



WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM

FLANDERS HYDRAULICS

EFFECTEN VAN EEN MOGELIJKE KLIMAAT- VERANDERING OP HET ZEESPIEGELNIVEAU, DE RIVIERAFVOER EN DE FREQUENTIE VAN HOOGWATERS EN STORMEN

LITERATUURSTUDIE

Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
Departement Leefmilieu en Infrastructuur
Administratie Waterwegen en Zeewezen



2000 - 2

Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
Departement Leefmilieu en Infrastructuur
Administratie Waterwegen en Zeewezen

Model 592

EFFECTEN VAN EEN MOGELIJKE KLIMAAT- VERANDERING OP HET ZEESPIEGELNIVEAU, DE RIVIERAFVOER EN DE FREQUENTIE VAN HOOGWATERS EN STORMEN

LITERATUURSTUDIE

VLIZ (vzw)
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE
FLANDERS MARINE INSTITUTE
Oostende - Belgium

APRIL 2000

INHOUDSOPGAVE

| | |
|--|-----|
| INHOUDSOPGAVE | i |
| LIJST VAN DE TABELLEN | iii |
| LIJST VAN DE FIGUREN..... | iv |
| LIJST VAN DE AFKORTINGEN..... | v |
| 0 INLEIDING..... | 1 |
| 1 KLIMAATVERANDERING: DEFINITIES EN SITUERING..... | 2 |
| 1.1 Inleiding | 2 |
| 1.2 Definitie klimaat | 2 |
| 1.3 Recente klimaatverandering | 3 |
| 1.4 Onderzoek naar klimaatwijzigingen | 6 |
| 1.4.1 Klimaatmodellen | 6 |
| 1.4.2 Hoe worden klimaatmodellen gebruikt?..... | 7 |
| 1.4.3 Onzekerheden verbonden aan de klimaatmodellen | 7 |
| 1.4.4 Nut van klimaatmodellen | 8 |
| 1.5 Voorspelde klimaatverandering op wereldniveau..... | 9 |
| 1.6 Voorspelde klimaatverandering op regionaal niveau..... | 9 |
| 2 EFFECTEN AAN DE KUST | 11 |
| 2.1 Inleiding | 11 |
| 2.2 Omschrijving van de Belgische kust | 11 |
| 2.3 Historische waarnemingen en huidige situatie | 12 |
| 2.3.1 Niveau van de zeespiegel | 12 |
| 2.3.2 Extreme waterstanden en stormklimaat..... | 13 |
| 2.3.3 Huidige kustverdediging | 15 |
| 2.3.4 Versteiling van de vooroever..... | 16 |
| 2.3.5 Waarnemingen in Nederland | 17 |
| 2.4 Wat met de toekomst? | 18 |
| 2.4.1 Huidige voorspellingen | 19 |
| 2.4.2 Gevolgen in verband met het zeeniveau | 19 |
| 2.4.3 Het extreme windklimaat | 21 |
| 2.5 Conclusies | 21 |
| 3 EFFECTEN OP RIVIEREN..... | 23 |
| 3.1 Inleiding | 23 |
| 3.2 Historische waarnemingen en huidige toestand..... | 23 |
| 3.2.1 Schelde: Zoetwaterafvoer | 23 |
| 3.2.2 Bovenschelde | 24 |
| 3.2.3 Schelde: Getijdenbeweging..... | 25 |
| 3.2.4 Maasbekken | 28 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3 | Toekomst..... | 29 |
| 3.3.1 | Bovenschelde | 29 |
| 3.3.2 | Zeeschelde - Westerschelde..... | 29 |
| 3.3.3 | Maasbekken | 31 |
| 3.3.4 | Deelstroombekken..... | 32 |
| 3.4 | Simulaties bovendebieten Scheldebekken..... | 35 |
| 3.5 | Conclusies | 37 |
| 4 | ALGEMENE CONCLUSIES..... | 39 |

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

BIJLAGE A

LIJST VAN DE TABELLEN

| | |
|---|-----|
| Tabel 1 : Ontwerpwaarden van de extreme HW's voor een aantal terugkeerperiodes - situatie Oostende..... | T 1 |
| Tabel 2 : Overzicht van alle gekende stormvloedten aan de Belgische kust sinds 1925 | T 1 |
| Tabel 3 : Overzicht van de belangrijkste niveau's in verband met de kustverdediging... | T 2 |
| Tabel 4 : Scheldebekken - Meetposten op de inlandse grenzen van het getijgebied | T 2 |
| Tabel 5 : Overzicht van de 10-jaarlijkse gemiddelde waarden voor hoog- en laagwater ter hoogte van Antwerpen (tijpost Loodsgebouw) gedurende 100 jaar..... | T 3 |
| Tabel 6 : Belangrijkste trends voor HW, LW en TA op de Zeeschelde in de laatste 100 jaar | T 3 |
| Tabel 7 : Overzicht aantal stormtijden opgemeten te Antwerpen gedurende de laatste 100 jaar | T 3 |
| Tabel 8 : Beknopte omschrijving van de deelstroombekkens (bron: Gellens en Roulin, 1996)..... | T 4 |
| Tabel 9 : Opsplitsing van het totale bovendebiet van de Schelde | T 5 |
| Tabel 10 : Simulatie bovendebieten Schelde - berekende verhanglijnen bij verschillende debieten | T 6 |

LIJST VAN DE FIGUREN

- Figuur 1 Vergelijking stormtijden Oostende (1925-1993) met geldende alarmpeilen aan Belgische kust
- Figuur 2 Overzicht jaargemiddelde afvoer van de Schelde te Schelle (1949-1998)
- Figuur 3 Schelde te Antwerpen: langdurige tijevoluitie - jaargemiddelde hoogwater
- Figuur 4 Schelde te Antwerpen: langdurige tijevoluitie - jaargemiddelde laagwater
- Figuur 5 Schelde te Antwerpen: langdurige tijevoluitie - jaargemiddelde tijamplitude
- Figuur 6 Evolutie gemiddelde vloednelheid langs de Schelde
- Figuur 7 Evolutie gemiddelde ebsnelheid langs de Schelde
- Figuur 8 Evolutie maximale vloednelheid langs de Schelde
- Figuur 9 Evolutie maximale ebsnelheid langs de Schelde
- Figuur 10 Overzicht samengestelde componenten van een stormtij
- Figuur 11 Overzicht van extreme afvoerwaarden op de Maas 1914-1995
- Figuur 12 Overzicht van de bestudeerde deelbekkens
- Figuur 13 Drietrapsgetij als afwaartse randvoorwaarde
- Figuur 14 Overschrijdingslijn van de hoogwaterstanden te Antwerpen (1970 - 1990)
- Figuur 15 Verhanglijnen langs de Schelde bij 1-jaarlijks debiet
- Figuur 16 Verhanglijnen langs de Schelde bij 20-jaarlijks debiet
- Figuur 17 Verhanglijnen langs de Schelde bij 50-jaarlijks debiet
- Figuur 18 Verhanglijnen langs de Schelde bij 100-jaarlijks debiet

LIJST VAN DE AFKORTINGEN

| | |
|-------|---|
| AGCM | Atmosfeer General Circulation Model |
| AOGCM | Gekoppeld Atmosfeer-Oceaan GCM |
| AWZ | Administratie Waterwegen en Zeewezen |
| DDC | Data Distribution Centre (verbonden aan het IPCC) |
| GCM | General Circulation Model |
| GHW | Gemiddeld HW |
| GLW | Gemiddeld LW |
| GTA | Gemiddeld TA |
| HW | Hoogwater |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IRMB | Integrated Runoff Model - Bultot |
| LW | Laagwater |
| MSL | Gemiddeld zeeniveau (mean sea level) |
| NW4 | 4 ^{de} Nota Waterhuishouding (Nederland) |
| OGCM | Oceaan General Circulation Model |
| RIKZ | Rijksinstituut voor Kust en Zee (Nederland) |
| SAW | Stroomafwaarts |
| SOW | Stroomopwaarts |
| TA | Tijamplitude |
| TAW | Tweede algemene waterpassing |
| WMO | Wereld Meteorologische Organisatie |

0 INLEIDING

Sinds een aantal jaren is 'het broeikaseffect' een veel besproken onderwerp. Dit broeikaseffect, of beter het *toenemend* broeikaseffect, zou een klimaatverandering kunnen veroorzaken, die wat gevolgen kan hebben voor het leven op aarde.

In dit rapport werd getracht om een beknopt literatuuroverzicht te geven van de effecten die een eventuele klimaatverandering kan hebben op het niveau van de zeespiegel, de rivierafvoer en de frequenties van hoogwaterstanden en stormen. De analyse van de effecten wordt beperkt tot Vlaanderen.

Vooreerst wordt kort de problematiek van klimaatverandering geschetst (hoofdstuk 1). Daarbij wordt zijdelings ook verwezen naar controverses die bestaan in de discussies. Er wordt ook aangegeven welke voorspellingen er worden gedaan voor de toekomst.

Hoofdstuk 2 behandelt mogelijke effecten van klimaatverandering aan de kust. Eerst wordt een overzicht gegeven van de huidige situatie en de waargenomen trends, zowel aan de belgische kust als in de omliggende gebieden. Daarna wordt ingegaan op de bestaande voorspellingen en de gevolgen ervan voor de zeespiegel en het windklimaat.

Vervolgens wordt het effect van een klimaatverandering op de rivierafvoer besproken (hoofdstuk 3). Ook de mogelijke gevolgen voor de Zeeschelde en de Westerschelde als tijgebonden rivieren worden behandeld.

Tot slot worden in hoofdstuk 4 een aantal algemene conclusies op een rij gezet.

1 KLIMAATVERANDERING: DEFINITIES EN SITUERING

1.1 Inleiding

Het eerste hoofdstuk van dit rapport bespreekt de definitie van een klimaat (1.2) en geeft een beknopt overzicht van de huidige kennis over klimaatverandering (1.3). Paragraaf 1.4. geeft meer achtergrond bij het onderzoek naar klimaatverandering door middel van klimaatmodellen. Tot slot worden nog de voorspelde klimaatveranderingen gegeven op mondiale (1.5) en regionale (1.6) schaal.

1.2 Definitie klimaat

Het klimaat wordt doorgaans omschreven als het "gemiddelde weer". De omschrijving is geldig voor een bepaalde streek (vb. West-Europa) en voor een bepaalde periode. Door de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) wordt een klimaat per definitie bepaald op basis van een periode van dertig jaar. Berger [1992] stelt dat een klimaat gekarakteriseerd wordt door de statistische verdeling van een aantal meteorologische situaties die zich voordoen in de loop van jaren en eeuwen. Een klimaat omvat dus niet alleen de gemiddelde omstandigheden, maar ook de extremen én de variabiliteit. In bredere zin is het de beschrijving van de toestand van een klimaatsysteem [Houghton *et al.*, 1997].

Een klimaatsysteem bevat volgende componenten [Berger, 1992]:

- (a) atmosfeer;
- (b) hydrosfeer (oceanen, meren, rivieren ...);
- (c) biosfeer (zowel terrestrische als mariene biosferen);
- (d) cryosfeer (zee-ijs, gletsjers en ijskappen);
- (e) lithosfeer.

Al deze componenten interageren met elkaar via een netwerk van energiestromen, nutriëntencycli (vb. C-cyclus, N-cyclus, ...), stromingen van water(damp) en (andere) broeikasgassen, waarvan CO₂, CH₄ en ozon de belangrijkste zijn [T.K., 1996b]. Al deze interacties worden gestuurd door de zon. Er wordt voortdurend gezocht naar een evenwicht tussen de inkomende zonnestraling en de gereflecteerde warmtestraling vanaf het aardoppervlak, met een dynamisch systeem als gevolg. Een stabiel evenwicht wordt nooit

bereikt, hoogstens een labiel evenwicht dat snel weer verstoord wordt [Van Dooren, 1996].

Het klimaatsysteem bepaalt het klimaat nu op volgende manieren:

- (a) de samenstelling van de atmosfeer regelt de stralingshuishouding (broeikaseffect) en de temperatuur aan het aardoppervlak;
- (b) wolken zorgen enerzijds voor isolatie van het aardoppervlak, anderzijds voor neerslag (waardoor de hydrologische cyclus draaiende gehouden wordt);
- (c) door de ongelijke verdeling van straling over het aardoppervlak (ten gevolge van wolken, weerkaatsing door ijs en sneeuwoppervlakken, reflectie door de atmosfeer, verschil in energieadsorbtie tussen land en water, ...) ontstaan er in atmosfeer en oceanen stromingen om de ontstane temperatuursverschillen op te heffen.

Naast de hogeromschreven 'lange termijn' factoren wordt een klimaat ook nog beïnvloed/verstoord door onvoorziene gebeurtenissen. Stofwolken ten gevolge van van een vulkaanuitbarsting, zoals bij de Pinatubo-vulkaan op de Filippijnen in 1991, kunnen lokaal de instraling van zonlicht verminderen, waardoor een kouder gebied kan ontstaan, waardoor een verandering optreedt in energiestromen (oceanen, atmosfeer), waardoor ... Geregeld treden verwachte of onverwachte wijzigingen op in het patroon van oceaanstromingen (vb. El Niño), waardoor er een klimaatswijziging kan optreden in bepaalde streken. Samengevat kan gezegd worden dat het klimaat continu en op verschillende manieren verandert, ofwel volgens een bepaalde trend(breuk), waarbij een verandering optreedt van 'de gemiddelde toestand', ofwel als een oscillatie rond de gemiddelde toestand. Deze oscillaties kunnen op verschillende tijdschalen optreden [Berger, 1992]. Dit alles zorgt onder andere voor een natuurlijke variatie in het broeikaseffect op aarde, met als gevolg bijvoorbeeld de afwisseling van (kleine) ijstijden en interglaciale periodes (met warmere temperaturen).

1.3 Recente klimaatverandering

Op basis van analyses van meteorologische en andere data, over grote gebieden en periodes van tientallen jaren, werden over de laatste 100 jaar (tot 1990) toch belangrijke systematische veranderingen vastgesteld [IPCC, 1995; GECR, 1996]:

- (a) de globale gemiddelde luchttemperatuur aan het aardoppervlak is sinds het einde van de 19^{de} eeuw toegenomen met 0,3 tot 0,6° C. Nieuwe analyses (sinds 1990) wijzigen deze temperatuursrange niet ¹. De laatste jaren behoren tot de warmste sinds 1860;

¹ Er bestaat echter discussie over de echtheid van de temperatuurstijgingen. Volgens sommige auteurs zouden deze waargenomen stijgingen ook het gevolg kunnen zijn van "urban effects" (invloed van steden) op de metingen. Hierbij wordt geadviseerd dat indien men uit de

- (b) boven het land zijn de nachttemperaturen meer toegenomen dan de dagtemperaturen;
- (c) er worden grote regionale verschillen vastgesteld;
- (d) globaal gezien is de zeespiegel gestegen met 10 tot 25 cm. Een groot deel van deze toename zou toegeschreven kunnen worden aan de toename van de temperatuur op wereldschaal²;
- (e) de temperatuurstijging zorgt voor een toename in het voorkomen van extreem warme dagen, en een afname in het aantal extreem koude dagen;
- (f) tot slot zal een temperatuurstijging ook zorgen voor een verandering in de aard van droogtes en overstromingen die zullen voorkomen.

De laatste jaren rijzen er vermoedens dat er ook een variabiliteit bestaat/op gang komt waarvan *menselijke activiteiten* aan de basis liggen. Deze vermoedens zijn gebaseerd op de vaststelling dat sinds de jaren '60 - '70 er een significante toename blijkt te zijn in de concentratie van CO₂ in de atmosfeer [T.K., 1996b]. Dit kan worden toegeschreven aan toenemend verbruik van fossiele brandstoffen en het op grote schaal afbranden van bossen. Industriële processen zorgen ook voor een toenemende concentratie van (zwaavelhoudende) aërosolen in de atmosfeer. Het effect hiervan is tweeledig: enerzijds reflecteren de aërosolen meer zonnestraling (koelend effect), anderzijds zorgen ze ook voor meer condensatiekernen in de lucht, met meer wolkvorming als gevolg (isolerend, verwarmend effect). Deze wijzigingen in de concentraties van broeikasgassen en aërosolen zorgen voor een toenemend broeikas effect van de atmosfeer: op sommige plaatsen wordt minder zonlicht direct gereflecteerd, en op andere plaatsen zorgt een betere isolatie in de atmosfeer dat de aarde minder afkoelt.

De hypothese "*klimaatverandering ten gevolge van menselijke activiteiten*" wordt echter niet door iedereen gevolgd. Recent Deens onderzoek [o.a. Friis-Christensen en Lassen, 1991; Svensmark, 1998] toont een correlatie tussen de hoeveelheid kosmische straling die onze atmosfeer binnendringt en de wolkbedekking in de atmosfeer. Daaruit concluderen de onderzoekers dat de lange termijn variaties in zonneactiviteit de variatie in de temperatuur op aarde verklaren (minder kosmische straling betekent minder bewolking

klimaatgegevens al deze urban effects zou kunnen wegfilteren, zou blijken dat de luchttemperatuur aan het aardoppervlak de laatste 100 jaar statistisch gezien niet significant gestegen is [o.a.: Wood, 1988, Karl *et al.*, 1989, Wijn-Nielsen, 1989; In: Shennan, 1992].

² Net zoals er discussie bestaat over het effectieve bestaan van een toename van het broeikas effect (zie voetnoot ¹) wordt het bestaan van een globale zeespiegelstijging ten gevolge van het toenemende broeikas effect door verschillende auteurs betwist. De tijgegevens zouden namelijk overheerst worden door lokale en regionale effecten, zowel van oceanische als geologische aard [Pirazolli, 1989 ; In Shennan, 1992].

en dus opwarming [Daems, 1999]). Hiermee willen ze aantonen dat het toenemende broeikas effect ten gevolge van wijzigende concentraties aan broeikasgassen niet veroorzaakt zou worden door menselijke activiteiten (een *hypothese* die tot nu toe als *vaststaand feit* werd aanvaard), maar daarentegen een gevolg zou zijn van de wisselende activiteit van de zon en dus een natuurlijke oorzaak zou hebben. Ook Böttcher [1996; In: T.K., 1996a] wijst op de rol die de zonnevlekkenactiviteit zou spelen in verband met de veranderingen van de gemiddelde temperaturen op aarde en de gemiddelde weersgesteldheid³. Kerr [1996] verwijst naar Amerikaans onderzoek (Scripps Institute of Oceanography, San Diego) waarin grote gelijkenis wordt opgemerkt tussen de fluctuaties in oceaantemperaturen en zonnestraling.

Los van deze zonnestraling-hypothese wijst Sneyers [1982] op het "fundamenteel instabiel karakter" van ons klimaat. Hij doet dit op basis van een vergelijking van de luchttemperaturen en neerslag voor verscheidene periodes te Ukkel. De vastgestelde veranderingen in trends en variabiliteit zijn ook terug te vinden in andere weerkundige grootheden. Sneyers [1982] concludeert dat het absurd zou zijn om, tijdens de zoektocht naar eventuele menselijke invloeden op het klimaat, uit het oog te verliezen dat het klimaat een natuurlijke versatiliteit bezit en dus voorbarige conclusies te trekken over de optredende klimaatverandering.

Als deze beweringen waar zijn, kan eventueel verondersteld worden dat de gebruikte klimaatmodellen in hun voorspellingen het toenemende broeikas effect sterk overschatten. Een gevolg van deze argumentatie zou zijn dat veel maatregelen om het stijgende broeikas effect tegen te gaan in feite ten onrechte zijn. Op deze discussie wordt in voorliggende literatuurstudie echter niet verder ingegaan.

Ondanks de hierboven weergegeven discussie over de uiteindelijke *oorzaken* van het toenemende broeikas effect, bestaat er over een aantal belangrijke *gevolgen* toch meer eensgezindheid. Jelgersma en Tooley [1992] geven als belangrijkste vaststaande gevolgen:

- (a) toename van de gemiddelde wereldtemperatuur (omdat meer langgolvlige aardstraling gevangen wordt in de atmosfeer)
- (b) stijging van de zeespiegel (door thermische expansie zeewater, afsmelten van gletsjers, zee-ijs en ijskappen)

³ Böttcher geeft ook kritiek op de werking van het IPCC. Volgens Böttcher vertrekt het IPCC van een basisveronderstelling over klimaatverandering, zonder rekening te houden met andere bestaande theorieën daarover. Hij verwijt het IPCC dat het uit de waaier aan theorieën een keuze gemaakt heeft die niet wetenschappelijk gefundeerd is, maar eerder politiek. Ook Daems [1999] wijst hierop. In 1990, bij het verschijnen van het eerste IPCC-rapport, werd de menselijke invloed op de versterking van het broeikas effect nog als louter hypothetisch gezien. Op de Rio-conferentie in 1992 echter werd deze hypothese *zonder meer* als een vaststaand feit geïnterpreteerd.

Er blijven ook nog een aantal belangrijke vragen onbeantwoord [Jelgersma en Tooley, 1992]:

- (a) hoeveel zal de temperatuursstijging bedragen bij een verdubbeling van de CO₂-concentratie? Aan welke snelheid zal de temperatuursstijging verlopen?
- (b) welke invloeden zijn te verwachten op oceaanstromingen? Hoe snel zullen de oceanen reageren?
- (c) aan welke snelheid zal het zeespiegelniveau veranderen?
- (d) ...

1.4 Onderzoek naar klimaatwijzigingen

1.4.1 Klimaatmodellen

Houghton *et al.* [1997] geeft een overzicht van de verschillende modellen die voor klimaatonderzoek gebruikt worden. Volgende soorten modellen zijn te onderscheiden:

- (a) 1D-modellen voor atmosfeer of oceanen worden o.a. gebruikt voor berekening van straling/convectie in de atmosfeer, voor het bepalen van de bufferende werking van oceanen op veranderingen in de temperatuur van het aardoppervlak, bepalen van energiebalansen in functie van de breedteligging, ...;
- (b) 2D-modellen (bvb. breedteligging in functie van hoogte, lengteligging in functie van hoogte) laten toe om het horizontale energietransport beter te berekenen;
- (c) 3D-modellen (GCM's) kunnen op hun beurt onderverdeeld worden volgens het klimaatcompartiment dat omschreven wordt:
 - atmosfeermodellen (AGCM): berekenen de circulaties in de atmosfeer, waarbij rekening wordt gehouden met o.a. waterdamp, bewolking, zonne-energie, energieuitwisseling met de oceaan (sterk vereenvoudigd);
 - oceaanmodellen (OGCM): houden vooral rekening met het enorme energietransport ten gevolge van oceaanstromingen. Deze processen spelen zich af op een kleinere schaal dan de atmosfeerprocessen, waardoor voor OGCM's fijnere grids en krachtiger computers nodig zijn;
Dergelijke modellen worden gekenmerkt door horizontale roosterafstanden van 2 tot 4°, en 10 tot 20 lagen in de verticale richting. Telkens zijn ook randvoorwaarden nodig (oppervlaktetemperatuur van de oceanen voor AGCM's, temperatuur landoppervlak, fluxen van zoetwater en warmte voor OGCM's).
 - gekoppelde modellen (AOGCM): eind jaren '60 werd voor de eerste keer zo'n model gebruikt, waarbij een atmosferisch model (9 verschillende lagen) en een oceaanmodel (5 verschillende lagen) gebruikt werden om berekening te maken van atmosferi-

sche variabelen (voor een rooster van 500 x 500 km): het GFDL-model (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). Dit model werd gebruikt als basis voor latere AOGCM's [Massel, 1999].

De 3D-modellen worden dus gebruikt voor schattingen van klimaatvariabelen voor een (redelijk grof) netwerk van punten op de aarde.

1.4.2 Hoe worden klimaatmodellen gebruikt?

Als input voor de klimaatmodellen worden klimaatscenario's gebruikt, de zogenaamde emissiescenario's. Door het DDC van IPCC werden reeds een aantal emissiescenario's ter beschikking gesteld. In een bepaald emissiescenario wordt voor een periode van bijvoorbeeld 100 jaar de evolutie omschreven van de emissie van broeikasgassen en aërosolen. De te verwachten emissies worden bepaald door demografische, economische, politieke en technologische evoluties in de wereld. Op basis van deze "te verwachten" emissies berekenen klimaatmodellen dan het te verwachten klimaat [IPCC-DDC, 1999]. De scenario's moeten beschouwd worden als mogelijke toekomstige ontwikkelingen, niet als gewenste ontwikkeling. IPCC-DDC [1999] waarschuwt ook tegen het ten onrechte naar voor schuiven van een scenario, door bepaalde belangengroepen, als zijnde 'het meest realistische scenario voor de toekomst'. Het is namelijk niet mogelijk om op een objectieve manier de probabiliteit van een bepaald scenario te bepalen, omdat de scenario's gebaseerd zijn op veronderstellingen. Het kan enkel de bedoeling zijn om een waai-er aan mogelijke toekomstbeelden te leveren ⁴.

1.4.3 Onzekerheden verbonden aan de klimaatmodellen

Het gebruik van klimaatmodellen laat toe om een aantal voorspellingen te doen over het toekomstig klimaat, maar houdt tevens ook een aantal beperkingen in wat betreft de zekerheid van de voorspellingen. De onzekerheden in de resultaten van klimaatmodellen kunnen opgedeeld worden in twee factoren:

(a) onzekerheden intrinsiek aan wiskundige modellering:

- om de wiskundige formules (differentiaalvergelijkingen), die de relaties beschrijven tussen de verschillende klimaatfactoren, via computerberekening te kunnen oplossen, is een discretisatie van de formules noodzakelijk. Hierbij moeten keuzes gemaakt worden in verband met te gebruiken roosterdichtheid en tijdstap. Deze vereenvoudigingen zijn noodzakelijk om te besparen in rekentijd en rekencapaciteit van de computers;

⁴ In het Supplementary Report to the IPCC Assessment worden 6 alternatieve scenario's gepubliceerd, IS92a tot f.

Meer info op URL http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/emissions/is92.html. Voor de opmaak van het Third Assessment Report (IPCC, in voorbereiding) werd een Special Report on Emissions Scenarios gepubliceerd, waarin een nieuwe set van 4 'families' van scenario's wordt voorgesteld.

Meer info op URL: http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/emissions/SRES98.html.

- door onvolledige kennis van bepaalde fysische relaties is het mogelijk dat er in het klimaatmodel vergelijkingen ontbreken, waardoor het klimaatmodel de werkelijkheid niet volledig kan nabootsen;
- bepaalde processen die gebeuren op een kleinere schaal dan omschreven door de roosterdichtheid moeten toch gesimuleerd worden in het klimaatmodel. Dit moet dan gebeuren door middel van parametrisatie [Houghton *et al.*, 1997];
- 'slechte gegevens' (die bvb. de uitgangssituatie niet correct genoeg weergeven) worden door het klimaatmodel niet als dusdanig herkend. De output zal dus navenant zijn. Hier speelt dus het G.I.G.O.-principe: 'garbage in, garbage out';

(b) onzekerheden intrinsiek aan het klimaat [T.K., 1996a; Williams, 1999]:

- bepaalde terugkoppelingen in het klimaatsysteem zijn moeilijk te modelleren, bvb. de inwerking van de wolken op het klimaat, de effecten van aërosolen op de wolkvorming⁵;
- wat is de te verwachten evolutie van de concentratie aërosolen? blijft ze toenemen?
- hoe zal het broeikas effect in de toekomst evolueren?

De klimaatgebonden onzekerheden kunnen opgevangen worden door het doorrekenen van verschillende scenario's. Dit levert dan een range van voorspellingswaarden, die gelden voor grote gebieden (mondiale schaal) en over een grofmazig netwerk. De onzekerheden over de voorspellingen worden nog groter wanneer men overgaat van globale klimaatmodellen naar modellen op regionale schaal. Op deze schaal is er namelijk meer natuurlijke variatie in de klimaatfactoren, omdat er veel meer kleinschalige processen meespelen [Schoeters en Vanhaecke, 1999]. Ook het rooster moet veel gedetailleerder uitgewerkt worden. Verschillende regionale modellen die met elkaar vergeleken worden, laten wel vanalles zien, maar zijn onderling niet consistent. Daarom zeggen regionale modellen eigenlijk (nog?) niets [T.K., 1996a].

1.4.4 Nut van klimaatmodellen

De gegevens die een klimaatmodel levert, worden gebruikt om de effecten van een klimaatverandering te voorspellen. Daarom bestaan er zogenaamde *impactmodellen*. De onzekerheden die bestaan bij klimaatmodellen worden meegenomen in de impactmodellen. Toch kunnen deze laatste gebruikt worden om een beleid te ondersteunen. De waarde van de impactmodellen ligt niet zozeer in een kwantitatieve, cijfermatige voor-

⁵ In het *First Assessment Report* (FAR) van het IPCC [1990] werd in de gebruikte modellen het effect van aërosolen niet meegenomen. De voorspellingen in het *Second Assessment Report* (SAR) van het IPCC [1995] daarentegen zijn gebaseerd op berekeningen mét aërosolen. Dit leverde een reductie van de voorspelde temperatuurstijging in FAR met één derde! In 2001 wordt het *Third Assessment Report* verwacht ...

spelling van effecten. De resultaten dienen gebruikt te worden als een indicatie voor de meest waarschijnlijke effecten en voor de kwetsbaarheid van bepaalde gebieden [Schoeters en Vanhaecke, 1999].

1.5 Voorspelde klimaatverandering op wereldniveau

Berger [1992] meldt dat bij een toename van de concentraties van de verschillende broeikasgassen aan het huidige tempo (= anno 1992) er tegen 2030 een broeikaseffect zal ontstaan dat gelijkwaardig is met een verdubbeling van de CO₂-concentratie in vergelijking met de pre-industriële concentraties. Klimaatmodellen berekenen dat met een dergelijke verdubbeling een temperatuurstoename van 1,5 tot 4,5 °C gepaard zal gaan. Alhoewel het nog niet mogelijk is om met deze klimaatmodellen ook regionale voorspellingen te doen, geven de modellen twee belangrijke tendensen aan:

- (a) de opwarming van de luchttemperatuur aan het aardoppervlak zal maximaal zijn op de hogere breedtegraden tijdens de winter;
- (b) de zomerdroogte zal frequenter voorkomen op de gematigde breedtegraden van het noordelijk halfrond.

Meer recent deed het IPCC voorspellingen op grond van een aantal scenario's (cfr. supra) waarin verondersteld wordt dat er géén aangepast beleid gevoerd wordt tijdens de behandelde periode. Het IPCC voorspelt voor de komende eeuw een stijging van de wereldgemiddelde temperatuur van 1 tot 3,5° C (gemiddeld 2° C) tegen het jaar 2100. Deze stijging is relatief ten opzichte van de toestand in 1990. Voor het jaar 2050 zal de temperatuur met 0,5 tot 1,5° C gestegen zijn ten opzichte van 1990. Deze temperatuurstijgingen zullen zich vooral voordoen op het noordelijk halfrond, en zullen naar verwachting voornamelijk tijdens de winter en 's nachts tot uiting komen. Een gevolg hiervan is een afzwakking van de temperatuurcontrasten tussen dag en nacht, winter en zomer [IPCC, 1996; In: RLG, 1998; Watson *et al.*, 1997].

Voor de hogere breedtegraden wordt door de verschillende klimaatmodellen (op basis van de IPCC-scenario's) een verhoogde neerslag berekend tijdens de winter [IPCC, 1996; In: RLG, 1998].

1.6 Voorspelde klimaatverandering op regionaal niveau

Op basis van een literatuurstudie wordt door Schoeters en Vanhaecke [1999] een mogelijk scenario voor België vooropgesteld. Aangezien in ons land nog geen dergelijk scenario voorhanden is, werd door de auteurs een scenario samengesteld op basis van scenario's afkomstig van het IPCC [1995] en de UK Climate Change Impact Review Group [1996]. Ook hier geldt de veronderstelling dat er geen beleidsmaatregelen genomen worden om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Er wordt gekeken naar de situatie waarbij een verdubbeling van de CO₂-concentratie zal optreden (verwacht tegen 2100).

Op gebied van temperatuur wordt een toename van de gemiddelde luchttemperatuur verwacht van 2 - 2,5 °C. De minimale temperaturen zullen meer veranderen dan de maximale temperaturen, en de temperatuurstijging in de winter zal hoger zijn dan in de zomer.

De frequentie van stormen zou toenemen met 30 % tegen 2050 [UK Climate Change Impact Review Group, 1996].

Voor de neerslag wordt verwacht dat tijdens de zomer de neerslag iets zal verminderen (± 3 %) of stabiel blijven. Tijdens de winter zal de neerslag toenemen met ± 10 %. De voorspellingen voor de afvoer van rivieren lopen sterk uiteen, gaande van een afname van 5 % tot een toename van 12 %. Een toename van overstromingen kan verwacht worden bij toenemende neerslag in de periodes dat de bodems waterverzadigd zijn.

Voor België wordt tegen 2100 een zeespiegelstijging verwacht van 40 tot 70 cm [Schoeters en Vanhaecke, 1999].

2 EFFECTEN AAN DE KUST

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bespreekt de gevolgen van een eventuele klimaatverandering voor de kust en de aangrenzende gebieden. Paragraaf 2.2 situeert kort de Belgische kust. De volgende paragraaf (2.3) bespreekt historische waarnemingen en de huidige situatie van het niveau van de zeespiegel (2.3.1), de extreme waterstanden en het stormklimaat (2.3.2), de kustverdediging (2.3.3) en de versteiling van de vooroever (2.3.4). Ook wordt aandacht besteed aan de Nederlandse situatie (2.3.5). Daarna wordt gekeken naar de toekomst (2.4): wat zijn de voorspellingen (2.4.1) en wat zijn de gevolgen voor het niveau van de zeespiegel (2.4.2) en het stormklimaat (2.4.3)? Tot slot worden een aantal conclusies getrokken (2.5).

2.2 Omschrijving van de Belgische kust

Door haar ligging in de zuidelijk punt van de Noordzee is de Belgische kust onderhevig aan een hoge fysische energie (ten gevolge van een gecombineerd effect van zeestromingen, getijden en wind). De kustlijn wordt door Baeteman *et al.* [1992] omschreven als een 'mesotidal', wind-gedomineerde clastische kustlijn met een TA dat varieert tussen 4 en 5 m. De golfactiviteiten worden aangedreven door overheersend westelijke winden, en de kustlijn is periodisch onderworpen aan vloedgolven uit het zuidwesten, het westen en het noordwesten. Deze laatste veroorzaken vaak extreem hoge getijden en hoog-energetische golven. De kustlijn heeft meestal een rechtlijnig verloop en de ondiepe 'off-shore' strook wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van talrijke geulen en zandbanken [Verwaest *et al.*, 1999].

Strand en duinenstrook vormen van nature een bescherming voor de achterliggende kustvlakte. De zeewering aan de Belgische kust bestaat uit drie morfologische eenheden: de vooroever, het strand en de duinengordel. Dit complex heeft een breedte van enkele honderden tot een paar kilometer en een hoogte van een tiental tot ruim 30 meter [MVG, 1993]. Daarnaast wordt de kustlijn op verscheidene plaatsen ook nog beschermd door een kunstmatig aangebrachte zeewering. Er bestaat een dynamisch evenwicht tussen de zee en de zeewering, waarbij de kustlijn aan veranderingen onderhevig is ten gevolge van fundamentele factoren als golfklimaat, windrichting, zeepeil en beschikbaarheid van zand [MVG, 1993].

De kustvlakte is op heden van groot belang voor het toerisme, bewoning en landbouw. Omwille van economische en ecologische redenen is de instandhouding en verbetering van de zeewering van groot belang [Schoeters en Vanhaecke, 1999]. Op verschillende plaatsen langs de kust wordt erosie vastgesteld van het strand en de duinvoet, ondanks

de aanwezigheid van verdedigingsstructuren of het toepassen van strandsuppleties [de Moor, 1979].

2.3 Historische waarnemingen en huidige situatie

2.3.1 Niveau van de zeespiegel

Het verloop van het getij en de zeespiegel op de Noordzee is door verscheidene auteurs onderzocht. Dergelijk onderzoek gebeurt op basis van een grondige analyse van de historische tijwaarnemingen en kan informatie opleveren over eventuele trends op korte of lange termijn. Voor de Belgische kust zijn er historische tijwaarnemingen beschikbaar voor Oostende (1835-1853; 1927-1998), Nieuwpoort (1932-1998) en Zeebrugge (1932-1998). Tussen haakjes is telkens de periode vermeld waarvoor *bruikbare* data beschikbaar zijn. De Belgische waarnemingen kunnen vergeleken worden met de tijwaarnemingen uit Vlissingen (1890-1998). Er zijn een vijftal factoren te onderscheiden die tijwaarnemingen kunnen beïnvloeden [Van Cauwenberghe, 1999]:

1. periodische factor: tijbewegingen, veroorzaakt door zon- en maancyclus;
2. random factoren (hydrologische en meteorologische invloeden);
3. isostatische factoren (herverdeling van de aardmassa, ten gevolge van geologische processen; vb.: het afsmelten van de Scandinavische en Schotse ijskap veroorzaakt een bodemstijging in die streken, wegens minder gewicht op de aardkorst; daardoor ontstaat er op andere plaatsen een bodemdaling);
4. tectonische factoren (beweging aardplaten);
5. eustatische factoren (wisselwerking tussen hoeveelheid water in oceanen en ijskappen).

Baeteman *et al.* [1992], die zich baseerde op gegevens van Van Cauwenberghe [1977, 1985], besluit dat er een lineaire toename waargenomen kan worden van 1 cm/10 jaar, voor zowel HW, LW als MSL. Daarbij wordt geen aanwijzingen gevonden voor een toename van de zeespiegelstijging.

Van Cauwenberghe [1999] analyseerde de tijwaarnemingen te Oostende (periodes 1835-1852 en 1927-1998) met behulp van verschillende methodes: lineaire en cyclische 'best-fit' en zwevende gemiddelden. Deze analyses werden voor een deel getoetst aan waarnemingen in Vlissingen (1890-1998). De belangrijkste conclusies zijn de volgende:

1. in de laatste 70 jaar is er een relatieve zeespiegelstijging waargenomen in Oostende. Voor HW: 2 mm/jaar, voor MSL: 1,5 mm/jaar en voor LW: 1 mm/jaar. Aangezien HW en LW verschillend toenemen, is er sprake van een toename in het TA (de toename

blijft echter wel *relatief*, aangezien over de stabiliteit van de Oostendse ondergrond geen 100% zekerheid bestaat)⁶

2. in Vlissingen is er minder stabiliteit dan in Oostende (bodemdaling werd vastgesteld), en dit vertaalt zich in grotere toenames van HW, MSL en LW dan in Oostende (voor de periode 1890-1998). Voor de periode 1927-1998 is de toename slechts groter voor HW. Voor LW en MSL zijn de waarden dan gelijkaardig aan die in Oostende;
3. de methode van de zwevende gemiddelden toont *geen versnelling* aan in de stijging van de zeespiegel in Oostende en Vlissingen;
4. gelijkaardige waarden voor relatieve zeespiegelstijging zijn teruggevonden voor Nederland en het Verenigd Koninkrijk [o.a. Woodworth *et al.*, 1991; Shennan en Woodworth, 1992; Woodworth *et al.*, 1999];
5. de auteur stelt zich vragen bij het feit of er, vanaf een bepaald ogenblik, daadwerkelijk een versnelde zeespiegelstijging zal optreden. Dergelijke voorspellingen zijn tot nu toe altijd gebaseerd op klimaatmodellen met veel onzekerheden.

2.3.2 Extreme waterstanden en stormklimaat

Probabilitas n.v. [1999] voerde een statistische modellering uit van de extreme HW's aan de Belgische kust (Oostende, Nieuwpoort, Zeebrugge). Daarbij werden specifiek de terugkeerperiodes van 50 jaar en 10.000 jaar bepaald. Voor een bepaalde HW werd ook telkens de verwachtingswaarde van de bijkomende zeeklimaatkarakteristieken⁷ afgeleid. Voor Oostende beschikte men over HW-standen van de periode 1925 - 1980, voor Nieuwpoort en Zeebrugge van de periode 1959 - 1980. De ontwerpwaarden van de extreme HW's voor een aantal terugkeerperiodes worden weergegeven in tabel 1, samen

⁶ Toch kan er voor de Belgische kust aangenomen worden dat we op dit ogenblik op een stabiele vlakte leven, en dat eventuele bodemdaling, gezien over een periode van 1000 jaar heel beperkt zal blijven [pers.comm. C. Baeteman, januari 2000].

⁷ De onderzochte karakteristieken zijn:
significante golfhoogte (H33): gemiddelde van de 33% hoogste golfhoogtes gemeten tijdens 15 minuten;
gemiddelde tijperiode (GTZ): gemiddelde tijd tussen opeenvolgende overschrijdingen van het nulpeil tijdens dezelfde 15 minuten;
piekperiode (TPE): periode waarvoor het energiespectrum van de golfhoogtes maximaal is tijdens dezelfde 15 minuten.

met de onder- en bovengrens van het 90%-betrouwbaarheidsinterval. De weergegeven ontwerpwaarden gelden voor Oostende en zijn omgerekend naar TAW₂₀₀₀-waarden⁸.

Van Cauwenberghe [1993] geeft een overzicht van alle gekende stormvloed en de Belgische kust sinds 1925. In tabel 2 worden de stormvloed en de Belgische kust zoals ze werden opgemeten te Oostende.

In figuur 1 worden deze stormtijgegevens vergeleken met de geldende alarmpeilen voor de Belgische kust, de zogenaamde stormwaarschuwing:

- Hoogwater springtij (Oostende): +4,65 m TAW;
- Hoogtij kust (Oostende): +5,60 m TAW;
- Gevaarlijk stormtij kust: +5,90 m TAW.

Uit de gegevens is **geen eenduidige toename** af te leiden in het **voorkomen van bepaalde hoogwaterstanden onder stormcondities**⁹.

Aan het RIKZ werd een analyse uitgevoerd van lange termijn-observaties van de zeespiegel (100 jaar), de golfhoogte (30 jaar) en de wind (40 jaar), in het kader van een onderzoek naar mogelijke wijziging van het stormklimaat over Noordwest Europa [Bijl, 1996]. Alhoewel bleek dat er, gezien over eerder korte termijnen, een aanzienlijke natuurlijke variatie aanwezig was in de gegevens, is er toch *geen significante toename* te merken van het stormklimaat over Noordwest Europa. Gelijkaardige vaststellingen worden gedaan voor de Duitse Bocht en het zuidwestelijke deel van de Noordzee. In dit laatste gebied (meetstations Vlissingen (Nederland) en Southend (Verenigd Koninkrijk)) is er, over korte termijn, een matige variabiliteit in de gegevens en lijkt er een trend te zijn van een lichte afname van het stormklimaat. Als algemene conclusie wordt gesteld dat het stormklimaat over Noordwest Europa **niet slechter** geworden is **over de laatste 100 jaar**, maar dat er een **aanzienlijke natuurlijke variabiliteit is over korte termijnen**.

Schmidt en von Storch [1993] maakten drie jaar eerder reeds melding van gelijkaardig onderzoek voor de Duitse Bocht. Daaruit bleek dat er over de laatste 100 jaar geen significante veranderingen zijn gebeurd bij de optredende windsnelheden. Wel wordt er een

⁸ Alle waterstanden worden omgerekend naar waarden TAW₂₀₀₀, om ze onderling vergelijkbaar te maken. Dit wordt gedaan omdat in de loop van deze eeuw een zeespiegelstijging werd vastgesteld van 15 cm [Van Cauwenberghe, 1999]. De waarden worden via de volgende formule omgerekend: $TAW_{2000} = TAW + 0,015 * (2000 - t)$, met t uitgedrukt in jaren.

⁹ De voorwaarde voor het opnemen van de stormvloed in de tabel was dat voor minstens één van de drie meetpunten (Nieuwpoort, Oostende of Zeebrugge) een bepaald minimumpeil moet overschreden worden. Dit minimumpeil bedraagt respectievelijk + 5,70 m TAW, + 5,55 m TAW of + 5,45 m TAW.

substantiële toename vastgesteld in het aantal zware stormen in de Noord-Atlantische regio, maar de oorzaak van deze toename staat niet vast: is er een effectieve toename van het aantal stormen, of is de waargenomen toename enkel een gevolg van een verbeterde registratie van stormen?

2.3.3 Huidige kustverdediging

De huidige kustverdediging bestaat uit verschillende elementen die als volgt gerangschikt kunnen worden [MVG, 1993]:

- de strandwal is een eerste kustverdedigingslinie, en bestaat uit de onderwateroever, het strand en de duinengordel en alle kustverdedigingswerken (dijken, strandhoofden, ...);
- een tweede kustverdedigingslinie omvat de binnenlandse indijkingen, zowel de fossiele strandwallen als de wegbermen en dijken van menselijke oorsprong. Deze tweede verdedigingslinie is *geen continue* bedijking;
- een derde linie wordt gevormd door de hoogtelijn van +5 m TAW.

In verband met de verdediging van de Belgische kust worden in tabel 3 een aantal belangrijke cijfers weergegeven (alle peilen in m TAW).

Verwaest [1998a, 1998b] maakte een eerste berekening van het huidige veiligheidsniveau van de natuurlijke zeewering (de zeereep). Het resultaat van de berekening is een geschatte verwachte bezwijkkans van de (eerste linie in de) zeewering¹⁰. De auteur maakt wel volgende bemerkingsen:

- wat betreft de nauwkeurigheid van het resultaat wordt er slechts een *indicatie* van de grootte-orde van de bezwijkkansen gegeven¹¹;
- er werden *geen overstromingssimulaties* uitgevoerd om het overstroombare land in kaart te brengen;
- er wordt geen rekening gehouden met de *bijkomende bescherming* die een *tweede linie* van de zeewering kan bieden bij een eventuele doorbraak.

¹⁰ De berekening werd uitgevoerd op basis van een vijftal parameters: het waterniveau op zee (Z+7,0 m), de significante golfhoogte (5,75 m), de korrelgrootte van het duinzand (200 μ), het duinvolume (x m³/m kustlijn) en het strandvolume (y m³/m kustlijn). De eerste twee parameters gelden bij stormcondities met een terugkeerperiode van 100 jaar.

¹¹ Uit een gevoeligheidsanalyse van de gebruikte parameters blijkt dat er een redelijke onzekerheid en/of fout optreedt bij de parameters, wat zich dan ook uit in de waarden van de bezwijkkansen.

De geschatte bezwijkkans van de zeewering wordt bepaald op *10 % van de kans op het voorkomen van een storm waarbij het overstroombare achterland effectief overstromd wordt.*

Uit de berekeningen blijkt dat volgende zeerepen het zwakst zijn:

- de zone vóór het staatsnatuurreservaat De Westhoek (daar zijn wel nog meer landinwaarts gelegen zeeweringen aanwezig);
- de zeereep voor De Panne-centrum, Sint-Idesbald-bad, Koksijde-bad, Oostduinkerke-bad, Groenendijk-bad;
- de zeereep tussen Bredene en de Haan;
- de zeereep tussen Wenduine en Blankenberge;
- de Duinse Polders (Blankenberge);
- de zeereep voor het Zwin.

Voor deze stroken varieert de bezwijkkans van de eerste linie van de zeewering tussen 1/1.000 jaar en 1/40.000 jaar. Maar zoals hierboven reeds gesteld, duiden deze kanswaarden enkel op een grootte-orde, en kunnen dus niet als absolute waarden beschouwd worden.

MVG [1993] wijst op de hoogdringende noodzaak van een gedetailleerde expertise van de zeeweringselementen, zelfs alleen nog maar met het oog op preventief onderhoud. Voor de Belgische kust bestaan er op dit ogenblik nog geen gedetailleerde richtlijnen voor een te handhaven minimaal veiligheidsniveau van de zeewering [Verwaest, 1998a]. Binnen het strategisch plan van AWZ zijn wel een aantal algemene beleidsrichtlijnen opgenomen:

- opvolgen van de evolutie van de zeewering;
- in stand houden van de zeewering, met een voorkeur voor zachte kustverdedigingsmaatregelen (vb. zandsuppleties en aanplantingen);
- meewerken aan een integraal en duurzaam kustbeheer;
- bepalen van een uniform veiligheidsniveau langs de hele kustlijn.

2.3.4 Versteiling van de vooroever

[Deze paragraaf is gebaseerd op Verwaest *et al.* [1999].]

Op dit ogenblik treedt er een versteiling van de vooroever op (aan de Noordzeekusten in het Verenigd Koninkrijk, België, Nederland, Duitsland en Denemarken). Als belangrijke oorzaak worden de menselijke ingrepen in het bovenste deel van het kustprofiel be-

schouwd (bv. bebouwing, strandsuppleties). De correlatie tussen deze ingrepen en de versteiling van de vooroever wordt echter niet overal teruggevonden. Andere mogelijke oorzaken zijn het convergeren van de getijdestromingen evenwijdig aan de kust, verminderde aanvoer van zandig sediment via rivieren, zandwinningen, het ruwer worden van het strandsubstraat, olie- en gaswinningen, een vertraging in de stijging van het zeeniveau, ... Over de exacte oorzaak bestaat nog veel onduidelijkheid.

Versteiling van de vooroever laat een verhoogde indringing van de golven toe. De belangrijkste gevolgen zijn toenemende stranderosie, overstroming en ondermijning van de (kunstmatige) zeeweringen.

Een analyse van de evolutie van de vooroever aan de Belgische kust over de periode 1954 - 1998 toonde het volgende aan:

- voor het centrale deel van de kust (tussen Nieuwpoort en Blankenberge) was er een verdieping van de geulen (met ongeveer 1 m) en een verschuiving van de geulen landinwaarts (met ongeveer 100 m). Dit ging gepaard met een belangrijk verlies aan zandsubstraat. Over het algemeen werd een versteiling van de vooroever vastgesteld;
- voor het oostelijke deel van de kust (tussen Blankenberge en Knokke-Zoute) is er een netto aangroei van de kust geweest sinds 1976 (begin van de bouw van de Zeebrugse haven). Het gevolg daarvan was een afvlakking van de vooroever;
- het westelijke deel van de kust (De Panne - Oostduinkerke) kende een tamelijke stabiliteit wat betreft aan- of afvoer van zand. Tussen 1986 en 1998 werd op sommige stukken een versteiling en op andere stukken een afvlakking van de vooroever vastgesteld.

In afwachting van meer kennis over de oorzaken en effecten van de waargenomen verliezen aan zand in de 'nearshore' en 'upper sea bed' zones zal het huidige kustbeleid ongewijzigd verdergezet worden.

2.3.5 Waarnemingen in Nederland

In Nederland werd onderzoek naar zeespiegelstijging o.a. verricht door van Malde [1992]. Op basis van een analyse van gegevens van 8 tijmeters langs de Nederlandse kust (Vlissingen, Zierikzee, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen, Terschelling en Delfzijl) werden volgende waarnemingen gedaan:

- er is een algemene stijging van MSL met ongeveer 15-20 cm/eeuw over de laatste 100 jaar;
- deze stijging is niet constant: er zit een golvende beweging in (periode van 15 jaar of meer). Daarenboven zijn er ook periodes waar MSL constant blijft;
- er zijn ook nog jaarlijkse schommelingen in MSL ten gevolge van 'ruis' in de metingen. De ruis wordt veroorzaakt door enerzijds natuurlijke variaties (astronomische

oscillaties, windvariaties, ...) en anderzijds door beïnvloeding van de metingen door bouwwerken (Afsluitdijk, Deltawerken, ...).

Specifiek voor Vlissingen stelt van Malde [1992] het volgende vast:

- de toename van HW is groter dan de toename van LW, waardoor TA ook toeneemt;
- de toename van HW voor springtij is groter dan de toename van HW voor doortij.

De meest opvallende vaststelling in Vlissingen is dus een continue toename van het TA sinds 1875, gepaard met een toename van HW die groter is dan de toename van de zeespiegelstijging. Hieruit volgt een verandering van de tijcurves. Het is volgens van Malde [1992] weinig waarschijnlijk dat de baggerwerken in de Westerschelde hier veel invloed op hebben.

Als algemene conclusies van zijn onderzoek stelt van Malde [1992]:

- de toename van MSL is duidelijk in Nederland sinds 1885, *a rato* van 15-20 cm per eeuw;
- een belangrijke invloedsfactor zijn de grote werken (Afsluitdijk, Deltawerken, havenwerken, ...);
- naast een toename van MSL, is er ook een toename van TA (zowel aan de Nederlandse kust als in de Duitse Noordzee). De verklaring hiervoor is iets moeilijker te geven. Omdat de toename van het TA gepaard gaat met een snellere toename van HW dan van het gemiddeld zeeniveau, is dit verschijnsel van groot belang voor de "Lage Landen".

2.4 Wat met de toekomst?

Aangezien er over het bestaan van een toenemend broeikaseffect, en gevolgen zoals een toename van de zeespiegelstijging, nog discussie en twijfels bestaan¹², wordt in een aantal werken vertrokken van het idee "*stel dat er een (versnelde) zeespiegelstijging aan de gang is/op komst is, wat zijn dan de consequenties?*". Indien zou blijken dat alle heibel voor niets is en er geen 'dramatische klimaatwijziging' op komst is, dan is er niets gebeurd; is dit wel het geval, dan heeft men nu al een aantal mogelijke rampscenario's uitgedacht, inclusief eventuele maatregelen.

Deze "*stel dat ...*"-werkwijze zal hier ook even gevolgd worden.

¹² Zie bijlage A voor een illustratie van deze discussies.

2.4.1 Huidige voorspellingen

Het IPCC maakt in zijn rapporten een schatting van de *mondiale* zeespiegelstijging ten gevolge van een temperatuurstijging. Zo wordt tegen het jaar 2050 een wereldwijde stijging voorspeld van 5 tot 40 cm (gemiddeld 20 cm), en tegen het jaar 2100 een stijging van 15 tot 95 cm (gemiddeld 50 cm) [IPCC, 1996]¹³. De voorspelde snelheid van zeespiegelstijging ligt nog altijd 2 tot 5 maal hoger dan de tot nu toe vastgestelde snelheden van zeespiegelstijging. Modelprojecties tonen ook aan dat de zeespiegelstijging zal blijven doorgaan na 2100, omwille van een vertraagde respons van het klimaatsysteem [Klein en Nicholls, 1996].

Op een *regionale* schaal wordt voor de zuidelijke Noordzee geschat dat er een relatieve zeespiegelstijging zal optreden van 25 cm tegen 2050, en tot ongeveer 60 cm tegen 2100 [Werkgroep Klimaatverandering en bodemdaling NW4, 1997]. Voorspellingen op regionale schaal dienen echter met de grootste voorzichtigheid gebruikt te worden .

Rijkswaterstaat gaat in de komende eeuw uit van een relatieve zeespiegelstijging van 60 cm [de Ronde *et al.*, 1998]. Deze verwachtingswaarde wordt ook door de afdeling Waterwegen Kust aangehouden als ontwerpwaarde voor de zeeeringsinfrastructuur.

2.4.2 Gevolgen in verband met het zeeniveau

1) Algemeen

De gevolgen van een mondiale zeespiegelstijging moeten op regionale schaal bekeken worden in termen van *relatieve* zeespiegelstijging, *i.e.* de waargenomen wijziging van het zeeniveau ten opzichte van het land. Er zijn dus bijkomende effecten mogelijk van bijvoorbeeld het dalen of stijgen van het land.

Over het algemeen zullen de gevolgen van een (drastische) zeespiegelstijging voor laaggelegen gebieden langs de kust de volgende zijn: permanente overstroming, verlies aan beschermende stranden, verhoogd overstromingsgevaar en zoutwaterintrusie [Titus, 1986]. Ingeval er aan de Belgische kust een (zeespiegelstijging met) doorbraak van de dijken zou optreden, zou dit een overstroming teweeg brengen die zich 20 km landinwaarts uitstrekt [De Wolf, 1996].

2) Belgische kustpolders

De effecten van een doorbraak van de Belgische kust zullen grotendeels bepaald worden door de hoogteligging van de Holocene afzettingen: Belgische kust-laaglanden zijn gekenmerkt door een verticale sequentie van mariene sedimenten en veenlagen, als gevolg van cyclische transgressies en regressies in het verleden, en de aanwezigheid van opgevulde geulen (vroeger slikken-en-schorrensysteem) [Baeteman *et al.*, 1992].

¹³ Deze voorspellingen zijn gebaseerd op het zogenaamde 'business as usual'-scenario, waarbij er wordt van uitgegaan dat de uitstoot van broeikasgassen op het peil van 1990 blijft.

De kwetsbaarheid van de klei- en veengebieden in de kustvlakte ligt in het gevaar dat bestaat voor *inklinking* van zowel de veen- als de kleilagen ten gevolge van overdreven en/of onverantwoorde drainage van het gebied. Deze verdere verlaging van het bodempeil zorgt ook voor een verminderde drainagecapaciteit. Daarom is het van groot belang dat bij het beheer van het drainagesysteem wordt gezorgd voor zorgvuldig onderhoud van de talrijke grachten, kanalen en dijken. De huidige situatie volstaat niet om een plotsse overvloed aan water te verwerken [Baeteman *et al.*, 1992]. Daarnaast betekent de drainage van de polders ook een gevaar voor zoutinvasie in het grondwater.

3) Belgische kustlijn

De kwetsbaarheid van het strand en de duinen is afhankelijk van andere factoren. Een zeespiegelstijging impliceert in normale omstandigheden dat het volledige profiel vooroever-strand-duinvoet-duin mee evolueert. De kustlijn vertoont dan normaal een transgressie. In natuurlijke omstandigheden (*i.e.* zonder zeeweringen) bestaat er een evenwichtige uitwisseling tussen de zee, het strand en de duinen. Afslag van de duinen en het strand, gevolgd door sedimentatie op de vooroever, treedt op in het late najaar, de winter en het vroege voorjaar. De aanvulling van het strand met materiaal vanop de vooroever gebeurt tijdens de zomer [De Wolf, 1996]. In de huidige situatie aan de Belgische kust is op veel plaatsen het strand te smal en zijn de duinen vaak vastgelegd aan de landwaartse zijde, waardoor geen migratie van duinengordel meer mogelijk is. Ook de aanvoer van sediment vanop plaatsen verder langs de kust is verstoord [Baeteman *et al.*, 1992]. Het hiervoor omschreven natuurlijke dynamisch evenwicht werkt niet meer voor 60 % van de Belgische kust [De Wolf, 1996].

In dit verband kan even ingegaan worden op het mogelijke verband tussen 'harde zeewering' en stranderosie. Er bestaat een brede consensus over het feit dat harde zeeweringen een schadelijke invloed hebben op de aangrenzende stranden en dat ze *passief* bijdragen aan de versmalling van de stranden die ze 'beschermen' [Baeteman *et al.*, 1992]. Over de al of niet *actieve* rol van harde zeeweringen in deze versmalling bestaat nog discussie [Pilkey en Wright, 1988]. Kraus [1988] stelde dat harde zeeweringen de lange termijn erosie van stranden niet versnellen als er voldoende sediment of een brede brandingszone is. Als stranden daarentegen een tekort kennen aan sediment of in het geval van een zeespiegelstijging, is het aannemelijk dat er meer erosie zal optreden ter hoogte van beschermde stranden dan ter hoogte van niet-beschermde, natuurlijke stranden.

Voorgaande alinea zou beschouwd kunnen worden als een pleidooi om harde zeeweringen op te heffen en de zeetransgressies niet te verhinderen. Iets wat voor de Belgische kust niet echt realistisch is omwille van het huidige landgebruik. Een bijkomend gevaar van een zeetransgressie kan optreden als op een bepaald moment een vroegere geul in de kustvlakte wordt 'aangesneden'. Dergelijke geulen zijn gevuld met waterverzadigd zand, en komen voor op verschillende dieptes. Aangezien zand een grotere erosiegevoeligheid heeft dan klei of veen, kan het aansnijden van zo'n geul 'liquefactie' (snelle verschuiving van het zand) en een versnelde erosie als gevolg hebben. Het risico op zo'n gebeurtenis is het grootst op plaatsen waar de duinengordel smal is [Baeteman *et al.*, 1992].

4) Conclusie

De mogelijke gevolgen van een zeespiegelstijging kunnen dus als volgt samengevat worden. Zeespiegelstijging zal vooral leiden tot een **versterkte erosie van de vooroe-ver**. Hierdoor zullen de risico's voor afslag van strand en duinvoet toenemen. Het steeds steiler worden van de kust, met een sterkere inwerking van golf- en windkrachten als gevolg, zal het **toepassen van zandsuppleties steeds noodzakelijker** maken, om op die manier de kustlijn te vrijwaren van verdere erosie en transgressie.

2.4.3 Het extreme windklimaat

[De gegevens in deze paragraaf zijn gebaseerd op Bijl [1995].]

1) Voorspellingen

Op basis van GCM-experimenten is het niet mogelijk om *eenduidig* het effect van klimaatverandering op het extreme windklimaat te voorspellen. Daarom wordt een bepaald scenario *uitgekozen* als basis voor een voorspelling. In dit scenario wordt verwacht dat ten gevolge van het broeikaseffect het huidige extreme windklimaat met twee graden (breedteligging) noordwaarts verschuift, wat neerkomt op ongeveer 220 km. Dit betekent o.a. dat verwacht wordt dat het centrum van een (extreme) storm meer naar het noorden ligt. Deze veronderstellingen over veranderingen in het windklimaat werden gebruikt als input voor berekeningen met het Continental Shelf Model, waarmee (o.a.) de stormopzetten berekend kunnen worden voor verschillende meetposten langs de Noordzeekust. Deze gegevens worden gecombineerd met beschikbare frequentieverdelingen van stormen in het huidige extreme windklimaat. Hieruit wordt volgende conclusie getrokken: een mogelijke verschuiving van het huidige extreme windklimaat naar het noorden resulteert in een lichte daling van de overschrijdingsfrequentie van een bepaalde maximale waterhoogte (bij stormen). Met andere woorden een verschuiving van het huidige extreme windklimaat met ongeveer 220 km heeft een relatief klein effect van ongeveer 0,1 m op de te verwachten stormvloed. Of nog: voor een bepaalde overschrijdingskans zullen de ontwerpwaarden in de toekomst iets lager mogen zijn.

2) Gevolgen

Omwille van het beperkte effect kan verondersteld worden dat een verandering in het extreme windklimaat ten gevolge van het toenemende broeikaseffect weinig tot geen invloed zal hebben op de toekomstige stormvloedhoogtes.

2.5 Conclusies

De **huidige situatie** kan dus als volgt samengevat worden:

- er heeft zich tijdens deze eeuw een relatieve zeespiegelstijging voorgedaan van (10)-15-20 cm/eeuw. In de loop van deze eeuw is geen versnelling vastgesteld van deze zeespiegelstijging [Van Cauwenberghe, 1999]. Wel wordt er een verschil gemeld met de snelheid van de zeespiegelstijging in vorige eeuwen. Deze bedroeg

volgens Jelgersma [1992] 5-6 cm/eeuw, terwijl een andere bron 3-5 cm/eeuw aangeeft [RLG, 1998]. Volgens Jelgersma [1992] is de hoge snelheid van de zeespiegelstijging tijdens deze eeuw te wijten aan een globale temperatuurstijging ten gevolge van het toenemende broeikaseffect. Dit wordt tegengesproken door RLG [1998], die stelt dat deze hogere snelheid een 'normaal fenomeen' is, te wijten aan het einde van "de kleine ijstijd" (aangezien het verhoogde broeikaseffect pas ontstaan zou zijn halfweg deze eeuw);

- gedurende de laatste 100 jaar is het stormklimaat in Noordwest Europa niet verslechterd. Er is echter wel een grote natuurlijke variabiliteit gezien over korte termijnen;
- uit een eerste berekening van het huidige veiligheidsniveau van de (eerste linie van de) natuurlijke zeevering (duinen) blijkt dat voor de zwakste kustdelen de bezwijkingskans varieert tussen 1/1.000 jaar en 1/40.000 jaar. Deze waarden moeten echter als indicatief beschouwd worden;
- langs het grootste deel van de Noordzeekust treedt er momenteel een verstelling op van de vooroever. De oorzaken hiervan zijn divers. Aan de Belgische kust wordt verstelling vooral vastgesteld tussen Nieuwpoort en Blankenberge.

Wat betreft de **toekomst** is het volgende te besluiten:

- door de afdeling Waterwegen Kust wordt, bij het ontwerpen van nieuwe zeeverende infrastructuur gewerkt met een verwachte zeespiegelstijging van 60 cm/100 jaar. Om bij een toenemend zeespiegelniveau transgressies te vermijden, zal in de toekomst meer en meer gebruik gemaakt worden van zandsuppleties om de stranden een voldoende breedte te geven;
- uit een Nederlandse studie blijkt dat er voor de toekomst een noordwaartse verschuiving van het extreme windklimaat te verwachten valt ten gevolge van het toenemende broeikaseffect. Omwille van het beperkte effect hiervan op de hoogte van de stormvloed kan aan deze factor een beperkt belang toegekend worden.

3 EFFECTEN OP RIVIEREN

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de effecten van een eventuele klimaatverandering op het afvoerregime van rivieren besproken. In een eerste paragraaf (3.2) worden historische gegevens verzameld en besproken van achtereenvolgens de zoetwaterafvoer van de Schelde (algemeen) (3.2.1), de bovenafvoer van de Bovenschelde (3.2.1), tijgegevens voor de Zeeschelde en de Westerschelde (3.2.3) en de situatie in het Maasbekken (3.2.4). In paragraaf 3.3 wordt voor het bekken van de Bovenschelde (3.3.1), het bekken van de Zeeschelde en de Westerschelde (3.3.2) en het Maasbekken (3.3.3) een bespreking gegeven van de verwachte ontwikkelingen voor de toekomst. Onder 3.3.4 worden enkele voorspellingen behandeld voor een aantal kleinere deelstroombekkens. Op basis van deze voorspellingen worden voor de bovenafvoer van de Bovenschelde een aantal simulaties doorerekend (3.4). Paragraaf 3.5 rondt het hoofdstuk af met een aantal conclusies.

3.2 Historische waarnemingen en huidige toestand

3.2.1 Schelde: Zoetwaterafvoer

De Schelde en haar zijrivieren zijn *regenrivieren*. De afvoer van deze rivieren wordt grotendeels bepaald door het neerslagoverschot en het gevoerde waterbeleid in het stroombekken. Dit regenrivierkarakter verklaart de grote variatie die er in de afvoergegevens te vinden is [van Eck, 1999]. Gegevens over het bovendebiet van de Schelde worden verkregen door waterstandsmetingen (limnigrafen) en rechtstreekse (akoestische) debietmetingen aan de inlandse grenzen van het getijgebied [AMS, 1998]. Op basis van deze meetgegevens wordt sinds 1949 jaarlijks een berekening gemaakt van de zoetwaterafvoer van de Schelde te Schelle. De inlandse grenzen van het getijgebied waar metingen worden verricht zijn weergegeven in tabel 4.

Voor de laatste drie meetposten zijn ook cijfers weergegeven voor de optredende getijslag op die punten¹⁴. AMS [1999] meldt dat in de loop van de jaren een *toename* van deze getijslag vastgesteld werd. Oorzaken zijn het toegenomen afwaartse getij en de verkleinde beddingsweerstand van de afwaartse delen van het tijbekken.

¹⁴ Omwille van deze getijslag worden de afvoergegevens berekend op basis van de "laagwaterstanden", om het (opstuwend) effect van het getij weg te filteren uit de meetgegevens, en dus enkel de zuivere afvoergegevens over te houden.

Het meerjarig gemiddelde voor de periode 1949 - 1998 bedraagt 107 m³/s. In figuur 2 is ook te zien dat er een toenemende trend aanwezig is in de jaargemiddelde afvoeren [AMS, 1999]. Voor deze stijgende trend in de afvoer wordt door AMS [1999] als oorzaak gegeven: de sterk uitgebreide verstedelijking en de grootschalige aanleg van industriegebieden, die voor een zeer grote grondbedekking zorgen, daar waar vroeger nog veel neerslagwater in grondwater kon overgaan.

De koppeling met andere stroomgebieden (vb. afvoer naar Duinkerken, Heist en Terneuzen, aanvoer vanuit Maasbekken) heeft ervoor gezorgd dat de kenmerkende hoge afvoerpieken van een regenrivier enigszins gedempt werden [van Eck, 1999]. Deze auteur beweert ook dat daardoor een hoger basisniveau voor de afvoer is ontstaan. Dit lijkt eerder te wijten aan de toegenomen verstedelijking.

3.2.2 *Bovenschelde*

In deze paragraaf wordt de situatie beschreven die zich de laatste jaren soms voordeed ter hoogte van Gent [Balduck, 1995].

Tijdens de periodes december-januari 1993-94 en januari-februari 1995 werden in Gent uitzonderlijke debieten aangevoerd via de Leie en de Bovenschelde. De aanvoer bedroeg ruim 500 m³/s. Als belangrijkste oorzaken voor deze uitzonderlijke hoeveelheden haalt Balduck [1995], naast de hoge neerslaghoeveelheid, volgende redenen aan:

- de toenemende urbanisatiegraad;
- de toename van de hoeveelheid verharde oppervlakte;
- een toenemende drainage van waterzieke gebieden;

met als bekend gevolg een versnelde en verhoogde afvoer van hemelwater naar de rivieren. Ook rechtekkingen op o.a. de Leie en Bovenschelde spelen een rol.

Tot voor kort kon een dergelijk debiet beschouwd worden als een 100-jarig debiet. Omdat een dergelijk debiet nu tweemaal kort na elkaar voorkwam, veronderstelt Balduck [1995] dat dit nu een 5-jarig debiet geworden is¹⁵. Als dit het geval zou zijn, dan kan via berekeningen en veronderstellingen aangetoond worden dat het 100-jarig dat door de Leie en de Bovenschelde gezamenlijk aangevoerd wordt ruim 700 m³/s zou bedragen! Om de afvoer van 500 m³/s te verzekeren was ter hoogte van de stuwsluis te Merelbeke reeds een speciale ingreep nodig in het beheer van de stuwsluis. Deze situatie kan nog niet beschouwd worden als de meest extreme omstandigheid, aangezien de hoge afvoe-

¹⁵ Statistisch gezien is deze veronderstelling niet echt relevant. Zie hiervoor ook eerste alinea van paragraaf 3.3.3 *Maasbekken*. Een wijziging in de terugkeerperiode dient via verder onderzoek op een exactere manier bepaald te worden.

ren bijvoorbeeld niet gepaard gingen met een stormtij (waardoor de afvoer via de Zeeschelde moeilijker zou verlopen).

Uit voorgaande moet blijken dat er op dit moment bij de afvoer van het water uit Leie en Bovenschelde reeds belangrijke problemen kunnen ontstaan ten gevolge van de hoger omschreven oorzaken (urbanisatie). Het is niet duidelijk of op dit ogenblik reeds effecten ten gevolge van een klimaatverandering een rol spelen.

3.2.3 Schelde: Getijdenbeweging

a) GHW, GLW en TA

Tabel 5 geeft een overzicht van de 10-jaarlijkse gemiddelde waarden voor hoog- en laagwater ter hoogte van Antwerpen (tijpost Loodsgebouw) voor een periode van 100 jaar. Hieruit blijkt duidelijk dat gedurende de voorbije eeuw TA met 0,80 m of 18 % vergroot is en dat GHW te Antwerpen 0,56 m hoger geworden is, terwijl GLW daalde met 0,24 m [Kerstens, 1993].

De oorzaak van deze evolutie (namelijk toename van TA te Antwerpen) is te zoeken in een samenspel van diverse factoren, enerzijds van natuurlijke aard zoals de inklinking van de bodem en de stijging van de zeespiegel, en anderzijds van menselijke ingrepen, die kunnen samengevat worden als wijzigingen van de komberging (door indijkingen, rechttrekkingen) en riviermorfologie (baggeren, rechttrekkingen) [Kerstens, 1993].

Door Taverniers [1998] wordt de evolutie ter hoogte van Antwerpen (tijpost Loodsgebouw) als volgt samengevat. De jaargemiddelde HW's vertonen een stijgende trend (zie figuur 3), de jaargemiddelde LW's vertonen een dalende trend (zie figuur 4), met als gevolg dat het jaargemiddelde TA sterk toegenomen is sedert het begin van deze eeuw (zie figuur 5). De halftij-waarden nemen slechts lichtjes toe, omdat ter hoogte van Antwerpen het effect van een zeespiegelstijging geneutraliseerd wordt door een daling in de LW's. Over de laatste 50 jaar bedroeg de stijging van het gemiddeld hoogwater (GHW) bij springtij 50 cm, het GHW bij 'normaal' tij 40 cm en het GHW bij doortij 25 cm. In de stijgende trend van het HW tijdens de laatste 100 jaar zijn twee periodes te onderscheiden¹⁶: periode vóór 1960 (met een lineair stijgende trend) en de periode na 1960 (met stijging volgens een tweede-graadsvergelijking) (zie figuur 3). Voor LW wordt de laatste 100 jaar een dalende trend vastgesteld. Over de laatste 50 jaar bedroeg de daling van het gemiddeld laagwater (GLW) bij springtij (ongeveer) 30 cm, het GLW bij 'normaal' tij (ongeveer) 20 cm en het GLW bij doortij 12 cm. Als logisch gevolg van de veranderingen in HW en LW is er een stijgende trend in het TA. Over de laatste 50 jaar bedroeg de

¹⁶ Meer gegevens hierover zijn terug te vinden bij Sas *et al.* [1979]. Als verklaring voor deze trendbreuk in de evolutie van HW wordt een sterke toename van het hydraulisch vermogen van de rivier gegeven.

toename van TA bij springtij (ongeveer) 80 cm, de toename van TA bij 'normaal' tij 60 cm, en de toename van TA bij doortij (ongeveer) 40 cm.

De trend van het GHW sinds 1960 is volgens Taverniers [1998] gerelateerd aan de bathymetrische ontwikkelingen die plaatshadden in het Schelde-estuarium (ontwikkeling Gat van Ossenisse en Overloop van Hansweert, jaren '50 - '60). Er wordt opgemerkt dat de baggerwerken in de Beneden-Zeeschelde, in de jaren '70, **geen** invloed hadden op het tijverloop. Aangezien de huidige verdiepingswerken in de Westerschelde in verhouding tot de natte sectie van de rivier minder drastisch zijn dan deze laatste, verwacht Taverniers [1998] ook geen invloed ten gevolge van de verdiepingswerken. Volgens Arends [pers.comm. 2000] moet dit iets genuanceerder gesteld worden. Ze baseert zich daarvoor op een studie van Witteveen en Bos [1999] die in dit kader berekeningen uitvoerden met een waterbewegingsmodel om het effect van ingrepen (o.a. baggerwerken) op de Westerschelde te bepalen. Uit hun berekeningen volgde dat de waterstand met enkele cm verhoogt ten gevolge van een verruiming van de hoofdgeul. Dat deze (berekende) wijzigingen in de praktijk niet worden vastgesteld, kan dus te wijten zijn aan het feit dat de wijzigingen gecamoufleerd worden door natuurlijke variaties (zie ook 3.3.2).

Als belangrijkste oorzaak voor de algemeen dalende trend van het GLW wordt de verbeterde eb-stroming in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde opgegeven (ten gevolge van rechtekkingen, verdieping, verlagen bodemweerstand, ...) [Taverniers, 1998].

Niet alleen ter hoogte van de tijpost in Antwerpen worden trends vastgesteld, dezelfde evolutie is ook waarneembaar over de rest van de Zeeschelde. Daarbij valt op te merken dat de trends voor HW, LW en TA extreme waarden aannemen ter hoogte van de tijpost te Dendermonde. De belangrijkste veranderingen (Δ 's) over de laatste 100 jaar worden weergegeven in tabel 6.

Op basis van een uitgebreide literatuurstudie van getijdebekkens over de hele wereld, omschrijft DHV [1998] de Westerschelde als 'een macrogetij-gedomineerd estuarium met een geringe rivierinvloed, met een beperkte invloed van de golven op de morfologie'.

Net zoals er te Antwerpen de laatste eeuw wijzigingen werden opgemeten in met name GHW en TA, worden voor de Westerschelde wijzigingen vastgesteld in MSL. Svašek [1998a] stelt vast dat de *trend van zeespiegelstijging* voor stations langs de Westerschelde (Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Bath) grote gelijkenis vertoont met de vastgestelde trends langs de Nederlandse kust (namelijk een toename van 20 cm gedurende de laatste eeuw). Wat betreft de evolutie van het gemiddelde zeeniveau te Vlissingen is het opmerkelijk dat de stijging van de zeespiegel pas ontstaat vanaf $\pm 1890 - 1895$. Daarvoor (sinds 1875) was een opmerkelijke daling vast te stellen (± 15 cm op 20 jaar!), waarvoor (nog) geen verklaring kan gegeven worden [Svašek, 1998a].

In de Westerschelde werd tijdens de voorbije eeuw ook een *toename van het tijamplitude* vastgesteld, variërend van 4 % te Vlissingen tot 5 % in Terneuzen, 7 % te Hansweert tot zelfs 9 % in Bath. Deze toename is sterker dan de toename die wordt vastgesteld aan de kust (nl. ± 10 cm/eeuw) en versterkt in landinwaartse richting. Als belangrijkste factor

voor deze snellere toename in de Westerschelde wordt de verandering van de morfologie door menselijk ingrijpen gegeven (verdiepingswerken)¹⁷. Uit onderzoek [Svašek, 1998b] blijkt dat hier aanpassingen in zowel het mondingsgebied als de rest van de Westerschelde een rol spelen. Uit modelberekeningen blijkt ook dat de invloed van een zeespiegelstijging en verandering van het tijamplitude op zee hierin eerder beperkt is¹⁸.

Er wordt bij vloed ook een *toegenomen voortplantingssnelheid van de getijgolf* in het Schelde-estuarium vastgesteld. De getijgolf legt in vergelijking met de situatie in 1895 de afstand Vlissingen - Hansweert 15' en de afstand Vlissingen - Antwerpen 40' sneller af.

T.S. [1984] geeft een vergelijking van de overschrijdingslijnen voor hoogwaterstanden langs de Westerschelde. Voor de stations Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath worden de frequentielijnen gegeven voor de periodes 1901 - 1950 en 1971 - 1980. Hieruit blijkt dat er in het gebied van de 'normale frequenties', tussen 10^2 en 10^{-2} per jaar, een verhoging van het HW is opgetreden van $\pm 20 - 30$ cm.

b) Eb- en vloednelheden

Een belangrijk gevolg van deze trend is de toename in vloed- en ebsnelheden [Taverniers, 1998]. In de figuren 6 t.e.m. 9 wordt deze trend geïllustreerd. In de figuren wordt op basis van verschillende kubatuurberekeningen [Valcke *et al.*, 1966; Smets, 1996] een overzicht gegeven van het verloop van de vloed- en ebsnelheden in functie van tijd en plaats. Voor zowel de gemiddelde vloed- als ebsnelheden is te merken dat er over ongeveer het volledige traject hogere waarden worden genoteerd in de periode 1971-1980, in vergelijking met de periode 1941-1950 (figuren 6 en 7). Opmerkelijk is ook dat ter hoogte van Terneuzen en Lillo bijna geen veranderingen zijn opgetreden in de tijd. Uit deze grafieken valt ook af te leiden dat er weinig verandering is opgetreden in de periode vóór 1950. Voor de maximale ebsnelheden (figuur 9) zijn gelijkaardige conclusies af te leiden,

¹⁷ Verdiepingswerken hebben twee belangrijke effecten op het waterniveau. Ten eerste is er een toename van het tijamplitude, omdat er door de verdieping een grotere hoeveelheid tijd-energie stroomopwaarts geduwd wordt. Deze toename van het tijamplitude is evenredig verdeeld over hoog- en laagwater. Ten tweede is er ook een daling van het gemiddelde waterniveau. De combinatie van deze effecten zorgt ervoor dat het effect van een verdieping zich vooral laat merken in een sterke daling van het laagwaterpeil, en in mindere mate zichtbaar is in een toename van het hoogwaterpeil (Niemeyer, 1998).

¹⁸ De veranderingen van de hydraulische randvoorwaarden in de modelering zijn groter of gelijk aan de waargenomen veranderingen (nl. een zeespiegelstijging van 0,5 m respectievelijk 0,2 m, en een toename van het tijamplitude van 4 % voor zowel modelering als realiteit), maar de effecten op de waterbeweging in het Westerschelde-estuarium (o.a. de mate van vervroeging van het tij, en van de plaatsgebonden verandering van het tijamplitude) zijn volgens de modelering veel kleiner dan in realiteit. Dit wijst er volgens Svašek (1998a) op dat er nog andere, belangrijker oorzaken meespelen.

nl. hogere waarden over het volledige traject voor de periode 1971-1980. Voor de maximale vloedsnelheden (figuur 8) is het moeilijk om een éénduidig verband af te leiden.

Het feit dat de eb- en vloedsnelheden gewijzigd zijn, wordt volgens T.S. [1984] niet vastgesteld in de *metingen*, wat dus in tegenspraak lijkt te zijn met de *berekeningen* uitgevoerd door Valcke *et al.* [1966] en Smets [1996].

c) Stormtij

Ter hoogte van de meetpost in Antwerpen werd niet alleen een toename van het tijverschil vastgesteld. Tijdens de voorbije eeuw is ook het aantal stormtijen toegenomen [Kerstens, 1993]¹⁹. Dit wordt weergegeven in tabel 7. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat het stormtij gedefinieerd werd als een overschrijding van het waterpeil (+6,5 m TAW) tot en met het begin van de jaren '80. Sindsdien ligt het peil op +6,6 m TAW. Aangezien er de laatste eeuw ook een toename van de hoogwaterstanden werd vastgesteld (zie hoger), mag uit een toename van het aantal stormtijen niet zondermeer geconcludeerd worden dat er een toename is van het aantal stormen (!). Figuur 10 [Sas, 1984] toont aan dat een stormtij bestaat uit verschillende componenten. De waargenomen toename van het stormtij te Antwerpen is dus voornamelijk te wijten aan een stijging van GHW en daardoor een verandering van TA, en valt dus onder de component 'tide'.

3.2.4 Maasbekken

DIHO [1995] zet een aantal extreem hoge afvoerdebieten die opgemeten werden in de laatste eeuw op een rij. De minimale waarde voor de opgenomen afvoeren bedroeg 1.500 m³/s. In figuur 11 worden alle waarden weergegeven. Uit deze grafische voorstelling zou afgeleid kunnen worden dat er een stijgende trend aanwezig is in de extreem hoge afvoerdebieten²⁰. In figuur 11 is echter slechts een deelpopulatie van de afvoergegevens van deze eeuw weergegeven (namelijk de extreme waarden hoger dan 1.500 m³/s). De analyse van extreme waarden vereist echter het gebruik van bijzondere statistische methodes. Gezien de complexiteit hiervan en het ontbreken van een aantal gegevens worden dergelijke berekeningen buiten deze literatuurstudie gelaten. **Om een juist beeld te krijgen van eventuele trends in de afvoerwaarden is verder en diepgaander onderzoek hierover aangewezen.**

¹⁹ Deze vaststelling staat in tegenstelling met de waarnemingen aan de kust (zie 2.3.2).

²⁰ In laatste 15 jaar van de meetperiode liggen de laagste extreme waarden iets hoger dan in de eerste 15 jaar van de meetreeks. Er komen ook iets meer uitgesproken extreme afvoerdebieten voor in de laatste 15 jaar.

3.3 Toekomst

3.3.1 *Bovenschelde*

Voorspellingen over de effecten van een eventuele klimaatverandering wijzen op een verandering die kan optreden in het neerslagpatroon (cfr. 1.5). Deze veranderingen in het **neerslagpatroon** kunnen een belangrijke invloed hebben op de **afvoerregimes** in de rivieren. Op dit ogenblik wordt echter in de praktijk met deze problemen nog geen rekening gehouden, en wordt er enkel gezocht naar oplossingen om het huidige probleem van de versnelde afvoer aan te pakken. Reden hiervoor is de grote onzekerheid die er nog bestaat over de voorspellingen van een klimaatverandering en de moeilijkheid om de effecten van een klimaatverandering te onderscheiden van effecten van menselijke ingrepen in de rivieren [pers.comm. Balduck en Van Crombrugge, 2000].

Eén van de effecten van een klimaatverandering die moeilijkheden kan veroorzaken is een versnelde stijging van het zeeniveau en dan voornamelijk het GHW. Door een toename van het zeeniveau kan verwacht worden dat het (hoog-)waterpeil in de Westerschelde en de Zeeschelde zal gaan toenemen. Als gevolg hiervan zou het 'lozen' van het bovendebiet in de Zeeschelde minder lang mogelijk kunnen worden. Een ander gevolg is dat de lozingen t.h.v. de spuisluizen in Oostende, Heist en Terneuzen ook minder lang kunnen werken. Reeds in het kader van de 'gewone' afvoerproblemen stelt Balduck [1995] voor om op middellange termijn bijvoorbeeld opslagcapaciteit te voorzien in de achterhaven van Zeebrugge. Deze opslagcapaciteit (voor zoetwaterafvoer) kan ook benut worden in geval van een versnelde zeespiegelstijging (alhoewel daar op dit ogenblik geen aanwijzingen voor zijn; cfr. 2.3.1.). Ook andere oplossingen worden voorgesteld, o.a. een verminderde aanvoer vanuit Frankrijk.

3.3.2 *Zeeschelde - Westerschelde*

Svašek [1998a] stelde vast dat de trends in *zeespiegelstijging* voor stations langs de Westerschelde (Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Bath) grote gelijkenis vertoont met de vastgestelde trends langs de Nederlandse kust (cfr. 3.2.3). Daarom wordt de toename van de zeespiegelstijging langs de kust — verwacht wordt dat de zeespiegel in de volgende eeuw zal toenemen met 60 cm i.p.v. 20 cm deze eeuw — ook aangenomen voor de Westerschelde. Ten aanzien van deze verwachtingswaarde bestaan dezelfde onzekerheden als bij de verwachte zeespiegelstijging.

De gevolgen van een zeespiegelstijging zijn volgens Bird [1993; In: DHV, 1998] o.a. een doorgaans breder en dieper worden van het estuarium, een toename van het tijamplitude, en een verder doordringen van de getijgolf op de rivier. Omdat door de sterkere ebstromen de geulen meer geërodeerd worden en meer sediment door de geulen wordt afgevoerd, zal het effect van een zeespiegelstijging ook afhangen van de sedimentaanvoer door zee en rivier [DHV, 1998]. Bij een sediment-overschot zal het estuarium verondiepen en in omvang afnemen. Bij een sediment-tekort daarentegen zal het estuarium verdiepen. Daarnaast worden een groter deel van de riviersedimenten opgevangen binnen het estuarium, en door het verder doordringen van de zouttong gebeurt de sedimentatie van fijnere slibdeeltjes meer stroomopwaarts. Een eventuele toename van de slibinhoud van de Scheldeafvoer zou op die plaatsen een verhoogde slibsedimentatie

kunnen veroorzaken. De zouttong kan ook een bedreiging vormen voor de zoete grondwaterreserves in de buurt van het estuarium [DHV, 1998].

De grenzen tussen een "verdrinkend", een stabiel en een "verlandend" estuarium liggen volgens Van der Spek [1994; In: DHV, 1998] niet zo heel ver uit elkaar. In een geologische studie werd de evolutie van het Holland getijdebekken in de periode van vóór 7000 BP tot 3500 BP geanalyseerd. Tijdens de periode waarin de zeespiegelstijging meer dan 0,75 m/eeuw bedroeg, waren er weinig tot geen intergetijdegebieden aanwezig (dus alles was verdrongen). In een periode waarin de zeespiegelstijging 0,30 tot 0,40 m/eeuw bedroeg, was de sedimentaanvoer in evenwicht met de zeespiegelstijging. In de periode waarin de zeespiegelstijging verder afnam tot 0,15 m/eeuw trad er een verlanding van het estuarium op.

Met deze kennis in het achterhoofd kan eens gekeken worden naar de verwachte toename van de zeespiegelstijging voor de Westerschelde, namelijk een toename van 20 cm/eeuw naar 60 cm/eeuw. Deze verandering is van dezelfde grootteorde als de historische verandering die destijds in het Holland getijdebekken een omkering van een grootschalige trend veroorzaakte [cfr. Van der Spek, 1994]. Deze vergelijking maakt duidelijk dat een verdrinkingsscenario voor de Westerschelde niet zondermeer kan uitgesloten worden.

Om veranderingen in de zeespiegelstijging te kunnen volgen, is het enerzijds noodzakelijk dat er voldoende sediment-aanvoer is, maar anderzijds moeten de 'transportmogelijkheden' gunstig zijn (d.w.z. dat de snelheden van tijstromingen groot genoeg moeten zijn om zand te verplaatsen).

Voor wat betreft het *tijamplitude* wordt, uitgaande van de huidige trends, voor Vlissingen in de komende 100 jaar een stijging van het tijamplitude verwacht van 4 %. De spreiding rond deze verwachtingswaarde is echter groot. Omwille van de verdere verdiepingswerken wordt verwacht dat de toename van het tijamplitude in landinwaartse richting waarschijnlijk nog groter zal zijn [Svašek, 1998a]. Dit lijkt in tegenspraak met wat door Taverniers [1998] gesteld wordt, namelijk dat ten gevolge van de verdiepingswerken géén bijkomende trend (toename) in het tijamplitude verwacht mag worden (cfr. 3.2.3). In dit verband deden Witteveen en Bos [1999] op basis van berekeningen, waarin het effect van morfologische ingrepen op het tijamplitude werd nagegaan, de volgende vaststellingen. De omvang van de toename van het tijamplitude was klein ten opzichte van fluctuaties in jaargemiddelde waarnemingen. Daarnaast werd ook vastgesteld dat in waarnemingen geen instantane (onmiddellijke) respons te herkennen is van ingrepen op de morfologie. Het effect van de beschouwde ingreep is dus te gering om te kunnen onderscheiden van fluctuaties die jaarlijks voorkomen in de waarnemingen. Witteveen en Bos [1999] veronderstellen ook dat het effect van een vroegere ingreep eerst en vooral tot uiting komt in wijzigingen in de stroming en aanmerkelijk minder in de waterstand. Aanpassingen van de waterstanden aan morfologische ingrepen zouden dus pas op relatief grotere tijdschaal merkbaar worden.

Bij getijgedomineerde estuaria, zoals de Westerschelde, vormt het getij één van de belangrijkste motoren die morfologische veranderingen in een estuarium bepalen. Uit een

onderzoek van Friedrichs *et al.* [1990; In: DHV, 1998] blijkt dat bij vloedgedomineerde estuaria met een hypsometrische curve²¹ met een constante helling (zoals de Westerschelde) de vloeddominantie afneemt als gevolg van een zeespiegelstijging. De eb-stroom kan daardoor dominantier worden, waardoor een omslag van een sediment-importerend systeem naar een sediment-exporterend systeem niet *a priori* uit te sluiten valt. Gezien de hypsometrische karakteristieken van de Westerschelde kan uit de berekeningen van Friedrichs *et al.* [1990] afgeleid worden dat dit getijdebekken zeer gevoelig is voor wijzigingen in de geometrische verhoudingen (bv. door baggeren/ontpolderen), getijkarakteristieken en versnelde zeespiegelstijging.

DHV [1998] haalt het voorbeeld aan van de Oosterschelde, waar door een abrupte wijziging (c.q. reductie) van de tij-energie (met o.a. een reductie van het tijamplitude met 12 %) een omkering plaatsvond van grootschalige trends in het estuarium: sediment-export sloeg om in sediment-import. Voor het Marsdiep (een geul tussen de Zuiderzee en de Noordzee) werd een gelijkaardige vaststelling gedaan: door een (beperkte) toename van het tijamplitude (van 1,30 na 1,90 m), met verhoging van de stroomsnelheden als gevolg, werd in het Zuiderzeebekken de sedimentatie van hoofdzakelijk fijne deeltjes (wegens de lage stroomsnelheden) verdrongen door sedimentatie van zand. Dit zand dient aangevoerd te worden van 'elders', in eerste instantie van de buitendelta van de geul, later waarschijnlijk van de omliggende kusten. Ook hier wordt dus een belangrijke omslag vastgesteld van grote processen (namelijk van evenwichtssituatie naar zandimport) ten gevolge van van een relatief kleine wijziging in tijamplitude.

Tot slot mag volgens Svašek [1998a] nog een *noordwaartse verschuiving van het stormklimaat* verwacht worden (cfr. 2.4.3), maar eventuele morfologische veranderingen ten gevolge hiervan zijn niet relevant binnen de studieperiode van 100 jaar (wel op langere termijn).

3.3.3 Maasbekken

Recent werden enkele extreem hoge afvoeren vastgesteld op de (Grens-)Maas (winters 1993 en 1995). Het zo kort na elkaar voorkomen van dergelijke extremen doet natuurlijk de vraag rijzen of er een trendbreuk op gang komt. DIHO [1995] stelt dat het voorkomen van twee dergelijke pieken statistisch niet uitgesloten is. Er mag dus, op basis van deze twee extreme gebeurtenissen, niet zonder meer besloten worden dat er een toename is in de frequentie ten gevolge van bijvoorbeeld een klimaatverandering. Beide gebeurtenissen moeten gezien worden als een gevolg van de natuurlijke variatie in het afvoerre-gime.

Daarnaast sluit DIHO [1995] uit dat de extreem hoge afvoerdebieten een gevolg zouden zijn van de verhoogde urbanisatie. Gezien de aard van de bodem en de ondergrond in het Maasbekken (namelijk lage infiltratiegraad) treedt er een snelle verzadiging op van de bodem, waardoor er ook heel veel water via runoff wordt afgevoerd (in plaats van via

²¹ Een hypsometrische curve toont het verband tussen de waterhoogte en het wateroppervlak.

infiltratie). Daarom bestaat er bij extreme neerslag weinig verschil tussen de waterverzadigde bodems en de verharde oppervlakten. De verhoogde urbanisatie draagt dus in geval van extreme neerslag nog weinig bij aan extreem hoge afvoeren op de Maas.

Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de toenemende urbanisatiegraad wel effect heeft ingeval er 'gewone' hoge neerslaghoeveelheden voorkomen, omdat dan de potentiële buffercapaciteit van de bodem nog een rol zou kunnen spelen als de verharde oppervlakte er niet zou zijn.

3.3.4 Deelstroombekkens

Door Gellens en Roulin [1996, 1998] werd een zogenaamde gevoeligheidsstudie over de hydrologische cyclus uitgevoerd die de impact onderzocht van klimaatverandering veroorzaakt door een verdubbeling van de concentratie atmosferisch CO₂. De studie wordt uitgevoerd met het 'Integrated Runoff Model - Bultot' (IRMB), dat werd toegepast op acht stroombekkens in België: vier uit het Scheldebekken (Aa, Dijle, Herk en Zwalm) en vier uit het Maasbekken (Berwijn, Méhaigne, Oostelijke Ourthe en Semois). Een omschrijving van de stroombekkens is gegeven in tabel 8 en figuur 12.

De nodige inputgegevens voor het IRMB werden geleverd door 6 IPCC-scenario's en 1 scenario dat door Bultot *et al.* [1988] werd opgemaakt. Het zijn allemaal zogenaamde '2 x CO₂-scenario's' (zie hoger).

De IPCC-scenario's worden gekenmerkt door een voorspelde temperatuurstijging die varieert tussen 1,4° C en 4,8° C. Voor de neerslag zijn de voorspelde veranderingen sterk uiteenlopend, en zijn zowel positief als negatief. De meeste scenario's (5 op 6) voorspellen een toename van de neerslag tijdens de wintermaanden, variërend tussen 10 en 41 %. Tijdens de zomermaanden worden zowel toenames voorspeld van 11 tot 33 % (4 van de 6 scenario's) als afnames, gaande van 24 tot 40 %.

De belangrijkste karakteristieken van het zelf opgestelde scenario [Bultot *et al.*, 1988] zijn de volgende:

1. de jaargemiddelde (lucht-)temperatuur (gemeten aan het aardoppervlak) zal gestegen zijn met iets minder dan 3° C;
2. deze temperatuurstijging zal groter zijn in de winter (3,4° C) dan in de zomer (2,3° C);
3. de neerslag zal toenemen in de winter (met ongeveer 10 mm per maand);
4. in de zomer zal de neerslag iets afnemen.

Hieronder volgt een korte bespreking van de belangrijkste resultaten van het onderzoek. Vergelijkingen met de 'huidige situatie' slaan op de **referentieperiode 1901-1990**.

(a) Aanvulling van het grondwater.

Evoluties ten gevolge van een klimaatverandering zullen voornamelijk een invloed hebben op de afvoer tijdens de zomer en de herfst. De onderzochte stroombekkens kunnen opgedeeld worden in twee groepen. Een eerste groep bevat de stroombekkens met een hoge infiltratiegraad (Dijle, Herk en Méhaigne). De gevoeligheid van deze stroombekkens voor een klimaatverandering zal vooral gerelateerd zijn aan veranderingen in de jaarlijkse neerslag. Voor alle scenario's die een jaarlijkse toename van neerslag voorspellen (*i.e.* in 5 van de 7 gevallen), wordt vastgesteld dat de waarden voor de aanvulling van het grondwater over het hele jaar hoger zal liggen dan de huidige waarden. Deze laatste bedragen voor de 3 stroombekkens respectievelijk 403, 447 en 252 mm/maand (gemiddelde waarden over het jaar). De verschillende scenario's voorspellen respectievelijk toenames die variëren tussen 3-23 %, 6-25 % en 8-25 %.

Een tweede groep stroombekkens (Berwijn, Oostelijke Ourthe en Semois), gekenmerkt door een lage infiltratiegraad en dus vooral oppervlakkige afvloeï, zal voornamelijk worden beïnvloed door de toenames van temperatuur en PET (omdat het neerslagwater dus niet snel genoeg kan infiltreren). Voor de meeste scenario's (*i.e.* in 5 van de 7 gevallen), wordt vastgesteld dat de waarden voor de aanvulling van het grondwater over het hele jaar lager zal liggen dan de huidige waarden. Deze laatste bedragen voor de 3 stroombekkens respectievelijk 102, 37 en 66 mm/maand (gemiddelde waarden over het jaar). De verschillende scenario's voorspellen respectievelijk afnames die variëren tussen 0-7 %, 0-13 % en 2-19 %.

De resultaten voor de stroombekkens van de Aa en de Zwalm liggen tussen de twee groepen in.

Op basis van deze vaststellingen, nl. de grote spreiding in de gevoeligheden voor een klimaatverandering, waarschuwen Gellens en Roulin [1996] ervoor dat het toekomstig grondwaterbeleid — omwille van de vele onzekerheden in de voorspellingen — niet eenvoudig zal zijn.

(b) Rivierafvoer.

Wat betreft de rivierafvoer kunnen de stroombekkens op dezelfde manier ingedeeld worden als bij 'aanvulling grondwater'. Ook hier liggen de stroombekkens van de Aa en de Zwalm tussenin. Tijdens de zomer vertonen ze meer gelijkenis met de 'Semois-groep', tijdens de wintermaanden met de 'Dijle-groep'.

Tijdens de wintermaanden (december-februari) berekent het model voor de meeste scenario's een afvoer die hoger ligt dan de huidige waarde, en dit in alle stroombekkens. De toenames kunnen variëren tussen 4 en 28 %. Voor de zomermaanden lopen de voorspellingen uiteen. Voor de scenario's die een neerslagtekort voorspellen tijdens de zomer (2 op 7), treedt er een afname op van de afvoer (bij alle stroombekkens). Voor de rivieren uit de Semois-groep en voor de Aa en Zwalm wordt deze trend waargenomen bij meerdere scenario's (4 op 7). Dit heeft uiteraard te maken met de lagere infiltratiegraad waardoor de verhoogde PET een grotere rol kan spelen.

(c) 'Overstromingsdagen' (flood days):

Deze dagen worden gedefiniëerd als dagen waarbij de afvoer hoger ligt dan de 0,95-percentielwaarde voor de referentieperiode. Onder de huidige omstandigheden komen er gemiddeld 18 *flood days* per jaar voor. Voor de meeste scenario's wordt een toename van het aantal *flood days* verwacht in de winter. De spreiding over het jaar is niet voor alle stroombekkens gelijk. In het Semois- en Ourthebekken worden zo goed als geen *flood days* voorspeld tussen mei en september, terwijl voor de Dijle en de Herk zelfs in deze periode gemiddeld 1 *flood day* per maand kan voorkomen. De Aa en de Zwalm zouden volgens de verschillende scenario's ook geen *flood days* hebben in de maanden juni tot augustus [Gellens en Roulin, 1998].

Twee grote piekdebieten uit deze eeuw (1 januari 1926 en 22 december 1993) werden onderworpen aan de verschillende scenario's. Hieruit blijkt dat onder de verschillende scenario's de terugkeerperiode van dergelijke piekdebieten korter wordt (voor de Semois werden de volgende waarden gevonden: piek van 1 januari 1926: van 75 jaar naar 30 jaar; piek van 22 december 1993: van 300 jaar naar 150 jaar).

(d) 'Laag water dagen' (low flow days):

Analoog aan de *flood days* worden *low flow days* gedefiniëerd als dagen waarbij de afvoer lager ligt dan de 0,05-percentielwaarde voor de referentieperiode. Onder de huidige omstandigheden komen er gemiddeld 18 *low flow days* per jaar voor, voornamelijk aan het eind van de zomer. De voorspellingen volgens de verschillende scenario's lopen sterk uiteen voor de verschillende stroombekkens. Het aantal *low flow days* wordt vooral beïnvloed door de grondwateropslag. Scenario's die een afname van de neerslag voorspellen geven een afname van het aantal *low flow days*. De andere scenario's geven in de bekkens met een hoge infiltratiegraad (Herk, Dijle, Méhaigne) zorgt een bufferend effect van de grondwateropslag voor een daling van het aantal *low flow days*. In de bekkens van de Semois-groep wordt gemiddeld een toename van het aantal *low flow days* voorspeld.

Ondanks de grote spreiding tussen de voorspellingen van de verschillende scenario's en tussen de karakteristieken van de bestudeerde stroombekkens kunnen een aantal globale conclusies getrokken worden:

1. voor stroombekkens met in hoofdzaak oppervlakkige afvloeï en weinig infiltratie zal er een **stijging zijn in de frequentie van overstromingen tijdens de wintermaanden** [zoals reeds vastgesteld door Bultot *et al.*, 1988 en Gellens en Demarée, 1993].
2. stroombekkens met een **hoge infiltratiegraad** vertonen een **grotere buffering** tegen effecten ten gevolge van klimaatverandering wegens de hogere grondwater voorraad, terwijl stroombekkens met een **lage infiltratiegraad veel gevoeliger** zijn voor klimaatverandering. Dit duidelijke onderscheid werd vastgesteld op basis van een impactstudie ten gevolge van klimaatveranderingen op een groot aantal rivieren [Bultot *et al.*, 1988];

3. tijdens de wintermaanden berekent het model voor de meeste scenario's een toename van de rivierafvoer variërend tussen 4 en 28 %. Voor de zomermaanden zijn de voorspellingen afhankelijk van de infiltratiegraad van de stroombekkens.

Om echter een duidelijker beeld van de verwachtingen te kunnen schetsen is nog meer diepgaand onderzoek nodig ²².

3.4 Simulaties bovendebieten Scheldebekken

Om het effect van een toename van de rivierafvoer, die tot 28 % kan bedragen (cfr. 3.3.3), na te gaan, werden een aantal simulaties doorgerekend met het Scheldemodel ²³. Als bovenstroomse randvoorwaarden werden 4 debieten met een verschillende terugkeerperiode opgegeven, namelijk een jaarlijks, 20-, 50- en 100-jaarlijks daggemiddeld debiet. Het totale bovendebiet te Schelle is de som van de bovendebieten op Boven-schelde (Melle), Kleine Nete, Grote Nete, Dijle, Zenne en Dender. De afzonderlijke debieten waaruit het totale bovendebiet telkens is samengesteld, zijn weergegeven in Tabel 9. Als afwaartse randvoorwaarde werd een stormtij opgelegd. Het betreft een zogenaamd drietrapsgetij, *i.e.* drie opeenvolgende stormtijden, waarbij het HW telkens verhoogt met 1,20 m (zie figuur 13). Dit levert voor Antwerpen een uiteindelijk storm-HW op van + 8,25 m TAW. Dit HW-peil heeft een terugkeerperiode van 400 jaar. Deze terugkeerperiode wordt afgeleid uit figuur 14 'Overschrijdingslijn van de HW's te Antwerpen' [Antwerpse Zeediensten, 1990], die werd opgesteld op basis van waarnemingen. De waarnemingen omvatten de waterstanden die tot stand komen ten gevolge van zowel het getij als de bovenafvoer (hoe klein ook in vergelijking met het getij).

Dezelfde simulatie op het Scheldemodel werd ook uitgevoerd met de 4 bovendebieten (voor dezelfde terugkeerperiodes), **verhoogd met 28 %**. De bovendebieten zijn weergegeven in Tabel 9.

Bij deze simulaties is het belangrijk om op te merken dat hier een kunstmatige extreme situatie wordt doorgerekend, namelijk een maximale bovengrens voor het totale bovendebiet. Er werd geen rekening gehouden met de waarschijnlijkheid waarmee dergelijke extreme bovenafvoeren zich **tegelijkertijd** kunnen voordoen op alle zijrivieren van de Schelde. De simulatie had enkel de bedoeling om het effect van een extreme situatie te bepalen.

²² In de lijn van de besproken studie wordt ook gewerkt aan de ontwikkeling van een hydrologisch model dat geschikt is om de hydrologische cyclus te simuleren op een 'nationale' schaal (België) [Gellens *et al.*, 1998]. Het uiteindelijke doel van deze studie zal zijn om een impactstudie voor klimaatverandering te kunnen uitvoeren op de twee belangrijkste stroombekkens in België, zijnde het Scheldebekken en het Maasbekken (vandaar de naam van het model: SCHEME-model = SCHEldt-MEuse-model).

²³ Het Scheldemodel (model 440) werd ontwikkeld aan het Waterbouwkundig Laboratorium. In de berekeningen werden alle bestaande en geplande overstromingsgebieden opgenomen.

Tabel 10 toont voor een aantal punten langs de Schelde het berekende verhang in de verschillende gevallen. De resultaten zijn ook grafisch weergegeven in de figuren 15 tot en met 18. De berekende verhanglijnen tonen aan dat de invloed van een verhoogde bovenafvoer zich hoofdzakelijk laat voelen stroomopwaarts Dendermonde. De effecten van verhoogde bovendebieten zijn dus gering in de Beneden-Zeeschelde, maar significant in de Boven-Zeeschelde.

Indien verondersteld wordt dat de twee gebeurtenissen (optreden van een 100-jarlijks bovendebiet en een 400-jarlijks stormtij) onafhankelijk zijn, zoals wordt aangenomen in WL [1977] en Berlamont *et al.* [1981], dan is de terugkeerperiode van de gecombineerde gebeurtenis gelijk aan het product van de twee afzonderlijke terugkeerperiodes. Het model berekent bij een 100-jarlijks bovenafvoer en een 400-jarlijks stormtij een waterpeil van + 8,43 TAW te Antwerpen (zie tabel 10). Gelijklopend aan de redenering uit WL [1985] zou voor dit waterpeil een terugkeerperiode van 1 op 80.000 jaar verwacht mogen worden²⁴. Uit figuur 14 kan echter worden afgeleid dat de terugkeerperiode voor deze waterstand te Antwerpen 1111 jaar bedraagt, wat nogal sterk afwijkt van de hoger vermelde waarde. Deze onverenigbaarheid laat vermoeden dat de veronderstelling van onafhankelijkheid van de gebeurtenissen niet volledig opgaat. Een andere reden kan liggen in het feit dat kansen worden vermenigvuldigd van gebeurtenissen die niet op dezelfde locatie opgemeten worden (namelijk bovendebieten te Melle, Grobbendonk, Zammel, Haacht, Zemst en Dendermonde en het getij te Antwerpen). **Diepgaander onderzoek over deze veronderstelling van onafhankelijkheid is misschien aangewezen.**

Los van bovenstaande discussie over de onafhankelijkheid van de gebeurtenissen wordt vastgesteld dat de terugkeerperiode van de HW's bij verhoogde bovenafvoer kleiner wordt in vergelijking met de huidige bovenafvoeren. Zo valt de terugkeerperiode voor de waterstand te Antwerpen in geval van een 100-jarlijks bovenafvoer (verhoogd met 28 %) terug van 1111 jaar naar 833 jaar.

²⁴ Deze redenering is als volgt samen te vatten: de bovendebieten worden ingegeven als **daggemiddelde** debieten; het stormtij (of beter: een volledige eb-vloedcyclus) neemt ongeveer een **halve dag** in beslag. Dit wordt als volgt weergegeven:

$$\frac{1 \text{ tij}}{400 \text{ jaar}} = \frac{2 \text{ tijen}}{800 \text{ jaar}} = \frac{1 \text{ 'dagtij'}}{800 \text{ jaar}}$$

Deze laatste verhouding kan nu vergeleken worden met de terugkeerperiode van een **daggemiddeld** debiet. Dit levert voor de gecombineerde gebeurtenis een terugkeerperiode van 1 keer in de 80.000 jaar op.

3.5 Conclusies

De huidige situatie kan als volgt samengevat worden:

- de meerjarig gemiddelde bovenafvoer van de Schelde (voor de periode 1949 - 1998) bedraagt 107 m³/s. In de jaargemiddelde waarden is er een stijgende trend merkbaar, waarvoor de verhoogde urbanisatiegraad van het stroombekken als een mogelijke verklaring kan gelden;
- specifiek voor de Leie en de Bovenschelde is nu reeds duidelijk dat er sprake is van een verhoogde afvoer, met de bijhorende problemen als gevolg. Ook hier wordt de toegenomen urbanisatiegraad als oorzaak beschouwd, eerder dan een eventuele klimaatverandering (omwille van de vele onzekerheden die hierover nog bestaan);
- voor zowel de Zeeschelde als de Westerschelde werden in de laatste eeuw een stijging van de HW's, een verandering van de LW's (namelijk een toename in Vlissingen, Terneuzen en Bath, en een afname in Antwerpen) en een toename van TA vastgesteld. De mate waarin dit gebeurde verschilde van plaats tot plaats: 4 % TA-toename in Vlissingen, 9 % in Bath en 18 % in Antwerpen. In Antwerpen is slechts een beperkte toename van de halftij-waarden opgemeten. Er wordt ook een *toegenomen voortplantingssnelheid van de getijgolf* in het Schelde-estuarium vastgesteld. De getijgolf bij vloed legt in vergelijking met de situatie in 1895 de afstand Vlissingen - Hansweert 15' en de afstand Vlissingen - Antwerpen 40' sneller af. Uit kubatuurberekeningen voor verschillende periodes (1941 - 1950 en 1971 - 1980) blijkt dat er ook veranderingen optreden in de eb- en vloodsnelheden;
- oppervlakkige analyse van gegevens over extreem hoge afvoerdebieten op de Maas gedurende de voorbije eeuw toont aan dat er een schijnbare trend merkbaar is in het voorkomen van extreme afvoeren/waterstanden. De gebruikte analysetechniek is echter niet de meest geschikte. **Diepgaander onderzoek op basis van complexe extreme waarden statistiek is noodzakelijk om een juist beeld te krijgen.**

Wat betreft de toekomst kan het volgende besloten worden:

- voor de Leie en de Bovenschelde wordt niet expliciet rekening gehouden met een klimaatverandering. Verwacht wordt dat de effecten hiervan (voorlopig) niet te onderscheiden zijn van andere wijzigingen/variëaties in de afvoer ten gevolge van menselijke ingrepen aan de waterlopen;
- langs de Belgische en Nederlandse kust wordt voor volgende eeuw een zeespiegelstijging verwacht van 60 cm/eeuw. De gevolgen hiervan zullen ook merkbaar zijn in de Westerschelde. Het precieze effect, verdrinking of verlanding, is echter niet makkelijk te voorspellen, omdat dit bijvoorbeeld sterk afhangt van wijzigingen in het sedimenttransport. Vergelijking met historische zeespiegelstijgingen toont aan dat een verdrinkingsscenario voor de Westerschelde niet *a priori* kan uitgesloten worden;

- op basis van hypsometrische karakteristieken is de Westerschelde te omschrijven als een vloedgedomineerd estuarium. Onderzoek wees uit dat bij dergelijke estuaria de vloeddominantie afneemt ten gevolge van een zeespiegelstijging. Uit berekeningen kan worden afgeleid dat het getijdebekken van de Westerschelde zeer gevoelig is voor wijzigingen in de geometrische verhoudingen (bijvoorbeeld door baggeren/ontpolderen), getijkarakteristieken en versnelde zeespiegelstijging. Hierdoor is een omslag van een sediment*importerend* systeem naar een sediment*exporterend* systeem mogelijk. **Verder onderzoek dient hierover uitsluitsel te geven;**
- het kort na elkaar voorkomen van een aantal extreme afvoerdebieten op de Maas wijst nog niet onmiddellijk op een toename in de frequentie ervan. De verhoogde urbanisatiegraad speelt enkel een rol tijdens 'normale' hoge neerslaghoeveelheden en afvoerdebieten, en heeft zo goed als geen impact op extreem hoge afvoerdebieten;
- voor een aantal kleinere deelstroombekkens (Aa, Berwinne, Dijle, Herk, Méhaigne, Ourthe, Semois en Zwalm) werden een aantal klimaatscenario's doorgerekend met het IRMB. Ondanks grote spreidingen tussen de voorspellingen van de verschillende scenario's en tussen de karakteristieken van de bestudeerde stroombekkens kunnen een aantal conclusies getrokken worden. Voor stroombekkens met in hoofdzaak oppervlakkige afvloeï en weinig infiltratie zal er een stijging zijn in de frequentie van overstromingen tijdens de wintermaanden. Stroombekkens met een hoge infiltratiegraad vertonen een grotere buffering tegen effecten ten gevolge van klimaatverandering wegens de hogere grondwatervoorraad, terwijl stroombekkens met een lage infiltratiegraad veel gevoeliger zijn voor klimaatverandering. Tijdens de wintermaanden berekent het model voor de meeste scenario's een toename van de rivierafvoer variërend tussen 4 en 28 %. Voor de zomermaanden zijn de voorspellingen afhankelijk van de infiltratiegraad van de stroombekkens. Voor een duidelijker beeld van de verwachtingen is echter nog meer diepgaand onderzoek nodig;
- met het Scheldemodel werden simulaties uitgevoerd voor bovenafvoeren die 28 % groter zijn dan de huidige bovenafvoeren. De berekende verhanglijnen tonen aan dat de invloed van een verhoogde bovenafvoer zich hoofdzakelijk laat voelen stroomopwaarts Dendermonde. De terugkeerperiode van de bijhorende HW's te Antwerpen (en elders) worden kleiner in vergelijking met de huidige bovenafvoeren.

4 ALGEMENE CONCLUSIES

Voor het effect van een klimaatverandering op het niveau van de zeespiegel en op het stormklimaat en het voorkomen van extreme HW's werden in dit rapport, op basis van de aangetroffen informatie in de literatuur, een aantal conclusies getrokken.

De **huidige situatie** kan als volgt samengevat worden:

- er heeft zich tijdens deze eeuw een relatieve zeespiegelstijging voorgedaan van (10)-15-20 cm/eeuw. In de loop van deze eeuw is geen versnelling vastgesteld van deze zeespiegelstijging. Wel wordt er een verschil gemeld met de snelheid van de zeespiegelstijging in vorige eeuwen. Een aanpassing of trendbreuk ten gevolge van van een eventuele klimaatverandering is op dit ogenblik dus (nog) niet merkbaar in metingen van MSL;
- gedurende de laatste 100 jaar is het stormklimaat in Noordwest Europa niet verslechterd. Er is echter, gezien over korte termijnen, wel een grote natuurlijke variabiliteit;
- uit een eerste berekening van het huidige veiligheidsniveau van de (eerste linie van de) natuurlijke zeewering (duinen) blijkt dat voor de zwakste kustdelen de bezwijkingskans varieert tussen 1/1.000 jaar en 1/40.000 jaar. Deze waarden moeten echter als indicatief beschouwd worden;
- langs het grootste deel van de Noordzeekust treedt er momenteel een versteiling op van de vooroever. De oorzaken hiervan zijn divers. Aan de Belgische kust wordt versteiling vooral vastgesteld tussen Nieuwpoort en Blankenberge.

Wat betreft de **toekomst** is het volgende te besluiten:

- door de afdeling Waterwegen Kust wordt, bij het ontwerpen van nieuwe zeewerende infrastructuur gewerkt met een verwachte zeespiegelstijging van 60 cm/100 jaar. Om bij een toenemend zeespiegelniveau transgressies te vermijden, zal in de toekomst meer en meer gebruik gemaakt worden van zandsuppleties om de stranden een voldoende breedte te geven;
- uit een Nederlandse studie blijkt dat er voor de toekomst een noordwaartse verschuiving van het extreme windklimaat te verwachten valt ten gevolge van het toenemende broeikas-effect. Omwille van het beperkte effect hiervan op de hoogte van de stormvloed kan aan deze factor een beperkt belang toegekend worden.

In verband met het effect van een klimaatverandering op de rivierafvoer werden in de literatuur vooral gegevens gevonden over het Scheldebekken. Ook voor het Maasbek-

ken en enkele kleinere deelstroombekkens werd informatie verzameld. Dit leidde tot een aantal besluiten.

De **huidige situatie** kan als volgt samengevat worden:

- de meerjarig gemiddelde bovenafvoer van de Schelde (voor de periode 1949 - 1998) bedraagt 107 m³/s. In de jaargemiddelde waarden is er een stijgende trend merkbaar, waarvoor de verhoogde urbanisatiegraad van het stroombekken als een mogelijke verklaring kan gelden;
- specifiek voor de Leie en de Bovenschelde is nu reeds duidelijk dat er sprake is van een verhoogde afvoer, met de bijhorende problemen als gevolg. Ook hier wordt de toegenomen urbanisatiegraad als oorzaak beschouwd, eerder dan een eventuele klimaatverandering (omwille van de vele onzekerheden die hierover nog bestaan);
- voor zowel de Zeeschelde als de Westerschelde werden in de laatste eeuw een stijging van de HW's, een verandering van de LW's (namelijk een toename in Vlissingen, Terneuzen en Bath, en een afname in Antwerpen) en een toename van TA vastgesteld. De mate waarin dit gebeurde verschilde van plaats tot plaats. In Antwerpen is slechts een beperkte toename van de halftij-waarden opgemeten. Er wordt bij vloed ook een *toegenomen voortplantingssnelheid van de getijgolf* in het Schelde-estuarium vastgesteld. Uit kubatuurberekeningen voor verschillende periodes (1941 - 1950 en 1971 - 1980) blijkt dat er ook veranderingen zijn opgetreden in de eb- en vloodsnelheden;
- oppervlakkige analyse van gegevens over extreem hoge afvoerdebieten op de Maas gedurende de voorbij eeuw toont op het eerste zicht een *schijnbare* trend aan in het voorkomen van extreme afvoeren/waterstanden. De gebruikte analysetechniek is echter niet de meest geschikte. Diepgaander onderzoek op basis van complexe extreme waarden statistiek is noodzakelijk om een juist beeld te krijgen.

Wat betreft de **toekomst** kan het volgende besloten worden:

- voor de Leie en de Bovenschelde wordt niet expliciet rekening gehouden met een klimaatverandering. Verwacht wordt dat de effecten hiervan (voorlopig) niet te onderscheiden zijn van andere wijzigingen/variaties in de afvoer ten gevolge van menselijke ingrepen aan de waterlopen;
- de gevolgen van de voorspelde zeespiegelstijging voor volgende eeuw zullen ook merkbaar zijn in de Westerschelde. Het precieze effect, verdrinking of verlanding, is echter niet makkelijk te voorspellen, omdat dit bijvoorbeeld sterk afhangt van wijzigingen in het sedimenttransport. Vergelijking met historische zeespiegelstijgingen toont aan dat een verdrinkingsscenario voor de Westerschelde niet *a priori* kan uitgesloten worden;
- de Westerschelde te omschrijven als een vloedgedomineerd estuarium. Onderzoek wees uit dat bij een dergelijk estuarium de vloeddominantie afneemt ten gevolge van

een zeespiegelstijging. Uit berekeningen kan worden afgeleid dat het getijdebekken van de Westerschelde zeer gevoelig is voor wijzigingen in de geometrische verhoudingen (bijvoorbeeld door baggeren/ontpolderen), getijkarakteristieken en versnelde zeespiegelstijging. Hierdoor kan een omslag van een sediment*importerend* systeem naar een sediment*exporterend* systeem niet uitgesloten worden zonder verder onderzoek;

- het kort na elkaar voorkomen van een aantal extreme afvoerdebieten op de Maas wijst nog niet onmiddellijk op een toename in de frequentie ervan. De verhoogde urbanisatiegraad speelt enkel een rol tijdens *normale* hoge neerslaghoeveelheden en afvoerdebieten, en heeft zo goed als geen impact op *extreem* hoge afvoerdebieten;
- voor een aantal kleinere deelstroombekkens (Aa, Berwinne, Dijle, Herk, Méhaigne, Ourthe, Semois en Zwalm) werden verschillende klimaatscenario's doorgerekend met het IRMB. Ondanks grote spreidingen tussen de voorspellingen van de verschillende scenario's en tussen de karakteristieken van de bestudeerde stroombekkens kunnen een aantal globale conclusies getrokken worden. Voor stroombekkens met in hoofdzaak oppervlakkige afvloeien en weinig infiltratie zal er een stijging zijn in de frequentie van overstromingen tijdens de wintermaanden. Stroombekkens met een hoge infiltratiegraad vertonen een grotere buffering tegen effecten ten gevolge van klimaatverandering wegens de hogere grondwatervoorraad, terwijl stroombekkens met een lage infiltratiegraad veel gevoeliger zijn voor klimaatverandering. Tijdens de wintermaanden berekent het model voor de meeste scenario's een toename van de rivierafvoer variërend tussen 4 en 28 %. Voor de zomermaanden zijn de voorspellingen afhankelijk van de infiltratiegraad van de stroombekkens. Voor een duidelijker beeld van de verwachtingen is echter nog meer diepgaand onderzoek nodig;
- met het (wiskundig) Scheldemodel van het Waterbouwkundig Laboratorium werden simulaties uitgevoerd voor bovenafvoeren die 28 % groter zijn dan de huidige bovenafvoeren. De berekende verhanglijnen tonen aan dat de invloed van een verhoogde bovenafvoer zich hoofdzakelijk laat voelen stroomopwaarts Dendermonde. De terugkeerperiode van de bijhorende HW's te Antwerpen (en elders) worden kleiner in vergelijking met de huidige bovenafvoeren.

In dit rapport zijn een aantal zaken aangeraakt die met enige terughoudendheid benaderd werden. Voor deze punten wordt diepgaander onderzoek aanbevolen.

Dit is ondermeer het geval voor het uitvoeren van een extreme waarden analyse van de debieten die de voorbije eeuw optraden op de Grensmaas (cfr. 3.2.4.). Aangezien WLH zich in Vlaanderen ontwikkelt als kenniscentrum voor hydrologie, en daarvoor over de nodige analysetechnieken beschikt, behoort dit onderzoek zeker tot haar takenpakket.

Bij de simulatie van de (verhoogde) bovendebieten op de Schelde en de berekening van de terugkeerperiode van dergelijke evenementen (cfr. 3.4.) worden bemerkings gemaakt over het eventueel niet onafhankelijk zijn van de gebeurtenissen die hierbij spelen (nl. verschillende bovendebieten gemeten op verschillende locaties). Ook hierbij wordt

verder onderzoek aanbevolen, waarbij WLH als hydrologisch kenniscentrum een belangrijke rol kan spelen (als uitvoerder of opdrachtgever).

Om een beter zicht te krijgen op de wisselwerking tussen wijzigingen in morfologie en getij bij de Westerschelde, dient verder onderzoek uitgevoerd te worden rond het omslagpunt van een sediment-importerend naar een sediment-exporterend systeem (cfr. 3.3.2.). Dergelijk onderzoek kan gecoördineerd worden door de begeleidingsgroep Morfologie van de Werkgroep Lange Termijn Visie Westerschelde.

Deze literatuurstudie kwam tot stand dankzij de bereidwillige medewerking van volgende personen:

- Koen MAEGHE, Youri MEERSSCHAUT, Frank MOSTAERT (AWZ/Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek)
- Freddy WENS (AWZ/Directoraat-generaal)
- Toon VERWAEST, Peter DE WOLF (AWZ/Afdeling Waterwegen Kust)
- Jan BALDUCK, Willem VAN CROMBRUGGE (AWZ/Afdeling Bovenschelde)
- Eric TAVERNIERS (AWZ/Afdeling Maritieme Schelde)
- Marc SAS (IMDC)
- Aline ARENDS, Jacques VROON (Rijkswaterstaat/RIKZ)
- Luc DEBONTRIDDER (KMI)

Borgerhout, april 2000

De ingenieur,
belast met de studie

Voor gezien,

Het afdelingshoofd,

ir. Peter VIAENE

Dr. Frank MOSTAERT

REFERENTIES

- Afdeling Maritieme Schelde (AMS). **1999**. *Zeescheldebekken: de afvoer van de Schelde in 1998*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Maritieme Schelde
- Arends, A.. **2000**. *persoonlijke mededeling*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, DG Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
- Baeteman, C., de Lannoy, W., Paepe, R., van Cauwenberghe, C.. **1992**. *Vulnerability of the Belgian coastal lowlands to future sea-level rise*. In: Tooley, M.J., Jelgersma, S. (eds.), 1992. *Impacts of sea-level rise on European coastal lowlands*. Blackwell Publishers, Oxford
- Baeteman, C.. **2000**. *persoonlijke mededeling*. Ministerie van Economische Zaken, Bestuur Kwaliteit en Veiligheid, Afdeling Geologische Dienst van België
- Balduck, J., Van Crombrugge, W.. **2000**. *persoonlijke mededeling*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Bovenschelde
- Balduck, J.. **1995**. *De waterbeheersing in Oost- en West-Vlaanderen*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Bovenschelde
- Berger, A.. **1992**. *Le Climat de la Terre. Un passé pour quel avenir?* De Boeck Universit e
- Berlamont, J., Sas, M., Van Langenhove, G., Thienpont, M.. **1981**. *Multi- en interdisciplinaire evaluatiestudie betreffende de stormvloedkering te Antwerpen (Oosterweel). Deelstudie: waterbouwkundige aspecten*. KULeuven
- Bijl, W.. **1995**. *Impact of a wind climate change on the surge in the southern part of the North Sea*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, DG RWS, Rijksinstituut voor Kust en Zee, RIKZ-95.016
- Bijl, W.. **1996**. *Looking for observational signs of 'Changing storminess'*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, DG RWS, Rijksinstituut voor Zee en Kust, RIKZ/OS-96.157x
- Bird, E.C.F.. **1993**. *Submerging Coasts. The effects of a rising sea level on coastal environments*.
- Böttcher, C.J.F.. **1996**. *Verslag van het openbare gesprek in het kader van de werkzaamheden van de Tijdelijke commissie Klimaatverandering*. In: Tweede Kamer der Staten-Generaal (T.K.). 1996a. Kameronderzoek klimaatverandering. Gesprekken. Sdu Uitgevers, 's Gravenhage, pp. 231-247
- Bultot, F., Coppens, A., Dupriez, G.L., Gellens, D., Meulenberghs, F.. **1988**. *Repercussions of a CO₂-doubling on the water cycle and on the water balance - a case study for Belgium*. *J.Hydrol*, **99**, 319-347
- Daems, W.. **1999**. *Broeikaseffect: mythe of realiteit?*. EOS magazine, **november 1999**, 64-67
- de Moor, G.. **1979**. *Recent beach erosion along the Belgian North Sea coast*. *Bull. Belg. Ver. Geol.* **88(2)**, 143-57

- de Ronde, J.G. (red.), Heinen, P., Middelkoop, H., Oerlemans, J., Schuurmans, C., de Wolde, J. **1998**. *De keerzijde van ons klimaat*. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) en Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterverwerking (RIZA). Universiteit Utrecht, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek, Utrecht (IMAU).
- De Wolf, P.. **1996**. *Waterbeheersingsproblemen in West-Vlaanderen, De kustzone*. West-Vlaanderen Werkt **1**, 4-9
- DHV Milieu en Infrastructuur bv (DHV). **1998**. *Verkenning effecten versnelde zeespiegelstijging op dynamiek Westerschelde estuariene systeem*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RWS, RIKZ
- Dienst Hydrologisch Onderzoek (DIHO). **1995**. *Verslag: Hoge waterstanden Grensmaas, december 1993 en januari-februari 1995, gerelateerd aan vroegere hoge waterstanden*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Dienst Hydrologisch Onderzoek
- Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G., Speer, P.E.. **1990**. *Impacts of relative sea level rise on evolution of shallow estuaries*. Coastal and engineering studies, vol. 38
- Friis-Christensen, E., Lassen, K.. **1991**. *Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate*. Science **254**, 698-700
- Gellens, D., Demarée, G.. **1993**. *Sensitivity of the hydrological cycle. Impact of the climate change induced by the doubling of the CO₂ atmospheric concentration*. In: Proceedings of the "Belgian Impulse Program Global Change Symposium", 17 - 18 may 1993, vol. III. Belgian Science Policy Office, 217-243
- Gellens, D., Roulin, E., Gellens-Meulenberghs, F.. **1998**. *Impact of climate change on the water balance in the river Meuse basin (Belgium). Results obtained by moving scale from 200 to 2000 km²*. In: Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water. Espoo, Finland, 17 - 20 August 1998, Volume **2**, 820-828
- Gellens, D., Roulin, E.. **1996**. *Global climate change. Possible evolution of the hydrological cycle and water resources in Belgium. Results of the project 'Final Report of the Global Change project GC/34/022'*. Royal Meteorological Institute of Belgium
- Gellens, D., Roulin, E.. **1998**. *Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenario's*. J. Hydrol. **99**, 242-258
- Global Environmental Change Report (GECR). **1996**. *The IPCC Second Assessment Report: A Review*. Cutter Information Corp., USA
- Houghton, J.T., Gylvan Meira Filho, L., Griggs, D.J., Maskell, K.. **1997**. *An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change
<http://milenngroup.com/repository/global/CREC.html>
- IPCC. (in voorbereiding). *Third Assessment Report*.
- IPCC. **1995**. *The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers*. IPCC/WLO/UNEP, UK Meteorological Office, Bracknell, URL: <http://www.ipcc.ch/pub/sarsum1.htm>

- IPCC. **1996.** *Climate Change 1995; The science of Climate Change (Summary for policymakers)*. IPCC/Cambridge University Press, Cambridge England
- IPCC-DDC. **1999.** *Emissions Scenarios*. The IPCC Data Distribution Centre (DCC), URL: http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/emissions/emissions.html
- Jelgersma, S., Tooley, M.J.. **1992.** *Impacts of a future sea-level rise on European coastal lowlands*. In: Tooley, M.J., Jelgersma, S. (eds.), 1992. *Impacts of sea-level rise on European coastal lowlands*. Blackwell Publishers, Oxford
- Jelgersma, S.. **1992.** *Vulnerability of the coastal lowlands of the Netherlands to a future sea-level rise*. In: Tooley, M.J., Jelgersma, S. (eds.), 1992. *Impacts of sea-level rise on European coastal lowlands*. Blackwell Publishers, Oxford
- Karl, T.R., Tarpley, D., Quayle, R.G., Diaz, H.F., Robinson, D.A., Bradley, R.S.. **1989.** *The recent climate record: what it can and cannot tell us*. *Reviews of Geophysics* **27**, 405-430
- Kerr, R.A.. **1996.** *A new dawn for sun-climate links*. *Science* **271**, 1360-1361
- Kerstens, P.. **1993.** *Het Sigmoplan. Beveiliging van het Zeescheldebekken tegen stormvloed op de Noordzee*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Dienst Tijgebonden Waterwegen
- Klein, R.J., Nicholls, R.J.. **1996.** *Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies. Draft version 1.3*. UNEP, Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit Amsterdam
- Kraus, N.C.. **1988.** *The effects of seawalls on the beach: an extended literature review*. *Journal of Coastal Research* **SI 4**, 1-28
- Massel, R.S.. **1999.** *Fluid mechanics for marine ecologists*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (MVG). **1993.** *Kust 2002. Deel 1: De zeeverende functie van de kust. Stand van zaken. Voorbereidend rapport*. Dep. LIN, Adm. Waterinfrastructuur en Zeewezen, Bestuur Havens
- Niemeyer, H. D.. **1998.** *Change of mean tidal peaks and range due to estuarine waterway deepening*. Reprint from Proceedings: 26th International Conference on Coastal Engineering, 22-26 June 1998, Copenhagen, Denmark
- Pilkey, O.H., Wright III, H.L.. **1988.** *Seawalls versus beaches*. *Journal of Coastal Research* **SI 4**, 41-64
- Pirazzoli, P.A.. **1989.** *Present and near-future global sea-level changes*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology* **75**, 241-58
- Probabilitas n.v.. **1999.** *Statistische modellering van extreme hoogwaterstanden en het overeenkomstig zeeklimaat in relatief diep water*. Opdrachtgever: MVG, dep. LIN, AWZ, Afd. Waterwegen Kust, Oostende
- Raad voor het Landelijk Gebied (RLG). **1998.** *Overvloed en schaarste: water als geld. Advies over de gevolgen van klimaatverandering, zeespiegelrijzing en bodemdaling voor het landelijk gebied*. Publicatie RLG 98/5. Raad voor het Landelijk Gebied, Amersfoort
- Sas, M.. **1984.** *Frequency of occurrence of storm surges in an estuary: a stochastic approach*. 19th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Houston, 3-7 Sept. 1984

- Sas, M., Smets, E., Van Langenhove, G., Berlamont, J.. **1979**. *Gebruik van de simulatietechniek ter bepaling van overschrijdingsfrequenties van de extreme hoogwaterstanden op de Schelde*. KUL, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Departement Constructie, Afdeling Bouwkunde, Laboratorium voor Hydraulica
- Schmidt, H., von Storch, H.. **1993**. *German Bight storms analysed*. Nature 365,p 791
- Schoeters, K., Vanhaecke, P.. **1999**. *Studie "kader voor rapportering van "Climate Change"-effecten in België: uitwerking en toepassing". Eindverslag in opdracht van de Federale Diensten voor Wetenschappelijke, Technische en Culturele aangelegenheden*. Ecolas N.V., Lange Nieuwstraat 43, B-2000 Antwerpen, België
- Shennan, I., Woodworth, P.L.. **1992**. *A comparison of late Holocene and twentieth century sea-level trends from the UK and North Sea region*. Geophys.Journal Int. **109**, 96-105
- Shennan, I.. **1992**. *Impacts of sea-level rise on the Wash, United Kingdom*. In: Tooley, M.J., Jelgersma, S. (eds.), 1992. *Impacts of sea-level rise on European coastal lowlands*. Blackwell Publishers, Oxford
- Smets, E.. **1996**. *Kubatuurberekeningen voor het Scheldebekken. Het gemiddeld getij over het decennium 1971-1980. Een gemiddeld getij typisch voor het jaar 1980. Model 405-2*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
- Sneyers, R.. **1982**. *Notre climat change-t-il?*. Ciel et Terre, vol. **98**, 7-12
- Svašek B.V.. **1998a**. *Lange termijn gedrag Westerschelde, definitiestudie zeespiegelrijzing*. Svašek coastal & harbour engineering consultants
- Svašek B.V.. **1998b**. *De rol van het getij in de ontwikkeling van de Westerschelde, een modelmatige onderbouwing*. Svašek-rapport 98154/1029
- Svensmark, H.. **1998**. *Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate*. Danish Space Research Institute <http://milennigroup.com/repository/global/CREC.html>
- Taverniers, E.. **1998**. *Evolutie in het getij in het Zeescheldebekken*. Water **102**, 304-308
- Technische Scheldec commissie (T.S.). **1984**. *Verdieping Westerschelde. Studierapport. Programma 48'-43'. Deel 1: tekst*. Bestuur der Waterwegen/Antwerpen, Rijkswaterstaat/Middelburg
- Titus, J.. **1986**. *Greenhouse effect, sea-level rise and coastal zone management*. Coastal Zone Management Journal **14(3)**, 147-71
- Tweede Kamer der Staten-Generaal (T.K.). **1996a**. *Kameronderzoek klimaatverandering. Gesprekken*. Sdu Uitgevers, 's Gravenhage
- Tweede Kamer der Staten-Generaal (T.K.). **1996b**. *Kameronderzoek klimaatverandering. Rapport*. Sdu Uitgevers, 's Gravenhage
- UK Climate Change Impact Review Group. **1996**. *Review of the potential effects of climate change in the United Kingdom*. Department of the Environment
- Valcke, E., Vandervelden, H., Sterling, A., D'heygers, O., Roovers, P., Claeys, G., Codde, R., Van Damme, A.. **1966**. *Stormvloed op de Schelde. Deel 4*. Ministerie van Openbare Werken, Bestuur der Waterwegen
- Van Cauwenberghe, C.. **1977**. *Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust. Periode 1941-1970 en 1959-1970*. Tijdschr.Openbare Werken van België **4**, 339-49

- Van Cauwenberghe, C.. **1985**. *Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust. Periode 1971-1980*. Tijdschr.Openbare Werken van België **5**, 437-57
- Van Cauwenberghe, C.. **1993**. *Overzicht van de tijwaarnemingen langs de Belgische kust. Periode 1981-1990 voor Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge*. Rapport nr. 40 van de Hydrografische Dienst der Kust
- Van Cauwenberghe, C.. **1999**. *Relative sea level rise along the Belgian coast: analyses and conclusions with respect to the high water, the mean sea and the low water levels*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Waterwegen Kust, Dienst Hydrografie, Oostende
- Van der Spek, A.J.F.. **1994**. *Large scale evolution of Holocene tidal bassins in the Netherlands*. Proefschrift Universiteit Utrecht
- Van Dooren, P.. **1996**. *Klimaat op hol?* Uitgeverij Davidsfonds, Leuven
- van Eck, B. (red.). **1999**. *De Schelde-atlas, een beeld van een estuarium*. Schelde Informatie-Centrum, Middelburg
- van Malde, J.. **1992**. *Relative rise of mean sea-levels in the Netherlands in recent times*. In: Tooley, M.J., Jelgersma, S. (eds.), 1992. Impacts of sea-level rise on European coastal lowlands. Blackwell Publishers, Oxford
- Verwaest, T., Kunz, H., Hüttemeyer, P., Stam, J.-M., Soulsby, R., Lastrup, C., Madsen, H.T.. **1999**. *Profile steepening. A report prepared from the North Sea Coastal Management Group*. North Sea Coastal Management Group
- Verwaest, T.. **1998a**. *Duinafslag en veiligheidsniveau natuurlijke zeevering. Stagerapport*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Waterwegen Kust
- Verwaest, T.. **1998b**. *Eerste bepaling van het veiligheidsniveau van de zeereep*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AWZ, Afdeling Waterwegen Kust
- Waterbouwkundig Laboratorium (WL). **1977**. *Berekeningen stormvloedbeheersing in het Scheldebekken. Mod. 331 - 2*. Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout
- Waterbouwkundig Laboratorium (WL). **1985**. *Wiskundig model van de Schelde. Grote Nete. Model 440 - 1*. Ministerie van Openbare Werken, Bruggen en Wegen, Bestuur der Waterwegen, Waterbouwkundig Laboratorium
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., Dokken, D.J. (eds.). **1997**. *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Summary for policymakers*. IPCC WG II/WMO/UNEP
- Werkgroep Klimaatverandering en bodemdaling NW4. **1997**. *Klimaatverandering en Bodemdaling. Onderzoeksrapport in het kader van de voorbereidingen voor de vierde Nota Waterhuishouding*. Projectteam NW4, Den Haag
- Wijn-Nielsen, A.C.. **1989**. *The greenhouse effect: a review of data- and modelstudies*. In: Frankenfield Zanin, J. (ed.) Summaries of presentations: First International Meeting, Impact of sea level rise on cities and regions, Venice, 7-13
- Williams, M. (ed.). **1999**. *Climate Change Information Kit*. United Nations Framework Convention on Climate Change, URL:
<http://www.unfccc.de/text/resource/iuckit/index.html>
- Witteveen en Bos. **1999**. *Getijanalyses Westerschelde*. RIKZ

Wood, F.B.. **1988**. *On the need for the validation of the Jones et al. temperature trends with respect to urban warming*. *Climatic Change* **12**, 297-312

Woodworth, P.L., Shaw, S.M., Blackman, D.L.. **1991**. *Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline*. *Geophys.Journal Int.* **104**, 593-609

Woodworth, P.L., Tsimplis, M.N., Flather, R.A., Shennan, I.. **1999**. *A review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges*. *Geophys.Journal Int.* **136**, 651-670

Tabel 1 : Ontwerpwaarden van de extreme HW's voor een aantal terugkeerperiodes - situatie Oostende

| Terugkeerperiode | Extreme HW's (cm TAW ₂₀₀₀) | | |
|-------------------|--|---------------|-------|
| | 5% * | Ontwerpwaarde | 95% * |
| 1 per jaar | 543 | 546 | 550 |
| 1 per 10 jaar | 583 | 595 | 609 |
| 1 per 50 jaar | 604 | 628 | 659 |
| 1 per 100 jaar | 611 | 641 | 684 |
| 1 per 1.000 jaar | 626 | 686 | 782 |
| 1 per 10.000 jaar | 633 | 728 | 909 |

* ondergrens en bovengrens van het 90% betrouwbaarheidsinterval

Tabel 2 : Overzicht van alle gekende stormvloeden aan de Belgische kust sinds 1925

| Datum | TAW (m) | Datum | TAW (m) |
|------------|---------|------------|---------|
| 26/11/1928 | 5,83 | 13/11/1973 | 5,58 |
| 23/11/1930 | 6,19 | 14/12/1973 | 5,78 |
| 28/11/1930 | 5,69 | 14/12/1973 | 5,56 |
| 01/12/1936 | 5,47 | 28/11/1974 | 5,58 |
| 01/12/1936 | 5,71 | 20/11/1975 | 5,47 |
| 03/04/1938 | 5,44 | 03/01/1976 | 5,90 |
| 03/11/1940 | 5,41 | 04/01/1976 | 5,55 |
| 29/06/1944 | 6,01 | 21/01/1976 | 5,57 |
| 01/03/1949 | 6,04 | 15/11/1977 | 5,75 |
| 26/10/1949 | 5,43 | 12/01/1978 | 5,83 |
| 01/02/1953 | 6,66 | 02/01/1979 | 5,55 |
| 01/02/1953 | 5,80 | 06/11/1979 | 5,55 |
| 23/12/1954 | 5,54 | 20/04/1980 | 5,53 |
| 16/10/1958 | 5,54 | 25/10/1980 | 5,53 |
| 12/01/1959 | 5,54 | 14/11/1981 | 5,49 |
| 21/03/1961 | 5,88 | 02/02/1983 | 5,68 |
| 15/11/1962 | 5,53 | 24/11/1984 | 5,36 |
| 24/10/1964 | 5,43 | 22/01/1988 | 5,51 |
| 10/12/1965 | 5,87 | 27/02/1990 | 5,62 |
| 16/11/1966 | 5,70 | 27/02/1990 | 5,76 |
| 28/02/1967 | 5,61 | 28/02/1990 | 5,69 |
| 05/10/1967 | 5,65 | 01/03/1990 | 5,66 |
| 22/11/1971 | 5,62 | 20/09/1990 | 5,48 |
| 03/04/1973 | 5,58 | 07/10/1990 | 5,58 |

Tabel 3 : Overzicht van de belangrijkste niveau's in verband met de kustverdediging

| Elementen van de strandwal | Peil (m TAW) |
|----------------------------|--------------|
| Vooroevervoet | -4,11 |
| Laagwaterlijn | +1,39 |
| Hoogwaterlijn | +4,39 |
| Duinvoet | +6,89 |

| Elementen van de zeewering | Peil (m TAW) |
|----------------------------|-----------------|
| Zwin internationale dijk | +11,00 |
| Zeedijk te Knokke | +9,60 |
| Zeebrugge haven terrein | +7,89 |
| Zeedijk te De Haan | +11,00 à +11,29 |
| Zeedijk te Oostende | +8,60 à +9,60 |
| Wachtdijken Vosseslag | +10,00 |
| Zeedijk te De Panne | +9,60 |

Tabel 4 : Scheldebekken - Meetposten op de inlandse grenzen van het getijgebied

| Rivier | Meetpost | Getijslag (cm) | | |
|-------------|-------------|----------------|-----------|----------|
| | | Doodtij | Springtij | Stormtij |
| Schelde | Melle | - | - | - |
| Dender | Dendermonde | - | - | - |
| Zenne | Epegem | - | - | - |
| Dijle | Haacht | 10 à 20 | 20 à 80 | 70 à 90 |
| Grote Nete | Itegem | 0 à 20 | 0 à 40 | |
| Kleine Nete | Grobbendonk | 20 à 40 | 30 à 60 | Tot 110 |

Tabel 5 : Overzicht van de 10-jaarlijkse gemiddelde waarden voor hoog- en laagwater ter hoogte van Antwerpen (tijpost Loodsgebouw) gedurende 100 jaar

| Periode | Gemiddeld HW (m TAW) | Gemiddeld LW (m TAW) | Gemiddeld TA (m) |
|-------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1891 - 1900 | 4,68 | 0,29 | 4,39 |
| 1901 - 1910 | 4,72 | 0,23 | 4,49 |
| 1911 - 1920 | 4,83 | 0,24 | 4,59 |
| 1921 - 1930 | 4,85 | 0,20 | 4,65 |
| 1931 - 1940 | 4,90 | 0,18 | 4,72 |
| 1941 - 1950 | 4,90 | 0,17 | 4,73 |
| 1951 - 1960 | 4,96 | 0,15 | 4,81 |
| 1961 - 1970 | 5,07 | 0,17 | 4,90 |
| 1971 - 1980 | 5,15 | 0,01 | 5,14 |
| 1981 - 1990 | 5,24 | 0,05 | 5,19 |

Tabel 6 : Belangrijkste trends voor HW, LW en TA op de Zeeschelde in de laatste 100 jaar

| Tijpost | Δ HW (cm) | Δ LW (cm) | Δ TA (cm) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Vlissingen | +33 | ↗ | +15 |
| Prosperpolder | bijna +50 | ↘ | +80 |
| Antwerpen | ruim +60 | ↘ | +90 |
| Dendermonde | bijna +90 | bijna -60 | +145 !!! |
| Melle | ruim +50 | ↗ | +50 |

Tabel 7 : Overzicht aantal stormtijden opgemeten te Antwerpen gedurende de laatste 100 jaar

| Periode | 1900-1910 | 1911-1920 | 1921-1930 | 1931-1940 | 1941-1950 | 1951-1960 | 1961-1970 | 1971-1980 | 1981-1990 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Aantal stormtijden | 5 | 5 | 3 | 6 | 8 | 7 | 14 | 32 | 42 |

Tabel 8 : Beknopte omschrijving van de deelstroombekkens
(bron: Gellens en Roulin, 1996)

| Bekken / afwaartse grens | Opper- vlakte (km ²) | Gem. hoogte- ligging (m) | Min - max hoogte- ligging (m) | Tem- peratuur (°C) | Neerslag (mm/jaar) | Omschrijving |
|--------------------------|--|-----------------------------------|--|--------------------------|-----------------------|--|
| SCHELDEBEKKEN | | | | | | |
| Zwalm / Nederzwalm | 115 | 75 | 9 - 157 | 9,6 | 745,8 | Eerder vlak, zandig-kleiige bodem |
| Aa / Poederlee | 204 | 22 | 9 - 39 | 9,4 | 813,0 | Vlak en zandige bodem |
| Dijle / S' Joris Weert | 645 | 103 | 27 - 170 | 9,0 | 732,6 | Dikke aquifer, zandig-lemige bodem |
| Herk / Wellem | 108 | 100 | 39 - 131 | 8,9 | 797,8 | Vlakke, zandig-lemige bodem |
| MAASBEKKEN | | | | | | |
| Mehaigne / Moha | 345 | 100 | 81 - 152 | 9,3 | 815,2 | Eerder vlak, lemige hoogvlakte, kalkachtige ondergrond |
| Berwinne / Dalhem | 118 | 216 | 84 - 355 | 8,3 | 907,4 | Eerder golvende, kalkachtige bodem |
| Ourthe / Houffalize | 327 | 465 | 180 - 539 | 7,4 | 1025,7 | Golvende schist- en kalkachtige bodem met rotsondergrond |
| Semois / Membre | 1235 | 388 | 176 - 549 | 7,6 | 1162,3 | Golvende bodem met rotsondergrond en ondiepe aquifers |

Tabel 9 : Opsplitsing van het totale bovendebiet van de Schelde

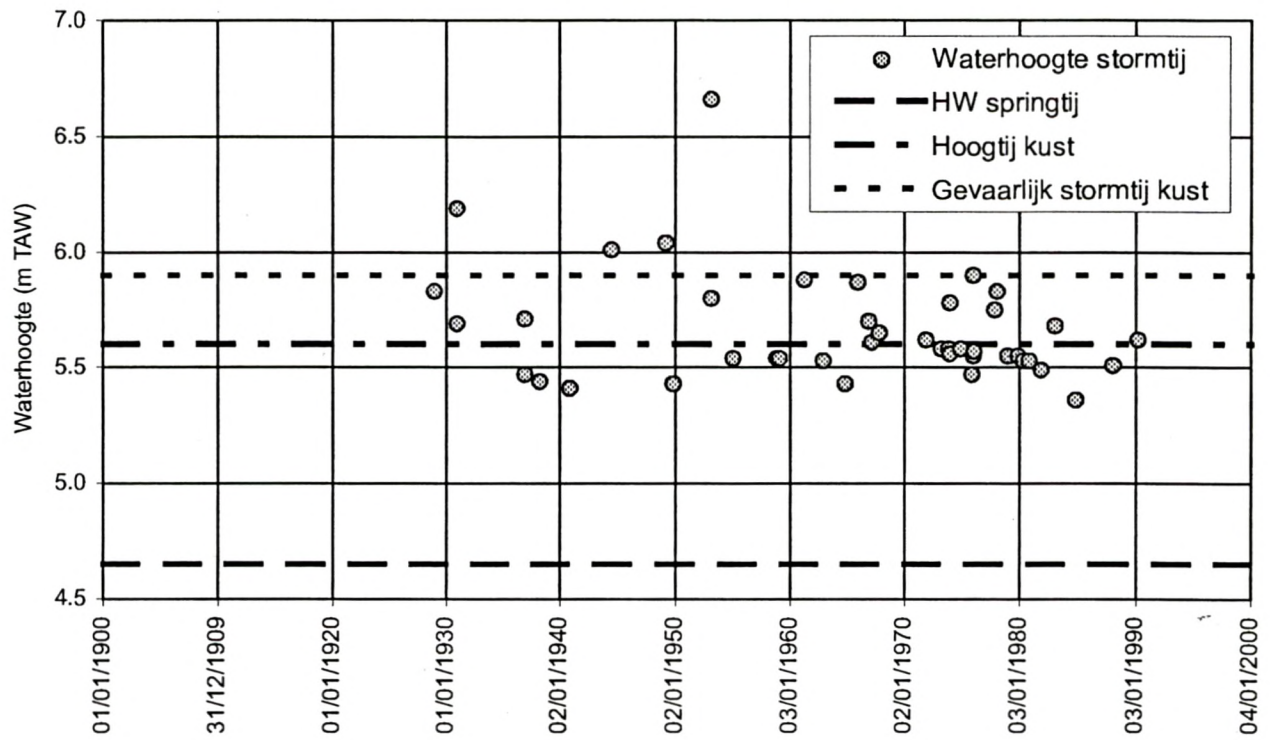
| | | Terugkeerperiode | | | |
|--------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| | | jaarlijks debiet | 20 --jaarlijks debiet | 50 --jaarlijks debiet | 100 --jaarlijks debiet |
| Rivier | Plaats | Debieten (m ³ /s) | | | |
| Schelde | Melle | 100 | 289 | 346 | 390 |
| Kleine Nete | Grobbendonk | 7 | 42 | 52 | 61 |
| Grote Nete | Zammel | 8 | 17 | 20 | 22 |
| Dijle | Haacht | 25 | 85 | 103 | 117 |
| Zenne | Zerst | 30 | 87 | 105 | 118 |
| Dender | Dendermonde | 44 | 96 | 112 | 124 |
| TOTAAL BOVENDEBIET | | 214 | 615 | 738 | 831 |
| TOTAAL BOVENDEBIET + 28% | | 274 | 788 | 945 | 1064 |

Tabel 10 : Simulatie bovendebiten Schelde - berekende verhanglijnen bij verschillende debieten

| Plaats | Terugkeerperiode | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------------|-------------------------|---------|----------------------|-----------------------------|---------|----------------------|-----------------------------|---------|-----------------------|------------------------------|---------|
| | jaarlijks debiet | jaarlijks debiet + 28 % | Vershil | 20 -jaarlijks debiet | 20 -jaarlijks debiet + 28 % | Vershil | 50 -jaarlijks debiet | 50 -jaarlijks debiet + 28 % | Vershil | 100 -jaarlijks debiet | 100 -jaarlijks debiet + 28 % | Vershil |
| | Waterstanden (m TAW) | | | | | | | | | | | |
| Prosperpolder | 8,43 | 8,43 | 0,00 | 8,43 | 8,43 | 0,00 | 8,43 | 8,43 | 0,00 | 8,43 | 8,43 | 0,00 |
| Boudewijnsluis | 8,34 | 8,34 | 0,00 | 8,34 | 8,34 | 0,00 | 8,34 | 8,34 | 0,00 | 8,34 | 8,34 | 0,00 |
| Antwerpen | 8,25 | 8,27 | 0,02 | 8,37 | 8,42 | 0,05 | 8,41 | 8,46 | 0,05 | 8,43 | 8,49 | 0,06 |
| Kruibeke | 8,38 | 8,40 | 0,02 | 8,49 | 8,53 | 0,04 | 8,52 | 8,55 | 0,03 | 8,54 | 8,58 | 0,04 |
| ± 2 km SAW Temse | 8,41 | 8,42 | 0,01 | 8,52 | 8,57 | 0,05 | 8,55 | 8,61 | 0,06 | 8,58 | 8,65 | 0,07 |
| ± 3 km SAW St.-Amands | 8,41 | 8,43 | 0,02 | 8,57 | 8,64 | 0,07 | 8,62 | 8,70 | 0,08 | 8,65 | 8,75 | 0,10 |
| ± 6 km SAW Dendermonde | 8,28 | 8,34 | 0,06 | 8,58 | 8,69 | 0,11 | 8,65 | 8,79 | 0,14 | 8,72 | 8,87 | 0,15 |
| ± 4 km SOW Dendermonde | 8,06 | 8,17 | 0,11 | 8,54 | 8,72 | 0,18 | 8,66 | 8,86 | 0,20 | 8,76 | 8,97 | 0,21 |
| Wichelen | 7,93 | 8,11 | 0,18 | 8,70 | 8,92 | 0,22 | 8,86 | 9,11 | 0,25 | 8,97 | 9,24 | 0,27 |
| ± 2 km SOW Wetteren | 8,17 | 8,37 | 0,20 | 8,95 | 9,18 | 0,23 | 9,11 | 9,38 | 0,27 | 9,23 | 9,53 | 0,30 |
| ± 8 km SAW Gentbrugge | 8,44 | 8,59 | 0,15 | 9,22 | 9,50 | 0,28 | 9,42 | 9,75 | 0,33 | 9,57 | 9,94 | 0,37 |

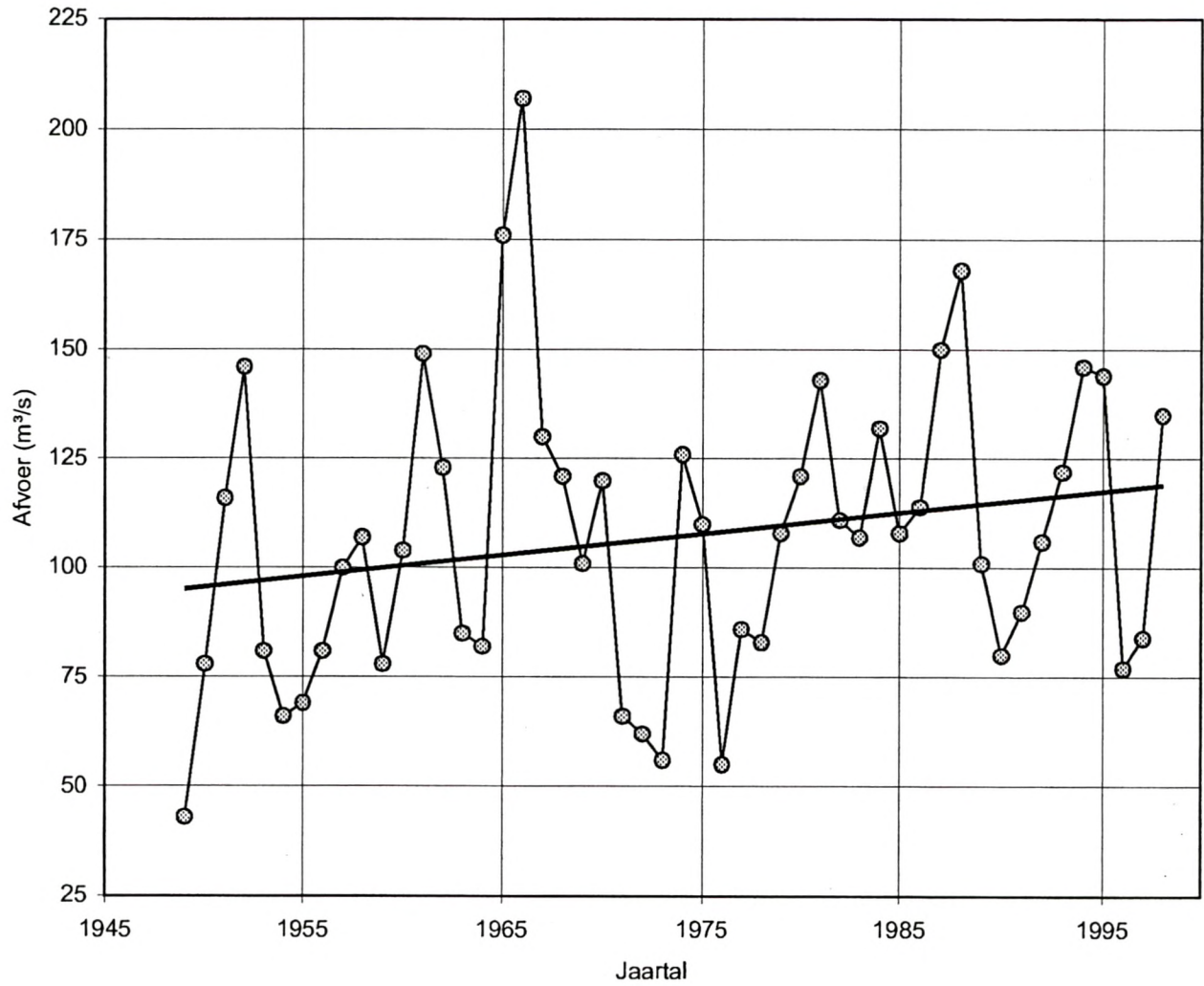


VERGELIJKING STORMTIJEN OOSTENDE (1925-1993)
MET GELDENDE ALARMEPEILEN BELGISCHE KUST



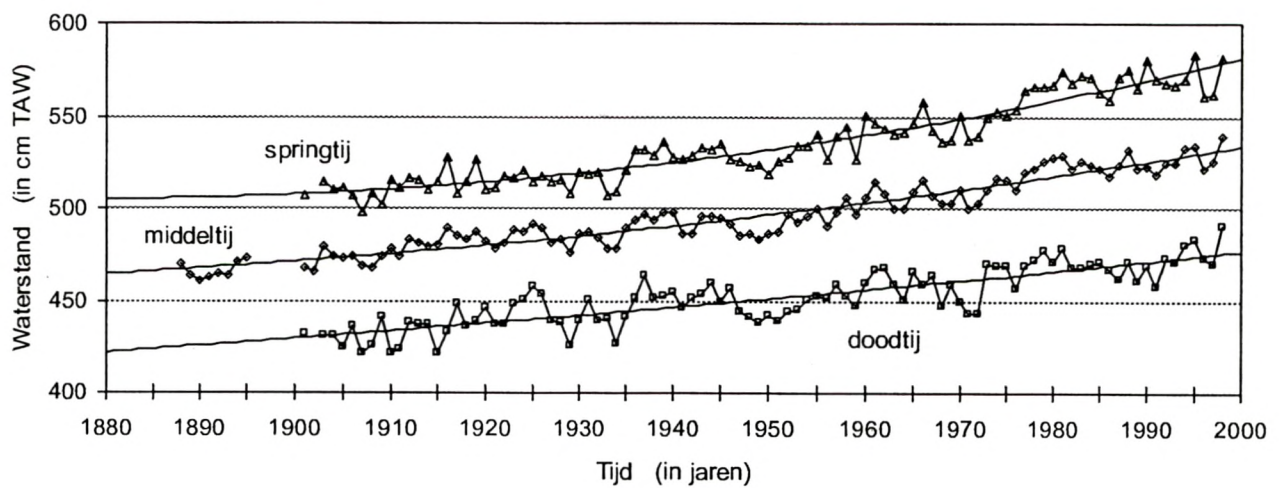


OVERZICHT JAARGEMIDDELDE AFVOER VAN DE SCHELDE
TE SCHELLE (1949-1998)





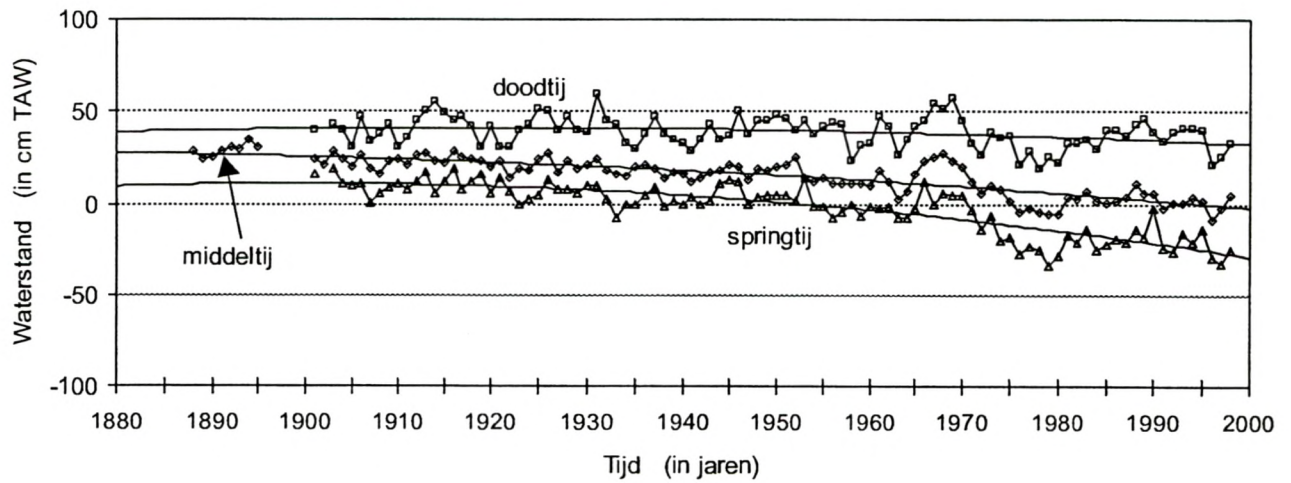
SCHELDE TE ANTWERPEN: LANGDURIGE TIJEVOLUTIE -
JAARGEMIDDELDE HOOGWATER



Bron : Afdeling Maritieme Schelde



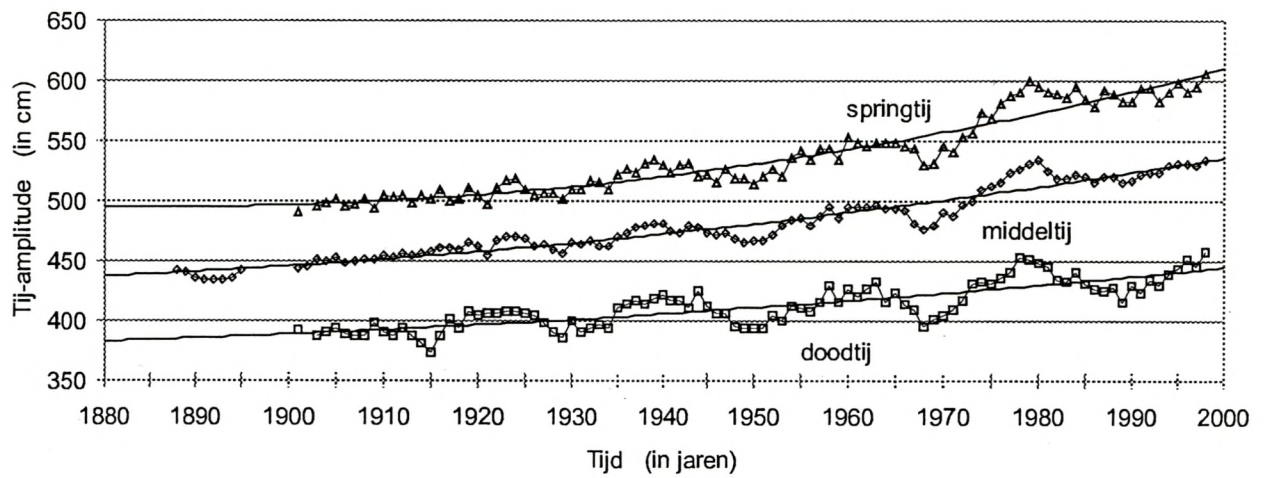
SCHELDE TE ANTWERPEN: LANGDURIGE TIJEVOLUTIE -
JAARGEMIDDELDE LAAGWATER



Bron : Afdeling Maritieme Schelde



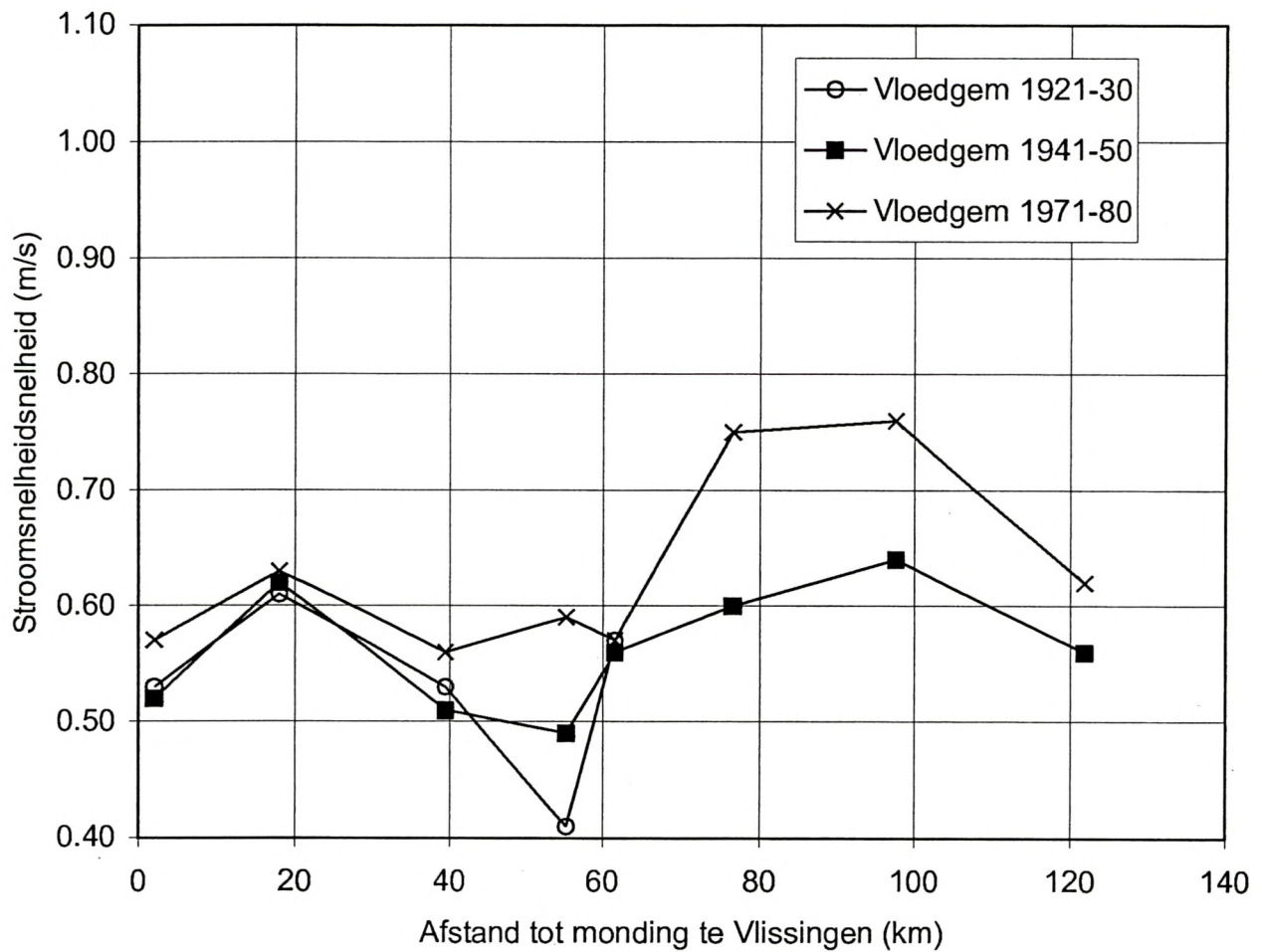
SCHELDE TE ANTWERPEN: LANGDURIGE TIJEVOLUTIE -
JAARGEMIDDELDE TIJAMPLITUDE



Bron : Afdeling Maritieme Schelde

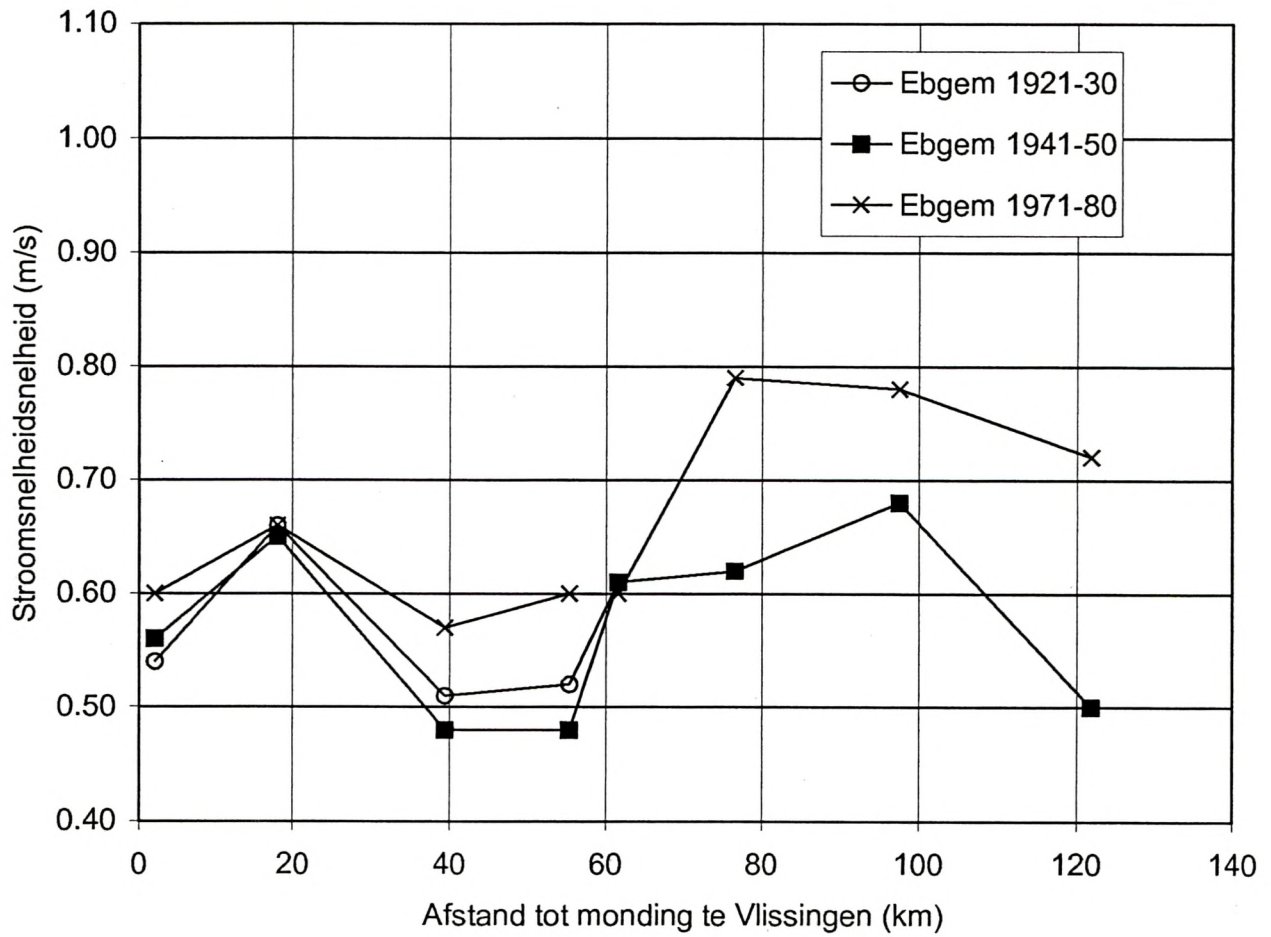


EVOLUTIE GEMIDDELDE VLOEDSNELHEID LANGS DE
SCHELDE



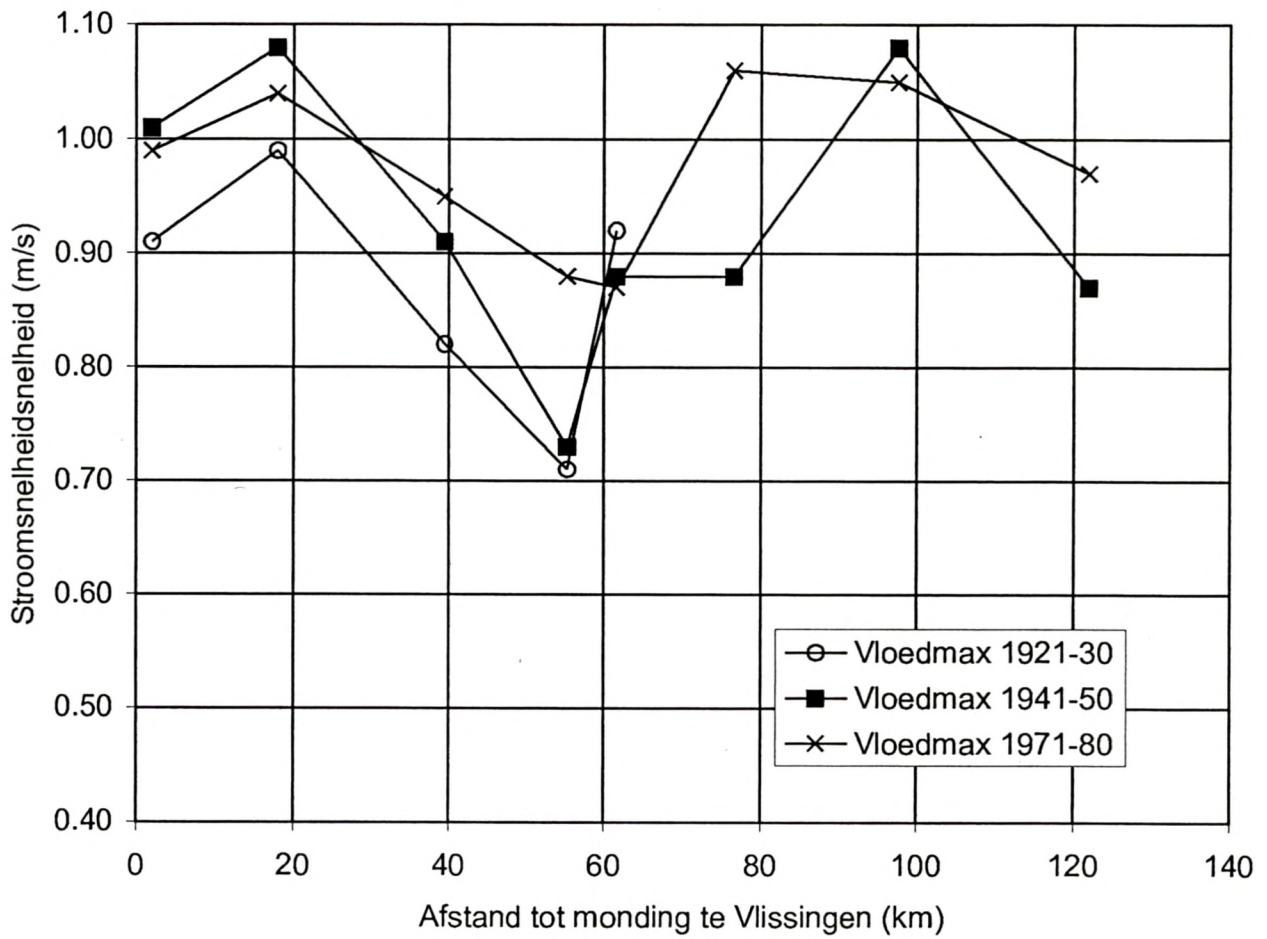


EVOLUTIE GEMIDDELTE EBSNELHEID LANGS DE SCHELDE

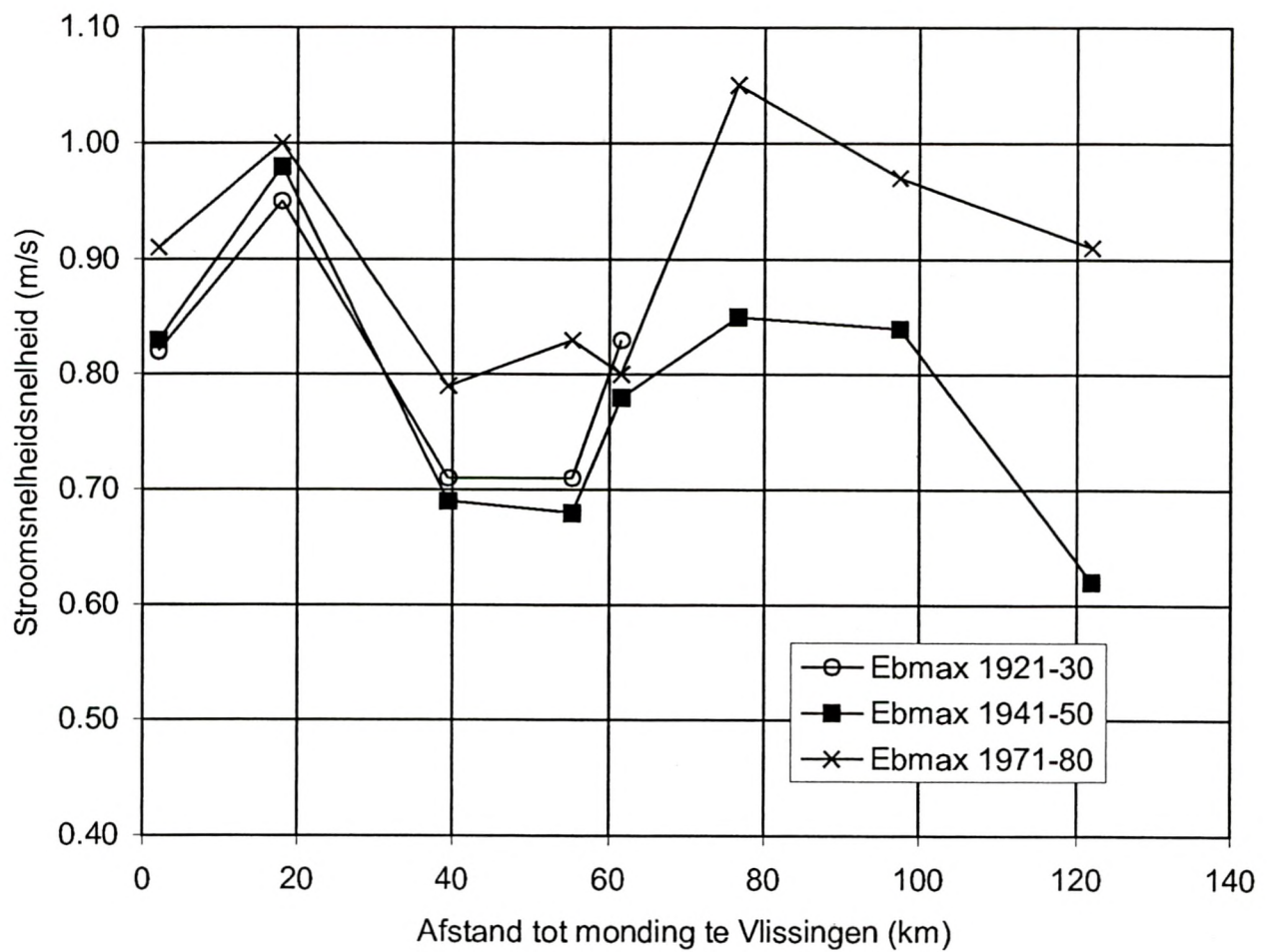




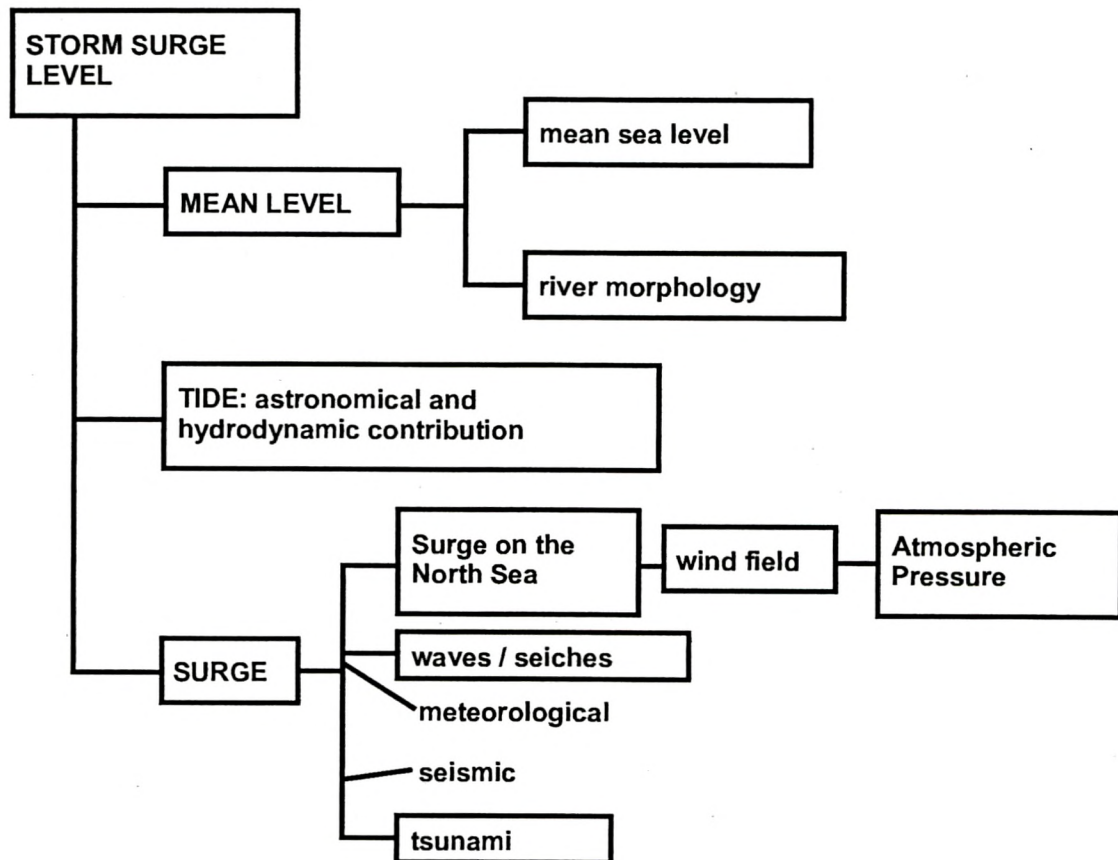
EVOLUTIE MAXIMALE VLOEDSNELHEID LANGS DE SCHELDE



EVOLUTIE MAXIMALE EBSNELHEID LANGS DE SCHELDE



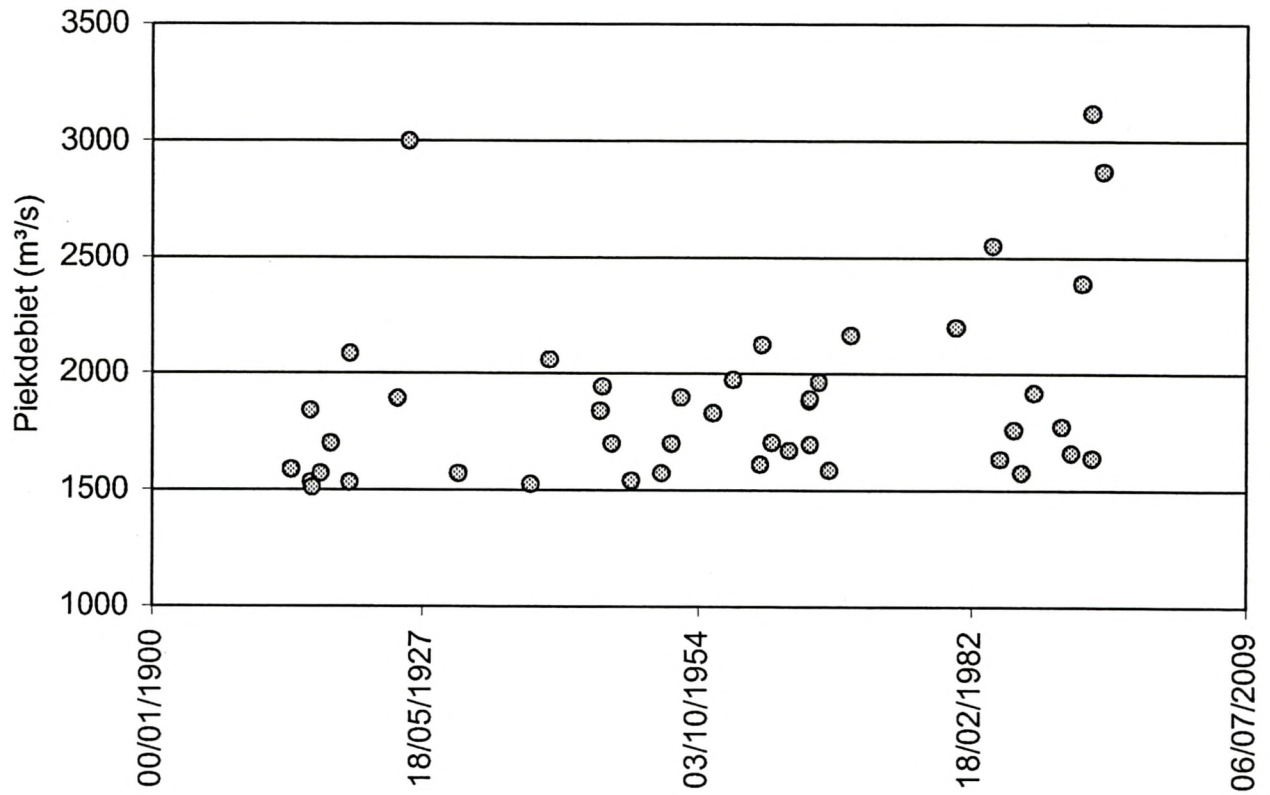
OVERZICHT SAMENGESTELDE COMPONENTEN VAN EEN
STORMTIJ



Bron: Sas, 1984

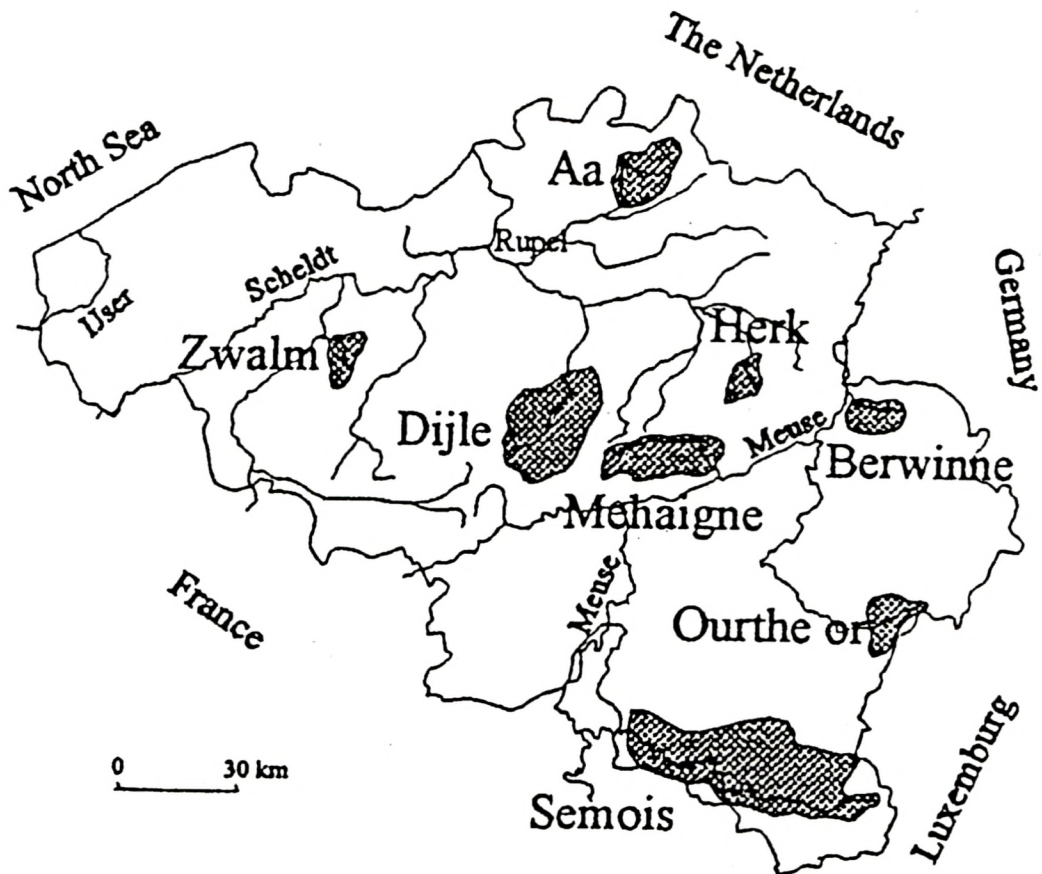


OVERZICHT VAN EXTREME AFVOERWAARDEN OP DE MAAS
(1914-1995)



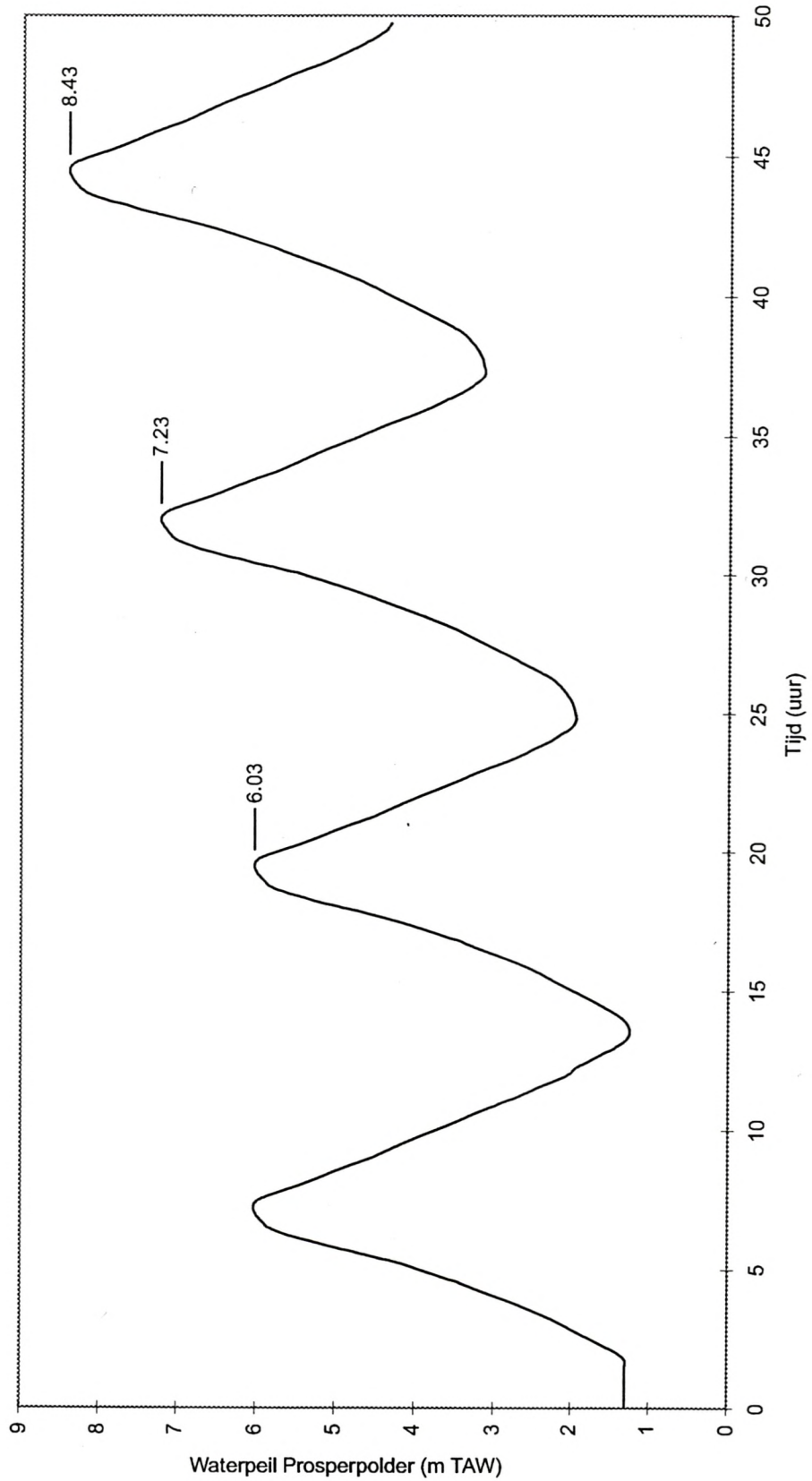


OVERZICHT VAN DE BESTUDEERDE DEELBEKKENS



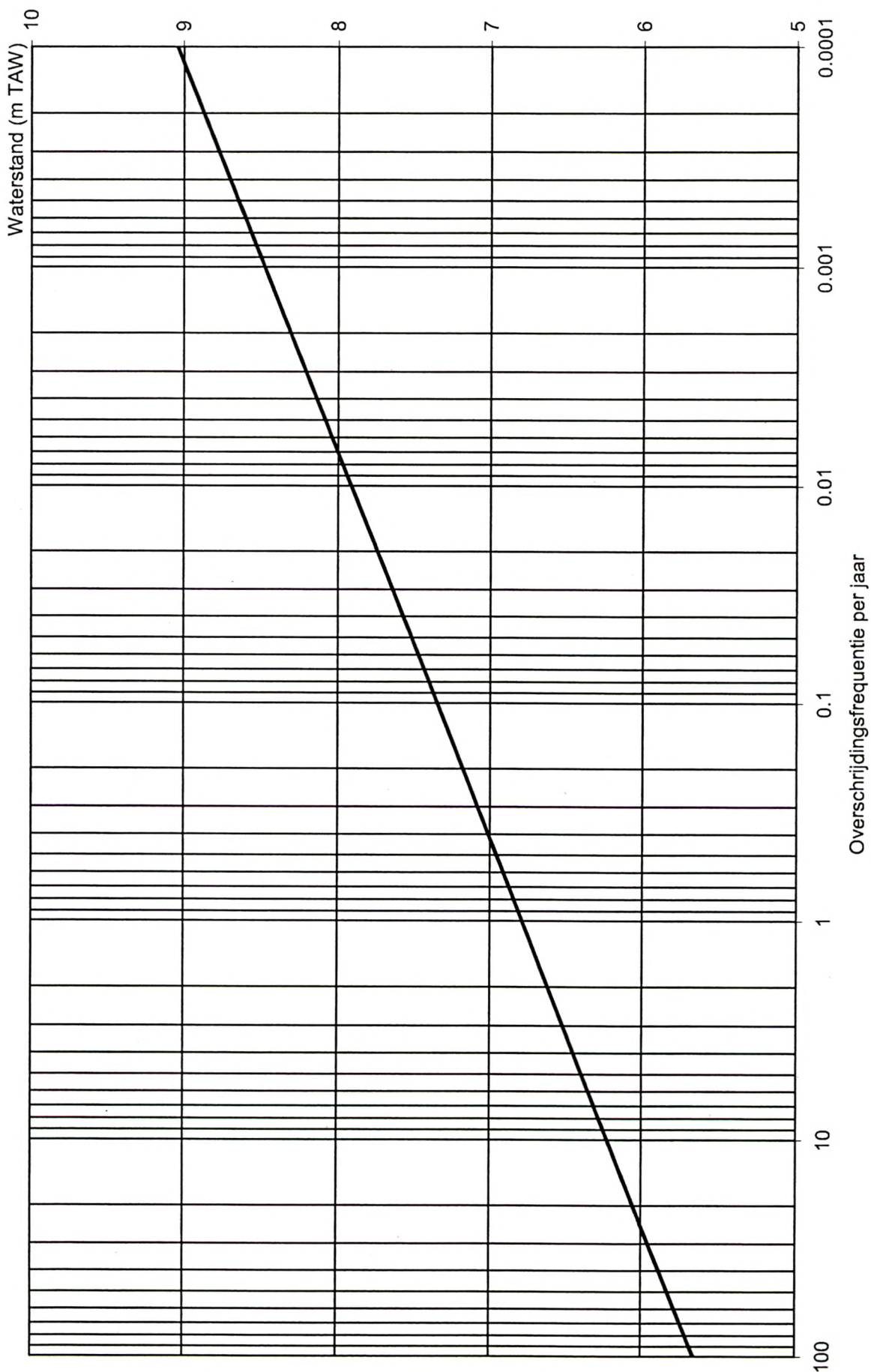


DRIETRAPSGETIJ ALS AFWAARTSE RANDVOORWAARDE



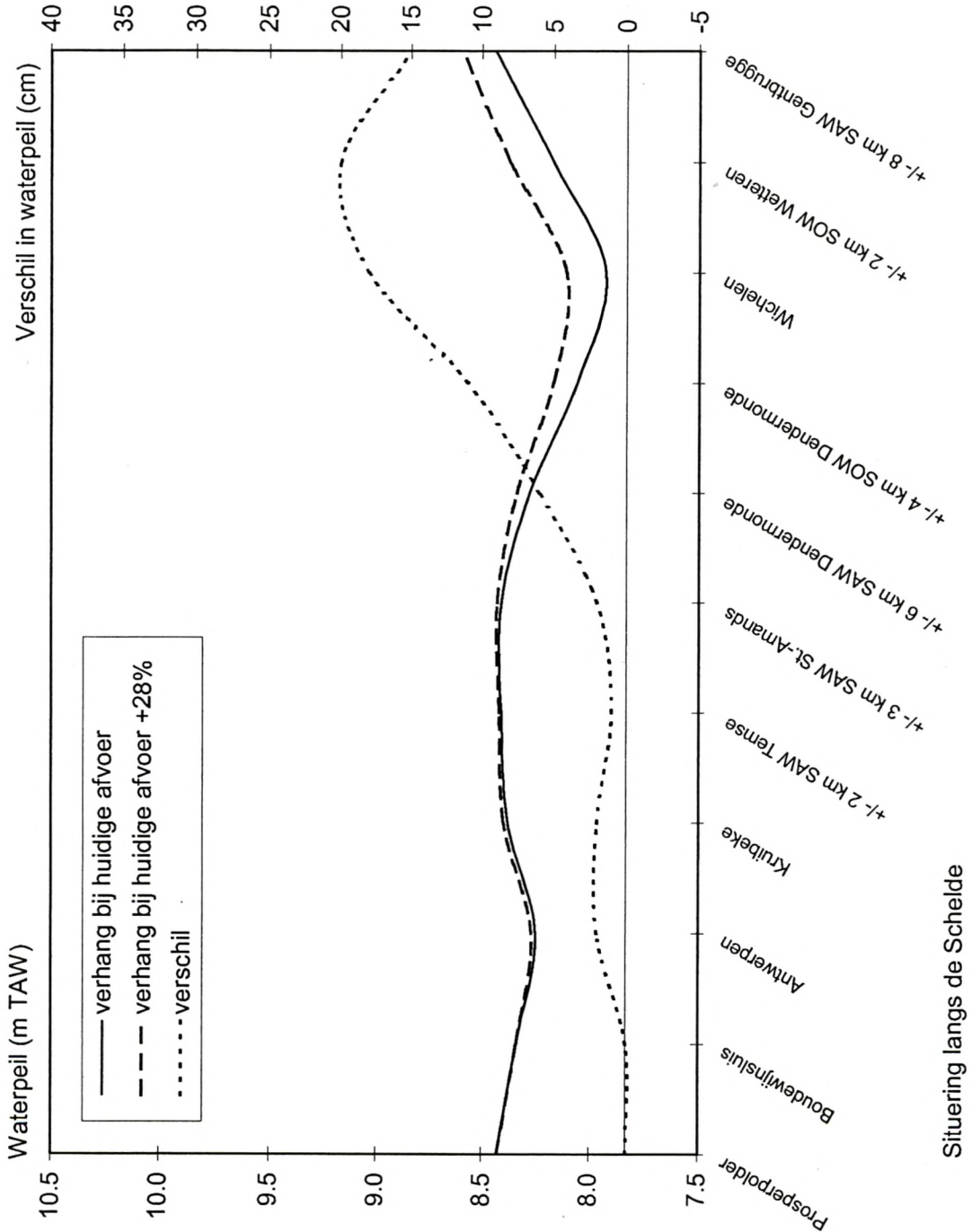


OVERSCHRIJDINGSLIJN VAN DE HOOGWATERSTANDEN TE
ANTWERPEN (1970 - 1990)





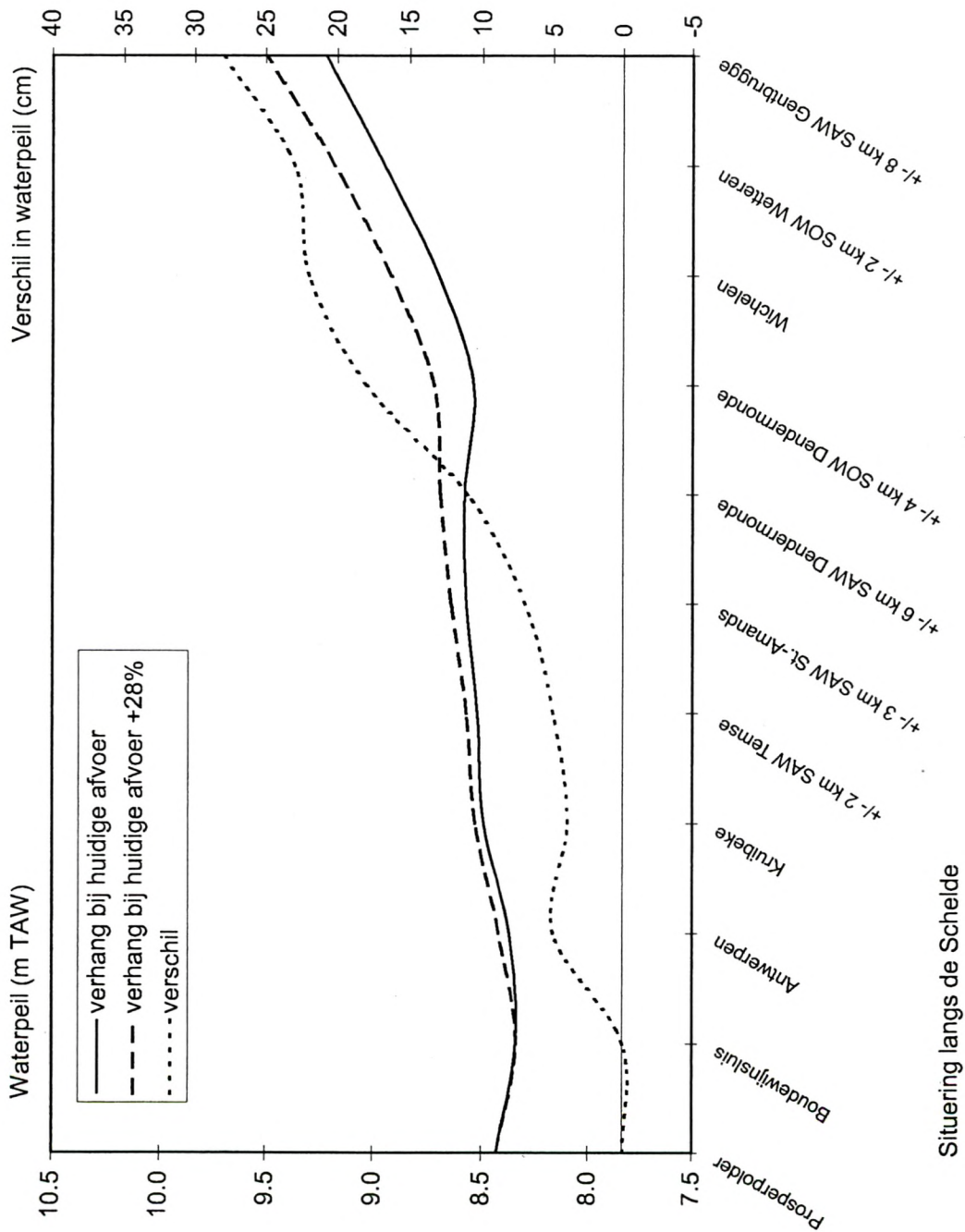
VERHANGLIJNEN LANGS DE SCHELDE BIJ 1-JAARLIJKS
DEBIET



Situering langs de Schelde



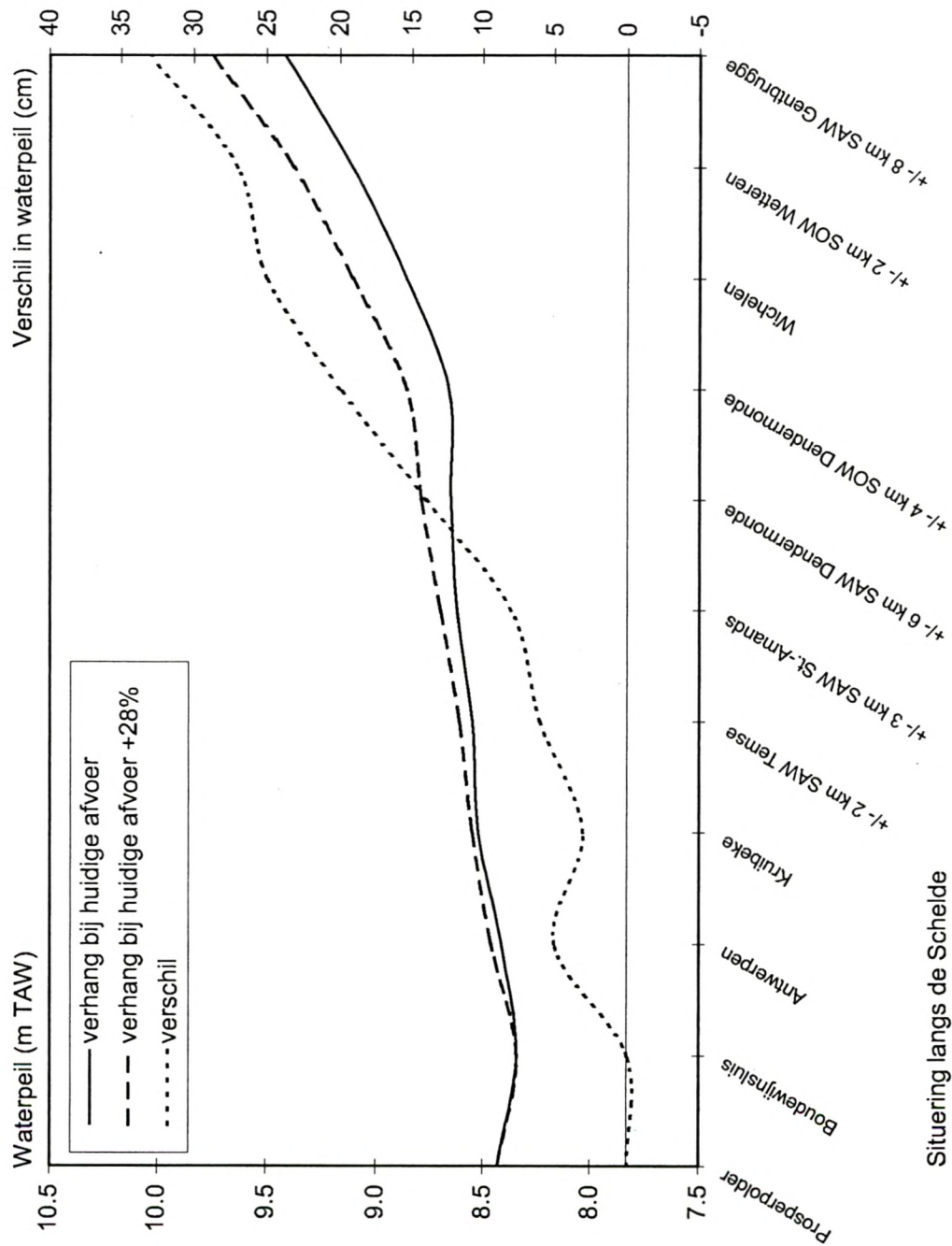
VERHANGLIJNEN LANGS DE SCHELDE BIJ 20-JAARLIJKS
DEBIET



Situering langs de Schelde



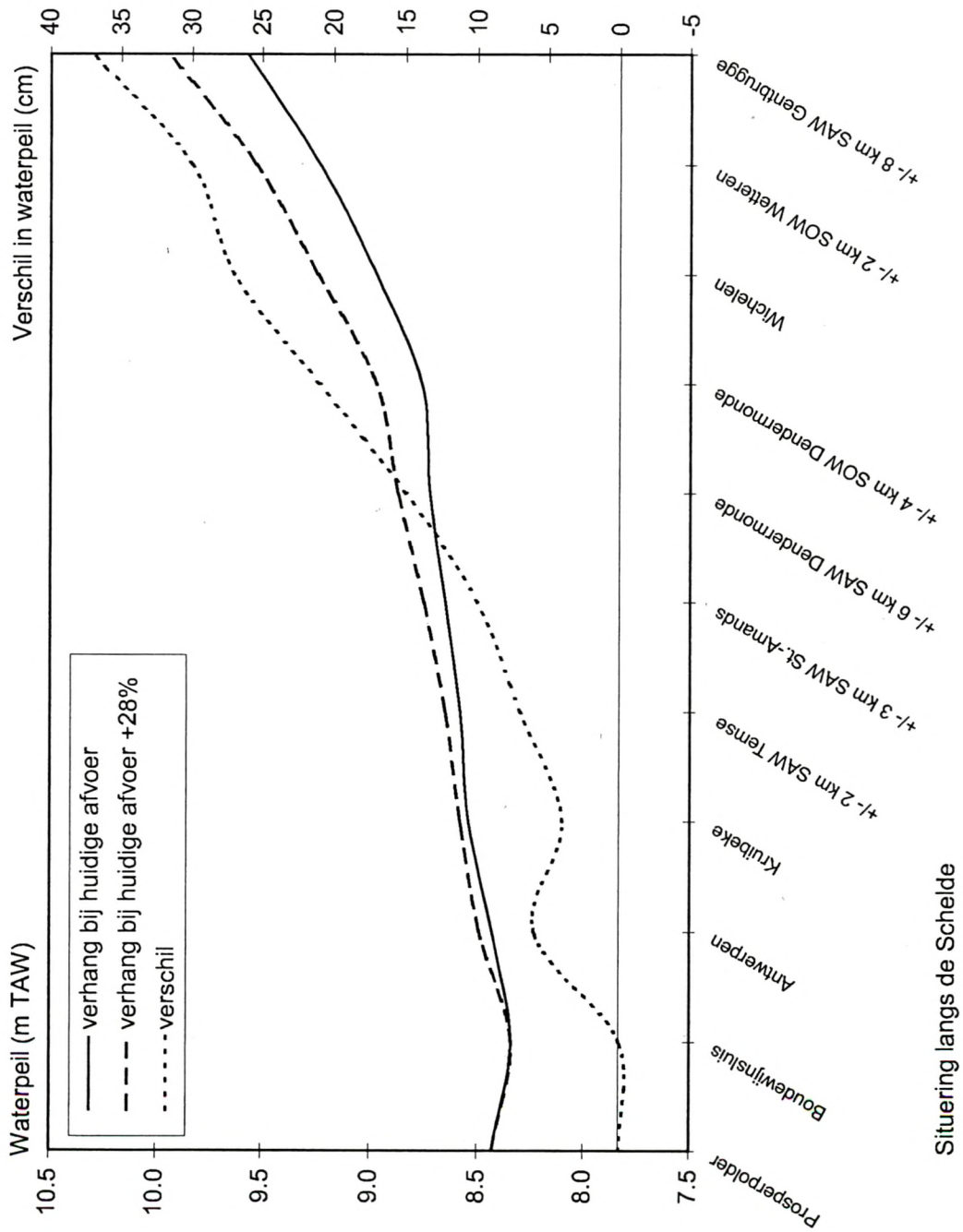
VERHANGLIJNEN LANGS DE SCHELDE BIJ 50-JAARLIJKS
DEBIET



Situering langs de Schelde



VERHANGLIJNEN LANGS DE SCHELDE BIJ 100-JAARLIJKS
DEBIET



BIJLAGE A

In deze bijlage wordt een uittreksel weergegeven uit de 'OCEANSPACE nieuwsbrief 211' van 14 februari 2000. Deze elektronisch verspreide nieuwsbrief kan online geraadpleegd worden via <http://www.Oceanspace.co.uk/>.

In het uittreksel wordt de publicatie van een artikel aangekondigd (verschenen bij BBC News Online) waarin de stelling dat de zeespiegel drastisch zal stijgen t.g.v. een massaal afsmelten van de ijskappen op Antarctica en Groenland sterk gerelativeerd wordt.

[Uittreksel uit Oceanspace Newsletter 211]

OCEANSPACE NEWSLETTER 211 14/02/2000

1. LIMITED SEA RISES EXPECTED

*Sea levels will rise by "several tens of centimetres" over the next century, according to Australian research. The finding is based on a computer model of future climate change that assumes the Earth's surface temperatures will rise by two to three degrees over the coming century. BBC New Online reports at http://news.bbc.co.uk/hi/english/sci/tech/newsid_639000/639241.stm that the Antarctic Cooperative Research Centre (CRC) says melting ice in both Antarctica and Greenland will cause **some** increase in sea levels, **but stresses that we are unlikely to see the catastrophic melting** forecast in some quarters. It goes on to quote Antarctic CRC's director, Professor Garth Paltridge who hopes the research will help dispel the myth that we are heading for a drowning world as a result of global warming. The BBC site has links to Antarctic CRC, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) the international body that is reviewing scientific estimates on long-term climate change and the Science & Environmental Policy Project.*

[Weergave van het artikel waarvan sprake in de nieuwsbrief]

LIMITED SEA RISES EXPECTED

Antarctic ice sheet could increase in volume

Sea levels will rise by "several tens of centimetres" over the next century, according to Australian research. The finding is based on a computer model of future climate change that assumes the Earth's surface temperatures will rise by two to three degrees over the coming century.

*The Antarctic Co-operative Research Centre (CRC) says **melting ice** in both Antarctica and Greenland will cause some increase in sea levels, but stresses that we are unlikely to see the catastrophic melting forecast in some quarters.*

The centre's director, Professor Garth Paltridge, told BBC News Online that he hoped the research would help dispel the myth that we are heading for a drowning world as a result of global warming.

Informed opinion

"Many of the public are still under the impression that there is a distinct possibility the ice cap on Antarctica will slide off into the sea and melt, thereby raising sea levels by quite disastrous amounts over the next few years or decades," he said.

"One often hears this sort of implication when, for instance, somebody reports that a particularly large part of an ice shelf has broken off from somewhere in Antarctica. It seems well worth while to make the point that informed scientific opinion does not agree with such extreme scenarios."

The Antarctic ice sheet is a very important focus for climate change research, not least because it helps to cool the Earth by reflecting the Sun's energy back into space. Were it to melt completely, it would add 55 meters to global sea levels. But the Antarctic CRC says this is not going to happen with a warming of just two or three degrees.

However, it is possible, it says, that the projected warming could increase the flow rate of grounded ice into the sea, adding perhaps one or two meters to sea levels over the next one or two thousand years.

Higher evaporation

The Antarctic CRC says its calculations suggest that a significant proportion of the slightly smaller Greenland ice sheet could disappear - but again over a period of millennia.

Indeed, the centre believes that in the short term, there will be relatively little melting of the ice-sheets with perhaps even an increase in volume of the Antarctic sheet as a result of greater snowfall caused by higher evaporation from warmer oceans.

Thus, for the next century or two, the worldwide rise in sea levels will come mainly from thermal expansion of the oceans and the melting of non-polar glaciers.

The findings are part of Australia's contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), an international body that is reviewing scientific estimates on long-term climate change. Part of the IPCC's role is to put together best-guess scenarios for the future.

Model problems

There will be some scientists who will reject this latest work because, like much of the other material assessed by the IPCC, it is based on computer models which sceptics of global warming regard as deeply flawed.

The models have to incorporate a multitude of complex interactions, including cloud formation, precipitation, oceanic heat transport and sea-ice formation. Many of these measurements have to be averaged otherwise the computing task would simply be impossible. Neither do we have a full understanding of some of these climate processes.

Critics argue that the task of forecasting climate accurately even ten years ahead is beyond current technology.

They also doubt the evidence that the Earth is currently experiencing a rapid warming, pointing to the inconsistencies in temperature records.



**WATERBOUWKUNDIG
LABORATORIUM**

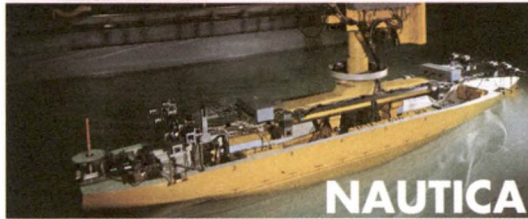
Berchemlei 115
B- 2140 ANTWERPEN
tel. 32(0)3/224 60 35
fax 32(0)3/224 60 36
e-mail: flanders.hydraulics@lin.vlaanderen.be
watlab@lin.vlaanderen.be

<http://watlab.lin.vlaanderen.be>

FLANDERS HYDRAULICS

WATERBOUWKUNDIG LABORATORIUM

FLANDERS HYDRAULICS



ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
departement Leefmilieu en Infrastructuur
administratie Waterwegen en Zeewezen
afdeling Waterbouwkundig Laboratorium