere calibratie van het Delft3D model, maar voor de beoogde diagnostische modellering wordt dat niet essentieel geacht.

6.3. Referentie-simulatie

Effecten van veranderingen in de geometrie van de Westerschelde zijn bij de diagnostische modellering beschreven door modeluitkomsten voor twee geometrieën met elkaar te vergelijken. Een van die twee geometrieën is steeds dezelfde en de bijbehorende modelberekening wordt in het navolgende de referentie-simulatie genoemd. Deze geometrie is ontleend aan metingen aan de bodemligging in 1968, waar nodig aangevuld met bodemmetingen uit andere jaren om ook de gebieden die in 1968 niet zijn bemeten te kunnen dekken. Daarbij is als volgt te werk gegaan.

De bodemschematisatie voor de referentie-simulatie is afgeleid van een GIS bestand dat door het RIKZ is aangeleverd. Als eerste is op de GIS kaart het WAQUA rooster geprojecteerd met 783 x 266 roosterpunten. Het roosterpunt (1,1), linksonder, ligt hierbij op de RDV coördinaat (50,371450). Er is rekening gehouden met het gegeven dat Delft3D-Flow (en ook WAQUA) rekent met een zgn. staggered grid. Om de waterstand in locatie (x,y) uit te rekenen maakt Delft3D-Flow gebruik van een dieptepunt op locatie (x+50m, y+50m). Hierop is bij het genereren van de bodemfile geanticipeerd. Op de aldus verkregen bodemfile zijn dezelfde bewerkingen uitgevoerd als hierboven beschreven om tot een 750 x 256 rooster te komen.

De hieruit resulterende bodemfile is nog niet geschikt voor een simulatie. De volgende extra aanpassingen zijn aan deze file gedaan:

- a. Een groot gedeelte in de Westerscheldemond is in 1968 niet gemeten. Dit gedeelte is aangevuld met metingen van het eerstvolgende jaar waarvan bodemgegevens beschikbaar zijn, namelijk 1972. In 1972 is er ook een (veel kleiner) gedeelte niet gemeten. Dit gedeelte is uiteindelijk handmatig aangepast;
- b. Voor alle GIS-bestanden geldt dat het Delft3D-rooster aan de zijde van de Westerscheldemond buiten het bereik van de GIS-kaart valt. Hierdoor is er aan deze zijde een band met een breedte van 19 roosterpunten en een hoogte van 256 roosterpunten waarvoor geen bodem bekend is. Deze band is aangevuld met de waarden uit de eerste kolom waarvoor de bodemligging wel bekend is;
- c. Het Verdrongen land van Saeftinge is in 1968 niet gemeten. Dit gebied is uit de bodemfile voor 1988 gehaald en aan de bodemfile voor 1968 toegevoegd. Tussentijdse veranderingen in het Verdrongen land van Saeftinge worden hiermee verwaarloosd.
- d. De Zeeschelde, zoals in sterk geschematiseerde vorm aanwezig in de bodemfile voor 1988, is in de 1968 bodemfile aangebracht. De aansluiting is niet volkomen gedefinieerd: er zijn wat roosterpunten waarvoor de bodemligging onbekend is. De details van de aansluiting zijn handmatig aangebracht, waarbij naar een zo geleidelijk mogelijke overgang is gestreefd;
- e. Het gebied Ossendrecht, dat in 1976 is ingepolderd, is aangebracht in de bodemfile zodanig dat het bij hoogwater onderloopt. Het niveau van de polder ligt op 1 m boven het nulniveau;
- f. De havens van Vlissingen en van Terneuzen zijn aangebracht. Deze zijn gekopieerd uit de bodemfile van 1988.

De overige invoergegevens zijn ongewijzigd gebleven. Dit houdt dus in dat de simulaties met de bodem van 1968 zijn uitgevoerd met gebruikmaking van de randvoorwaarden voor 2 tot 10 april 1989.

6.4. Definitie van drie typen bodemverandering

Van de geometrische veranderingen die zich in de periode 1968-1978 in werkelijkheid hebben voorgedaan, zijn de volgende elementen in de diagnostische modelberekeningen in beschouwing genomen:

- kombergingsverkleining ten gevolge van inpolderingen bij Bath (Ossendrecht) en bij Braakman (de Mosselbanken), beide in 1976;
- vergroting van het stroomvoerend oppervlak ten gevolge van vaargeulverdieping (baggerwerkzaamheden);
- functiewisseling van het Middelgat en het Gat van Ossenissee enerzijds en het verplaatsen van de Schaar van Spijkerplaat anderzijds (aangeduid als autonome ontwikkeling).

Qua aard worden deze drie elementen (typen bodemveranderingen) redelijk representatief verondersteld voor de ontwikkeling van de bodem van het estuarium. Daarbij moeten de volgende opmerkingen worden gemaakt:

1. Voor wat betreft Inpoldering is aangenomen dat het effect kan worden weergegeven door de betreffende gebieden in het model uit te sluiten van het actieve rekengebied.

2. Voorts is verondersteld dat het effect van autonome ontwikkeling in de Westerschelde wordt gesimuleerd wanneer de bodem van de referentie-simulatie wordt aangepast voor de functiewisseling van het Middelgat en het Gat van Ossensisse enerzijds en het verplaatsen van Splijkerplaat anderzijds. Hiertoe zijn uit de verschilkaart 1968-1978 de veranderingen geselecteerd die zijn opgetreden op de genoemde twee locaties waar de autonome ontwikkelingen worden verondersteld.
3. Er is aangenomen dat effect van baggerwerken ten behoeve van vaargeulverruiming in beeld wordt gebracht wanneer alle bodemveranderingen uit de verschilkaart 1968-1978, met uitzondering van de inpolderingen en de autonome veranderingen, worden meegenomen. Kleinschalige autonome veranderingen die niet als zodanig onder de gespecificeerde autonome ontwikkelingen vallen, worden daarmee ten onrechte bij baggerwerken betrokken. Dit is een gevolg van het feit dat kleinschalige autonome ontwikkelingen niet van bagger-gerelateerde bodemveranderingen te isoleren zijn.
4. In een tweede modelberekening met betrekking tot het effect van baggerwerk, zijn de daaruit voortvloeiende veranderingen in de geometrie op een alternatieve manier uit de verschilkaart 1968-1978 geschat. Hierbij is ervoor gezorgd dat de gesommeerde gebaggerde en gestorte volumes over de periode 1968-1978 overeenkomen met respectievelijk de geërodeerde en de gesedimenteerde volumes. Het betreft een academische benadering die in feite veronderstelt dat het gebaggerde zand voor een blijvende verdieping en het gestorte zand voor een blijvende verondieping van de bodem heeft gezorgd. De her-distributie van gebaggerde en gestorte volumina in verticale zin wordt buiten beschouwing gelaten.
5. Tenslotte is een simulatie uitgevoerd voor de combinatie van de beschouwde drie typen bodemveranderingen. De effecten die volgen uit de simulaties van de afzonderlijke bodemveranderingen kunnen aan deze simulatie worden gerelateerd om zo een indruk te krijgen van het relatieve belang van een specifieke bodemverandering voor het getij.

6.5. Resultaten van de simulaties

Het vergelijk tussen de referentie-simulatie en de overige simulaties is gebaseerd op de hoogte van vijf opeenvolgende hoogwaters, ter plaatse van de meetstations Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Baalhoek en Bath.

Als eerste is geconstateerd dat de verschillen tussen de referentie-simulaties en de simulaties met bodemaanpassingen klein zijn ten opzichte van de resolutie waarmee de uitvoer is weggeschreven. Om de 10 minuten is er een waterstand bekend. In de meeste gevallen is daarom alleen voor en na het opgetreden hoogwater een waterstand weggeschreven. Het exacte maximum ligt daartussenin en is in principe dus onbekend. Om de hoogte van het opgetreden maximum zo nauwkeurig mogelijk vast te stellen is ieder signaal beschreven met een Fourier reeks. Via interpolatie zijn de hoogte en de ligging van de maxima vastgesteld.

Deze maxima zijn vervolgens met de overeenkomende maxima uit de referentie-simulatie vergeleken. Zowel het verschil in hoogwaterniveau als de faseverschuiving zijn bepaald. De resultaten staan in de afbeeldingen 6.2a-e. Iedere kolom in de afbeeldingen bevat de resultaten voor één hoogwater.

6.6. Conclusies

Met behulp van een numeriek model van de Westerschelde zijn de effecten van diverse bodemveranderingen op de waterbeweging gemodelleerd. Deze modellering heeft een diagnostisch karakter. Dat wil zeggen dat de nadruk niet ligt op het zo getrouw mogelijk simuleren van de werkelijk opgetreden veranderingen in het getij, maar in het verkrijgen van inzicht in de effecten van ingrepen op het getij in relatieve zin. Een correcte modellering van de fysica van het estuarium is daarom van primair belang.

Uit een onderling vergelijk tussen modelresultaten van het gebruikte Delft3D model, het WAQUA model waarvan het gebruikte model is afgeleid en metingen, is geconcludeerd dat de fysica van het estuarium op juiste wijze in het model aanwezig is. Het model is daarmee geschikt bevonden voor een diagnostische toepassing.

Modelberekeningen zijn uitgevoerd voor een referentie-bodem (afgeleid van de bodem zoals deze in 1968 is gemeten) en voor fictieve bodems die zijn ontstaan door op deze referentie-bodem een vooraf gekozen type verandering aan te brengen. Het betreft inpolderingen, bagger- en stortwerkzaamheden en autonome ontwikkelingen. Deze bodemaanpassingen zijn uitgevoerd met behulp van de bodemverschilkaart tussen 1968 en 1978. Omdat bodemveranderingen die ten gevolge van bagger- en stortwerkzaamheden zijn opgetreden, niet van autonome ontwikkelingen te isoleren zijn, is het noodzakelijk geweest om op dit punt aannamen te doen. Dit heeft geleid tot een tamelijk grove identificatie van de specifieke bodemveranderingen.

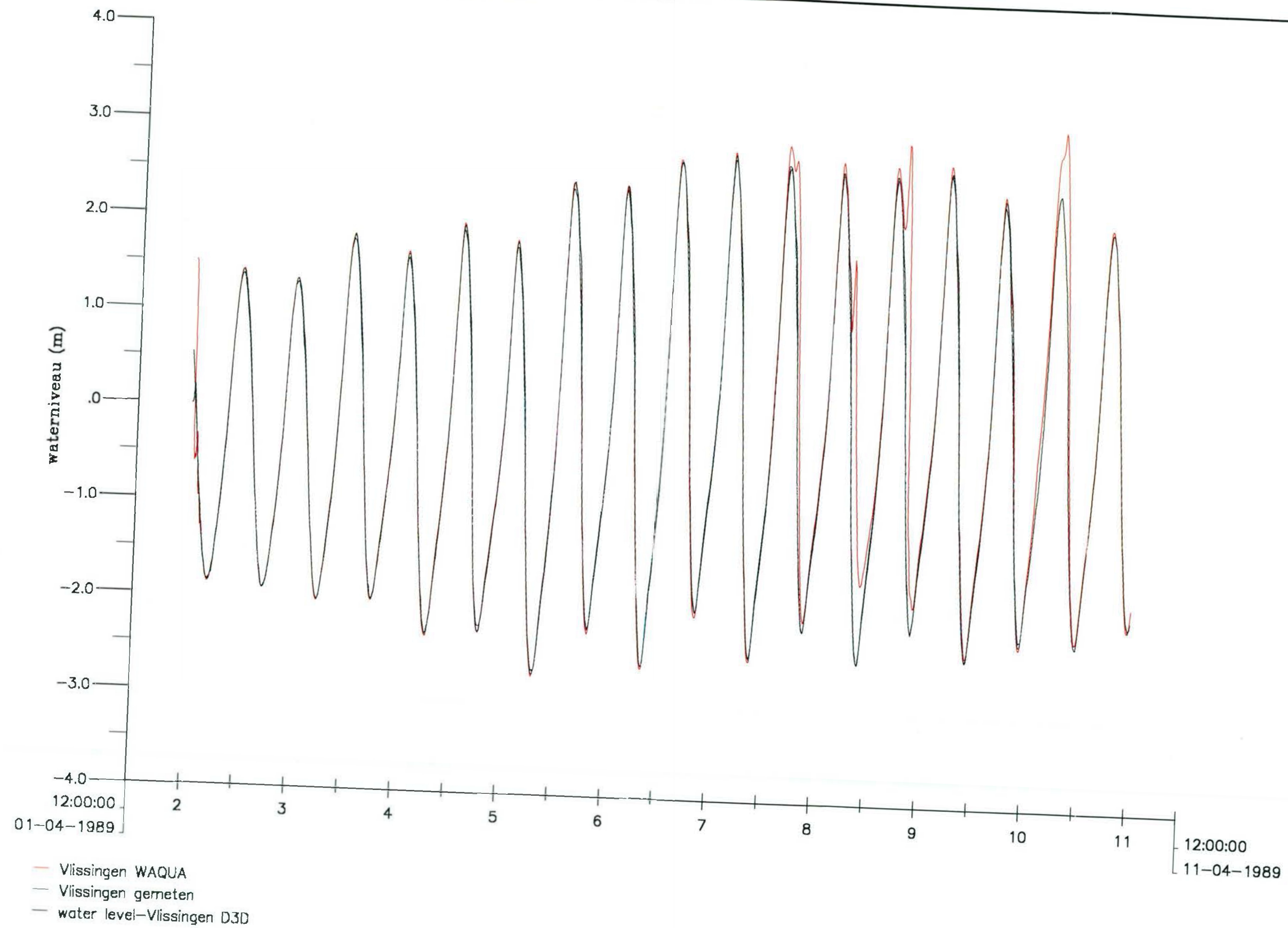
De absolute grootte van de effecten van de bodemaanpassingen kan niet direct worden gerelateerd aan waargenomen, werkelijke veranderingen in waterstanden. De reden daarvoor is dat de diagnostische modelberekeningen zijn gebaseerd op weliswaar realistische, maar desondanks fictieve geometrieën van de Westerschelde. Bovendien is het model niet uitputtend gecalibreerd voor enige werkelijke bodem en bijbehorende randvoorwaarden.

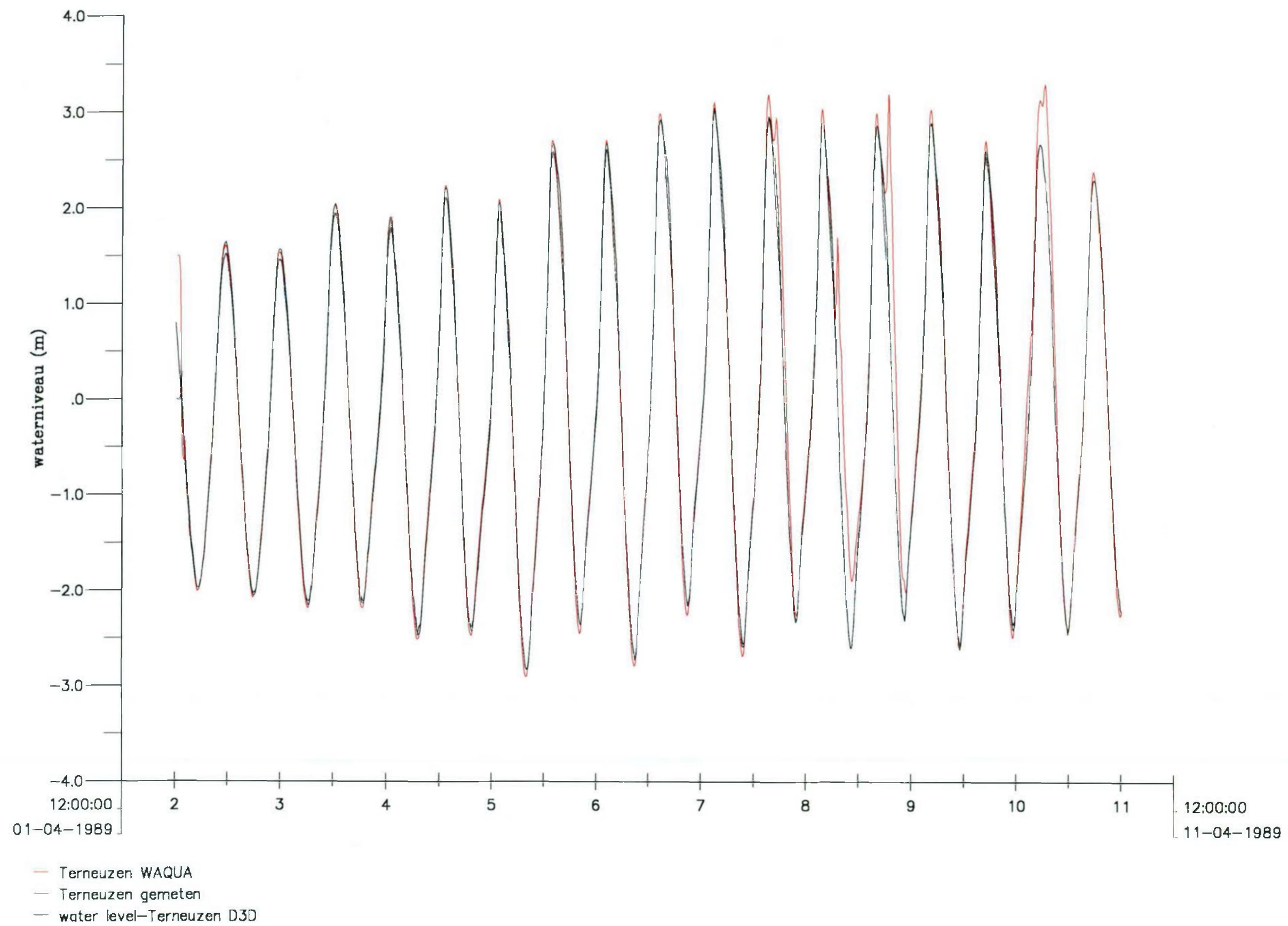
In relatieve zin is de grootte van de effecten van de bodemaanpassingen wel van betekenis. Het geeft een beeld van aard en orde van grootte van het effect van een aantal soorten veranderingen in de bodemligging van het estuarium. Toegespitst op het niveau van hoogwater kunnen uit de diagnostische modelberekeningen de volgende conclusies worden getrokken (zie tevens afbeelding 6.2):

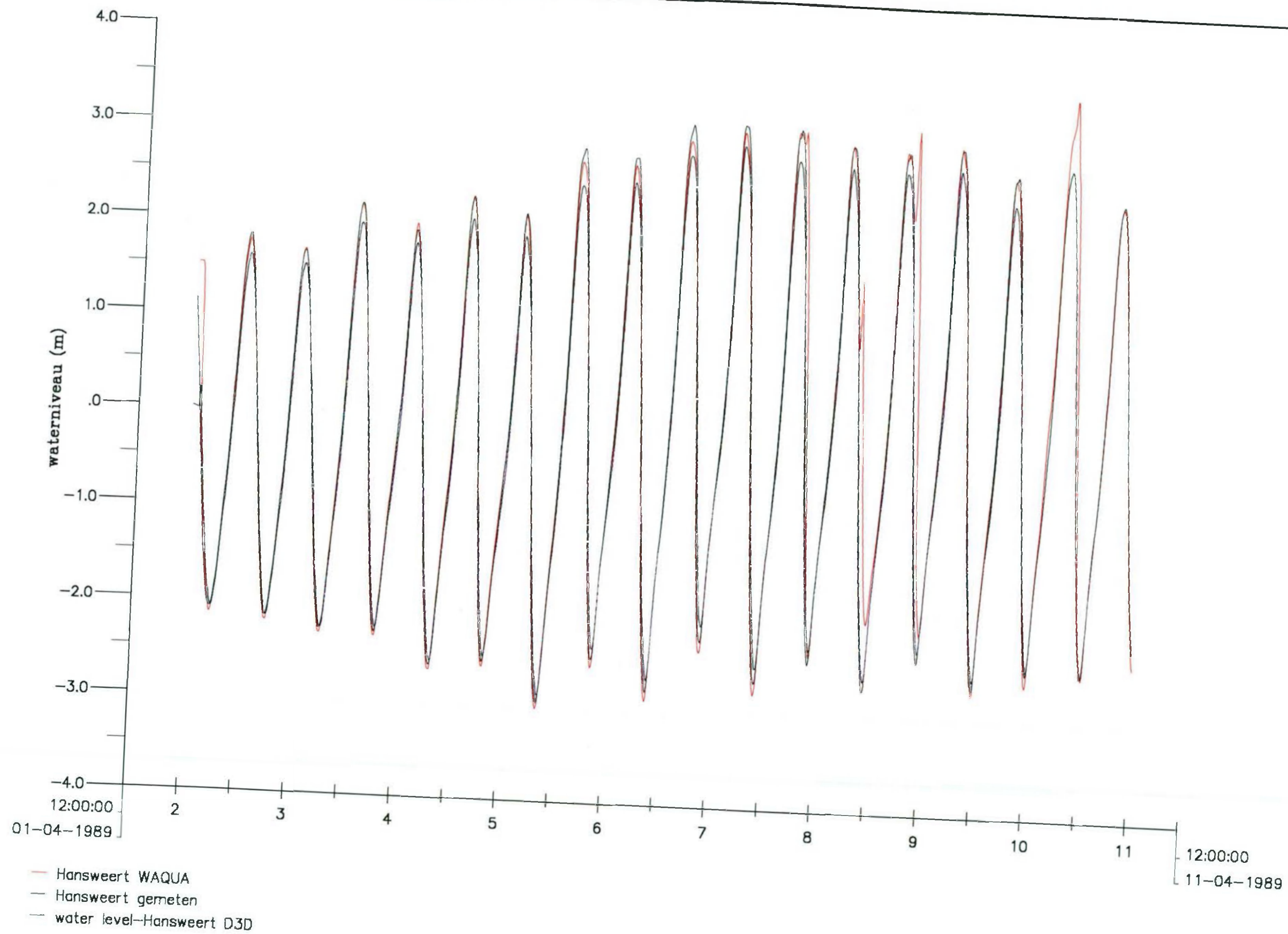
1. Voor iedere bodemverandering (inpoldering, autonome ontwikkeling en baggerwerken) geldt dat de invloed ervan op de hoogte van het hoogwater sterker merkbaar wordt in oostelijke richting (dieper de Westerschelde in).
2. Voor de stations Vlissingen, Terneuzen en Hansweert zijn de verschillen tussen de referentie-simulatie en de overige simulaties erg klein, namelijk in de orde van enkele millimeters. Dit duidt er waarschijnlijk op dat de grootte van de verschillen kleiner is dan de nauwkeurigheid waarmee de verschillen zijn bepaald. Deze stations worden daarom hierna buiten beschouwing gelaten.
3. Voor de stations Baalhoek en Bath zijn de verschillen in de orde van enkele centimeters. Voor beide stations geldt dat de bodemaanpassing voor autonome ontwikkeling het kleinste effect op het hoogwater heeft, maximaal 0,5 cm. Deze bodemaanpassing is dan ook het minst ingrijpend; er is uitsluitend een lokale verplaatsing van platen en geulen toegepast.
4. Bij Bath is het effect van de overige bodemaanpassingen het duidelijkst. Geulverruiming heeft een iets grotere invloed op het hoogwater (ongeveer 1,0 cm verhoging) dan autonome ontwikkeling. Daarna komt inpoldering met ongeveer 2,5 cm verhoging.
5. Het effect van de beschouwde bodemveranderingen gezamenlijk is dat bij Bath het hoogwater gemiddeld ongeveer 3,5 cm stijgt.
6. De geulverruiming met gecumuleerde volumina geeft het grootste effect, hoewel het verschil met de hoogwaters voor de alle bodemveranderingen gezamenlijk gering is.

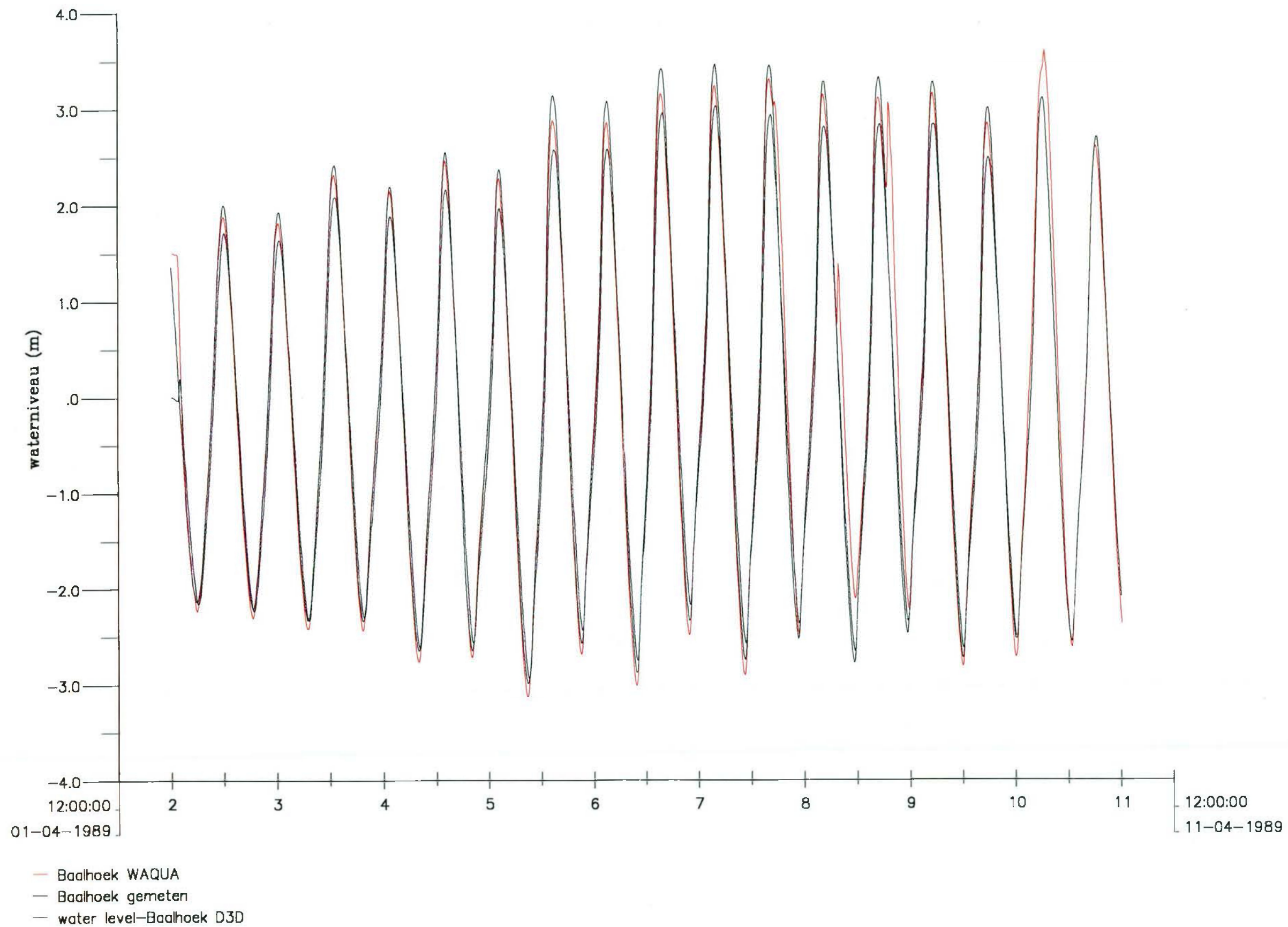
Met betrekking tot de faseverschuiving is op te merken dat er slechts bij uitzondering een faseverschuiving optreedt die groter is dan 1 minuut. Faseverschuivingen die kleiner zijn dan 1 minuut worden niet significant verondersteld omdat deze verschuivingen kleiner zijn dan de resolutie in het tijdsdomein.

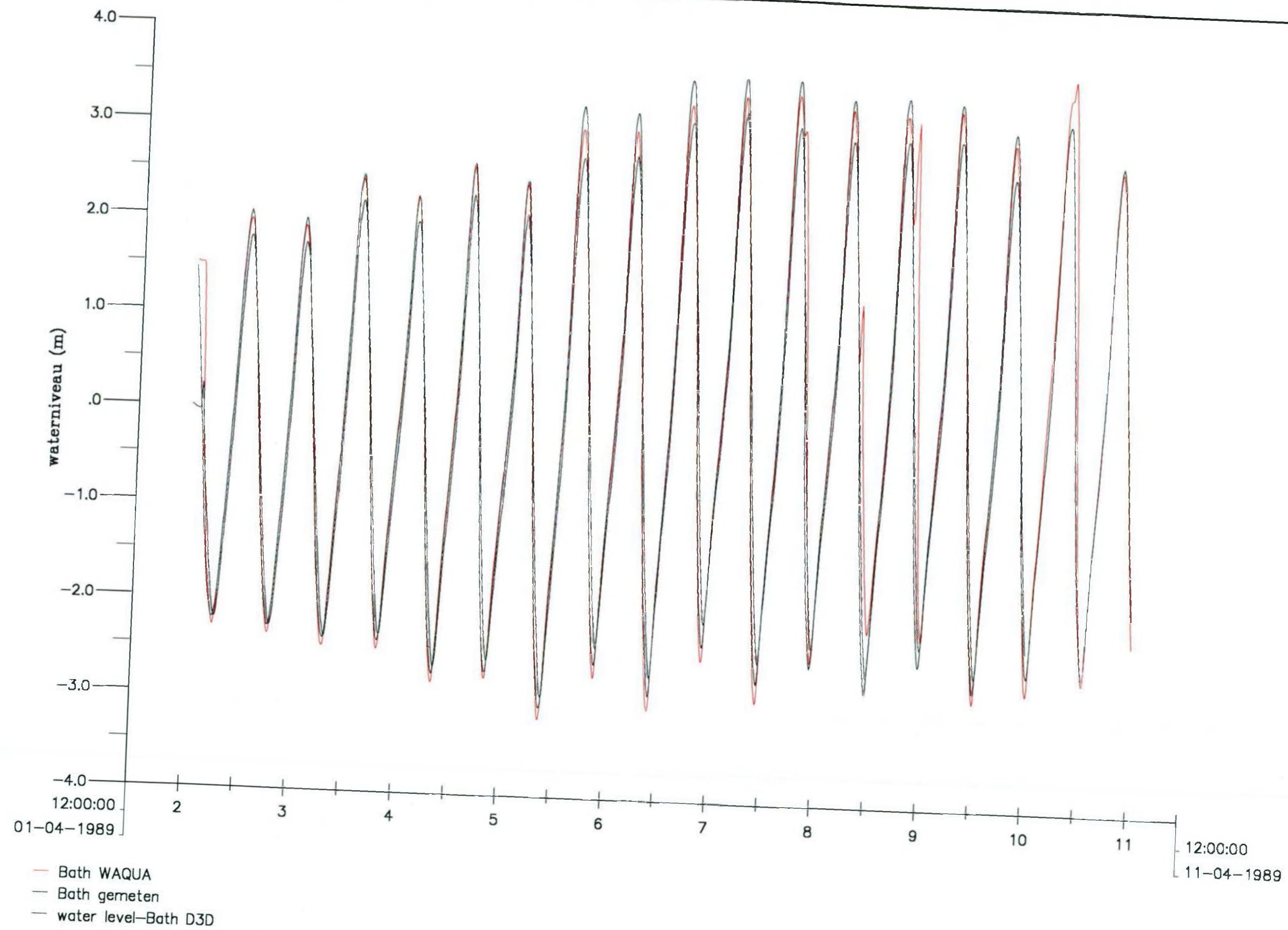
Voorts valt op dat de faseverschuivingen die groter zijn dan 1 minuut slechts voor een enkele getijgolf gelden en niet, zoals te verwachten zou zijn, voor alle opeenvolgende getijgolven. Aangezien het niet aannemelijk is dat een enkele getijgolf, qua amplitude gelijk aan zijn voorganger, een andere voortplantingssnelheid heeft, wordt dit verschijnsel toegeschreven aan onnauwkeurigheden in de berekening van de faseverschuivingen.



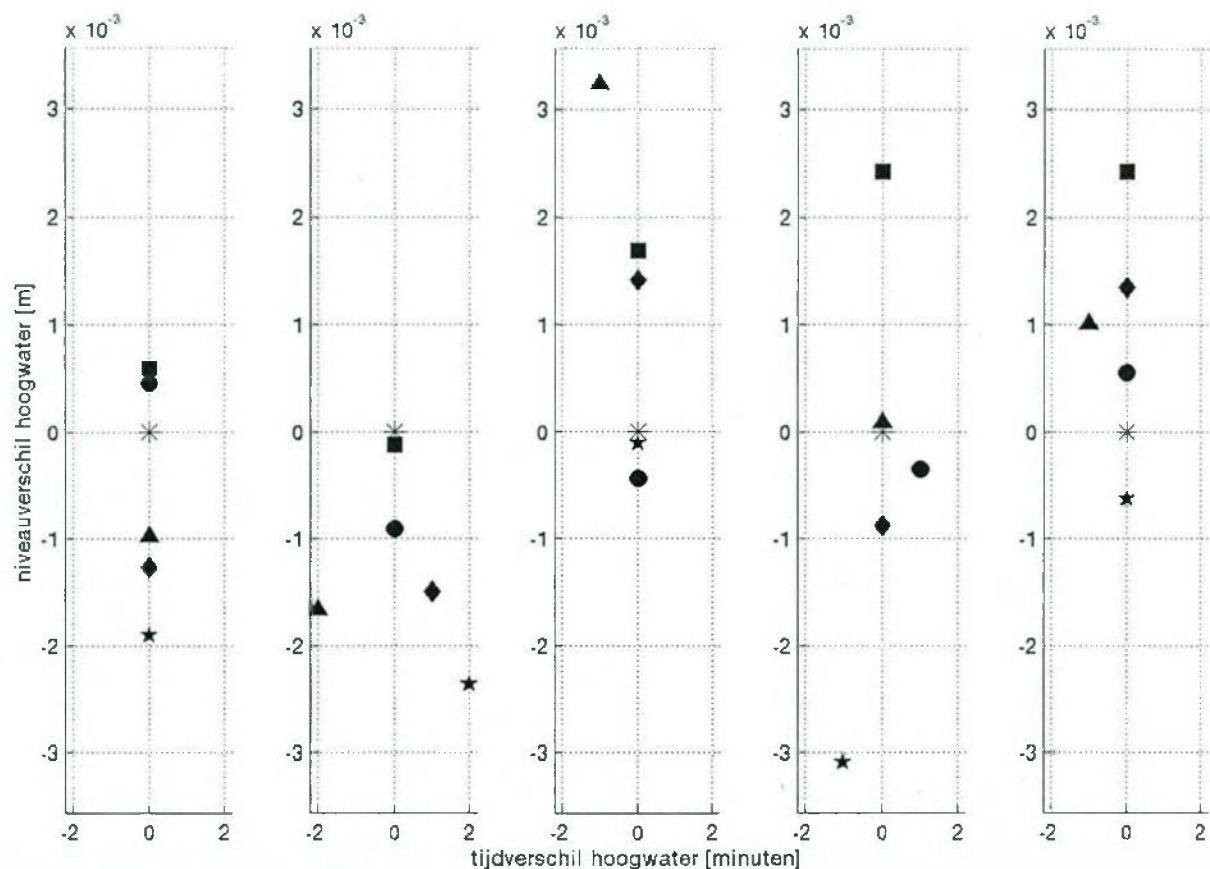








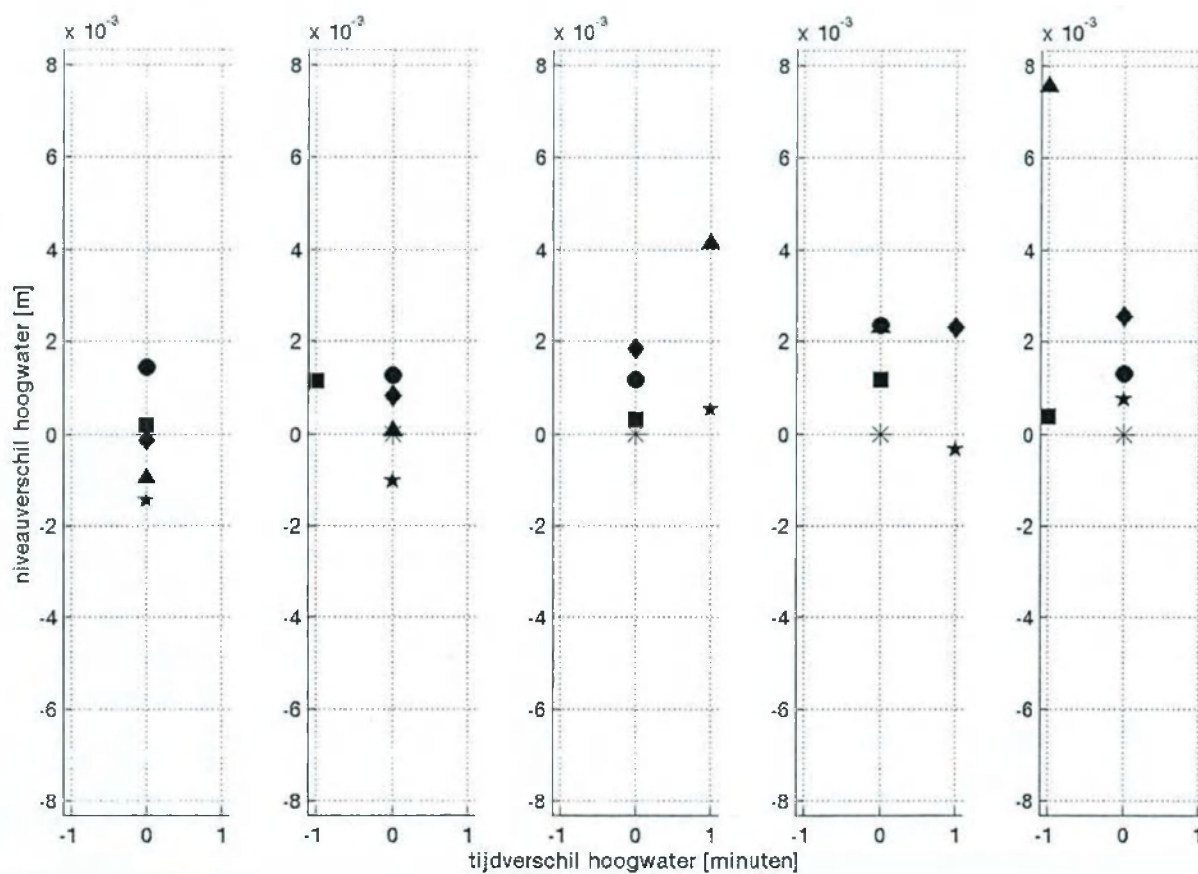
Figuur 6.2a Meetstation Vlissingen



Legenda:

- * referentie simulatie
- ▲ geulverruiming, jaarlijkse bagger- en stortvolumina gecumuleerd
- ★ geulverruiming, netto effect
- inpoldering
- autonome ontwikkeling
- ◆ bodempligging 1978

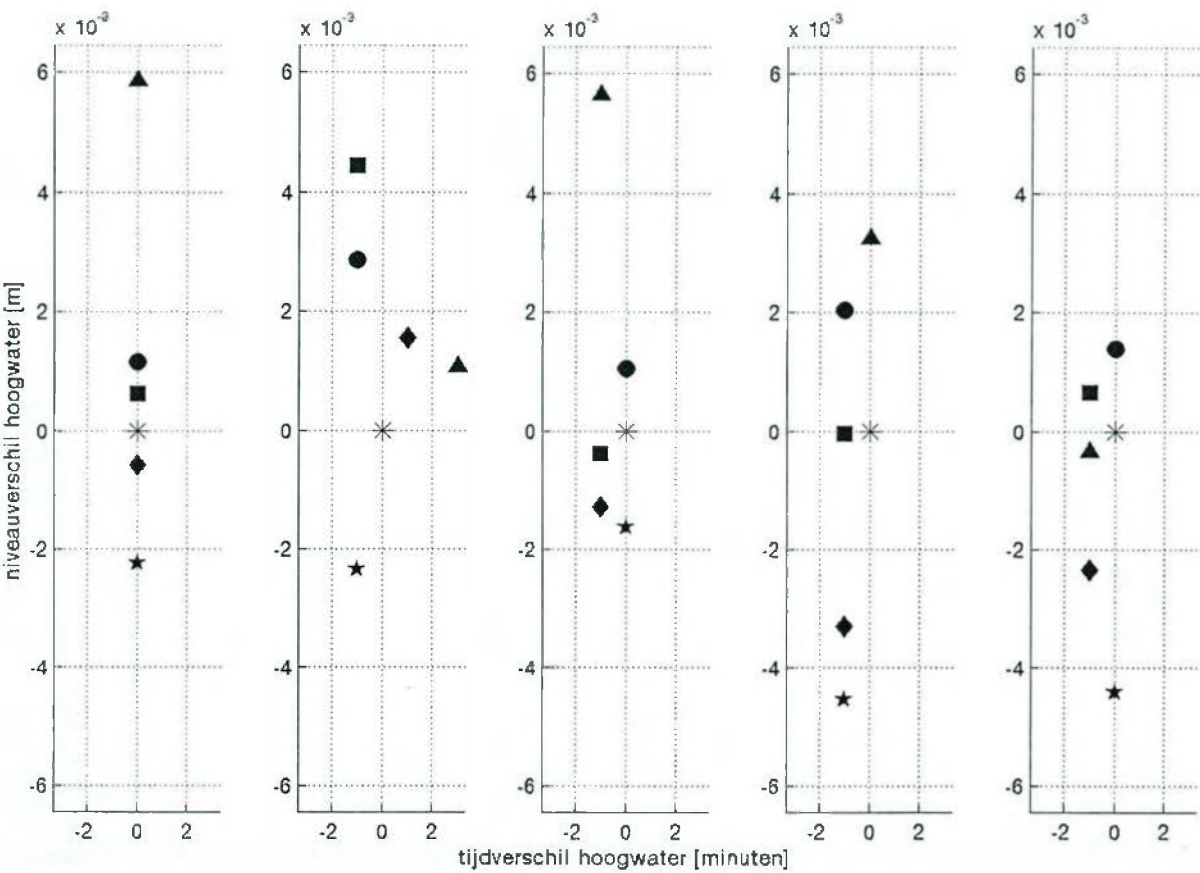
Figuur 6.2b Meetstation Terneuzen



Legenda:

- * referentie simulatie
- ▲ geulverruiming, jaarlijkse bagger- en stortvolumina gecumuleerd
- ★ geulverruiming, netto effect
- inpoldering
- autonome ontwikkeling
- ◆ bodemligging 1978

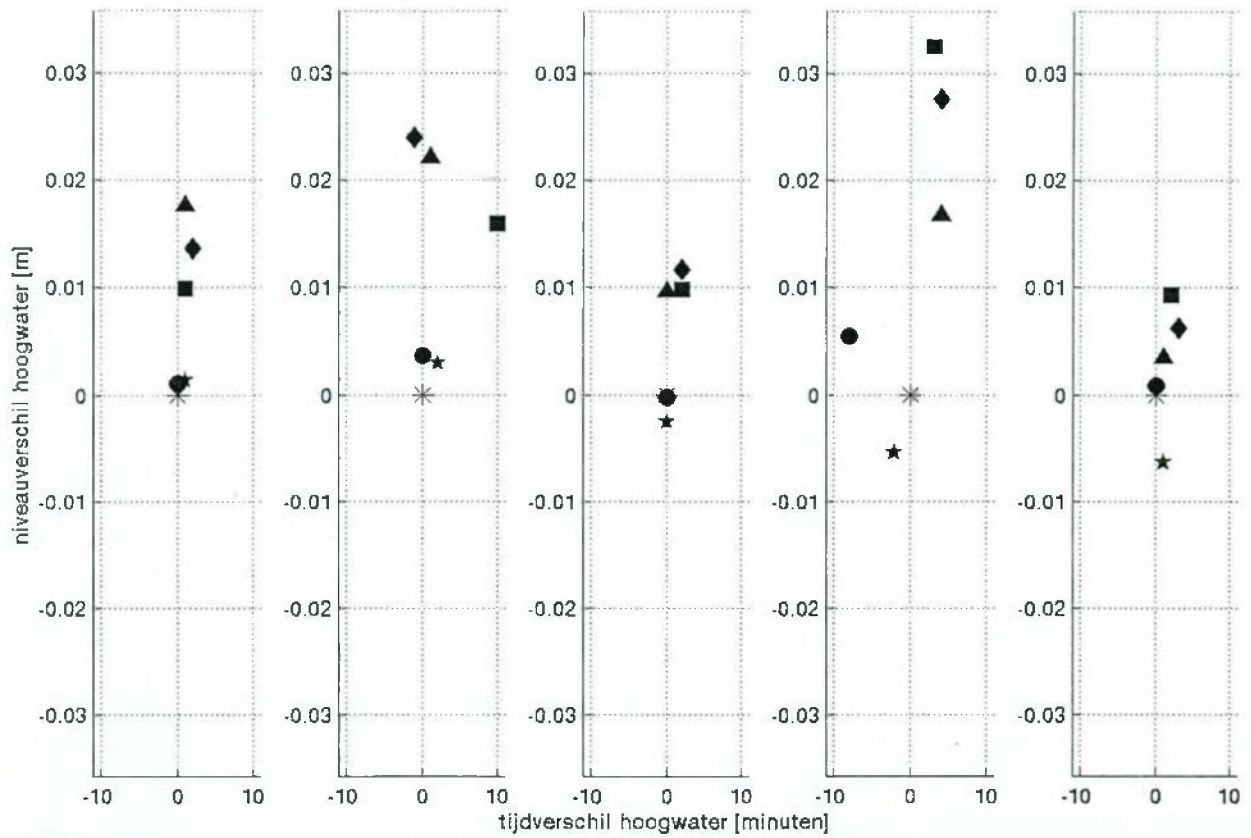
Figuur 6.2c Meetstation Hansweert



Legenda:

- * referentie simulatie
- ▲ geulverruiming, jaarlijkse bagger- en stortvolumina gecumuleerd
- ★ geulverruiming, netto effect
- inpoldering
- autonome ontwikkeling
- ◆ bodemligging 1978

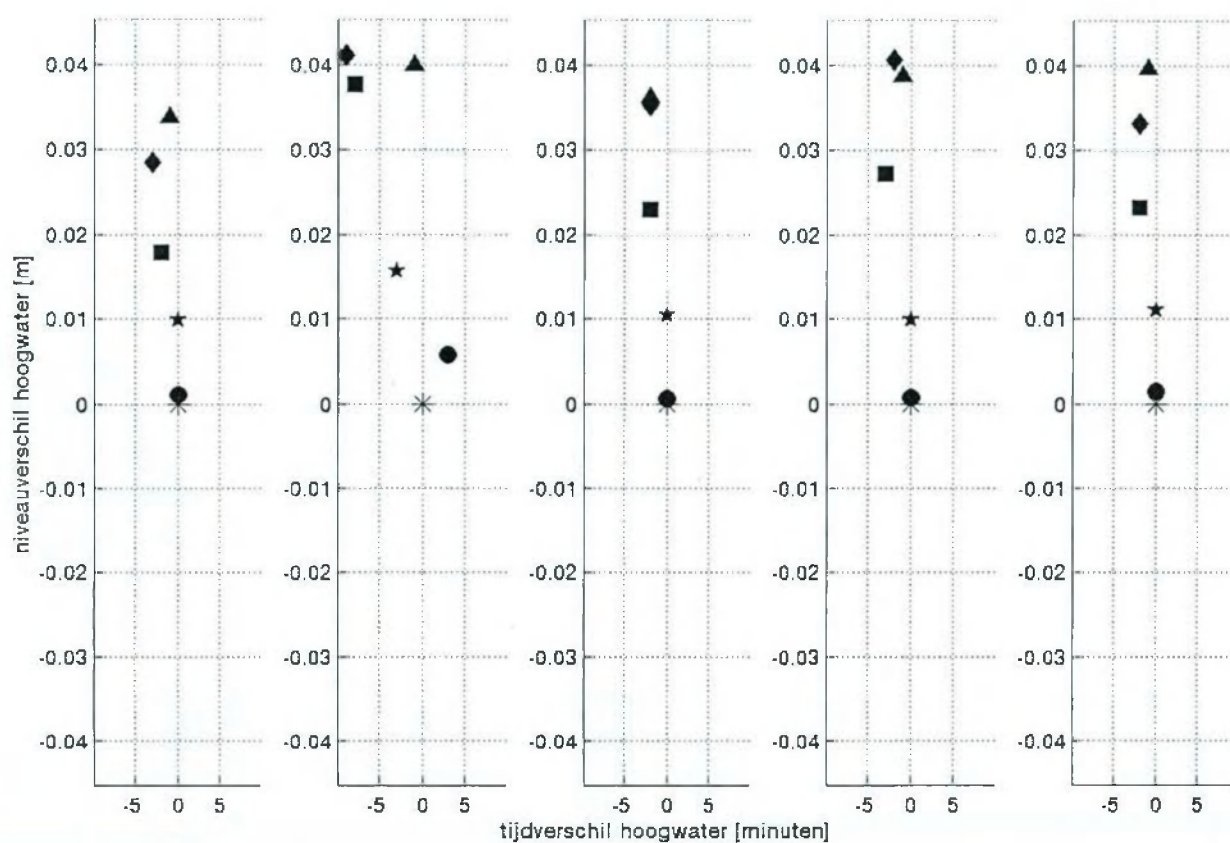
Figuur 6.2d Meetstation Baalhoek



Legenda:

- * referentie simulatie
- ▲ geulverruiming, jaarlijkse bagger- en stortvolumina gecumuleerd
- ★ geulverruiming, netto effect
- inpoldering
- autonome ontwikkeling
- ◆ bodemligging 1978

Figuur 6.2e Meetstation Bath



Legenda:

- * referentie simulatie
- ▲ geulverruiming, jaarlijkse bagger- en stortvolumina gecumuleerd
- ★ geulverruiming, netto effect
- inpoldering
- autonome ontwikkeling
- ◆ bodemligging 1978

7. CONCEPTUEEL MODEL

7.1. Inleiding

De onderhavige studie is erop gericht om oorzaken te achterhalen van de tijdsafhankelijke ontwikkeling van met name de hoogwaterstanden die zich blijkbaar voordoet in de Westerschelde. Om daaraan bij te dragen, wordt in het navolgende een kwalitatieve beschrijving afgeleid van factoren en mechanismen, inclusief hun onderlinge samenhang, die naar verwachting een dominante rol spelen bij het tot stand komen van waterstanden in dit estuarium. Deze beschrijving noemt men in het algemeen een conceptueel model.

Uitgangspunt bij de formulering van het conceptueel model is dat waterstanden in de Westerschelde vooral worden bepaald door de voortplanting van het getij in dit estuarium. De (tijdsafhankelijke) waterstand in het estuarium wordt bepaald door de interactie tussen variaties in de waterstand op de Noordzee (getij, windopzet et cetera) en de geometrie van het estuarium. De afvoer van de Zeeschelde wordt van ondergeschikt belang geacht. Deze benadering van de werkelijkheid laat toe dat de Westerschelde in het conceptueel model wordt gezien als een enkelzijdig gesloten bekken.

Het model is op twee niveaus uitgewerkt:

- niveau 1
Het conceptueel model niveau 1 (CM1) geeft op een hoog abstractieniveau de algemene samenhang weer tussen de kenmerken die van belang zijn voor het getij. In paragraaf 7.2 worden deze kenmerken geïdentificeerd en toegelicht. In paragraaf 7.3 wordt onderscheid gemaakt tussen sturende en volgende kenmerken. Deze paragraaf wordt afgesloten met het CM1. Het CM1 dient vervolgens als basis voor het CM2.
- niveau 2
Het conceptueel model niveau 2 (CM2) geeft inzicht in de effecten van bepaalde geometrische ingrepen in het estuarium op het getij. De aandacht gaat daarbij met name uit naar de beïnvloeding van de (hoog)waterstanden. Het CM2 beoogt daarmee aan te sluiten op de context van deze studie. In deze context staat de vraag centraal in hoeverre ingrepen in de geometrie van het estuarium de veiligheid van het omliggende gebied tegen overstromen beïnvloeden.

In paragraaf 7.4 wordt het algemene karakter van het CM1 afgebakend om het toepassingsgebied van het CM2 vast te leggen. Vervolgens wordt in paragraaf 7.5 het CM2 toegelicht.

7.2. Inventarisatie kenmerken

Het getij zoals het zich manifesteert in het Westerschelde estuarium is het resultaat van geometrische, hydrodynamische en meteorologische kenmerken. Deze worden hieronder benoemd en toegelicht.

7.2.1. Geometrische kenmerken

In de praktijk worden meerdere geometrische kenmerken gebruikt. Deze paragraaf beperkt zich tot drie basis-kenmerken:

- De lengte van het estuarium;
- De bergende breedte in een doorsnede;
- De stroomvoerende oppervlakte in een doorsnede;

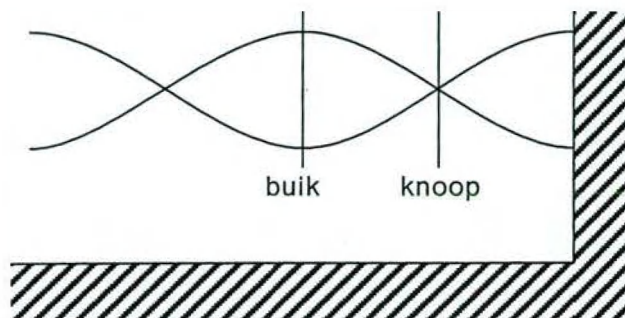
De lengte van het estuarium

De lengte van het estuarium is vooral van belang in verhouding tot de lengte van de getijgolf. Deze verhouding is, samen met de weerstand en de traagheid in het bekken, mede bepalend voor het getij. Dit wordt hieronder toegelicht.

Als de Westerschelde wordt geschematiseerd tot een enkelzijdig gesloten bekken, dan vindt er aan het gesloten uiteinde volledige reflectie van de getijgolf plaats. De gereflecteerde getijgolf interacteert vervolgens met de inkomende golf. Het getij op een bepaalde locatie in het bekken wordt dan volledig bepaald door het faseverschil tussen de inkomende en de gereflecteerde golf en varieert zodoende tussen onderlinge versterking en onderlinge uitdoving van de inkomende en de gereflecteerde golf.

Bij verwaarlozing van de wrijving is de amplitude van de inkomende en van de gereflecteerde golf overal in het estuarium gelijk. In dit geval levert de interactie van inkomende en gereflecteerde golf een symmetrisch patroon op van buiken (volledige versterking) en knopen (volledige uitdoving). In afbeelding 7.1 is dit patroon voor het verticale getij weergegeven.

Afbeelding 7.1 Patroon staande golf in enkelzijdig gesloten bekken



Een dergelijk patroon wordt een staande golf genoemd. De amplitude van een staande golf is tweemaal de amplitude van de inkomende golf. Een staande golf treedt op als er geen wrijving in het bekken is. De lengte van het bekken is hierbij niet van belang.

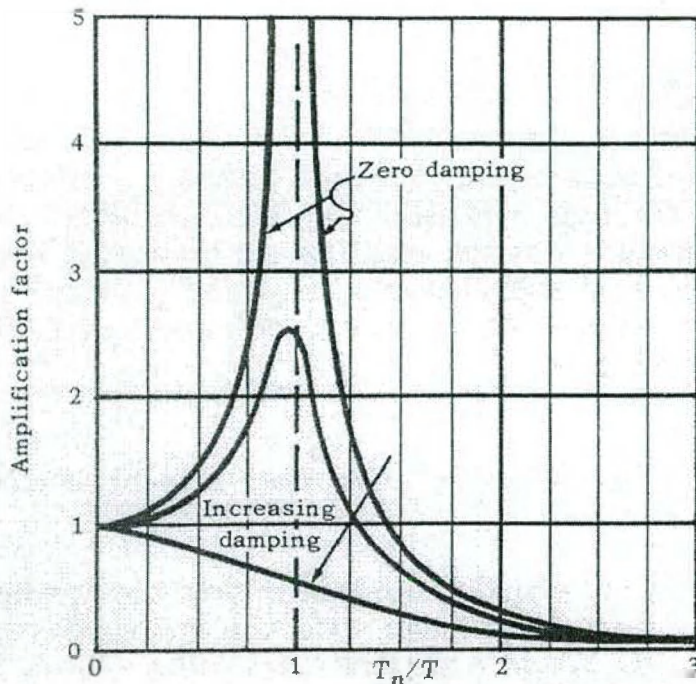
Een speciaal geval doet zich voor wanneer de lengte van het bekken gelijk is aan $1/4$, $3/4$ of $5/4$ van de golflengte. In die gevallen valt de locatie van de monding van het bekken samen met de locatie van een knoop in het verticale getij. De staande golf waarvoor dit geldt, wordt een eigentrilling van het systeem genoemd. De eigentrilling met de laagste frequentie is die waarvoor geldt dat de lengte van het bekken gelijk is aan een kwart golflengte.

Als de frequentie van het aangeboden getij op de monding zodanig is dat het bekken in eigentrilling wordt gebracht, dan treedt resonantie op. Zonder wrijving leidt resonantie tot oneindig hoge amplitudes. De wrijving dempt dus de resonantie. Daarnaast verschuift ten gevolge van wrijving de eigenfrequentie van het bekken.

De bekkenlengte van de Westerschelde komt ongeveer overeen met een kwart van de golflengte van de getijgolf. Dit zou er op kunnen duiden dat er in de Westerschelde sprake is van een gedempte resonantie.

In afbeelding 7.2 is de dempende invloed van de wrijving op resonantie weergegeven. Wanneer de wrijving relatief groot wordt, speelt resonantie geen rol meer, ook al is aan de voorwaarden voor resonantie voldaan.

Afbeelding 7.2 Invloed wrijving op resonantie (Ippen, 1966)



Via damping van de getijamplitude leidt bodemwrijving eveneens tot een andere voortplantingssnelheid, een andere golflengte en daarmee tot een ander golfgetal. In dat geval treedt over de lengte van het estuarium een zeker verloop op van het faseverschil, waardoor wederzijdse versterking of verzwakking niet langer een globaal kenmerk is, maar van plaats tot plaats kan variëren.

Bij betrekkelijk lange estuaria zal bovendien door grilligheid van de geometrie op diverse plaatsen gedeeltelijke reflectie van de getijgolf plaatsvinden. Bovendien is het getij uit meerdere getijcomponenten opgebouwd die eigen reflectiepunten hebben. Reflectie is daarmee niet langer geconcentreerd aan het gesloten uiteinde van het estuarium. Er is dan niet een enkele gereflecteerde golf, maar een complex van gereflecteerde golven die zowel onderling als met de inkomende golf interacteren.

De bergende breedte in een doorsnede

De bergende breedte wordt gemeten langs de waterspiegel in een dwarsdoorsnede. De bergende breedte varieert met de waterstand wanneer de oevers bestaan uit betrekkelijk flauwe taluds. Een dijk kan in dit verband worden benaderd als een verticale wand, aangezien een dijktafstand in verhouding tot de breedte van de Westerschelde steil is. Voor waterstanden hoger dan de teen van de dijk, zal de bergende breedte uitsluitend nog ten gevolge van het onderlopen van platen veranderen.

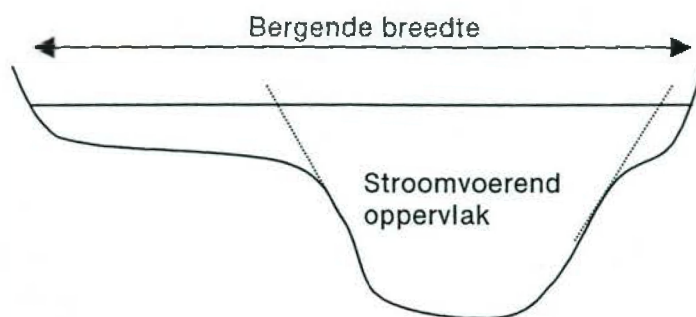
Het effect dat een inpoldering, via de bergende breedte, op het getij heeft is afhankelijk van de hoogte van het ingepolderde gebied. Als dit gebied onder normale omstandigheden reeds watervrij was, dan wordt de verticale wand pas van invloed bij meer dan gemiddeld hoogwater. Bij laag gelegen ingepolderde gebieden is dit reeds eerder het geval.

Het verloop van de bergende breedte (voor zekere waterstand) over de lengte-as van het estuarium geeft informatie over de vorm van het estuarium in het horizontale vlak. Deze vorm wordt daarom niet als apart geometrische kenmerk besproken.

De stroomvoerende oppervlakte van een doorsnede

De stroomvoerende oppervlakte van een dwarsdoorsnede wordt afgeleid uit het oppervlak van de stroomvoerende geul(en). Bij de bepaling van dit oppervlak worden de beide taluds van de geul denkbeeldig tot aan de waterspiegel verlengd. Het stroomvoerend oppervlak wordt dus begrensd door de natte omtrek van de stroomvoerende geul, de denkbeeldige verlengingen aan weerszijden van de geul en de waterspiegel. Afbeelding 7.3 geeft de schematisatie weer.

Afbeelding 7.3 Schematisatie stroomvoerend oppervlak



De verhouding tussen het stroomvoerend oppervlak en de bergende breedte is bepalend voor de voortplantingssnelheid van de getijgolf. Voor uitleg hierover wordt verwezen naar de volgende paragraaf.

7.2.2. Hydrodynamische kenmerken

Met hydrodynamische kenmerken wordt de waterbeweging beschreven. Voor het beoogde CM gaat de belangstelling uit naar voortplanting van het getij in het estuarium. Die kan op hoofdlijnen worden weergegeven aan de hand van ruimtelijke en tijdelijke variaties in waterstanden en stromingen, respectievelijk het verticale en het horizontale getij. Om die variaties inclusief hun onderlinge samenhang in beeld te brengen, wordt aandacht besteed aan traagheid, weerstand en voortplantingssnelheid van de getijgolf.

Bovengenoemde kenmerken worden hieronder gedefinieerd en kort toegelicht. Voor details wordt verwezen naar Pieters en Verspuy (1997) en naar Ippen (1966).

Verticaal getij

Het verticale getij is een variatie in de waterstand in ruimte en in tijd. Een maat voor de verticale getijbeweging in de tijd is de getijslag. De getijslag is gelijk aan het verschil tussen hoog- en laagwater op een bepaalde plaats. Metingen over de afgelopen decennia wijzen uit dat, gemiddeld over de Westerschelde, de getijslag toeneemt. Dat komt omdat het gemiddeld hoogwaterniveau sneller stijgt dan de zeespiegel en het gemiddeld laagwaterniveau minder snel stijgt dan de zeespiegel. Sinds 1960 daalt het gemiddeld laagwaterniveau zelfs, zie bijlage V.

De ruimtelijke variatie in het verticale getij wordt in het algemeen weergegeven met behulp van de getijversterkingsfactor G . G is gelijk aan de verhouding tussen het verticale getij ter plaatse en het verticale getij in de monding. In de Westerschelde neemt G direct vanaf de monding toe tot voorbij Antwerpen (Rupelmonde), waarna G weer afneemt (Claessen en Meyvis, 1994). Deze afname wordt de 'vloedkull' genoemd (van Veen, 1944).

De amplitude van het getij op een willekeurige plaats in de Westerschelde (en ook in de monding) wordt voornamelijk bepaald door de interactie van inkomende en gereflecteerde golf. Damping ten gevolge van energieverlies door bodemwrijving speelt in het middendeel van de Westerschelde waarschijnlijk een ondergeschikte rol (Pieters en Verspuy, 1997) ten opzichte van de traagheid. In het Oostelijk deel neemt het relatieve belang van de weerstand toe. Voorbij Bath is de rol van de weerstand getijgemiddeld zelfs groter dan de rol van de traagheid (Adema, 1998).

Een contractie in het estuarium betekent een afname in bergende breedte in de voortplantingsrichting van de getijgolf. Dit leidt tot een toename in de verticale berging: het verticale getij zal dus toenemen. Er treedt echter ook reflectie op over het gehele traject waarover de contractie plaatsvindt. Dit heeft een verlagend effect op het verticale getij.

Horizontaal getij

Het horizontale getij is de benaming voor de periodieke fluctuatie in de stroomsnelheden. Het bestaat uit een ebstroom en een vloedstroom. Het horizontale getij wordt in hoge mate bepaald door het verticale getij en de geometrie. De verhangen in het estuarium die ten gevolge van het verticale getij optreden, veroorzaken gradiënten in hydrostatische druk en versnellen en vertragen daardoor de watermassa. Traagheid en weerstand, die hierna worden besproken, zorgen voor een faseverschil tussen verticaal en horizontaal getij. Wanneer de weerstand buiten beschouwing wordt gelaten, loopt het horizontale getij een kwart periode achter op het verticale getij.

Traagheid en weerstand

Weerstand is evenredig met de bodemruwheid en met het kwadraat van de stroomsnelheid. Daarnaast neemt de weerstand af met toenemende hydraulische straal. De hydraulische straal is voor de Westerschelde bij benadering gelijk aan de verhouding tussen stroomvoerend oppervlak en bergende breedte.

Traagheid is altijd een combinatie van een locale bijdrage (variatie van stroomsnelheid in de tijd) en een advectionele bijdrage (ruimtelijke variatie). Doorgaans geldt voor het getij dat de verticale fluctuaties in de waterstand klein zijn ten opzichte van de waterdiepte. Daardoor is de advectionele traagheid relatief klein. Onder normale omstandigheden is dat voor de Westerschelde redelijkerwijs het geval. In het Oostelijke deel van de Westerschelde neemt het belang van de advectionele traagheid toe (Adema, 1998). De aanname dat verticale waterstandsfluctuaties klein zijn ten opzichte van de waterdiepte gaat hier minder op.

De verhouding tussen traagheid en weerstand bepaalt in hoge mate het faseverschil tussen het verticale en horizontale getij. Als de traagheid domineert, nadert het faseverschil tot een kwart periode. Dit faseverschil wordt gereduceerd als het belang van de weerstand ten opzichte van de traagheid toeneemt.

Voorts leidt weerstand ertoe dat energie wordt gedissipeerd, waardoor de intensiteit van zowel horizontaal als verticaal getij afneemt in de voortplantingsrichting van de golf.

Voortplantingssnelheid

De voortplantingssnelheid van de getijgolf is evenredig met de wortel uit de verhouding tussen het stroomvoerend oppervlak en de bergende breedte, zie vergelijking (1).

$$(1) \quad c = \sqrt{\frac{g \cdot A_s}{B_b}}$$

Onder de top van de getijgolf zal de verhouding tussen het stroomvoerend oppervlak en de bergende breedte groter dan onder het dal. Hieruit volgt dat de top van de getijgolf zich sneller voortplant dan het dal. Vanwege het verschil in voortplantingssnelheid tussen top en dal zal het front van de getijgolf versteilen en zal de golf een asymmetrische vorm aannemen. In de Westerschelde speelt deze versteiling geen overheersende rol omdat, zoals reeds met betrekking tot de traagheid is opgemerkt, verticale fluctuaties in de waterstand betrekkelijk klein zijn ten opzichte van de waterdiepte. De versteiling is waarneembaar wanneer de gemiddelde getijkromme bij Vlissingen en bij Bath met elkaar worden vergeleken. De getijgolf lijkt bij Vlissingen enigszins 'achterover te hellen', wat bij Bath niet het geval is.

Verandering van de voortplantingssnelheid heeft gevolgen voor de golflengte. Een afname van de voortplantingssnelheid leidt tot een evenredige afname van de golflengte ($\lambda = c.T$).

Rivierafvoer

Onder normale omstandigheden heeft de rivierafvoer alleen invloed op het getij in de Boven-Zeeschelde, tussen Rupelmonde en Gent (Pleters en Verspuy, 1997). De invloed van de Scheldt op het getij in de Westerschelde wordt daarom in het CM buiten beschouwing gelaten.

7.2.3. Meteorologische kenmerken

Hieronder zijn de meteorologische kenmerken genoemd die van invloed zijn op het getij.

Stormopzet op de Noordzee

Met name tijdens een Noordwesterstorm worden de waterstanden in het zuidelijk deel van de Noordzee opgestuwd. Dit kan bij benadering op het verticale getij worden gesuperponeerd, zodat de middenstand van het getij aan de monding wordt verhoogd. Deze verhoging van de middenstand leidt ertoe dat er tijdelijk een grote hoeveelheid water het estuarium in- en uitstroomt (bergend oppervlak maal verhoging). Tijdens de opbouwphase van de stormopzet zal er daarom een netto landwaarts debiet zijn, landinwaarts afnemend. Tijdens de afbouwphase zal er een netto zeewaarts debiet zijn. Deze extra debieten hoeven niet tot hogere stroomsnelheden te leiden, vanwege toename van het stroomvoerend oppervlak. Een en ander is uiteraard afhankelijk van de hoogte van de opzet en het tijdsbestek waarin de opzet wordt op- en afgebouwd.

Vanwege de toegenomen gemiddelde waterdiepte zal de voortplantingssnelheid van de getijgolf toenemen en zal de mate van opslingering in het estuarium wijzigen. De gevolgen hiervan voor het verticale getij zijn moeilijk te voorspellen en zullen per locatie verschillen. De toegenomen gemiddelde waterdiepte leidt eveneens tot een afname van de weerstand. Dit reduceert de energie-dissipatie, waardoor de getijdoordringing in het estuarium toeneemt.

Zeespiegelstijging

De gevolgen van zeespiegelstijging voor het getij zijn, zij het op een andere tijdschaal, vergelijkbaar met die voor stormopzet. De tijdschaal waarop zeespiegelstijging optreedt is echter dermate groot dat de morfologie moet worden meegenomen wanneer de gevolgen van zeespiegelstijging worden beschouwd. Morfologische processen zullen ertoe leiden dat de bodem van de Westerschelde de zeespiegelstijging 'volgt', mits er voldoende sediment beschikbaar is.

Buien

Buien zijn lokale depressies. Sterke gradiënten in atmosferische druk zijn van invloed op het waterniveau. Ter plaatse van de depressie zal het waterniveau hoger zijn dan daarbuiten. De windvlagen die met lokale depressies gepaard gaan, kunnen oscillaties in de waterstand veroorzaken. Tenslotte leidt een hevige lokale neerslag tot een (relatief kleine) plaatselijke stijging in het waterniveau.

7.3. Structurering van de kenmerken

7.3.1. Inleiding

De geometrische, meteorologische en hydrodynamische kenmerken kunnen worden verdeeld in sturende kenmerken (randvoorwaarden) en volgende kenmerken. Een sturend kenmerk is een kenmerk dat alleen kan worden beïnvloed door externe factoren, en niet door het systeem zelf. Dit onderscheid ligt ten grondslag aan het CM1.

De geometrische kenmerken kunnen alle als sturend worden beschouwd. Daarnaast kunnen, zij het op andere tijd- en ruimteschalen, eveneens de meteorologische kenmerken als sturende kenmerken worden gehanteerd.

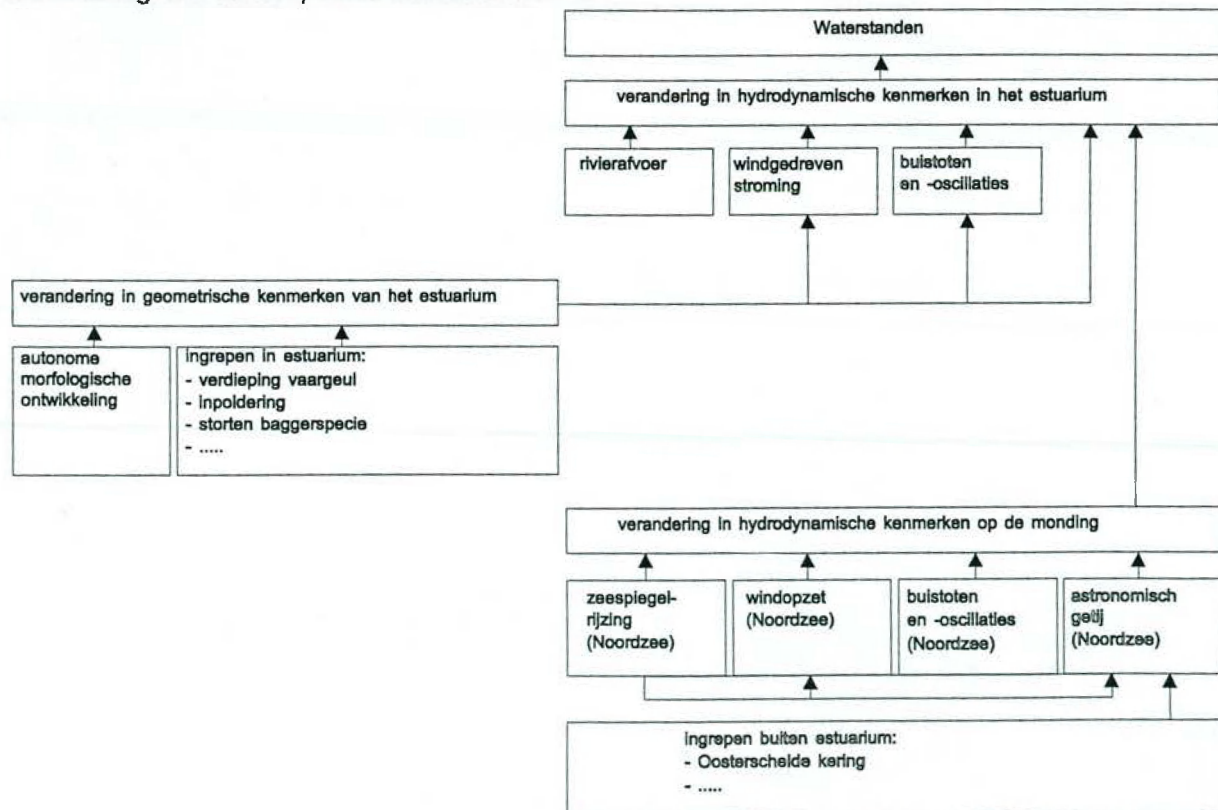
Met betrekking tot de hydrodynamische kenmerken kan uitsluitend het astronomisch getij als randvoorwaarde worden beschouwd. Het werkelijke getij in de monding is een resultante van de wisselwerking tussen het astronomische getij op de Noordzee en de Westerschelde en wordt door het systeem zelf beïnvloed. Het werkelijke (meetbare) getij op de monding is dus geen randvoorwaarde.

Deze beschouwing leidt tot een algemeen conceptueel model van de Westerschelde met betrekking tot waterstanden. Dit model wordt aangeduid met conceptueel model niveau 1 (CM1).

7.3.2. Het conceptuele model niveau 1

In afbeelding 7.4 is het CM1 afgebeeld. Het geeft schematisch de rol van de verschillende kenmerken weer met betrekking tot de waterstanden in de Westerschelde. Het CM1 vat daarmee de hierboven beschreven verbanden tussen de kenmerken van het getij samen.

Afbeelding 7.4. Conceptueel model niveau 1



7.4. Afbakening en definities

Om tot een schematische weergave te komen van de effecten van specifieke geometrische veranderingen op overige kenmerken, dient het CM1 te worden gedetailleerd en gespecificeerd. De afbakening die daarvoor op het CM1 is toegepast, is hieronder puntsgewijs verwoord. Ter wille van de duidelijkheid zijn er tevens enkele begrippen gedefinieerd die bij het afleiden van het CM2 zullen worden gehanteerd.

- Het CM2 beperkt zich tot het schematisch weergeven van de effecten van drie specifieke geometrische veranderingen: inpoldering, vaargeulverruiming en autonome ontwikkeling.
- De gevolgen van geometrische veranderingen voor het getij kunnen zich op verschillende tijdschalen manifesteren. Er worden twee tijdschalen onderscheiden: de morfologische en de hydrodynamische. De tijdschaal waar het conceptuele model zich op richt is de hydrodynamische.
- Een instantane respons kan lokaal of globaal zijn. Wanneer het invloedsgebied van de respons van dezelfde grootteorde is als de ingreep die de respons veroorzaakte, is er sprake van een lokale respons. In overige gevallen is de respons globaal. Het CM2 maakt hierin geen onderscheid, omdat de ruimtelijke schaal van de respons sterk afhangt van de locatie en grootte van de geometrische verandering.
- De autonome ontwikkeling voortrekt zich op morfologische tijdschaal. De hydrodynamische respons op de autonome ontwikkeling volgt steeds direct op deze geleidelijke geometrische verandering. De hydrodynamische respons op de netto autonome ontwikkeling over bijvoorbeeld enkele decennia wordt in deze studie echter eveneens als instantaan beschouwd. Daarmee is verondersteld dat in de netto autonome ontwikkeling die wordt beschouwd, alle morfologische terugkoppeling tussen geometrie en waterbeweging die gedurende de beschouwde decennia is opgetreden, is verdisconteerd.
- De autonome ontwikkelingen die in het CM2 worden meegenomen, zijn de functiewisseling van het Gat van Ossensisse en het Middelgat enerzijds, en inhoudstoename van de Schaar van Spijkerplaat anderzijds.

7.5. Effecten van de geometrische veranderingen

Op basis van het CM1 en de afbakening wordt het CM2 afgeleid. Hiertoe worden de gevolgen van de geometrische veranderingen die in de afbakening zijn aangegeven, berekend.

In dit verband wordt verwezen naar hoofdstuk 5, met name naar paragraaf 5.3 (Inpoldering) en naar paragraaf 5.4 (Afdamming, baggeren en storten, erosiebestrijdende maatregelen). Eveneens wordt verwezen naar hoofdstuk 6, waarin de modelsommen zijn toegelicht die in het kader van deze studie zijn uitgevoerd.

7.5.1. Inpoldering

Inpoldering staat primair gelijk aan een afname van de bergende breedte, althans wanneer de waterstand hoger is dan het niveau van het ingepolderde gebied. Vanwege deze afname van de bergende breedte zal de hydraulische straal iets toenemen, maar wanneer het een brede doorsnede betreft niet in significante mate. De stroomvoerende breedte blijft in principe hetzelfde, ervan uitgaande dat slechts inpoldering van niet-stromend gebied plaatsvindt.

De doorsnede over het estuarium ter plaatse van de westelijke begrenzing van het ingepolderde gebied wordt in het volgende de westelijke rand genoemd. De oostelijke rand is de doorsnede over het estuarium ter hoogte van de oostelijke begrenzing van het ingepolderde gebied. Ter wille van de eenvoud wordt aangenomen dat de inpoldering instantaan heeft plaatsgevonden.

De ruimteschaal waarover de inpoldering effect heeft, hangt sterk af van de locatie en de grootte van de inpoldering. Er worden hier twee situaties onderscheiden: een lokaal effect en een globaal effect.

Lokaal effect

Bij gelijk blijvende debieten zal de getijslag tussen de randen toenemen. Dit volgt uit continuïteit: de afname in bergende breedte kan alleen door een toename in verticale berging worden opgevangen. De getijslag zal voorbij de inpoldering weer terugkeren tot het oorspronkelijke niveau van voor de inpoldering, mits de debieten inderdaad constant zijn gebleven. Dit hoeft niet het geval te zijn.

Toename van de getijslag in combinatie met het constant blijven van de periode van het getij, leidt noodzakelijkerwijs tot een snellere stijg- en daalsnelheid van de waterspiegel in het gebied tussen de randen. Hierdoor nemen getijgemiddeld de vervallen over de Westelijke rand af en over de Oostelijke rand toe. De debieten over de Westelijke rand zullen daardoor afnemen en de debieten over de Oostelijke rand zullen toenemen. Dit effect remt de toename van stijg- en daalsnelheden tussen de randen. Het volume dat moet worden geborgen neemt immers af.

Globaal effect

Als de inpoldering dermate groot is dat er over de Westelijke rand een significante afname van de debieten plaatsvindt, levert dat ook een debietafname op in het gebied dat ten Westen van de Westelijke rand gelegen is. Als deze debietafname significant is, en als de weerstand in dit gebied relevant is voor het getij, dan zal dit een afname van de weerstand en dus een toename van de stijg- en daalsnelheid van het getij tot gevolg hebben. Hierdoor zal de afname van de vervallen over de Westelijke rand (ten gevolge van de inpoldering) worden beperkt. Dit secundaire mechanisme werkt dus beperkend op de primaire lokale compensatie over de Westelijke rand.

Hetzelfde geldt voor de Oostelijke rand. De grotere debieten in het gebied dat Oostelijk van de Oostelijke rand is gelegen, zullen, indien de weerstand in dit gebied van substantiële betekenis is, via de toegenomen weerstand tot extra demping van de amplitude en dus van de stijg- en daalsnelheden leiden. Deze afname van de stijg- en daalsnelheden werkt compenserend op het primaire effect van de inpoldering over de Oostelijke rand (dit effect bestond uit toename van de stijg- en daalsnelheden).

7.5.2. Vaargeulverruiming

Ter plaatse van de vaargeulverruiming wordt het stroomvoerend oppervlak vergroot. Daardoor zullen, bij gelijk blijvende debieten, de snelheden afnemen. Dit verlaagt de weerstand. Wanneer vaargeulverruiming bestaat uit het wegruimen van drempels, zal de weerstand eveneens afnemen vanwege de toename van de diepte.

Bij storten in nevengeulen treedt het tegenovergestelde effect op. Het stroomvoerend oppervlak neemt af en de weerstand neemt toe (bij afname van de diepte). Storten op platen heeft geen direct gevolg voor het stroomvoerend oppervlak.

Voor wat betreft de verdere gevolgen van vaargeulverruiming wordt er onderscheid gemaakt tussen een traagheids-gedomineerde situatie en een weerstands-gedomineerde situatie. In het westelijk deel van de Westerschelde zal de traagheids-gedomineerde situatie beter van toepassing zijn, terwijl in het oostelijk deel de weerstands-gedomineerde situatie meer aan de werkelijkheid voldoet.

Traagheids-gedomineerd

Wanneer de vaargeulverruiming plaatsvindt in een gebied waarin de weerstand van ondergeschikt belang is voor de getijvoortplanting, zal er relatief weinig veranderen. Een dergelijk gebied wordt bijvoorbeeld gekenmerkt door lage stroomsnelheden, of het is er relatief diep. De weerstandsafname zal dus naar verhouding gering zijn en dientengevolge de effecten van de weerstandsafname eveneens.

Weerstands-gedomineerd

Als de weerstand een significante rol speelt, zal de weerstandsafname bepalend zijn. De weerstandsafname zal per saldo tot grotere stroomsnelheden leiden, ondanks de toename in het stroomvoerend oppervlak. Met name de weerstandsverlaging ten gevolge van de toename van de diepte draagt hiertoe bij.

Vanwege de afname van de weerstand vindt er ter plaatse van de vaargeulverruiming minder energie-dissipatie plaats dan voorheen, waardoor het verticale getij minder wordt gedempt dan voor uitvoering van de ingreep het geval was. Per saldo neemt de getijdoordringing dus toe.

Het laagwater neemt dus af (wordt lager) en het hoogwater neemt toe (wordt hoger). Het laagwater neemt echter meer af dan het hoogwater toeneemt (mondelinge communicatie J. de Ronde). Voor een hoge waterstand is, bij zekere vaargeulverruiming, de procentuele toename van het stroomvoerend oppervlak kleiner dan voor een lage waterstand. Uit een continuïteitsbeschouwing volgt dat het effect van de vaargeulverruiming op het hoogwater daardoor kleiner is dan op het laagwater.

Voortplantingssnelheid

Als de vaargeulverruiming een toename van de diepte inhoudt, zal dat een verhoging van de voortplantingssnelheid van de getijgolf tot gevolg hebben.

Een hogere voortplantingssnelheid leidt tot een langere golflengte van het getij. Dit heeft invloed op de verhouding tussen golflengte en bekkenlengte, waardoor de mate van opslingering wijzigt. In feite verandert, voor iedere locatie in het estuarium, het faseverschil tussen de inkomende en de gereflecteerde golf. Afhankelijk van de rol van het gereflecteerde getij op die locatie, zal de getijslag wijzigen.

7.5.3. Autonome ontwikkeling

In het middendeel van de Westerschelde neemt het Gat van Ossensisse geleidelijk de functie over van het Middelgat. Ten gevolge van deze functiewisseling wijzigt de lengte van de hoofdgeul. Hetzelfde gebeurt ten gevolge van de inhoudstoename van de Schaar van Spijkerplaat. Door dit proces wordt de hoofdgeul enigszins verlegd en ondergaat daarmee een lengteverandering.

Omdat de hoofdgeul van primair belang is voor de voortplanting van het getij, kan een verandering in de lengte van de hoofdgeul gelijk worden gesteld aan een verandering in bekkenlengte. Een verandering in bekkenlengte beïnvloedt de mate van opslingering. Op deze wijze beïnvloeden de autonome ontwikkelingen het getij.

7.5.4. Het conceptuele model niveau 2

In afbeelding 7.5 staat het CM2 afgebeeld. Bij deze afbeelding wordt het volgende opgemerkt:

- Links en rechts van de verbindingspijlen staan plus- en mintekens. Dit geeft aan of er een evenredig dan wel omgekeerd evenredig verband is. Wanneer er aan dezelfde zijde van de pijl een plus (bij het vertrekpunt) en een min (bij het aankomstpunt) staan, dan wil dat zeggen dat een toename van het 'start-kenmerk' een afname van het 'eind-kenmerk' tot gevolg heeft.
- Wanneer er geen tekens bij een pijl staan, dan is aard van het verband niet in algemene zin aan te geven.
- Wanneer een verband die een bepaalde pijl aangeeft wordt beschouwd, dan worden de kenmerken die niet aan weerszijden van deze pijl staan constant in de tijd verondersteld.
- Het schema wordt, bij een verandering in de geometrie, instantaan in zijn geheel doorlopen. Dat wil zeggen dat zich instantaan een nieuw evenwicht instelt wanneer er een verandering plaatsvindt. Er zijn geen 'tussenfasen' in de tijd.

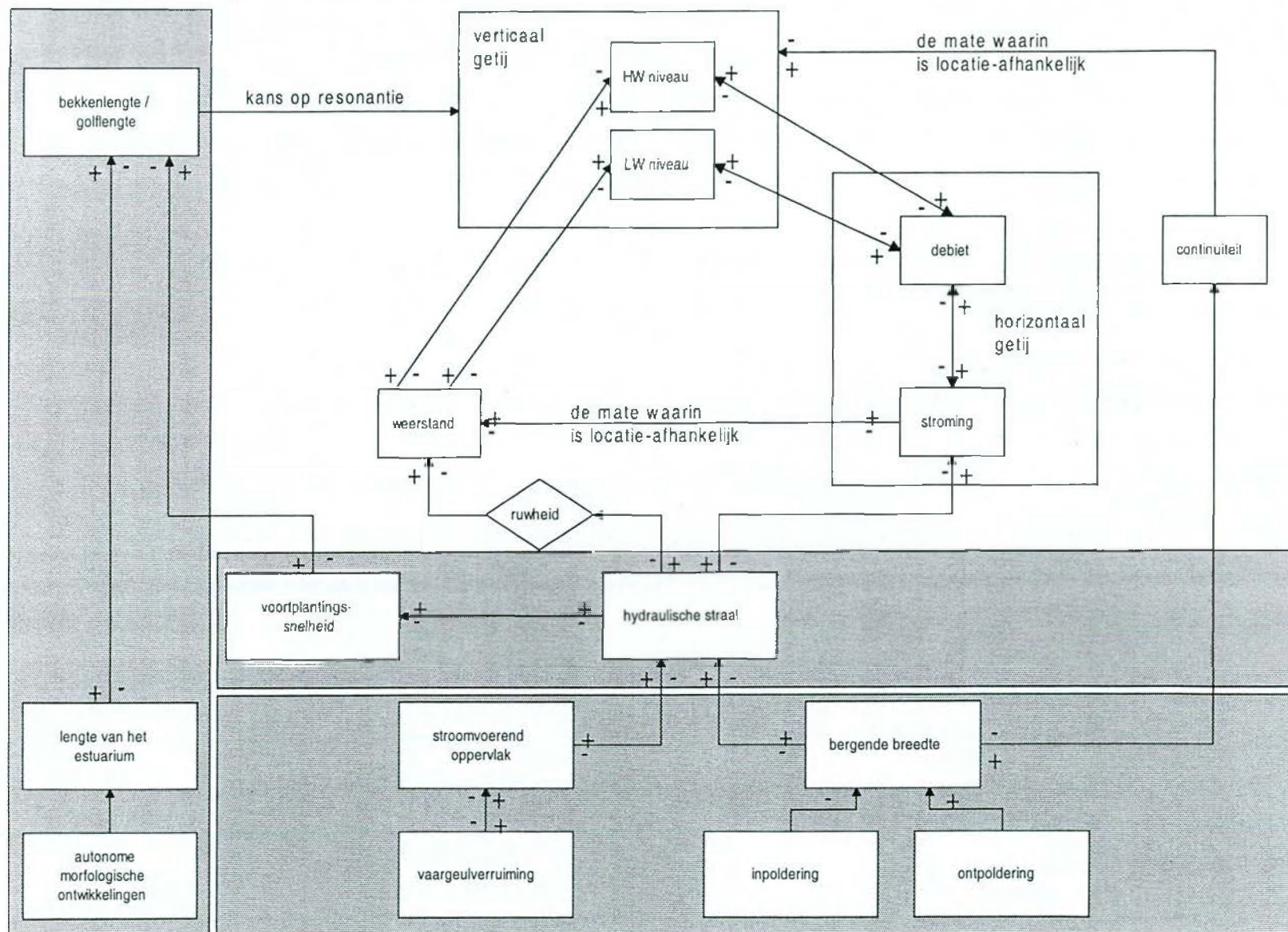
Er zijn drie gearceerde delen in de afbeelding. Deze delen zijn 'toeleverend' aan het niet gearceerde deel. Van de twee liggende gearceerde delen bevat het onderste deel de geometrische veranderingen die aan de basis staan van het CM. Het gearceerde deel daarboven bevat afgeleide kenmerken die ter verduidelijking zijn weergegeven. Het derde (staande) gearceerde deel bevat de kenmerken die gerelateerd zijn aan opslingering. Deze zijn apart samengenomen omdat opslingering een min of meer aparte invloed heeft op het getij.

Het niet gearceerde deel bevat de hydrodynamische terugkoppeling. Vanuit de gearceerde delen wordt op verschillende wijze 'aangehaakt' aan deze terugkoppeling. Via de plus- en minteken kan vervolgens een redenering worden gevolgd.

Het CM2 kan als vertrekpunt dienen voor verdere kwalitatieve en kwantitatieve analyses van het getij. De verbanden die in het CM2 staan aangegeven in de vorm van evenredigheid of omgekeerd evenredigheid kunnen door middel van numerieke simulaties verder in kaart worden gebracht.

Aan de verbanden kan informatie worden toegevoegd over de locatie en de grootte van de geometrische verandering. Dit kan eventueel leiden tot locatie- en ingreep-specifieke detailleringen van het CM2. Wanneer het CM2 voldoende gedetailleerd is, kan ook het cumulatieve effect van meerdere ingrepen worden geanalyseerd.

Afbeelding 7.5 Conceptueel model niveau 2



8. BESCHRIJVING VAN EXTREMEN

8.1. Inleiding

De constatering dat de gemiddelde zeestand en het niveau van hoogwater een stijgende tendens vertonen, leidt direct tot de veronderstelling dat extreme waterstanden in de loop van de tijd ook zullen toenemen. Om dit te kunnen kwantificeren wordt in de huidige praktijk, heel pragmatisch, verondersteld dat veranderingen in gemiddeld en extreem hoogwater in relatieve zin even groot zijn. Men noemt dit lineair doorvertalen. De vraag is echter of deze aanpak vanuit statistisch en fysisch perspectief verantwoord is.

Om het statistische aspect van deze vraag te beantwoorden, kijken we naar een veelvuldig gehanteerde methode om extremen langs statistische weg te beschrijven. Vervolgens gaan we na wat een waargenomen stijgende tendens in hoogwater voor invloed heeft op deze statistische beschrijving. Tenslotte wordt de bevinding ten aanzien van deze invloed genuanceerd aan de hand van kwalitatieve overwegingen met betrekking tot fysische aspecten van extreme waterstanden.

8.2. Statistische beschrijving

Een beschrijving van extreme condities wordt doorgaans ontleend aan een statistische extrapolatie van waarnemingen aan min of meer gematigde omstandigheden. De reden daarvoor is dat extremen zelf niet zo vaak worden waargenomen dat daarmee voldoende informatie kan worden vergaard om hun gedrag afdoende te kunnen beschrijven. Voor gematigde omstandigheden speelt die beperkte beschikbaarheid van informatie veel minder. Echter, om uit informatie over gematigde condities conclusies te kunnen trekken over het gedrag van extremen, vereist inzicht in de relatie tussen beide. Bij statistische extrapolatie wordt verondersteld dat de gematigde condities en de extremen beide deel uitmaken van een populatie met een bekende kansverdeling. In dat geval kunnen de parameters van die verdeling worden geschat uit de waargenomen gematigde omstandigheden en daarmee is dan de gehele populatie beschreven, inclusief de extremen.

Bij de beschrijving van extremen van een bepaald verschijnsel zijn vanuit de fysica geen voorkeuren aan te geven voor een bepaalde theoretisch gedocumenteerde statistische verdeling. Vaak wordt een statistische verdeling gekozen op grond van ervaring (gebleken geschiktheid) of volgt een voorkeur uit een onderling vergelijk van verdelingen waarbij wordt geselecteerd op grond van de mate van passing aan de waarnemingen. Bij deze methode worden de parameters van een verdeling geschat uit minimalisatie van een maat voor het verschil tussen waarnemingen en wat op grond van de betreffende verdeling verwacht mag worden. In de praktijk leidt die minimalisatie nooit tot nul, maar is altijd sprake van een residueel verschil. De verdeling met het kleinste residu heeft de voorkeur.

Naast de keuze van de verdeling is het ook nodig om vast te stellen welke waargenomen gematigde condities worden gebruikt om de parameters van de betreffende verdeling te schatten. Enerzijds bestaat de neiging om zo veel mogelijk waarnemingen te gebruiken om daarmee zo goed mogelijk gebruik te maken van de beschikbare informatie. Aan de andere kant zal men zich willen beperken tot de hogere waarnemingen omdat die meer representatief zijn voor extremen dan relatief lage waarnemingen. Bij de selectie moet een balans worden gevonden tussen deze tegenstrijdige verlangens.

Bij tijdreeksen, zoals hoogwaters, zijn er twee methoden om waarnemingen te selecteren voor het schatten van parameters van extreme waarden verdelingen. In de ene methode wordt de tijdreeks verdeeld in opeenvolgende periodes van gelijke duur. Vervolgens wordt uit elke periode het hoogste hoogwater gekozen. Door variatie van de duur van de periode kan de omvang van de selectie worden beïnvloed. Echter, in de praktijk wordt die duur over het algemeen vastgesteld op basis van veronderstelde periodiciteit in het onderliggende fysische verschijnsel. Bij hoogwaters is dat bijvoorbeeld een jaar. Het stochastische karakter van uitschieters in de waterstand wordt vrijwel volledig bepaald door atmosferische condities, zoals harde wind of extreem lage druk. Vanuit de seizoenen komt dan de periodiciteit van een jaar naar voren.

Bij de andere methode bestaat de selectie uit alle waargenomen hoogwaters boven één of andere drempel. Normaliter wordt deze drempel zo gekozen dat daardoor een schifting kan worden gemaakt tussen hoogwaters met verschillende fysische oorzaak. Deze methode is met name populair in gebieden waar hoogwaters niet alleen door het astronomisch getij en winterse stormen worden bepaald, maar ook door orkanen en aanverwante extreme atmosferische storingen.

Als de set waarnemingen die wordt gebruikt voor statistische extrapolatie in zijn geheel lineair wordt getransformeerd, dan moet op het resultaat van de extrapolatie een identieke transformatie van toepassing zijn. Dit is geïllustreerd in bijlage VI. In zo'n geval zou het lineair doorvertalen tot een correct beeld van de te verwachten extreme condities leiden.

In werkelijkheid is echter geen sprake van een (al of niet lineaire) transformatie van de gehele set. Door de stijgende tendens in de hoogwaters wijken recente waarnemingen doorgaans sterker af van de 'gemiddelde' waarnemingen dan langer geleden verzamelde waarnemingen. Als deze tendens zich voortzet, leidt extrapolatie volgens de klassieke methode (bijlage VI) van tot op heden verzameld waarnemingsmateriaal tot een systematische onderschatting van in de toekomst te verwachten extreme condities.

8.3. Fysica

Windopzet is het verschijnsel dat in een (deels) gesloten bassin water door wind tegen een gesloten rand of andere belemmering van de stroming wordt opgestuwd. De wind drijft via schuifspanning aan het wateroppervlak een stroming aan in de richting van de wind². Als deze stroming dwars op een gesloten rand van het bassin is gericht, zal de waterstand in de stroomrichting gaan stijgen. Hierdoor ontstaat een drukgradiënt (verhang) die een stroming aandrijft die qua richting juist tegengesteld is aan de windgedreven stroming. Uiteindelijk zal een evenwichtssituatie ontstaan waarbij er netto geen stroming meer is in de windrichting. Echter, er is wel sprake van een verticale circulatie, waarbij de stroming in de buurt van het wateroppervlak de windrichting volgt terwijl de stroming nabij de bodem tegen de wind in gaat.

De verhoging van de waterstand ten opzichte van het niveau van voor de windgedreven stroming, wordt opstuwing genoemd. In de evenwichtssituatie varieert de verhoging niet meer met de tijd, maar wel met de afstand tot de gesloten rand. Ter plaatse van die rand bereikt de opstuwing een maximum.

² De stelling ten aanzien van de stroomrichting is in het algemeen niet helemaal juist. De stroomrichting kan afwijken van die van de wind door bijvoorbeeld effecten van aardrotatie en de geometrie en bodemtopografie van het betreffende bassin. Voor de gegeven redenering maakt dit echter niet uit, en het is daar ter wille van de eenvoud niet in betrokken.

Bovenstaande situatieschets gaan we gebruiken om een kwalitatief oordeel te vormen over de juistheid van het eerder genoemde 'lineair doorvertalen' van extreme waterstanden als de gemiddelde zeestand en gemiddeld hoogwater stijgen. In eerste instantie gaan we uit van gelijkblijvende wind. Ook nemen we aan dat de bodemtopografie van het bassin niet verandert.

Als de gemiddelde zeestand en gemiddeld hoogwater langzaam maar zeker stijgen, dan zal het opwekken van windopzet op een steeds grotere waterdiepte plaats vinden. Voor het massatransport dat door de wind wordt aangedreven, maakt dat vrijwel niets uit, omdat dit transport geconcentreerd is in het bovenste deel van de waterkolom. Voor de drukgradiënt die zich als respons op de wind instelt, ligt dat anders. Deze kan zich over een steeds grotere verticale afstand manifesteren. Daardoor neemt het bijbehorende massatransport toe.

In de evenwichtssituatie moeten beide transporten elkaar opheffen. Daaruit volgt dat als het windgedreven transport niet toeneemt met de waterdiepte, dan zal het verhanggedreven transport ook niet toenemen. Bij toenemende waterdiepte zal de drukgradiënt moeten afnemen. Een stijgende gemiddelde zeestand en gemiddeld hoogwater leiden zodoende tot een afname van de windopzet.

In bovenstaande redenering is geen aandacht geschonken aan het niveau van laagwater. Extreem hoge waterstanden vallen doorgaans niet samen met het moment van laagwater. In het algemeen is voor extreme windopzet in en rond de Westerschelde een storm nodig waarvan de duur enkele malen de getijperiode kan bedragen. Gezien het verloop van stormen in deze omgeving (min of meer geleidelijke op- en afbouw) is het onwaarschijnlijk dat de maximale waterstand rond laagwater optreedt.

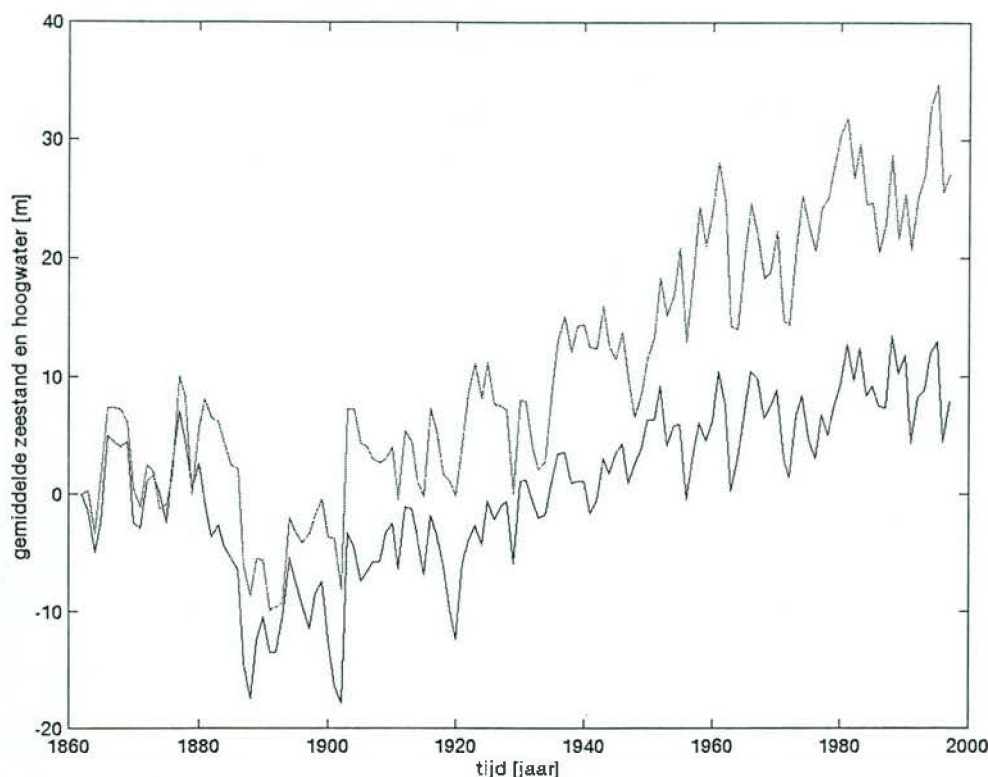
Gezien vanuit de fysica leidt het lineair doorvertalen dus tot een overschatting van extreme lokaal opgewekte opzet, althans indien het windklimaat niet verandert en ook de geometrie van het bassin ongewijzigd blijft. Dat hoeft echter niet het geval te zijn. De geconstateerde veranderingen in de gemiddelde zeestand en in gemiddeld hoogwater kunnen het gevolg zijn van een grootschalig fysisch proces dat bijvoorbeeld ook invloed heeft op frequentie en Intensiteit van stormen. Tegelijkertijd kan sprake zijn van autonome en/of door de mens gestuurde morfologische processen waardoor de toename van de waterdiepte anders is dan in de redenering is aangenomen. Zo zijn vele processen en omstandigheden denkbaar die aanleiding geven tot een voorzichtige interpretatie van wat uit de gegeven redenering naar voren is gekomen.

Het is echter de vraag of lokaal opgewekte opzet een dominante rol speelt in het totaal aan extreme waterstanden op de Westerschelde. Zo'n rol is eerder weggelegd voor verhogingen van de waterstand die vanuit de Noordzee worden geïnduceerd. Tot op zekere hoogte gelden de overwegingen ten aanzien 'lokale' opzet ook voor wat er op de Noordzee gebeurt. Echter, daarbij past een overeenkomstige voorzichtige interpretatie.

8.4. Analyse van veldgegevens

Vergelijking van uit waarnemingen afgeleide jaargemiddelde zeestand en jaargemiddeld hoogwater laat zien dat in ieder geval sinds ongeveer 1890 het hoogwater een snellere stijging vertoont dan de gemiddelde zeestand. Dit is in onderstaande afbeelding weergegeven. Daarin is langs de verticale as de verandering aangegeven van beide grootheden ten opzichte van de waarde die zij in 1862 hadden. Hoewel deze ontwikkeling is bepaald voor jaargemiddelde hoogwaters en niet voor extremen, lijkt op hoofdlijnen wel een overeenkomst te bestaan met de constatering dat nabij Antwerpen hoogwaters in het recente verleden sneller stijgen ten opzichte van de gemiddelde zeestand dan langer geleden.

Afbeelding 8.1 Verandering sinds 1890 in jaargemiddelde zeestand (onderste lijn) en jaargemiddeld hoogwater voor Vlissingen



8.5. Conclusie

Uit waarnemingen is naar voren gekomen dat de gemiddelde zeestand en gemiddeld hoogwater op diverse plaatsen in de Westerschelde een stijgende tendens vertonen. Extreme waterstanden die in het verleden zijn geschat uit toen beschikbare veldgegevens zullen, tegen de achtergrond van deze tendens, geen juist beeld geven van de huidige situatie. In de praktijk neemt men aan dat er een constante verhouding bestaat tussen gemiddeld en extreem hoogwater. Men noemt dit 'lineair doorvertalen'.

Gezien vanuit de statistische techniek die wordt gebruikt om extremen te schatten uit waarnemingen, is dit een juiste aanpak, mits de constante verhouding zich voordoet bij alle waarnemingen die in de schatting worden betrokken. Uit een kwalitatieve beschouwing over de fysica van het ontstaan van extreme hoogwaters kan worden geconcludeerd dat lineair doorvertalen mogelijk leidt tot een overschatting van extremen. Echter, aan die conclusie ligt een vergaande schematisatie van het fysisch systeem ten grondslag.

Een beperkte analyse van veldgegevens geeft aan dat in tegenstelling tot het resultaat van de kwalitatieve beschouwing van de fysica, lineair doorvertalen eerder tot een onderschatting dan tot een overschatting van extremen leidt. Daarmee is niet gezegd dat de gegeven beschouwing van de fysica onjuist, maar wel dat deze waarschijnlijk een onvolledig beeld van de werkelijkheid geeft. Zo is bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de historie van een storm (de tijdsafhankelijke opbouw en de daarmee samenhangende ontwikkeling van de opzet) en met de kennelijke toename van de frequentie waarmee stormen in onze omgeving voorkomen. Dergelijke aspecten komen overigens ook niet voor in de gegeven beoordeling van het lineair doorvertalen vanuit statistisch perspectief.

Blijkbaar zijn de veranderingen in het fysische systeem waarvan (hoge) waterstanden in de Westerschelde een uiting zijn, van een zodanige aard dat daarover geen duidelijke uitspraken gedaan kunnen worden op grond van uitsluitend eenvoudige beschouwingen zoals hiervoor gegeven.

9. SYNTHESE

De geometrie van de Westerschelde is aan sterke verandering onderhevig. Een combinatie van actieve morfologische processen en intensief menselijk handelen ligt hieraan ten grondslag. Tegelijk blijken ook waterstanden in de loop van de tijd een duidelijk merkbare verandering te vertonen. Tegen de achtergrond van veiligheid tegen overstromen van gebieden rond de Westerschelde, geniet vooral de verandering in hoge waterstanden belangstelling. Om na te gaan of die veiligheid in de toekomst in voldoende mate gewaarborgd blijft, is het zinvol inzicht te verwerven in het verband tussen veranderingen in de geometrie van het estuarium enerzijds en de ontwikkeling van waterstanden anderzijds.

In het algemeen zijn kenmerkende tijdschalen van de waterbeweging in de Westerschelde klein ten opzicht van de tijdschalen waarop veranderingen in de geometrie van dit estuarium optreden. Het is daarom te verwachten dat de waterbeweging instantaan reageert op een wijziging in de geometrie. Met andere woorden, de tijd die de waterbeweging nodig heeft om zich aan een gewijzigde geometrie aan te passen, zal klein zijn ten opzichte van de duur van de periode waarop die wijziging tot stand komt.

Vanwege deze eigenschap zal een relatief snelle verandering in de geometrie leiden tot een even snelle aanpassing van de waterbeweging. Op grond daarvan mag worden verwacht dat een menselijke ingreep, zoals inpoldering of verdieping van de vaargeul, direct van invloed zal zijn op de waterbeweging. Aan het begin van de onderhavige studie is verondersteld dat die directe invloed merkbaar zou moeten zijn in de waterstanden. De oorspronkelijke aanpak van de studie was gericht op de instantane respons van waterstanden op ingrepen.

Confrontatie van de waargenomen ontwikkeling van waterstanden in het estuarium met een kalender van ingrepen, heeft deze veronderstelling niet kunnen bevestigen. Het is echter niet op z'n plaats om hieruit te concluderen dat waterstanden niet zouden veranderen als gevolg van ingrepen in de geometrie. Uit de confrontatie kan alleen worden afgeleid dat de veranderingen die zijn veroorzaakt door in het verleden uitgevoerde ingrepen, niet significant te onderscheiden zijn van blijkbaar continu aanwezige fluctuaties in de ontwikkeling van waterstanden. Overigens zijn, voorafgaand aan de confrontatie, fluctuaties met bekende oorzaak zo veel mogelijk uit het signaal van waterstanden gefilterd (meteorologische invloeden, getijcomponent met een periode van 18,6 jaar).

Deze constatering was aanleiding om te veronderstellen dat de instantane respons van de waterbeweging op in het verleden uitgevoerde ingrepen primair tot uitdrukking komt in de stroming en aanmerkelijk minder in de waterstand. Deze verandering in de stroming zet een proces in gang dat streeft naar een onderling (dynamisch) evenwicht tussen morfologie en waterbeweging. Dat proces geeft wel een aanpassing van de waterstand te zien, zij het op een relatief grote tijdschaal.

Tegen deze achtergrond is het zinvol om het onderzoek naar het effect van ingrepen te verleggen van een instantane respons van waterstanden naar een respons op termijn. Hiertoe zijn parallel twee sporen bewandeld:

1. Vanuit hoofdzakelijk theoretische overwegingen is een conceptueel model geformuleerd waarin verbanden tussen veranderingen in de geometrie van het estuarium enerzijds en stromingen en waterstanden anderzijds in beeld zijn gebracht.
2. Historische waarnemingen aan waterstanden zijn kwalitatief in z'n geheel geanalyseerd ter identificatie van een respons van de waterstand die zich op termijn manifesteert. In aanvulling daarop zijn diagnostische modelberekeningen uitgevoerd voor een selectie van veranderingen in de geometrie die zich in de periode 1968-1978 hebben voorgedaan.

Het conceptuele model gaat niet in op morfologische processen die als gevolg van veranderingen in de waterbeweging in gang worden gezet. Om deze reden is het niet vanzelfsprekend dat inzichten die met dit model worden verkregen, direct gekoppeld kunnen worden aan resultaten van het onderzoek naar de respons 'op termijn' van de waterstand op ingrepen in de geometrie van het estuarium (analyse van historische waarnemingen). Daartoe dient nog een beschouwing te worden toegevoegd over de morfologische verandering die volgt op de instantane aanpassing van met name de stroming. Dat is een onderwerp voor vervolgstudie.

Het conceptuele model is vooral bedoeld als basis voor vervolgstudie. Het geeft de aard weer van veranderingen in de waterbeweging die verwacht mag worden in respons op wijzigingen in de geometrie van de Westerschelde. Het gaat daarbij vooral om de voortplanting van het getij. Door voort te bouwen op het spoor van de diagnostische modellering kunnen verbanden tussen fysische processen en mechanismen die in het conceptuele model zijn aangegeven, nader worden gespecificeerd. Zo'n specificatie kan bestaan uit het aangeven van parameters die (naar verwachting) een dominerende rol spelen in het verband, en bijvoorbeeld een omschrijving van de aard van het verband (zoals lineair, exponentieel of anderszins).

De tijdschaal waarop wijzigingen in de geometrie zich voordoen is geen parameter in het model. Dat is een direct gevolg van de veronderstelling dat de waterbeweging zich steeds direct aan de geometrie aanpast.

Het model laat tevens de effecten zien van zeespiegelrijzing op de voortplanting van het getij in het estuarium. Dit proces is min of meer te zien als een gestaag verlopende verandering in de geometrie van het estuarium. De tijdschaal van zeespiegelrijzing is zodoende ook geen parameter in het model.

Uit de genoemde analyse van historische waarnemingen is naar voren gekomen dat in de afgelopen eeuw op hoofdlijnen drie perioden te onderscheiden zijn. De eerste periode omvat circa de eerste 25 jaar van deze eeuw en kenmerkt zich door een betrekkelijk geringe, maar gestage stijging van de getijslag. Verspreid over deze periode zijn diverse gebieden ingepolderd. Deze lagen voor een groot deel boven gemiddeld hoogwater. Het effect van deze inpolderingen beperkt zich daardoor tot omstandigheden waarbij gemiddeld hoogwater wordt overschreden.

Tussen circa 1925 en 1950 zijn er weinig ingrepen in de geometrie van het estuarium geweest en is gemiddeld nauwelijks variatie in de getijslag opgetreden. Vanaf begin jaren 50 is dat anders. In de eerste helft van de vijftiger jaren zijn omvangrijke gebieden ingepolderd die op dat moment beneden gemiddeld hoogwater lagen (Braakman en Sloe). Deze ingrepen vallen ongeveer samen met het van een geleidelijke stijging van de getijslag. In het oostelijk deel van de Westerschelde is die stijging sterker dan in het westelijke deel. Bovendien lijkt de stijging over het gehele estuarium een asymptotisch verloop te hebben. Vlak na de ingrepen verloopt de stijging gemiddeld sneller dan na een aantal jaren (alleen bij Antwerpen is dit asymptotisch karakter niet goed in waarnemingen herkenbaar).

De vraag in hoeverre hier sprake is van een oorzakelijk verband, moet worden gesteld in relatie tot bagger- en stortactiviteiten die in het kader van grootschalige verruiming van de vaargeul in het oostelijke deel van de Westerschelde vanaf midden jaren zestig hebben plaats gevonden. Volgens het conceptueel model leidt verruiming van de vaargeul tot een toename van de doordringing van het getij. Inpolderingen (reductie van de bergende breedte) sorteren een soortgelijk effect. De waargenomen toename van de getijslag zou zodoende het gezamenlijke effect kunnen zijn van de inpolderingen en de verruiming van de vaargeul.

Ook uit de jaargemiddelde waterstanden die zijn afgeleid uit waarnemingen, zijn aanwijzingen gevonden voor een relatie tussen de ontwikkeling van de getijslag en grootschalige vaargeulverruiming in het oostelijke deel van de Westerschelde en in de Zeeschelde. Daarbij is de geconstateerde toename van het niveau van hoogwater met name toegeschreven aan een reductie van de weerstand die door de verruiming wordt veroorzaakt. De vergroting van de getijslag wordt echter in veel belangrijker mate bepaald door een daling van het niveau van laagwater. Aangezien de waterbeweging rond laagwater geconcentreerd is in de geulen van het estuarium, is het voor de hand liggend dat een verruiming van de vaargeul zich juist in die fase van het getij laat zien.

Uit de analyse van waarnemingen zijn voorts aanwijzingen naar voren gekomen dat inpoldering (verkleining van de komberging) een proces in gang zet dat leidt tot een geleidelijke toename van de getijslag. Gezien de tijdschaal waarop dit deze verandering zich manifesteert, zullen morfologische aanpassingen hierbij een rol spelen. Bovendien heeft het verloop van de verandering van de getijslag een asymptotisch karakter indien niet steeds nieuwe gebieden worden ingepolderd.

De diagnostische modellering is gericht geweest op het verkrijgen van inzicht in de effecten van drie soorten veranderingen in de geometrie van het estuarium. Het gaat om kombergingsverkleining ten gevolge van inpoldering, vergroting van het stroomvoerend oppervlak door verruiming van de vaargeul en enkele effecten van autonome morfologische veranderingen. De uitgevoerde modelberekeningen zijn voor een belangrijk deel gebaseerd op de werkelijke geometrie van de Westerschelde zoals die is gemeten in 1968 en 1978. Echter, om de typen bodemveranderingen van elkaar te kunnen onderscheiden, zijn enkele kunstmatige ingrepen gepleegd op de gemeten geometrieën. Om deze reden en omdat bij de modelberekeningen randvoorwaarden zijn gebruikt die betrekking hebben op 1989 en niet op 1968 of 1978, is een direct vergelijk tussen modeluitkomsten en waarnemingen aan de waterbeweging niet op z'n plaats.

Alle diagnostische modelberekeningen zijn uitgevoerd voor een getijcyclus waarbij gemiddelde hoge en lage waterstanden optreden (het gaat dus bijvoorbeeld niet om springtij of doodtij). Uit vergelijking van de modelresultaten is naar voren gekomen dat de verruiming van de vaargeul een verandering in hoog- en laagwater teweegbrengt in de orde van enkele centimeters (hoogwater) tot orde 10 centimeter (laagwater). Bovendien lijkt ook de fase van het getij enkele seconden te verschuiven, maar vanwege de betrekkelijk geringe resolutie van de modeluitkomsten is dit niet meer dan een indicatie.

Uit het conceptuele model valt af te leiden dat een verruiming van de vaargeul in het algemeen zal leiden tot een versterkte doordringing van het getij. Dat gaat gepaard met een vergroting van de getijslag. Qua aard stemmen de modelresultaten hiermee overeen.

De omvang van de vergroting van de getijslag is klein ten opzichte van fluctuaties in de jaargemiddelde getijslag die uit waarnemingen zijn afgeleid. Dat is in overeenstemming met de eerdere constatering dat in het waarnemingsmateriaal geen duidelijk herkenbare instantane respons van waterstanden bevat op ingrepen in de geometrie van de Westerschelde. Het effect van de beschouwde ingreep is te gering om het te kunnen onderscheiden van fluctuaties die kennelijk van jaar tot jaar voorkomen in het jaargemiddeld hoogwater.

Verdere diagnostische modellering zal naar verwachting bijdragen aan een precisering van het conceptuele model. Daarbij moet bijvoorbeeld gedacht worden aan ruimtelijke spreiding van de intensiteit van effecten van ingrepen. Overigens is het daarbij niet altijd nodig om een complex model te gebruiken zoals dat in de onderhavige studie is gedaan. In veel gevallen kan worden volstaan met een eenvoudig (1-dimensionaal) model dat wordt toegepast op een geschematiseerde geometrie. In een vervolgstudie zou dit nader uitgewerkt kunnen worden.

Samengevat kan worden gesteld dat in het onderhavige onderzoek naar voren is gekomen dat de waterstand geen significante instantane respons vertoont op min of meer plotselinge veranderingen in de geometrie van de Westerschelde. Deze constatering is beperkt tot ingrepen met een omvang gelijk aan die van de werken die in de afgelopen eeuw zijn uitgevoerd. Daarnaast zijn aanwijzingen gevonden dat wel sprake is van een aanpassing van de waterstand die zich manifesteert op een tijdschaal van tientallen jaren of meer.

Er is verondersteld dat morfologische processen een relevante rol spelen in deze betrekkelijk trage aanpassing. Om die rol nader te kunnen onderzoeken zijn bouwstenen aangeleverd in de vorm van een conceptueel model en een kwalitatieve analyse van historische waarnemingen aan waterstanden in de Westerschelde. Daarnaast zijn enkele suggesties gedaan over de inpassing van deze bouwstenen in vervolgonderzoek.

REFERENTIES

Adema, J. 1998a

Effecten van kombergingsvergroting bij de grens op het getij in de Westerschelde, Werkdocument: RIKZ/AB-98.835x, Rijkswaterstaat Directie Zeeland/RIKZ

Adema, J. 1998b

Memo betreffende het WAQUA model Westerschelde 100m, 5 augustus 1998, Rijkswaterstaat Directie Zeeland/RIKZ

Anomynous, 1996

Ontwikkelingen in de Westerschelde; prognose voor de komende 25 jaar, nota AX-96.009/-NWL-96.14/RIKZ-96.006, Rijkswaterstaat Directie Zeeland/RIKZ

Arends, A.A., 1997

Inventarisatie van de huidige kennis over de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde, , rapport RIKZ/AB-97.857x Middelburg, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Bollebakker, P., de Jong, H. en S.J. van de Kramer (1987)

Een analyse van de stormvloedstanden bij Antwerpen (prosperpolder) opgetreden in de periode 1971-1986.

Dillingh, D., P.F. Heinen, 1994

Zeespiegelstijging, getijverandering en deltavelligheid, rapport RIKZ-94.026, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Ferguson, H.A., 1988

Delta-visie; een terugblik op 40 jaar natte waterbouw in zuidwest-Nederland, Rijkswaterstaat

Huijs, S.W.E., 1996

De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen, rapport R 96-17, Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie.

Ippen, A.T. (editor), 1966

Estuary and coastal dynamics, Engineering Societies Monographs, McGraw-Hill Book Company, inc.

Kalkwijk, dr. ir. J.P.Th, 1976

De analyse van getijden, Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele techniek, Delft.

Kerstens, 1996

Het Sigmaplan; plan voor de beveiliging van het Zeescheldebekken tegen stormvloeden vanuit de Noordzee, Ministerie van de Vlaamse gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur

Kleef, A.W. van, 1994

Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond Middelgat, Westerschelde, Rijkswaterstaat Directie Zeeland, concept notitie ZA-94.119

Langendoen, E.J., 1987

Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen, Technische Universiteit Delft, rapport nr. 5-87

Mol, G., A.M. van Berchum, G.M. Krijger, 1997

De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48/43'; rapport 1', Middelburg, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, rapport RIKZ-97.049, ISBN 90-369-3412-5

Mol, G.J., 1997

T0-Fysica, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Mol, G., 1995

De Westerschelde, een resultaat van menselijke ingrepen, rapport RIKZ-95.030, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Pieters, T., C. Verspuy, 1997

Getijanalyse Schelde-estuarium; Invloed plaatselijke veranderingen bergende oppervlakte op getijvoortplanting; Een analyse met TRECOS-WESTERSCHELDE 1997, rapport BGW-97.6, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Vlissingen, Delft.

Pieters, T., P. Bollebakker en J.Vroon, 1993

Berekeningen invloed geulverdieping en kombergingsvergroting op getij Schelde estuarium, werkdocument GWWS-93.862x, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Pieters, T., C. Strom, T. Walhout, T. Ysebaert, 1991

Het Schelde-estuarium, meer dan een vaarweg, nota GWWS-91.081, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Svasek, 1998

Lange termijn gedrag Westerschelde; definitiestudie zeespiegelrijzing

Svasek, 1995

Kust*2000; Definitiestudie: Westerscheldemonnd (no.1), rapport RKZ-256

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1995

Basisrapport zandige kust

Veen, J. van, 1945

Opmerkingen over Scheldepublikaties

Ven, G.P. van de (red.), 1993

Leefbaar laagland; geschiedenis van de waterbeheersing en landaanwinning Nederland, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Uitgeverij Matrijs, Utrecht.

Vroon, J., C. Storm, J. Coossen, 1997

Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, rapport RIKZ-97.023, ISBN 90-369-3441-9, Middelburg.

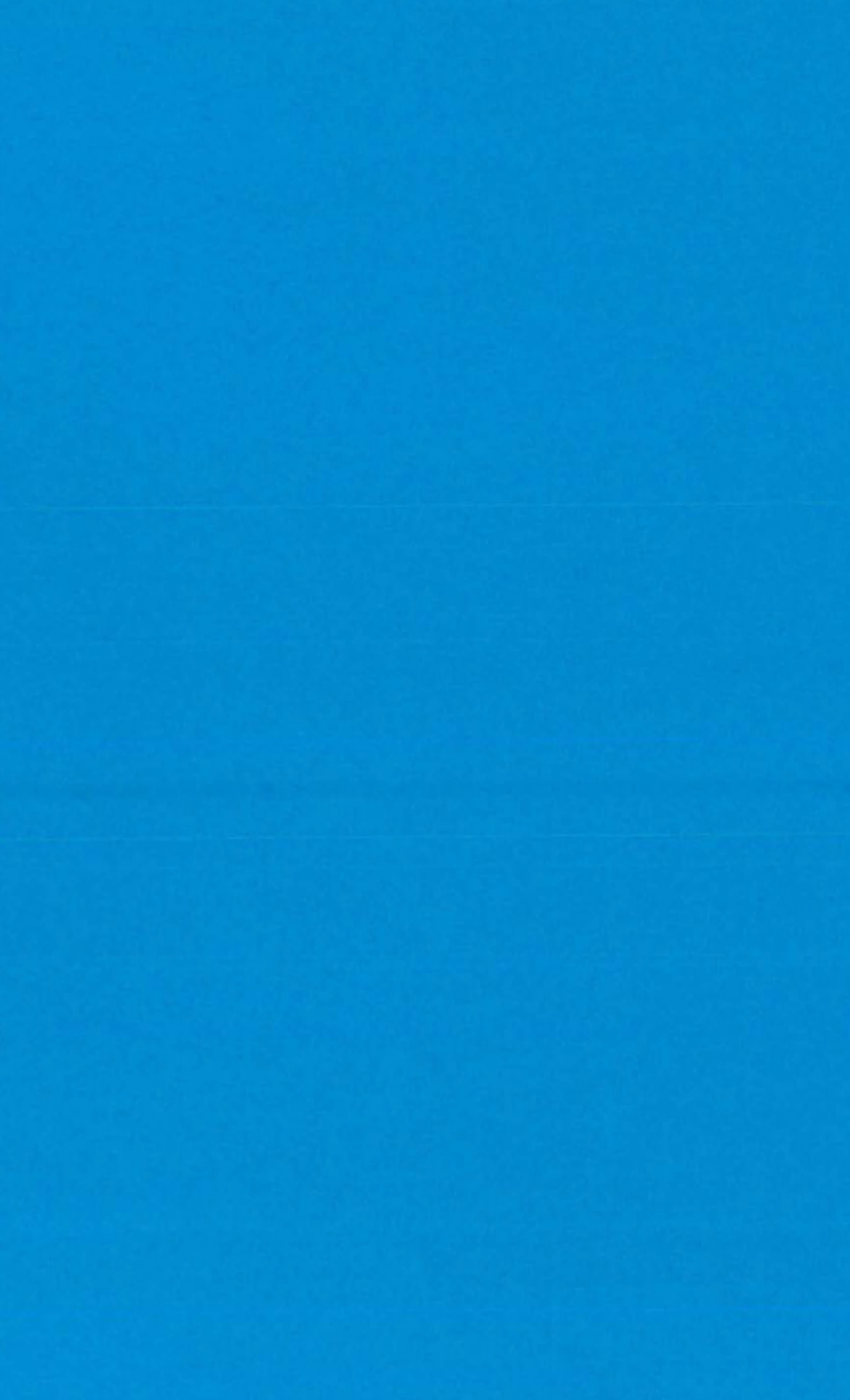
Bijlage I Gedetailleerde gegevens van inpolderingen in de Westerschelde 1800-1990

Bijlage II Bagger- stort en zandwinhoeveelheden in de Westerschelde 1955-1995

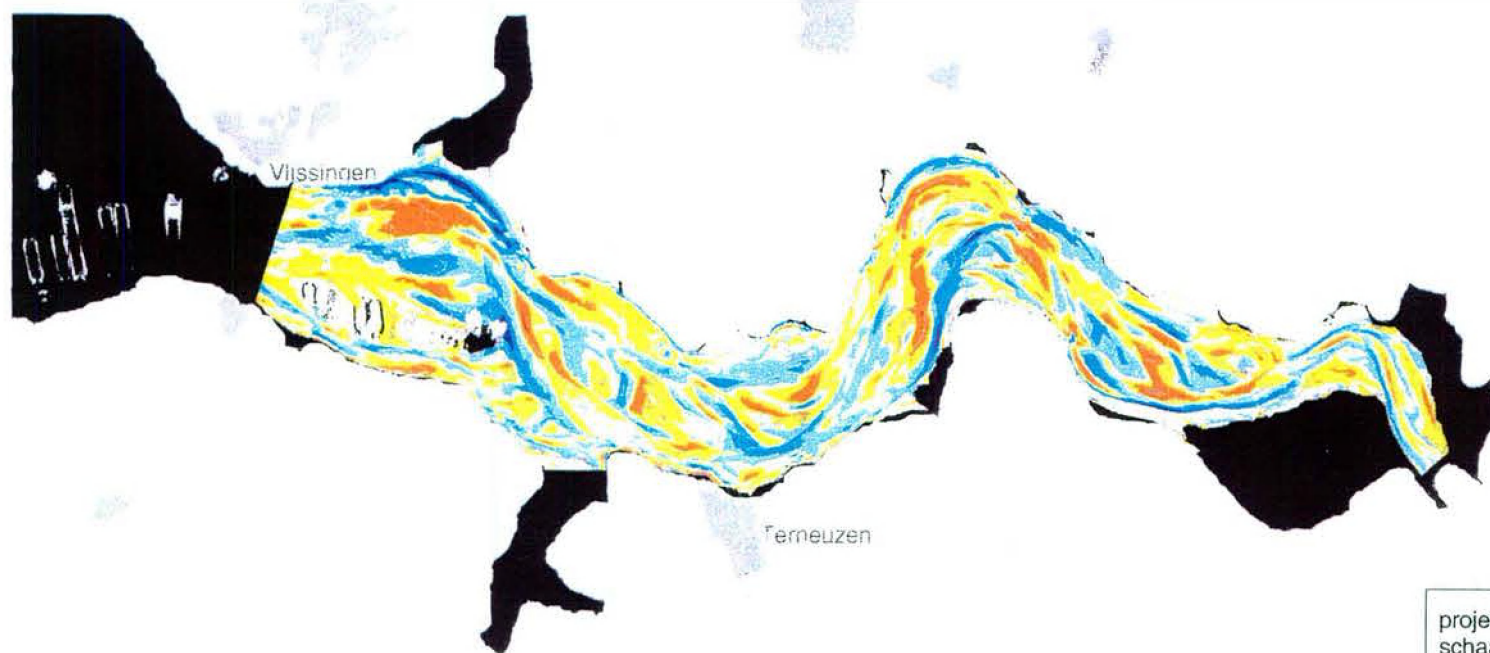
[illegible]

			1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	lotaal	
Inpoldering	Bath	ha																							
	Saefting	ha																							
	Hellegat	ha																							
	Braakman	ha																							
	Sloe	ha																					148		
	totaal	ha																					930		
Baggeren	Oost	mln m³	9.05	11	8.23	8.17	10.4	9.37	8.97	7.44	5.63	6.85	7.68	9.5	10.2	9.68	8.44	5.25	6.85	5.93	6.61	6.56	6.21	258.32	
	Midden	mln m³	0.81	0	0.12	0.26	0.22	0.32	0	2.89	0.47	0	0.4	0.39	0.14	0	0	0.6	0.52	0.32	0.36	1.17	1.3	10.29	
	West	mln m³	2.43	1.79	0.49	2.45	1.2	1.23	0.87	0.71	1.04	1.03	1.4	0.83	0.42	0.47	0.64	0.7	0.83	0.76	0.6	0.77	1.65	34.16	
		totaal baggeren		12.29	12.79	8.84	10.88	11.82	10.92	9.84	11.04	7.14	7.88	9.48	10.72	10.76	10.15	9.08	6.55	8.2	7.01	7.57	8.5	9.17	302.77
Storten (1)	Oost	mln m³	5.72	6.79	5.34	5.44	5.17	4.17	5.17	5.92	4.12	5.38	5.45	7.39	6.76	5.87	4.26	3.41	3.57	3.85	2.83	3.84	2.6	177.86	
	Midden	mln m³	2.48	1.22	1.8	2.4	3.96	2.53	1.93	3.3	1.5	0.93	2.38	2.26	2.59	3.59	3.95	2.43	3.64	2.21	0.8	3.43	4.41	59.37	
	West	mln m³	1.37	1.64	0.49	2.57	1.47	3.3	2.47	1.82	2.14	1.84	1.9	0.97	1.03	0.47	0.64	0.7	0.83	0.9	3.06	1	1.89	38.52	
		subtotaal storten materiaal Westerschelde		9.57	9.65	7.63	10.41	10.6	10	9.57	11.04	7.76	8.15	9.73	10.62	10.38	9.93	8.85	6.54	8.04	6.96	6.69	8.27	8.9	275.75
Intern onttrokken	Oost	mln m³	3.33	4.21	2.89	2.73	5.23	5.2	3.8	1.52	1.51	1.47	2.23	2.11	3.44	3.81	4.18	1.84	3.28	2.08	3.78	2.72	3.61	80.48	
	Midden	mln m³	-1.67	-1.22	-1.68	-2.14	-3.74	-2.21	-1.93	-0.41	-1.03	-0.93	-1.98	-1.87	-2.45	-3.59	-3.95	-1.83	-3.12	-1.89	-0.44	-2.26	-3.1	-49.08	
	West	mln m³	1.06	0.15	0	-0.12	-0.27	-2.07	-1.6	-1.11	-1.1	-0.81	-0.5	-0.14	-0.61	0	0	0	-0.14	-2.46	-0.23	-0.2	-4.36		
		subtotaal onttrokken (baggeren - storten(1))		2.72	3.14	1.21	0.47	1.22	0.92	0.27	0	-0.62	-0.27	-0.25	0.1	0.38	0.22	0.23	0.01	0.16	0.05	0.88	0.23	0.27	27.02
Storten (2)	uit kan. Z.-Beveland	mln m³	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	1.9	0.59	0	2.98	0	0.13	1.18	0.16	0.04	0.17	0.1	0	7.42	
	uit Zeeschelde, België	mln m³	0.08	0.09	0.81	1.09	0.84	0.35	0.27	0.03	0.67	0.39	0.44	0.87	0.14	0.09	0	0	0	0	0	0	0	6.85	
		subtotaal storten 'extern' materiaal		9.65	9.65	7.63	10.41	10.6	10	9.57	11.21	7.76	10.05	10.32	10.62	13.36	9.93	8.98	7.72	8.2	7	6.86	8.37	8.9	283.94
Zandwinning	handel	mln m³	1.15	1.13	0.89	1.39	1.55	1.47	1.35	1.38	1.47	1.47	1.6	1.67	1.71	1.73	1.8	1.59	1.76	1.96	2.09	2.03	1.65	39.65	
	overheden	mln m³	1.19	1.91	2.7	1.82	0.37	0.64	0.48	0	2.26	1.98	1.45	1.76	0.23	0.57	1.44	0.11	0.05	0.05	0.04	0.01	0.01	47.89	
		subtotaal zandwinning		2.34	3.04	3.59	3.21	1.92	2.11	1.83	1.38	3.73	3.45	3.05	3.43	1.94	2.3	3.24	1.7	1.81	2.01	2.13	2.04	1.66	87.54
Totaal onttrokken	subtotaal onttrokken+zandwinning-storten(2 mln m³		-4.59	-3.47	-2.83	-6.73	-7.46	-6.97	-7.47	-9.83	-4.65	-6.87	-7.52	-7.09	-11.04	-7.41	-5.51	-6.01	-6.23	-4.94	-3.85	-6.1	-7	-169.38	
Geulwandverdediging	Nauw van Bath																								
	Walsoorden (Zuidergat)																								
	Gat van Ossenisse																								
	Kruiningen-Hansweert																								
	Verdronken land van Saefting																								
	Baalhoek																								
EXTERNE INGREPEN	Markiezaat met Markiezaatsdam	jaar																							
	Noordzee/kust																								
	Oosterscheldestormvloedkering	jaar																					x		
	Oesterdam	jaar																					x		
	Philipsdam	jaar																					x		
	lozingsmiddel Zoommeer	jaar																					x		
	Kreekraksluizen	jaar																					x		
Zoommeer	jaar																					x			
Schelde	Inpoldering																								
	gotpolders																								

Bijlage III Bodemverschilkaarten van de Westerschelde voor verschillende perioden



bodemverandering periode 1931-1955



project: rw741.1
schaal: 1: 300.000
datum: 9-11-'98

Raadgevende Ingenieurs **Bos**
Witteveen

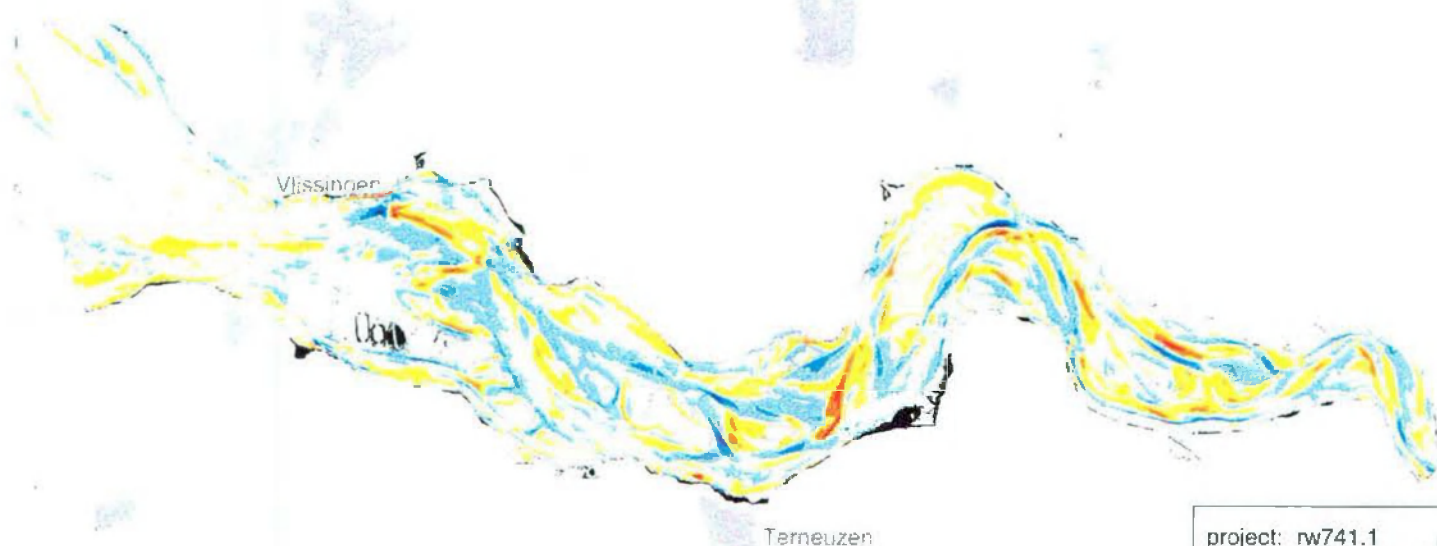
bodemverandering periode 1955-1960



project: rw741.1
schaal: 1: 300.000
datum: 9-11-'98

Raadgevende Ingenieurs **Bos**
Witteveen

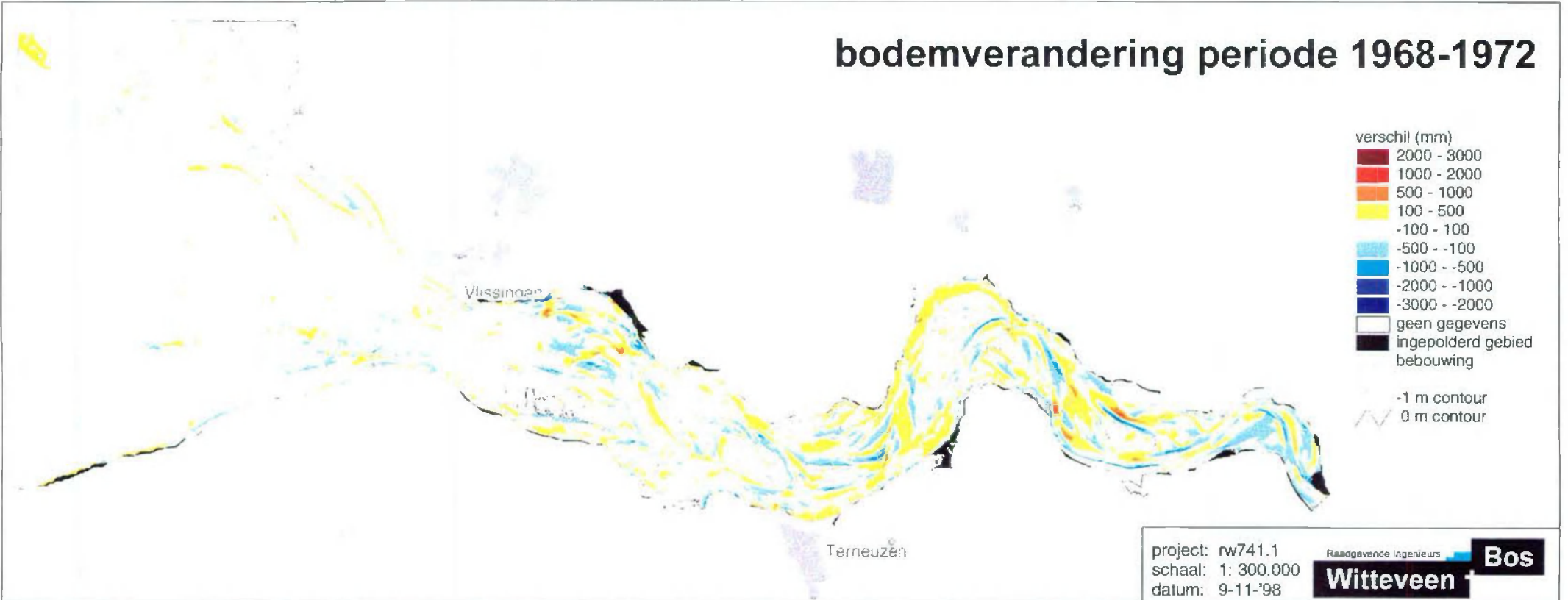
bodemverandering periode 1960-1968



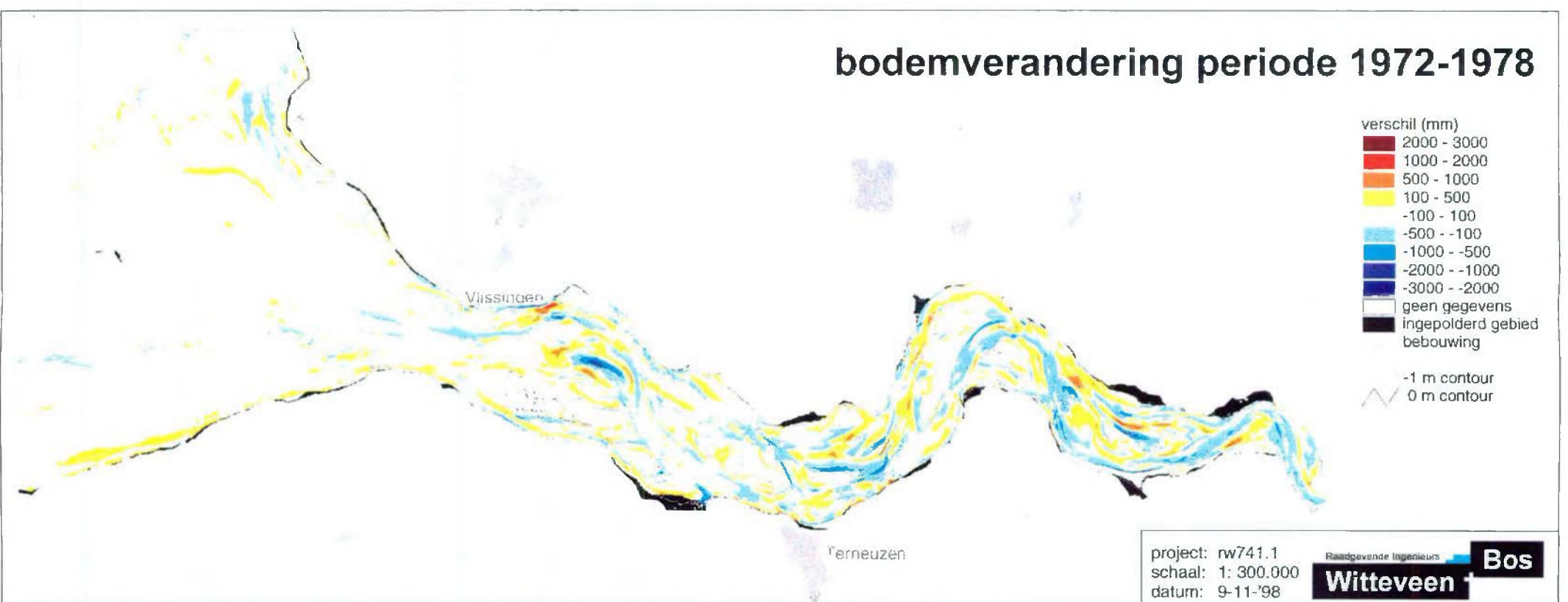
project: rw741.1
schaal: 1: 300.000
datum: 9-11-'98

Raadgevende Ingenieurs **Bos**
Witteveen

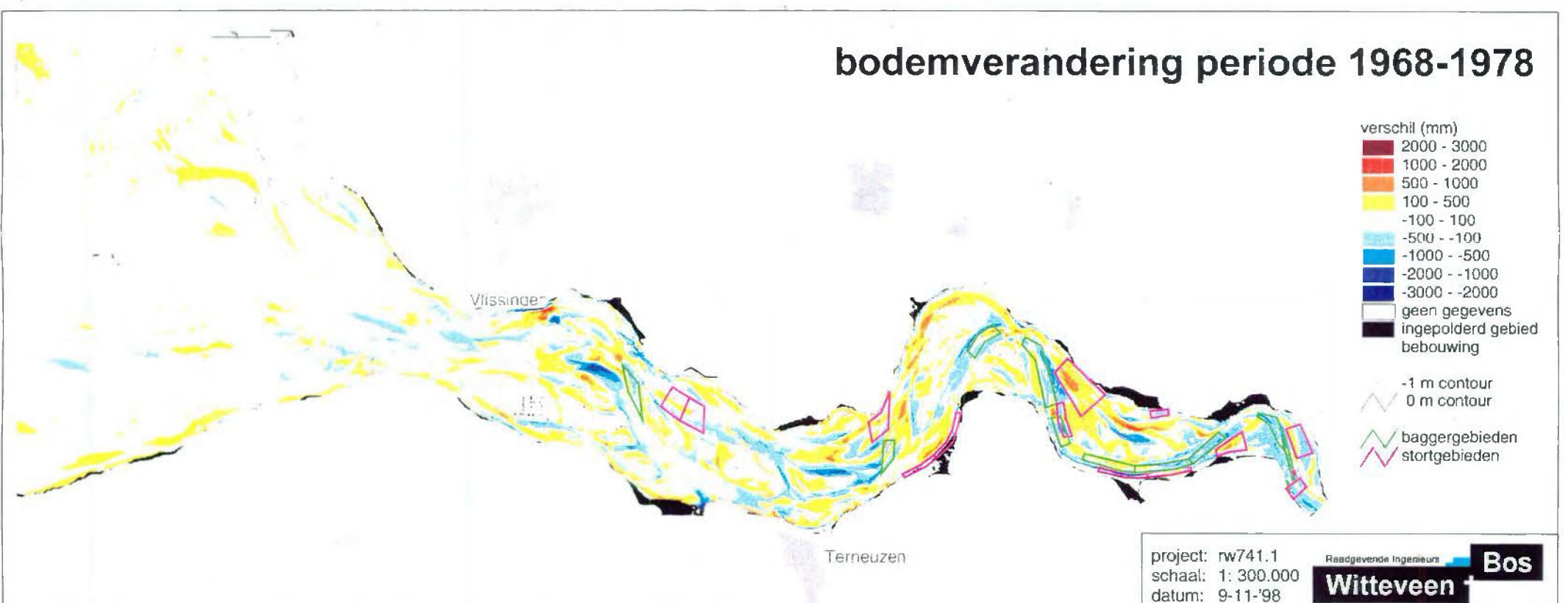
bodemverandering periode 1968-1972



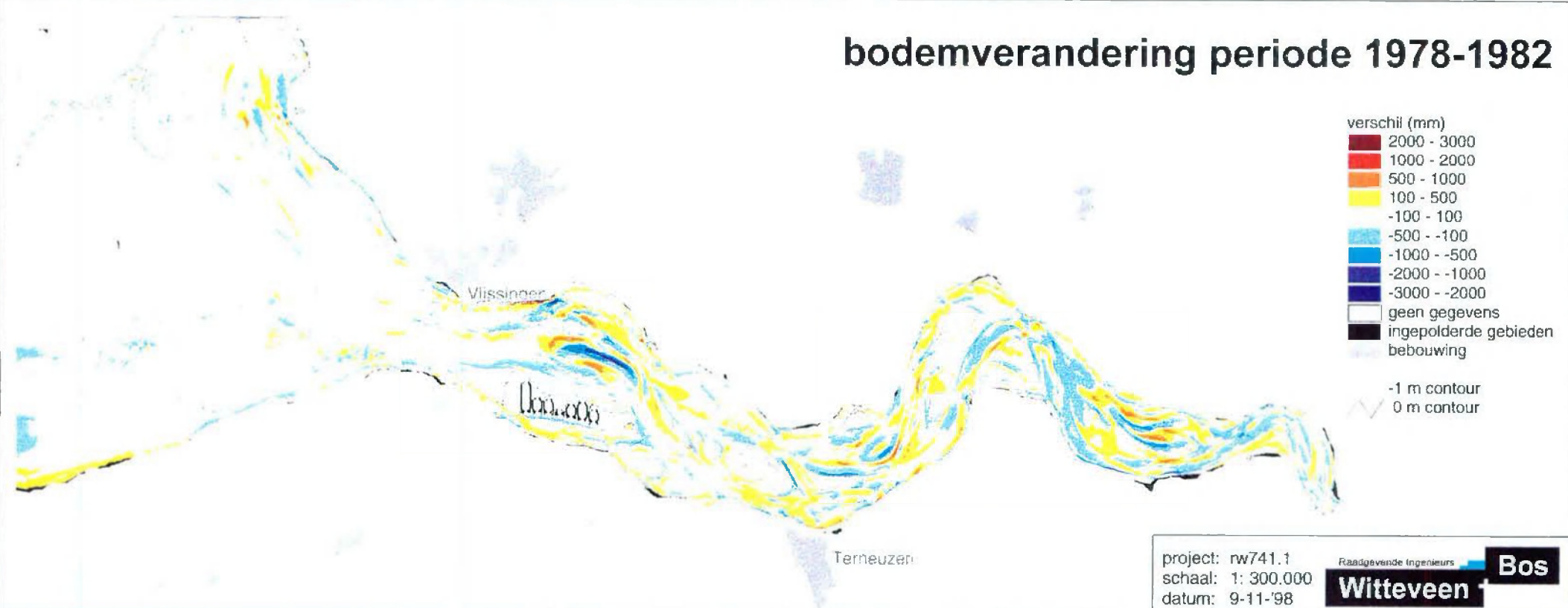
bodemverandering periode 1972-1978



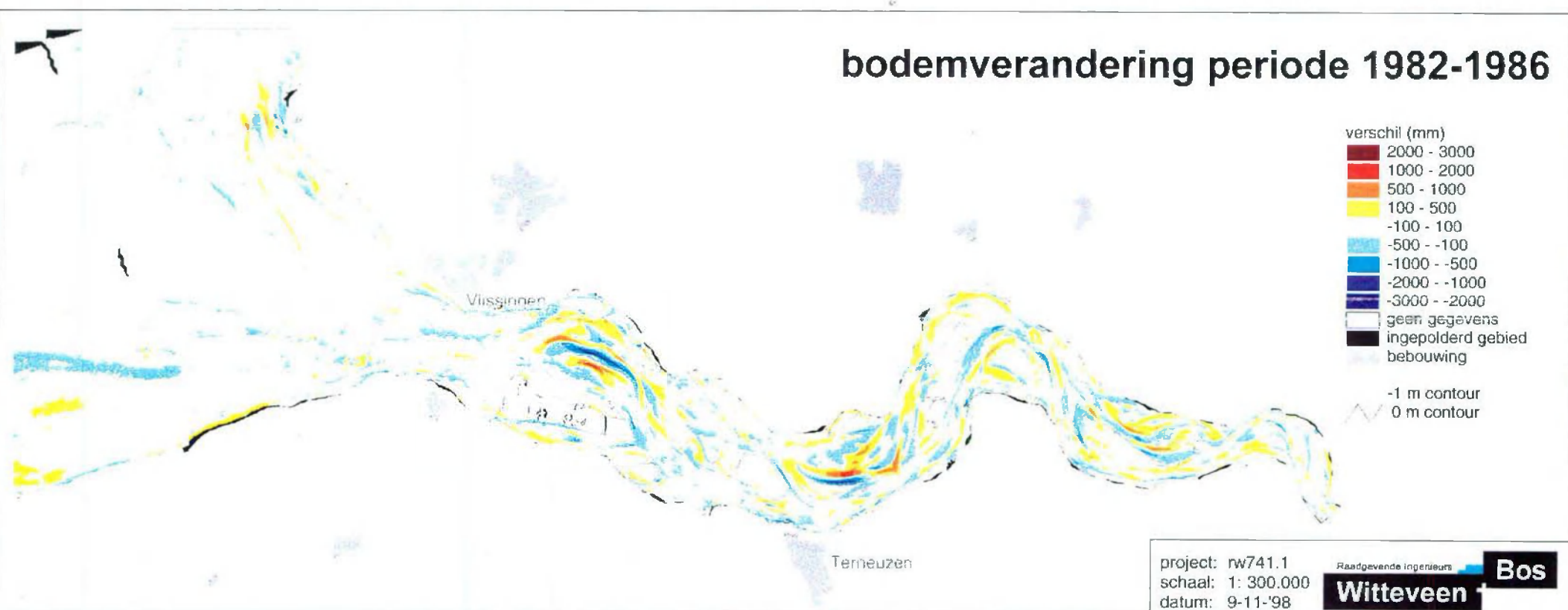
bodemverandering periode 1968-1978



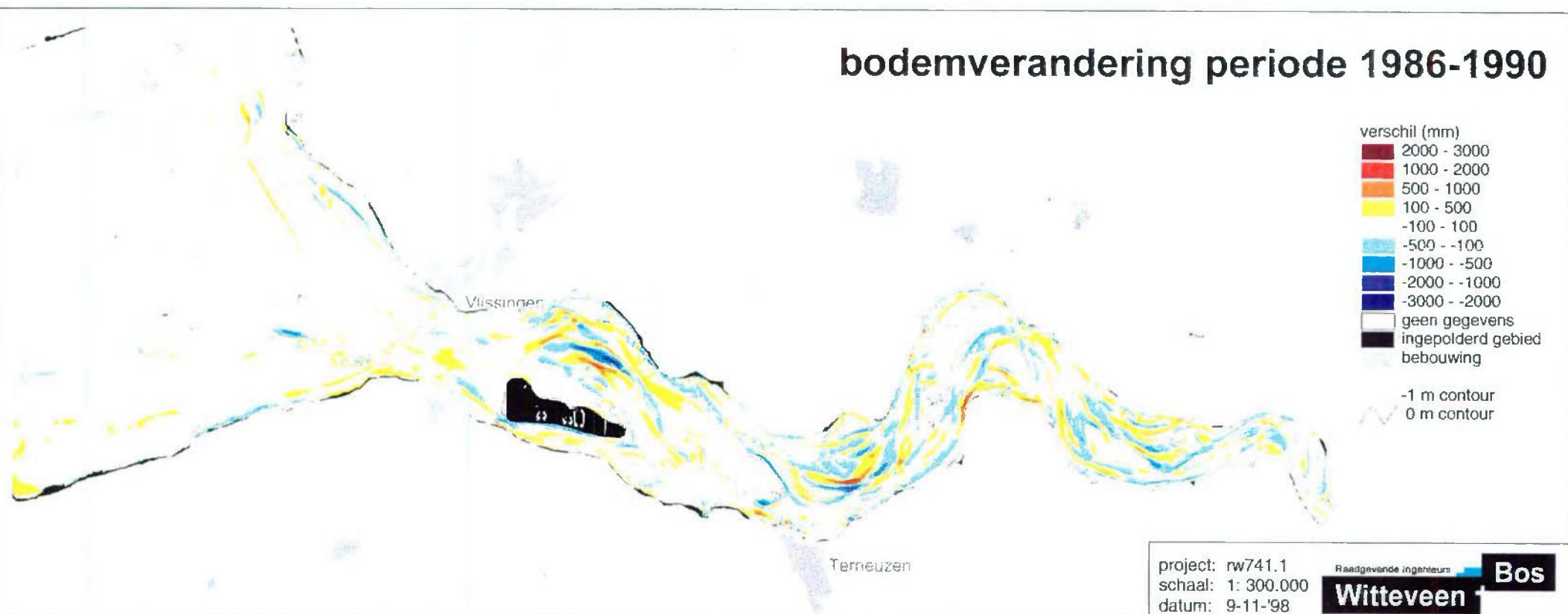
bodemverandering periode 1978-1982



bodemverandering periode 1982-1986



bodemverandering periode 1986-1990



bodemverandering periode 1990-1994



project: rw741.1
schaal: 1: 300.000
datum: 9-11-'98

Raadgevende Ingenieurs **Bos**
Witteveen

bodemverandering periode 1994-1996



project: rw741.1
schaal: 1: 300.000
datum: 9-11-'98

Raadgevende Ingenieurs **Bos**
Witteveen

Bijlage IV Rol van het astronomische getij

IV. ROL VAN HET ASTRONOMISCHE GETIJ

IV.1. Inleiding

Om een schatting te kunnen maken van het aandeel van het astronomisch getij in fluctuaties in het jaargemiddelde getijverschil bij Vlissingen, is het spectrum van het tijdsafhankelijke signaal dat door opeenvolgende jaargemiddelden wordt gevormd, vergeleken met het spectrum van een synthetische reeks die verwacht mag worden als het verloop van waterstanden volledig bepaald zou worden door het astronomisch getij.

Om dit tweede spectrum te kunnen bepalen, zijn uit de synthetische reeks van waterstanden eerst alle hoog- en laagwaters afgeleid. De methode die daarvoor is toegepast, bestaat uit de volgende stappen:

1. Voor elke deelreeks van één jaar zijn de amplitudes en fasen van 47 harmonische componenten bepaald³.
2. Met behulp van de gekwantificeerde componenten zijn reeksen van hoog- en laagwaters voor het betreffende jaar berekend. Daarbij is gebruik gemaakt van de voorkennis dat het getij bij Vlissingen een dubbeldaags karakter heeft. De dominante dubbeldaagse component heeft een periode van 44712 seconde. Dat wil zeggen dat elk hoogwater ongeveer deze periode na z'n voorganger gevonden kan worden. In de rekenprocedure voor de bepaling van hoogwaters is dit verwerkt door elk volgend hoogwater te zoeken in een tijdsinterval waarvan de ondergrens $44712s - \Delta t$ en de bovengrens $44712s + \Delta t$ na het laatst gevonden hoogwater valt. In dat interval wordt gezocht naar het tijdstip waarop de afgeleide naar de tijd van de superpositie van harmonische componenten gelijk is aan nul. De foutmarge in de bepaling van dit tijdstip bedraagt ten hoogste 1s. Voor de bepaling van laagwaters is een analoge procedure gehanteerd.
3. Uit de zo bepaalde hoog- en laagwaters is het verloop van het jaargemiddelde getijverschil bepaald.

Vergelijking van spectra volgens de genoemde methode komt in de volgende paragraaf aan bod. De conclusies komen daarna aan de orde.

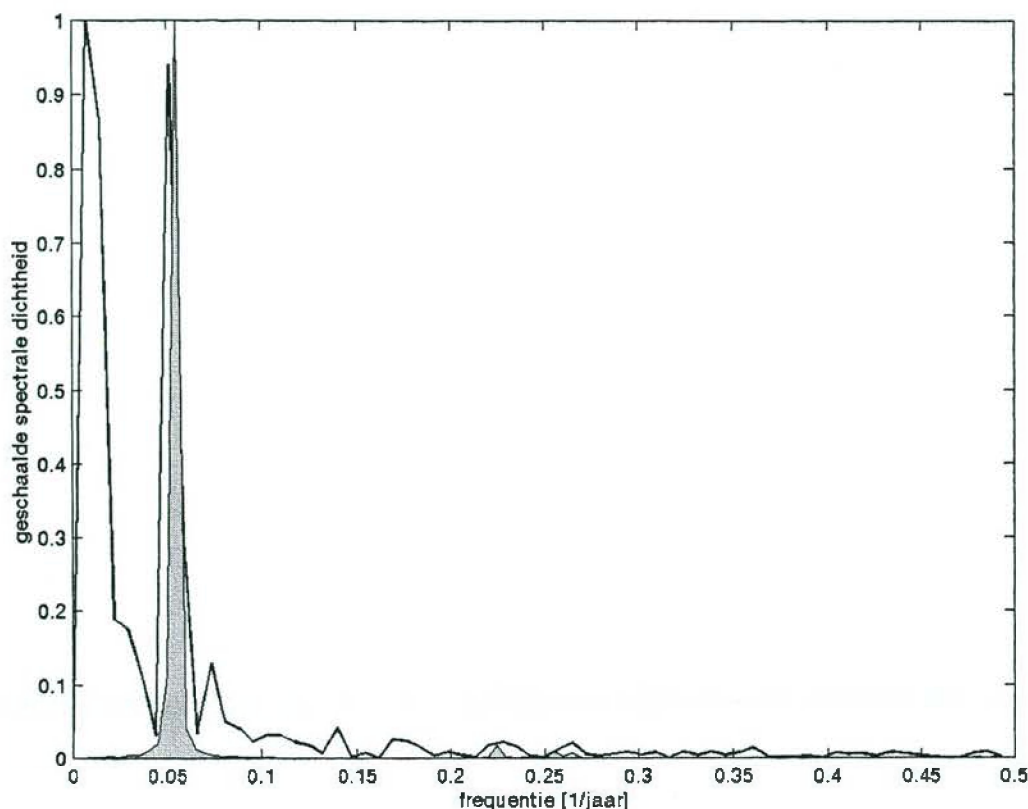
³

Dit is een merkwaardige stap aangezien de synthetische reeks is bepaald uit sommatie van harmonische componenten. Echter, de synthetische reeks is in de vorm van uurwaarden voor de onderhavige analyse opgeleverd en pas daarna is naar voren gekomen dat het voor de verwerking van de gegevens makkelijker zou zijn geweest om met amplitudes en fasen van de onderliggende componenten te werken. Aangezien de inspanning die geleverd moet worden om vanuit de uurwaarden terug te gaan naar de harmonische componenten klein is ten opzichte van het alsnog beschikbaar stellen van amplitudes en fasen, is uit praktische overweging voor het eerste gekozen.

IV.2. Vergelijking van spectra

Door toepassing van *Fourier Transformatie* zijn uit het tijdsafhankelijke verloop van de jaargemiddelde getijverschil, frequentie spectra afgeleid. Dat is gedaan voor jaargemiddelde getijverschillen die uit waarnemingen aan waterstanden bij Vlissingen zijn afgeleid en voor getijverschillen die zijn berekend uit de synthetische reeks van waterstanden. Beide spectra zijn in afbeelding IV.1 weergegeven.

Afbeelding IV.1 Vergelijking van spectra



In deze afbeelding is met de getrokken lijn het spectrum aangegeven dat hoort bij de waarnemingen. Het gearceerde spectrum heeft betrekking op de synthetische reeks van waterstanden.

Onderlinge vergelijking van de spectra is erop gericht om een uitspraak te kunnen doen over verschillen of overeenkomsten in de relatieve mate waarin bepaalde frequenties in de beide achterliggende signalen aanwezig zijn. Tegen deze achtergrond volstaat het om de vorm van de spectra te vergelijken; de schaal is daarvoor niet relevant. Om dat te vereenvoudigen zijn de twee spectra geschaald. Daardoor liggen de pieken van de twee spectra in afbeelding IV.1 op hetzelfde niveau.

Het is niet verwonderlijk dat het 'waargenomen' spectrum meer ruis bevat dan het 'synthetische' spectrum. Een deel van die ruis zal afkomstig zijn van meteorologische effecten, ook al zijn die onderdrukt door uit te gaan van getijverschillen in plaats van bijvoorbeeld hoogwaters.

Een opvallende overeenkomst is de plek bij die optreedt voor de component met een periode van 18,2 jaar. Vrijwel zeker houdt deze plek verband met de getijcomponent met een periode van 18,6 jaar. Dat de piek van het spectrum niet precies bij deze frequentie ligt, heeft te maken met de resolutie die met de *Fourier Transformatie* in het frequentie-domein bereikt kan worden. Deze is evenredig het aantal punten in de tijdreeks waar de transformatie op wordt toegepast.

Naast deze overeenkomst is er ook een opvallend verschil. Het 'waargenomen' spectrum vertoont een plek bij een periode van 136 jaar. Deze plek, die niet voorkomt in het 'synthetische' spectrum, houdt verband met de geconstateerde gestage toename van de getijslag. Overigens mag uit de ligging van deze plek geen conclusie worden getrokken over periodiek gedrag op een grote tijdschaal. Periodes groter dan 136 jaar komen in het berekende spectrum niet voor als gevolg van de beperkte lengte van de reeks van jaargemiddelde getijslagen en de dichtst bij gelegen kleinere periode waarvoor een spectrale waarde is berekend, is 68 jaar. We kunnen dus hooguit stellen dat er een piek in het spectrum zit bij een periode groter dan 68 jaar.

Alvorens de *Fourier Transformatie* is toegepast, is het signaal van jaargemiddelde getijverschillen niet ontdaan van een eventuele lineaire trend. De enige bewerking die vooraf is toegepast, is dat door lineaire transformatie het gemiddelde van alle jaargemiddelden geforceerd is op een waarde nul.

Meestal wijst een plek in het spectrum bij de grootste beschouwde periode (laagste frequentie) op de aanwezigheid van een trend in het oorspronkelijke signaal. Overigens is daarmee niet gezegd dat er naast die trend niet nog een periodieke component met een betrekkelijk grote periode aanwezig kan zijn. Echter, als die periode groter is dan 68 jaar, dan is de bijdrage van die component met behulp van het berekende spectrum niet te onderscheiden van het effect van de trend.

Uit deze vergelijking van de twee spectra concluderen we dat in de synthetische reeks (en dus in het astronomische getij) geen periodieke component aanwezig is die het waargenomen langjarige gedrag van jaargemiddelde getijverschillen kan verklaren.

Bijlage V Verwijdering van 18,6 jarige cyclus

V. VERWIJDERING VAN 18,6 JARIGE CYCLUS

V.1. Doel

Tijdreeksen van jaargemiddelde hoogwaters, laagwaters en getijverschillen worden gecorrigeerd voor de 18,6-jarige cyclus die voorkomt in het astronomische getij. Deze component draagt in hoge mate bij aan de betreffende reeksen. De te corrigeren reeksen zijn afgeleid uit waterstanden die zijn waargenomen in 8 meetstations langs de Zeeschelde, de Westerschelde en rond de monding van de Westerschelde.

V.2. Methode

Om uit een tijdreeks (t_i, y_i) een sinuscomponent met periode ω te verwijderen, worden de volgende stappen doorlopen:

1. Uit de reeks wordt een eventueel aanwezige lineaire trend verwijderd;
2. De amplitude α en fase ϕ van de sinuscomponent die in het zo gefilterde signaal aanwezig is, worden bepaald door deze component in de zin van kleinste kwadraten aan het gefilterde signaal aan te passen;

De gevonden sinuscomponent wordt van het gefilterde signaal afgetrokken en vervolgens wordt de trend die in stap 1 is verwijderd bij het verschil opgeteld. Het resultaat is de originele reeks waar de gevonden sinuscomponent uit verwijderd is. In bijgaande afbeeldingen is dit de gecorrigeerde reeks genoemd.

V.3. Rekenkundige uitwerking

1. De lineaire trend wordt genoteerd als $\lambda t + \mu$. De coëfficiënten λ en μ worden bepaald met de methode der kleinste kwadraten. Dat wil zeggen dat

$$\sum_i (y_i - (\lambda \cdot t_i + \mu))^2$$

wordt geminimaliseerd. Ter plaatse van het minimum van deze som geldt

$$\begin{pmatrix} \sum_i t_i^2 & \sum_i t_i \\ \sum_i t_i & \sum_i 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i t_i y_i \\ \sum_i y_i \end{pmatrix}$$

2. Amplitude en fase van de sinuscomponent worden ook met de methode der kleinste kwadraten bepaald. Dat leidt tot

$$\begin{pmatrix} \sum_i \sin^2(\omega t_i) & \sum_i \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) \\ \sum_i \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) & \sum_i \cos^2(\omega t_i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \cdot \cos(\phi) \\ \alpha \cdot \sin(\phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i (y_i - \lambda t_i - \mu) \cdot \sin(\omega t_i) \\ \sum_i (y_i - \lambda t_i - \mu) \cdot \cos(\omega t_i) \end{pmatrix}$$

V.4. Resultaten

De resultaten van het verwijderen van de 18,6 jarige cyclus zijn beschreven in termen van amplitude en fase van deze sinusvormige component. Bovendien is de gemiddelde kwadratische afwijking tussen het oorspronkelijke signaal en de geoptimaliseerde sinus berekend als indicator voor de mate waarin het oorspronkelijke signaal wordt bepaald door de beschouwde cyclus. Deze indicator is gedefinieerd als

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$$

waarin het residu ϵ_i wordt gegeven door

$$\epsilon_i = y_i - \alpha \sin(\omega t_i - \varphi)$$

en waarin voorts α de geoptimaliseerde amplitude van de sinus is, φ staat voor de bijbehorende geoptimaliseerde fase en n is het aantal elementen (jaren waarvoor een jaargemiddelde waterstand gedefinieerd is) in de oorspronkelijke reeks.

De gevonden optimale amplitudes en fasen zijn vermeld in tabel V.1. De indicatoren voor de verschillen tussen jaargemiddelde waterstanden en 18,6 jarige cyclus zijn te vinden in tabel V.2.

Tabel V.1 Amplitude en fase van de 18,6-jarige cyclus

Meetstation	Amplitude [cm]			Fase [radialen]		
	Hoogwater	Laagwater	Getijverschil	Hoogwater	Laagwater	Getijverschil
Antwerpen	4,7	7,5	11,3	-1,23	2,65	-0,77
Prosper	4,2	5,9	8,2	-1,57	2,84	-0,81
Bath	1,2	5,0	5,5	-1,61	2,80	-0,55
Hansweert	2,2	4,0	6,0	-0,77	2,75	-0,52
Terneuzen	2,4	4,3	6,7	-0,55	2,76	-0,44
Vlissingen	2,8	4,3	6,7	-0,97	2,84	-0,57
Cadzand	3,6	3,7	7,4	-0,77	2,77	-0,71
West Kapelle	3,1	3,1	6,2	-0,67	2,69	-0,56

Tabel V.2 Verschil tussen jaargemiddelde waterstanden en 18,6 jarige cyclus

Meetstation	Gemiddelde kwadratische afwijking [cm ²]		
	Hoogwater	Laagwater	Getijverschil
Antwerpen	21,04	22,10	27,31
Prosper	24,63	31,83	23,75
Bath	29,96	36,47	53,81
Hansweert	22,03	17,85	13,68
Terneuzen	17,33	10,88	14,87
Vlissingen	12,22	9,77	7,58
Cadzand	15,76	20,25	20,38
West Kapelle	9,56	7,11	5,58

Grafieken waarin de resultaten van het verwijderen van de 18,6 jarige cyclus voor de verschillende meetstations zijn weergegeven, zijn opgenomen in de afbeeldingen V.1 t/m V.8 op de volgende pagina's. Per meetlocatie zijn twee series van drie grafieken opgemaakt. De ene serie toont de tijdreeks waaruit de lineaire trend is verwijderd in combinatie met de bijbehorende geoptimaliseerde 18,6 jarige cyclus voor zowel hoogwater, laagwater als het getijverschil. De andere serie betreft het residu ϵ als functie van de tijd.

V.5. Bespreking

Op het traject Antwerpen-Vlissingen vertoont de amplitude van de 18,6 jarige cyclus eerst een afname gevolgd door een relatief geringe stijging. Het dal in de amplitude bevindt zich ter hoogte van Bath (voor hoogwater en het getijverschil) of Hansweert (laagwater).

Dit verloop van de amplitude wijkt op hoofdlijnen af van het gedrag dat het jaargemiddelde getijverschil vertoont. In afbeelding V.9 is dit gedrag grafisch weergegeven. Voor elk jaar in de afgelopen eeuw is in deze grafiek de jaargemiddelde getijslag voor diverse meetlocaties aangegeven in verhouding tot de getijslag in Vlissingen. Blijkbaar neemt de getijslag vanaf Vlissingen in de richting van Antwerpen toe, zonder dat zich onderweg een consequente afname voordoet.

Dit verschil in gedrag kan een artefact zijn van het optimaliseren van de amplitude van de 18,6 jarige cyclus. De toegepaste methode garandeert niet dat fluctuaties die in fysisch opzicht niets met de cyclus van doen hebben toch ongeveer hetzelfde gedrag vertonen. In dat geval verklaart de cyclische component meer van het totale signaal dan op grond van het astronomische getij aan deze component zou worden toegeschreven.

In het navolgende worden in het oog springende incidenten in de ontwikkeling van het gecorrigeerde getijverschil voor zes meetlocaties in het estuarium kort beschreven. Naar mogelijke oorzaken wordt in de onderhavige bijlage niet gezocht.

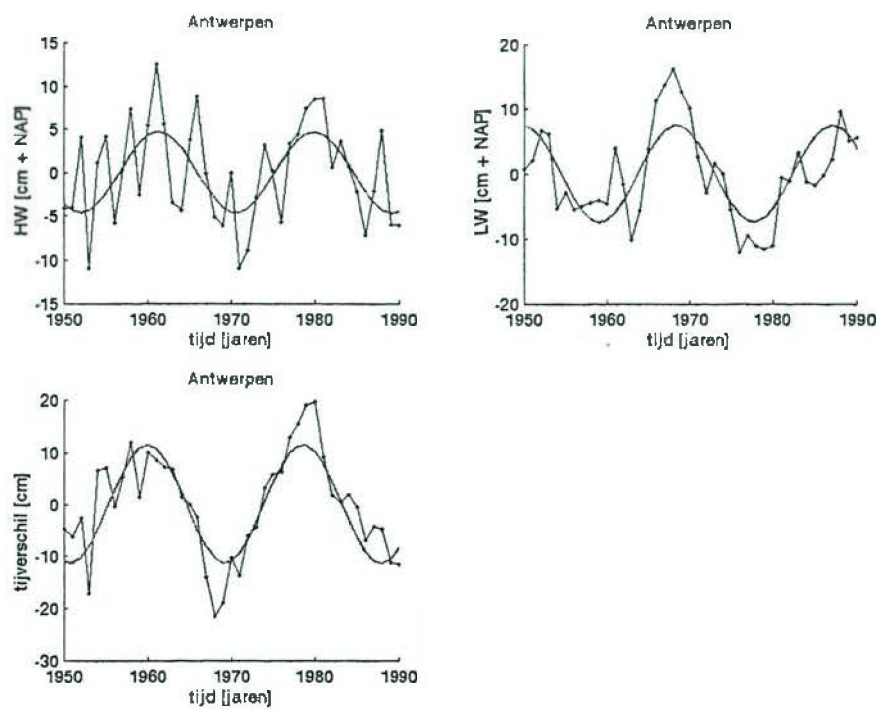
- **Antwerpen**
De 18,6 jarige cyclus verklaart meer van het verloop van hoogwater dan van het verloop van laagwater. Het residu vertoont een stijgende tendens. Visuele beoordeling van afbeelding V.1b voor het getijverschil wekt de indruk dat zich tussen 1960 en 1970 een trendbreuk voordoet in de ontwikkeling van het jaargemiddelde getijverschil. Voor 1960 lijken zich fluctuaties rond een min of meer constant niveau voor te doen, terwijl zich vanaf midden jaren 60 een stijgende tendens ontwikkelt.

- Prosper
Het jaargemiddelde getijverschil nabij Prosper vertoont een gedrag dat sterk lijkt op dat bij Antwerpen, zij het dat de trendbreuk zich op grond van visuele beoordeling van afbeelding V.2b wat later zou kunnen voordoen. Ook zou reeds vóór de trendbreuk sprake kunnen zijn van een zwak stijgende tendens.

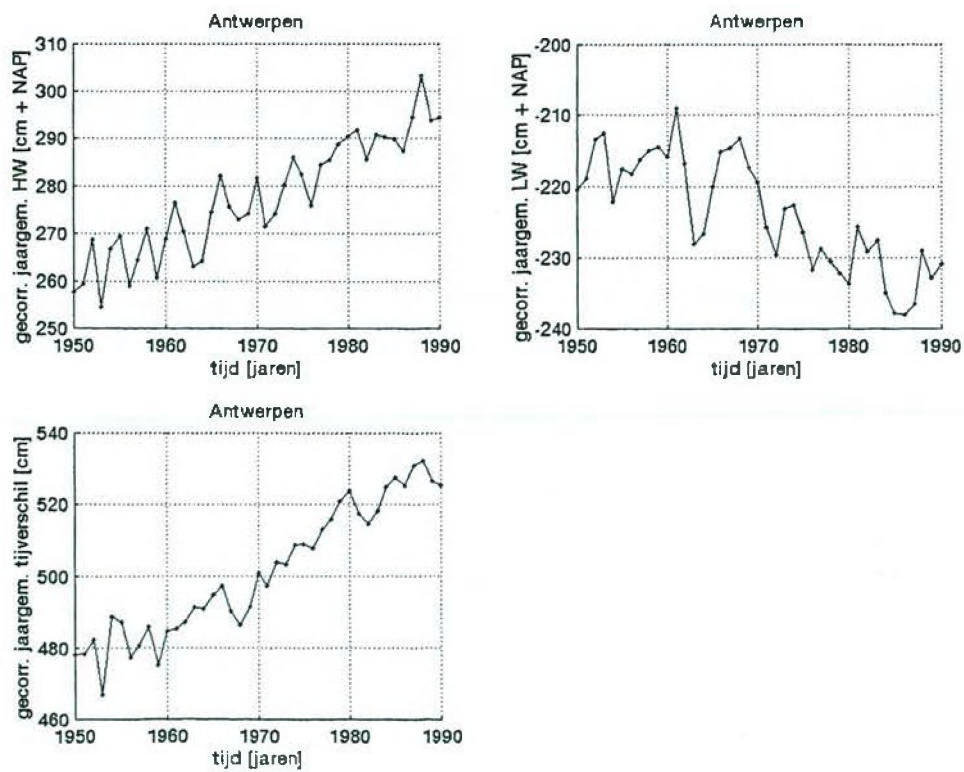
De geleidelijke stijging van het getijverschil vanaf de tweede helft van de jaren 60 lijkt in de periode 1985-1995 langzaam in sterkte af te nemen.

- Bath
De beschikbare tijdreeks van jaargemiddelde waterstanden is voor Bath veel langer dan die voor de twee voorgaande stations. Ruwweg in de periode 1900-1920 neemt het jaargemiddelde getijverschil gestaag toe. Daarna is er tot begin jaren 60 gemiddeld geen toename. Dan zet zich net als bij Antwerpen en Prosper een duidelijke stijgende tendens in die rond 1980 afvlakt (zie afbeelding V.3b).
- Hansweert
Op hoofdlijnen vertoont het gecorrigeerde jaargemiddelde getijverschil hetzelfde gedrag als bij Bath, zij het dat alle veranderingen in trends zich veelal eerder lijken voor te doen. De eerste trendbreuk (van stijgend naar vrijwel constant) zet zich rond 1920 in. De tweede (van constant naar stijgend) begint al vóór 1960 en de daaropvolgende afvlakking ruim vóór 1980 (zie afbeelding V.4b).
- Terneuzen
Voor wat betreft de ontwikkeling van het gecorrigeerde jaargemiddelde getijverschil lijkt wat nabij Terneuzen is waargenomen sterk op wat zich bij Hansweert heeft voorgedaan.
- Vlissingen
Voor Vlissingen geldt dat ook.

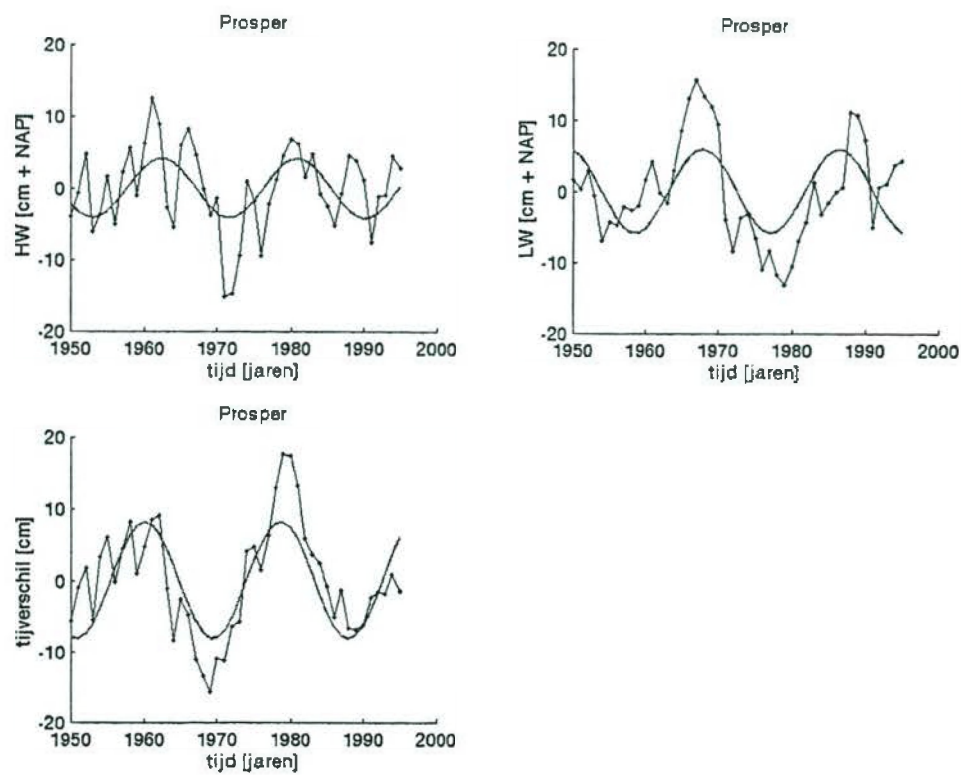
Afbeelding V.1a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Antwerpen)



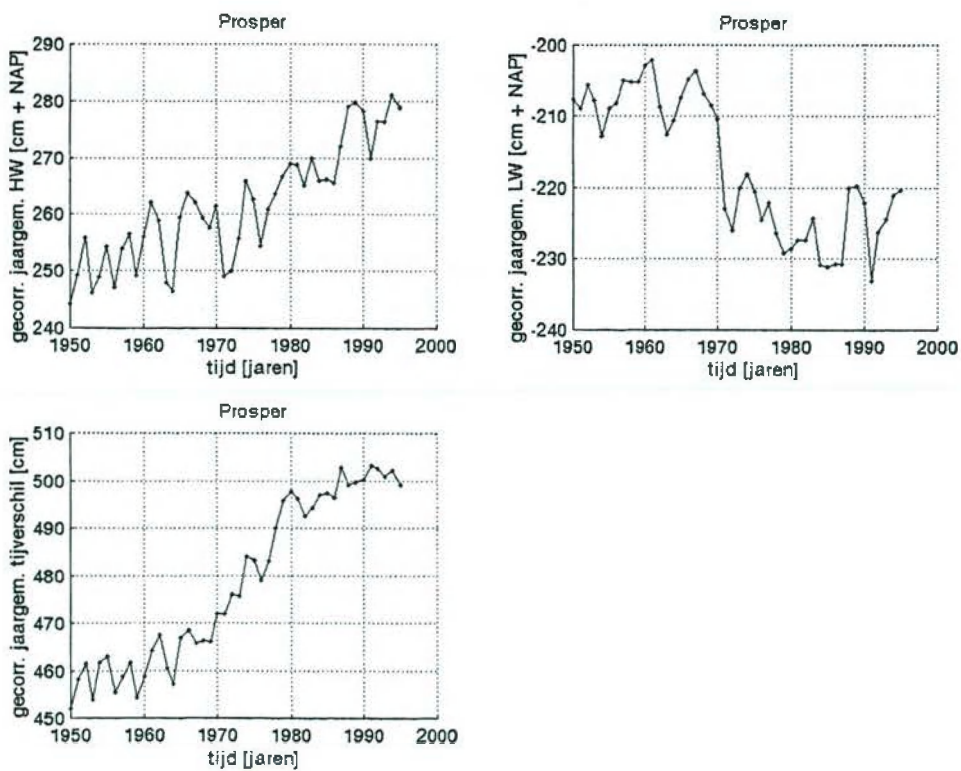
Afbeelding V.1b Gecorrigeerde tijdreeksen



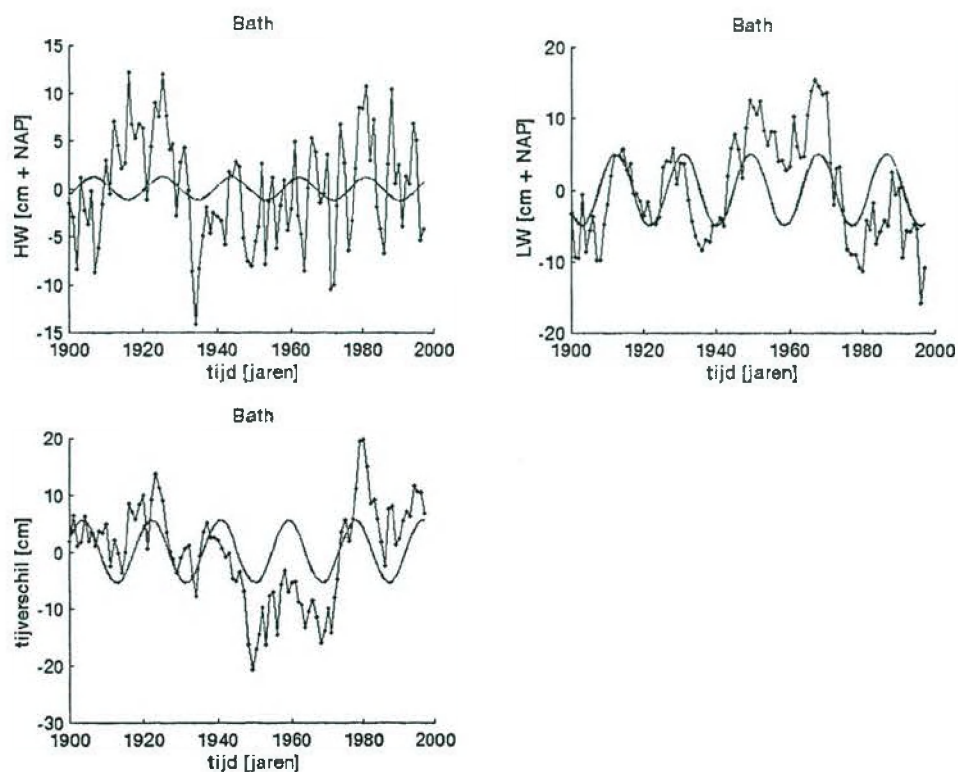
Afbeelding V.2a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Prosper)



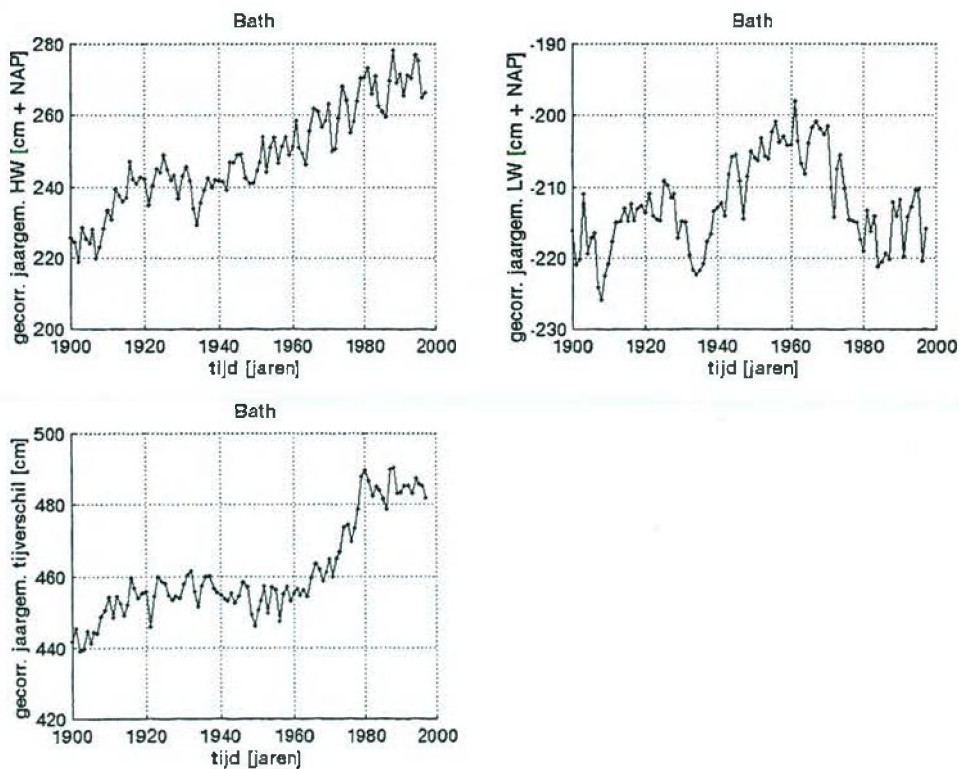
Afbeelding V.2b Gecorrigeerde tijdreeksen (Prosper)



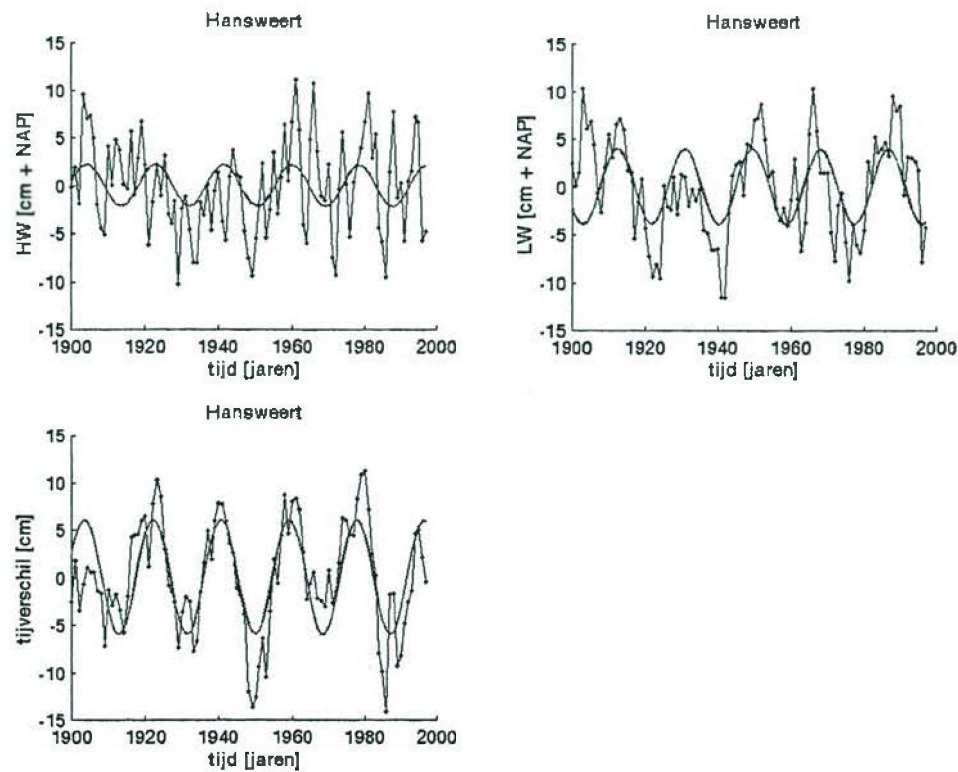
Afbeelding V.3a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Bath)



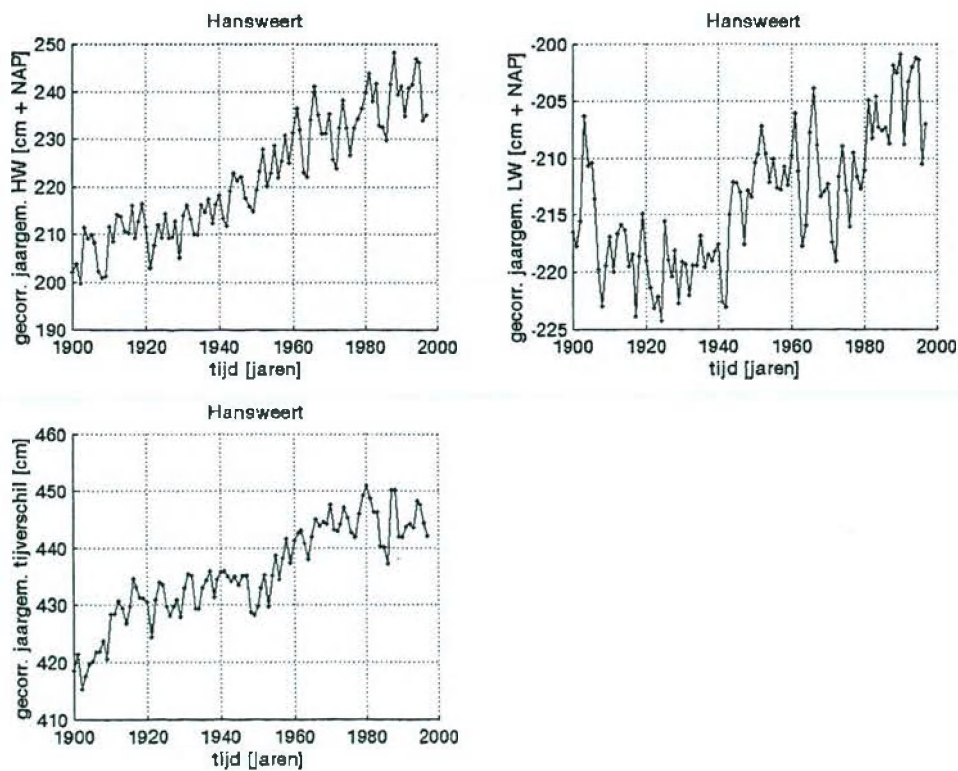
Afbeelding V3b Gecorrigeerde tijdreeksen (bath)



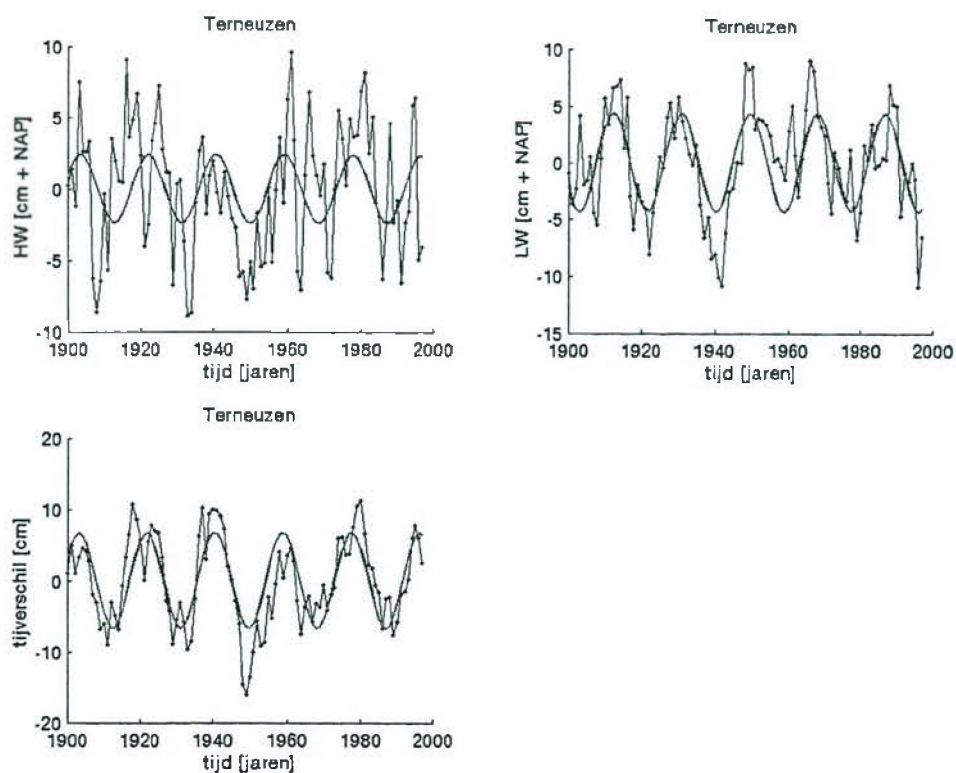
Afbeelding V.4a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Hansweert)



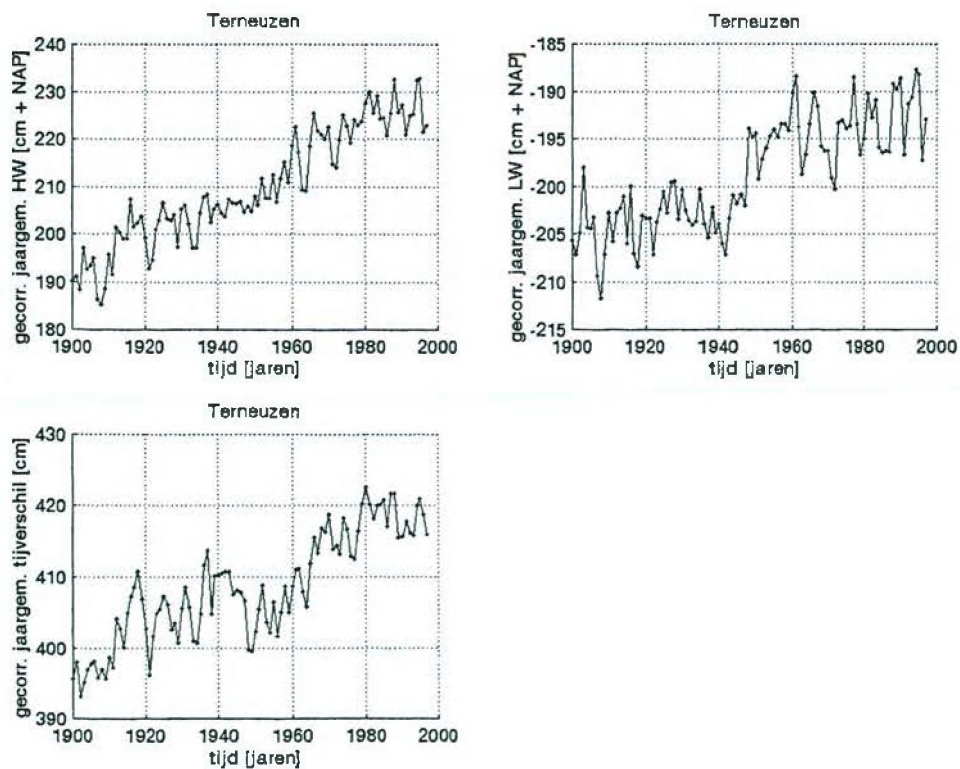
Afbeelding V.4b Gecorrigeerde tijdreeksen (Hansweert)



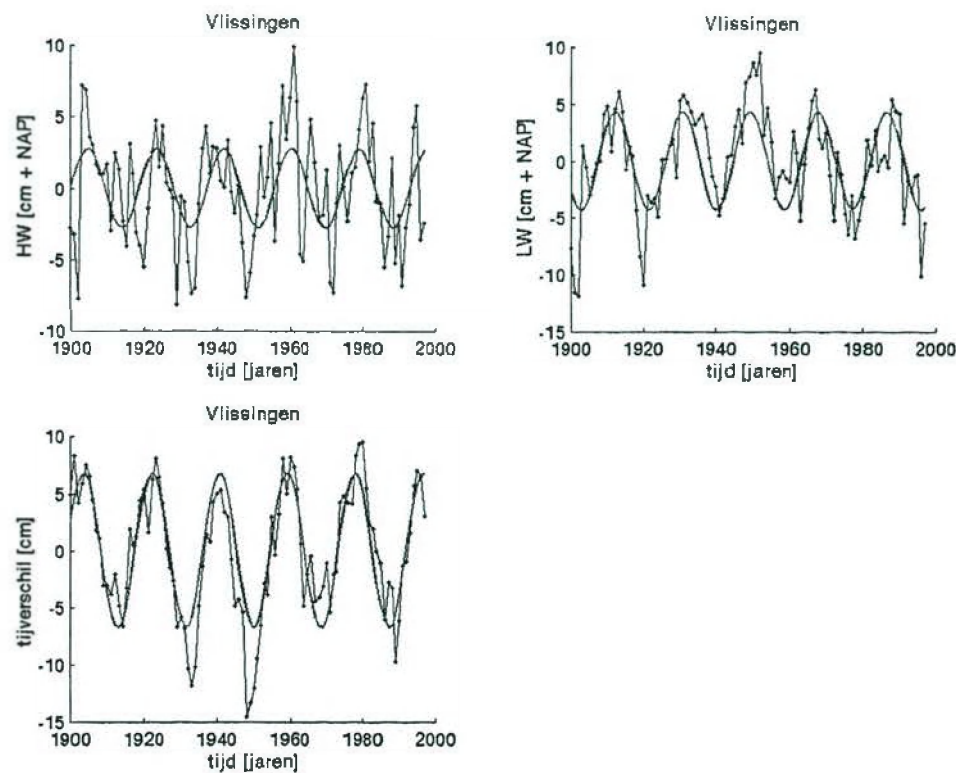
Afbeelding V.5a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Terneuzen)



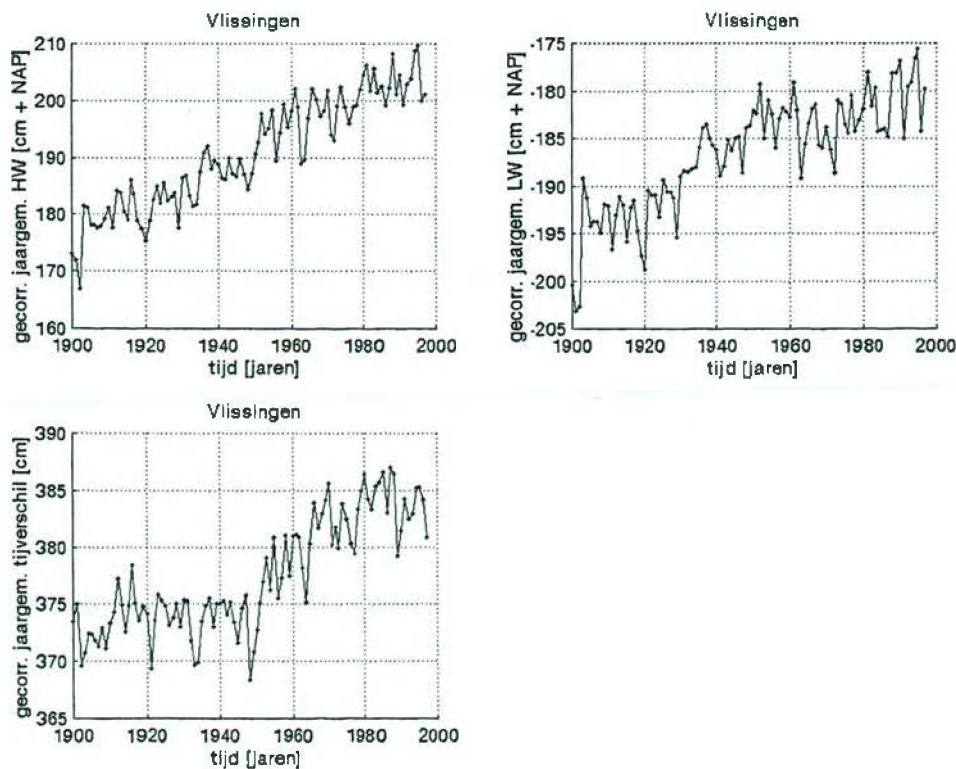
Afbeelding V.5b Gecorrigeerde tijdreeksen Terneuzen)



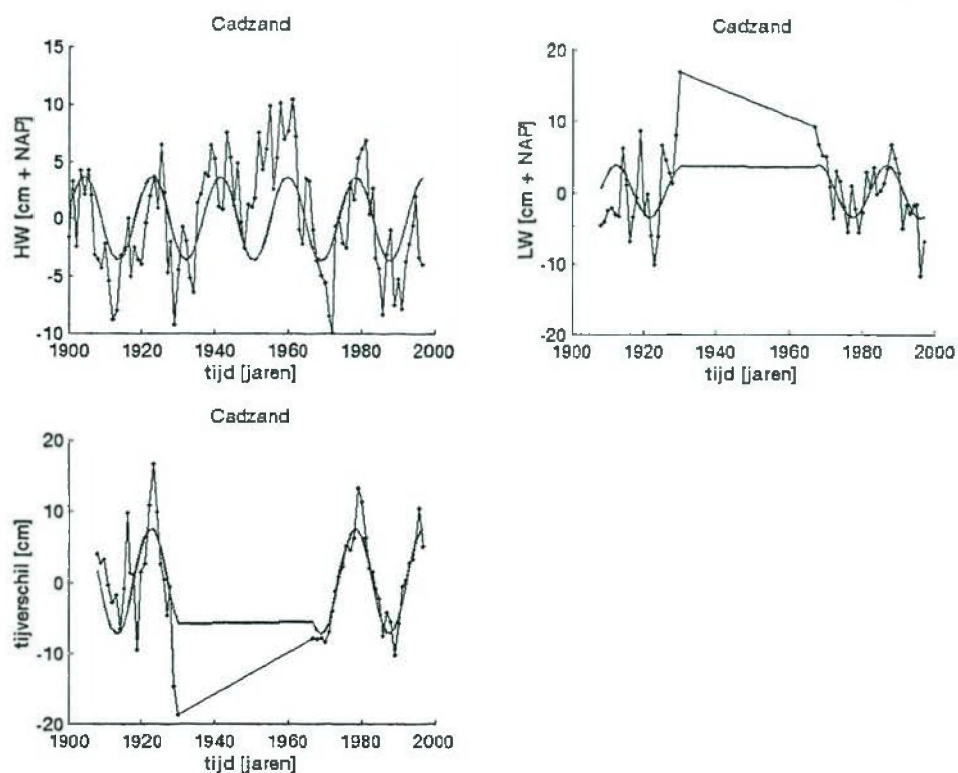
Afbeelding V.6a Tijdsreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Vlissingen)



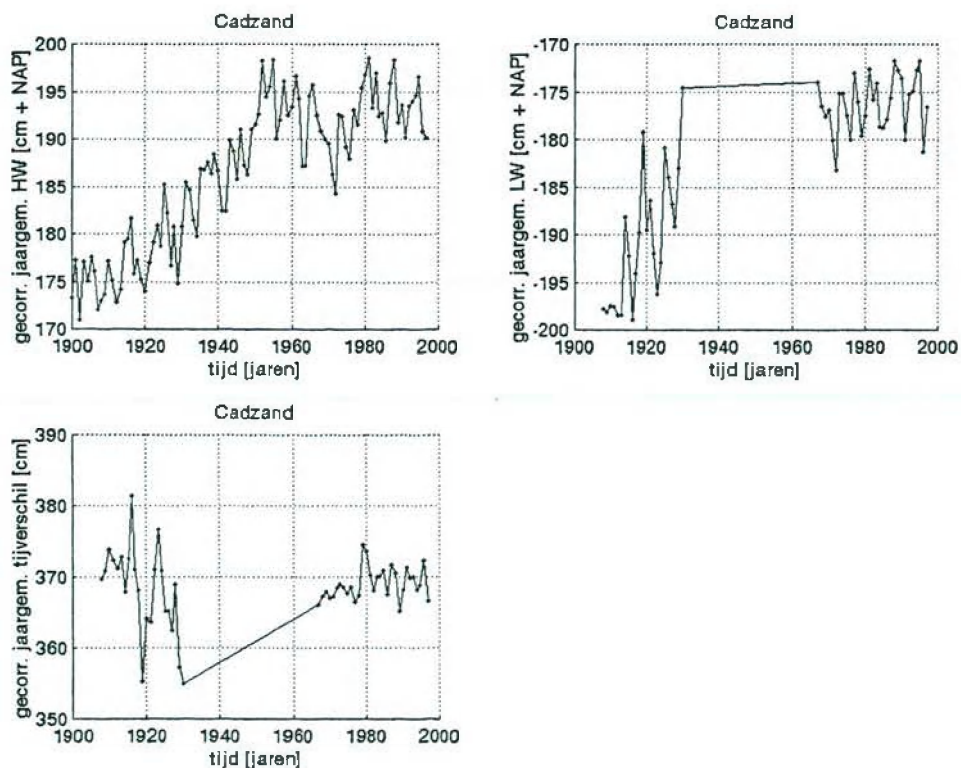
Afbeelding V.6b Gecorrigeerde tijdsreeksen (Vlissingen)



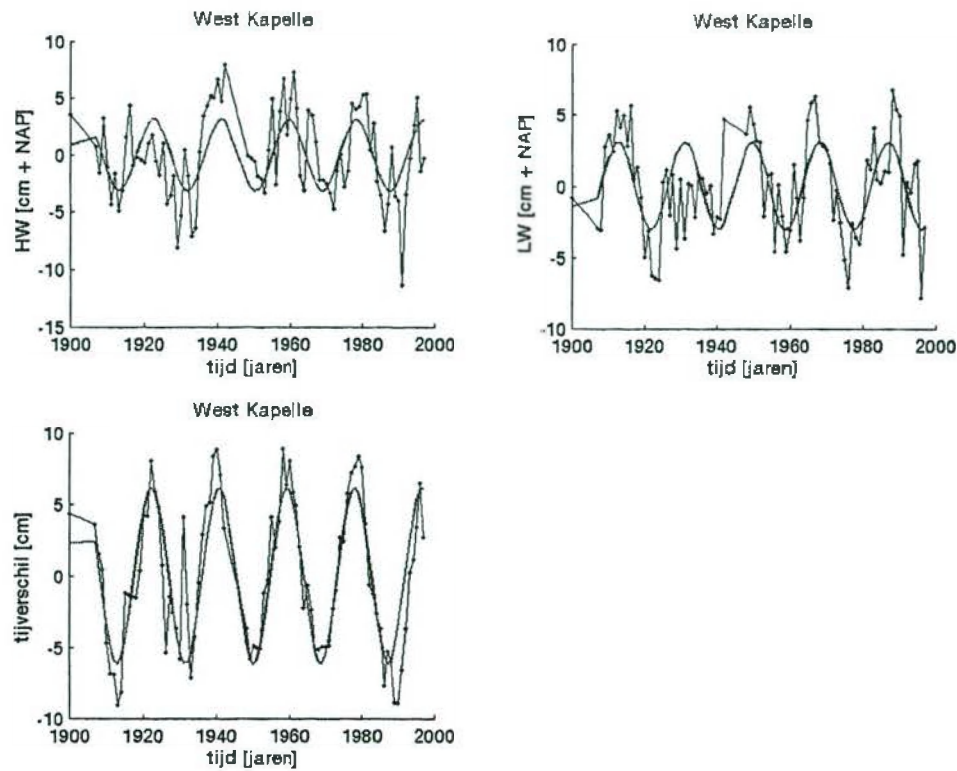
Afbeelding V.7a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (Cadzand)



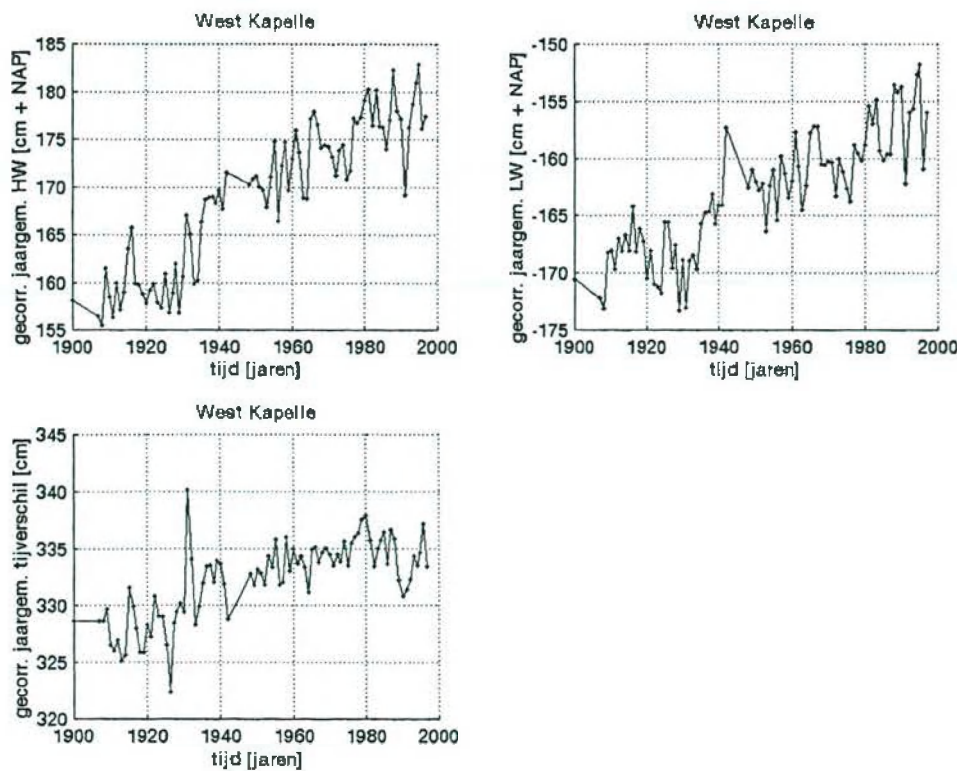
Afbeelding V.7b Gecorrigeerde tijdreeksen (Cadzand)



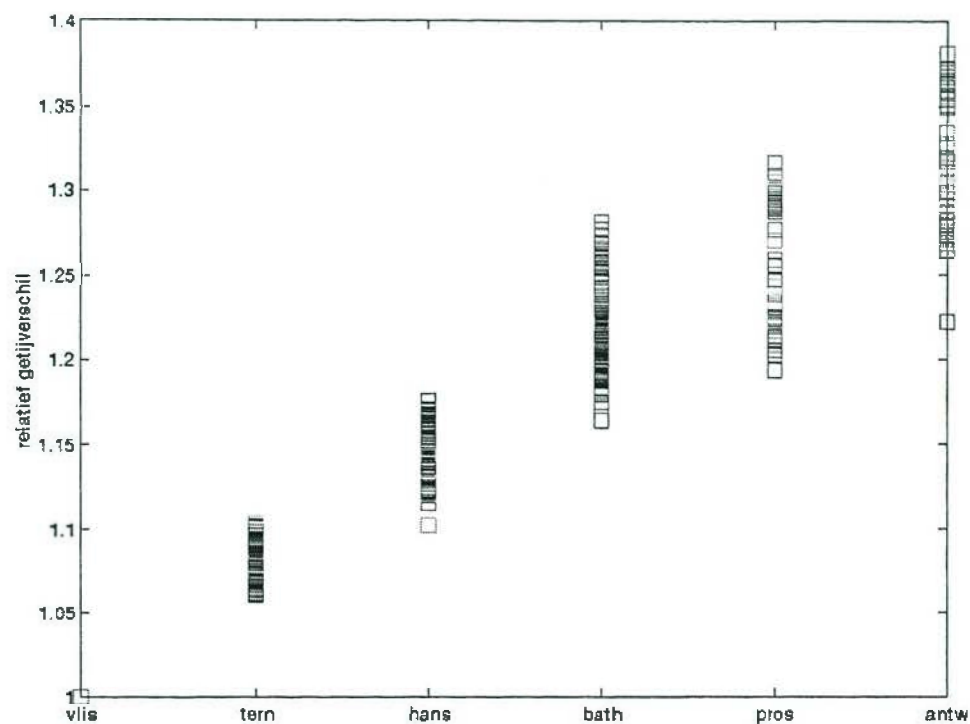
Afbeelding V.8a Tijdreeks (zonder trend) en bijpassende 18,6 jarige cyclus (West Kapelle)



Afbeelding V.8b Gecorrigeerde tijdreeksen (West Kapelle)



Afbeelding V.9 Getijverschil voor diverse jaren ten opzicht van dat nabij Vlissingen



Bijlage VI Statistische extrapolatie

VI. STATISTISCHE EXTRAPOLATIE

VI.1. Inleiding

Om inzicht te krijgen in het effect van geleidelijk variërend gedrag van hoogwaters op schattingen van extreme condities, richten we ons in het navolgende op een veelvuldig gehanteerde techniek om tot die schattingen te komen. We gaan er vanuit dat populatie extreme hoogwaters afdoende kan worden beschreven met de Gumbel verdeling of met de Weibull verdeling en de parameters van deze verdelingen schatten we uit waarnemingen met behulp van de *Maximum Likelihood* (afgekort ML) methode. Voor gedetailleerde theoretische achtergronden van deze verdelingen en van de ML-methode wordt verwezen naar de literatuur.

VI.2. De ML-methode

Als van een populatie met bekende verdeling één waarneming beschikbaar is, ligt het voor de hand te veronderstellen dat deze waarneming hoort bij de grootste kansdichtheid. Immers, ten opzichte van alle andere mogelijke veronderstellingen heeft deze veronderstelling de grootste kans juist te zijn. Deze overweging vormt de basis van de ML-methode. Daarin wordt de set van geselecteerde waargenomen hoogwaters gezien als één waarneming aan een meerdimensionale stochastische variabele. Als de n geselecteerde hoogwaters onderling statistisch onafhankelijk zijn, dan is hun gezamenlijke kansdichtheid gelijk aan de n -de macht van de kansdichtheid waarmee de populatie van individuele hoogwaters wordt beschreven. Door nu de set hoogwaters (dat is dus de enige waarneming aan de meerdimensionale stochastische variabele) te associëren met het maximum van de gezamenlijke kansdichtheid, volgt een schatting van de parameters van die gezamenlijke dichtheid. Aangezien die parameters identiek zijn aan de parameters van de kansdichtheid waarmee individuele hoogwaters worden beschreven, is de beschrijving van extremen hiermee in principe afgerond. Hieronder wordt een en ander in formule-vorm toegelicht.

Stel dat hoogwaters x kunnen worden beschreven met de kansdichtheid $p(x)$. In dat geval is de gezamenlijke kansdichtheid p_n van n onderling onafhankelijke hoogwaters x_j ($j = 1..N$) gelijk aan

$$(1) \quad p_n = \prod_{j=1}^N p(x_j)$$

Als wordt aangenomen dat de waarnemingen $\hat{x}_j$ ($j = 1..N$) passen bij het maximum van deze gezamenlijke kansdichtheid, dan moet gelden dat

$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial \theta_i} \prod_{j=1}^N p(\hat{x}_j) = 0$$

voor alle parameters θ_i van de kansdichtheid p .

In rekentechnisch opzicht is het doorgaans niet handig om met het product in (1) en (2) te werken. Daarom wordt wel gebruik gemaakt van de logaritme van de gezamenlijke kansdichtheid. Het product wordt daarmee vervangen door een sommatie:

$$(3) \quad \frac{\partial}{\partial \theta_i} \sum_{j=1}^N p(\hat{x}_j) = 0$$

De sommatie in bovenstaande uitdrukking wordt wel de *log-likelihood* functie genoemd.

VI.3. De gumbel-verdeling

Stel dat het gedrag van extreme hoogwaters adequaat kan worden beschreven met de Gumbel verdeling. Volgens deze verdeling wordt de kansdichtheid $p(x)$ voor hoogwaters x gegeven door

$$(4) \quad p(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[-\frac{x-\mu}{\sigma} \exp \left[-\frac{x-\mu}{\sigma} \right] \right]$$

waarin μ en σ de parameters van de verdeling zijn. De bijbehorende onderschrijdingskans $P(x)$ van het niveau x volgt uit

$$(5) \quad P(x) = \int_{-\infty}^x p(t) dt = \exp \left[-\exp \left[-\frac{x-\mu}{\sigma} \right] \right]$$

De ML-schatters van de parameters voldoen volgens (3) aan

$$(6) \quad N - \sum_{j=1}^N \exp \left[-\frac{\hat{x}_j - \mu}{\sigma} \right] = 0$$

en

$$(7) \quad N + \sum_{j=1}^N \left(-\frac{\hat{x}_j - \mu}{\sigma} \right) + \sum_{j=1}^N \left(\frac{\hat{x}_j - \mu}{\sigma} \exp \left[-\frac{\hat{x}_j - \mu}{\sigma} \right] \right) = 0$$

Stel nu dat de set geselecteerde hoogwaters $\hat{x}_j$ ($j = 1..N$) betrekking heeft op de situatie aan het begin van een geleidelijke stijging van hoogwaters en dat er een even grote set $\hat{\xi}_k$ ($k = 1..N$) is voor een situatie waarin die geleidelijke stijging al goed waarneembaar is. De $\hat{\xi}$ zijn op dezelfde manier geselecteerd als de $\hat{x}$. Daarmee wordt bedoeld dat in beide gevallen bijvoorbeeld steeds het hoogste hoogwater in een jaar is gekozen.

Stel voorts dat de set ξ zodanig kan worden geordend dat bij redelijke benadering geldt dat

$$(8) \quad \hat{\xi}_j = a\hat{x}_j + b$$

($j = 1..N$) waarin a en b constanten zijn.

Voor de set ξ kunnen we, net als voor x , door toepassing van (3) ML-schatters bepalen van de Gumbel parameters. Ter onderscheid van de schatters σ en μ voor de set x , noteren we de schatters voor de set ξ met $\tilde{\sigma}$ en $\tilde{\mu}$.

Als de geconstateerde geleidelijke stijging van het hoogwater daadwerkelijk 'lineair mag worden doorvertaald' naar extremen, zoals momenteel in de praktijk wordt toegepast, dan moet het niveau x dezelfde onderschrijdingskans hebben als het niveau $\xi = ax + b$. Met andere woorden, voor elke willekeurige x moet gelden dat

$$(9) \quad \exp\left[-\exp\left[-\frac{x-\mu}{\sigma}\right]\right] = \exp\left[-\exp\left[-\frac{(ax+b)-\tilde{\mu}}{\tilde{\sigma}}\right]\right]$$

Dat is alleen mogelijk indien

$$(10) \quad \begin{cases} \tilde{\sigma} = a\sigma \\ \tilde{\mu} = a\mu + b \end{cases}$$

Door eenvoudige substitutie is aan te tonen dat deze $\tilde{\sigma}$ en $\tilde{\mu}$ de ML-schatters zijn van de Gumbel parameters voor de set ξ . Deze schatters volgen uit

$$(11) \quad N - \sum_{j=1}^N \exp\left[-\frac{\hat{\xi}_j - \tilde{\mu}}{\tilde{\sigma}}\right] = 0 \quad \text{en} \quad N + \sum_{j=1}^N \left(-\frac{\hat{\xi}_j - \tilde{\mu}}{\tilde{\sigma}}\right) + \sum_{j=1}^N \left(\frac{\hat{\xi}_j - \tilde{\mu}}{\tilde{\sigma}} \exp\left[-\frac{\hat{\xi}_j - \tilde{\mu}}{\tilde{\sigma}}\right]\right) = 0$$

Door (8) en (10) in bovenstaande vergelijkingen in te vullen, worden de gelijkheden (6) en (7) gevonden. Daarmee is het bewijs geleverd.

Bovenstaande exercitie laat zien dat een lineaire transformatie van de set hoogwaters waaraan een Gumbel verdeling wordt aangepast tenelnde extreme hoogwaters te kunnen beschrijven, leidt tot dezelfde lineaire transformatie in die extremen (bij gelijke onderschrijdingskans). Een identieke conclusie kan worden getrokken als gelijke herhalingstijd als uitgangspunt wordt gehanteerd, mits de N hoogwaters $\hat{\xi}$ een even lange periode beslaan als de $\hat{x}$.

VI.4. De Weibull verdeling

Voor de Weibull verdeling, volgens welke de onderschrijdingskans van een niveau x ($x \geq 0$) wordt gegeven door

$$(12) \quad P(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

(α en β zijn de parameters van de verdeling), kan een overeenkomstige redenering worden gevolgd. Deze leidt ook tot uitdrukking (10), zij het met de toevoeging $b=0$. Zodoende kan voor de Weibull verdeling worden geconcludeerd dat verhoging met een factor a van de hoogwaters waaruit de parameters van de verdeling worden geschat, leidt tot een evenredige verhoging van extremen die aan de hand van die parameterschattingen worden bepaald.

Bijlage VII Van WAQUA naar Delft3D

VII. VAN WAQUA NAAR DELFT3D

VII.1 Aangeleverde gegevens

Het RIKZ heeft een Westerscheldemodel aangeleverd dat uit een aantal bestanden in WAQUA structuur bestaat:

- de bodemligging in de monding van de Westerschelde in 1988;
- de bodem in de Westerschelde in 1988;
- het verloop tussen deze twee bodemfiles;
- de Manningwaarden in het hele gebied (bodemruwheid);
- de kustlijn in de vorm van een reeks coördinaten;
- de randvoorwaarden voor 2 april 1989 00.00 uur tot 10 april 1989 23.30 uur voor waterstanden op de open randen, voor ieder half uur;
- de windgegevens voor 2 april 1989 00.00 uur tot 10 april 1989 23.50 uur, voor iedere 10 minuten.

De bodemfiles zijn afgeleid voor een rechtlijnig rekenrooster met een puntsafstand van 100 m. De Schelde rivier is in sterk geschematiseerde vorm in het model opgenomen. Het rekenrooster heeft als afmeting 783 x 266 punten.

Uit de WAQUA Identificatie file zijn gegevens gehaald over het Schelde debiet, de locaties van de meetstations en de locaties van de zgn. 'dry points' en de 'thin dams'.

Om de uitvoer van het model te kunnen toetsen, zijn waterstandsgegevens voor 2 april 1989 00.00 uur tot 10 april 1989 23.50 uur meegeleverd voor de stations Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Baalhoek en Bath. Dit is dezelfde periode als waarover de randvoorwaarden beschikbaar zijn. Tevens zijn over deze periode debietgegevens voor enkele debietraalen bijgevoegd.

Het aangeleverde model is reeds afgeregeld, zie Adema (1998). Bij het omzetten naar een Delft3D-structuur zijn de instellingen voor de schuifspannings-coëfficiënt voor wind en de turbulente viscositeit daarom overgenomen. De gebruikte tijdstap van 0,5 min. is eveneens aangehouden.

VII.2 Van een WAQUA-structuur naar een Delft3D-structuur

De aangeleverde bestanden kunnen niet zonder meer als invoer voor Delft3D-Flow worden gebruikt. Het grootste verschil doet zich voor in de format van de bodemfile. De inhoud van de aangeleverde bodemfiles bestaat uit losse matrices voorafgegaan door de positie van iedere matrix op het rekenrooster. Delft3D-Flow daarentegen leest de bodem als één matrix in.

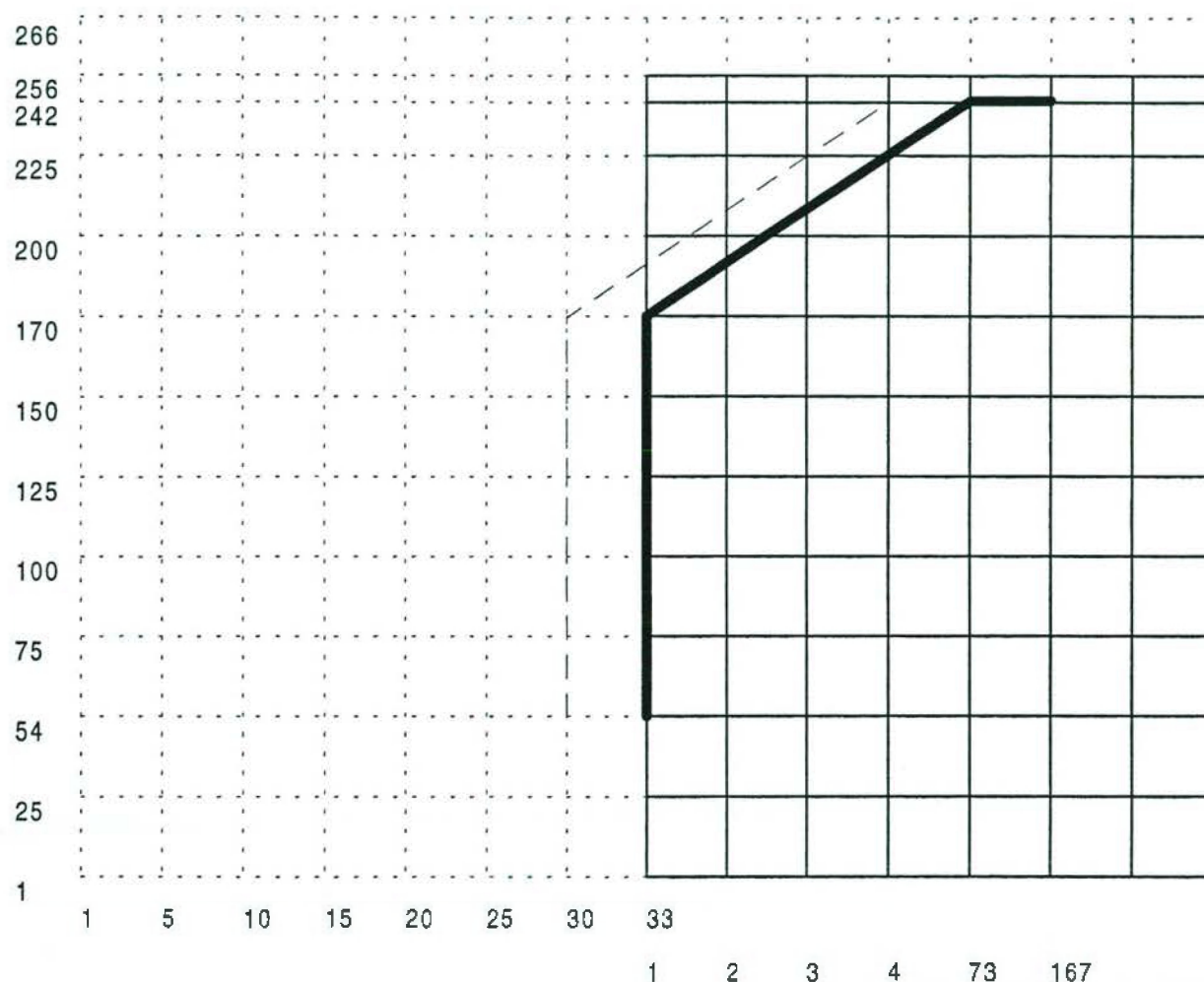
Delft3D-Flow maakt gebruik van meerdere zgn. attribute files, die tijdens de simulatie worden aangeroepen en die alle gegevens bevatten over de modelconfiguratie. Deze attribute files zijn alle opnieuw aangemaakt, aangezien deze files aan een strikt voorgeschreven format moeten voldoen die afwijkt van de WAQUA format.

Na de conversie van een WAQUA naar een Delft3D-structuur is een tweede aanpassing aan het model gedaan. Deze komt voort uit het feit dat de beschikbare versie van Delft3D-Flow maximaal met 750 x 750 rekenpunten rekent. Aangezien de aangeleverde bodemfile gebruik maakt van 783 x 266 punten moest er een aantal punten vervallen.

Er is voor gekozen om dit hoofdzakelijk aan de zijde van de Westerscheldemond te doen. Het rekenrooster is daar ingekort met 32 punten. Aan de tegenoverliggende zijde van het rooster is met 1 (inactief) punt ingekort. Deze aanpassingen hebben nagenoeg geen invloed op de simulaties. De randvoorwaarde in de Westerscheldemond is namelijk niet op punt 1 maar op een afstand van minimaal 30 roosterpunten van de rand voorgeschreven (punt 31).

Om praktische redenen is er aan de bovenzijde van het rooster ook ingekort, namelijk met 10 punten. Het gaat hier om inactieve punten waardoor dit geen invloed heeft op de simulaties. Het rekenrooster heeft nu de afmeting van 750 x 256 roosterpunten. Dit rooster is gebruikt voor alle simulaties die zijn uitgevoerd. In figuur VII.1 is schematisch weergegeven hoe het gebruikte rooster zich verhoudt tot het WAQUA rooster.

Afbeelding VII.1 Het WAQUA rooster en het Delft3D rooster



gestippeld = WAQUA rooster en randvoorwaarde
 gesloten = D3D rooster en randvoorwaarde

De locatie van het punt (1,1) in het nieuwe rekenrooster is gelijk aan de locatie van punt (1,33) in het oorspronkelijke rooster. Alle coördinaten die in de WAQUA bestanden worden gehanteerd, zijn hiervoor aangepast zodat de geografische positie van deze punten ongewijzigd blijft.

Met betrekking tot het zgn. 'grid enclosure', dat het actieve deel van het rekenrooster omsluit, wordt opgemerkt dat dit langs de buitenranden van het rooster is gelegd. Hiermee wordt voorkomen dat gebieden die bij hoog water onderlopen, droog blijven omdat ze zijn uitgesloten van het actieve rooster. Bovendien wordt vermeden dat de enclosure moet worden aangepast na iedere wijziging in de bodemfile. Een roosterpunt wordt actief (nat) wanneer een waterdiepte van 0,15 m wordt overschreden.