

Inventarisatie van de huidige kennis over de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde

Ministerie van verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat



Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ



Aan
Geadresseerde

Contactpersoon
Mw. drs. S.W.E. Huijs
Datum
24 februari 1998
Ons kenmerk
-

Doorkiesnummer
0118-686355
Bijlage(n)
1
Uw kenmerk
-

Onderwerp
Aanbieding werkdocument RIKZ\AB-97.857x: "Inventarisatie van de huidige kennis over de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde."

Geachte heer, mevrouw,

Op dit moment vindt binnen Directie Zeeland de ontwikkeling van een langetermijnvisie voor het beheer van de Westerschelde plaats. Deze visie is gericht op de effecten van beheersmaatregelen op de doelstellingen van Rijkswaterstaat : droge voeten, een vlotte en veilige scheepvaart en natuurlijkheid. Veiligheid tegen overstromen is hierbij een belangrijk aandachtspunt.

De beheerder moet op dit moment voor de Westerschelde rekening houden met:

- een relatief snelle stijging van de hoogwaterstanden
- een versnelde zeespiegelstijging
- effecten op de hoogwaterstand als gevolg van de huidige en toekomstige ingrepen (de verdieping 48'-43', een stormstuw en gog's in België)

Om deze redenen heeft Directie Zeeland een toekomstverkenning naar de veiligheid tegen overstromen voor de Westerschelde geïnitieerd. Aan het RIKZ is de volgende vraag gesteld: 'Hoe snel stijgen in de Westerschelde de hoogwaterstanden, nu en in de toekomst (verschillende scenario's) en wat zijn de mogelijke oorzaken en consequenties hiervan?' Het voorliggende rapport is een eerste stap bij de beantwoording van deze vraag.

Het rapport geeft een overzicht van de huidige stand van zaken omtrent de veiligheid en de ontwikkeling van de hoogwaterstanden in de Westerschelde.

In het Schelde estuarium hebben in het verleden ingrepen, naast autonome ontwikkelingen, een sterke invloed gehad op de stijging van de hoogwaterstanden. Er is echter geen sprake van een acuut veiligheidsprobleem.

De dijkhoogte wordt bepaald door de golfploop en de waterhoogte met een kans van voorkomen van 1/4000. Ook deze extreme waterstand vertoont een stijging in de loop van de tijd. Voor het oostelijk deel van de Westerschelde gaat men uit van een stijging



van 50cm/eeuw. Dit is twee maal zo groot als de stijging van de zeespiegel op de Noordzee. Maatregelen om de stijging van de extreme waterstanden te voorkomen of te verminderen leveren een tijdwinst voor toekomstige dijkophoging op.

Aangezien in het estuarium nog steeds grootschalige ingrepen plaatsvinden is het voor de lange termijn zinvol onderzoek te doen naar de stijging van de (extreme) hoogwaterstanden. In het rapport wordt op basis van de inventarisatie van de huidige kennis en de hiaten daarin de volgende fasering van het onderzoek naar veiligheid voorgesteld:

1. Een getijanalyse waarbij de oorzaak-gevolg relaties van de stijging van de hoogwaterstanden en de ingrepen in beeld worden gebracht.
2. De koppeling van de waterbeweging met de morfologie.
3. Een toekomstverkenning naar de veiligheid. Hierbij staan het genereren van maatregelen en het doorrekenen van scenario's voor de doelstellingen van Rijkswaterstaat centraal.

Directie Zeeland heeft conform dit advies besloten de toekomstverkenning naar de veiligheid tegen overstromen voor de Westerschelde te starten met een verkenning van het getij. De getijanalyse zal in het 3^e kwartaal van 1998 klaar zijn. De studie zal worden uitgevoerd door het RIKZ in het kader van de productgroep Structuur.

De communicatie met de regio betreffende de veiligheid zal plaatsvinden via een nieuwe integrale organisatiestructuur binnen Directie Zeeland waarin de langetermijnvisie voor het beheer van de Westerschelde centraal staat.

Met vriendelijke groet,

Mw. drs. S.W.E. Huijs
(projectbegeleider Verkenning Getij NWL)



Verzendlijst RIKZ\AB-97.857x

DZL

G.P. Bollebakker
ir. L.D. Boom
ir. T.J. Boon
drs. J. Coosen
ing. L. Dekker
ir. A. Hoekstra
W. Houmes
mw drs. S.W.E. Huijs
drs. A.W. van Kleef
ing. G. Krijger
Lic. ing. J.W.P. Prins
ir. P.N.G.C. Schakel
drs. C. Storm
ing. J.A. de Roos
ir. W.A. Roose
ir. H.A.Q. Verhees
ing. C.J. Van Westenbrugge
bibliotheek

RIKZ

mw. ir. A.A. Arends
dr. D.W. Dunsbergen
mw. ir. E. Feenstra
ing. M.A.G. van Helvert
drs. B.A. Kornman
H. Kraay
ir. A. Langerak
C. Van de Male
G. Mol
dr. J.P.M. Mulder
drs. M.E. Philippart
ing. P. Roelse
ir. J.G. de Ronde
drs. G.J. Rotmensen
drs. J.H.M. de Ruig
drs. H. Verbeek
ir. J.H. Vroon
bibliotheek
uitvoerend bureau
ir. T. Pieters
ir. C. Verspuy

TAW

Marsroute DWW/ir. P.Tönjes, drs. P. van Vesseem

SIC

mw. L. Withagen

Werkdocument

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Aan

-

Van

Mw. ir. A.A. Arends

Datum

December 1997

Nummer

RIKZ/AB-97.857x

Project

Verdieping

Onderwerp

Inventarisatie van de huidige kennis over de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde

Doorkiesnummer

0118-672301

Bijlage(n)

-

Vestiging Middelburg
Postbus 8039, 5330 EA Middelburg
Bezoekadres Grenadierweg 31

Telefoon 0118 672200
Telefax 0118 651046

Bereikbaar 20 minuten loopafstand vanaf station Middelburg richting industriegebied Arnestein of treintaxi

RIKZ\AB-97.857x

Samenvatting

Als gevolg van verschillende ingrepen en autonome ontwikkelingen in en nabij de Westerschelde is het niveau van de hoogwaterstand de afgelopen eeuw gestegen. Ook de extreme waterstand met een kans van voorkomen van 1/4000 jaar is gestegen. Deze stijging is van invloed op de benodigde kruinhoogte van de dijken die behalve de 1/4000 waterstand ook bepaald wordt door de golfoploop en een toeslag voor bui-oscillatie. Op dit moment wordt uitgegaan van een stijging van de extreme waterstand van 50 cm/eeuw in het oostelijk deel van de Westerschelde. Die stijging is twee keer zo groot als de zeespiegelstijging op de Noordzee. Op de korte termijn levert de stijging van het hoogwater geen probleem op voor de veiligheid, maar voor de lange termijn planning is het zinvol onderzoek te doen naar de stijging van de extreme waterstanden.

De stijging van het hoogwater is het gevolg van menselijke ingrepen, autonome ontwikkelingen en natuurlijke veranderingen die in en nabij de Westerschelde hebben plaatsgevonden.

De menselijke ingrepen die van invloed zijn op het getij zijn inpoldering, baggeren, storten en geulwandverdediging. Als gevolg van de inpolderingen die sinds de 17^e eeuw tot ver in deze eeuw hebben plaatsgevonden is het kombergingsvolume verkleind. Door deze ingreep is de getijdoordringing in het estuarium veranderd en is de bodemligging zich gaan aanpassen. Door baggeren wordt de vaargeul (hoofdgeul) verdiept. Hierdoor wordt deze geul dominant en wordt het meergeulen systeem minder nadrukkelijk aanwezig. De bodem aanpassing die in de monding van de Westerschelde heeft plaatsgevonden als gevolg van baggerwerkzaamheden, heeft een verhoging van de waterstand bij Vlissingen tot gevolg gehad. De getijkarakteristieken van Vlissingen zijn mede bepalend voor de getijontwikkeling in de rest van de Westerschelde. De natuurlijke veranderingen zijn veranderingen in de bodemligging van de Westerschelde die niet direct toe te schrijven zijn aan een ingreep. De functie wisseling die heeft plaatsgevonden tussen het Middelgat en het Gat van Ossenis is her een voorbeeld van.

Een voorbeeld van een autonome ontwikkeling is de zeespiegelstijging.

Behalve de ingrepen die in het verleden hebben plaatsgevonden, worden tegenwoordig en zullen ook in de toekomst ingrepen in het systeem gedaan worden. Sinds juli 1997 is de 48'/43' verdieping in gang gezet. Uit modelberekeningen volgt dat dit initieel een verhoging van de waterstand van 5 cm tot gevolg heeft. Wat de consequenties zijn op de lange termijn zal verder onderzocht moeten worden.

Zowel in Nederland als in België worden plannen gemaakt voor het toekomstig beheer van het Schelde estuarium. In België is het sigmaplan opgesteld om de veiligheid te waarborgen. In dat plan komt onder meer kombergingsvergroting en het bouwen van een stormstuw bij Oosterweel aan de orde.

Als gevolg van ontpoldering of kombergingsvergroting zullen de waterstanden dalen. Hoe groot de daling is, is afhankelijk van de grootte en ligging van het gebied. De effecten zijn grensoverschrijdend. Ook het effect van een stormstuw is grensoverschrijdend. Het sluiten van de stuw tijdens hoogwater levert een extra stijging op van de hoogwaters van het zeewaarts gelegen gebied. Verder zijn er plannen om na de huidige verdieping een volgende verdieping (50') in gang te zetten. Een autonome ontwikkeling die zich zal blijven voortzetten, en effect heeft op de hoogwaterstand, is de zeespiegelstijging welke zich in de toekomst wellicht versneld zal voortzetten.

Tot nu toe zijn alle ingrepen afzonderlijk bekeken en zijn de effecten op korte termijn onderzocht. In een vervolgstudie moet meer naar de samenhang tussen de verschillende ingrepen worden gekeken waarbij ook een fysische verklaring gevonden moet worden voor de verschillende effecten. Ook terugkoppelingseffecten met onder meer de morfologie moeten in rekening worden gebracht. De eerste fase zal zijn, het uitvoeren van een getijanalyse. Vervolgens zal een koppeling met de morfologie gemaakt worden en kunnen maatregelen gegenereerd worden. Met behulp van een kostenbaten analyse kunnen de resultaten van verschillende alternatieven afgewogen worden.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1. Inleiding	7
2. Probleemanalyse	9
2.1 Bepaling van kruinhoogte dijken	9
2.2 Stijging van de hoogwaterstand	10
2.3 Levert de stijging van het gemiddelde hoogwater een risico op voor de veiligheid?	11
2.4 Conclusie	13
3. Oorzaken van opgetreden veranderingen in het getij	15
3.1 Inpoldering	15
3.2 Vaarwegverdieping	16
3.3 Inpoldering en vaarwegverdieping	17
3.4 Bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde	17
3.5 Morfologische veranderingen in de Westerschelde	17
3.6 Bouw Oosterschelde stormvloedkering	18
3.7 Verandering van windklimaat	18
3.8 Zeespiegelstijging	19
3.9 Conclusies	19
4. Toekomstige ontwikkelingen	21
4.1 Huidige en geplande ingrepen	21
4.1.1 vaarwegverdieping 48'/43'	21
4.1.2 Uitvoering van het Sigmaplan in België	22
4.2 Plannen voor toekomstige ingrepen	22
4.2.1 Kombergingsvergroting in België en in Nederland	22
4.2.2 Afronding Sigmaplan	23
4.2.3 Verdieping 50'	23
4.3 Interactie ingrepen	24
4.4 Autonome ontwikkelingen	24
4.5 Conclusies	24
5. Voorstel verdere studie naar veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde	27
6. Literatuurlijst	35

Lijst met figuren

- figuur 1 : basispeilen in de Westerschelde
- figuur 2 : ontwerp-peilen in de Westerschelde
- figuur 3 : verloop gemiddelde zeeniveaus in Vlissingen
- figuur 4 : verloop gemiddelde zeeniveaus in Terneuzen
- figuur 5 : verloop gemiddelde zeeniveaus in Hansweert
- figuur 6 : verloop gemiddelde zeeniveaus in Bath
- figuur 7 : ontwikkeling van benodigde kruinhoogte
- figuur 8 : ontwikkeling van toetspeil in de tijd bij verschillende scenario's
- figuur 9 : verandering van het getijvolume in de Westerschelde

1. Inleiding

In het Westerschelde estuarium zijn de laatste decennia verschillende ingrepen gedaan zoals verdieping van de vaarweg, zandwinning en inpoldering. Deze ingrepen hebben effect op de waterbeweging in het estuarium. Behalve de ingrepen zijn ook autonome ontwikkelingen, zoals de stijgende zeespiegel en natuurlijke veranderingen in de morfologie van belang voor de getijontwikkeling in de Westerschelde. De vraag met betrekking tot de veiligheid tegen overstromen blijft vanwege deze ontwikkelingen actueel ondanks het feit dat de dijken langs de Westerschelde op deltahoogte zijn.

In de notitie NWL 96.60 heeft de directie Zeeland een aantal vragen aan het RIKZ gesteld die betrekking hebben op de Westerschelde. De vraag die verband houdt met de veiligheid tegen overstromen luidt : Hoe snel stijgen in de Westerschelde de hoogwaterstanden, nu en in de toekomst (verschillende scenario's), en wat zijn de mogelijke oorzaken en consequenties hiervan?

Dit werkdocument bevat een inventarisatie van de studies die tot nu toe gedaan zijn in relatie tot de veiligheid tegen overstromen en geeft een overzicht van de kennis op dit moment. Aan de hand van de huidige kennis zal een gefaseerd onderzoeksplan worden opgesteld om de leemtes in kennis op te vullen. Eerst zal de probleemanalyse worden beschreven. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de oorzaken van de opgetreden getijveranderingen verkend. Daarna volgt in hoofdstuk 4 een beschrijving van de (eventuele) toekomstige ingrepen en hun verwachte effecten op het getij. Tenslotte staat in hoofdstuk 5 een overzicht van het benodigde vervolg onderzoek.

2. Probleemanalyse

Naar aanleiding van de dijkdoorbraken en de overstromingen in 1953, is het deltaplan opgesteld en ten uitvoer gebracht. In 1990 zijn de laatste dijken op deltahoogte gebracht. De dijken kunnen nu een stormvloed weerstaan met een kans van voorkomen van 1 keer per 4000 jaar.

Als gevolg van natuurlijke processen en verschillende ingrepen in het estuarium is een versnelde stijging van de hoogwaterstand geconstateerd. Om veiligheid tegen overstromen te garanderen is wettelijk vastgelegd (Wet op de waterkering) dat de primaire waterkeringen elke 5 jaar op hun veiligheid getoetst moeten worden. In dit hoofdstuk zal geanalyseerd worden wat de stijging van de hoogwaterstanden betekent voor de vereiste kruinhoogte van de dijken.

2.1 Bepaling van kruinhoogte dijken

Zoals hierboven is genoemd, worden de dijken elke 5 jaar getoetst aan de veiligheidsnorm. Voor de toetsing van de kruinhoogte en de stabiliteit van de dijk zijn de stormvloedstanden maatgevend. De eerste toetsing wordt uitgevoerd voor een 5-jaarlijkse periode die eindigt rond het jaar 2000 (DWW, 1996).

De toetsing van de kruinhoogte van dijken wordt uitgevoerd door het optellen van het toetspeil, de golfoploop en een toeslag voor bui-oscillatie. In een randvoorwaardenboek uitgegeven door de Dienst Weg en Waterbouwkunde (1996) zijn voor alle dijkvakken langs de Nederlandse kust de toetspeilen en de significante golfhoogten voor het jaar 2000 weergegeven.

Basispeil	: Waterpeil, vastgesteld voor het jaar 1985, met een kans van voorkomen van 1/10000 jaar.
Ontwerppeil	: Waterpeil om dijkhoogten mee te ontwerpen of te toetsen. Dit peil is vastgesteld voor 1985 en is afgeleid van het basispeil. Voor Zeeland geldt een kans van voorkomen van 1/4000 jaar.
Toetspeil	: Waterpeil gebruikt voor de toetsing van dijken, geldig voor een bepaald jaar. Dit peil is afgeleid van het ontwerppeil

Het toetspeil is vastgesteld voor een bepaald jaar en is gebaseerd op het ontwerppeil plus een toeslag die voor de 5 jaarlijkse toetsingsperiode wordt vastgesteld aan de hand van de stijgsnelheid van de waterstanden van een representatief geachte periode. Het ontwerppeil is afgeleid van het vastgestelde basispeil.

In het eindrapport van de Deltacommissie (1960) staat de aanbeveling het onderzoek naar de hoogte van de basispeilen voort te zetten wanneer meer waarnemingsmateriaal beschikbaar is. Dit hernieuwde onderzoek naar de basispeilen is in 1993 afgerond (Philippart e.a., 1995). De basispeilen geven de stormvloedstanden weer die een overschrijdingsfrequentie hebben van eens per 10.000 jaar (= 1 % per eeuw) en gelden voor 1985. Het voor 1985 vastgestelde basispeil in de Westerschelde varieert van 5,45 m NAP bij Westkapelle tot 6,80 m NAP bij de grens, zie figuur 1. Het ontwerppeil, dat afgeleid is van het basispeil, ligt in Zeeland bij een waterhoogte met een kans van voorkomen van 1 maal per 4000 jaar. Dit komt neer op een ontwerppeil van 5,23 m NAP bij Vlissingen tot 6,50 m NAP bij de grens, zie figuur 2 (Philippart, e.a., 1995). De

ontwerppeilen gelden voor het jaar 1985. Om deze te gebruiken voor de eerst volgende toetsing moet, in verband met de stijgende waterstanden, een toeslag worden opgeteld bij het voor 1985 berekende peil. Hierdoor wordt het toetspeil voor het jaar 2000 verkregen. Voor de hele Nederlandse kust is voor dat jaar een toeslag vastgesteld van 5 cm.

De golfploop tegen het dijktaalud wordt berekend met golfploopformules waarin de significante golfhoogte en piekperiode voorkomen. De golfrandvoorwaarden, behorend bij de nieuwe toetswaterstanden, worden momenteel met het golfdoordringingsmodel SWAN opnieuw berekend. De resultaten hiervan worden in het volgende randvoorwaardenboek opgenomen. De significante golfhoogten, behorend bij de oude toetswaterstanden, variëren in de Westerschelde tussen 1,40 m bij Bath en 3,85 m bij Vlissingen. Dit levert een golfploop van ongeveer 3 tot 5 meter. Op dit moment wordt onderzoek gedaan of de tot nu toe toegepaste golfploopformules nog voldoen. Verschillende golfploopformules kunnen verschillen in de berekende golfploop geven in de orde van enkele decimeters.

De toeslag voor bui-oscillaties is gering en varieert tussen 5 en 15 cm, om de extra waterhoogte als gevolg van buistoten (drukverschillen in de atmosfeer) in rekening te brengen.

Op dit moment wordt door de Dienst Weg en Waterbouw onderzoek gedaan naar het gebruik van inundatie-risico om de veiligheid te bepalen, de zogenaamde Marsroute van TAW. De resultaten van dit onderzoek worden in 2004 verwacht.

N.B. Voor de bepaling van de stabiliteit van de dijk is de duur dat het hoogwater tegen de dijk staat van belang. In deze studie wordt alleen gekeken naar de ontwikkeling van de hoogte van de hoogwaters, waardoor de duur van het hoogwater buiten het kader van deze studie valt.

2.2 Stijging van de hoogwaterstand

De waterstand wordt op verschillende punten in de Westerschelde continu gemeten. Uit een analyse van deze resultaten blijkt dat de hoogwaterstand stijgt. In tabel 1 volgt een overzicht van de stijging van de gemiddelde zeestand en de gemiddelde hoogwaterstand van verschillende perioden.

In de figuren 3, 4, 5 en 6 staan voor respectievelijk Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath het verloop van de gemiddelde zeestand en de gemiddelde hoogwaterstand weergegeven. Ter vergelijking zijn eveneens twee stations buiten de Westerschelde toegevoegd, namelijk Hoek van Holland en IJmuiden.

periode	1900-1990		1940-1990		1975-1990	
station	gem. zeestand	gem. hoogwater	gem. zeestand	gem. hoogwater	gem. zeestand	gem. hoogwater
Vlissingen	22	29	17	29	24	17
Terneuzen	24	40	26	42	19	18
Hansweert	16	40	24	43	34	23
Bath	-	52	-	56	-	57
Hoek v. Holland	25	-	26	40	42	26
IJmuiden	21	25	20	31	27	43

tabel 1 : stijging van de gemiddelde zeestand en de gemiddelde hoogwaterstand in cm/eeuw, berekend met de SSA methode voor drie verschillende tijdvakken (Dillingh en Heinen, 1994)

Uit deze tabel is een aantal ontwikkelingen af te leiden :

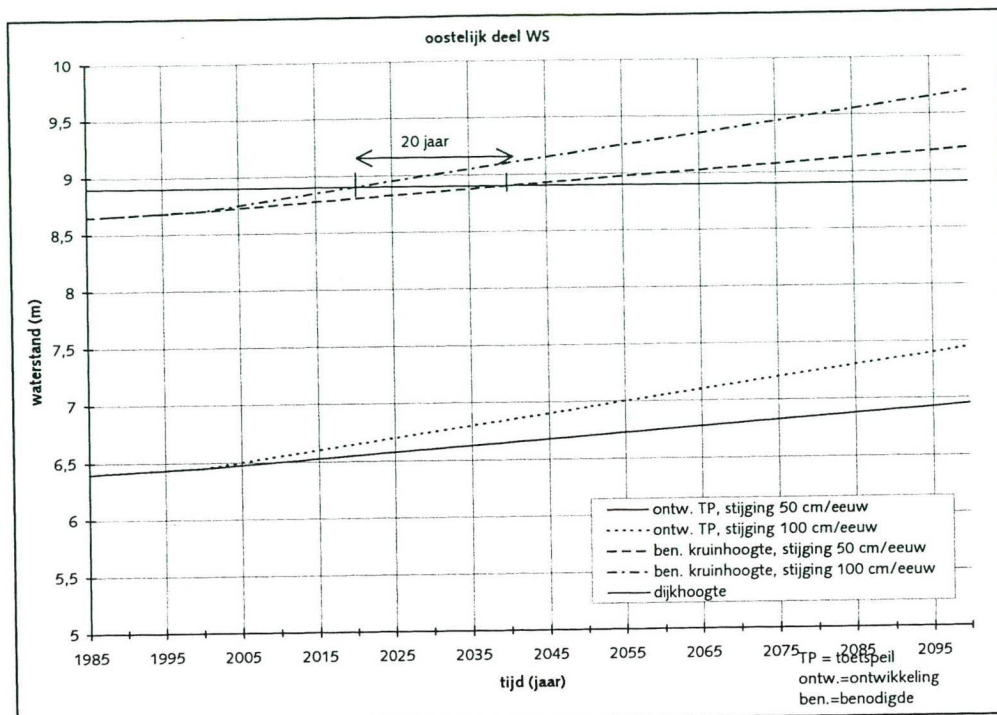
- Over het algemeen stijgt de hoogwaterstand sneller dan de gemiddelde zeestand. Dit fenomeen geldt niet voor de korte periode van 1975-1990. Dit kan ook uit de figuren 3-6 worden afgelezen. De stijging van het hoogwater is sterk afhankelijk van de locatie en het beschouwde tijdvak.
- De meest recente periode van 1975-1990 vertoont een snellere stijging van de gemiddelde zeestand dan de (langere) perioden ervoor. Dit is een verschijnsel dat langs de hele Nederlands kust is waar te nemen.
- De stijging van zowel de gemiddelde zeestand als van het gemiddelde hoogwater in de Westerschelde is groter naarmate de locatie verder in het oosten is gesitueerd.

Uit hetzelfde onderzoek volgt dat voor de toekomst rekening moet worden gehouden met een stijging van het gemiddelde hoogwater van 30, 40 en 50 cm/eeuw in respectievelijk het westelijk, midden en oostelijk deel van de Westerschelde.

2.3 Levert de stijging van het gemiddelde hoogwater een risico op voor de veiligheid?

Hieronder wordt de stijging van het gemiddelde hoogwater gekoppeld aan de bepaling van de kruinhoogte waaruit kan worden afgeleid of deze stijging een risico oplevert voor de veiligheid.

Aangenomen wordt dat de stijging van het hoogwater lineair doorvertaald mag worden naar extreme omstandigheden. Aangezien de stijging in het oostelijk deel van de Westerschelde het meest extreem is, is dat deel ter illustratie gebruikt. In figuur 7 staat de ontwikkeling van de benodigde kruinhoogte van de dijk uitgezet tegen de tijd.



figuur 7 : ontwikkeling van benodigde kruinhoogte

De onderste getrokken lijn geeft de ontwikkeling in de tijd van het toetspeil weer volgens Dillingh en Heinen (1994), d.w.z. een stijging van het gemiddelde hoogwater van 50 cm/eeuw. De lijn die daar even boven ligt en een steiler verloop heeft geeft de ontwikkeling van het toetspeil weer bij een versnelde stijging van 100 cm/eeuw, door bijvoorbeeld een versnelde zeespiegelstijging of verdieping van de vaargeul. De twee hoger liggende lijnen die evenwijdig liggen aan de getrokken lijn en de kleine stippellijn geven de benodigde kruinhoogte die hoort bij de boven beschreven ontwikkeling van het toetspeil (respectievelijk huidige stijging en versnelde stijging). Hierbij is rekening gehouden met golfploop en bui-oscillatie. De horizontale lijn geeft een gemiddelde van de actuele dijkhoogte in het oostelijk deel weer, er van uitgaande dat de dijken niet meer inklinken. Uit het snijpunt van de actuele kruinhoogte en de benodigde kruinhoogte volgt het jaartal wanneer de kruinhoogte van de dijk niet meer voldoet aan de gestelde eisen. Uit deze figuur is af te lezen dat een twee maal zo grote stijging van het hoogwater, bij de gegeven kruinhoogte van de dijk, een tijdverlies van 20 jaar oplevert met betrekking tot het voldoen aan de veiligheidsnorm van de kruinhoogte van de dijk.

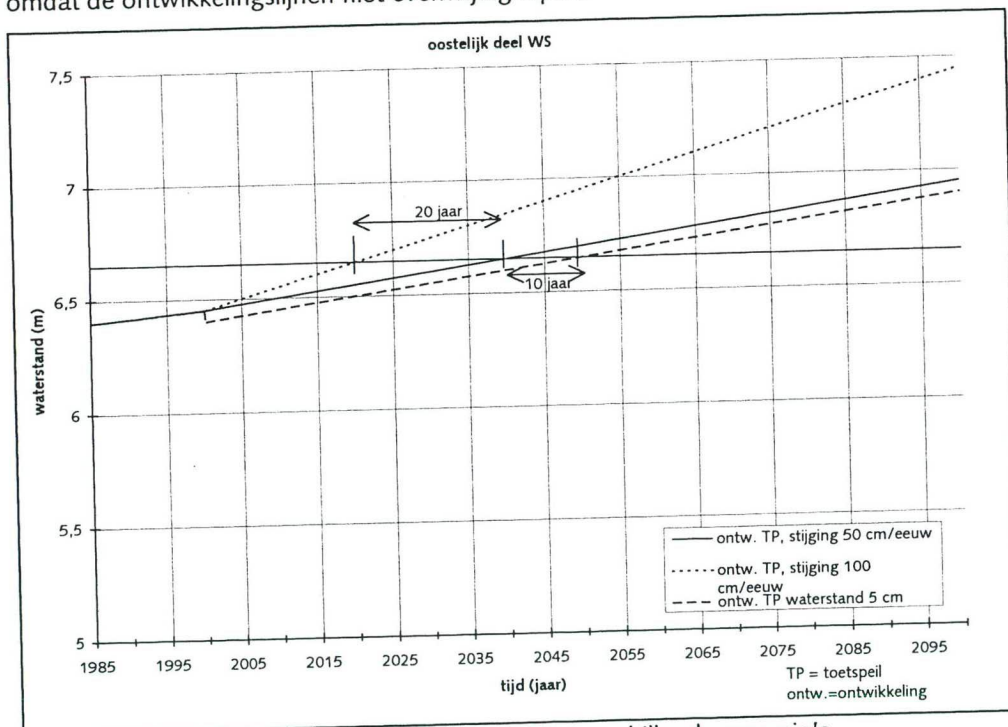
Zoals eerder is genoemd wordt op dit moment onderzoek gedaan naar de golfploopformuleringen. De resultaten van die studie zullen direct van invloed zijn op de benodigde kruinhoogte van de dijken. Bij de eerstvolgende toetsing zal de verandering in de golfploop maatgevend zijn. Voor een toekomstvisie kan voor het onderzoek naar de veiligheid de golfploop evenals de bui-oscillatie als een constante worden beschouwd waardoor het onderzoek zich zal toespitsen op de ontwikkeling van het toetspeil.

Veranderingen die optreden in de ontwikkeling van het toetspeil worden tot nu toe lineair in de benodigde kruinhoogte meegenomen. Bij een probabilistische benadering zal dat niet meer lineair zijn, maar zal het toetspeil nog steeds een belangrijke rol spelen.

In figuur 8 is daarom alleen de ontwikkeling van het toetspeil weergegeven met een willekeurig referentieniveau, om de 2 scenario's te kunnen vergelijken. De getrokken lijn geeft de ontwikkeling van het toetspeil weer volgens het huidige scenario (Dillingh en Heinen, 1994).

De onderste stippellijn geeft de ontwikkeling weer als, ten gevolge van een ingreep in het estuarium, de waterstand 5 cm daalt en in de toekomst dezelfde trend volgt als de huidige ontwikkeling. Uit de figuur is af te lezen dat dit een tijdwinst levert van 10 jaar. Hierbij is de hoogte van het referentieniveau niet van belang omdat de lijnen evenwijdig liggen.

De bovenste stippellijn geeft het scenario weer waarbij een versnelde stijging van het hoogwater optreedt van 100 cm/eeuw. Bij dit referentieniveau levert het een verlies in tijd op van 20 jaar. De tijdwinst is afhankelijk van het gekozen referentie- of dijkniveau omdat de ontwikkelingslijnen niet evenwijdig lopen.



figuur 8 : ontwikkeling van toetspeil in de tijd bij verschillende scenario's

Uit de figuren valt af te leiden dat een verandering in de ontwikkelingslijn van het toetspeil een tijdwinst of -vertraging oplevert voor de kruinhoogte van de dijken. Ook een marginaal lijkende daling van de waterstand van 5 cm, levert bij de huidige ontwikkeling van het toetspeil een tijdwinst van 10 jaar op.

2.4 Conclusie

Op de korte termijn levert de stijging van de hoogwaterstanden geen gevaar op voor de veiligheid van de dijken. Maar voor de lange termijn is het zeker zinvol om verder onderzoek te doen naar de ontwikkeling van het toetspeil omdat een verandering van de

lijn tijdwinst of -verlies kan opleveren. Dit tijdverschil kan via een kostenbaten analyse in een kostenplaatje worden omgezet.

Er van uitgaande dat de golfoploop en de bui-oscillatie constant zijn, kan uit de voorgaande probleemanalyse de volgende probleemstelling gedistilleerd worden :
Hoe zal de ontwikkeling van het toetspeil in de toekomst verlopen en waardoor wordt deze veroorzaakt? Wat zijn de consequenties hiervan voor de veiligheid tegen overstromen?

3. Oorzaken van opgetreden veranderingen in het getij

In de Westerschelde is in de afgelopen decennia een aantal ingrepen gepleegd die van invloed zijn geweest en nog steeds van invloed zijn op het getij in de Westerschelde. Naast de menselijke ingrepen zijn ook natuurlijke veranderingen en autonome ontwikkelingen van invloed op de veranderingen van de waterbeweging. De veranderingen in het getij worden veroorzaakt door een combinatie van verschillende factoren welke niet simpelweg kunnen worden opgeteld omdat ze elkaar ook wederzijds beïnvloeden.

Zoals uit de probleemanalyse bleek is de ontwikkeling van de hoogwaterstanden van belang in relatie tot veiligheid. Geconstateerd is dat de hoogwaterstanden de afgelopen eeuw zijn gestegen. Het getijvolume in de Westerschelde is deze eeuw echter nauwelijks veranderd zoals blijkt uit metingen (Vroon e.a., 1997), zie figuur 9. In de monding is een lichte daling van het getijvolume te zien, in het middendeel en het oostelijk deel is het getijvolume bijna constant gebleven en in het meest oostelijk gelegen deel is een lichte toename te zien. De periode waarover gemeten is, is lang genoeg, maar er zijn weinig metingen gedaan in die tijd. Verder moet rekening worden gehouden met relatief grote onnauwkeurigheden als gevolg van meetfouten en het herleiden van de metingen naar gemiddeld getij waardoor de beschreven trend voorzichtig moet worden geïnterpreteerd.

In dit hoofdstuk zullen de ingrepen en autonome ontwikkelingen die in het verleden hebben plaatsgevonden beschreven worden. Daarbij wordt vooral de verandering van het hoogwater beschreven. Daarnaast zullen ook de verandering van andere getijparameters worden beschreven voor zover deze van belang zijn voor het inzicht in de stijging van het hoogwater.

3.1 Inpoldering

Tussen de veertiende en de zeventiende eeuw werd het kombergingsoppervlak door overstromingen en militaire inundaties steeds groter. Daarna is het kombergingsoppervlak telkens verkleind als gevolg van inpolderingen. Het kombergend oppervlak van de Westerschelde is afgenomen van circa 45.000 ha in 1800 tot circa 30.000 ha in 1980 (Pieters, 1991). Vooral rond 1800 is men begonnen met het inpolderen van hoog gelegen delen in de Westerschelde. Het effect op het waterbergend vermogen was in de vorige eeuw nog niet zo groot. In deze eeuw (tot 1980) zijn steeds meer gebieden met een substantieel waterbergend vermogen ingepolderd, waardoor de komberging sterk is afgenomen.

De relatieve grootte, hoogteligging en de plaats van de inpoldering langs de Westerschelde beïnvloed het effect dat de inpoldering heeft op de waterbeweging.

De afname van het kombergingsvolume van het estuarium is niet tot uitdrukking gekomen in een afname van het getijvolume. De vraag is wat de invloed is van kombergingsverkleining op het getijvolume.

De inpolderingen hebben waarschijnlijk effect gehad op de verhoging van de hoogwaterstanden in de Westerschelde. Omdat het waterbergend vermogen van het estuarium is afgenomen, zijn de extreme hoogwaterstanden bij hoge afvoeren en stormvloeden toegenomen. Voor de inpoldering fungeerden de gebieden als overstromingsgebieden zodat de extreme hoogwaterstanden konden worden afgevlakt. Dit is een hypothese die nog niet via metingen of berekeningen is aangetoond.

3.2 Vaarwegverdieping

Sinds het begin van deze eeuw wordt de Westerschelde uitgebaggerd ten behoeve van de scheepvaart. Tot de eerste wereldoorlog ging het om kleine hoeveelheden van ongeveer 1 tot 2 mln m³ per jaar. Vanwege de groter wordende schepen, moesten dieper liggende schepen de haven van Antwerpen kunnen bereiken waardoor de vaargeul moest worden uitgediept. De baggerhoeveelheden namen per jaar toe tot 4 à 5 mln m³ in de zestiger jaren. Er werd zoveel mogelijk morfologisch gebaggerd (=meegaan met natuurlijke morfologische processen) (Pieters, 1991).

Tussen 1970 en 1975 werd een grootschalige verdieping van de hoofdgeul met 3 à 4 meter doorgevoerd. Hierdoor werd de baggeromvang tijdelijk verdrievoudigd tot ongeveer 12 à 14 mln m³ per jaar. Na ongeveer 15 jaar is een nieuwe evenwichtssituatie ontstaan tussen het geulvolume en het getijvolume. Tegenwoordig bedraagt het onderhoudsbaggervolume ongeveer 8 à 10 mln m³ per jaar. In tabel 2 staan de baggervolumina per tijdseenheid uitgezet.

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

tabel 2 : baggervolume per jaar, exclusief de monding van de Westerschelde (Mol, 1997).

Tijdens het baggeren wordt vooral de drempel (overgang tussen twee bochten) uitgebaggerd omdat de geul daar breder en dus ondieper is. Er wordt veronderstelt dat het grotere geulprofiel een groter debiet aantrekt waardoor een ruimer geulprofiel ontstaat in de tussenliggende geuldelen die niet gebaggerd zijn. Door het grotere profiel van de hoofdgeul wordt deze dominant, worden de nevengeulen ondergeschikt en verdwijnen de kortsluitgeulen. Ook dit is een veronderstelling die nog niet fysisch onderbouwd is.

Het niveau van de hoog- en laagwaterstanden is beïnvloed door de verdieping van de vaargeul. Uit 1-dimensionale modelberekeningen met DUFLOW (Bollebakker, 1996) blijkt dat het laagwaterniveau is afgenomen tot ongeveer 30 cm bij Bath hetgeen overeenkomt met metingen (Dillingh en Heinen, 1994). Als gevolg van de verdieping neemt de hoogwaterstand toe. Uit de berekeningen volgt een kleinere toename dan uit de metingen, waaruit kan worden afgeleid dat er nog een andere oorzaak is voor de stijging van het hoogwaterniveau.

3.3 Inpoldering en vaarwegverdieping

De combinatie van verdieping en inpoldering heeft voor een andere vorm van het doorstroomprofiel gezorgd. Dit veranderde profiel is van invloed op de voortplanting van de getijgolf. Door de inpolderingen is de bergende breedte van het estuarium verkleind en door de verdieping is het stroomvoerende oppervlak vergroot. De snelheid van de voortplanting van de getijgolf is evenredig met de wortel uit het stroomvoerende oppervlak gedeeld door de bergende breedte, in formule vorm :

$$c_g = \sqrt{g \cdot A_s / B_b}$$

waarin :

c_g	= voortplantingssnelheid getij	[m/s]
g	= zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]
A_s	= stroomvoerend oppervlak	[m ²]
B_b	= bergende breedte	[m]

Een afname van B_b en een toename van A_s resulteert dus in een vergroting van de voortplantingssnelheid van de getijgolf, hetgeen overeenkomt met de metingen.

3.4 Bodemveranderingen in de mond van de Westerschelde

In deze eeuw is de bodemligging van de mond van de Westerschelde gewijzigd als gevolg van baggerwerkzaamheden. De geul tussen Zeebrugge en Vlissingen (Wielingen) is 2,5 meter dieper dan in het begin van deze eeuw. Verder is de geul in zeewaartse richting verschoven. De bodem ter hoogte van Blankenberghe is deze eeuw 1 meter minder diep geworden. Uit berekeningen met het ZUNOWAK-model (=zuidelijke Noordzee model) blijkt dat deze veranderingen in bodemligging een vergroting van de getijslag in Vlissingen tot gevolg hebben gehad van 17 cm, hetgeen aardig overeenkomt met de 14 cm die gemeten is (Langendoen, 1987). Als gevolg van de veranderingen in de mond van de Westerschelde is het hoogwaterniveau bij Vlissingen met 8 cm gestegen. De getijkromme van Vlissingen is mede bepalend voor de voortplanting van het getij in de rest van het estuarium, zie paragraaf 3.7. Een bodemverandering in de mond van de Westerschelde heeft via een verandering van het getij ter plaatse invloed op het getij verder stroomopwaarts.

3.5 Morfologische veranderingen in de Westerschelde

Ondanks het feit dat het totale getijvolume niet significant veranderd is, is de debietverdeling over de geulen wel veranderd. In het Westelijk deel is de verdeling van het debiet over de geulen ongeveer gelijk gebleven terwijl in het oostelijk deel het ebvolume in de hoofdgeul is toegenomen ten opzichte van het totale getijvolume en in het middendeel het ebvolume in de hoofdgeul is afgenomen ten opzichte van het totale getijvolume. In het oostelijk deel is het meergeulensysteem waarbij, een duidelijke verdeling bestaat tussen eb- en vloedgeulen, steeds minder duidelijk. Veranderingen van de morfologie werken door in een verandering in het getij en zijn daarmee van belang voor de ontwikkeling van het hoogwater.

Deze ontwikkelingen zijn het gevolg van morfologische veranderingen die van nature optreden in de Westerschelde of worden beïnvloed door ingrepen en autonome ontwikkelingen. Bagger- en stortactiviteiten zijn ingrepen die direct invloed hebben op de morfologische veranderingen in de Westerschelde omdat daarbij de hoofdgeul wordt verdiept en in nevengeulen wordt gestort.

Hieronder zullen natuurlijk optredende processen beschreven worden. Hierbij moet worden bedacht dat deze processen waarschijnlijk door andere activiteiten zijn beïnvloed.

De herverdeling van het getijvolume in het middendeel is toe te schrijven aan een natuurlijk proces. Als gevolg van de verminderde eb- en vloeddominantie van de geulen is het middendeel van de Westerschelde gaan sedimenteren.

Bij een duidelijke verdeling tussen eb- en vloedgeul hebben beide geulen een groot doorstroomprofiel omdat de capaciteit van de ebgeul tijdens vloed niet effectief gebruikt wordt en vice versa. Het totale doorstroomprofiel (van eb- en vloedgeul) is daardoor relatief groot. Bij een afname van de dominantie van de geul neemt het maximale debiet per geul af. Daardoor heeft de geul een kleinere doorstroomprofiel nodig en treedt sedimentatie op. Dit proces heeft plaatsgevonden in het middendeel van de Westerschelde waar een herverdeling van het debiet heeft plaatsgevonden tussen de geulen het Middelgat en het Gat van Ossensse. Het getijvolume in de ebgeul, het Middelgat, is afgenomen en de functie is overgenomen door de zuidelijker gelegen geul het Gat van Ossensse, waarbij sedimentatie van het middengedeelte is opgetreden, de zogenaamde functiewisseling (Kleef, 1994). In het systeem hebben meer morfologische aanpassingen plaatsgevonden (o.a. Schaar van de Spijkerplaat), maar daar is in de literatuur minder over bekend.

3.6 Bouw Oosterschelde stormvloedkering

Aan de hand van modelonderzoek, met het Randdelta II-model, is vastgesteld dat het sluiten van de stormvloedkering Oosterschelde geen rol van betekenis speelt voor de hoogwaterstanden op de Westerschelde. Onder normale getijomstandigheden wordt de hoogwaterstand bij Vlissingen niet beïnvloed door het sluiten van de stormvloedkering Oosterschelde. Bij een extreme stormvloed, zoals in 1953 is voorgekomen, vertonen de hoogwaterstanden bij Vlissingen bij een open en gesloten stormvloedkering een verschil van minder dan 2 cm (Bollebakker e.a., 1987).

3.7 Verandering van windklimaat

In hetzelfde onderzoek van Bollebakker e.a. (1987) is met behulp van een statistisch model een relatie vastgesteld tussen de opgetreden extreme hoogwaterstanden in Prosper en diverse getijkenmerken bij Vlissingen voor de periode 1971-1986. Er blijkt een statistische relatie te bestaan tussen de opgetreden stormvloedstand te Prosperpolder en de volgende parameters : de hoogwaterstand en rijssnelheid in Vlissingen die vooraf gaan aan het hoogwater in Prosper, de windsnelheid en de windrichting. Uit statistische analyse blijkt dat de variantie in de hoogwaterstand bij Prosper voor 86% wordt verklaard uit de relatie tussen de hoogwaterstand bij Vlissingen en Prosper. Door de windsnelheid in de statistische relatie te betrekken, verklaart deze 93% van de variantie in de hoogwaterstand bij Prosper. Hieruit blijkt dat behalve de

hoogwaterstanden in Vlissingen ook het windklimaat van belang is voor de hoogwaterstanden in Prosper.

Eenzelfde soort onderzoek voor een langere periode (1943-1995) naar de statistische relatie tussen de opgetreden extreme hoogwaters in Bath en Vlissingen heeft uitgewezen dat de relatie tussen de getijkarakteristieken van Vlissingen en de hoogwaterstanden te Bath voor de lange periode minder sterk zijn dan voor een kortere perioden (Arends, 1997). Het blijkt dat behalve de wind en getijkarakteristieken in Vlissingen ook interne factoren zoals de geometrie van belang zijn. Ingrepen met een snelle initiële morfologische reactie zoals inpolderingen kunnen met deze statistische methode beter geanalyseerd worden dan ingrepen met een lange morfologische reactie zoals baggeren.

3.8 Zeespiegelstijging

Als gevolg van de zeespiegelstijging wordt de komberging van de Westerschelde groter, omdat het kombergend oppervlak groter wordt. Uit berekeningen met het Randdelta II-model volgt dat als gevolg van de zeespiegelstijging de relatieve stijging van het hoogwater in de Westerschelde enkele centimeters bedraagt, terwijl het laagwater relatief enkele centimeters daalt. Dit resulteert in een vergroting van de getijslag van maximaal 3,5 centimeter voor de periode 1900-1980 (Langendoen, 1987).

3.9 Conclusies

De oorzaken van de stijging van het hoogwater als gevolg van verschillende ingrepen en ontwikkelingen zijn duidelijk. Ook het gevolg, de stijging van het hoogwater, is duidelijk, maar de relatie oorzaak-gevolg is niet bekend. Uit verschillende berekeningen volgt weliswaar een stijging van de hoogwaterstand als gevolg van de ingreep, maar de vraag waarom die verhoging optreedt kan nog niet worden beantwoord. De fysische relaties tussen komberging, getijvolume, demping en loopsnelheid van het getij en de terugkoppelingsmechanismen zijn onbekend. Evenmin is inzicht in de specifieke relatie tussen gemiddeld hoogwater en extreem hoogwater.

4. Toekomstige ontwikkelingen

In het Schelde-estuarium worden nu en in de toekomst menselijke ingrepen gedaan. Deze ingrepen zullen net als de ingrepen die in het verleden hebben plaatsgevonden, effect hebben op het getij in de Westerschelde en zijn daarmee van belang voor de veiligheid tegen overstromen. Eerst zullen de effecten van de huidige en geplande ingrepen worden beschreven, daarna zullen de verwachte effecten worden behandeld toekomstige ingrepen waar op dit moment plannen voor worden ontwikkeld.

4.1 Huidige en geplande ingrepen

In deze paragraaf zullen de ingrepen die op dit moment aan de gang zijn, zoals vaargeulverdieping, en ingrepen die gepland zijn, zoals de aanleg van potpolders in België worden beschreven.

4.1.1 vaarwegverdieping 48'/43'

Om de haven van Antwerpen toegankelijk te maken voor grotere, dieper liggende schepen is per 1 juli 1997 de zogenaamde 48'/43' verdieping in gang gezet. Dit houdt in dat onder alle gemiddelde getijomstandigheden o.a. de volgende vaarmogelijkheden mogelijk zijn (Technische Scheldec commissie, 1984) :

- Een massagoedschip met een diepgang van 48 voet (=14,65 m) moet in één getij de haven van Antwerpen kunnen bereiken.
- Een massagoedschip met een diepgang van 50 voet (=15,26 m) moet in twee getijcycli de haven van Antwerpen kunnen bereiken.
- Afvaart van een containerschip met een diepgang van 42,8 voet (=13 m) moet in één getij mogelijk zijn.

Met behulp van 1- en 2-dimensionale modellen zijn berekeningen uitgevoerd om te onderzoeken hoe het getij als gevolg van de verdieping zal wijzigen Bollebakker (e.a., 1996), Pieters (e.a., 1993) en Dekker (1994). Bij de 2-dimensionale berekeningen is de hoofdgeul wel verruimd maar is het sediment niet teruggestort, waardoor de berekeningen met een te ruim geulprofiel ter plaatse van de stortlocaties zijn uitgevoerd. De belangrijkste resultaten van deze berekeningen zijn :

- De getijslag zal in stroomopwaartse richting toenemen van 0 cm bij Vlissingen tot 10 à 15 cm bij Bath. Dit komt voornamelijk door een verlaging van de laagwaterstanden met ca. 10 cm. De gemiddelde hoogwaters zullen met ongeveer 5 cm stijgen.
- Onder stormomstandigheden wordt geen extra verhoging van de waterstanden verwacht als gevolg van de verdieping.
- Verdieping van de Beneden-Zeeschelde zal een stijging tot gevolg hebben van de hoogwaters op de Zeeschelde met 10 à 15 cm.
- De verdeling van het getij over de hoofd- en nevengeulen zal veranderen ten koste van de nevengeulen. Verwacht wordt dat de hoofdgeulen 5 tot 15% meer van het totale getijvolume zullen afvoeren en de scharen even zoveel minder.
- Het absolute getijvolume zal met 1-5% toenemen.

- Er wordt indirecte invloed van de verdiepingswerken verwacht op de golfhoogte, omdat door veranderingen in de morfologie veranderingen in golfhoogten kunnen ontstaan.

4.1.2 Uitvoering van het Sigmaplan in België

De Belgische tegenhanger van het deltaplan is het sigmaplan (Ministerie van de Vlaamse gemeenschap), daarin worden dijkverhoging, aanleg van gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG), dijkverzwaring en de bouw van een stormstuw bij Oosterweel beschreven als maatregelen ter verhoging van de veiligheid tegen overstromen in België. Langs de Schelde is een groep overstromingsgebieden met een oppervlak van bijna 600 ha operationeel. De studie naar een tweede groep overstromingsgebieden, waaronder de Kruibeke-Bazel-Rupelmonde (KBR) polder, is in een vergevorderd stadium.

Het aanleggen van GOG's heeft het doel bij extreme omstandigheden de top van de vloedgolf af te toppen waardoor de hoogwaterstanden dalen. Om tijdens de volgende vloedgolf eenzelfde effect te bereiken, moet de polder tijdens laagwater volledig uitwateren. Onder normale condities stroomt de GOG niet vol en heeft daar geen effect op het getij en de morfologie.

Door het Belgische Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (Laet, 1993) zijn 1D modelberekeningen gedaan naar het effect op o.a. de hoogwaterstanden van verschillende polder onder gemiddeld tij omstandigheden. Er zijn twee situaties doorgerekend : één waarbij de polder het huidige bodemniveau heeft en één waarbij de polder is afgegraven tot laagwater.

Op Nederlands grondgebied zijn de effecten op het hoogwater niveau van de eerste serie potpolders niet erg groot (enkele centimeters). Het aanleggen van de KBR polder met een verlaagde bodem tot laagwater heeft in het Nederlandse gedeelte van de Westerschelde een daling van de hoogwaterstand tot gevolg van ongeveer 15 cm. De daling van het hoogwater is het grootst in de buurt van de GOG's en varieert afhankelijk van de plaats van enkele centimeters tot enkele decimeters.

4.2 Plannen voor toekomstige ingrepen

Zowel in Nederland als in België worden plannen ontwikkeld voor het toekomstige beheer van het Schelde-estuarium. Hieronder zullen de plannen besproken worden met hun verwachte effecten op het getij in de Westerschelde. Ook hier ligt de nadruk op de hoogwaterstanden, maar zullen ook de andere getijparameters beschreven worden.

4.2.1 Kombergingsvergroting in België en in Nederland

Uit het verdrag inzake de veruiming van de vaargeul in de westerschelde is voortgekomen dat natuurcompensatie gerealiseerd moet worden. Dit wordt gedaan door middel van het natuurherstelplan. Dit plan bestaat uit een pakket natuurherstelprojecten, in of in de nabijheid van de Westerschelde, dat tot een duidelijke kwaliteitsverbetering van de natuur van de Westerschelde leidt (Adviescommissie Westerschelde, 1997).

Een van de opties die genoemd wordt voor de lange termijn en een relatie heeft met veiligheid is kombergingsvergroting. Het effect op de hoogwaterstand is ondermeer afhankelijk van de gekozen vorm, GOG of ontpoldering. In beide gevallen zal de hoogwaterstand dalen.

Zoals eerder beschreven is hebben GOG's geen effect op het getij en de morfologie. Permanente vergroting van het kombergend oppervlak heeft daarentegen wel effect op het getij en de morfologie. Hoe sterk de invloed is hangt onder andere af van de hoogte van het ontpolderde gebied. Als het ontpolderde gebied op laagwaterniveau ligt, wordt het intergetijdegebied vergroot waardoor de komberging wordt vergroot en het getijvolume groter kan worden. Ligt de polder op gemiddeld hoogwaterniveau, dan wordt de polder alleen tijdens extreme waterstanden overspoeld en is het effect op het getijvolume en de morfologie minder.

Met het 1D model DUFLOW zijn berekeningen gedaan voor kombergingsvergroting bij de Belgisch-Nederlandse grens en bij Kruibeke. Hieronder volgt een samenvatting van de resultaten van die berekeningen (Bollebakker e.a. 1996):

- Verwacht wordt dat onder stormomstandigheden ontpoldering langs de Schelde (KBR) van 300 ha zal resulteren in een afname van de hoogwaters van 10 à 15 cm in België. Ontpoldering van 500 ha zal een afname van het hoogwater van 20 cm veroorzaken. De laagwaters zullen iets hoger komen te liggen, respectievelijk 5 en 10 cm.
- De locatie van het te ontpolderen gebied blijkt erg belangrijk te zijn. Het ontpolderen van een gebied van 300 ha bij Kruibeke-Bazel-Rupelmonde zal in Nederland (ter hoogte van Bath) een verlaging van het hoogwater tot 15 cm tot gevolg hebben terwijl ontpoldering van eenzelfde gebied bij de Hedwige polder een verlaging van het hoogwater van 3-5 cm tot gevolg heeft.
- Verwacht wordt dat ontpoldering van 300 ha of 500 ha bij KBR een toename geeft van het vloedvolume met respectievelijk 10-20%. Ook hier is de locatie van belang want ontpoldering van eenzelfde gebied bij de Hedwige polder levert nauwelijks een vergroot getijvolume.
- De stormvloed van 1953 laat zien dat kombergingsvergroting in Nederland de veiligheid in België vergroot. Door de dijkdoorbraken kwam in Nederland 8000 ha onder water te staan, waardoor het hoogwater in Antwerpen ca. 60 cm lager is uit gevallen.

4.2.2 Afronding Sigmaplan

Het sluiten van de stormstuw Oosterweel onder extreme omstandigheden heeft een waterstandsverhoging voor de stuw van enkel decimeters tot gevolg. In 1978 (Lupgens) zijn met het 1-dimensionale model IMPLIC berekeningen gedaan voor een gesloten stormstuw. De berekeningen die in 1996 gedaan zijn met het 2-dimensionale model Scaldis geven eenzelfde beeld (Male en Vroon, 1996). Als gevolg van het sluiten van de stormvloedkering varieert de toename van de hoogwaterstanden tussen 7 cm bij Terneuzen en 39 cm bij Bath. Afhankelijk van het sluittijdstip kan een translatiegolf ontstaan waardoor de waterstanden nog hoger kunnen worden.

4.2.3 Verdieping 50'

In België worden plannen gemaakt om na de huidige verdieping de Westerschelde te verdiepen zodat schepen met een diepgang van 50 voet in één getij de haven van

Antwerpen kunnen bereiken. Er zijn nog geen berekeningen gedaan naar de verwachte effecten op het hoogwater.

4.3 Interactie ingrepen

Het gecombineerde effect van verschillende ingrepen kan vanwege het niet lineaire karakter niet bij elkaar worden opgeteld. In deze paragraaf zullen de effecten van verdieping en kombergingsvergroting gepresenteerd worden. De resultaten komen uit de reeds genoemde studie van Bollebakker (1D) e.a. (1996) en uit een studie van Dekker (2D) (1996) :

- Een combinatie van verdieping en ontpoldering van zowel de Hedwige als de KBR polder heeft naar verwachting het grootste effect op de waterstanden in de Schelde. De laagwaters zullen stijgen tot 6 cm bij Hansweert tot ca. 30 cm bij Antwerpen. De hoogwaters zullen afnemen tot ongeveer 10 cm bij Bath. Bij Antwerpen zullen de hoogwaters dalen met 22 cm (1D model) tot 45 cm (2D model, waarbij beide polders tot laagwater zijn afgegraven) afhankelijk van de gebruikte modellering. Tevens zal er een vertraging optreden van de getijgolf op de Schelde van 30 minuten.
- Het getijvolume zal bij een combinatie van ontpolderen bij Kruibeke en vaarwegverdieping vergroten met 10-20%, afhankelijk van de grootte van het gebied. Dit is vergelijkbaar met de gevolgen van alleen ontpolderen. Als gevolg van kombergingsvergroting bij Hedwige en verdieping zal naar verwachting het getijvolume in het oostelijk deel van het estuarium stijgen met 5 à 10%.

4.4 Autonome ontwikkelingen

Bij toekomstige ontwikkelingen van het hoogwater moet rekening gehouden worden met de zeespiegelstijging. Hiervoor zijn een aantal scenario's opgesteld die variëren van een kleine stijging van de zeespiegel tot een in de toekomst versnelde zeespiegelstijging.

Uit de studie van Heinen en Hoogkamer (1993) blijkt dat na analyse van de data van de gemiddelde zeestand het erop lijkt dat de ruis rond het signaal toeneemt. Deze ruis wordt veroorzaakt door luchtdrukverschillen en het nodale getij. Dit zou een oorzaak kunnen zijn van de versnelde zeespiegelstijging van de laatste 2 decennia.

Over de ontwikkeling van de druk in de atmosfeer is niet veel bekend, zodat rekening gehouden moet worden met een onzekere factor. Uit onderzoek van de Ronde e.a. (1993) bleek dat de zeespiegelstijging voor 20% mede bepalend is voor de kruinhoogte van de Afsluitdijk en de Hondsbosse zeewering.

4.5 Conclusies

Concluderend kan worden gezegd dat als gevolg van de vaarwegverdieping de hoogwaters, volgens de berekeningen met het verruimde Westerschelde model, initieel maximaal 5 cm zullen stijgen.

Ontpolderen heeft een verlaging van de hoogwaterstanden tot gevolg hetgeen de veiligheid verhoogt. De grootte van dit effect is afhankelijk van de grootte, de hoogteligging, de plaats en de manier van uitvoeren van het te ontpolderen gebied.

De bouw van een stormstuw in Oosterweel heeft negatieve gevolgen voor de veiligheid, omdat de hoogwaterstanden voor de stuw met enkele decimeters worden verhoogd. De stijging van de zeespiegel heeft een verhogend effect op de hoogwaterstanden waardoor de veiligheid wordt beïnvloed. Afhankelijk van de snelheid van de zeespiegelstijging heeft deze grote of minder grote gevolgen voor de veiligheid.

Veel berekeningen zijn gedaan naar het effect van verschillende ingrepen op het hoogwaterniveau. De vraag die blijft staan is wat de fysische verklaring voor de verschillende ingrepen is.

Ingrepen, autonome ontwikkelingen en eventuele maatregelen beïnvloeden elkaar, zodat afzonderlijke effecten niet zonder meer bij elkaar mogen worden opgeteld. De maatregelen zullen in combinatie met ingrepen en autonome ontwikkelingen bestudeerd moeten worden om de gevolgen voor de veiligheid te bepalen. Ingrepen die in België gedaan worden in het Schelde-estuarium hebben ook effect op het getij in Nederland en omgekeerd. Zowel voor Nederland als voor België is het van belang om in het kader van de veiligheid grensoverschrijdend overleg en onderzoek uit te voeren naar de gevolgen van ingrepen in het Schelde-estuarium.

5. Voorstel verdere studie naar veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde

De conclusie uit de probleemanalyse is dat op korte termijn de stijging van de hoogwaterstand geen gevaar oplevert voor de veiligheid van de dijken, maar dat het voor de lange termijn zinvol is om verder onderzoek te doen naar de ontwikkeling van het toetspeil. Het is dan mogelijk een optimaal beheer van de Westerschelde ten aanzien van veiligheid vast te stellen.

In dit hoofdstuk zal de opzet van het vervolg van deze studie worden beschreven.

Fasering

In de vervolg studie naar de veiligheid tegen overstromen kunnen een aantal fasen worden onderscheiden. De eerste fase zal bestaan uit een getijanalyse waarbij de oorzaken van de stijging van het hoogwater tot nu toe onderzocht zullen worden. Hierbij moet de kennis over het getij in de Westerschelde worden verbeterd. De zeespiegelstijging is een belangrijke invloedsfactor op de stijging van het hoogwater. Binnen het project verdiep wordt nader onderzoek gedaan naar dit verschijnsel en de morfologische gevolgen (Langerak, 1997). De voortgang van die studie moet gevolgd worden zodat resultaten tussen beide studies uitgewisseld kunnen worden.

De opgedane kennis uit de getijanalyse wordt gebruikt bij de toekomstverkenning. Deze kennis alleen is niet voldoende omdat een verandering van het getij invloed heeft op de morfologie welke vervolgens weer invloed heeft op het getij. Daarom zal het in de volgende fase nodig zijn om een terugkoppeling uit te voeren met de morfologie om ook tweede orde effecten in beeld te brengen.

Op lange termijn kunnen de stijgende waterstanden de veiligheid bedreigen, waardoor het noodzakelijk kan zijn om ingrepen te doen, in het estuarium om de stijging tegen te gaan of dijkverhoging waarbij de stijging dan een randvoorwaarde is. Het genereren van verschillende maatregelen is een aparte fase die zal uitmonden in verschillende alternatieven voor de toekomstverkenning.

De afweging tussen de verschillende maatregelen kan gedaan worden op basis van een kostenbaten analyse. Daarbij moeten niet alleen economische maar ook maatschappelijke en milieu effecten worden meegenomen. Dit zal een andere fase van de studie zijn.

Tenslotte zullen alle verschillende fasen gecombineerd worden in een toekomst verkenning. Een combinatie van autonome ontwikkelingen, ingrepen en maatregelen leveren verschillende alternatieven voor de toekomst verkenning. Op basis van de uitkomsten van de verschillende alternatieven kan het toekomstige beheer ten aanzien van veiligheid van de Westerschelde worden bepaald.

De eerste fase van het vervolgonderzoek is de getijanalyse. Na afloop van die fase zal meer duidelijk zijn over de inhoud en opzet van de volgende fasen daarom zal hieronder de eerste fase uitgebreid beschreven worden en zullen de andere fasen kort toegelicht worden.

Getijanalyse

Gedurende de eerste fase van de vervolgstudie zal een getijanalyse gedaan worden om kennis op te doen over de getijdoordringing in de Westerschelde waarmee de waargenomen veranderingen kunnen worden verklaard. Hieronder volgen een aantal zaken die bij de analyse aan bod dienen te komen.

Na afloop van de getijanalyse moet een helder beeld zijn ontstaan over de invloed van de ingrepen en de autonome ontwikkelingen op de extreme hoogwaterstijging zodat op grond daarvan een prognose gedaan kan worden over de toekomstige ontwikkelingen.

Op dit moment worden 1D berekeningsresultaten geanalyseerd van kombergingsvergroting (Pieters, 1997). Bij deze analyse wordt ingegaan op de invloed van de fysische parameters wrijving en traagheid. De resultaten van deze studie zullen zo snel mogelijk beschikbaar komen en geven extra informatie voor de getijanalyse.

In dit document is een aantal oorzaken genoemd voor de stijgende hoogwaterstanden tot nu toe. Deze zijn : inpoldering, vaargeulverdieping, bodemverandering mond van de Westerschelde, natuurlijke morfologische veranderingen, verandering windklimaat en zeespiegelstijging. De combinatie van deze factoren heeft geresulteerd in een verhoging van de waterstand. De invloed van deze factoren afzonderlijk is niet bekend. De Westerschelde kan niet als een lineair systeem worden beschouwd waardoor de invloed van de ingrepen of ontwikkelingen niet bij elkaar opgeteld kunnen worden. Zowel de individuele invloed als de interactie van de verschillende factoren zal onderzocht moeten worden.

Uit tabel 1 van de probleemanalyse bleek dat er verschil is tussen de stijging van het gemiddelde hoogwater en de gemiddelde zeestand. Ook is geconstateerd dat het gemiddelde springtij sneller stijgt dan de gemiddelde hoogwaterstand. De stijging van de gemiddelde hoogwaterstand wordt tot nu toe lineair doorvertaald in een stijging van de extreme waterstand. Uit het voorgaande zou geconcludeerd kunnen worden dat dit geen terechte aanname is. De getijanalyse moet uitwijzen wat de relatie is tussen de (stijging van de) gemiddelde zeestand en de (stijging van de) gemiddelde hoogwaterstand. En vervolgens moet de relatie tussen de (stijging van de) gemiddelde hoogwaterstand en de (stijging van de) extreme waterstand onderzocht worden. Dit laatste is voor de veiligheidsstudie het meest van belang. Verder moet een verklaring worden gevonden voor het feit dat de extremen sneller stijgen. Misschien zijn factoren buiten het estuarium hiervan de oorzaak.

Als gevolg van de geometrie van het estuarium wordt de getijgolf in oostwaartse richting opgeslingerd. Deze slingering lijkt de laatste jaren toe te nemen. Onderzocht moet worden wat daarvan de oorzaak is, hoe de geometrie deze opslingering beïnvloed en wat de maximale waarde van de opslingering is.

Een zaak die verband houdt met deze opslingering is de invloed van de zeespiegelstijging op het hoogwater. Bekend moet worden hoe de zeespiegelstijging buiten het bekken doorvertaald kan worden naar een stijgende hoogwaterstand in het bekken.

Het effect van bepaalde ingrepen is erg locatie gevoelig. Met behulp van een gevoeligheidsanalyse van het huidige systeem moet worden nagegaan waar en waarom een ingreep weinig of veel effect heeft.

Het Schelde-estuarium strekt zich uit tot de sluizen bij Gent. Omdat ingrepen grensoverschrijdend zijn, kan niet worden volstaan met een analyse van alleen het Nederlandse gedeelte. Het gebied waarover de getijanalyse uitgevoerd moet worden is vanaf de raai Vlissingen-Breskens tot en met het significante Belgische gedeelte.

Omdat in de volgende fase een terugkoppeling met de morfologie zal plaatsvinden is het van belang dat aan het einde van de getijanalyse een indicatie gegeven wordt over de rol van de morfologische ontwikkelingen in het estuarium.

Terugkoppeling morfologie

Ingrepen, maatregelen en autonome ontwikkelingen hebben direct invloed op de waterstand en getijdoordringing. Veranderingen in het getij zullen morfologische reacties als gevolg hebben waardoor de bodem zich zal aanpassen aan de nieuwe situatie. Deze veranderde bodemligging zal de getijparameters weer beïnvloeden. Voor de lange termijn ontwikkelingen van de waterstand is de interactie tussen getij en morfologie van groot belang. Binnen het project verdieping wordt een studie gedaan naar de morfodynamiek van de Westerschelde (Kornman, 1997). De resultaten van deze studie kunnen van belang zijn bij deze fase van de vervolgstudie naar veiligheid.

Inventarisatie alternatieven toekomstverkenning

Een combinatie van autonome ontwikkelingen zoals bv. zeespiegelstijging, ingrepen zoals bv. vaargeulverdieping en maatregelen met betrekking tot veiligheid in het estuarium vormen de verschillende alternatieven voor de toekomstverkenning. In deze fase zullen de verwachte ingrepen geanalyseerd worden. Verder moet onderzocht worden welke maatregelen genomen kunnen worden om de stijging van de waterstanden te minimaliseren of tegen te gaan. Ook zullen maatregelen gegeneerd worden die geen direct effect hebben op de waterstand, maar wel veiligheidsverhogend zijn. Na afloop van deze fase zijn een aantal alternatieven gegenereerd die als uitgangspunt zullen dienen voor de toekomstverkenning.

Opzetten kostenbaten analyse

Een afweging tussen verschillende alternatieven voor de toekomst zal plaatsvinden op basis van een kostenbaten analyse waarbij behalve economische ook maatschappelijk en milieu effecten meegenomen worden. Bij het opzetten van het model moet goed nagegaan worden hoe de verschillende effecten gewogen kunnen worden. Na afloop van de uitkomsten van de toekomstverkenning zal het model gebruikt worden bij de afweging van de verschillende alternatieven.

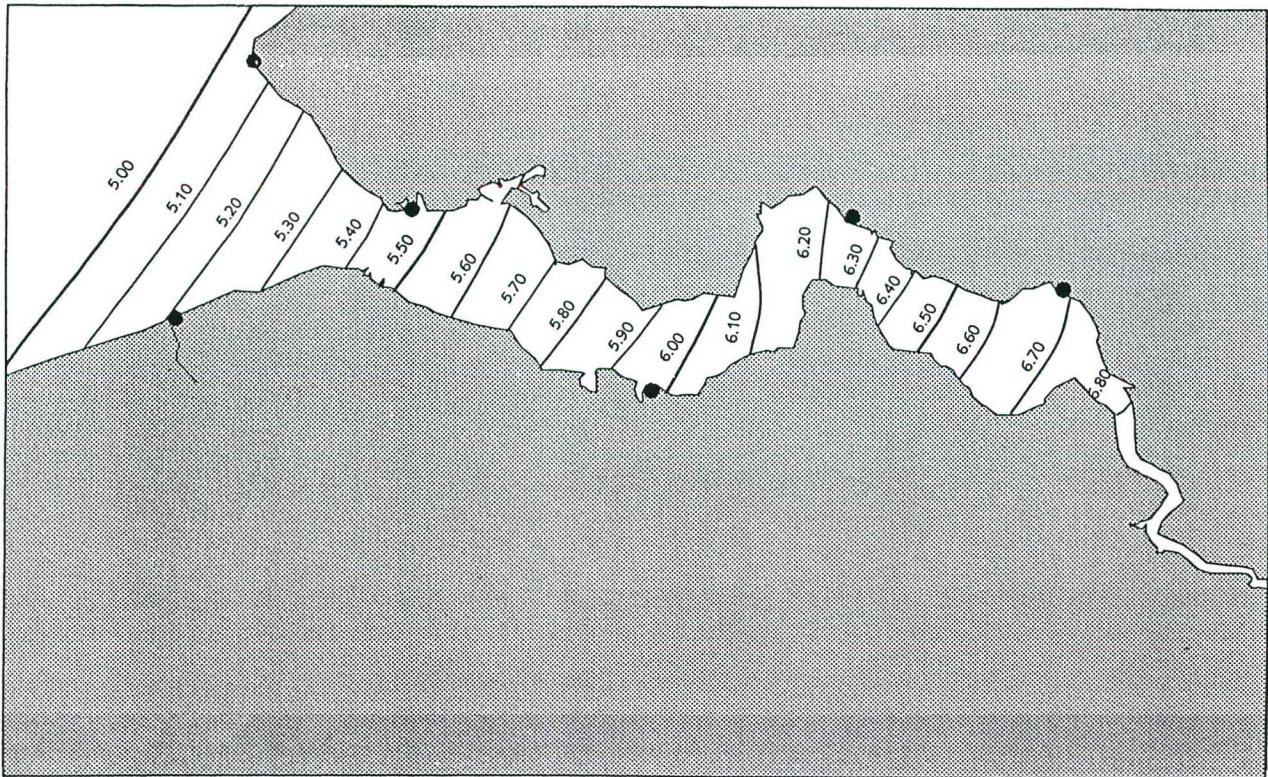
Toekomstverkenning

De alternatieven die gedurende een eerdere fase zijn gegenereerd zullen in deze fase doorgerekend worden. Daarbij zullen zowel de effecten van de verschillende alternatieven op de hoogwaterstand bepaald worden als een kostenbaten analyse van elk alternatief gemaakt worden. Op grond van deze verkenning kan een beheersvisie worden bepaald.

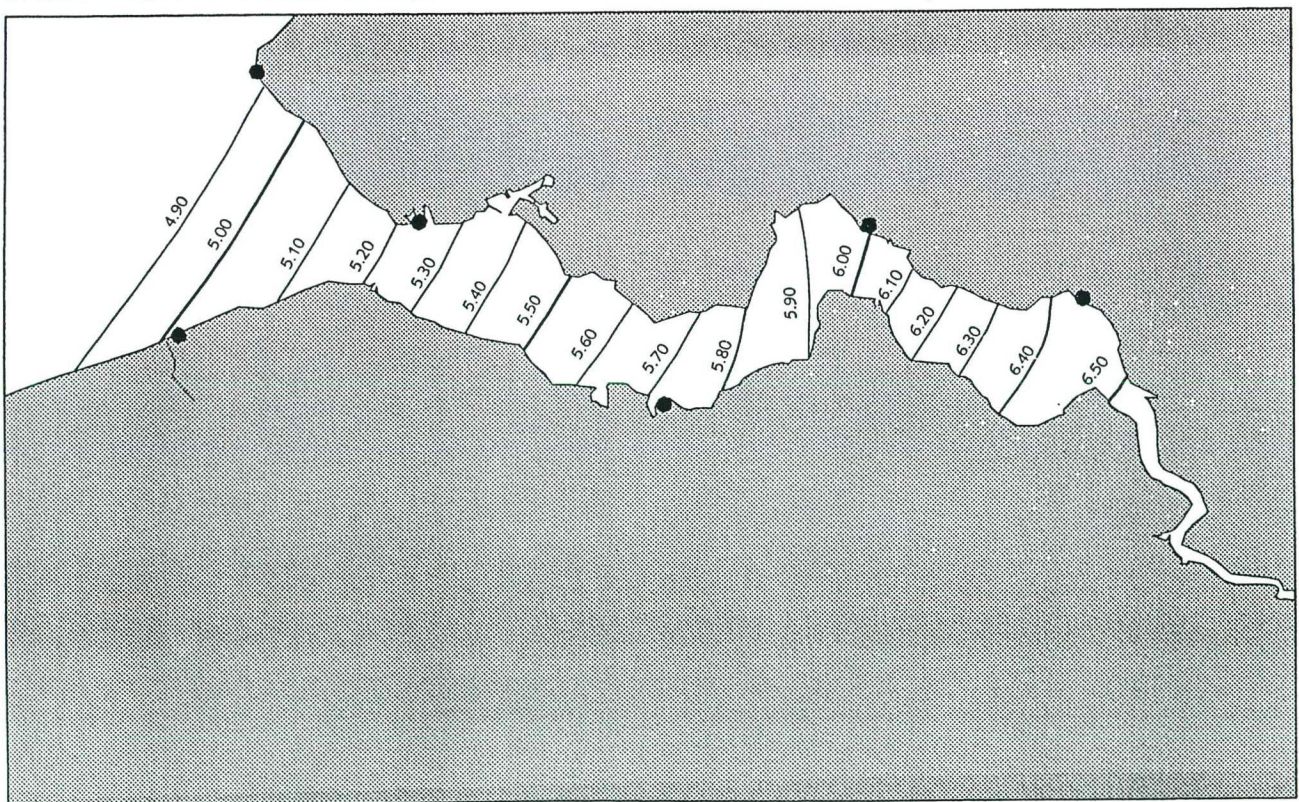
In tabel 3 staan de bovengenoemde fasen schematisch weergegeven.

	uit te voeren studie
fase 1	getijanalyse
fase 2	terugkoppeling morfologie
fase 3	inventarisatie alternatieven toekomstverkenning
fase 4	opzetten kostenbaten analyse
fase 5	toekomstverkenning

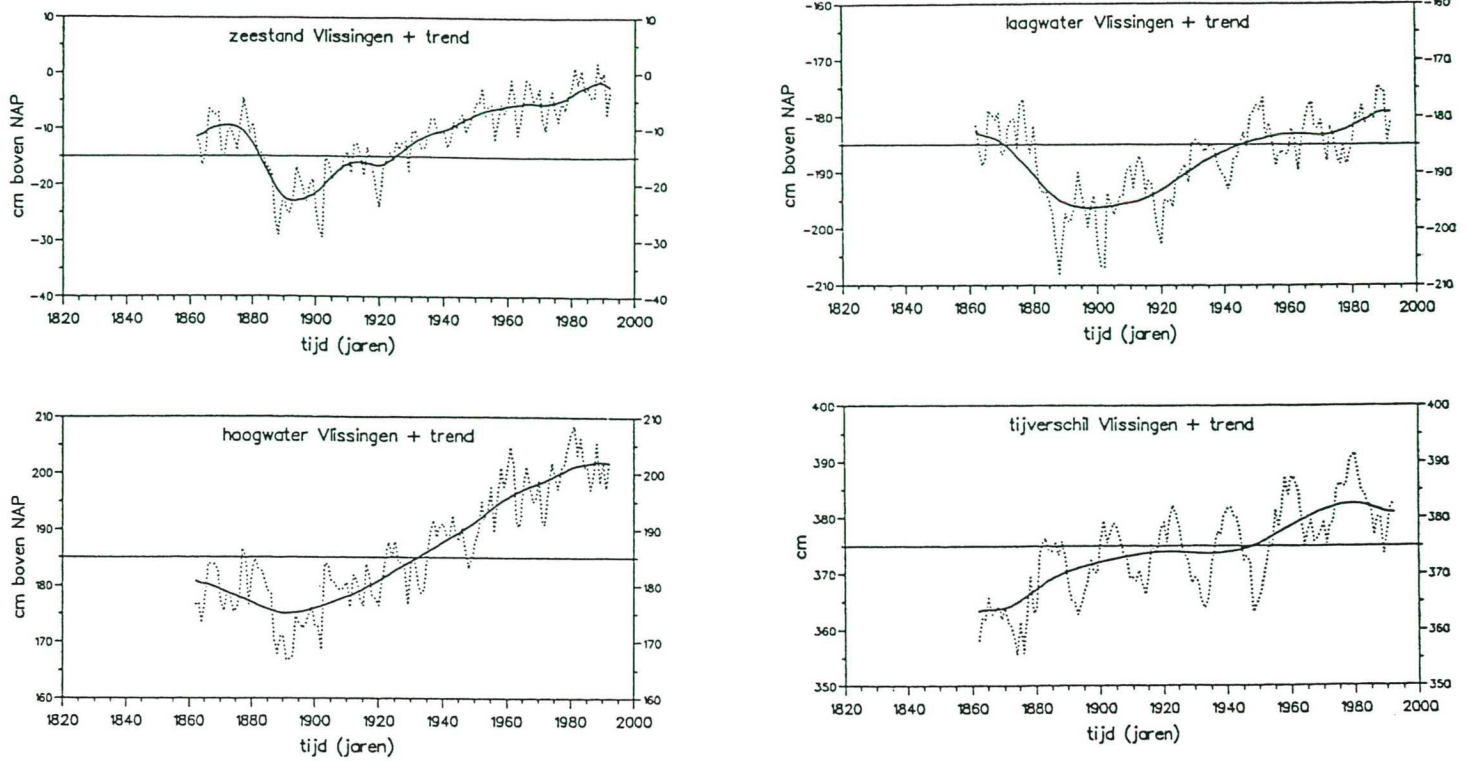
tabel 3 : fasering vervolgonderzoek naar de veiligheid tegen overstromen van de Westerschelde



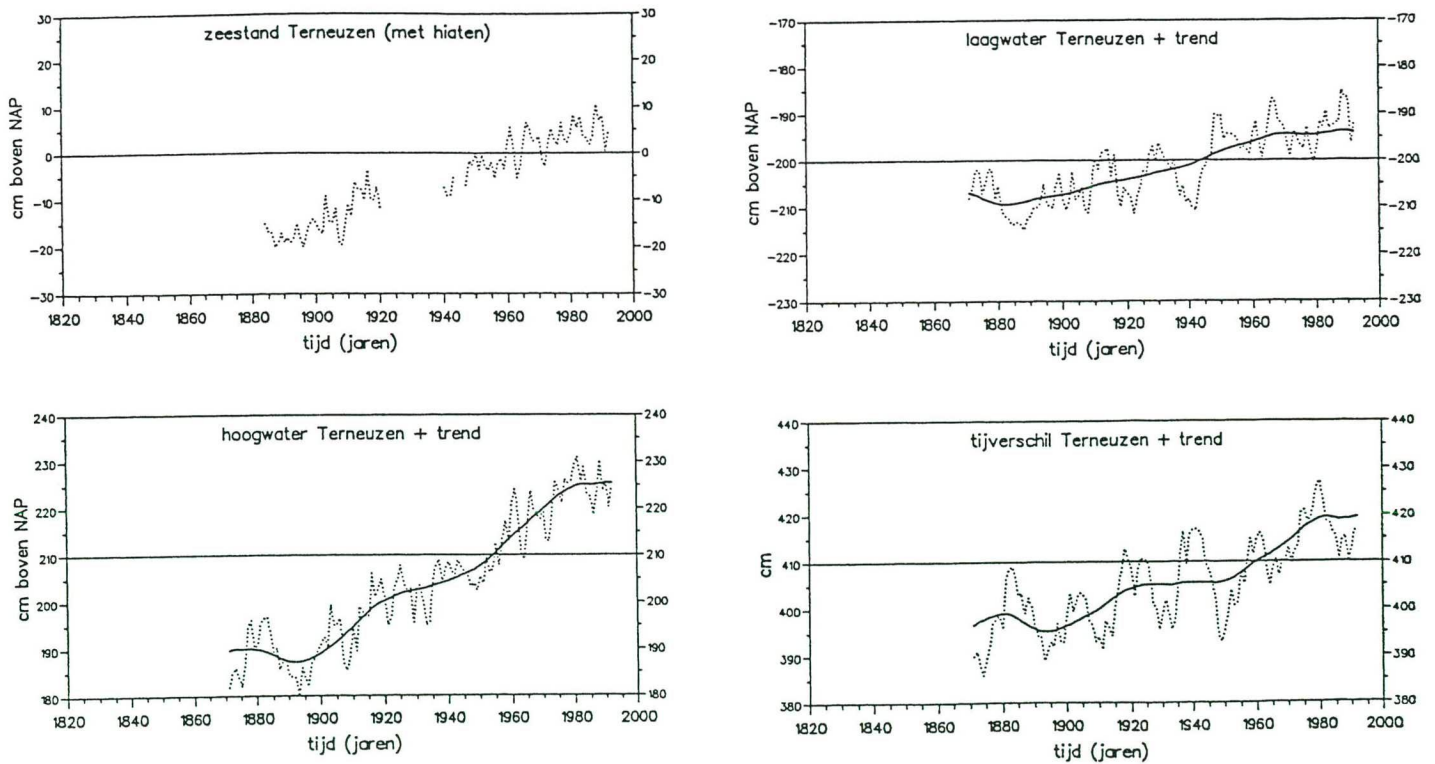
figuur 1 : basispeilen in de Westerschelde (Philippart e.a., 1995)



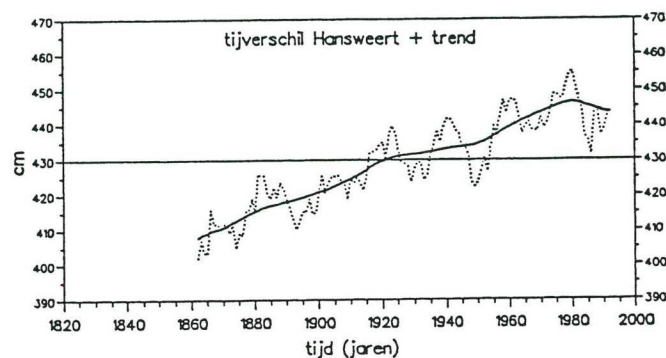
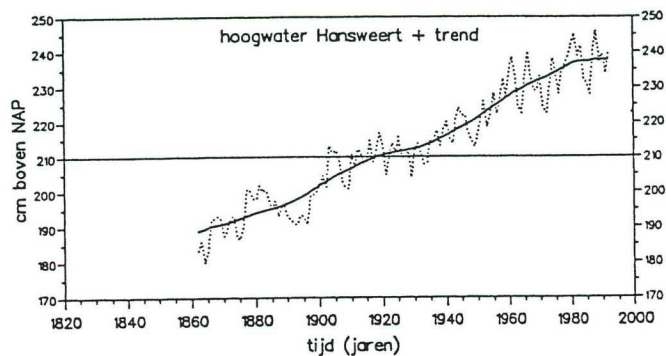
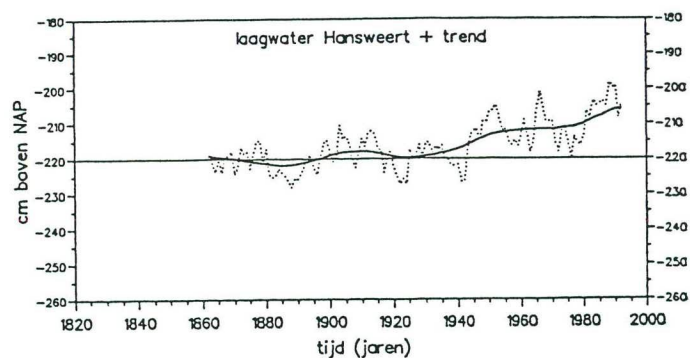
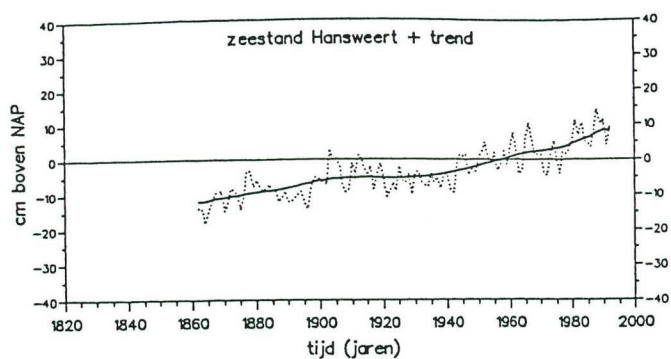
figuur 2 : ontwerppeilen in de Westerschelde (Philippart e.a., 1995)



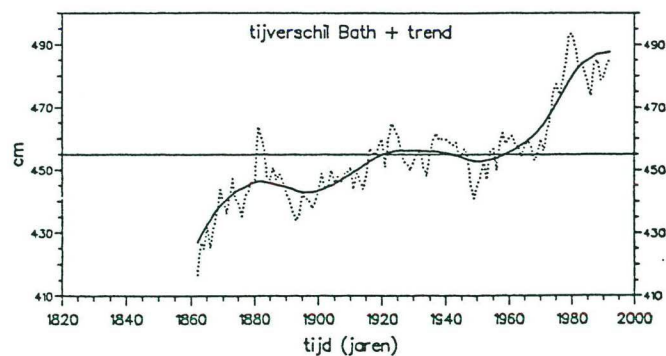
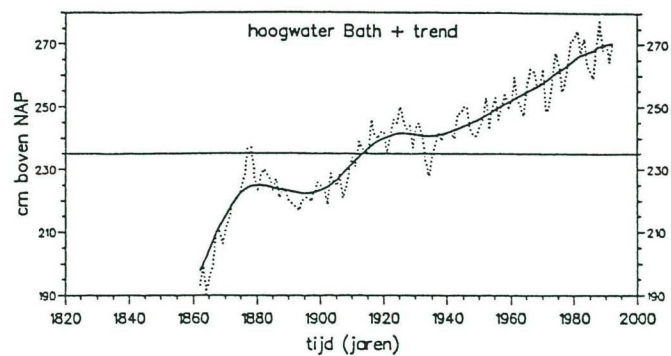
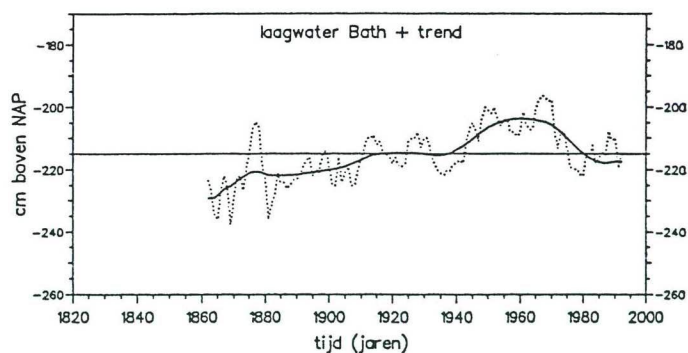
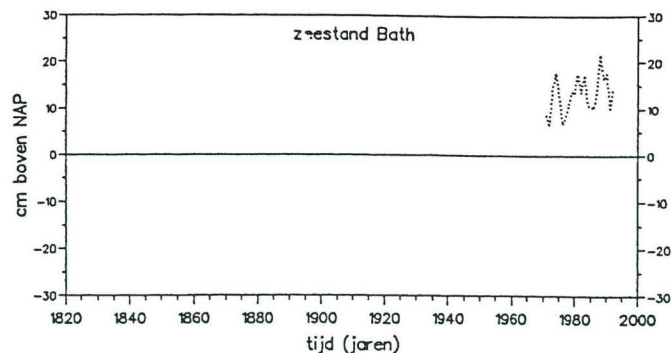
figuur 3 : verloop gemiddelde zeeniveaus in Vlissingen (Dillingh en Heinen, 1994)



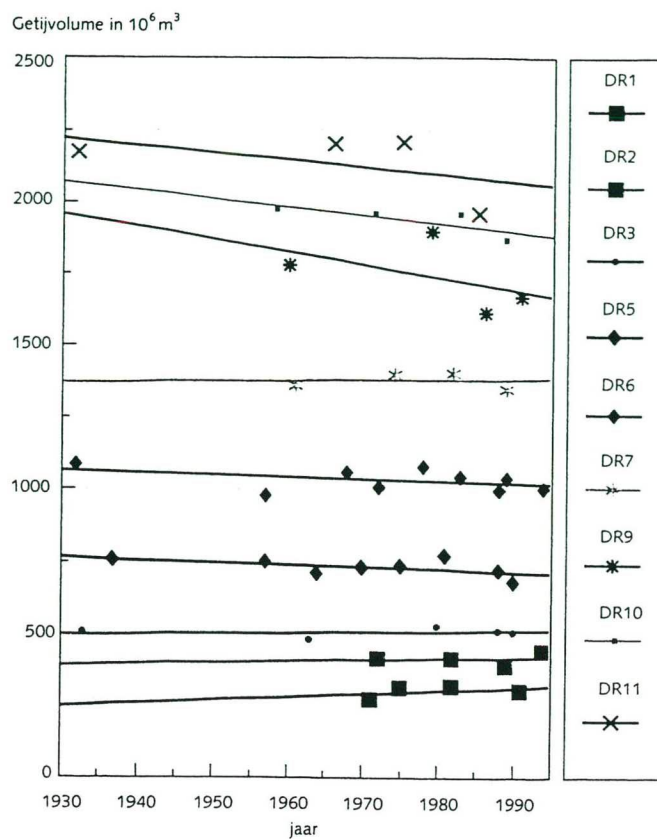
figuur 4 : verloop gemiddelde zeeniveaus in Terneuzen (Dillingh en Heinen, 1994)



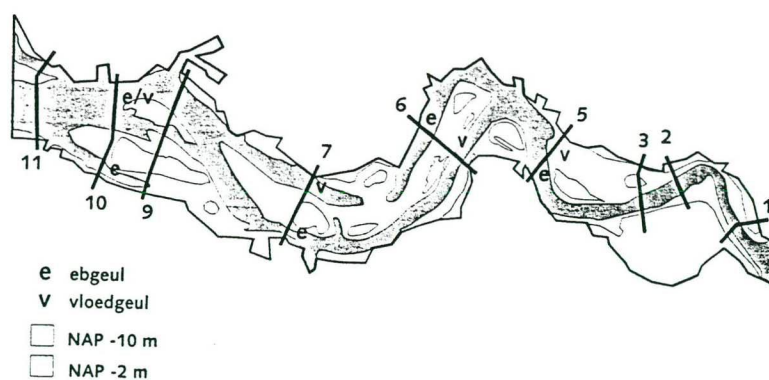
figuur 5 : verloop gemiddelde zeenniveaus in Hansweert (Dillingh en Heinen, 1994)



figuur 6 : verloop gemiddelde zeenniveaus in Bath (Dillingh en Heinen, 1994)



figuur 9 : verandering van het getijvolume in de Westerschelde (Vroon e.a., 1997)



6. Literatuurlijst

Advies commissie Westerschelde, 1997

Over natuurcompensatie maatregelen in het kader van de veruiming van de vaarweg Westerschelde. Uitgebracht aan de minister van Verkeer en Waterstaat.

Arends, A.A., 1997

Statistische analyse van opgetreden stormvloedstanden in Bath. Concept. Werkdocument RIKZ/AB-97.859x. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rijkswaterstaat.

Bollebakker, P., H. de Jong, S.J. v.d. Kramer, 1987.

Een analyse van de stormvloedstanden bij Antwerpen (Prosperpolder), opgetreden in de periode 1971-1986. Nota GWW-87.407. Dienst Getijdewateren. Rijkswaterstaat.

Bollebakker, P., T. Pieters, J. Vroon, 1996.

Bundeling getijberekeningen met DufLOW. Werkdocument RIKZ/AB-96.803x. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rijkswaterstaat.

Bollebakker, P., 1996.

DUFLOW modellen van de Westerschelde voor 1960 en 1992. Werkdocument RIKZ/AB-96.846x. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rijkswaterstaat.

Dekker, L., 1994

Verdieping Westerschelde : getijberekeningen Scaldis100. Rapport AX 94.042. Directie Zeeland. Rijkswaterstaat.

Dekker, L., 1996.

Presentatie getijberekeningen Scaldis100 m.b.t. ontpoldering Westerschelde/Schelde. Memo. Directie Zeeland. Rijkswaterstaat.

Deltacommissie, 1960.

Rapport Deltacommissie, Deel 1, Eindverslagen Interimadviezen.

Dienst Weg en Waterbouw, 1996.

Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen. ISBN-90-3693-718-3. Dienst Weg en Waterbouwkunde. Rijkswaterstaat.

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

Zeespiegelstijging, getijverandering en deltaveiligheid. Rapport RIKZ-94.026. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rijkswaterstaat.

Heinen, P.F., M.J.J. Hoogkamer, 1993.

Trends en meteorologische invloeden in gemiddelde zeeniveaus. Rapport DGW-93.017. Dienst Getijdewateren. Rijkswaterstaat.

Kleef, A.W. van, 1994.

Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans in het gebied rond het Middelgat, Westerschelde. Nota NWL 95.02A. Directie Zeeland. Rijkswaterstaat.

- Kornman, B., 1997
Morfologische dynamiek. Werkdocument RIKZ/OS-97.867x \
- Laet, P., 1993
Wiskundig model van de Schelde. Project Oostwest. MOD.440 Rapport 4.
Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout.
- Langendoen, 1987.
Onderzoek naar de vergroting van het getijverschil te Vlissingen. Rapport nr. 5-87.
TUDelft.
- Langerak, A., 1997
Brondocument zeespiegelstijging.
- Lupgens, G.A., 1978.
Eén-dimensionale getijberekeningen betreffende het Schelde-bekken in verband met de stormvloedkering te Oosterweel. Nota WWKZ-78.V006. Studiedienst Vlissingen.
Directie Waterhuishouding en Waterbeweging. Rijkswaterstaat.
- Male, K. van der, J. Vroon, 1996.
Stormvloedkering Antwerpen. Memo 4 december 1996. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
Rijkswaterstaat.
- Ministerie van de Vlaamse gemeenschap.
Sigmanplan : voor de beveiliging van het zeescheldebekken tegen stormvloed op de noordzee. Ministerie van de Vlaamse gemeenschap, departement leefmilieu en infrastructuur, administratie waterwegen en zeewezen, afdeling Zeeschelde.
- Mol, G.J., 1997
TO-Fysica. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rijkswaterstaat.
- Pethick, J.S., 1994.
Humber Estuary & coast : Management Issues.
- Philippart, M.E., D. Dillingh en S.T. Pwa, 1995.
De basispeilen langs de Nederlandse kust : de ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen. Rapport RIKZ-95.008. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
Rijkswaterstaat.
- Pieters, T., 1991.
Het Schelde-estuarium, meer dan een vaarweg. Nota GWWS-91.081. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rijkswaterstaat.
- Pieters, T., P. Bollebakker en J. Vroon, 1993
Berekeningen invloed geulverdieping en kombergingsvergroting op getij Schelde estuarium. Werkdocument GWWS-93.862x. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
Rijkswaterstaat.
- Pieters, T., 1997
De invloed van bergingsveranderingen op de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium : analyse met trecos-westerschelde 1996-1997. Concept.

Ronde, J.G., D. Dillingh, W. Groenewoud, 1993
Past and future sea level rise in the Netherlands and its impacts. Rapport DGW-93.027 / MD-TNO-R-93.21. Dienst Getijdewateren. Rijkswaterstaat.

Smith, H. en J.S. Petthick, 1996.
Wetland restoration in southern north sea coastal areas : the experience op Britain and the Netherlands. Reprinted from the North American water and environment congress. American society of civil engineers.

Technische Scheldec commissie, 1984
Nota verdieping Westerschelde programma 48'/43'.

Vroon, J., C. Storm, J. Coosen, 1997.
Westerschelde, stram of struis? : Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium.
Rapport RIKZ-97.023. ISBN 90-369-3441-9. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
Rijkswaterstaat.



