



Dienst Getijdewateren

Rijksinstituut voor kust en zee

De basispeilen langs de nederlandse kust

Eindverslag van het onderzoek naar de kansen op extreem hoge
waterstanden langs de Nederlandse Kust.

ir. A. van Urk

Rapport DGW-93.026

April 1993

INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding	3
1.1	Probleemstelling	5
1.2	Uitgangspunten	6
1.3	Samenvatting	7
1.4	Conclusies en aanbevelingen	8
2	De deltacommissie	11
3.	Samenvatting van het hernieuwde statistische onderzoek	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Selectie en verwerking	13
3.3	Invloed lengte meetreeksen	14
3.4	Basispeilen volgens methodiek Deltacommissie	15
4.	De samenhang langs de nederlandse kust	17
4.1	Probleemstelling	17
4.2	Een nadere analyse van de waarnemingen	17
4.3	Het fysische modelonderzoek naar de samenhang met Hoek van Holland	20
4.3.1	Inleiding	20
4.3.2	Opschaling van stormen zonder verplaatsing	21
4.3.3	Verplaatsing van stormen met beperkte opschaling	22
4.4	De nauwkeurigheid van de relatie met Hoek van Holland	23
5.	De resultaten	24
5.1	Methode	24
5.2	Bespreking van de resultaten	25

Bijlagen

Referenties 25

Bijlage 4.1	Verloop GHW, $5 \cdot 10^{-1}$ en 10^{-1} p.j. langs de kust
Bijlage 4.2	Verloop hellingen overschrijdingslijnen langs de kust
Bijlage 4.3	Overschrijdingsfrequenties windopzetten bij HW en de HW standen 1932-1985
Bijlage 4.4	Steilheden overschrijdingslijnen volgens Deltacommissie en recente gegevens
Bijlage 4.5	Overschrijdingsfrequenties HW-opzetten ≥ 30 cm aan 5 basisstations
Bijlage 4.6	Frequentie-betrekkingen met basispeilen
Bijlage 5.1	HW overschrijdingsfrequenties Vlissingen en Hoek van Holland
Bijlage 5.2	HW overschrijdingsfrequenties Den Helder en Harlingen
Bijlage 5.3	HW overschrijdingsfrequenties Delfzijl en West-Terschelling

Appendix a

Overwegingen en aanbevelingen van het knmi 41

Appendix b

Aanbevelingen over de weging van de resultaten 45

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Kort na de stormramp van 1953 stelde de Minister van Verkeer en Waterstaat de Deltacommissie in met als taak een plan op te stellen ter beveiliging van het land tegen overstroming. In haar eindverslag (ref. 1) staan ook voor een groot aantal peilmeetstations langs het Nederlandse kustgebied en de estuaria de zogenaamde basispeilen gegeven. Dit zijn de hoogwaterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar oftewel een kans van 1% per eeuw. In verband met de onzekerheden in de basispeilen, in het bijzonder die voor de Westelijke Waddenzee, beval de Deltacommissie aan verder te gaan met het onderzoek naar de hoogte van de basispeilen, op het moment dat voldoende lange meetreeksen ter beschikking zouden staan.

In 1984 is begonnen met een uitgebreid onderzoek naar de overschrijdingskansen van zeer hoge stormvloed in een samenwerkingsverband tussen het Centrum voor Wiskunde en Informatica (het vroegere Mathematisch Centrum), het KNMI en de Rijkswaterstaat (Ref.2). Het gaat hierbij om een analyse van de waarnemingen van de 5 hoofdstations, die onafhankelijk van elkaar zijn beschouwd, met als doel bij de huidige stand van de statistische en meteorologische kennis per station een zo nauwkeurig mogelijke uitspraak te doen over de stormvloedstanden behorende bij zeer kleine overschrijdingskansen. De stations zijn Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Bedacht moet hierbij worden dat voor de stations in de Westelijke-Waddenzee na de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 nu langere waarnemingsreeksen ter beschikking staan dan de Deltacommissie destijds had voor Hoek van Holland.

De resultaten van het statistische onderzoek zijn aangevuld met een analyse van de fysische samenhang onder zeer extreme stormvloedcondities. Dit om er zeker van te zijn dat de statistische schattingen van extreme standen fysisch geen tegenstrijdigheden bevatten (Ref.3).

In beginsel is de huidige analyse betrokken op dezelfde 5 hoofdstations. Tijdens de eindfase van het onderzoek kwam de veiligheid van de dijkkring Terschelling in de belangstelling. Een verandering van de basispeilen zou de discussie hierover direct beïnvloeden. Daarom is bij de uitwerking en presentatie zoveel mogelijk ook het peilmeetstation West-Terschelling betrokken. Voor alle andere peilmeetstations langs de kust en de estuaria zal nog een verdere uitwerking nodig zijn. De basispeilen voor de hoofdstations gelden daarvoor overigens als uitgangspunt.

Voorts is een zo volledig mogelijke afweging gemaakt van alle beschikbare informatie, zowel vanuit de statistiek van de afzonderlijke meetreeksen als vanuit de fysica van het systeem stormveld-Noordzee, om tot een afgewogen voorstel te komen voor de nieuwe basispeilen. De belangrijkste bouwstenen voor de onderhavige eindrapportage zijn de rapporten genoemd in ref.2 en 3, die als een integraal onderdeel van

de totale rapportage moeten worden gezien.

1.2 Uitgangspunten

Voor de behandeling van de uitkomsten van zowel het statistische als het fysische onderzoek en de uiteindelijk weging van beide uitkomsten tot een eindresultaat is het nodig dat enkele uitgangspunten worden gedefinieerd. Hierbij is enerzijds de continuïteit met het verleden van belang omdat hierop de huidige veiligheid van het land berust, maar moet anderszijds ook nieuwe informatie zoveel mogelijk benut worden. Een nieuwe beschouwing van de basispeilen is thans verantwoord omdat er veel nieuwe informatie beschikbaar is. De gehanteerde methodiek staat in het navolgende en de onderliggende nota's beschreven.

Bij het onderzoek naar de samenhang van extreme standen langs de kust kunnen er verschillen geconstateerd worden tussen de fysische samenhang en de statistische extrapolatie. Zo kunnen statistisch afgeleide basispeilen in twee stations fysisch enigszins strijdig zijn. Aan de andere kant kan uit het onderzoek naar de fysische samenhang van zeer extreme stormvloed en uitspraak over de frequenties van die verschijnselen worden gedaan. Een keus is noodzakelijk over hoe vanuit een of enkele stations extreme standen fysisch worden geëxtrapoleerd langs de kust en hoe deze resultaten worden meegewogen met de resultaten van de statistische extrapolatie naar hoge waterstanden met zeer lage frequenties. De Deltacommissie nam als uitgangspunt het station Hoek van Holland. Met behulp van enkele veronderstellingen over de samenhang lang de kust zijn vervolgens alle overschrijdingsfrequentielijnen en basispeilen hieraan gekoppeld.

De volgende uitgangspunten zijn voor het onderhavige onderzoek gesteld:

- Hoek van Holland blijft een centrale rol vervullen in de hele analyse. De veiligheid van Centraal Holland hangt hier mee samen en het is van belang dat ook voor de basispeilen van de overige stations een verband met die veiligheid wordt gelegd.
- Het basispeil te Hoek van Holland volgt uit het hernieuwde statistische onderzoek. Dit basispeil wordt mede uitgangspunt voor de vaststelling van de basispeilen in de rest van Nederland.
- Met behulp van een analyse van de samenhang op basis van de waarnemingen en de fysische extrapolatie langs de kust worden peilen in alle andere stations bepaald voor een vergelijkbare extreme meteorologische conditie boven de Noordzee als die, die leidt tot basispeil omstandigheden te Hoek van Holland (verder aangeduid met vergelijkbare zwaarte).
- Tevens wordt de nauwkeurigheid waarmee deze overeenkomende peilen kunnen worden bepaald geschat. Deze hangt o.a. samen met de kwaliteit van de gebruikte modellen en de gehanteerde extrapolaties waarin de afstand tot Hoek van Holland een rol speelt.
- Vanuit de statistiek wordt tevens de hoogwaterstand bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-4} per jaar bepaald, (verder 10^{-4} kwantiel genoemd) per station met de mogelijke spreiding.
- Voor ieder station zijn er zo twee schattingen voor de hoogwaterstand bij 10^{-4} per jaar, het peil afgeleid vanuit de fysica met vergelijkbare zwaarte, en het peil afgeleid uit de waarnemingen van het station zelf. Ieder met zijn eigen onnauwkeurigheid uitgedrukt in een spreiding.
- Met behulp van een wiskundig-statistische weging wordt daarna één basispeil per station vastgesteld.
- In dit rapport worden alleen de hoofdstations en West-Terschelling

behandeld. In een later stadium volgt het doorrekenen en de vaststelling van de basispeilen voor de overige stations. Op deze wijze wordt het volgende bereikt.

- De beveiliging van Centraal Holland, het landsdeel met de grootste bevolkingsdichtheid, blijft van cruciaal belang bij het denken over de veiligheid van het land.
- Er is continuïteit met de werkwijze van de Deltacommissie.
- Er wordt goed gebruik gemaakt van de vele extra waarnemingen in ieder station sinds de Deltacommissie haar werk deed.
- Er wordt op een zo goed mogelijke manier rekening gehouden met de onzekerheden die de verschillende benaderingen in zich hebben hetgeen een stap vooruit betekent op weg naar een volledig probabilistische beschouwing van de veiligheid van de dijkringen.
- Er wordt gebruik gemaakt van de ontwikkelde kennis van het gedrag van stormvloed en de Noordzee.

De hier gemaakte keus van één representatief station (Hoek van Holland) is overigens zeer wezenlijk en kan de resultaten beïnvloeden. Men kan zich afvragen of de Deltacommissie zich in de huidige situatie ook beperkt zou hebben tot Hoek van Holland of zouden ze ook andere hebben gebruikt? Voor de stations rond de Westelijke-Waddenzee zijn nu nagenoeg evenveel gegevens beschikbaar als de Deltacommissie destijds voor Hoek van Holland had. Verder hebben de stations Vlissingen en Delfzijl even lange reeksen als Hoek van Holland, en heeft een statistische extrapolatie van dit materiaal een vergelijkbare waarde.

Om een goede vergelijking tussen de resultaten mogelijk te maken worden in onderstaande verslaggeving steeds twee waarden genoemd voor de basispeilen van de Deltacommissie, te weten de peilen voor 1950 en die voor 1990. Verder gaan met de peilen van de Deltacommissie kan op twee manieren, met of zonder de correctie voor de stijging van het gemiddelde hoogwater over die tijd. In het laatste geval is er in feite sprake van een verlaging.

1.3 Samenvatting

Deze nota is het eindverslag van een hernieuwd onderzoek naar de basispeilen langs de Nederlandse kust. Kort na de stormramp van 1953 stelde de Minister van Verkeer en Waterstaat de Deltacommissie in met als taak een plan op te stellen ter beveiliging van het land tegen overstroming. In haar eindverslag geeft de Deltacommissie voor een groot aantal peilmeetstations langs het Nederlandse kustgebied en de estuaria de zogenaamde basispeilen. Dit zijn de hoogwaterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar oftewel een kans van 1% per eeuw. In verband met de onzekerheden in de basispeilen, in het bijzonder die voor de Westelijke Waddenzee in verband met de afsluiting van de Zuiderzee, beval de Deltacommissie aan verder te gaan met het onderzoek naar de hoogte van de basispeilen, op het moment dat voldoende lange meetreeksen ter beschikking zouden staan.

De belangrijke uitgangspunten gehanteerd bij het onderhavige onderzoek zijn:

- Hoek van Holland blijft een centrale rol vervullen in de hele analyse. De veiligheid van Centraal Holland hangt hier mee samen.
- Met behulp van een analyse van de samenhang in extreem hoge waterstanden langs de kust op basis van de waarnemingen, statistische en fysische extrapolatie worden vergelijkbare peilen in de

andere stations bepaald. Hierbij worden de onzekerheden in de verschillende benaderingswijzen meegewogen in het eindresultaat. Het hernieuwde statistische onderzoek is in 1984 begonnen in een samenwerkingsverband tussen experts van het Centrum voor Wiskunde en Informatica (het vroegere Mathematisch Centrum), het KNMI en de Rijkswaterstaat. Het gaat hierbij om een analyse van de waarnemingen in 5 hoofd-stations, die onafhankelijk van elkaar zijn beschouwd, met als doel bij de huidige stand van de statistische en meteorologische kennis per station een zo nauwkeurig mogelijke uitspraak te doen over de stormvloedstanden behorende bij zeer kleine overschrijdingskansen. De stations zijn Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen en Delfzijl.

Tijdens de eindfase van het onderzoek kwam de veiligheid van de dijkkring Terschelling in de belangstelling. Daarom is bij de uitwerking en presentatie zoveel mogelijk ook het peilmeetstation West-Terschelling betrokken.

De basis van het onderzoek naar de samenhang langs de kust wordt gevormd door wiskundige fysische modellen. Hierbij zijn stormvelden boven de Noordzee gesimuleerd die basispeilomstandigheden opleveren. Voor de uiteindelijke basispeilen langs de Nederlandse kust wordt een verband gelegd met het basispeil voor Hoek van Holland. Langs twee wegen is deze samenhang bepaald. In de eerste plaats door een analyse van de relatie met Hoek van Holland in het gebied van de waarnemingen. Een vergelijking vindt plaats met wat de Deltacommissie vond voor de situatie in de jaren vijftig. In de tweede plaats door middel van genoemd modelonderzoek.

Langs deze weg is een zo volledig mogelijke afweging gemaakt van alle beschikbare informatie, zowel vanuit de statistiek van de afzonderlijke meetreeksen als vanuit de fysica van het systeem stormveld-Noordzee. Alle resultaten worden gewogen met behulp van de geschatte onzekerheden. Vaststelling van de aldus bepaalde nieuwe basispeilen is thans verantwoord gezien de nieuwe informatie die thans beschikbaar is.

1.4 Conclusies en aanbevelingen

De volgende basispeilen worden voorgesteld:

Station	Basispeilen Deltacommissie	Basispeilen uit hernieuwd onderzoek
Vlissingen	565	545
Hoek van Holland	500	500
Den Helder	505	440
Harlingen	580	500
Delfzijl	640	615
West-Terschelling	530	430
Waarden in NAP +cm		

In het hernieuwde onderzoek naar de basispeilen is de werkwijze van Deltacommissie genuanceerd toegepast. Een koppeling is gelegd met het basispeil te Hoek van Holland evenals de Deltacommissie deed. Daarnaast is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de informatie uit de waterstandswaarnemingen in ieder station afzonderlijk. Omdat na afsluiting van de Zuiderzee in 1932 nu relatief lange

waarnemingsreeksen ter beschikking staan kon voor de Westelijke-Waddenzee de interpolatiemethode van de Deltacommissie worden verlaten.

Het hernieuwde statistische onderzoek levert lagere basispeilen op dan die zoals vastgesteld door de Deltacommissie. Deze reductie is het grootste in in het gebied van de Westelijke Waddenzee.

De volledige overschrijdingsfrequentielijnen van de hoogwaterstanden moeten nog worden vastgesteld voor de nieuwe situatie. De reductie van de basispeilen is voor de ontwerppeilen bij andere veiligheidsniveaus als 1/4000 per jaar en 1/2000 per jaar niet dezelfde maar zal iets minder zijn.

Voor alle andere peilmeetstations langs de kust en de estuaria is nog een verdere uitwerking nodig. Eventuele nieuwe basispeilen voor de hoofdstations gelden daarvoor overigens als uitgangspunt.

De zeespiegelstijging die sinds de analyse van de Deltacommissie is opgetreden wordt thans gecompenseerd door lagere schattingen van de basispeilen.

Benadrukt wordt dat hier zo goed mogelijk de gemiddelde verwachtingswaarde van de basispeilen is geschat met gebruikmaking van de ter beschikking staande informatie en hulpmiddelen. Verder is meer inzicht ontstaan in de onzekerheden van de schatting van de basispeilen.

Een nadere analyse zal worden uitgevoerd naar de onzekerheid die nu overblijft in deze schatting van de basispeilen en hoe deze op een verantwoorde wijze in het ontwerp of de toetsing van de waterkeringen kan worden verdisconteerd. Dit past in de lijn naar het probabilistisch ontwerpen van waterkeringen, waarvoor technieken worden ontwikkeld in het kader van de Technische Adviescommissie Waterkeringen. Bij de hiernavolgende toetsingsrondes in het kader van de Wet op de Waterkeringen verdient dit alle aandacht.

2 De deltacommissie

Hier wordt een korte samenvatting gegeven van de werkwijze van de Deltacommissie bij de vaststelling van de basispeilen (Ref.1). De grondslag voor de vaststelling van de basispeilen vormden indertijd:

- een studie van het KNMI naar de depressiebanen van stormvloed, die zich te Hellevoetsluis als zwaar hadden gemanifesteerd en
- een wiskundig-statistische analyse van hoge hoogwaterstanden te Hoek van Holland uit de periode 1900-1950 door het Mathematisch Centrum te Amsterdam.

De werkwijze van de Deltacommissie is hieronder kort beschreven in de vorm van een aantal stappen. Verder zij verwezen naar ref. 1 en 2. De volgende stappen zijn te onderscheiden:

- Selectie van alle stormvloed met een windopzet tijdens hoogwater van meer dan 1,60 m te Hellevoetsluis. Daarna volgde een reproductie van de bijbehorende weersituaties en de depressiebanen, de zogenaamde depressiebaanselectie. Het gebied of venster boven de Noordzee waar al deze depressies doorheen trokken kon zo worden vastgesteld.
- Hoek van Holland is vervolgens gekozen als representatief station voor heel Nederland voor zover het het gedrag van zeer hoge stormvloed betrof. Daarna volgde een selectie van de hoogwaterstanden te Hoek van Holland met een windopzet hoger dan 0,50 m waarvan de depressiebaan door dat venster loopt. Deze werden als potentieel gevaarlijk beschouwd.
- Verdere selecties waren: de beperking tot de hoogwaterstanden uit de wintermaanden (nov/dec/jan) en de beperking tot 1 hoogwaterstand per stormvloed.
- Deze data werden vervolgens door het Mathematisch Centrum uitgebreid geanalyseerd. Het MC beval uiteindelijk de zgn. exponentiële verdeling aan en kwam met een overschrijdingsfrequentielijn die bij 10^{-4} per jaar een stand van NAP + 5,13 m gaf.
- De Deltacommissie koos vervolgens een overschrijdingsfrequentielijn voor Hoek van Holland door NAP + 5 m bij een kans van 10^{-4} per jaar. De helling van de overschrijdingslijnen van de andere stations werd nagenoeg gelijk verondersteld aan die van Hoek van Holland voor het gebied tussen bij benadering 10^{-3} en 10^{-4} per jaar.
- Tot de hoogwaterstanden behorende bij eens in de 50 jaar werden de overschrijdingsfrequentielijnen bepaald door de waarnemingen. Tussen 1/50 per jaar en 10^{-3} per jaar werd een overgang geschat op grond van beschouwingen over de samenhang. Voor de Waddenzee werden de overschrijdingsfrequentielijnen en basispeilen vastgesteld door middel van interpolatie tussen IJmuiden en Zoutkamp.

Bij deze werkwijze van de Deltacommissie, worden de volgende kanttekeningen geplaatst:

- De depressiebaan selectie is enigszins subjectief.
- De exponentiële verdeling is niet per sé de juiste voor de stochastische

beschrijving van extreme stormvloedstanden.

- De interpolatie voor de Westelijke-Waddenzee wordt sterk bepaald door Zoutkamp. Dit station lag echter achterin de Lauwerszee. De overschrijdingsfrequentielijn voor dat station is relatief steil in het gebied van de waarnemingen, hetgeen doorwerkt in alle te interpoleren stations.
- De Deltacommissie heeft zich beperkt tot de keus Hoek van Holland als representatief station voor de Nederlandse kust. Dit onder andere omdat:
Vlissingen beïnvloeding ondervindt door het Engels Kanaal, IJmuiden gevoelig is voor havenslingeringen en Den Helder en Harlingen beïnvloed waren door de afsluiting van de Zuiderzee en er slechts korte homogene meetreeksen beschikbaar waren. Hoek van Holland (en Hellevoetsluis) was daarom destijds de beste keus.

3 Samenvatting van het hernieuwde statistische onderzoek

3.1 Inleiding

Het onderzoek is uitgevoerd voor de vijf hoofdstations, waarbij hoogwaterstanden met de volgende meetreeks lengte zijn verwerkt:

Vlissingen	1881...1985
Hoek van Holland	1887...1985
Den Helder	1932...1985
Harlingen	1932...1985
Delfzijl	1881...1985

De genoemde perioden beginnen vanaf het moment dat er ononderbroken homogene reeksen hoog- en laagwaterstanden van de betrokken stations zijn geregistreerd. Bepalend voor de homogeniteit is de herleidbaarheid van de waarnemingen naar de huidige waterstaatkundige toestand. Hierdoor valt het begintijdstip voor de beide Waddenzeestations na de afsluiting van de Zuiderzee.

Voor elk van de 5 stations zijn hoogwaterstanden (HW's) met zeer kleine overschrijdingskansen berekend met behulp van wiskundig-statistische modellen. Daartoe is per station het beschikbare gegevensmateriaal eerst onderworpen aan selecties ten einde autocorrelatie uit te sluiten en homogeniteit te verzekeren. In beginsel stonden voor de vaststelling van de gezochte hoge HW's twee wegen open:

In de eerste plaats de statistische verwerking. Een HW is in beginsel de som van een deterministische component (het astronomische hoogwater) en een stochastische, (de hoogwateropzet, HW-opzet). De eerste is het gevolg van de aantrekkingskrachten van zon en maan, waarvan de uitwerking ter plaatse wisselt volgens een samenstel van cycli. De sterker schommelende HW-opzet wordt veroorzaakt door meteorologische factoren (wind, luchtdruk). De toegepaste statistische methoden zijn ontwikkeld voor stochastische niet cyclische variabelen, zodat hun toepassing op HW's strikt genomen niet ideaal lijkt. Daar echter ieder samentreffen van een bepaald astronomisch hoogwater en een HW-opzet een toevalskarakter heeft is dit geen bezwaar. In de tweede plaats de statistische verwerking van relevante windopzetten. Na de vaststelling van de verdelingsfunctie voor de stochastische HW-opzet kan die gekoppeld worden aan de verdelingsfunctie van het astronomische hoogwater. Die koppeling was echter langs theoretische weg nog niet voor alle toegepaste methoden mogelijk.

3.2 Selectie en verwerking

Per station zijn de volgende bewerkingen van de meetreeksen verricht:

- Herberekening van de astronomische hoog- respectievelijk laagwaterstanden voor de genoemde perioden. Dit was nodig omdat

- de berekeningen uit het verleden niet consistent genoeg waren.
- Berekening van de HW-opzet als het verschil tussen het opgetreden HW en bijbehorend herberekend astronomisch hoogwater.
- Herleiding van de HW's naar de toestand 1985 i.v.m. de opgetreden veranderingen van de jaargemiddelden van de HW's.
- Ter homogenisering van het waarnemingsmateriaal zijn de volgende selecties toegepast zoals de beperking tot gegevens uit het stormseizoen van 1 oktober tot 15 maart en het invoeren van ondergrenzen (drempels) voor zowel de HW-opzetten als de HW's.
- Klimatologische, meteorologische en hydrologische overwegingen hebben geleid tot een verdere selectie ter verwijdering van auto-correlatie.

De toegepaste methoden zijn gegrond op de theorie van de extreme waarden uit de wiskundige statistiek. Deze onderscheidt twee typen verdelingen, de verdelingsvrije en de verdelingsgebonden verdeling. Voor een uitgebreide beschrijving van de methoden wordt verwezen naar ref.2. Uiteindelijk is gekozen voor de zogenoemde VVM-0 methode, als de meest betrouwbare voor dit doel. Dit is een verdelingsvrije methode waarbij van te voren geen enkele vooronderstelling is gemaakt over de aard van de verdelingsfunctie. Deze wordt volledig door het waarnemingsmateriaal bepaald. De methode is overigens in de loop van het onderzoek ontwikkeld.

Tevens zijn de 95% betrouwbaarheidsintervallen bepaald. De breedte van het berekende betrouwbaarheidsinterval mag overigens niet meewegen in de keus van de verdelingsfunctie omdat deze sterk wordt beïnvloed door vooronderstellingen vooraf. Als er meer voorondersteld wordt, bijvoorbeeld over het type verdelingsfunctie, wordt het betrouwbaarheidsinterval kleiner. De betrouwbaarheid neemt echter dan slechts schijnbaar toe omdat de onzekerheid in de vooronderstelling zelf niet wordt meegewogen.

tabel 3.1
schattingen van het 10^{-4} -
kwantiel (nap+cm) en de bijbe-
horende 95%-
betrouwbaarheidsintervallen
(cm) voor de toestand 1985

methode	Vlissingen	Hoek van Holland	Den Helder	Harlingen	Delfzijl
VVM-0	540 ±140	500 ±190	425 ±100	460 ±80	600 ±150
bp	565	500	505	580	640
hs (herleid)	466	402	331	379	480
hs ₀	455 (1953)	385 (1953)	325 (1953)	369 ('54'76)	453 (1901)

- bp = huidige basispeil zoals vastgesteld door de Deltacommissie
- hs (herleid) = hoogste stand van het gebruikte, naar 1985 herleide, HW-bestand
- hs₀ = hoogste waargenomen stand uit de beschouwde periode, met jaar (de hoogste bekende stand van Delfzijl is NAP +460 cm uit 1825)

Ondezocht is in hoeverre de verlenging van de waarnemingsreeksen tot op heden tot andere resultaten zou leiden. Dit was niet het geval zodat verder gewerkt is met genoemde uitkomsten.

3.3 Invloed lengte meetreeksen

Ten einde de uitkomsten van de stations onderling te kunnen vergelijken is de methode VVM-0 ook nog toegepast op het station IJmuiden, voor de periode 1883-1985 en de stations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, West-Terschelling en Delfzijl voor de periode 1932-1985.

De uitkomsten voor de hoogwaterstanden bij 10^{-4} per jaar, het 10^{-4} -kwantiel, is aangegeven in tabel 3.2, waaruit duidelijk blijkt dat de resultaten voor de reeksen van 53 jaar lager zijn dan voor de zoveel langere reeksen, beginnend in de 19e eeuw. Hieruit wordt geconcludeerd dat de geschatte waarden voor de beide Waddenzeestations Den Helder en Harlingen waarschijnlijk een 5 à 6 dm lager zijn dan gevonden zou zijn indien ook voor deze stations overeenkomstige lange reeksen beschikbaar geweest zouden zijn. De correctie voor de VVM-0 methode is bepaald op 5,5 dm.

tabel 3.2
schattingen van het 10^{-4}
kwantiel voor de lange en korte
perioden (nap+cm) met het 95%
betrouwbaarheidsinterval(cm)

periode	Vlissingen	Hoek v Holl	IJmuiden	Delfzijl
lange periode	540 ± 140	500 ± 190	530 ± 210	600 ± 150
korte periode	500 ± 165	470 ± 200	470 ± 240	545 ± 165

De waarden van de 10^{-4} kwantielen herleid uit de periode 1932-1985 van Den Helder, Harlingen en ook West-Terschelling voor de VVM-0 methode zijn vervolgens verhoogd met 5,5 dm. Deze gecorrigeerde waarden staan weergegeven in Tabel 3.1. Feitelijk zijn deze nu gebaseerd op een langere periode dan 1932-1985, zij het afgeleid uit andere stations. Wat de spreiding betreft van de nieuwe 10^{-4} kwantielen is een vergelijking gemaakt van de spreidingen van de 53-jarige periode en de langere periode voor de stations vanwaaruit de correctie is bepaald. Deze wijken slechts weinig af van die voor de lange reeks. De banden staan ook gegeven in tabel 3.2. Om deze reden is voor de spreiding van de stations in de Westelijke-Waddenzee die van de 53 jarige reeks genomen.

De beste schattingen van de 10^{-4} kwantielen met het 95% betrouwbaarheidsinterval voor de stations rond de W-Waddenzee worden nu:

Den Helder	NAP + 425 ± 100 cm
Harlingen	NAP + 460 ± 80 cm
W-Terschelling	NAP + 405 ± 60 cm

Het 95% betrouwbaarheidsinterval komt globaal overeen met _twee maal de standaardafwijking. In het navolgende wordt verder gewerkt met de standaard afwijking.

3.4 Basispeilen volgens methodiek Deltacommissie

Voor de volledigheid wordt nog een vergelijking gemaakt tussen de huidige basispeilen en peilen die verkregen zouden worden als de methodiek van de Deltacommissie zou worden toegepast op de verlengde reeksen. Vervolgens kunnen deze waarden weer worden vergeleken met de resultaten van het hernieuwde statistische onderzoek. In tabel 3.3 staat een aantal waarden genoemd.

De huidige basispeilen volgens de Deltacommissie staan in kolom (2). Deze gelden in feite voor de situatie van 1950. Sinds die tijd is echter de zeespiegel gestegen en het getij veranderd. De correctie hiervoor varieert per stations maar is gemiddeld ongeveer 15 cm. De basispeilen van de Deltacommissie voor de huidige situatie zouden daarmee ook ongeveer 15 cm hoger zijn; ze staan in kolom (3).

De frequentieverdelingen die de Deltacommissie gebruikte zijn weergegeven in de kolommen (4), (6), (8) en (9). Vanouds bekende

statistische technieken zijn de Gumbelverdeling voor de jaarextremen en de Exponentiële verdeling voor de waarden boven een bepaalde grenswaarde of drempel. Beide zijn ook door de Deltacommissie gebruikt. Echter de Deltacommissie deed dit alleen voor Hoek van Holland terwijl in deze kolommen de waarden staan zoals ze per station zijn afgeleid op de verlengde reeksen. De minimale ondergrens (kolom 6) is de overeenkomende ondergrens per station volgens de methodiek van de Deltacommissie voor Hoek van Holland. Voor de kolommen (8) en (9) liggen de ondergrenzen hoger. Tevens zijn de spreidingen vermeld.

Wanneer de werkwijze van de Deltacommissie met Hoek van Holland als uitgangspunt wordt toegepast op de gegevens tot nu toe, dan ontstaat een resultaat dat weergegeven is in kolom (10). De helling van de overschrijdingsfrequentielijn van Hoek van Holland boven de waarde bij eens per 10 jaar, wordt dan gehanteerd om vanaf de 10^{-1} waarden van de andere stations te extrapoleren. De helling van de overschrijdingsfrequentielijnen van alle stations wordt dan gelijk verondersteld. Zoals verder in dit rapport zal worden aangegeven, kan deze benadering van de Delta Commissie nu genuanceerd worden toegepast, met name omdat thans aanzienlijk meer informatie ter beschikking staat.

De resultaten van het hernieuwd statistisch onderzoek volgens de VVM-0 methode staan in de kolommen (11) en (12).

tabel 3.3

10-4 kwantielen volgens methodiek deltacommissie vergeleken met nieuwe methoden

Station	Peil Delta- Commissie 1950 1990		Gumbel	Exponentiël met versch. ondergrens					Delta Comm nu.	Hernieuwd Statist. Ond. VVM-O	
				σ	Minim.	σ	>5*pj	>1*pj			σ
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Vlissingen	565	580	545	±35	545	±30	580	545	580	540	±70
Hoek v.Holl.	500	515	490	±40	520	±30	520	480	500*	500	±95
Den Helder	505	520	485	±65	545	±50	515	450	470	425	±50
Harlingen	580	595	640	±85	720	±60	670	570	550	460	±40
Delfzijl	640	655	710	±65	765	±45	750	700	610	600	±75
W-Tersch.**	530	545					560	480	500	405	±30

* per definitie gelijk aan het resultaat van het hernieuwd statistisch onderzoek. NAP + 5m te Hoek van Holland is vertaald met deze methode naar de andere stations

** voor West-Terschelling is niet alles uitgewerkt.

De hoogwaterstanden zijn in NAP + cm; σ 's in cm

Opvallend is het volgende:

- Het hernieuwde statistische onderzoek levert lagere peilen dan de huidige. Dit is het sterkste in de Westelijke-Waddenzee. Vergelijk kolom (11) met kolommen (2) en (3).
- Voor Vlissingen en Hoek van Holland ontlopen de resultaten van de verschillende methodes elkaar niet veel.
- Opvallend zijn de lagere uitkomsten van de exponentiële verdeling bij een hogere ondergrens, kolommen (6)-(9). In de Westelijke-Waddenzee is dit het sterkste hetgeen erop duidt dat de exponentiële verdeling en in het verlengde daarvan de Gumbelverdeling niet goed voldoet.
- Voor Delfzijl geven de Gumbel- en de Exponentiële verdeling relatief hoge waarden.

4 DE SAMENHANG LANGS DE NEDERLANDSE KUST

4.1 Probleemstelling

Zoals in de uitgangspunten is aangegeven blijft Hoek van Holland een belangrijke rol vervullen bij de bepaling van de basispeilen. Bij het hernieuwde statistische onderzoek zijn de stations apart behandeld. Echter voor de uiteindelijke vaststelling van de basispeilen langs de Nederlandse kust moet ook een verband aanwezig zijn met het basispeil afgeleid voor Hoek van Holland. Impliciet betekent dit dat de fysische samenhang moet worden gecheckt en waar nodig in de standen verdisconteerd. Langs twee wegen is deze samenhang bepaald. In de eerste plaats door een analyse van de relatie met Hoek van Holland in het gebied van de waarnemingen. In de tweede plaats door middel van modelonderzoek onder extreme omstandigheden, bij niet eerder opgetreden superstormen (Ref. 3).

Uiteindelijk wordt een relatie vastgesteld waarbij peilen worden herleid in alle stations die een vergelijkbare zwaarte hebben als het basispeil te Hoek van Holland van NAP +5m. De onzekerheid in die schatting is tevens gekwantificeerd, zodat weging met de uitkomsten van het hernieuwde statistische onderzoek mogelijk wordt.

4.2. Een nadere analyse van de waarnemingen

Een analyse wordt uitgevoerd op de waarnemingen in het gebied waar nog niet geëxtrapolerd hoeft te worden. Dit om na te gaan welk verband er tussen de verschillende stations bestaat. Ook is van belang wat de verschillen zijn met wat de Deltacommissie vond. In het statistische onderzoek zoals samengevat in hoofdstuk 3 zijn de stations afzonderlijk beschouwd. De Deltacommissie koppelde uiteindelijk alles aan Hoek van Holland en beschouwde de helling van de overschrijdingsfrequentielijn als maatgevend voor de extrapolatie van de overige stations in het gebied met de zeer hoge stormvloeden (overschrijdingsfrequentie lager dan 10^{-3} pj). Mede daarom heeft de Deltacommissie ook veel aandacht besteed aan de samenhang langs de kust en in de estuaria.

Voor de bepaling van deze samenhang zijn enkele aanvullende gegevens van belang. In Tabel 4.1. is voor een aantal stations een aantal waarden weergegeven in het gebied van gemiddeld hoogwater tot aan de frequentie van 10^{-1} per jaar. De waarden zijn geldig voor de situatie 1990. Ook voor enkele andere stations langs de kust zijn dergelijke waarden afgeleid. Verder zijn in deze tabel de hoogst opgetreden standen en de huidige basispeilen weergegeven om een en ander te kunnen vergelijken.

De kenmerkende hoogwaterstanden zijn weergegeven in de kolommen (2), (3), (4) en (5). De waarden behorende bij een zekere overschrijdingsfrequentie zijn afgelezen uit het geselecteerde en gehomogeniseerde materiaal van het hernieuwde statistische onderzoek.

Omdat het frequenties betreft die niet verder gaan dan 10^{-1} per jaar, berekend uit reeksen met een lengte van meer dan 60 respectievelijk 100 jaar zijn deze waarden redelijk betrouwbaar en is er geen sprake van onzekerheid in het beginpunt van de extrapolatie.

De hoogst opgetreden hoogwaterstanden in de waarnemingsperiode zijn gecorrigeerd voor de stijging van het gemiddelde hoogwater weergegeven in kolom (6).

De huidige basispeilen volgens de Deltacommissie staan in kolom (7). In kolom (8) is een globale correctie ingevoerd voor de stijging van het gemiddeld hoogwater sinds 1950.

Relevante verschillen die een indruk geven van de samenhang zijn weergegeven in de kolommen (9), (10) en (11). De weergegeven verschillen geven een indruk van de helling van de overschrijdingsfrequentielijnen van HW's in het gebied van de waarnemingen. Verschillen in gedrag tussen stations langs de westkust van Nederland en die langs de Waddenzee worden zo zichtbaar. Deze verschillen zijn gevisualiseerd op de bijlagen 4.1 en 4.2.

TABEL 4.1: Enkele aanvullende gegevens voor de samenhang langs de kust

Station	Gem. HW	HW bij overschrijdings frequenties van			Hoogst opgetr.	Basispeil Deltacomm.		Verschillen tussen enkele kolommen				
		1/pj	1/2pj	1/10pj		1950	1990	4-2	5-4	5-3	8-6	8-4
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Vlissingen	205	320	338	379	466	565	580	133	41	59	114	242
Hoek v. Holl	111	235	254	298	402	500	515	143	44	63	113	261
IJmuiden	97	223	242	287	402	515	530	145	45	64	128	288
Den Helder	58	198	219	269	331	505	520	161	50	71	161	301
W-Tersch.	83	228	248	296	330	530	545	165	48	68	215	297
Harlingen	95	273	295	347	379	580	595	200	52	74	216	300
Delfzijl	135	309	338	408	480	640	655	203	70	99	175	317

Toelichting:

- pj is in feite per stormseizoen.
- De waarden gelden voor de toestand eind tachtiger jaren
- De hoogwaterstanden zijn in NAP + cm; de verschillen in cm.
- 1/2 pj komt globaal overeen met het zogenaamde Grenspeil;

In de grafieken, weergegeven op bijlage 4.1, zijn het gemiddeld hoogwater, de 1/2 pj waarde en de 1/10 pj waarde uitgezet langs de hele kust. Opvallend is dat het verloop van het gemiddeld hoogwater goed is terug te vinden in de hogere waarden. Het verschil tussen de verschillende lijnen is een maat voor de helling van de overschrijdingsfrequentielijnen.

Op bijlage 4.2. staan de verschillen van de 1/2 pj waarde t.o.v. het gemiddeld HW en het verschil van 1*pj t.o.v. 1/10*pj. Deze laatste waarde wordt ook wel de decimeringshoogte genoemd. Opvallend is het volgende:

- De afstand van het gemiddeld hoogwater tot het grenspeil verloopt langs de kust veel sterker dan de decimeringshoogte op een iets hoger niveau en neemt ook sterk toe van zuid naar noord.
- De decimeringshoogte tussen 1*pj en 1/10*pj verloopt vrij gelijkmatig langs de hele kust en de waddeneilanden (zie ook bijlage 4.3).

Bij de relatief zwakkere stormen vertoont de reactie van de windopstuwing langs de kust meer verschillen dan bij hogere. De kansafname om een stormvloed van 1 meter hoger te krijgen is bij hogere standen gelijkmatiger verdeeld langs de kust dan bij lagere. De windopstuwing loopt in het noorden ook wat sneller op bij de lagere stormvloeden dan in het zuiden. Bij de hogere stormvloeden wordt dit verschil minder. Dit wordt geïllustreerd op bijlage 4.3. Hierop staan de windopzetten tijdens hoogwater geordend naar frequentie langs de kust weergegeven van Vlissingen tot aan West-Terschelling. Opvallend is dat deze windopzetten naar het noorden gaande systematisch hoger worden. Tot aan de overschrijdingsfrequentie van 1 keer per jaar is dit het duidelijkste. Daarboven buigen ze bij en gaan de geordende waarden meer parallel lopen. Deze buiging is in het noorden het sterkste.

Op bijlage 4.3 zijn tevens de HW's geplot voor eenzelfde periode en dezelfde stations geordend naar frequentie voor de periode 1932-1985. Opvallend is dat de hellingen van de geordende waarden bij frequenties lager dan 1 *pj een min of meer gelijk gedrag gaan vertonen langs de kust van Hoek van Holland tot West-Terschelling.

De Deltacommissie stelde dat de helling oftewel de decimeringshoogten van de overschrijdingslijnen in het extreme gebied voor alle stations nagenoeg gelijk zou worden voor overschrijdingsfrequenties tussen 10^{-3} pj en 10^{-4} pj . Daar beneden zijn er verschillen met o.a. een oplopende helling gaande naar het noorden. Op de bijlage 4.4 zijn de hellingen tussen overschrijdingsfrequenties van $1/10 \text{ *pj}$ en 1 *pj van de Deltacommissie vergeleken met die van 1990. De hellingen van de overschrijdingsfrequentielijnen in dat gebied blijken nu veel minder onderling te verschillen dan de Deltacommissie veronderstelde. Op de bijlage staat ook de grafiek die de Deltacommissie gebruikte om de overschrijdingslijnen voor de Westelijke-Waddenzee met behulp van interpolatie af te leiden. Dit gebeurde door de decimeringshoogten voor de W-Waddenzee te interpoleren vanaf IJmuiden tot aan Zoutkamp. Opvallend is het verschil met de huidige waarden in het gebied tussen $1/2 \text{ *pj}$ en $1/10 \text{ *pj}$. Duidelijk is dat de Deltacommissie voor de Westelijke-Waddenzee deze waarde overschat heeft, hetgeen doorwerkt op de ligging van alle overschrijdingsfrequentielijnen in dat gebied. Met name de helling van de HW overschrijdingsfrequentielijn van Zoutkamp in het gebied van het grenspeil heeft invloed gehad op het resultaat van de interpolatie.

De naar frequentie geordende hoogwaterstanden van enkele stations waaronder Den Helder en Harlingen zijn weergegeven op bijlage 4.5. De extra windopzet op de Waddenzee, het zogenaamde Waddeneffect, is goed zichtbaar. Dit uit zich in een steilere overschrijdingsfrequentielijn van Harlingen dan Den Helder. Bij lagere stormvloeden staat op de Waddenzee een relatief dunne schijf water die sterk opzetgevoelig is. Bij hoger wordende waterstanden divergeren de geplotte waarnemingen minder, hetgeen goed zichtbaar is. De Waddenzee wordt dieper en de windopzet relatief minder. In de overschrijdingsfrequentielijnen uit het hernieuwde statistische onderzoek werkt dit fenomeen door.

Als basis voor het verband tussen Hoek van Holland en de overige stations zijn betrekkinglijnen samengesteld tussen de hoogwaterstanden met dezelfde frequentie in steeds twee stations (bijlage 4.6). Deze standen hoeven niet tot dezelfde gebeurtenis te horen, maar zijn wel vergelijkbaar. De lijnen heten dan de frequentie-betrekkinglijnen. Tot de frequentie van eens per 10 jaar staan ze op de

bijlage als ononderbroken lijnen. Het is de basis voor de relatie die met behulp van modellen is afgeleid voor extreme omstandigheden.

De Deltacommissie heeft de helling van de overschrijdingsfrequentielijnen in de omgeving van het grenspeil ($1/2 \cdot p_j$) in de W-Waddenzee overschat (bijlage 4.6). Zij interpoleerde deze waarde tussen IJmuiden en Zoutkamp. Ook voor IJmuiden is sprake van een overschatting hetgeen doorwerkt in alle waarden. Voor Zoutkamp kan dit uiteraard niet meer worden nagegaan, daar dit station nu achter de dam ligt die de Lauwerszee afsluit.

4.3 Het fysische modelonderzoek naar de samenhang met Hoek van Holland

4.3.1 Inleiding

Een representatieve superstorm voor de Nederlandse kust bestaat niet omdat een storm wordt bepaald door vele meteorologische factoren die stochastisch van aard zijn maar waarvan de statistiek onvoldoende bekend is. In het onderzoek worden dan ook superstormen gesimuleerd die in staat zijn zeer hoge waterstanden weer te geven. De duur, de stormintensiteit en de fase tussen astronomisch hoogwater en maximum windopzet kunnen hierbij worden gevarieerd maar ook de plaats van het weersysteem boven de Noordzee.

In het onderzoek wordt gebruik gemaakt van zogenaamde WAQUA-modellen, dit zijn twee-dimensionale waterbewegings-modellen, waarin de ondiep-watervergelijkingen worden opgelost. De stroming is gemiddeld over de diepte. In de modellen zijn fysische processen gemodelleerd zoals de getijbeweging, bodemwrijving, transporten, het droogvallen en onderlopen van platen en de interacties tussen water, wind en luchtdruk.

Met behulp van een analyse van de samenhang op basis van waarnemingen en mathematisch-fysische modellen worden peilen in alle andere stations bepaald die een vergelijkbare frequentie van voorkomen hebben, een vergelijkbare zwaarte, als het nieuwe basispeil te Hoek van Holland, t.w. NAP + 5m. Met behulp van de fysisch-mathematische modellen kunnen de frequentie-betrekkinglijnen worden berekend tot de frequentie van 10^{-4} p_j. De basis voor deze lijnen staat op bijlage 4.6. De nauwkeurigheid waarmee deze overeenkomende peilen kunnen worden bepaald wordt tevens geschat.

Deze hangt o.a. af van de nauwkeurigheid van de gebruikte modellen, de gehanteerde schematisatie en de afstand tot Hoek van Holland.

Om in deze stations extreme stormvloedstanden te bepalen met een vergelijkbaar gewicht zijn opschalingen en verplaatsingen van bestaande stormen gehanteerd. Een bepaalde stormvloed heeft nooit in verschillende stations tegelijkertijd dezelfde frequentie. Daar komt nog bij dat in het ene station de maximum windopzet tijdens laagwater kan vallen en tegelijkertijd in een ander station tijdens hoogwater, hetgeen tot onvergelijkbare standen leidt. In het onderzoek worden de stormen op twee manieren gebruikt:

- Uitgebreide opschaling zonder geometrische verschuiving. Dit gebeurt zowel met de vorm als met de frequentie van voorkomen in de verschillende stations.
- Uitgebreide geometrische verschuiving van het stormveld over de Noordzee met een beperkte opschaling.

4.3.2 Opschaling van stormen zonder verplaatsing

De keuze van de te gebruiken stormen is hierbij belangrijk. In het modelonderzoek zijn drie criteria aangelegd op basis waarvan de selectie plaats heeft gevonden:

- De stormen moeten potentieel gevaarlijk zijn d.w.z. een zodanige weersituatie opleveren dat een zware noordwester storm optreedt.
- De stormen mogen geen uitzonderlijke verschillen van de stormvloedpeilen langs de Nederlandse kust hebben opgeleverd.
- Van de stormen moeten nauwkeurige gegevens van het bijbehorende windveld beschikbaar zijn.

Een drietal stormen is geselecteerd die hieraan voldoen en wel de stormen van 24 november 1981, 1 februari 1983 en 14 februari 1989. Verder is vanwege de zwaarte ook nog de 1953 storm in een aantal gevallen gebruikt. Voor het feit dat de frequentie van HW standen langs de kust van iedere stormvloed afzonderlijk toch niet helemaal gelijk is later gecorrigeerd.

Uiteindelijk gaat het erom stormvloedstanden te verkrijgen in de verschillende stations, die een vergelijkbare gewicht hebben als de NAP + 5 m te Hoek van Holland. Stormvloedstanden zijn gesimuleerd vanaf het gebied van de waarnemingen tot in de buurt van de basispeilen.

De genoemde stormen zijn hiertoe opgeschaald en verschoven als volgt:

- Verschuiving van de stormopzet ten opzichte van het astronomisch getij.
- Opschaling door vermenigvuldiging van de windsnelheden.
- Opschaling door vermenigvuldiging van de duur.

Allereerst is de verschuiving van belang om vergelijkbare waarden te krijgen in de verschillende stations. Bij stormvloeden valt de grootste windopzet voor het ene station op een ander moment ten opzichte van het astronomisch hoogwater dan voor het andere station. De betrekking tussen twee stations wordt hierdoor sterk beïnvloed. Er wordt nu zodanig verschoven met de windopzet ten opzichte van het astronomisch hoogwater dat vergelijkbare standen ontstaan. Dit worden de zogenaamde geoptimaliseerde stormvloedstanden genoemd.

Vervolgens zijn de geoptimaliseerde stormvloeden opgeschaald. Ook deze geoptimaliseerde stormen hebben echter evenals hun origineel niet langs de hele kust dezelfde frequentie. Zolang de frequenties niet gelijk zijn, is de betrekking ook niet zuiver. Een minder vaak voorkomende stand wordt vergeleken met een vaker voorkomende of andersom. Hiervoor moet worden gecorrigeerd.

Lijnen die een verband geven tussen stormvloeden met vergelijkbaar gewicht in twee stations zijn verkregen door de betrekkinglijnen zodanig te verschuiven dat ze aansluiten op de frequentie-betrekkinglijnen bepaald naast de waarnemingen zoals weergegeven op bijlage 4.6. Onzekerheden hierin zijn vertaald in een additionele spreiding die bij de uiteindelijke weging weer wordt meegenomen. Vanwege de afstand is voor Delfzijl een tussenstap via West-Terschelling toegepast.

Uit de met behulp van de aldus bepaalde betrekkinglijn kunnen de standen worden bepaald die eenzelfde gewicht hebben als het basispeil van Hoek van Holland, NAP + 5 m. In tabel 4.2. staan de uitkomsten.

Tabel 4.2
Overeenkomend basispeil uit
opgeschaalde stormen

Stations	Overeenkomend (basis)peil	Spreiding
Vlissingen	555	±30
Hoek van Holland	500 (def.)	0 (def.)
Den Helder	487	±30
Harlingen	569	±34
Delfzijl	665	±43
W-Terschelling	496	±55

Hoogwaterstanden in NAP + cm; spreiding in cm

Wat in de frequentie-betrekkinglijnen opvalt is dat ze min of meer een lineair verband tonen. Bij het opschalen van de geoptimaliseerde stormen verloopt het gedrag in andere stations niet wezenlijk anders dan in Hoek van Holland. Als dit verband lineair is, dan is de aard en de vorm van de frequentieverdeling ook in beide stations vergelijkbaar.

Wat de Westelijke-Waddenzee betreft geven deze modeluitkomsten ook aan dat bij de zeer hoge stormvloeden de gemiddelde waterstand op de "Waddenzeebak" toch min of meer tegelijk met de Noordzee omhoog komt, met extra windopzetten langs de zuidostrand. De duur van de stormvloed is voldoende lang om dank zij de grote capaciteit van de zeegaten de "Waddenzeebak" snel te kunnen vullen. Een reducerende werking van de zeegaten bij de vulling van de Waddenzee is wel zichtbaar tijdens de aanloop van de stormvloed, maar tijdens de maximale opzet is dit effect verdwenen. In de Waddenzee worden de opzetten uiteindelijk nog iets hoger dan buiten omdat het gebied relatief ondiep is ten opzichte van de Noordzee.

4.3.3 Verplaatsing van stormen met beperkte opschaling

Op aanraden van het KNMI is het effect van uitgebreide geometrische verplaatsing van stormsysteemen onderzocht. Hiervoor is de stormsituatie genomen die tot de ramp van 1953 heeft geleid (Appendix A). De grootschalige meteorologische situatie die tot een dergelijke storm aanleiding gaf had namelijk net zo goed op een iets andere plaats kunnen liggen en had dan een ramp elders kunnen veroorzaken. In beginsel heeft elke ligging van het depressiesysteem boven de Noordzee een gelijke kans, dit omdat de grootschalige weersituatie niet wordt beïnvloed door de landmassa's. Uiteraard geldt dit binnen zekere grenzen maar het gebied waarin verschuiving mogelijk is is groot genoeg voor dit onderzoeksdoel. Voor ieder station kan nu een zodanige ligging van de het 1953 stormveld worden opgezocht dat de bijbehorende stand in dat station maximaal is. De maximale standen per station kunnen nu voor verschillende stations vergeleken worden en zijn in beginsel gelijkwaardig wat frequentie van voorkomen betreft. Overeenkomende standen met een basispeil van NAP +5 m te Hoek van Holland kunnen zo worden herleid.

tabel 4.3
Overeenkomende maxima na
verschuiving storm 1953

station	1953 opgetreden + correctie voor HW stijging	HW maxima 1953 bij NAP +5m in H v Holl.	Spreiding
(1)	(2)	(3)	(4)
Vlissingen	466	550	± 32
Hoek v Holland	402	500	
Den Helder	331	396	± 34
Harlingen	380	517	± 53
Delfzijl	340	588	± 67
W-Terschelling	330	409	± 38

- Kolom (2): De Hoogwaterstanden van 1953 met de gecorrigeerde standen voor de huidige situatie met de hoogwaterstijging over die tijd.
- Kolom (3): Waarden gegenereerd vanuit een verschoven 1953 storm.
- Hoogwaterstanden in NAP + cm; spreiding in cm

4.4 De nauwkeurigheid van de relatie met Hoek van Holland

Uit het fysisch modelonderzoek volgen pellen voor de verschillende stations, die een gewicht hebben vergelijkbaar met dat van het basispeil (NAP + 5 m) te Hoek van Holland. De afgeleide relatie-lijnen zijn gegeven in figuur 4.6. De standaardafwijking van de zo berekende basispellen afgeleid uit Hoek van Holland, wordt bepaald door de onzekerheid in de relatie. De verschoven 1953 storm heeft hier overigens niet in meegedaan. Deze standen zijn afzonderlijk meegewogen en ook de nauwkeurigheid hiervan is afzonderlijk bepaald. De onzekerheid wordt veroorzaakt door de volgende factoren:

- De spreiding in de berekende waterstanden. Deze spreiding wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheden en onzekerheden in het fysisch model en het modelleren van de fenomenen. Voor-zover het om opgetreden stormvloed gaat betreft het hier terugvoorspellen (hindcasting). Achteraf worden windsnelheden en luchtdrukken ingevoerd in het model en worden de waterstanden berekend. Daarnaast wordt een extra onnauwkeurigheid veroorzaakt door het kunstmatig vergroten van de intensiteit van de stormen.
- De spreiding door de noodzakelijke beperking van aantal stormen. Uiteindelijk kon in dit stadium slechts een beperkt aantal stormen gebruikt worden. Een mogelijke onzekerheid over de bruikbaarheid van de gekozen stormen, het beperkte aantal stormen en het realiteitsgehalte van de gemanipuleerde stormen kan worden uitgedrukt in een spreiding.
- De invloed van het vergelijken van overeenkomende waarden. Het gaat hier niet om rechtstreekse voorspellingen voor één station maar om overeenkomende waarden tussen twee stations. De modelfouten werken in een dergelijke verhouding niet volledig door. De reductie van de spreiding hangt direkt af van de correlatie tussen die beide stations.
- De spreiding rondom de betrekkinglijn. De afwijkingen van de punten ten opzichte van de betrekkinglijn, doordat de ene storm toch anders van karakter is dan de andere of doordat de afstand erg groot wordt.

In ref.3 staat een en ander uitgewerkt en gemotiveerd. De resultaten van de nauwkeurighedsanalyse staan ook in de tabellen 4.2 en 4.3.

5. De resultaten

5.1.Methode

Er staan nu voor ieder station, met uitzondering van Hoek van Holland, in wezen twee peilen ter beschikking met de gevraagde lage overschrijdingsfrequentie. Het peil bepaald uit de frequentie-betrekking met het basispeil te Hoek van Holland en het peil dat statistisch afgeleid is uit de waarnemingsreeks van het station zelf. Voor beide peilen is de nauwkeurigheid bepaald. Met behulp van de grootte van de spreiding van beide resultaten wordt het nieuwe basispeil berekend. Voor het uiteindelijke resultaat staan er twee wegen open:

- De mogelijke fout in de schatting van het basispeil te Hoek van Holland wordt ook meegewogen in de vertaling van dit peil naar andere stations.
- Het basispeil te Hoek van Holland is een axioma. De spreiding oftewel de mogelijke fout wordt verwaarloosd.

In het eerste geval zal de invloed van het basispeil te Hoek van Holland minder doorwerken in de basispeilen van de andere stations dan in het tweede geval. In het tweede geval wordt meer gewicht gehecht aan de fysische samenhang in relatie tot het basispeil van NAP + 5m te Hoek van Holland. Dit is ook meer in lijn met de benadering van de *Deltacommissie. Verder omspannen de waterkeringen in Nederland* grote gebieden waarbij een optimale samenhang in ontwerprandvoorwaarden van belang is. Resultaten voor beide benaderingen zijn berekend. Gekozen is voor de tweede benadering in verband met de beleidsmatige continuïteit met de bepaling in het verleden door de Deltacommissie, het aanbrengen van een betere samenhang langs de kust en een betere doorwerking van het eerder vastgestelde basispeil te Hoek van Holland.

Voor de weging is nog het volgende van belang. Als er twee gelijkwaardige schattingen van een basispeil zijn, die ieder onafhankelijk van elkaar zijn berekend, dan zal het gewogen eindresultaat in het algemeen beter zijn dan elke schatting afzonderlijk. Er wordt tenslotte informatie toegevoegd. Beide peilen hebben een eigen spreiding die verschillend is. De nauwkeurigheid van het eindresultaat zal verbeteren of minstens gelijk blijven aan de kleinste van de twee spreidingen. Zijn de twee basispeilen volledig onafhankelijk van elkaar bepaald, dan wordt de spreiding van het eindresultaat beter. Dit kan optreden als er een basispeil moet worden berekend met behulp van twee peilen die volgen uit twee aansluitende reeksen waarnemingen, bijvoorbeeld die van 1880-1930 en 1930-1990. De spreiding van het gewogen basispeil wordt dan kleiner. Is er echter sprake van enige correlatie omdat bijvoorbeeld uit dezelfde gegevensbron wordt geput bij zowel de statistische als de fysische benadering dan zal in het algemeen de spreiding van het eindresultaat niet veel afwijken van de kleinste spreiding van een van beide basispeilen. Dit laatste is hier min of meer het geval. Het fysisch modelonderzoek is gekoppeld aan het basispeil te Hoek van Holland dat weer gebaseerd is op een selectie van stormvloed en die ook mee hebben gedaan aan de vorming van de

waarnemingsreeksen van bijvoorbeeld Vlissingen en Delfzijl. De statistisch bepaalde basispeilen van Vlissingen en Delfzijl vertonen aldus een zekere correlatie met de model- resultaten. Een goede veronderstelling in deze gevallen is dan ook steeds de kleinste van de twee spreidingen gekozen wordt als de spreiding van het eindresultaat.

De resultaten uit het hernieuwde statistische onderzoek (lit.2) voor Vlissingen en Delfzijl zijn gebaseerd op nagenoeg evenveel gegevens als die voor Hoek van Holland. Omdat deze reeksen globaal twee maal zo lang zijn als die voor de stations rond de Westelijke-Waddenzee worden de resultaten uit het hernieuwde statistische onderzoek voor Vlissingen en Delfzijl tweemaal meegewogen in het eindresultaat en die voor de Westelijke-Waddenzee eenmaal. Er wordt globaal twee maal zoveel waarde aan toegekend mede omdat de informatie waarop het gebaseerd is ook twee maal zo veel is. Voordeel is nu dat de extra informatie vanuit Hoek van Holland optimaal ten goede komt aan de Westelijke-Waddenzee vanwege de grotere onzekerheid aldaar. Echter de informatie vanuit Hoek van Holland werkt wel enigszins door in Vlissingen en Delfzijl. Samenhang langs de hele kust is zo gewaarborgd.

De wegingsprocedure is op basis van een statistische procedure uitgewerkt waarover advies is gevraagd (zie Appendix B). Het basispeil wordt het gewogen gemiddelde van de uitkomsten van het statistisch bepaalde 10^{-4} kwantiel en de waarde vanuit de relatie met Hoek van Holland, bepaald m.b.v. het fysisch modelonderzoek.

In het fysisch modelonderzoek is er ook sprake van twee uitkomsten; één met behulp van opgeschaalde stormvloed en één door middel van het verschuiven van stormvelden. Alvorens te wegen met het statistische eindresultaat wordt eerst op dezelfde manier het eindresultaat van het fysische modelonderzoek bepaald. Voor de eindspreiding van het modelonderzoek wordt de kleinste spreiding van de twee genomen.

5.2. Bespreking van de resultaten

In Tabel 5.1 staat een overzicht van de meest relevante resultaten weergegeven, die hierna kort worden besproken. De resultaten van de hernieuwde statistische analyse staan in de kolommen (4) en (5). In het algemeen is er sprake van reductie ten opzichte van de basispeilen van de Deltacommissie, echter voor de Westelijke-Waddenzee is de reductie erg groot (1 à 1,3m). De weegfactoren staan in kolom (6).

TABEL 5.1:
Basispeilen volgens deltagcommissie
en 10^{-4} kwantielen volgens het
hernieuwde onderzoek

Station	Peil Delta- Commissie 1950 1990		Hernieuwd Statist. onderzoek 10^{-4} σ		Weeg fac- tor	Fysische modellen				Eindresultaat fys. modellen ($\sigma_{HvH} = 0$) 10^{-4}		Gewogen eindresultaat ($\sigma_{HvH} = 0$) 10^{-4}	Hoogst opgetr. HW	Versch. met (13)
	(2)	(3)	(4)	(5)		Opschaling '53 10^{-4} σ		Versch. 10^{-4} σ		(11)	(12)		(14)	(15)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Vlissingen	565	580	540	± 70	2	555	± 30	550	± 32	552	± 30	545	466	79
Hoek v.Holl.	500	515	500	± 95	-	500	-	500	-	500	-	500	402	98
Den Helder	505	520	425	± 50	1	487	± 30	396	± 34	447	± 30	441	331	110
Harlingen	580	595	460	± 40	1	569	± 43	517	± 53	548	± 43	501	379	122
Delfzijl	640	655	600	± 75	2	665	± 55	588	± 67	634	± 55	613	480	133
W-Tersch.	530	545	405	± 30	1	496	± 34	409	± 38	457	± 34	428	330	98

HW standen in NAP + cm; spreiding en verschillen in cm

Met behulp van de gevonden betrekking met Hoek van Holland op basis van het fysisch modelonderzoek met opgeschaalde stormen zijn overeenkomende stormvloeden met peilen bij 10^{-4} pj geschat, kolommen (7) en (8). Hierbij is er vanuit gegaan dat het basispeil te Hoek van Holland NAP + 5 m is en vertaald wordt naar de andere stations. Opvallend is dat deze peilen in het algemeen hoger uitkomen dan die uit het hernieuwde statistische onderzoek volgen. De fysische benadering heeft echter ook zijn onzekerheden die zijn beschreven in par.4 en verder in ref.3.

De uitkomsten van de analyse met het verschoven stormveld van 1953 zijn weergegeven in de kolommen (9) en (10). Na herleiding zijn standen bepaald die een vergelijkbare zwaarte hebben als NAP + 5 m te Hoek van Holland. Tevens is vanuit de spreiding van alle resultaten een standaardafwijking geschat. Voor Den Helder, West-Terschelling en Delfzijl liggen de resultaten zeer dicht bij de resultaten uit het hernieuwde statistische onderzoek.

De resultaten van de twee fysische analyses, weergegeven in de kolommen (7) en (9), zijn mathematisch gewogen met behulp van de onzekerheidsmarges. De gewogen eindresultaten van het fysische onderzoek zijn weergegeven in de kolom (11). Voor de resulterende spreiding is de kleinste van de twee genomen, kolom (12).

Als eindresultaat van weging geeft kolom (13) waarden tussen de resultaten van het hernieuwde statistische onderzoek en die van de fysica in. Hierbij is voor Hoek van Holland de spreiding nihil verondersteld. Basispeil NAP + 5 m is hier een uitgangspunt. Deze waarden worden als de beste schatting voor de nieuwe basispeilen aanbevolen. In de Westelijke-Waddenzee is de daling ten opzichte van de huidige basispeilen groot en wel tussen 0,5 en 1 meter. Voor Vlissingen en Delfzijl is er ook sprake van reductie maar minder groot. Een minder gecompliceerde weging, bijvoorbeeld door rekenkundig te middelen tussen de statistische en fysische resultaten, geeft overigens resultaten die ook dicht bij het eindresultaat liggen.

Berekeningen zijn ook uitgevoerd als de spreiding van Hoek van Holland volledig wordt meegenomen. De resultaten zijn iets lager dan de vorige. Vlissingen nihil, Den Helder 18 cm, Harlingen 25 cm, West-Terschelling 18 cm en Delfzijl 5 cm. De standen schuiven iets meer op in de richting van het hernieuwde statistische onderzoek.

Fysisch gezien kan een aantal aspecten worden genoemd ter verklaring voor het feit dat de 10^{-4} waarden in de Westelijke-Waddenzee relatief lager zijn, terwijl dit bij de minder zware stormvloeden niet het geval is (bijlage 4.3).

- De minder zware stormvloeden die in het zuiden of in het noorden bij de Eems aangrijpen zullen beide een verhoging in Den Helder en West-Terschelling geven. Dit resulteert in meer windopzetten dan in Hoek van Holland of Delfzijl. De noord-west-hoek van Nederland wordt als het ware dubbel "gepakt".
- Om zeer hoge stormvloeden te krijgen bij de noord west-hoek van Nederland moet de storm hier duidelijk op gericht zijn, en vervalt dit effect.
- Bij de zeer hoge stormvloeden gericht op de NW-hoek van Nederland kan het water relatief gemakkelijk in beide richtingen wegstromen, zodat het moeilijker is daar een zeer hoge windopzet te krijgen (het omgekeerde van een trechter werking).

- De strijklengte over het Noordzeeoppervlak is tot aan de Noordwesthoek van Nederland korter dan die naar andere regio's.

Het verschil met de hoogst opgetreden waarden (kolom (15) loopt naar het noorden gaande toe. Een stormvloed van het kaliber 1953 is waarschijnlijk in het noorden niet opgetreden. Echter bij handhaving van de huidige basispeilen worden de verschillen wel erg groot. Bijvoorbeeld 2 m voor West-Terschelling tegen 1 m voor Hoek van Holland. Dit lijkt onwaarschijnlijk. De verschillen met de nieuwe basispeilen zijn wat dat betreft realistischer.

Het eindresultaat is weergegeven in tabel 5.2 en tevens weergegeven op de bijlagen 5.1, 5.2 en 5.3. Ook is op deze bijlagen een voorlopige schatting gegeven van het verloop van de overschrijdingsfrequentielijnen in het gebied tussen 10^{-3} en 10^{-4} per jaar. De uiteindelijke overschrijdingsfrequentielijnen moeten nog worden bepaald.

Tabel 5.2
De nieuwe basispeilen

Station (1)	Basispeilen Delta- Commissie		Nieuwe Basispeilen 10^{-4} (4)
	1950 (2)	1990 (3)	
Vlissingen	565	580	545
Hoek van Holland	500	515	500
Den Helder	505	520	440
Harlingen	580	595	500
Delfzijl	640	655	615
West-Terschelling	530	545	430

Hoek van Holland is per definitie gelijk aan het resultaat van het hernieuwd statistisch onderzoek.

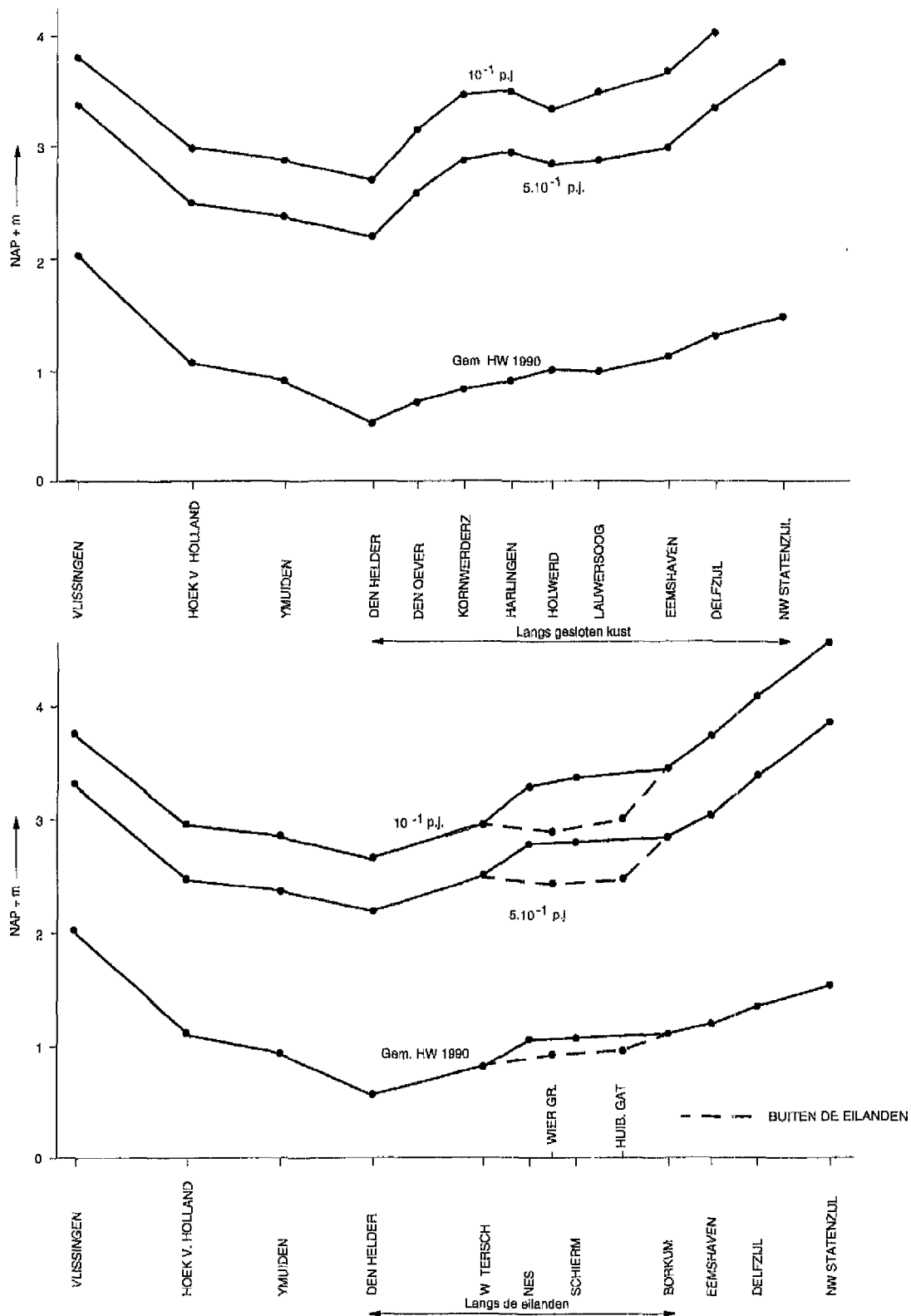
Standen cm NAP + cm

Referenties

1. "Deltacommissie" (1960): Rapport Deltacommissie met de onderliggende delen.
2. "De basispeilen langs de Nederlandse kust. Statistisch onderzoek "
Rapport DGW-93.023,
D.Dillingh, L.de Haan, R.Helmers,
G.P. Können, J. van Malde,
's-Gravenhage, april 1993.
3. " De basispeilen langs de Nederlandse kust. Fysisch onderzoek."
Rapport DGW-93.025,
M.E. Philippart, S.T. Pwa, J.G. de Ronde,
's-Gravenhage, april 1993.

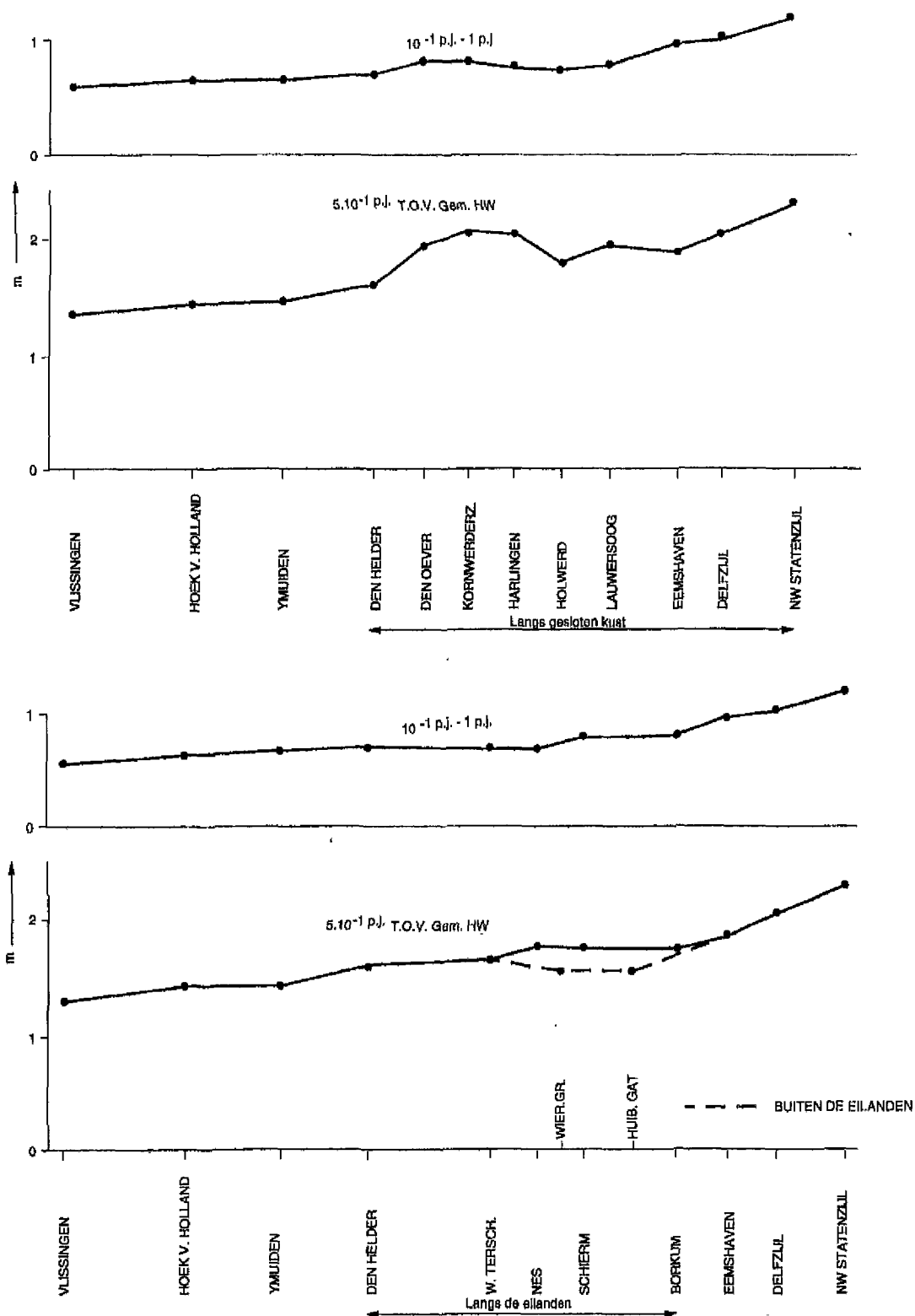
Bijlage 4.1

Verloop GHW, $5 \cdot 10^{-1}$ en 10^{-1} per jaar langs de kust



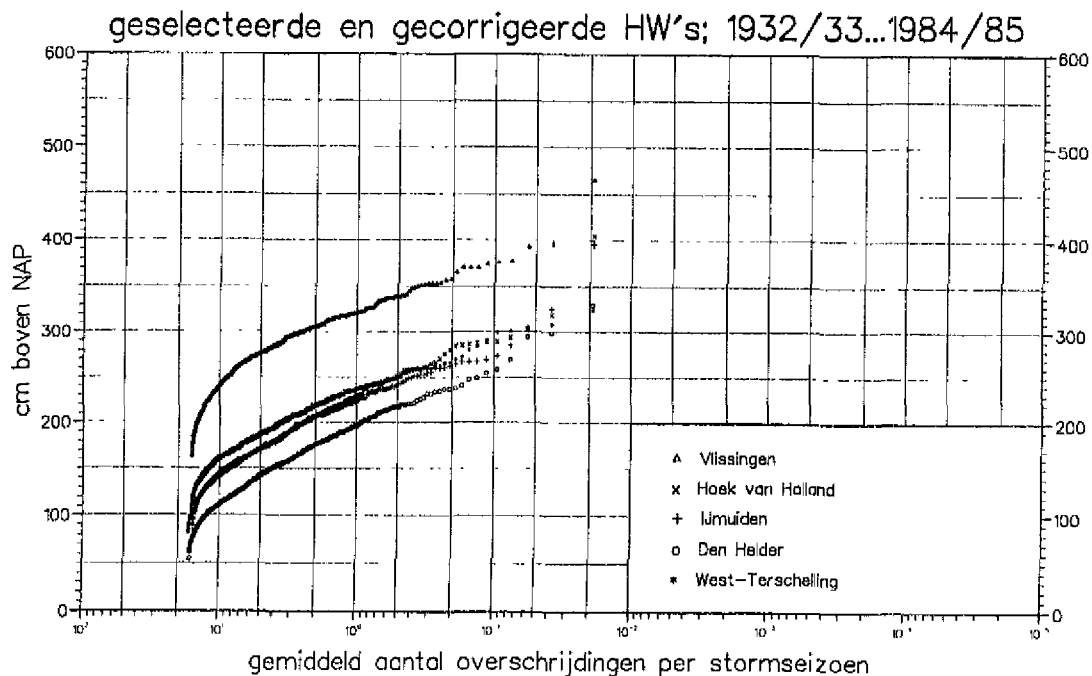
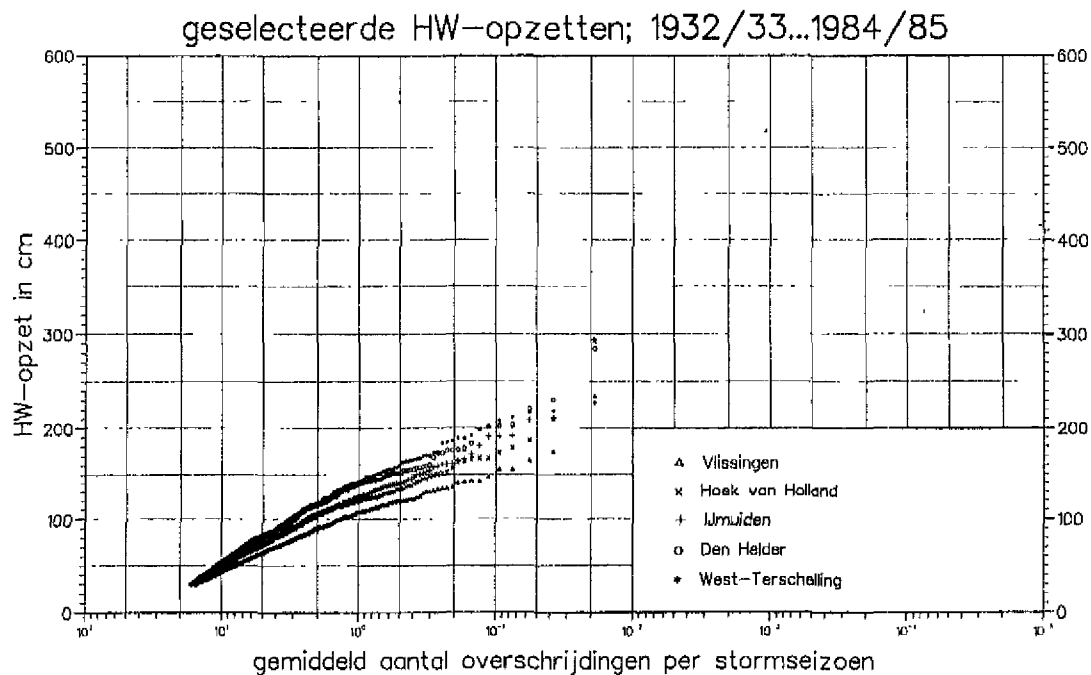
Bijlage 4.2

Verloop hellingen overschrijdingslijnen langs de kust



Bijlage 4.3

Overschrijdingsfrequenties windopzetten bij HW en de HW standen 1932 - 1985



Bijlage 4.4

Steilheden overschrijdingslijnen volgens Deltacommissie en recente gegevens

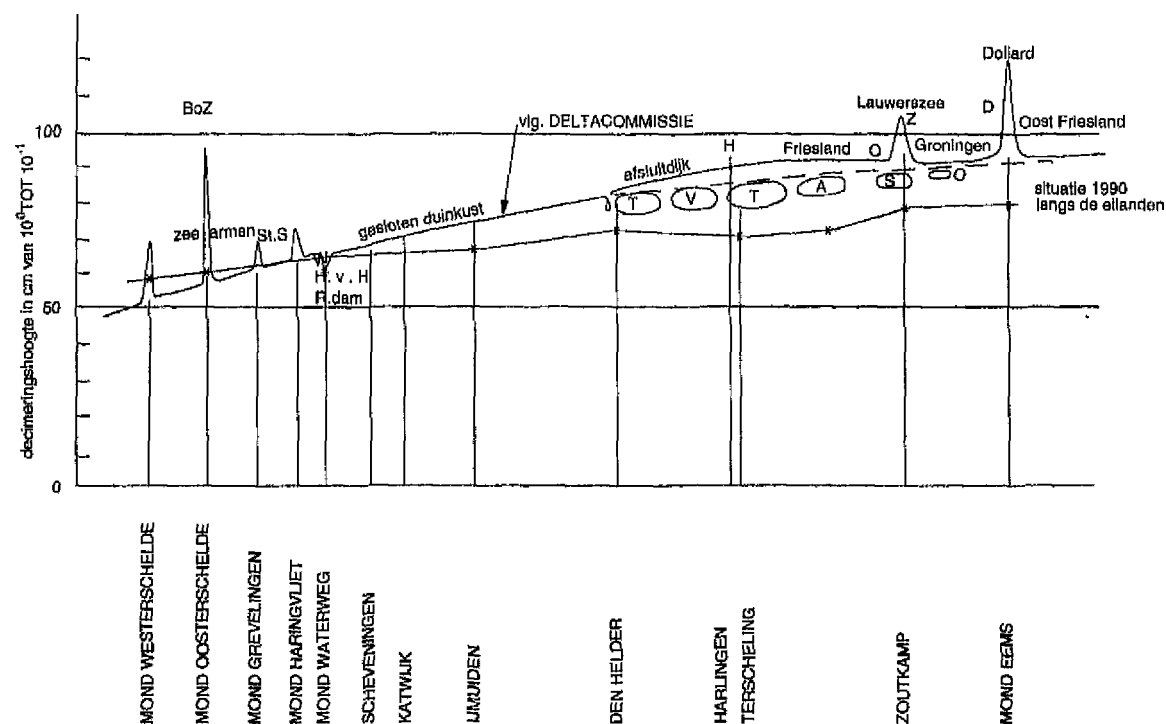


fig. a Het verloop van de decimeringshoogte (verschil tussen 10^{-1} en 10^0 poll) langs de Nederlandse kuststations

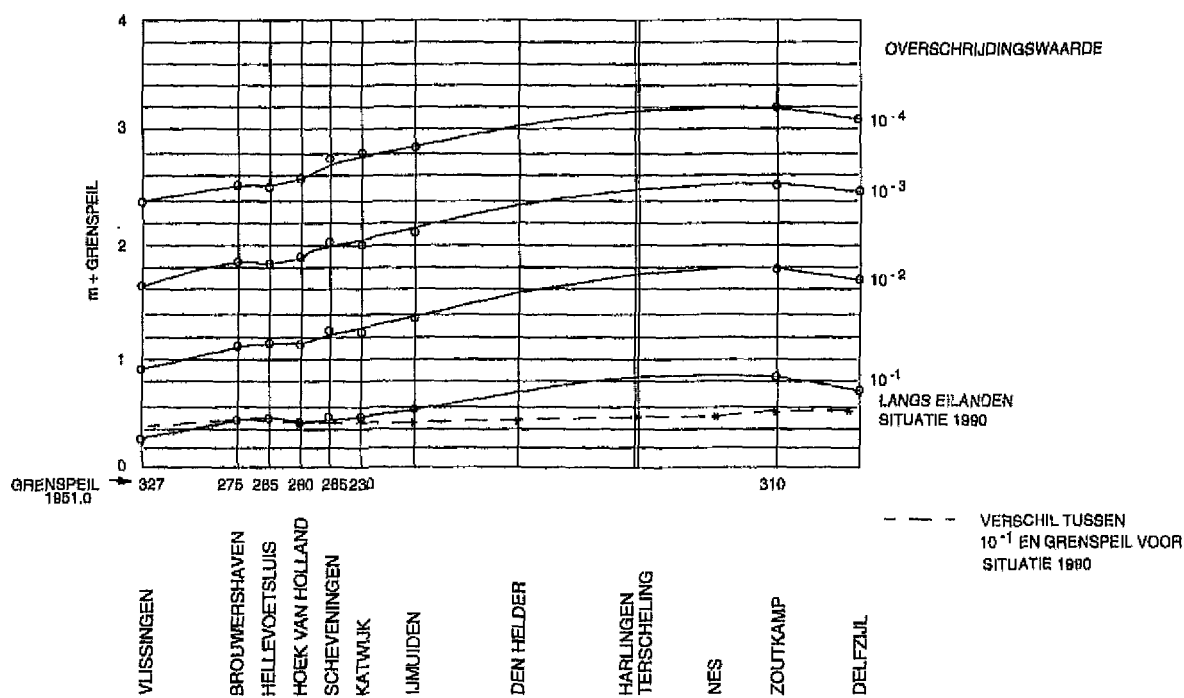
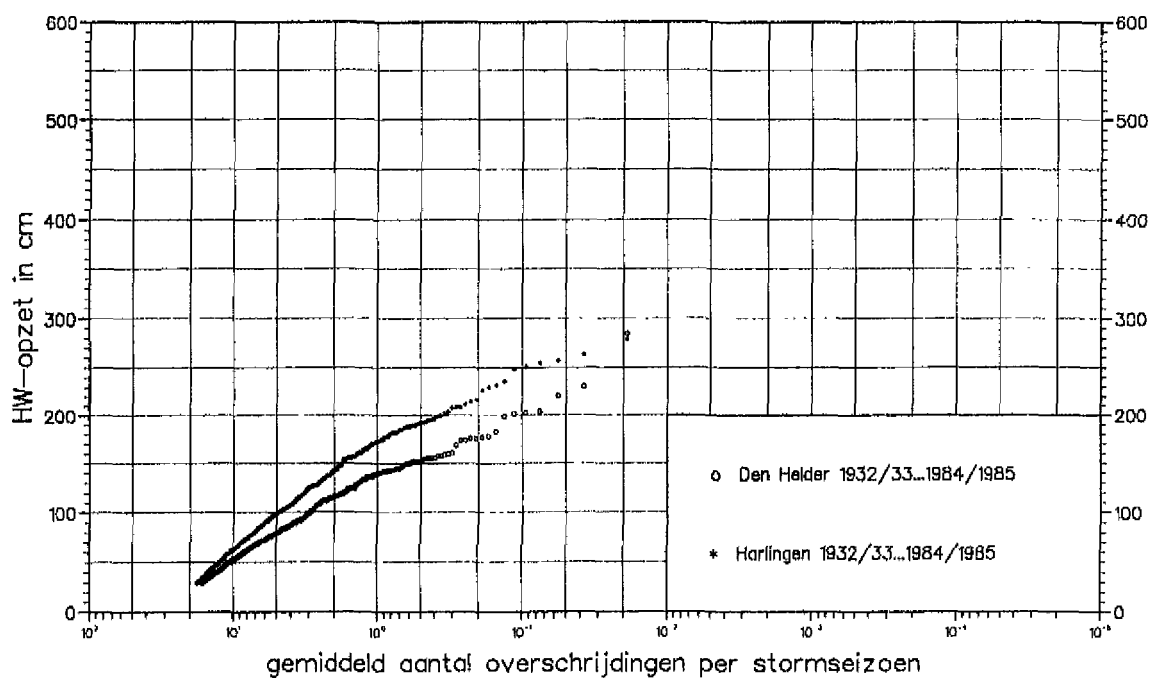
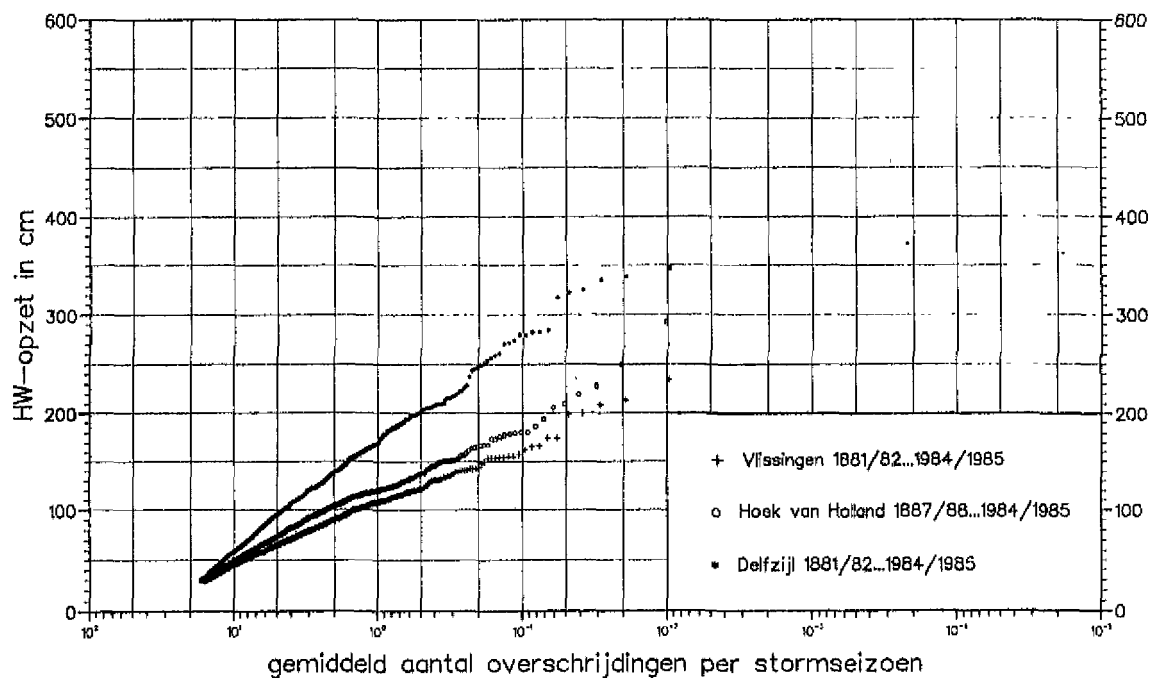


fig. b Verloop van de waterhoogte met gelijke overschrijdingswaarde langs de Nederlandse kust

Bijlage 4.5

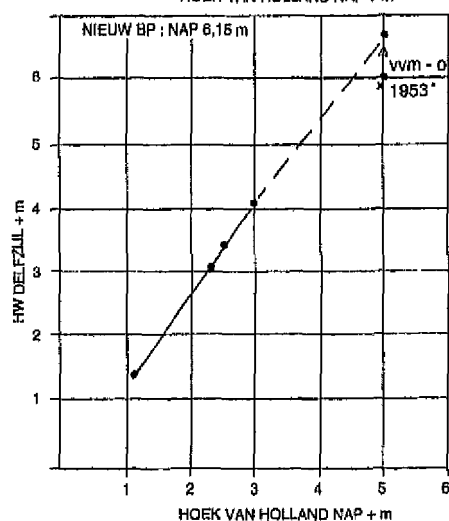
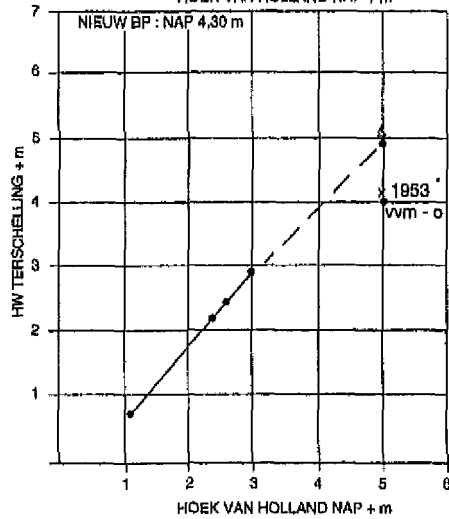
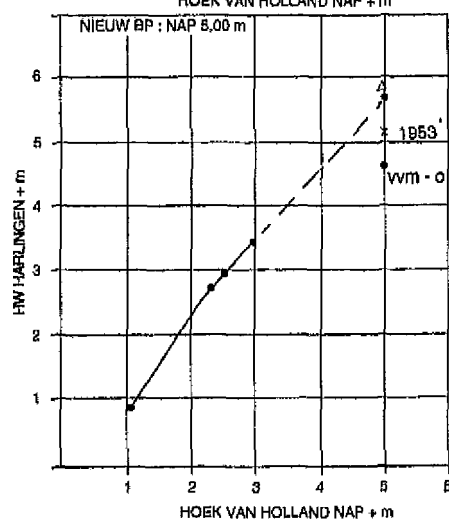
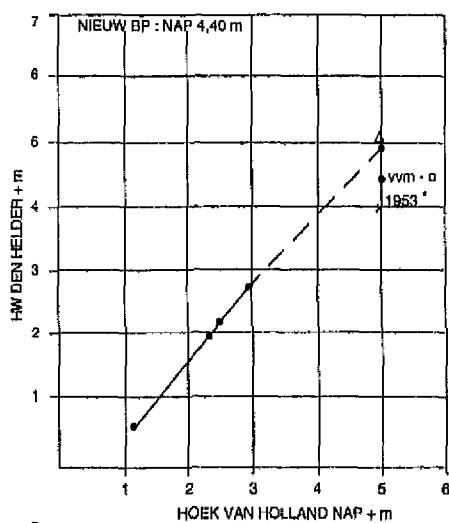
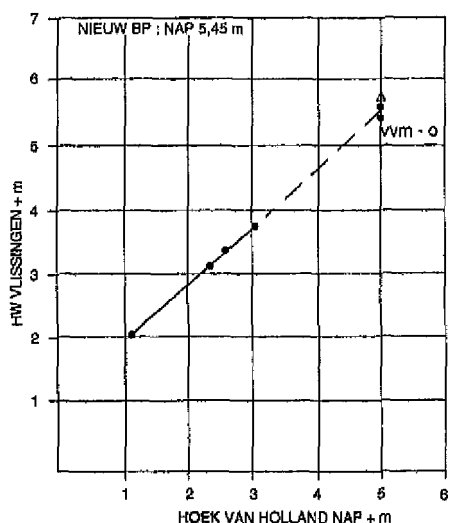
Overschrijdingsfrequenties HW - opzetten ≥ 30 cm aan 5 basisstations



selecties : stormseizoen 1 Okt. ...15 Mrt. en hoogste opzet per storm

Bijlage 4.6

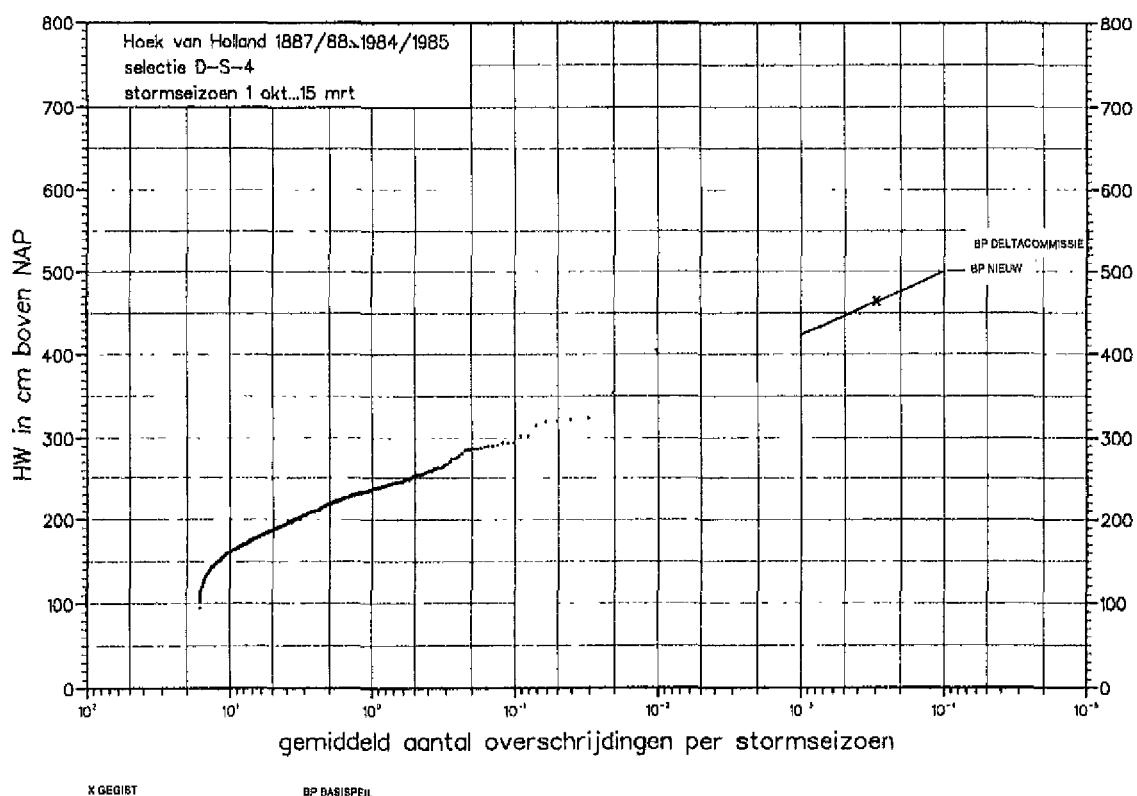
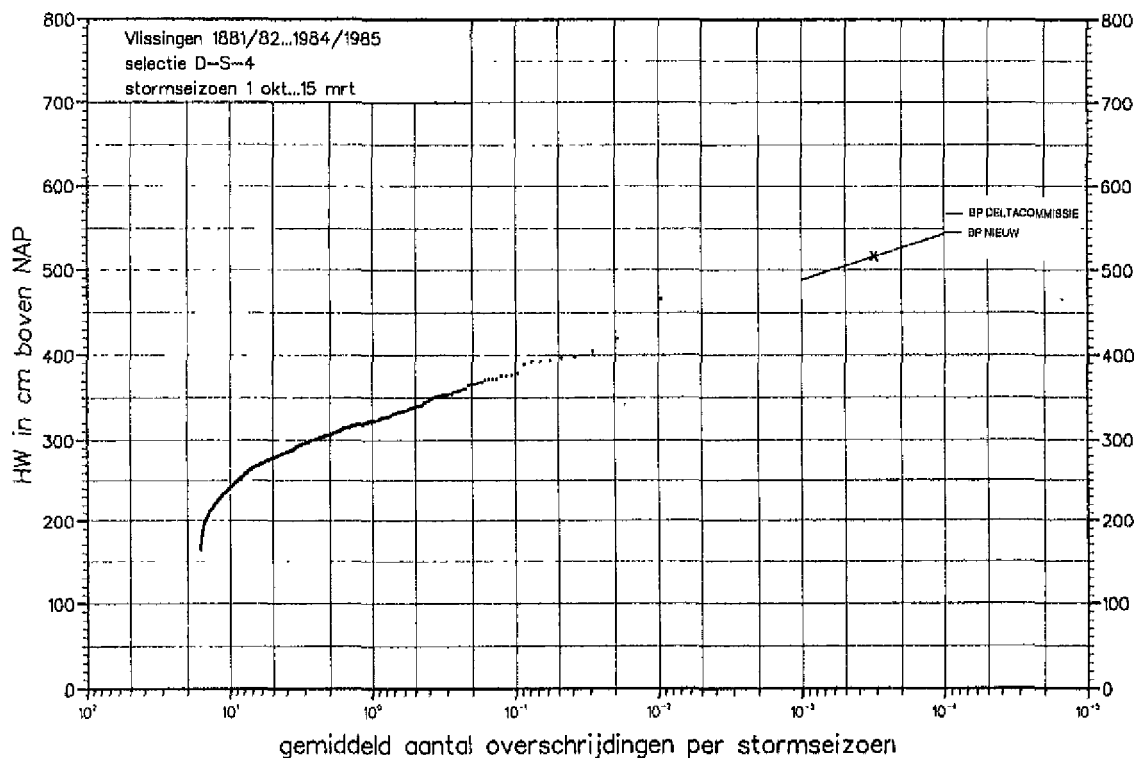
Frequentie - betrekkinglijnen met basispeilen



- Δ DELTACOMMISSIE
- vvm - o : HERNIEUWD STATISTISCH ONDERZOEK
- FREQ. BETREKKINGSLIJN TOT 10^{-1} p.]
- - - FYSISCH MODEL BETREKKINGSLIJN
- 1953 * VANUIT VERSCHUIVING 1953 STORMVELD
- BP NIEUWE BASISPEILEN

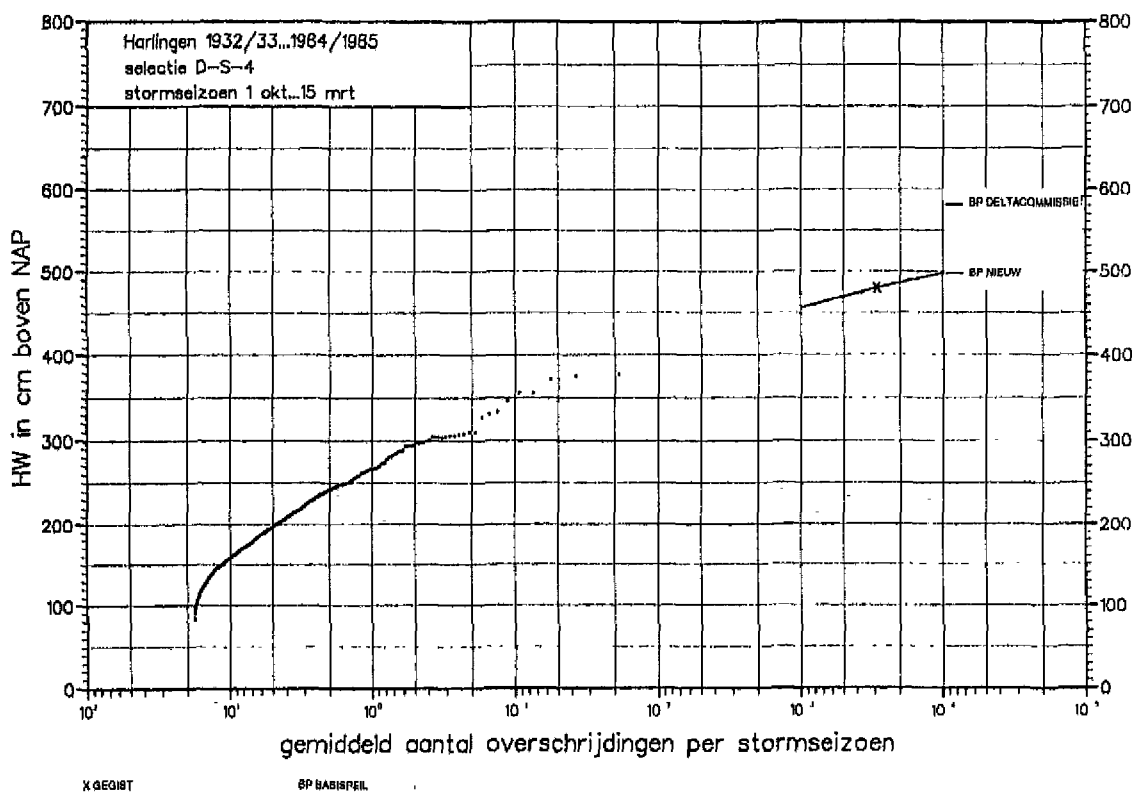
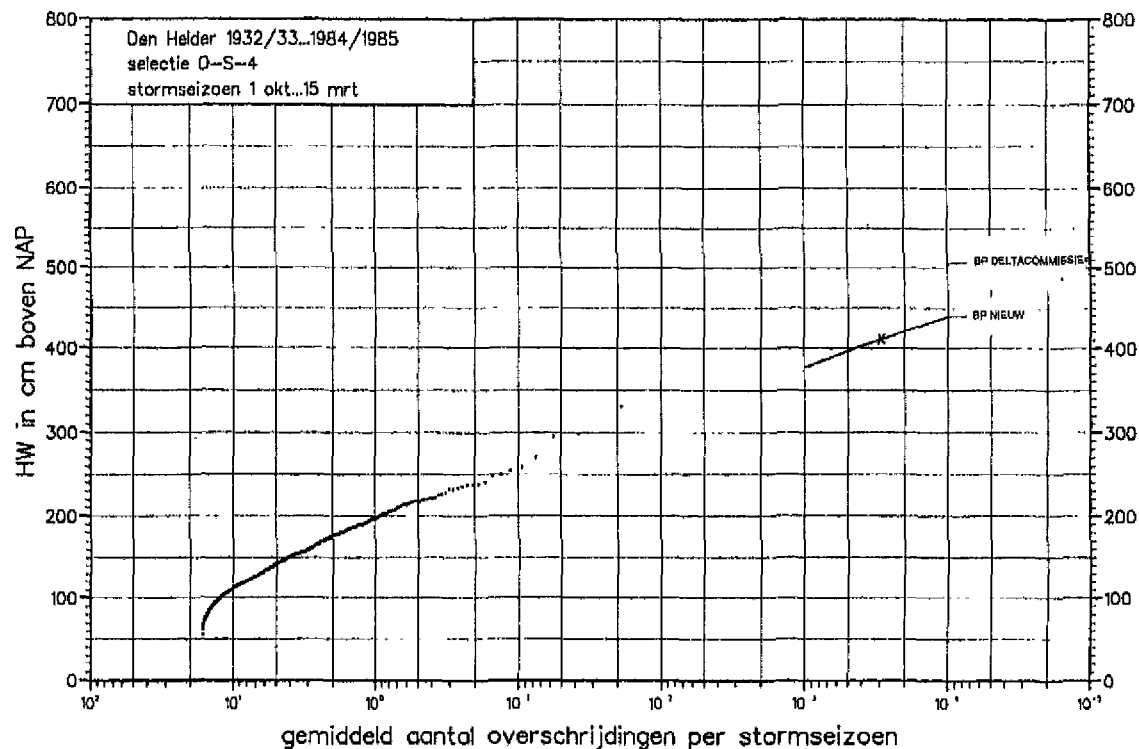
Bijlage 5.1

HW overschrijdingsfrequenties Vlissingen en Hoek van Holland



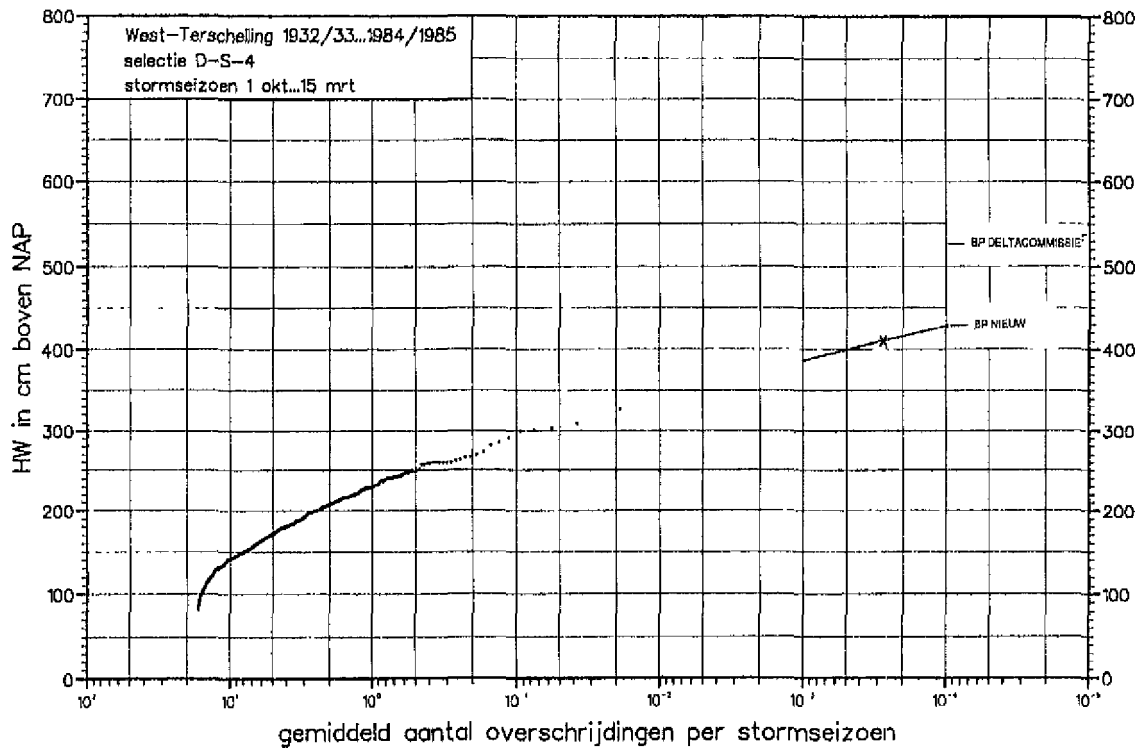
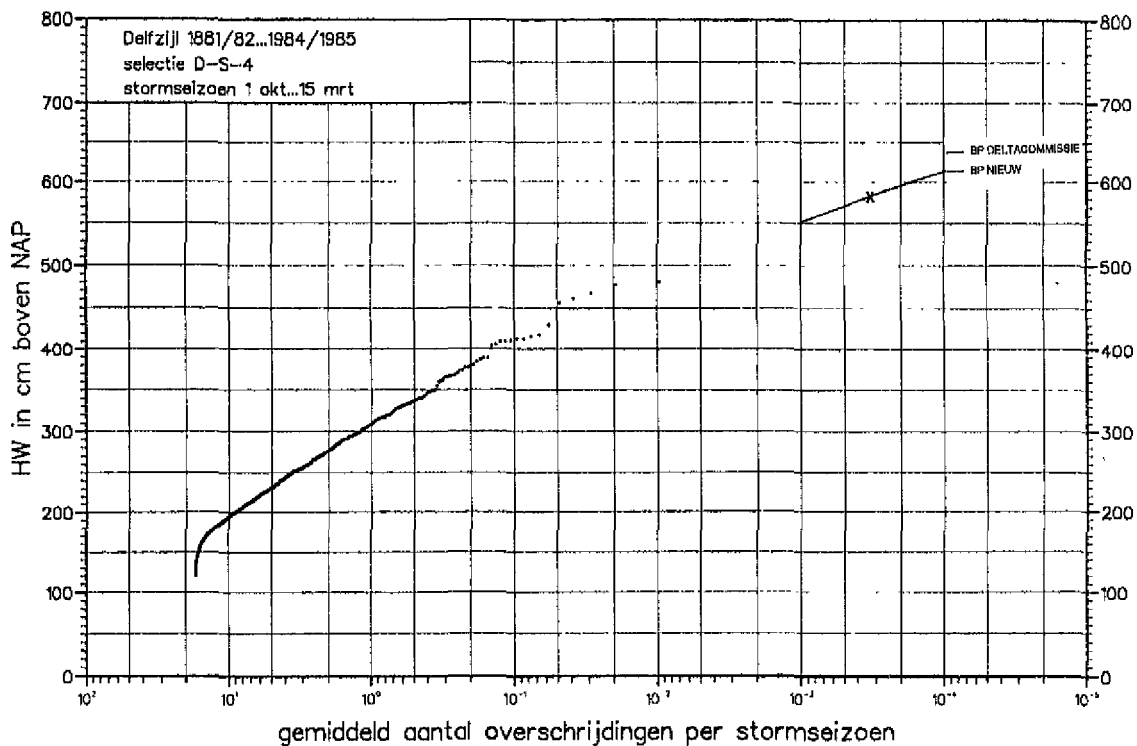
Bijlage 5.2

HW overschrijdingsfrequenties Den Helder en Harlingen



Bijlage 5.3

HW overschrijdingsfrequenties Delfzijl en West - Terschelling



X GEÏST

BP BASISPEIL

Appendix a

Overwegingen en aanbevelingen van het knmi

Door : dhr. B. Zwart

Datum: april 1993

1 Probleemstelling

Door de Dienst getijdewateren van de Rijkswaterstaat is advies gevraagd over de meteorologische aspecten die samenhangen met het creëren van extreem hoge stormvloedstanden langs de kust en in de westelijke Waddenzee. Deze moeten, wat zwaarte betreft, vergelijkbaar zijn met basispeilomstandigheden in Hoek van Holland.

2 Enkele meteorologische opmerkingen

Het creëren van superstormen door het uitvoeren van genoemde opschalingen kan meteorologisch gezien op bezwaren stuiten. De verschijnselen, die zich aan het aardoppervlak (i.c. zee-oppervlak) voordoen zijn namelijk onverbrekkelijk verbonden met processen in de hogere luchtlagen. Het beeld van de luchtdrukverdeling, die men kunstmatig tot stand brengt, kan bij de heersende algemene circulatie volstrekt onmogelijk zijn. Daarbij is het vermenigvuldigen van de wind met een factor 1,75 niet realistisch. Men komt dan op gemiddelde windsnelheden van meer dan 180 km/h of meer dan 50 m/s. Dit zijn gemiddelde windsnelheden, die uitsluitend bij tropische cyclonen worden waargenomen. Bij vermenigvuldiging met een factor 1,25 of 1,50 komt men tot realistischere waarden van 130 tot 155 km/h. De temperatuur van het oppervlaktewater van de Noordzee en de Atlantische Oceaan nabij het Europese continent is (veel) te laag voor tropische cyclonen om zich daar te vormen of te handhaven, gesteld dat zij de oversteek over de Atlantische Oceaan hebben overleefd. Zware stormen in onze streken zijn uitsluitend gekoppeld aan depressies, die niet speciaal extreem diep hoeven te zijn, maar die wel sectoren moeten vertonen met een extreem steil luchtdrukveld.

3 Verplaatsing van opgetreden stormen

Om het in de aanvang gestelde doel - het creëren van hoge waterstanden langs de kust en in de westelijke Waddenzee t.o.v. Hoek van Holland - te bereiken, kan daarom beter gebruik worden gemaakt van opgetreden meteorologische situaties. In het verleden voorgekomen depressies met stormvelden van hoge intensiteit kunnen zodanig worden verschoven dat de nieuwe situatie volgens meteorologisch inzicht tot hoge waterstanden in de westelijke Waddenzee zou moeten leiden. Bij deze handelwijze wordt er niet geknoeid aan de dynamische en fysische opbouw van de atmosfeer binnen het depressiesysteem. Het is namelijk niet denkbaar, waarom een bepaald stromingspatroon niet elders in de atmosfeer zou kunnen ontstaan, waar het gaat om verschuivingen van slechts enkele honderden kilometers. Verschuivingen over duizenden kilometers, speciaal wanneer die plaats vinden in de

noord-zuid richting en omgekeerd, zijn niet toegestaan omdat er dan totaal andere klimaatzone's bij worden betrokken. Ook configuraties, waarbij lijvoren en stuwruggen voorkomen, mogen niet worden gekozen omdat die aan de topografie zijn gekoppeld.

Zeere zware stormen komen voor in gebieden, waar de isobaren dicht opeen liggen. Deze situatie kan zich voordoen zowel in de warme sector van een depressie als in de trog. Trogstormen en warme sectorstormen zijn beruchte verschijnselen. Met name in de trog kan een storm zeer zwaar worden door de onstabiele opbouw van de atmosfeer. Troggen ontstaan onder invloed van processen in de bovenlucht (advectie van koude) en onafhankelijk van de geografie. Troggen kunnen dus zonder ernstige bezwaren met de depressiekern worden verplaatst en eventueel gedraaid. De trog mag echter niet versterkt zijn door een lijvore, zoals bij een Skagerak- en Genuadepressie.

4 Manipulatie met de stormvloeddepressie van 1 februari 1953

Bij de stormdepressie van 1 februari 1953 ontstond op een bepaald moment een trog nabij de Shetland eilanden (pal ten westen van de depressiekern). De trog verplaatste zich over de westelijke Noordzee zuidwaarts om daarna rond het depressiecentrum om te zwaaien zodat het maximale windveld op de Zuidhollandse kust werd gericht waar toen de hoogste opzetten werden gemeten. Het advies was: verschuif de baan van het depressiecentrum zó, dat dit maximale windsnelheid (met richting 270 à 280 gr) gericht wordt op de zuidelijke Waddenzee. Dit kwam neer op een noordwaartse verschuiving van de depressiebaan met maximaal enkele honderden kilometers. Dan kwam de sterkste wind (uit de richting 280 graden) juist op de zuidelijke Waddenzee te staan. Tevens zijn de resultaten van zuidwaartse, westwaartse en oostwaartse verschuivingen berekend.

Door de maximale effecten van deze eenzijdige verschuivingen te combineren leek een absoluut maximaal effect te kunnen worden bereikt. De resultaten van de berekening weken nogal af van het gegeven advies. We kunnen dit als volgt verklaren. Er werd bij de berekeningen gebruik gemaakt van een windveld afgeleid uit een drukveld verkregen van de Engelse meteorologische dienst. Dit drukveld bevatte naast een steil gedeelte bij Schotland (de trog) een ander steil veld boven Zuid-Limburg en de Ardennen. Dit steile veld werd hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het ontstaan van een stuwrug voor de hoogste delen van de Ardennen en de Eifel. Door de depressiekern naar het noordwesten te verschuiven, werd dit steile veld op de Hollandse kust gericht en werden extreem hoge waterstanden gecreëerd. Een dergelijke handelswijze is echter niet geoorloofd (stuwruggen mogen niet verplaatst worden), de met deze manipulatie verkregen waarden moesten worden verworpen. Een (zuid)oostverschuiving was noodzakelijk om de sterke winden bij Schotland voor de Nederlandse kust te krijgen. De sterke winden langs de Schotse oostkust (119 tot 129 km/h of 33 tot 36 m/s uit richtingen 340 tot 360 graden) lagen nu in de volle breedte over de Zuidelijke Noordzee. De met dit experiment verkregen waterstanden zijn door deze in meteorologisch opzicht toegestane verschuivingen reëel. Door de wind met een factor 1,25 te vermenigvuldigen worden dan gemiddelde windsnelheden bereikt (148 tot 162 km/h of 41 tot 45 m/s). Rijkooort en Wierenga (1983) berekenden op metingen uit het tijdvak 1962-1976 voor de lokaties op de lichtscheper Goeree en Texel

een terugkeerperiode van 1000 jaar voor een uurgemiddelde van de potentiële wind van omstreeks 145 km/h of 40 m/s. Iets hogere windsnelheden boven het Noordzeegebied voor de Nederlandse kust zijn in de toekomst dus geenszins ondenkbaar.

5 Invloed broeikas effect

Wat betreft het ontstaan van superstormen als gevolg van een versterkt broeikas effect spreken klimaatmodellen elkaar tegen. Depressies zouden in aantal kunnen toenemen, maar niet in intensiteit veranderen, maar ook zouden veel diepere depressies kunnen ontstaan. Het laatste hoeft echter niet te betekenen dat stormen dan ook heviger worden. Bij klimaatverandering is een baanverschuiving waarschijnlijk. Een noordwaartse baanverschuiving zou voor onze kust een vermindering van het aantal zware stormen betekenen, een zuidwaartse verschuiving een toeneming.

Appendix b

Aanbevelingen over de weging van de resultaten

Door: Prof. ir. A.C.W.M. Vrouwenfelder,

Prof. drs. ir. J.K. Vrijling

Technische Universiteit Delft

Datum: april 1993

Nr.: Memorandum 93-CON-MO57/VRA/BKA

1 Inleiding

Door de Dienst Getijdewateren van de Rijkswaterstaat is aan bovenvermelde personen advies gevraagd over de berekeningsmethode voor het vaststelling van de basispeilen voor de waterstanden voor de Nederlandse kust, als bekend zijn:

- (1) schattingen via waarnemingen ter plaatse;
- (2) schattingen via waarnemingen bij Hoek van Holland en een model voor de onderlinge relaties;

Nader geconcretiseerd waren de vraagpunten:

- (1) hoe moet de weging plaats vinden?
- (2) hoe moet worden omgegaan met de statistische en modelonzekerheden?

Deze notitie is bedoeld om een zo goed mogelijk antwoord op beide vragen te formuleren.

2 Schatting uitsluitend via modelvorming

Algemeen kan worden gesteld dat de waterstanden op (zeg) een tweetal stations langs de Nederlandse kust kunnen worden opgevat als twee gecorreleerde continue stochastische processen. Om de beschouwingen hanteerbaar te houden worden in de praktijk de continue processen vervangen door diskrete processen, bijvoorbeeld door in ieder station de maxima per week te beschouwen. Hierbij wordt aangenomen dat de maxima van de ene week niet gecorreleerd zijn met de maxima van een andere week.

Door over langere tijd in elke week voor elk van de twee stations het maximum te meten, ontstaat een tweedimensionale puntenwolk. Indien de twee stations dicht bij elkaar liggen, zal er sprake zijn van een grote mate van correlatie. Deze correlatie neemt af naarmate de afstand tussen de stations groter wordt.

Men kan nu proberen een model op te zetten voor de relatie tussen het ene station en het andere. Als men voldoende waarneming heeft kan men dit statistisch doen, heeft men die niet dan kan men bijvoorbeeld een fysisch model proberen. In het onderhavige geval wordt getracht beide wegen te bewandelen en de resultaten te combineren.

Voor de helderheid van de discussie is het echter doelmatig ons eerst te beperken tot de situatie dat er geen lokale waarnemingen in het tweede station zijn. We beschikken bijvoorbeeld alleen over waarnemingen bij Hoek van Holland, maar niet bij Harlingen. In dat geval zijn we volledig op het model aangewezen.

In het ideale geval verloopt de modelvorming als volgt:

1) Bepaal de basisvariabelen $X_1, X_2, \dots$ van het probleem. In dit geval zijn dat bijvoorbeeld de uitgestrektheid, de diepte en de baan van de depressie.

2) Bepaal de relaties tussen de waterstanden op de twee beschouwde stations en de basisvariabelen:

$$H_A = H_A(X_1, X_2, \dots) \quad (1a)$$

$$H_B = H_B(X_1, X_2, \dots) \quad (1b)$$

3) Bepaal het verband tussen H_A en H_B . Als we ons beperken tot lineaire verbanden en Gaussische verdelingen, dan kan dit model in de volgende gedaante worden geschreven.

$$H_A = a + bH_B + cU \quad (2)$$

Hierin zijn a , b en c deterministische constanten die direct volgen uit de functies $H_A(\dots)$ en $H_B(\dots)$; U is een standaard normaal verdeelde variabele (dwz gemiddelde 0.0 en standaardafwijking 1.0). In een dergelijk geval bepaalt men gemiddelde en standaardafwijking van H_B via:

$$\mu(H_B) = a + b \mu(H_A) \quad (3a)$$

$$\sigma^2(H_B) = b^2 \sigma^2(H_A) + c^2 \quad (3b)$$

Als de modelparameters a , b en c en de statistische parameters $\mu(H_A)$ en $\sigma(H_A)$ bekend zijn, kan men de statistische parameters van het tweede station schatten. Door de Dienst Getijdewateren is in het onderhavige geval een iets andere weg gevolgd, maar dat doet voor de discussie verder niet ter zake.

Bij de bepaling van de parameters van H_B kunnen er nu dus twee bronnen van onzekerheid worden aangewezen:

(1) statistische onzekerheid als gevolg van het feit dat de statistiek van station A beperkt is.

(2) modelonzekerheid omdat de kennis van het model niet volledig is en de parameters a , b en c niet goed worden geschat.

De Dienst Getijdewateren heeft een schatting gemaakt van de grootte van beide bronnen van onzekerheid. De vraag is nu of deze moet worden meegenomen in de bepaling van de gezochte kwantiel van H_B .

Zuiver redenerend vanuit de betrouwbaarheidstheorie is het antwoord daarop bevestigend. Er is vanuit de theorie geen enkele reden om welke onzekerheid dan ook weg te laten. In de praktijk doet zich echter het probleem voor dat bij het bepalen van hoogwaterstanden met zeer lage overschrijdingsfrequenties door de Rijkswaterstaat normaal geen

rekening wordt gehouden met de statistische onzekerheid. De vraag is dus hoe de modelonzekerheden in a, b en c moeten worden opgevat: als "fysische" onzekerheid of als "statistische" onzekerheid.

De eenvoudigste redenering is om te zeggen dat de onzekerheden in a, b en c leiden tot onzekerheid in de statistische parameters van HB en dus statistische onzekerheden zijn. In feite is dit het standpunt van de groep die zich met de vaststelling van de basispeilen bezighoudt. Als we iets dieper kijken moeten we echter concluderen dat er (minstens) twee vormen van modelonzekerheid zijn:

- vereenvoudiging van fysische relaties
- het weglaten van een stochastische variabele.

De onzekerheid in het eerste geval zou kunnen worden weggenomen door een beter model te nemen. Dit is vergelijkbaar met de statistische onzekerheid die kan worden weggenomen door meer waarnemingen. De tweede modelonzekerheid echter is eigenlijk gewoon een fysische onzekerheid: het enige verschil punt is dat de bron van onzekerheid "anoniem" is. Nader onderzoek zou hier de bron van onzekerheid kunnen aanwijzen, maar niet wegnemen. Met andere woorden: de modellen (1a) en (1b) worden uitgebreid met X_{n+1} , X_{n+2} , enz. en de onzekerheid in de coëfficiënten a, b en c in (2) wordt gereduceerd.

Aangezien beide vormen van onzekerheid door elkaar lopen is de discussie dus eigenlijk niet goed te beslissen. De vraag is natuurlijk of dit erg is. Vaststaat dat de onzekerheid "ergens" moet worden verdiskonteerd. Het is een kwestie van voorkeur of men dit wil doen door het definiëren van een hogere ontwerpwaterstand, dan wel anderszins. Het enige punt is dat de onzekerheid niet "vergeten" wordt. Dit laatste is natuurlijk niet denkbeeldig als men het niet in de ontwerpwaterstand stopt: er is verder in de leidraden geen enkele aanwijzing dat op het ene station de verdere procedure anders is dan op het andere.

3 Het combinatie-probleem

Als er ook nog lokale waarnemingen zijn, zoals in het onderhavige geval, wordt de zaak gecompliceerder. Door de Dienst Getijdewateren wordt de volgende formule voorgesteld om de "modelschatting" en de "lokale schatting" te combineren:

$$H_B = \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_m^2) H_{B2} + \sigma_2^2 H_{B1}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_m^2} \quad (4)$$

- H_{B1} = schatting via model uitgaande van station A (Hoek van Holland)
- H_{B2} = lokale schatting uit statistische extrapolatie van lokale waarnemingen.
- σ_1 = onzekerheid in H_{B1} , afkomstig van de statistische onzekerheid bij station A.
- σ_2 = statistische onzekerheid in H_{B2}
- σ_m = modelonzekerheid

Bij de toepassing van (4) doen zich twee problemen voor:

- (1) De formule veronderstelt dat de onzekerheden onafhankelijk zijn: dit is natuurlijk niet helemaal het geval. De waarnemingen bij Harlingen

kunnen niet geheel onafhankelijk worden beschouwd van die bij Hoek van Holland. Meenemen van deze correlatie in de weging zou leiden tot:

$$H_B = \frac{(\sigma_m^2 + \sigma_1^2 - \rho\sigma_1\sigma_2) H_{B2} + (\sigma_2^2 - \rho\sigma_1\sigma_2) H_{B1}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2} \quad (5)$$

Hierbij is ρ de correlatie tussen de statistische onzekerheden bij Hoek van Holland en het betreffende station. Geconcludeerd kan worden dat als $\sigma_1 < \sigma_2$ een positieve correlatie leidt tot een groter gewicht van het model.

- (2) Stel dat we de modelonzekerheden en de statistische onzekerheden goed in rekening willen brengen. We hebben dan de keuze de modelonzekerheid als een fysische onzekerheid te behandelen dan wel als een statistische. In het eerste geval wordt de modelonzekerheid ondergebracht in de schatting voor het fractiel via het model (fractiel=deelverzameling; het 10% fractiel van een reeks is de waarde die in 10% van de gevallen wordt overschreden). De weging wordt uitsluitend bepaald door de statistische onzekerheden. Daarna wordt de statistische onzekerheid in het resultaat verdiskonteerd. In het tweede geval blijft de modelonzekerheid buiten de schatting van het fractiel, maar speelt wel mee met de weging. Daarna wordt de resulterende gecombineerd statistische/model-onzekerheid in het eindresultaat verdiskonteerd. Beide wegen zullen niet tot hetzelfde resultaat leiden. In dit geval is het probleem hoe de modelonzekerheid moet worden opgesplitst in een "statistisch" en een "fysisch" deel dus van een andere orde dan in paragraaf 2.

4 Conclusies en aanbevelingen

Een theoretisch goede analyse vraagt om:

- het meenemen van zowel modelonzekerheden en statistische onzekerheden in de uiteindelijke schatting van het fractiel.
- het uitsplitsen van de modelonzekerheid in een deel dat het gevolg is van een "mathematische vereenvoudiging" en een deel dat het gevolg is van het "niet meenemen van alle stochasten". Het eerste deel zou als "statistische" en het tweede deel als "fysisch" geïnterpreteerd moeten worden. Het verschil is van belang voor de wegingsprocedure.
- rekening te houden met de afhankelijkheden tussen de statistische onzekerheden van de verschillende stations.

Door de werkgroep is echter:

- geen onzekerheid meegenomen in de schatting van het fractiel.
- geen rekening gehouden met correlaties.
- de modelonzekerheid geheel als statistisch beschouwd.

Deze werkwijze kan om de volgende reden toch als acceptabel wordt bestempeld:

- in de RWS-praktijk worden de statistische onzekerheden nooit meegenomen in de schatting van een fractiel.
- uitsplitsen van de modelonzekerheden in een fysisch en statistisch deel is praktisch ondoenlijk.
- het niet meenemen van de "fysische" modelonzekerheid in de schatting van het "modelfractiel" is een niet-conservatieve fout en zou

dan ook verworpen moeten worden als het model de enige schatting was; het combineren met de lokale gegevens dempt de fout echter aanzienlijk en bovendien is, gezien de werkwijze van RWS, een belangrijk deel van de modelonzekerheid van statistische aard.

- het weglaten van correlatie is conservatief zolang de statistische onzekerheid in Hoek van Holland groter is dan de lokale statistische onzekerheid.

Een belangrijke vraag is nog welke statistische onzekerheid bij Hoek van Holland in rekening moet worden gebracht. De keuze gaat tussen drie mogelijkheden:

- (1) de statistische onzekerheid op basis van de klassieke exponentiële verdeling;
- (2) de statistische onzekerheid die hoort bij de meer geavanceerde methoden, indien men die ook op Hoek van Holland toe zou passen.
- (3) de statistische onzekerheid in de schatting van het basispeil te Hoek van Holland wordt voor deze berekeningen op nul gesteld. Dit basispeil is een axioma.

Voor het antwoord is het van belang te bedenken dat de schatting van het basispeil te Hoek van Holland vanuit het hernieuwde statistische onderzoek niet ver afwijkt van die volgens een exponentiële verdeling, zoals ook in het verleden gebruikt. Dit zou er voor pleiten voor de onzekerheid van H_{B1} uit te blijven gaan van de bijbehorende relatief lage statistische onzekerheid op basis van de exponentiële verdeling. Het resultaat van die gedachte is voor de combinatie-procedure conservatief omdat op die manier de schatting via het model meer gewicht krijgt. In dat geval zou het ook aanbeveling verdienen de correlatie in (5) mee te nemen. Als de statistische onzekerheid van de schatting van het basispeil te Hoek van Holland op nul wordt gesteld dan werkt de schatting via het model nog sterker door, omdat dan alleen de modelonzekerheid overblijft. *Uit zuiver theoretische overwegingen wordt dit niet aanbevolen.*

Slotopmerkingen

- (1) Wellicht ten overvloede wordt gewezen op het belang en de invloed van de data-selectie: de keuze welke stormen wel en niet worden meegenomen bij de verdere statistische analyse heeft veel invloed op de uiteindelijke resultaten.
- (2) Het verwaarlozen van de statistische onzekerheid bij het toepassen van "scherpe statistische verdelingen" zoals toegepast bij de bepaling van de peilen op de Waddenzee moet met de nodige argwaan worden bekeken teneinde een uitgesproken onconservatief resultaat te voorkomen.
- (3) De gang van zaken in dit project toont eens te meer aan dat er nog steeds niet goed opgeloste vragen op het gebied van de statistische verwerking van dit type waarnemingen bestaat. Dit vraagt enerzijds om verder onderzoek en rechtvaardigt anderzijds op dit moment een conservatieve schatting van de waterstanden, zeker als de kosten verbonden aan de hogere schatting reëel gering zijn. Vanuit die optiek is het in ieder geval toe te juichen dat de scherpe zuiver statistische schattingen op voor de Waddenzee (met de relatief grote onzekerheid) naar boven toe gecorrigeerd worden door de schattingen via fysische modellen. Of en in hoeverre dit genoeg was zal moeten blijken.

