

Stormvloedstanden op de Schelde (1971-1986)

P. Bollebakker,
H. de Jong, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren

Foto's Harry v. Reeken, DGW

Het optreden van extreem hoge stormvloedstanden op de Schelde blijkt niet in verband te staan met het sluiten van de Oosterschelde Stormvloedkering. Deze conclusie kan worden getrokken, enerzijds uit de resultaten van een aantal modelberekeningen, anderzijds uit een beknopte statistische analyse.

Welke factoren zijn dan wel van invloed op het ontstaan van extreme hoogwaterstanden op de Schelde?

Uit een analyse van de stormvloedstanden, opgetreden in de periode 1971 - 1986, blijkt dat voornamelijk de combinatie: hoogwaterstand en voorafgaande laagwaterstand te Vlissingen en de daaropvolgende windsnelheid en windrichting, hiervoor bepalend kan worden geacht. Een niet onbelangrijke constatering, gelet op de problemen die in oktober 1986 door een hoge stormvloedstand ontstonden in België.

Inleiding

Op 20 okt. 1986 trad voor het eerst een stormvloed op die het noodzakelijk maakte, dat de Oosterschelde d.m.v. de Stormvloedkering werd gesloten. Tijdens deze storm werd te Antwerpen een sterk verhoogde hoogwaterstand gemeten (TAW +7,20 m), welke een niet gering peilverschil (1,44 m) vertoonde met de hoogwaterstand die te Vlissingen optrad. De bewuste storm veroorzaakte in het Belgische Kruibeke vrij ernstige problemen. Een grote hoeveelheid zandzakken bleek nodig om het rijzende wa-

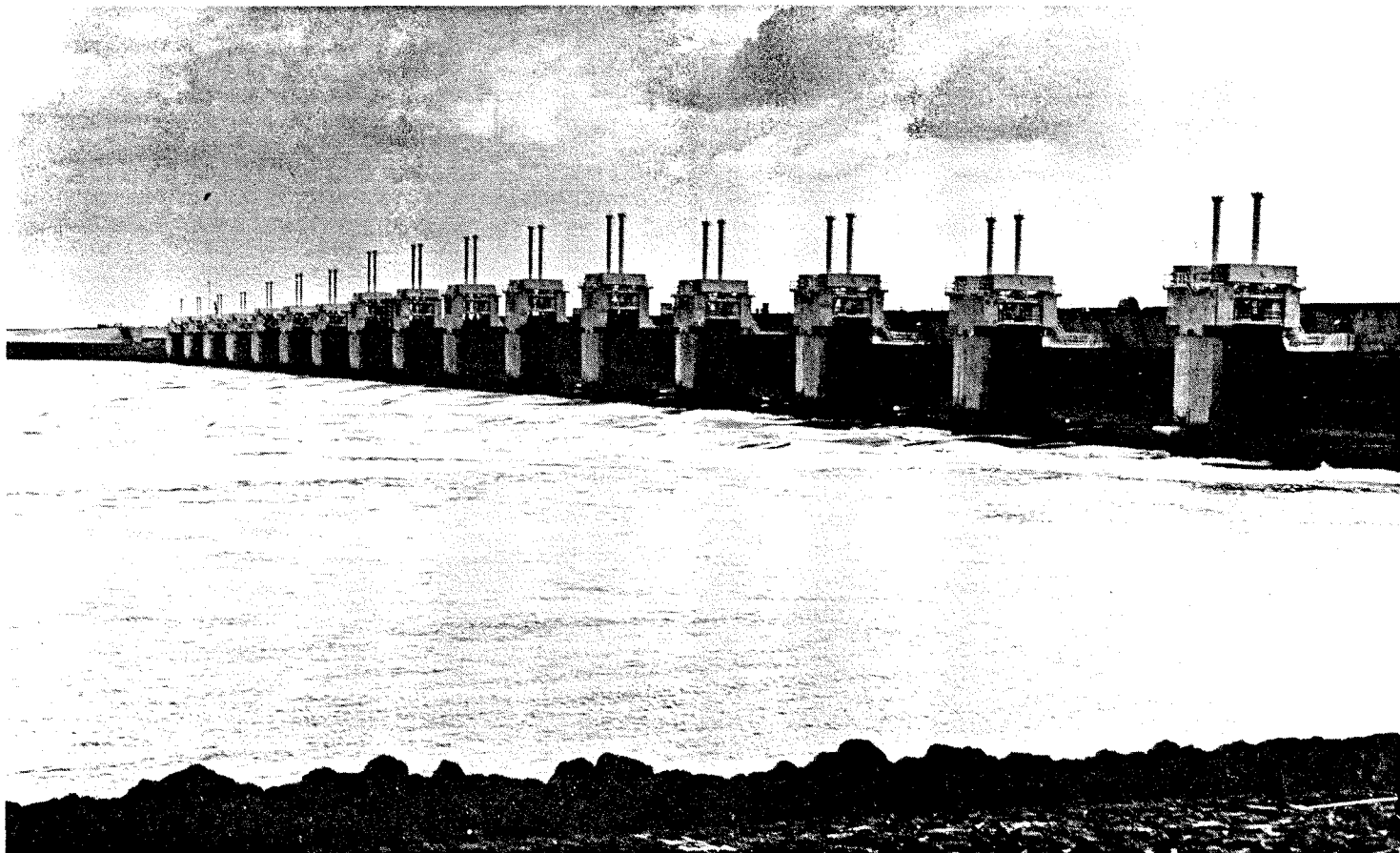
ter te keren. Spoedig werd de suggestie geuit, ondermeer door burgemeester Denernt van Kruibeke, dat er een causaal verband zou bestaan tussen het sluiten van de Stormvloedkering Oosterschelde en de extreem hoge waterstand op de Schelde (o.a. te Kruibeke). Deze problematiek vormde de aanleiding om enig onderzoek te verrichten, ten einde de geconstateerde verschijnselen op bevredigende wijze te kunnen verklaren. In dit artikel worden de bevindingen in kort bestek ¹⁾ gepresenteerd.

Gevolgde werkwijze

De aanpak die gevolgd is, komt globaal op het volgende neer. Allereerst is nagegaan welk effect het sluiten van de Stormvloedkering heeft op de waterstand te Vlissingen. Vervolgens zou dit effect worden doorvertaald met behulp van het waterloopkundig IMPLIC- resp. WAQUA-model Westerschelde, naar Prosperpolder. Gezien echter het feit dat het effect van het sluiten van de Stormvloedkering marginaal bleek te zijn, is van deze doorvertaling afgezien. Wel is door middel van een statistische analyse getracht een betrekking te vinden tussen de opgetreden stormvloedstanden te Prosperpolder en diverse fysische karakteristieken te Vlissingen. Factoren die mogelijk ook nog van invloed zouden kunnen zijn, zoals de bovenafvoer van de Schelde en veranderingen door verrichte verdiepingswerken op de Westerschelde, zijn eveneens in de beschouwing betrokken.

Effect sluiten Oosterschelde Stormvloedkering

Op tweeledige wijze is getracht de vraag te beantwoorden in hoeverre het sluiten van de Oosterschelde Stormvloedkering effect



Stormvloedkering Oosterschelde

heeft op de waterstand te Vlissingen, te weten:

- * d.m.v. berekeningen met het tweedimensionaal model Randdelta-II;
- * d.m.v. een beknopte statistische analyse van de hoogwateropzet te Vlissingen.

Berekeningen met het Randdelta-II model:

De waterbeweging en waterstanden van een aan een getij onderhevig gebied kunnen worden beschreven d.m.v. een zgn. WAQUA-model. Een dergelijk model maakt gebruik van een programmapakket, ontwikkeld door de Rand Corporation, dat de voor de waterbeweging relevante vergelijkingen numeriek oplost.

In 1978 is een dergelijk model ontwikkeld voor het kustgebied vanaf Scheveningen tot Blankenberge (inclusief de Ooster- en Westerschelde). De naam van dit WAQUA-model is Randdelta-II (Langerak e.a., 1978). Met een aangepaste en uitgebreide versie van dit Randdelta-II model (Dekker, 1986), zijn bij het onderhavige onderzoek een tweetal simulaties uitgevoerd, te weten:

- 1) T0-situatie: Oosterschelde Stormvloedkering *open*,
(randvoorwaarde: getij van 1 en 2 september 1975, waarbij 1 sept. als inspeelperiode geldt);
- 2) T1-situatie: Oosterschelde Stormvloedkering *gesloten*,
(randvoorwaarde: overeenkomstig berekening 1).

Uit de berekeningsresultaten blijkt dat de invloed van het sluiten der Stormvloedkering op de waterstand van met name Vlissingen nagenoeg nihil is in relatie tot de nauwkeurigheid van het model. Op grond hiervan kan worden geconcludeerd dat ook stroomopwaarts van het Scheldebekken, de invloed van sluiten zodanig klein zal zijn, dat deze is te verwaarlozen. Een tweetal zaken dienen echter te worden opgemerkt. Strikt genomen hebben de boven vermelde resultaten geen betrekking op stormvloedomstandigheden, maar op de omstandigheden van gemiddeld getij. Voor het aangepaste en uitgebreide Randdelta-II model, gebruikt bij dit onderzoek, waren namelijk voor de zuidelijke zeerand geen randvoorwaarden van stormvloedomstandigheden beschikbaar. Voor het oorspronkelijke Randdelta-II model waren deze wel voorhanden. Gezien nu het feit dat uit vergelijking blijkt dat het hydraulisch gedrag in de T0-situatie van beide modellen vrijwel overeenkomt, kan voor het bepalen van het effect onder stormvloedomstandigheden ook van het oorspronkelijke Randdelta-II model gebruik worden gemaakt. Bij reeds eerder uitgevoerde berekeningen met dit model (Bosselaar, 1975) werd aangetoond dat de maximale waterstandsverschillen tussen de situatie met open Oosterschelde en de situatie met gesloten Stormvloedkering geringer zijn dan 2 cm voor het getijstation Vlissingen, ingeval de storm van 1953 als randvoorwaarde werd opgelegd.

Statistische analyse van de hoogwateropzet te Vlissingen.

Een beknopte statistische analyse van de hoogwateropzet bij Vlissingen van 51 opge-

trede stormen (periode 1980 - 1986) is uitgevoerd, uitgaande van de hypothese: hoogwateropzet Vlissingen is een functie van de laagwateropzet en de windsnelheid bij Vlissingen. Uit de residuen van dit model blijkt dat er geen aanleiding is te veronderstellen dat bij laatst genoemde storm de hoogwateropzet is versterkt door de sluiting van de Oosterschelde Stormvloedkering.

Statistische analyse der stormvloedstanden *Probleemanalyse*

Om de stormvloedstanden, opgetreden op de Schelde, te analyseren, is een statistisch model opgezet. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. het model dient verklarend van karakter te zijn voor stormvloeden opgetreden op de Schelde in de periode 1971 - 1986;
2. het model dient in ieder geval de relatie tussen de optredende stormvloedstand te Prosperpolder (de afhankelijke variabele) en de hoogwaterstand gemeten bij getijstation Vlissingen (verklarende variabele), te bevatten;
3. het model dient de stormvloedstand te Antwerpen van 20 okt. 1986 te kunnen typeren, als zijnde een passende of afwijkende waarneming, op basis van de gevonden residuele waarde;
4. in het model worden eventueel ook andere verklarende variabelen opgenomen.

Aan uitgangspunt 2 ligt de volgende overweging ten grondslag. Indien de opgetreden hoogwaterstand bij het getijstation Vlissingen wordt opgevat als verklarende variabele voor het model, dan kan worden gesteld dat hierin meteen een aantal componenten zijn vervat, die niet meer als afzonderlijke variabelen behoeven te worden ingevoerd. Het opgetreden getij te Vlissingen komt namelijk globaal gezien overeen met een superpositie van het astronomisch getij en de stormopzet. Het bevat ook reeds de invloed van de zeespiegelrijzing en het effect van de 18,6-jarige cyclus ten gevolge van de verandering in de helling van de maasbaan.

Andere factoren die mogelijk van invloed kunnen zijn en eventueel in het model dienen te worden opgenomen, zijn:

- a. het voorafgaande laagwater te Vlissingen;
- b. windinvloed;
- c. verdieping en andere ingrepen;
- d. bovenafvoer van de Schelde;
- e. locale effecten.

Het gebruikte data-bestand

Er is gekozen voor een model met meervoudige lineaire regressie. Hiervoor is een bestand samengesteld waarin - aansluitend bij uitgangspunt 2 en 4 - van een aantal stormen kenmerkende grootheden voor de stations Vlissingen en Prosperpolder voorkomen. Bij het samenstellen van het bestand hebben de volgende overwegingen een rol gespeeld:

- a. slechts die stormen, waarvan de relevante gegevens simultaan voor de getijstations Vlissingen en Prosperpolder beschikbaar waren, komen in aanmerking als basisgegevens te dienen voor de berekeningen;
- b. de data-reeks dient een voldoende groot aantal waarnemingen te bevatten om zin-

vol het meervoudige regressiemodel toe te kunnen passen.

Bovenstaande overwegingen hebben ertoe geleid, niet het station Antwerpen als afhankelijke variabele te hanteren - hetgeen aanvankelijk de bedoeling was - maar Prosperpolder. Een tekort aan waarnemingen en een aantal onzekerheden in de beschikbare waarden, lag hieraan ten grondslag. De beschikbare data van het getijstation Vlissingen (de verklarende variabele) zijn voorts geselecteerd aan de hand van de volgende criteria:

- * de hoogwaterstand te Vlissingen dient hoger of gelijk te zijn aan NAP +2,82m. Laatst genoemd peil vormt namelijk de ondergrens van de waterstanden te Vlissingen die gedurende de periode 1971 - 1986 een waterstand te Antwerpen tot gevolg hadden, welke voldoet aan het door Claessens (1984) genoemde criterium²⁾ voor stormvloeden;
- * de windrichting te Vlissingen dient niet kleiner te zijn dan 270° en niet groter dan 360°;
- * de windsnelheid te Vlissingen dient niet kleiner te zijn dan 7 m/s (gemeten 1 uur na HW Vlissingen). Deze uurwaarde wordt maatgevend geacht voor de periode die verstrijkt tussen HW Vlissingen en HW Prosperpolder. De laagste windsnelheid te Vlissingen welke in de periode 1971 - 1986 een stormvloedstand te Antwerpen tot gevolg had, bedroeg namelijk 7 m/s.

Het statistische model

Van de diverse onderzochte modellen wordt in het kader van dit artikel de volgende hypothese gepresenteerd:

Hoogwater Prosperpolder als functie van hoogwater Vlissingen, windsnelheid Vlissingen en laagwater Vlissingen.

Het model is getoetst aan de dataset. Ook zijn de parameters geschat en is gecontroleerd of de principes van meervoudige regressie geen geweld worden aangedaan d.m.v. een analyse van de residuen. De resultaten zijn als volgt.

De gevonden formulering voor de relatie luidt:

$$y = 1.12 x_1 + 2.7 x_2 - 0.04 x_3 + 10$$

waarin: y = hoogwater Prosperpolder in cm t.o.v. NAP;
 x_1 = hoogwater Vlissingen in cm t.o.v. NAP;
 x_2 = windsnelheid Vlissingen (gemeten 1 uur na tijdstip hoogwater) in m/s;
 x_3 = laagwater Vlissingen in cm t.o.v. NAP.

Voor de totale regressie geldt: $R^2 = 0.94$ en de standaardafwijking van het residu bedraagt 7.5 cm.

Fig. 1 geeft een beeld van de residuele waarden. Gecontroleerd is of er sprake is van autocorrelatie, inhomogene variantie of van niet-normaal verdeeld zijn van de residuele waarden. De resultaten van de Durbin-Watson statistiek (voor diverse sorteringen van de residuen aan de hand van de verklarende variabelen en tijd) geven aan dat er geen sprake is van autocorrelatie. Uit visuele con-

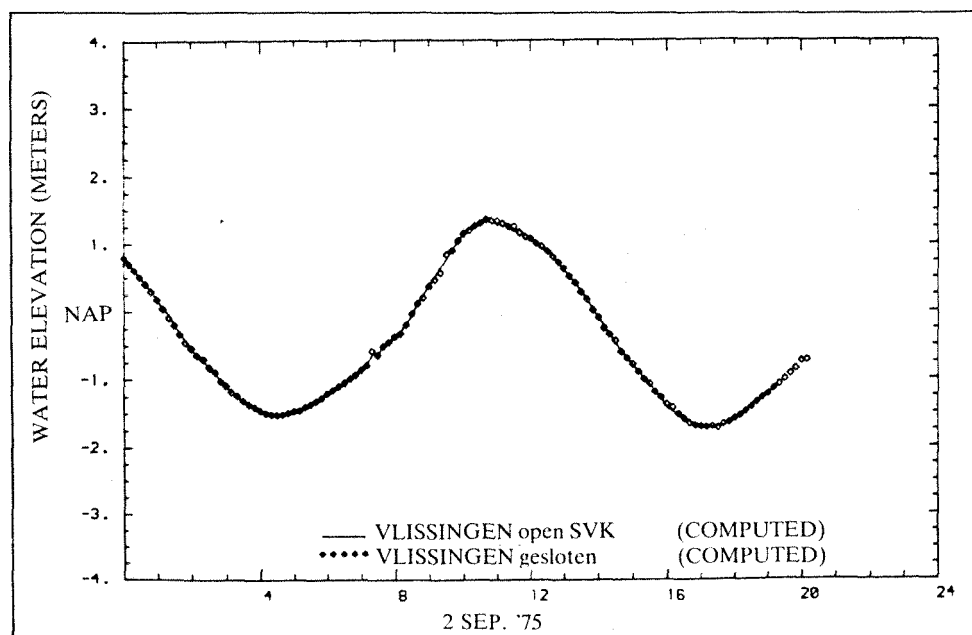
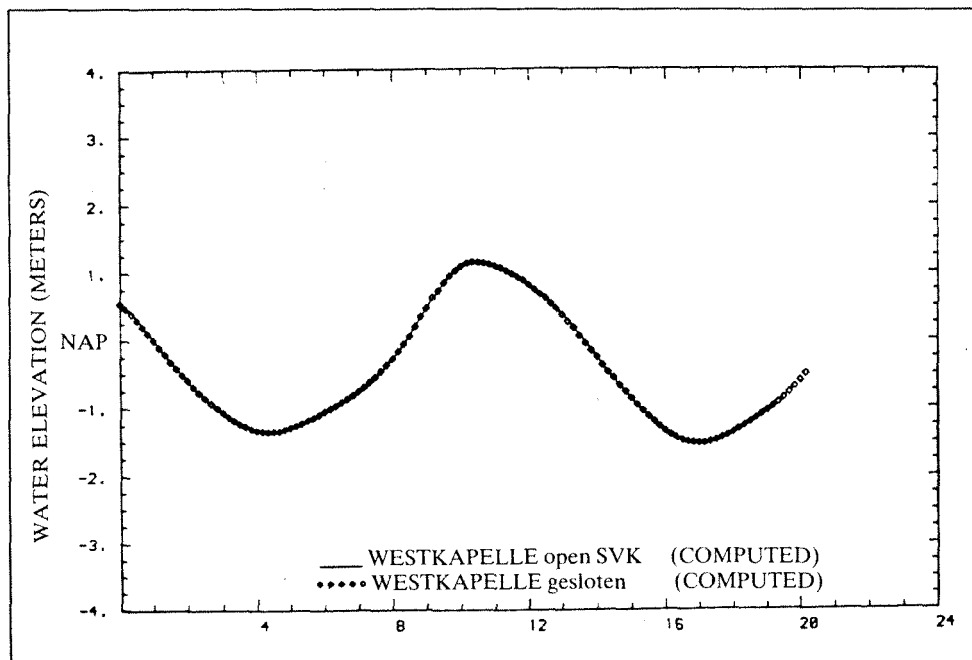
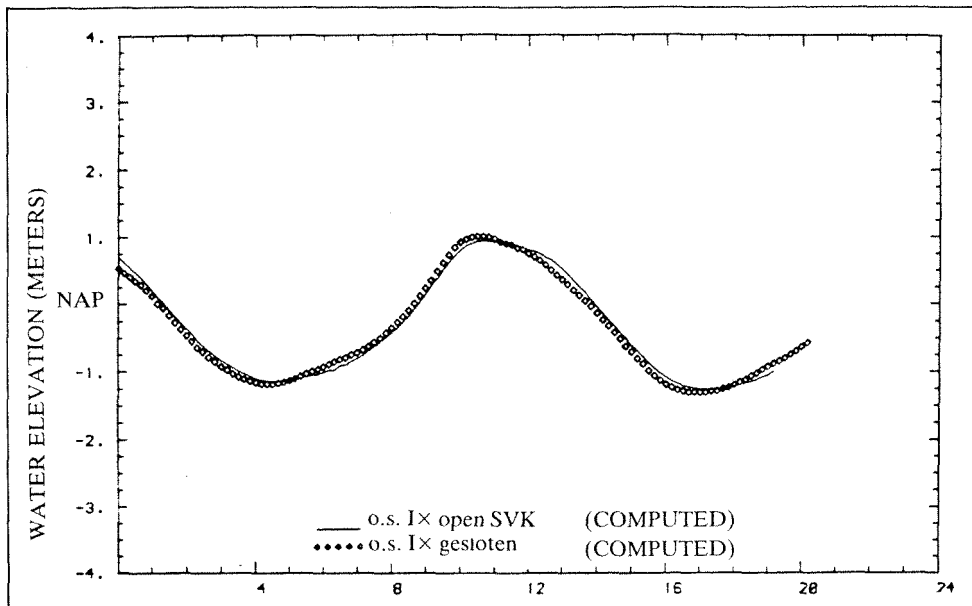


Fig. 1. Waterstanden bij open en gesloten Stormvloedkering

trole van grafieken, waarin het residu is uitgezet tegen resp. index, datum en onafhankelijke variabelen, blijkt dat er geen aanleiding bestaat te veronderstellen dat de variantie inhomogeen is.

De Kolmogorov-Smirnov test op normaliteit geeft bij een onbetrouwbaarheidsdrempel $\alpha = 0.05$ eveneens geen aanleiding de normale verdeling van de residuen te verworpen.

De gevonden statistische relatie kan als volgt worden samengevat: het opgetreden hoogwater bij Prosperpolder onder stormvloedomstandigheden is in sterke mate afhankelijk van het opgetreden hoogwater bij Vlissingen met de hieraan voorafgaande laagwaterstand en de windsnelheid in de periode welke verloopt tussen het tijdstip van HW Vlissingen en HW Prosperpolder.

Om een eventuele invloed van verdieping (door baggerwerken) van de Westerschelde te onderzoeken zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd. Het is mogelijk in het bestand een stap, of een lineair verloop (in de tijd) te definiëren, waarop het hiervoor beschreven model wordt getoetst. Uit de fitresultaten van deze berekeningen blijkt, dat er van een stap-trend, of lineaire trend geen sprake is. Derhalve kan worden vastgesteld dat de verdieping geen rol van betekenis speelt op de hoogte der stormvloedstanden. Wanneer in aansluiting op uitgangspunt 3 een typering van de stormvloed d.d. 20 okt. 1986 dient te worden gegeven, dan kan worden gesteld, dat het hoogwater Prosperpolder van deze stormvloed geen absolute uitbijter in de gevonden residuele reeks is. In fig. 1 komt dit goed tot uiting (laatste waarneming). De absolute afwijking van het model is 16,5 cm. De kans op een dergelijke of grotere afwijking is 3%.

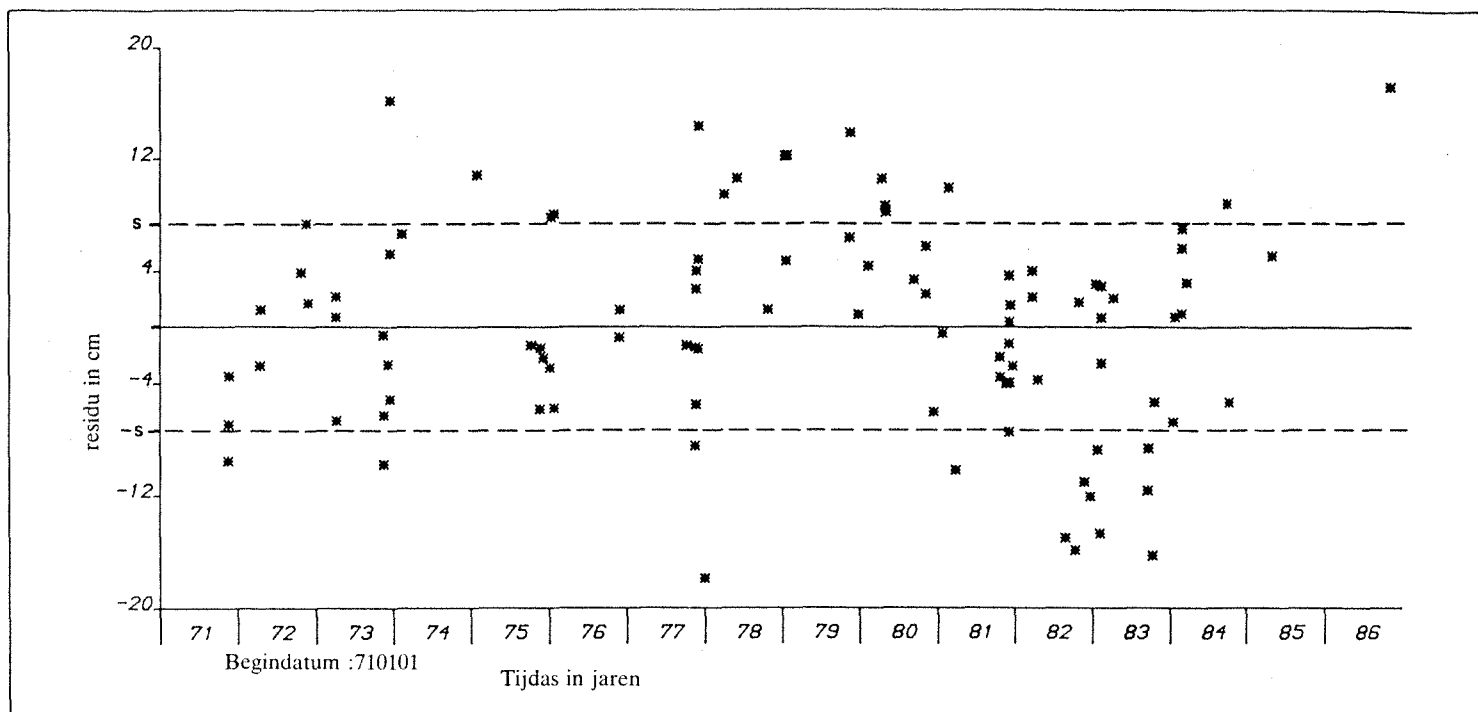
De storm van 20 okt. 1986 werd ook getypeerd door een opvallend groot peilverschil (1,44 m) tussen HW te Vlissingen en HW te Antwerpen. Volgens Belmans (1986) zijn reeds eerder dergelijke extreme peilverschillen bij stormvloed gemeten. Met behulp van het gepresenteerde model zijn deze echter voldoende te verklaren. Duidelijk blijkt dat de voorafgaande laagwaterstand (te Vlissingen) en de windsnelheid hiervoor bepalend zijn.

Nadere beschouwing van de resultaten

De residuele reeks van de behandelde modelformulering bevat een standaardafwijking van ruim 7 cm. Een aantal componenten die niet in de berekeningen betrokken zijn, doch die wel enig effect op het residu kunnen hebben, zijn o.a.:

- * de nauwkeurigheid van de registratie-apparatuur;
- * de lineaire formulering van de gehanteerde parameters;
- * ontbreken van (minder significante) parameters; te denken valt aan de lokale windrichting, die in belangrijke mate het effect van de windsnelheid kan beïnvloeden;
- * lokale effecten als buistoten en oscillaties.

Opgemerkt kan worden, dat het verdisconteren van bovengenoemde aspecten in de berekeningen zeer gecompliceerd is. De standaardafwijking (van het residu) van ruim 7 cm wordt echter voldoende nauwkeurig geacht, zodat een verdere verfijning van het model niet is doorgevoerd.



Residu als functie van de tijd

Conclusies

1. Uit de resultaten van het Randdelta-II model blijkt, dat het sluiten van de Oosterschelde Stormvloedkering geen invloed van betekenis heeft op de waterstand te Vlissingen en dus evenmin op de waterstanden stroomopwaarts het Scheldebekken.
2. Uit het statistisch onderzoek blijkt, dat de optredende hoogwaterstand te Prosperpolder onder stormvloedomstandigheden in sterke mate afhankelijk is van de opgetreden getijcondities te Vlissingen (hoogwaterstand en voorafgaand laagwater) en de windsnelheid in de periode die verloopt tussen het tijdstip van het HW te Vlissingen en het HW te Prosperpolder.
De relatie tussen de genoemde variabelen verklaart 94% van de variatie in de waterstand bij Prosperpolder. De standaardfout van het residu bedraagt slechts 7,4 cm.
3. Het peilverschil tussen het HW Prosperpolder en het HW te Vlissingen wordt in sterke mate bepaald door de windsnelheid welke optreedt in de periode tussen beide tijdstippen en de voorafgaande laagwaterstand te Vlissingen.
4. De stormvloedstand gemeten d.d. 20 okt. 1986 wordt door het gepresenteerde model afdoende verklaard, als zijnde een waterstand waarvan de hoogte hoofdzakelijk is bepaald door de hoogwaterstand te Vlissingen en de voorafgaande laagwaterstand aldaar en de windsnelheid.
5. Tussen de verdieping van de Westerschelde en de hoogwaterstand te Prosperpolder kon bij de eerder beschreven selectiecriteria geen directe relatie worden vastgesteld.

Noten

- 1) Meer uitvoerig zijn de resultaten van dit onder-

zoek gepresenteerd in Bollebakker e.a. (1987).

- 2) Door Claessens en Belmans (1984) wordt een getij als stormvloed aangemerkt als het HW bij het getijstation Antwerpen (loodsgebouw) het peil van TAW + 6,40 m (= NAP + 4,07 m) bereikt of overschrijdt.

Literatuur

Belmans, H.

De buitengewone stormvloed van 20 okt. 1986, Antwerpse Zeediensten, (1e verslag; concept), 1986.

Bollebakker, P., H. de Jong en Sj. v.d. Kamer. Een analyse van de stormvloedstanden bij Antwerpen (Prosperpolder), opgetreden in de periode 1971 - 1986. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren. (Nota GWWS 87.407) 1987.

Bosselaar, B. J.

Invloed stormvloedkering 1985. Rijkswater-

staat Deltadienst, (Notitie DDWT 85.391) 1985.

Claessens, J. en H. Belmans.

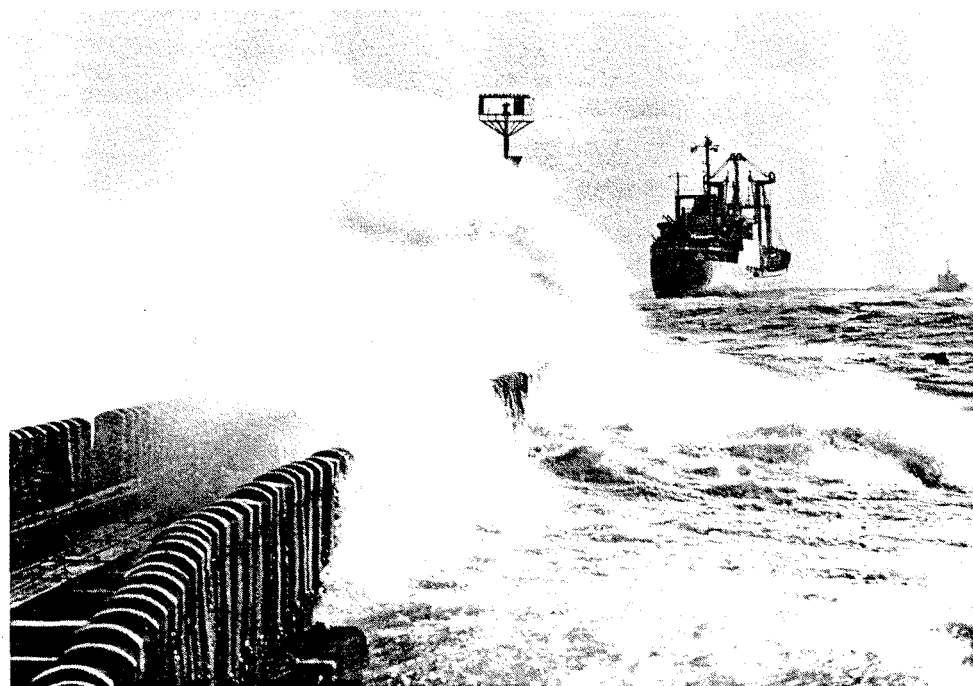
Overzicht van de getijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1971 - 1981, uittreksel uit Tijdschrift der Openbare Werken van België, nr. 3 - 1984.

Dekker, L.

Presentatie van het aangepaste en uitgebreide RANDDELTA-II computer getijmodel. Rijkswaterstaat directie Zeeland, (Nota AXH 86.257) 1986.

Langerak, A., M. A. M. de Ras en J. J. Leendertse.

Adjustment and verification of the RANDDELTA-II model. P6247 RWS WL RAND coöporation 1978.



Storm op de Schelde