

Vergelijking van de door Hydra-B respectievelijk Dijkring Berekende Hydraulische Belastingniveaus in het Benedenrivierengebied

RIZA werkdocument 2003.187X

Project nr. 610.033.15

Q. Gao WSH/RIZA

Datum : 08-12-2003

Samenvatting:

Het hydraulische belastingen op dijken vormen de belangrijkste parameters in het toetsen van de primaire waterkeringen. Met behulp van een probabilistisch rekenmodel, kan in principe, het veiligheidsniveau van een dijkvak worden bepaald door de combinaties van zeewaterstanden, afvoeren en wind.

Het rekenmodel Dijkkring is in de jaren 90 ontwikkeld. Met Dijkkring kunnen de veiligheidsniveaus van dijken in het westelijke gedeelte van het benedenrivierengebied getoetst worden. Het model kan zowel op een geheel dijkkringgebied als op basis van individueel dijkvak worden toegepast. Onlangs is door het RIZA een nieuw rekenmodel, Hydra-B, ontwikkeld. Hydra-B dient voor het toetsen van de primaire waterkeringen in het hele benedenrivierengebied gebruikt te worden. Hydra-B is sterk aan Dijkkring verwant. Bij de introductie van een nieuw model is het verstandig aan te geven wat de verschillen zijn met het vorige model. Dit is de reden voor dit onderzoek. Uit vergelijkingen met fictieve dijken is gebleken dat Hydra-B hogere olop- of overslaghoogte oplevert dan Dijkkring. Dit zou kunnen betekenen dat volgens het nieuwe model een verhoging van de kruinhoogte wordt vereist. Hierdoor staat de acceptatie van Hydra-B ook ter discussie. In dit rapport is Hydra-B versie 1.1.01 vergeleken met Dijkkring versie 5.0. Dit is met potentiële wind en niet de wind op 10 meter hoogte (open water wind). In Hydra-B versie 2.0 wordt open water wind gebruikt.

In dit rapport zal worden getracht om de oorzaken tussen beide modellen van de verschillen te verklaren. In verband daarmee zullen de methodieken van de twee modellen ook worden onderzocht.

Dijkkring is ontworpen voor de toepassing op PC's. Destijds (in het begin van de jaren 90) waren het computergeheugen en de rekensnelheid van PC's zeer beperkt. Vandaar dat het rekenmodel sterk vereenvoudigd werd. Hieronder zijn de twee belangrijkste vereenvoudigingen bij het opstellen van het model genoemd.

1. Het model omvat het gehele benedenrivierengebied, maar er zijn alleen 51 locaties waarvoor de lokale waterstanden zijn opgegeven. Deze zijn tevens MSW stations. Van de gegeven locaties zijn er 44 locaties voor de door Rijn en 7 voor de door Maas gedomineerde gebieden. Voor een willekeurige locatie moet de waterstand worden geïnterpoleerd.
2. Bij het bepalen van lokale waterstanden is uitgegaan van één overheersende windrichting (WNW) waarbij de relatie tussen de windsnelheden en de stormopzet van zeewaterstanden deterministisch is gelegd.

Vanwege de verbetering in de kennis en meetgegevens kan Hydra-B de veiligheidsniveaus van de primaire waterkeringen nauwkeuriger bepalen. In Hydra-B worden zowel windgolven als de zeewaterstanden volledig probabilistisch behandeld. Bij het bepalen van lokale waterstanden is de dichtheid van de uitvoerlocaties zo hoog dat voor praktische toepassingen een interpolatie niet nodig is. Dit is alleen mogelijk wegens de sterk toegenomen rekenkracht van de PC's van de laatste jaren.

Met de twee rekenmodellen worden de berekende belastingniveaus op 8 locaties onderzocht. Hieruit is gebleken dat de oorzaken van de verschillen in de berekende belastingniveaus op hoofdlijnen goed verklaarbaar zijn. De volgende verschillen hebben met name invloed op de berekende kruinhoogten, t. w.:

1. Keus voor golfparameter.
2. Nieuwe officiële sluitingscriteria van de keringen SVKH en SVKW.
3. Probabilistische verwerkingen van zeewaterstand.
4. De berekende lokale waterstanden voor 16 windrichtingen i.p.v. een enkele (WNW).

Door aanpassingen van de invoer of instellingen van de rekenmodellen kunnen de verschillen in de berekende belastingniveaus worden verkleind en daarmee verklaard. Maar door de complexe probabilistische berekeningen is het geheel op deze wijze verklaren van de verschillen niet mogelijk. Dit komt omdat sommige factoren, zoals lokale waterstanden en kansberekeningen niet afzonderlijk geïsoleerd kunnen worden.

Inhoudopgave

Samenvatting:	2
1. Inleiding	5
1.1 Algemene beschrijving	5
1.2 Probleemstelling	5
1.3 Doelstelling	6
1.4 Aanpak	6
2. Globale beschrijving voor Hydra-B en Dijkkring	8
2.1 Rekenformules voor overschrijdingsfrequentie	8
2.2 De verschillen tussen Dijkkring en Hydra-B	9
2.3 Beschrijving voor de testlocaties	11
2.3 Instelling voor het berekenen van windgolven	11
2.4 Faalmechanisme	12
2.5 Instelling voor overige parameters	13
3 Vergelijking modelresultaten	15
4 Reproducieren de belastingniveaus van Dijkkring	18
4.1 Inleiding	18
4.2 Toelichting voor stap 1-4	18
4.3 Illustreren voor de locatie Hellevoetsluis	19
4.4 Opmerking en conclusie	21
5. Berekeningen met aangepaste parameters	22
5.1 Algemene beschrijving	22
5.2. Aanpassingen	22
6. Onderzoek naar overige invloeden	24
6.1 Inleiding	24
6.2 Verschil in faalkans	24
6.3 Verschillen in afvoerstatistiek	24
6.4 Verschil in uitvoerlocaties	25
6.5 Verschillen in de besturing van keringen	25
6.6 Keuzes en methodieken voor de invoer van lokale waterstand, windgolven en zeewaterstanden	26
6.7 Verschillen in wind –Zeewaterstandstatistiek	27
6.8 Correlatie met verschil in overloophoogten	28
6.9 Correlatie met lokale waterstanden	28
7. Conclusies	30
Bijlage A. Formules voor windgolven	31
A.1 Formules van Bretschneider	31
A.2 Definities voor effectieve strijklengte en bodemhoogte	31
Bijlage B. Formules voor golfoverslag	33
B.1 Golfoverslag	33
B2. Reductiefactor voor strijkgolven	34
Bijlage C. Verhouding tussen T_p en T_s	36
Literatuur	39
Figuur	41

1. Inleiding

1.1 Algemene beschrijving

In de Wet op de waterkering staat aangegeven dat de minister van Verkeer en Waterstaat elke 5 jaar hydraulische randvoorwaarden publiceert ten behoeve van het toetsen van veiligheid van de primaire waterkering in Nederland. In 2001 zijn de hydraulische randvoorwaarden voor het benedenrivierengebied gepubliceerd, waarbij alleen toetspeilen zijn vastgesteld. Naast de toetspeilen is het van belang een toetsmodel te hebben voor het toetsen op hoogte van waterkeringen voor de faalmechanismen waterstand, 'golfoploop' en 'golfoverslag'. Hydra-B, het nieuwe toetsmodel voor het benedenrivierengebied, is te beschouwen als een nalevering van het Randvoorwaardenboek 2001 en met name van de cd-rom Hydra-2001

Het benedenrivierengebied bevindt zich in het benedenstroomse gedeelte van Rijn en Maas. De bovengrens van dat gebied op basis van de verandering in normfrequentie ligt bij de kilometerraaien 231(Maas), 952(Waal) en 943(Lek); de benedengrens bij kilometerraaien 1029(Haringvliet) en 1035 (Maasmond). In het gebied worden de waterkeringen beïnvloed door een aantal factoren: dit zijn de natuurlijke factoren zoals de rivierafvoeren van de Rijn en Maas, en hoge zeewaterstanden als gevolg van stormopzet; daarnaast zijn de menselijke factoren zoals de door mens aangebrachte stormvloedkeringen en de veranderingen van natuurlijke geometrie van de rivieren. Vanwege deze eigenschappen wordt het benedenrivierengebied als een apart watersysteem beschouwd.

Het hydraulische belastingniveau(benodigde kruinhoogte) wordt bepaald door de lokale waterstand, windgolven en gegevens van dijkprofiel. De lokale waterstand in het benedenrivierengebied wordt mede bepaald door de afvoeren van grote rivieren, de zeewaterstand, de windsnelheid en windrichting. De waterstanden op zee zijn grotendeels afhankelijk van de windsnelheid en de windrichting. Hoge windsnelheid uit de westelijke richtingen kan tot hoge zeewaterstand leiden. Wanneer de stormvloedkeringen in de Nieuwe Waterweg (SVKW) en in het Hartelkanaal (SVKH) worden gesloten hebben deze eveneens invloed op de lokale waterstanden.

Golfhoogte, piekperiode en golfrichting(golfparameters) worden bepaald door de windsnelheid, windrichting, de geometrie van de rivier en de waterdiepte. Met behulp van een golfmodel kunnen de golfparameters worden uitgerekend. De hoogte van golfoploop/overslag wordt bepaald door de golfparameters bij de teen van de dijk, de hoek van golfaanval, de hoogteligging van het voorland en het dijkprofiel. Golfoploop/overslag is voor het deelgebieden Haringvliet en Hollands Diep de belangrijkste factor van de kans op overbelasting.

Om de hydraulische belastingniveaus in het benedenrivierengebied te bepalen zal het probabilistische rekenmodel Hydra-B(Geerse, 2000) worden toegepast. De stochasten, die een rol spelen bij het berekenen van de benodigde kruinhoogten, zijn de Rijnafvoer te Lobith, Maasafvoer te Lith, de zeewaterstanden te Maasmond en de wind op Schiphol. De kans op het falen van de stormvloedkeringen vormt ook een onderdeel van het probabilistische model.

1.2 Probleemstelling

Er zijn sinds begin jaren negentig twee rekenmodellen die beschikbaar zijn voor het uitrekenen van de benodigde kruinhoogten in het benedenrivierengebied Dijkring en het model van de provincie Zuid Holland. In 2006 dient er echter het rekenmodel Hydra-B gebruikt te worden om het hydraulische belastingniveau te bepalen. In het model worden alle belangrijke

stochasten: de afvoeren, de zeewaterstanden, de windsnelheden en windrichtingen volledig probabilistisch behandeld. Bij het bepalen van lokale waterstand is de dichtheid van uitvoerlocaties zo hoog dat een interpolatie niet nodig is. Om een berekening met het model uit te voeren is een recente PC vereist.

Het rekenmodel Dijkkring 5.0 (Den Heijer 1994. Hierna afgekort als Dijkkring) is in de jaren 90 voor het toetsen van veiligheidsniveaus van een geheel dijkkringgebied ontwikkeld, maar het model kan ook worden toegepast op een individueel dijkvak. Door de beperking in het computergeheugen en de rekensnelheid van de PC's in de jaren 90 zijn er vereenvoudigingen in het model geïmplementeerd.

Uit recente vergelijkingen (Lammers & Duits, 2002) van de berekende belastingniveaus in het benedenrivierengebied is gebleken dat met fictieve dijken het rekenmodel Hydra-B een hogere oploop en overslaghoogte oplevert dan Dijkkring. Dit betekent dat volgens het nieuwe rekenmodel een verhoging van de benodigde kruinhoogte zou kunnen worden vereist. Hiermee stond de acceptatie van Hydra-B ook ter discussie.

Op verzoek van het RIZA heeft HKV Lijn in Water (Stijnen, e.a. 2003) onderzoek uitgevoerd naar de verschillende oploop/overslagmodules (afgekort: oploopmodules) die reeds in aantal belastingmodellen werden geïmplementeerd. Er zijn in Dijkkring twee variaties van oploopmodules: variatie van Leidraad 1986 (variatie I) en variatie van TAW-94 (variatie II). Vergelijken met variatie I berekent de oploopmodule Hydra-B inderdaad een hogere oploophoogte; vergeleken met variatie II levert Hydra-B dezelfde oploophoogte op als Dijkkring indien de hoek tussen de invalgolven en de dijk normaal kleiner is dan 70 graden. Groter dan deze berekent variatie II zelfs een hogere oploophoogte.

Uit het bovenstaande onderzoek blijkt dat Hydra-B niet altijd hogere overslaghoogten oplevert als Dijkkring variant II. Verder onderzoek is echter nodig om de oorzaken van het verschil (in de berekende belastingniveaus tussen Dijkkring en Hydra-B) naar boven te halen. Dit is de aanleiding van de onderhavige studie.

1.3 Doelstelling

Doel van deze studie is om de oorzaken van de verschillen tussen de twee modellen, Hydra-B en Dijkkring, naar boven te halen en op een juiste manier te verklaren. Het model van de provincie Zuid Holland volgt in grote lijnen Dijkkring. Met deze studie worden dus ook verschillen met het model van de provincie op hoofdlijnen verklaard.

1.4 Aanpak

Behalve het verschil in oploopmodules zijn er nog aantal verschillen tussen de twee rekenmodellen Dijkkring en Hydra-B. Dit zijn:

- de aparte afwikkeling in Hydra-B van profieldelen, dam, voorland en dijkprofiel (in Dijkkring is het strijklengte vak gelijk aan het profielvak en kiest het programma zelf de overgangen).
- de aannames in de probabilistische rekenformule,
- de probabilistische behandeling voor stormopzet voor zeewaterstanden,
- de statistiek voor afvoeren uit grote rivieren, -
- de wind-waterstandsstatistiek ,
- de sluitcriteria van de kunstwerken
- de bepaling van de lokale waterstanden met 16 ipv 1 windrichting.

In onderzoek naar de oorzaken van verschillen moet met het bovenstaande rekening gehouden worden

In de onderhavige studie is gebruik van de rekenmodellen **Hydra-B 1.1.0.1** en **Dijkkring 5.0** gemaakt. De aanpak van het onderzoek is als volgt:

- ❑ Ter informatie worden de formules van het probabilistische model Hydra-B en de samenhang met Dijkkring in hoofdstuk 2 gegeven.
- ❑ De berekende hydraulische belastingniveaus van Dijkkring en Hydra-B worden in hoofdstuk 3 vergeleken. Dit wordt gedaan voor 8 testlocaties, welke zich in het zeegebied en het overgangsgebied van het benedenrivierengebied bevinden. Om de verschillen tussen Hydra-B en Dijkkring te verklaren worden in hoofdstuk 4 t/m 6 een aantal instellingen van de rekenmodellen onderzocht.
- ❑ In hoofdstuk 4 worden de berekende belastingniveaus van Dijkkring gereproduceerd.
- ❑ In hoofdstuk 5 wordt een aantal instellingen van de modellen aangepast.
- ❑ Verschillen in methodieken worden in hoofdstuk 6 onderzocht.
- ❑ In hoofdstuk 7 worden de conclusies getrokken.

2. Globale beschrijving voor Hydra-B en Dijkkring

Het falen van een dijk is mogelijk zowel door een combinatie van lage waterstanden en hoge golven, als door een combinatie van hoge waterstanden en lagere golven. Hieruit blijkt dat het gehele frequentiedomein van afvoeren, waterstanden en wind van invloed is op de faalkans van een waterkering. De kansberekening wordt daarom uitgevoerd door numerieke sommatie over dat gehele domein. De modelmatige aanpak voor de bovengenoemde problemen zijn dezelfde zowel voor Hydra-B als voor Dijkkring en zullen in dit hoofdstuk worden beschreven.

In paragraaf 2.1 worden de rekenformules van Hydra-B beschreven. De verschillen overeenkomsten, van de twee modellen zullen in paragraaf 2.2 worden gegeven. De instellingen voor modelberekeningen zullen in paragraaf 2.3~2.5 worden gegeven.

N.B.: Gezien dat het begrip ‘hydraulische belastingniveau’ als de benodigde (berekende) kruinhoogte bij een gegeven overschrijdingsfrequentie verstaan kan worden, zullen deze twee begrippen in het onderhavige rapport soms door elkaar worden gebruikt. Als er nodig is, zal de algemenere term ‘berekende kruinhoogte’ worden gebruikt.

2.1 Rekenformules voor overschrijdingsfrequentie

De rekenformules in deze paragraaf zijn afkomstig uit het rapport van Geerse(2000). De belangrijke stochasten in de rekenmodellen zijn wind, rivierafvoeren en zeewaterstanden.

De afvoeren worden in beide modellen (Dijkkring en Hydra-B) gesplitst in lage afvoeren die beneden een grenswaarde q_g liggen en in hoge afvoeren die zich boven die grenswaarde bevinden. Voor de lage afvoeren worden in de modellen verschillende rekeningswijze dan voor de hoge afvoeren toegepast. De overschrijdingsfrequentie $\Psi_H(h)$, waarmee het belastingniveau h , c.q de benodigde kruinhoogte, wordt overschreden, wordt gegeven door de som van de overschrijdingsfrequenties voor de lage afvoeren $\Psi_H(h, Q_{laag})$ en voor de hoge afvoeren $\Psi_H(h, Q_{hoog})$,

$$\Psi_H(h) = \Psi_H(h, Q_{laag}) + \Psi_H(h, Q_{hoog}) \quad [2.1]$$

De formule voor de lage afvoeren in Hydra-B is gelijk aan die van Dijkkring. De rekeningswijze is ook aangeduid als de Delta Methode voor de Lage afvoeren (DML), welke de vorm heeft als volgt:

$$\Psi_H(h, Q_{laag}) = N \int_0^{q_g} dq g(q) P(H_q > h) \quad [2.2]$$

waarin $g(q)$ de momentane kansdichtheid van de rivierafvoer is. N is aantal dagen per winterhalfjaar. $P(H_q > h)$ is de kans dat gedurende één getijperiode, bij gegeven afvoer q , het belastingniveau h wordt overschreden. $P(H_q > h)$ is gedefinieerd als volgt:

$$P(H_q > h) = \sum_{r=1}^9 \int_{u: \gamma_o(q, u, m_0, r) > h} du g(u, r) + \sum_{r=10}^{16} \int_0^{\infty} dm \left[\int_{u: \gamma_o(q, u, m, r) > h} du g(u, m, r) p(O | q, u, m, r) + \int_{u: \gamma_D(q, u, m, r) > h} du g(u, m, r) p(D | q, u, m, r) \right] \quad [2.3]$$

waarin γ_o en γ_D deterministische functies zijn voor de geopende resp. de gesloten keringen. Deze functies zijn afhankelijk van afvoer q , windsnelheid u , zeewaterstand m en windrichting r . $g(u,m,r)$ is de gezamenlijk kansdichtheid van u , m , en r . $p(O|q,u,m,r)$ en $p(D|q,u,m,r)$ zijn de conditionele kansdichtheid voor een open resp. dichte keringen.

Voor de hoge afvoeren wordt in beide modellen gewerkt met de standaard afvoergolven. Om tot de overschrijdingsfrequentie $\Psi_H(h, Q_{hoog})$ te komen dient de faalkans tijdens de passage van de afvoergolf gewogen te worden met de frequentie van afvoertoppen. De rekeningswijze wordt ook als de IAG-methode aangeduid (IAG staat voor Individuele AfvoerGolf).

$$\Psi_H(h, Q_{hoog}) = N \int_{q_g}^{\infty} dk \psi_K(k) P(F_q | k) \quad [2.4]$$

Hierin is $\psi_K(k)$ de frequentiedichtheid van de afvoertoppen dat het niveau k overschrijdt. $P(F_q | k)$ is de faalkans tijdens de passage van de afvoergolf met top hoogte k dat faal optreedt. $P(F_q | k)$ wordt gedefinieerd als volgt,

$$P(F_q | k) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P(H_{q(j)} > h)] \quad [2.5]$$

waarin n het aantal getijperioden dat de afvoergolf met top k zich boven het niveau q_g bevindt, $q(j)$ is de gemiddelde afvoer tijdens getijperiode j . In het opstellen voor $P(F_q | k)$ is in Hydra-B uitgegaan van verschillende aanname als Dijkkring (Geerse, 2000). $P(H_{q(j)} > h)$ wordt door de vgl. (2.3) bepaald.

Qua opzet van rekenmethodiek zijn beide modellen aan elkaar verwant, maar deze twee verschillen ook in aantal aspecten. In de volgende paragrafen zullen deze in het kort worden beschreven.

2.2 De verschillen tussen Dijkkring en Hydra-B

2.2.1 Inleiding

In paragraaf 2.1 treffen we aantal belangrijke variabelen, zoals $P(F_q | k)$, $g(q)$, $\psi_K(k)$, $g(u,m,r)$. Deze zijn afhankelijk van zeewaterstanden, afvoeren en wind. Op de details over de afleiding van deze variabelen zullen we niet ingaan, maar we zullen in deze paragraaf de bewerkingen van deze variabelen, die rechtstreeks te maken hebben met de verschillen in de berekende resultaten, in het kort samenvatten. Hiertoe worden de verschillen, soms ook de overeenkomsten, van de twee modellen gegeven. We beschrijven ook de methoden waarmee de lokale waterstanden worden behandeld. Enkele van deze komen we weer terug in het hoofdstuk 6.

2.2.2 Verschil in de aanname voor faalkans

De aannames voor faalkans $P(F_q | k)$ verschillen in de twee modellen van elkaar. De aanname voor de afleiding van de faalkans is in Hydra-B meer gemotiveerd dan in Dijkkring. Op basis van blokgolf lijkt het vrij wel zeker dat de methode van Dijkkring hogere faalkans zal geven dan Hydra-B (Geerse 2000). Een ruwe schatting is dat de Dijkkringmethode tot een factor 1 tot 1,5 hogere faalkans kan leiden.

2.2.3 Probabilistische bewerking voor lokale waterstand, windgolven, zeewaterstanden

De windgolven worden in beide modellen volledig probabilistisch behandeld. De zeewaterstanden in Hydra-B worden, zoals voor windgolven, ook volledig probabilistisch

verwerkt. Door de combinaties van afvoeren, zeewaterstanden, windsnelheden en windrichtingen worden de lokale waterstanden in het model bepaald. Bij bepaling van de lokale waterstand uit afvoeren en zeewaterstanden is in Dijkkring een vereenvoudiging aangebracht. Hierin is de relatie tussen wind en zeewaterstanden deterministisch gelegd, uitgaande van één enkele overheersende windrichting(WNW). Andere randvoorwaarden waren op dat moment niet beschikbaar.

2.2.4 Wind-waterstandenstatistiek

Voor het uitrekenen van $g(u,m,r)$, de gezamenlijk kansverdeling van windsnelheid u , zeewaterstand m en windrichting r , zijn er statistieken van wind-zeewaterstanden nodig. In Dijkkring is de kansverdeling gebaseerd op de statistieken van Volker (Volker, 1989), uitgaande van een basispeil van 5,15m+ NAP. In Hydra-B is een ander basispeil (5,0m+NAP) gehanteerd. Daarnaast is de kansverdeling op relatief simpele wijze aangepast aan de nieuwe gegevens. Hiertoe wordt de conditionele kansverdeling $g(mlr)$ van Volker, welke een exponentiele vorm heeft, vervangen door Paretoverdeling (zie Geerse 2003).

2.2.5 Afvoerstatistiek

Voor het uitrekenen van $g(q)$, $\psi_k(k)$ heeft men afvoerstatistieken van Rijn en Maas nodig. Hoge afvoeren uit Rijn of Maas vormen de belangrijkste bedreiging situaties zowel voor het bovenrivierengebied als voor het benedenrivierengebied. De afvoerstatistieken in Dijkkring is nog uitgegaan van de oude toestand (Commissie Boetien I). Na de hoogwaters van winter 1993 en het voorjaar van 1995 zijn de afvoerstatistieken opnieuw afgeleid. Deze zijn ook in Hydra-B geïmplementeerd.

2.2.6 Verschillen in de besturing van de keringen

Tijdens hoge stormvloeden worden twee keringen, SVKW en SVKH, gesloten om de wateroverlast voor de achterliggende gebieden te beperken. In de rekenmodellen wordt deze met $p(Olq,u,m,r)$ en $p(Dlq,u,m,r)$, de conditionele kansdichtheid voor open- resp. dichte keringen, in rekening gehouden. In Dijkkring is de besturing van de keringen afhankelijk van afvoeren en zeewaterstanden. In Hydra-B is de besturing afhankelijk van windsnelheid, windrichting, zeewaterstand en afvoer. Alle vier worden als stochasten behandeld.

2.2.7 Verschillen in berekende waterstanden, ZWENDL v.s. SOBEK

Beide Dijkkring en Hydra-B hebben rekening gehouden met zeespiegelstijging. In Dijkkring zijn er per locatie 216 verschillende waterstanden als gevolg van de combinaties van de zeewaterstanden en de afvoeren. In Hydra-B zijn er per locatie 3384 verschillende waterstanden als gevolg van de combinaties van de zeewaterstanden, de afvoeren, de windsnelheden, de windrichtingen en de status van de keringen.

Voor het uitrekenen van lokale waterstanden maakt Dijkkring gebruik van de resultaten uit ZWENDL. Hydra-B maakt gebruik van SOBEK resultaten.. De SOBEK aan de oever zijn in het Haringvliet en Hollandse Diep gecorrigeerd voor dwarsopwaaiing. ZWENDL waterstanden voor de genoemde gebieden zijn langs de rivieras zijn berekend. Hierbij kan een verschil van 1 tot 4cm voor deze gebieden worden verwacht, omdat de as van de rivier het kantelpunt is.

2.2.8 Uitvoerlocaties voor lokale waterstanden

In sectie 1.2 is al aangegeven dat de probabilistische behandeling voor zeewaterstanden in Dijkkring sterk is vereenvoudigd door beperkte mogelijkheden van PC's uit de jaren 90. De andere belangrijkste vereenvoudiging is het aantal uitvoerlocaties voor lokale waterstanden. Voor het hele benedenrivierengebied zijn er alleen 51 locaties waarvoor de lokale waterstanden zijn opgegeven. In Hydra-B zijn er ongeveer 10.000 locaties. Details komen we in het hoofdstuk 6 terug.

2.3 Beschrijving voor de testlocaties

De instellingen voor dijknormaal(dijkoriëntatie) en overschrijdingsfrequentie, zijn dezelfde zowel voor Hydra-B als voor Dijkkring. Voor de 8 testlocaties in het benedenriviereengebied (figuur 1) zijn de belangrijke parameters als volgt(tabel 1):

De bodemhoogten zijn die ter plaatsen van de locaties,
De gemiddelde bodemhoogte over de strijkraai
De Effectieve strijklentes

Modelberekeningen zijn uitgevoerd met twee dijkprofielen: een met simpel dijkprofiel, met een talud van 1 op 3; en een met hetzelfde dijktaalud, maar met een enkele berm erbij welke een breedte van 3m heeft. De dijkruwheid wordt in beide rekenmodellen voor 1 aangehouden.

2.3 Instelling voor het berekenen van windgolven

De windgolven worden berekend volgens de formules van Bretschneider. Als referentie worden deze ook in Bijlage A gegeven. Hierin worden de strijklengten en gemiddelde bodemhoogten gedefinieerd.

Voor een berekening met Hydra-B kunnen gebruikers van de door het model meegeleverde effectieve strijklengten en bodemhoogten gebruik maken. Hierbij zijn er 16 richtingsectoren. Per richtingsector worden de effectieve strijklengte en gemiddelde bodemhoogte over de strijkraai opgegeven. De gebruikers kunnen zonodig deze gegevens wijzigen.

Voor een berekening met Dijkkring dienen gebruikers deze gegevens voor 9 richtingsectoren op te geven. De eerste richtingsector bevindt zich tussen -90° ten links van de dijknormaal, de laatste $+90^\circ$ ten rechts van de dijknormaal. In deze studie worden de effectieve strijklengten en de gemiddelde bodemhoogten in Dijkkring en in Hydra-B gelijk gesteld. Hieronder worden voorbeelden voor 2 locaties gegeven.

Locatie	Coördinaten [x, y] t.o.v. Parijs	Bodemhoogte [m] t.o.v. NAP	Dijknormaal [t.o.v. het Noorden]	Overschrijdings - frequentie [jaar]
Strijen	101604, 414795	-2.24	135°	1/2000
Moerdijk	102009, 413389	-1.01	315°	1/2000
Numansdorp	91066, 414773	0.48	180°	1/2000
Willemstad	90340, 411818	0.28	45°	1/2000
Hellevoetsluis	69208, 426585	-7.10	240°	1/4000
Goedereede	66593, 424384	-4.26	45°	1/4000
Dordrecht	105610, 426090	-2.35*	0°	1/2000
Rotterdam	94160, 436720	-3.93*	318°	1/10000

Tabel 1 Geografische ligging, bodemhoogten ter plaatse, dijknormalen en overschrijdings frequentie voor de 8 locaties in het benedenriviereengebied. *: de bodemhoogte is gemiddeld over de strijklengte in de richting van dijknormaal.

Voor de locatie Hellevoetsluis: is de dijknormaal 240° (behorend bij de richtingsector WZW) t.o.v. het Noorden. Bij de teen van de dijk is bodemhoogte –9.76m +NAP.

Richtingsector	ZZO	Z	ZZW	ZW	WZW	W	WNW	NW	NNW	
	157.5°	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°	
Strijklengte	5604	4730	3606	3736	3959	3416	2371	1093	248	
bodemhoogte		-3.85	-4.44	-5.97	-9.63	-9.76	-4.34	1.52	-0.42	-0.52

Voor de locatie Moerdijk: de dijknormaal is 315° (behorend bij de richtingsector NW) , bij de teen van de dijk is bodemhoogte –6.04m+NAP.

Richtingsector	ZW	WZW	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	
	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°	0°	22.5°	45°	
Strijklengte	5331	6022	5265	3872	2139	1867	2664	4372	4606	
Bodemhoogte		2.68	-4.22	-3.70	-4.89	-6.04	-5.58	-5.92	-2.21	-2.18

Gezien de bodemhoogte bij de teen van dijken is de invloed van voorland verwaarloosbaar.

De methodieken voor golfberekening in Hydra-B en in Dijkring verschillen van elkaar. In Dijkring kan de effectieve strijklengte in aantal vakken worden verdeeld. Per vak wordt een bodemhoogte toegekend zodat rekening gehouden kan worden met golfbreking. Echter blijkt deze behandeling een schijn nauwkeurigheid te zijn (memo Claessen 2002 in Lodder 2003). In Hydra-B wordt het dwarsprofiel van de rivier altijd als een waterbekken beschouwd met een uniforme bodemhoogten, de invloed van voorland op golven wordt wel in de module van het voorland verwerkt.

In het onderhavige onderzoek wordt verondersteld dat het dwarsprofiel van de rivieren een constante bodemligging tot de teen van de dijk heeft. Het voorland ligt te laag om invloed te hebben op de golven. Hiermee worden golven bij de teen van dijk in beide modellen gelijk genomen.

Voor het berekenen van windgolven, golfoploop/overslag zijn er nog aantal parameters (zie bijlage A en bijlage B). Maar deze zijn door modelmaker in de modellen ingebouwd. Voor die parameters hebben gebruikers geen invloed.

2.4 Faalmechanisme

In de Leidraad voor de Benedenrivieren (TAW, 1985) is gesteld dat de golfoploop/golfoverslag de belangrijkste component is bij het vaststellen van hydraulische belastingniveaus. In deze studie wordt voor de faalmechanisme golfoverslag gekozen.

In de afgelopen decennia is er veel onderzoek verricht naar het formuleren voor golfloop/overslag. Hiertoe zijn door de verbeterde inzichten de formules steeds bijgesteld. In Bijlage B worden de formules van Van der Meer (1994) voor golfoverslag beschreven. Hierin worden ook twee verschillende formuleringen voor de reductiefactor voor strijkgolven gegeven. Deze formules zijn in Dijkkring resp. Hydra-B geïmplementeerd.

2.5 Instelling voor overige parameters

In deze paragraaf zullen de instellingen worden beschreven die benodigd zijn om modelberekeningen uit te voeren. De meeste gegevens zijn meegeleverd met de modellen, of via databestanden die door de modellen ingelezen kunnen worden. Daarnaast is er ook aantal standaard instellingen, zoals sluitcriteria, de boven- en benedengrens en stapgrootten voor de numerieke integraties. Deze hebben altijd een defaultwaarde welke door gebruikers gewijzigd mogen worden. Dijkgeometrie en dijkoriëntatie moeten altijd door gebruikers worden opgegeven.

De standaard instellingen voor de berekeningen in het benedenrivierengebied zijn als volgt:

	HYDRA-B	1.1	Dijkkring 5.0
Faalmechanisme	golfoverslag		golfoverslag
Faalcriterium	0.1 l/m/s		0.1 l/m/s
Golfloop/overslag formules:	HYDRA-M		TAW-A1
	(de Waal, 1999)		(van der Meer & Janssen 1994)
Berekening voor het jaar	2006		2006.
Integratie voor dominerende afvoer			
Dominerende rivierafvoer:	Rijn		Rijn
Ondergrens van afvoer[m ³ /s]:	600		800
Bovengrens voor afvoer:	25000		18000
Grenswaarde tussen de hoge en lage afvoer[m ³ /s]	6000		4000
Stappengrootte voor laagafvoer:	200(Q<6000m ³ /s)		400(Q<4000m ³ /s)
Stappengrootte voor hoogafvoer	200(Q>6000m ³ /s)		200(Q>4000m ³ /s)
Integratie voor zeewaterstand			
Ondergrens voor zeewaterstand:	0.75m		1.0m+NAP
Bovengrens voor zeewaterstand:	7.0m		8.00 m+NAP
Stapgrootte voor integratie:	0.1m		0.1m
Sluitfuncties voor SVKW en SVKH zijn afhankelijk van	wind, zeewaterstanden en afvoer		zeewaterstanden en afvoer
Kansverdeling voor zeewaterstand	Normale verdeling		cosinus ^2
Keringcriteria:			
Gemiddelde voorspelfout	-0.09m		0m
Standaarddeviatie	0.18m		0.15m
Faalkansen voor de stormvloedkeringen			
SVKW	0.01		0.04
SVKH	0.01		0.04
Wind			
Aantal blokken voor windsnelheid	20		Impliciet
Aantal blokken voor windrichting	16		1 en 16*
Bovengrens windsnelheid	45m/s		60m/s
Percentage afknotten bovenkant windstatistiek	0.2		0.2

Tabel 2. Instellingen parameters voor modelberekeningen voor Hydra-B en Dijkkring. *: alleen voor windgolven. Golfoploop/overslag formules in Hydra-M zijn gebaseerd op Van der Meer (1997), met enkele aanpassingen voor strijkgolven (zie de Waal 1999).

De berekeningen met Dijkering zullen altijd met standaardinstellingen worden uitgevoerd. Gevoeligheidsonderzoek met Hydra-B geeft aan dat de stapgrootte voor afvoeren aangepast kan worden. In deze studie zal de stapgrootte voor $400 \text{ m}^3/\text{s}$ worden gekozen. In het overgangsgebied van het benedenrivierengebied maakt het berekende resultaat van deze keuze weinig verschil met de standaard instelling, terwijl de rekentijd kan worden gehalveerd.

De formules voor golfoploop/overslag van Van der Meer (1997) zijn dezelfde als die van Van der Meer (1994). De verschillen tussen de twee methodieken, b.v. in bepaling voor de reductiefactor voor ruwheid en de reductiefactor voor meer dan een berm, hebben geen invloed op de onderhavige onderzoeksresultaten.

3 Vergelijking modelresultaten

Berekening met Dijkkring moet de kruinhoogte, die representatief is voor een dijkvak, worden opgegeven. Voor de opgegeven kruinhoogte berekent het model de overschrijdingsfrequentie uit. Een te hoge of te lage kruinhoogte berekent Dijkkring te lage of juiste te hoge overschrijdingsfrequentie uit. Modelberekeningen moeten enkele keren worden herhaald zodat de berekende overschrijdingsfrequentie met de targetfrequentie redelijk afstemt(hoeft niet precies te zijn).

Met Hydra-B kan, voor de gegeven terugkeertijd (reciproque van overschrijdingsfrequentie), de benodigde kruinhoogte(of het hydraulische belastingniveau) worden bepaald. Hiertoe moeten ook de kruinhoogten (hulpdijkhoogten) worden opgegeven. De stapgrootte van deze hulpdijkhoogten bedraagt 0.1m. Als de benodigde kruinhoogte tussen de opgegeven hulpdijkhoogten valt, dan wordt de kruinhoogte, bij de gegeven terugkeertijd, met logaritmische interpolatie bepaald. Als de benodigde hoogte buiten de opgegeven hulpdijkhoogten ligt, dan wordt hij geëxtrapoleerd. Extrapolatie kan voor sommige locaties tot grote fouten leiden. Er wordt dus aanbevolen een groot aantal hulpdijkhoogten te gebruiken. In het benedenrivierengebied bedraagt het aantal aanbevolen hulpdijkhoogten 73.

Alle hulpdijkhoogten, behalve tweeé, hebben geen invloed op de uitkomst van de berekende kruinhoogte (wel op de grafieken met belastingniveaus voor meerdere herhalingstijden). De rekentijd neemt echter evenredig met het aantal hulpdijkhoogten toe. Testen met Hydra-B geeft aan dat het aantal hulpdijkhoogten, dus ook rekentijd, drastisch terug kan worden gebracht met een twee (stappen)berekening. In de eerste stap worden drie hulpdijkhoogten geschat, gebaseerd op werkelijke dijken in het gebied. De berekende kruinhoogte wordt, in vele gevallen, in de buurt van de 'echte' waarde geëxtrapoleerd of geïnterpoleerd. In de tweede stap worden 3 tot 5 hulpdijkhoogten opgegeven, afhankelijk van het verschil tussen de berekende en opgegeven dijkhoogten in de eerste stap. De kans, dat de berekende kruinhoogte in tweede stap weer wordt geëxtrapoleerd, is zeer klein. Eigenlijk is de methode, die hierboven is beschreven, dezelfde als die voor Dijkkring.

Voor 8 testlocaties in het benedenrivierengebied (figuur 1) geeft tabel 3 (volgende pagina) de door Dijkkring resp. Hydra-B berekende hydraulische belastingniveaus op, waarin de dijken een talud 1 op 3 hebben. De faalmechanisme is golfoverslag met een overslagcriterium 0.1 l/m/s. De windgolven zijn berekend met de formules van Bretschneider. De formules voor golfoverslag in Hydra-B zijn dezelfde als Hydra-M en deze in Dijkkring zijn gebaseerd op TAW-94 (variatie II, zie ook Bijlage B). De ruwheid van de talud is 1 .

De verschillen in de berekende belastingniveaus (of benodigde kruinhoogten) tussen deze twee rekenmodellen zijn niet verwaarloosbaar. Voor het dijkprofiel zonder berm is het absolute verschil, met uitzondering van de locatie Dordrecht, groter dan 10cm, met een maximale waarde van 90cm voor de locatie Hellevoetsluis. Het gemiddelde verschil voor de 8 locaties is 32cm, meestal berekent Hydra-B hogere benodigde kruinhoogten dan Dijkkring.

Locatie	Dijknormaal	Hydra-B	Dijkring	Hydra-B	DBn (het verschil tussen Hydra-B en Dijkring) [m]
		Hydra-M [m]	TAW94 [m]	hoofdrichting	
Strijen	135°	3.626	3.78	225°	-0.154
Moerdijk	315°	6.184	5.72	292°	0.464
Numansdorp	180°	5.274	4.63	247°	0.644
Willemstad	45°	4.786	4.54	337°	0.246
Hellevoetsluis	240°	6.582	5.68	247°	0.902
Goedereede	45°	5.010	4.69	337°	0.320
Dordrecht	360°	4.350	4.30	315°	0.050
Rotterdam	318°	5.882	5.78	270°	0.102

Tabel 3 De berekende hydraulische belastingniveaus volgens Hydra-B 1.1. en Dijkring 5.

Dijk-profielen zijn fictief met een talud 1 op 3 . $DBn = Bn_{Hydra-B} - Bn_{Dijkring}$.

De hoofdrichting is de richting waaruit de bijdrage aan de overschrijdingsfrequentie het maximum is. Beide modellen zijn uitgegaan van de toestand van 2006.

In werkelijkheid heeft een dijkprofiel altijd een of meer bermen. In tabel 4 worden de berekende hydraulische belastingniveaus, waarin het dijkprofiel een berm van 3m breedte heeft, opgegeven. De berm bevindt zich 3m boven NAP(omstreeks toetspeil). De verschillen tussen de twee modellen zijn weliswaar klein geworden (bij de locatie Hellevoetsluis is het verschil met 42cm gereduceerd), maar deze zijn nog steeds niet verwaarloosbaar. 6 uit de 8 testlocaties hebben een absoluut verschil groter dan 10cm, met een maximum van 48cm. Het gemiddelde verschil is 14cm.

Locatie	Dijknormaal	Hydra-B	Dijkring	Hydra-B	DBn-1 (het verschil tussen Hydra-B en Dijkring) [m]
		Hydra-M [m]	TAW94 [m]	hoofdrichting	
Strijen	135°	3.431	3.63	225°	-0.199
Moerdijk	315°	5.199	4.95	292°	0.249
Numansdorp	180°	4.572	4.26	247°	0.312
Willemstad	45°	4.140	4.00	337°	0.140
Hellevoetsluis	240°	5.566	5.09	247°	0.476
Goedereede	45°	4.319	4.14	337°	0.179
Dordrecht	360°	3.768	3.76	315°	0.008
Rotterdam	318°	5.014	5.06	270°	-0.046

Tabel 4 Verschil van belastingniveau van Hydra-B 1.1. en Dijkring 5.0. dijken met berm
Het dijkprofiel heeft een berm van 3m breedte. $DBn-1 = Bn_{Hydra-B} - Bn_{Dijkring}$.

Zoals opgegeven in paragraaf 2.3 ~2.5, zijn de factoren, die te maken hebben met golven en golfoverslag, in Dijkring en Hydra-B hetzelfde ingesteld (dijkprofiel, bodemhoogte en effectieve strijklengte). Maar de verschillen in de bovenstaande twee tabellen zijn opvallend. In de vergelijking met berm is het gemiddelde verschil ruim gehalveerd.

Tot nu toe zijn de oorzaken van verschillen tussen de twee modellen onduidelijk. Door de complexe probabilistische berekening is het moeilijk om de echte oorzaken te achterhalen. Dit komt omdat in de kansberekening de numerieke sommatie wordt uitgevoerd over het gehele frequentiedomein van afvoeren, waterstanden en wind. Maar het feit, dat in de loop der jaren

verschillende belastingmodellen verschillende golfparameters hebben gebruikt, is wel duidelijk (zie ook Stijnen, 2003). Het is begrijpelijk om te vermoeden dat Dijkring met andere golfparameters heeft gewerkt dan die van Hydra-B.

Maar de testen van Stijnen e.a. gaven aan dat de oploopmodule van Hydra-B en de variatie II van Dijkring dezelfde resultaten kunnen opleveren indien de hoek tussen de invalgolven en de dijknormaal kleiner is dan 70° . Als deze hoek groter is dan 70° , dan berekent TAW-94 een hogere oploop/overslaghoogte omdat de reductiefactor voor strijkgolven in TAW-94 anders is geformuleerd als die van Hydra-M (zie ook Bijlage B). Dat gebeurt alleen voor de locatie Strijen waar de hoek tussen de dijknormaal en de invallende golven 90° heeft (zie ook tabel 3-4).

In de testen van Stijnen e.a. zijn de golfparameters (golfhoogten en piekperioden) als invoergegevens vooraf opgegeven. In Dijkring worden deze met een golfmodule berekend. In Hydra-B zijn alle golfparameters in een database opgeslagen en tijdens berekening worden deze weer door het model ingelezen. Daarom vermoeden we dat Dijkring en Hydra-B andere golfparameters hebben gebruikt. Deze gedachte zal in het volgende hoofdstuk worden getoetst

4 Reproducieren de belastingniveaus van Dijkkring

4.1 Inleiding

Het rekenmodel Hydra-B en Dijkkring zijn aan elkaar verwant, maar de vergelijkingen in het beneden rivierengebied (tabel 3 ~4) geven echter aan dat de verschillen in de berekende belastingniveaus niet verwaarloosbaar zijn.

De correctheid van Hydra-B is al getest zowel voor academische gevallen als voor werkelijke situaties (zie Duits, 2002 en Vrouwenfelder et al 2002). De rekenprocedure van Hydra-B is helder en de berekende resultaten kunnen worden gecontroleerd en gereproduceerd. Een handmatige controle is uitgevoerd voor de door Hydra-B berekende golven en overslaghoogte.

De berekende resultaten van Dijkkring zijn niet gemakkelijk te controleren omdat wat de golfoploop /overslag betreft geen tussenresultaat kan worden uitgevoerd. De broncodes van Dijkkring zijn niet inzichtelijk. Het is daarom een niet gemakkelijke taak om de resultaten te reproducieren.

Om de door Dijkkring berekende belastingniveaus toch nog te reproducieren zijn de aannames noodzakelijk. Deze zien er uit als volgt:

1. Neem de windrichting over waaruit de bijdrage aan de overschrijdingsfrequentie het maximaal is, uit Hydra-B resultaten.
2. Neem de zeewaterstand en Rijnafvoer van Hydra-B over.
3. Gebruik de invoerfile van Dijkkring om de lokale waterstand af te leiden, uitgaande van de toestand van 1985. Hierbij zijn bilaterale interpolaties nodig,
4. Gebruik de tussenresultaten van Dijkkring om de windsnelheid af te leiden,
5. Bereken de golfhoogte en periode met calculator van Bretschneider. De berekende periode is al omgezet naar piekperiode,
6. Bereken de hoogte van golfoverslag volgens TAW-94,
7. Belastingniveau is de som van lokale waterstand + hoogte van golfoverslag.

Omdat het niet mogelijk is om de broncode aan te passen, is het reproducieren handmatig gedaan. De stappen 5 tot 7 behoeven geen verder uitleg. De redenering voor de stappen 1 tot 4 zullen hieronder worden gegeven.

4.2 Toelichting voor stap 1-4

4.2.1 Toelichting voor stap 1

De dijknormaal, strijklengte en bodemhoogte per richtingsector in Hydra-B en in Dijkkring zijn gelijk ingesteld. Daarnaast worden de windgolven in beide modellen volledig probabilistisch behandeld in de termen van windsnelheden en windrichtingen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de richting, waaruit de bijdrage aan de faalkans het maximaal is, dezelfde moeten zijn zowel in Dijkkring als in Hydra-B.

4.2.2. Toelichting voor stap 2

Voor de gegeven windrichting en overschrijdingsfrequentie wordt in beide modellen de combinatie 'afvoer, zeewaterstand en windsnelheid' met grootste gezamenlijke kansdichtheid gezocht. We verwachten dat de combinaties in beide modellen niet te veel van elkaar afwijken. Dit komt omdat:

1. het verschil in de afvoerstatistiek in beide rekenmodellen is klein,
2. de methoden voor de opzet van zeewaterstand in beide modellen zijn dezelfde,

3. het verschil in de statistieken voor zeewaterstand, behalve de richtingsectoren WZW en N, is verwaarloosbaar (zie Geerse e.a. 2003). Bij gegeven normfrequentie in het benedenrivierengebied zijn de verschillen voor deze twee richtingsectoren ook klein. Volgens deze redeneringen hebben we voor stap 2 genomen.

4.2.3 Toelichting voor stap 3

In Dijkkring worden de lokale waterstanden bepaald door de afvoer en de zeewaterstand waarbij deze twee onafhankelijk van elkaar zijn aangenomen. Als de zeewaterstand en de afvoer bekend zijn, dan ligt de lokale waterstand vast omdat de windsnelheid door de zeewaterstand deterministisch bepaald is.

4.2.4 Toelichting voor stap 4

In Dijkkring wordt, voor het berekenen van golfoverslag, de windsnelheden als functie van lokale waterstanden en windrichtingen uitgerekend. Per dijkvak wordt voor elke combinatie van waterstand bij Maasmond, rivierafvoeren en windrichting de laagste windsnelheid (bij gegeven faalkans) gezocht waarmee de overbelasting optreedt. Het rekenmodel voert de tussenresultaten uit waarin per richtingsector de windsnelheden als functie van lokale waterstanden worden gegeven.

4.3 Illustreren voor de locatie Hellevoetsluis

Om het reproduceren van belastingniveaus van Dijkkring te illustreren wordt de hoofdrichting, waaruit de bijdrage aan de overschrijdingsfrequentie het maximaal is, gekozen. De belastingniveaus van de overige richtingsectoren moeten dezelfde zijn. De dijk heeft een talud van 1 op 3. Stapsgewijs wordt hieronder de berekening voor de locatie Hellevoetsluis als een voorbeeld toegelicht.

Uit de berekening van Hydra-B zijn er volgende gegevens beschikbaar voor het illustratiepunt.

	Open keringen	Gesloten keringen
Bijdrage aan ov.Freq.	19.7%	80.3%
Windrichting	WZW (17.1%)	WZW (71.5%)
zeewaterstand Maasmond	2.95	2.95
Rijnafvoer q [m^3/s]	2000	2000
Maasafvoer q [m^3/s]	217	217
windsnelheid u [m/s]	31.6	32.4
lokale waterstand	2.07	1.98
golfhoogte H_s [m]	1.52	1.55
piekperiodes T_p [s]	4.6	4.6
golfrichting [graden]	247	247

Omdat de gesloten keringen de grotere bijdrage geeft aan de overschrijdingsfrequentie, hebben we voor deze keringsituatie gekozen.

1. De hoofdrichting, waaruit de bijdrage aan de overschrijdingsfrequentie maximaal is, is WZW.
2. Zeewaterstand is 2.95m+NAP en Rijnafvoer is 2000 m^3/s .
3. Gebruik de invoerfile Dijkkring, 'rijn1985.dd'. Hieruit kan de lokale waterstand worden afgeleid. Na interpolatie is de lokale waterstand $w_s=1.35m$.
4. Gebruik de tussenresultaten van Dijkkring, in de file 'locwawa.dat'. Hieruit kan de windsnelheid worden afgeleid. Na interpolatie $U=33.2m/s$.
5. De waterdiepte is 11.1 m (bodemhoogte + lokale waterstand), strijklengte is 3959m. Hieruit volgt $H_s=1.59m$, $T_p=4.69s$ volgens Bretschneider calculator.

6. Bereken de hoogte van golfoverslag volgens TAW-94. Hieruit is de overslaghoogte =4.71m.
7. Het belastingniveau voor de locatie Hellevoetsluis $B_n=4.71m+1.35m=6.06m$.

Het verschil met het resultaat van Dijkkring is $6.06m-5.68m=0.38m$. We vermoeden dat in Dijkkring Tp niet wordt gebruikt. In plaats daarvan gebruikt het model Ts bij het berekenen van golfoverslag.

6.1 Berekent de hoogte van golfoverslag met $T_s= 4.34s$. Hieruit is de overslaghoogte =4.32m.

7.1 Het belastingniveau $B_n= 4.32m +1.35m=5.67m$.

Het verschil met Dijkkring is $5.68m-5.67m=0.01m$ welke veel kleiner is dan 0.38m. Volgens stappen 1-5, 6.1 en 7.1 (de handmatige berekeningen wordt afkort als: Dijkkring Hand-Check) hebben we ook voor de overige 7 locaties gedaan. De resultaten worden in tabel 5 opgegeven. Alle tussenstappen van het reproduceren van Dijkkring worden in tabel 6 gegeven waarbij de windgolven volgens de formules van Bretschneider zijn berekend.

Locatie	Frequentie	Dijknormaal	Dijkkring Hand-Check	Dijkkring	DBn (het verschil tussen Hydra-B en Dijkkring) [m]
			Bn-taw94 [m]	Bn-taw94 [m]	
Strijen	1/2000	135°	3.78	3.78	0.0
Moerdijk	1/2000	315°	5.71	5.72	0.01
Numansdorp	1/2000	180°	4.63	4.63	0.0
Willemstad	1/2000	45°	4.54	4.54	0.0
Hellevoetsluis	1/4000	240°	5.67	5.68	0.01
Goedereede	1/4000	45°	4.68	4.69	0.01
Dordrecht	1/2000	360°	4.30	4.30	0.0
Rotterdam	1/10000	318°	5.77	5.78	0.01

Tabel 5: Mate van nauwkeurigheid van de reproductie van Dijkkring resultaten

In kolom Dijkkring Hand-Check worden handmatig gereproduceerde belastingniveaus voor de 8 testlocaties gegeven. Kolom Dijkkring geeft de resultaten van het model Dijkkring(zie ook tabel 3). $DBn= Dijkkring - Dijkkring_{Hand-Check}$

De resultaten van Dijkkring zijn deze bij de toestand van 2006 waarin het model rekening met een zeespiegelstijging gehouden heeft. Uitgaande van de basistoestand van 1985 is er een zeespiegelstijging van 10cm bij de toestand van 2035 aangenomen. Zoals opgegeven hierboven zijn de resultaten van Dijkkring 'handmatige check' gebaseerd op de toestand van 1985. Voor enkele locaties is handmatige controle ook uitgevoerd voor de toestand voor 2006; er bleek echter weinige verschillen in de resultaten.

In tabel 5~6 zijn de resultaten van Dijkkring alleen voor een dijkprofiel zonder berm gereproduceerd. Voor een dijkprofiel met berm kunnen de resultaten van Dijkkring volgens dezelfde procedure worden gecheckt. Hierbij moet dan rekening gehouden worden met de reductiefactor voor een berm.

Locatie	Strijen	Moerdijk	Numansdp	Willemstd	Hellevt	Goedere.	Dordrecht	Rotterdam
Ov. Freq.	1/2000	1/2000	1/2000	1/2000	1/4000	1/4000	1/2000	1/10000
Dijknorm.[grd]	135	315	180	45	240	45	360	318
Keringen	Open	Dicht	Dicht	Dicht	Dicht	Dicht	Dicht	Open
Hoofdri.[grd]	ZW	WNW	WZW	NNW	WZW	NNW	NW	W
Rijnafv[m ³ /s]	3800	4800	2400	5600	2000	5200	7600	2000
Zeews.[m]	2.48	3.73	2.95	3.53	2.95	3.83	3.28	3.25
Lokale ws.[m]	1.79	2.21	1.57	2.24	1.35	2.09	2.80	3.28
Windsnl.[m/s]	26.4	31.5	33.5	25.7	33.2	27.0	25.1	31.3
Strijk lengte[m]	5065	3872	3778	3267	3959	3804	1420	2315
Waterdpt[m]	3.77	7.1	6.6	9.6	11.1	9.2	4.3	6.1
Hs[m]	1.01	1.37	1.41	1.12	1.59	1.23	0.73	1.13
Tp[s]	4.02	4.42	4.48	3.97	4.69	4.17	3.15	3.93
Ts[s]	3.72	4.09	4.15	3.37	4.35	3.86	2.92	3.64
Ov.H_Tp[m]	2.17	3.82	3.34	2.51	4.71	2.82	1.63	2.71
Bn_Tp	3.96	6.02	4.91	4.75	6.06	4.91	4.43	5.99
Ov.H_Ts[m]	1.99	3.50	3.06	2.30	4.33	2.59	1.50	2.49
Bn_Ts	3.78	5.71	4.63	4.54	5.67	4.68	4.30	5.77

Tabel 6. Resultaten voor het handmatig reproduceren van de belastingniveaus van Dijkkring

De afkortingen zijn als volgt: Ov.Freq=overschrijdingsfrequentie; Dijknorm=Dijknormaal; Hoofdri=hoofdrichting; Rijnafv=Rijnafvoer; Zeews=zeewaterstand; Windsnl=windsnelheid; Ov.H_Tp=overslaghoogte volgens Tp; Bn_Tp=belastingniveau volgens Tp; Ov.H_Ts=overslaghoogte volgens Ts; Bn_Ts=belastingniveau volgens Ts. Hellevt=Hellevoetsluis, Goedere=Goedereede.

4.4 Opmerking en conclusie

Tijdens het reproduceren van de berekende belastingniveaus van Dijkkring is het volgende reeds opgemerkt: in Dijkkring worden lokale waterstanden altijd voor de windrichting WNW afgeleid terwijl in Hydra-B waterstanden voor alle 16 windrichtingen worden afgeleid. Hierdoor kan een verschil in de lokale waterstanden worden verwacht.

Uit de resultaten van vorige paragraaf concluderen we dat we de berekende hydraulische belastingniveaus van Dijkkring correct hebben gereproduceerd. In het model Dijkkring werd T_s , i.p.v. T_p , voor het berekenen van golfoverslag gebruikt. Uit contract met de Provincie Zuid Holland is gebleken dat de conclusie correct is.

Om rekening te houden met faalmechanisme van golfoploop/overslag zijn in de loop van der jaren verschillende golfperioden gebruikt in verschillende hydraulische belastingmodellen. Het gebruik van T_s in Dijkkring is ook een bewuste keuze geweest. In bijlage C wordt de verhouding tussen T_p en T_s verder toegelicht.

5. Berekeningen met aangepaste parameters

5.1 Algemene beschrijving

In het vorige hoofdstuk hebben we al duidelijk opgemerkt dat in Dijkkring Ts, i.p.v. Tp, wordt gebruikt voor het berekenen van hydraulische belastingniveaus. Inmiddels hebben we drie verschillende instellingen van Dijkkring en Hydra-B geïsoleerd. Deze zijn: verschil in de reductiefactor voor golfoverslag, verschil in de keringcriteria en verschil in gebruik van Ts en Tp.

Door de aanpassingen van de bovenstaande drie instellingen kunnen de verschillen in de uitkomsten worden verkleind en daarmee de oorzaken van verschillen worden deels verklaard. De aanpassingen zijn gedaan zowel voor Hydra-B als voor Dijkkring.

Voor het gemak hebben we het gemiddelde verschil ($= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 |DBn|$) gedefinieerd.

Hierin is DBn het verschil in de berekende belastingniveaus tussen Hydra-B en Dijkkring. Uit tabel 3 heeft Hydra-B hogere belastingniveaus berekend, behalve voor de locatie Strijen waar Dijkkring een hoger belastingniveau geeft. Het gemiddelde verschil is **0.32m**. Figuur 2 (ook tabel 3) geeft de verschillen van de berekende belastingniveaus weer.

5.2. Aanpassingen

5.2.1 Aanpassing Dijkkring met Hydra-B instellingen

Na controle voor de locatie Strijen is gebleken dat de invalgolven bij die locatie een hoek van 90° heeft met de dijknormaal. Bij een invalhoek groter dan 70° gebruikt Hydra-B andere reductiefactor voor golfoverslag dan Dijkkring. Aanpassing voor de berekende resultaat van Dijkkring is alleen handmatig mogelijk. De rekenwijzen zijn dezelfde als deze in hoofdstuk 4, behalve dat de reductiefactor van Hydra-M is gebruikt voor de strijkgolven.

Na aanpassing geeft Dijkkring het belastingniveau voor de locatie Strijen **3,42m**, welke weer kleiner is dan dat van Hydra-B. Omdat de invalhoeken van de overige locaties kleiner zijn dan 70°, zijn de aanpassingen niet nodig.

5.2.2 Aanpassing Hydra-B met de keringcriteria van Dijkkring

Hydra-B is aangepast met de keringcriteria van Dijkkring. Na aanpassing zijn de keringcriteria dezelfde als die voor Dijkkring (zie ook tabel 7). Gebleken is dat de aangepaste criteria alleen invloed hebben op de berekende belastingniveaus voor locatie Rotterdam (kleine 10cm), Numansdorp (1,5cm) en Hellevoet-sluys (1,3cm). De invloed op de overige locaties is bijna verwaarloosbaar (hooguit enkele millimeters, zie ook tabel 8).

	Standaard criteria	Aangepaste criteria
Kansverdeling voor zeewaterstand	Normaal verdeling	Cosinus^2 verdeling
Spelfout	-0.09	0
standaard deviatie	0.18	0.15
Faalkans voor kering	0.001	0.004

Tabel 7. Keringcriteria voor Hydra-B.

Locatie	Ov. Frequentie	Dijknormaal	Bn Hydra-criteria	Bn- Dykr-criteria	DBn (het verschil tussen twee berekeningen)
Strijen	1/2000	135°	3.626	3.624	0.002
Moerdijk	1/2000	315°	6.184	6.181	0.003
Numansdorp	1/2000	180°	5.274	5.259	0.015
Willemstad	1/2000	45°	4.786	4.782	0.004
Hellevoetsluis	1/4000	240°	6.582	6.569	0.013
Goedereede	1/4000	45°	5.010	5.012	-0.002
Dordrecht	1/2000	360°	4.350	4.346	0.004
Rotterdam	1/10000	318°	5.882	5.79	0.092
Tabel 8, Resultaten belastingniveaus Bn Hydra-B maar met verschillende keringcriteria. Hydra-criteria: keringcriteria volgens Hydra-B officieel vastgesteld in 2001; Dykr-criteria: keringcriteria volgens Dijkkring, officieel vastgesteld in 1997					

5.2.3 Aanpassing Hydra-B met Ts

Door aanpassing van de database is het ook mogelijk dat Hydra-B met Ts het hydraulische belastingniveau kan doorrekenen. Deze aanpassing blijkt de grootste invloed op de berekende resultaten te hebben.

Na deze aanpassingen worden in tabel 9 (ook figuur 3) de berekende belastingniveaus van Hydra-B en de verschillen met Dijkkring weergegeven. Hieruit is het gemiddelde verschil **0,12m**. Vergelijking met het verschil daarvóór is de reductie behoorlijk. Maar de verschillen voor sommige locaties (b.v. Hellevoetsluis en Numansdorp) zijn nog steeds niet verwaarloosbaar.

Figuur 4 geeft de verschillen (voor het gemak van analyse worden absolute waarden gegeven) vóór en na de aanpassingen weer, vergezeld van de hoofdrichtingen waaruit de bijdrage aan de overschrijdingsfrequentie het grootst is. We merken daarbij duidelijk op: dat een groot verschil voor de wind uit de richting WZW (Numansdorp en Hellevoetsluis) optreedt. Hierbij wordt vermoed dat de wind daar een grote rol heeft gespeeld; bij locatie Rotterdam is het verschil (absolute waarde) groot geworden, we vermoeden dat het verschil aldaar andere factoren (zoals sluitstrategie) een belangrijke invloed hebben. In het hoofdstuk 6 zullen deze worden onderzocht.

			Hydra-B	Dijkkring	Hydra-B	
Locatie	Ov. frequentie	Dijknormaal	Bn-Ts [m]	Bn-taw94 [m]	hoofdrichting	DBn-2
Strijen	1/2000	135°	3.475	3.42	225°	0.055
Moerdijk	1/2000	315°	5.875	5.72	292°	0.155
Numansdorp	1/2000	180°	4.994	4.63	247°	0.364
Willemstad	1/2000	45°	4.585	4.54	337°	0.045
Hellevoetsluis	1/4000	240°	6.197	5.68	247°	0.517
Goedereede	1/4000	45°	4.792	4.73	337°	0.062
Dordrecht	1/2000	360°	4.217	4.30	315°	0.083
Rotterdam	1/10000	318°	5.567	5.78	270°	-0.213

Tabel 9 Verschil tussen Hydra-B en Dijkkring met gelijke golfparameters Ts:
De berekende belastingniveaus van Hydra-B (Bn-Ts) na aanpassingen.
Het verschil tussen Hydra-B en Dijkkring (DBn-2) na aanpassingen.

6. Onderzoek naar overige invloeden

6.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat de verschillen in de belastingniveaus tussen Hydra-B en Dijkkring nog steeds niet verwaarloosbaar zijn. De verschillen, die worden veroorzaakt door:

- de nieuwe officiële sluitcriteria
- nieuwe waterstandsmodellen (SOBEK ipv Zwendl)
- meer windrichtingen 16 ipv 1
- verwerking van de dwarsopwaaiing in het probabilistische model
- nieuwe afvoerstatistiek en windwaterstandsstatistiek
- nieuwe probabilistische model Hydra-B
- andere keuzen ten aanzien van de bepaling van de golven
- (het werken met de piekperiode i.p.v. de significante golfperiode)
- andere wijze van het aanbieden van de golven aan het probabilistische model

(een heldere uitsplitsing tussen het genereren van de golven (met bretsneider) en de profiel eigenschappen (dam, voorland en dijkprofiel). In dit hoofdstuk wordt ernaar gestreefd verschillen te kwantificeren.

Sommige van deze verschillen zijn al in de paragraaf 2.2 beschreven. In paragraaf 6.2 tot 6.4 is ingegaan op de keuzes en methoden die minder belangrijk zijn voor het onderhavige onderzoek, maar wel van belang voor Hydra-B als een nieuw model. In paragraaf 6.5 tot 6.9 zullen de keuzes en methoden, die de belangrijkste oorzaken vormen voor de verschillen, worden onderzocht. De gevolgen daarvan worden uitbreidend geanalyseerd.

6.2 Verschil in faalkans

In het model Hydra-B en Dijkkring worden verschillende aannames gebruikt om de faalkans $P(F_q|k)$ af te leiden. Het verschil doet zich voor bij de passage van afvoergolf die zo hoog is dat ongeacht de windsnelheid de dijk zeker wordt overbelast. Figuur 5 geeft de faalkansen van de twee modellen bij een overschrijdingfrequentie van 1/2000 weer. Hieruit is gebleken hoe korter de afvoergolf duurt, hoe groter het verschil. Als een afvoergolf langer dan 6 getijperioden (~3 dagen) duurt, dan is het verschil praktisch verwaarloosbaar.

Voor de 8 testlocaties spelen de hoge windsnelheden en de gematigde afvoer de belangrijkste rol. In paragraaf 2.1 is aangegeven dat de afvoeren in beide modellen worden gesplitst in lage en hoge afvoeren waarop verschillende methoden worden toegepast. Juist voor de gematigde afvoer wordt in beide modellen dezelfde methode(DML) gebruikt. Het verschil in faalkans is in deze studie dus niet van belang.

6.3 Verschillen in afvoerstatistiek

Rijnafvoer vormt de belangrijkste bedreiging situaties waar Rijnafvoer dominante invloed heeft. In Dijkkring is er nog uitgegaan van de oude toestand, n.l. voor een terugkeertijd van 1250 jaar werd een debiet van $15000\text{m}^3/\text{s}$ bij Lobith als de maatgevende afvoer toegekend(Commissie Boertien I).

Na de hoogwaters in 1993 en 1995 is de afvoerstatistiek opnieuw afgeleid. De meetreeks is ook verlengd tot 1998. De nieuwe afvoerstatistiek is ook in Hydra-B geïmplementeerd. Het blijkt dat de opgetreden hoogwaters invloed hebben op de afvoerstatistiek(figuur 6). Voor een terugkeertijd van 1250 jaar is de maatgevende afvoer in de nieuwe afvoerstatistiek $16000\text{m}^3/\text{s}$.

Voor een gegeven normfrequentie heeft het afvoerdomein, die significante invloed oefent op de waterstand voor testlocaties, een breedte tussen 2000~10000 m³/s. In deze breedte is het verschil tussen de oude en de nieuwe statistiek klein. Voor de gekozen 8 testlocaties zijn windgolven, dus de windsnelheid, de belangrijkste factor voor een hoger hydraulisch belastingniveau. Vandaar dat in het onderhavige onderzoek het verschil in de afvoerstatistieken veel minder belangrijk wordt geacht.

Het verschil tussen de oude en nieuwe afvoerstatistieken voor Maas heeft geringe invloed op berekende resultaten van de 8 testlocaties.

6.4 Verschil in uitvoerlocaties

Dijkring omvat het hele benedenrivierengebied, maar er zijn alleen 51 locaties waarvoor de lokale waterstanden(toetspeilen) zijn opgegeven. Deze zijn tevens MSW stations. Van de 51 locaties zijn er 44 locaties voor de door Rijn gedomineerde en 7 voor de door Maas gedomineerde stroomgebieden. Deze locaties bevinden zich meestal in de splitspunten van de rivieren. De afstand tussen de twee achtereenvolgende locaties varieert tussen 7 ~ 15km.

Voor een willekeurige locatie moet de lokale waterstand door de waterstanden van de tussenliggende locaties worden geïnterpoleerd. Vanwege de grote afstand is de berekende lokale waterstand niet meer nauwkeurig.

In Hydra-B is de dichtheid van uitvoerlocaties voor lokale waterstanden zo hoog dat voor praktische toepassingen een interpolatie niet nodig is. In het benedenrivierengebied is de aantal locaties, waarvoor de lokale waterstanden zijn opgegeven, ongeveer 10.000. Dit is alleen mogelijk door een enorm vooruitgang in het geheugencapaciteit en rekensnelheid van PC's van de recente jaren.

Om een indruk van het verschil in de uitvoerlocaties te geven is hier een voorbeeld. Voor de gebieden Haringvliet en Hollandsch Diep heeft Dijkring de waterstanden voor 4 locaties opgegeven; deze zijn de locaties Hellevoetsluis, Middelharnis, Rak Noord resp. Moerdijk. De afstand tussen de twee achtereenvolgende locaties varieert tussen 10~15km. Voor dezelfde gebieden heeft Hydra-B voor 788 locaties de waterstanden opgegeven. Deze bevinden zich langs twee kanten van de rivieroever. De afstand tussen de twee achtereenvolgende locaties is 100m.

In deze studie zijn de 8 testlocaties zo gekozen dat modelberekening met Dijkring een interpolatie niet zeer nodig is. Hiertoe zijn voor drie paar locaties dezelfde waterstanden opgegeven. Dit zijn Hellevoet-sluis ~ Goedereede; Numansdorp ~Willemstad; Strijen ~ Moerdijk. Uit resultaten van Hydra-B is het maximale verschil tussen de gepaarde locaties ongeveer 1cm, zie ook tabel 11 in paragraaf 6.9.

6.5 Verschillen in de besturing van keringen

In het benedenrivierengebied bevinden zich twee keringen SVKW en SVKH. Tijdens hoge stormvloed dienen deze keringen gesloten te worden. In Dijkring worden de twee keringen bestuurd met verschillende waterstanden, n.l. bij een hogere waterstand(dus ook hogere windsnelheden) wordt SVKH eerder gesloten dan SVKW (zie ook figuur 7). Met ingang van het stormseizoen 1998 is de sluitstrategie gewijzigd en een gezamenlijk sluitcommando wordt voor beide keringen tegelijk gegeven.

Figuur 8 geeft de vergelijking van de sluitstrategieën bij de richtingsector WNW weer. Bij een hogere windsnelheid (uiteeraard hogere zeewaterstand) wordt Hydra-B vaker gesloten dan Dijkring. Dit betekent dat in Hydra-B de keringen worden gesloten bij een lagere

zeewaterstand. Een voorbeeld, bij een windsnelheid van 30m/s worden de keringen in Hydra-B gesloten bij een zeewaterstand van 2,8m; in Dijkkring worden de twee keringen pas gesloten bij een zeewaterstand van 3,2m (uitgaande van een Rijnafvoer van 2000m³/s). Dit heeft een direct gevolg op de berekende waterstanden bij locaties die achter de keringen liggen, zoals Rotterdam.

Voor het sluiten van de keringen heeft Dijkkring een hogere zeewaterstand nodig. Het gemiddelde verschil met Hydra-B is ongeveer 33cm bij een windsnelheid van 30m/s en een windrichting van WNW. Hiermee kan de hogere waterstand van Dijkkring voor de locatie Rotterdam worden verklaard.

6.6 Keuzes en methodieken voor de invoer van lokale waterstand, windgolven en zeewaterstanden

De faalkansen van een dijkvak worden bepaald door zowel de kans dat dijkvak wordt overbelast door de combinatie van lage waterstand en hoge golven als de combinatie van hoge waterstand en lagere golven. Hieruit blijkt dat het gehele frequentiedomein van afvoeren, waterstanden en wind van invloed is op de faalkansen van een waterkering. De stochasten voor een volledig probabilistische beschrijving zijn de afvoeren, zeewaterstanden, windsnelheden en windrichtingen.

In beide modellen worden windgolven volledig probabilistisch behandeld, in de zin dat zowel de windsnelheid als de windrichting als stochasten worden meegenomen. De aanpakmethodieken voor lokale waterstand zijn in de twee modellen echter verschillend. De lokale waterstanden worden bepaald door afvoer, zeewaterstanden en wind. In Hydra-B worden de lokale waterstanden, zoals voor windgolven, ook volledig probabilistisch behandeld. In Dijkkring is de relatie deterministisch tussen wind en zeewaterstanden vastgelegd, uitgaande van één overheersende windrichting(WNW). Hierdoor wordt de lokale waterstand in Dijkkring uitsluitend bepaald door afvoer en zeewaterstand.

De zeewaterstand is de som van het astronomische getij en de stormopzet. De combinatie van deze twee is vastgelegd zodat een waarde van stormopzet precies met een waarde van zeewaterstand wordt afgestemd (zie Deugd, 1994 en 2002). Volledig probabilistisch behandeld in Hydra-B betekent dat voor een gegeven zeewaterstand, er aantal combinaties mogelijk is met verschillende windsnelheden (zie figuur 9). Dergelijke handelswijze vereist een groot computergeheugen. In Dijkkring zijn daartegen de relatie tussen windsnelheden en de stormopzet bij Maasmond vastgelegd (zie ook figuur 10), in de zin dat met iedere waarde van stormopzet (daardoor ook iedere waarde van de zeewaterstand) precies een windsnelheid wordt geassocieerd. Door deze vereenvoudiging is het benodigde computergeheugen flink kleiner geworden.

Het verschil in probabilistische behandeling voor zeewaterstanden leidt tot het volgende verschil in het aantal van lokale waterstanden. Dit komt omdat voor iedere combinatie van afvoeren, zeewaterstanden, windsnelheden en windrichtingen de lokale waterstanden worden uitgerekend. Hydra-B heeft per locatie 3384 waterstanden(of anders gezegd waterstanden voor 3384 verschillende combinaties), tegenover 216 waterstanden die Dijkkring heeft.

De consequentie van een probabilistische behandeling voor zeewaterstanden is het verschil in de lokale waterstanden. Figuur 11 geeft de berekende (lokale) waterstanden ter locatie Hellevoetsluis weer. Het verschil tussen Hydra-B(berekend door SOBEK) en Dijkkring (berekend door ZWENDL) varieert tussen 0cm~ 100cm. Figuur 12 geeft het gemiddelde verschil weer. Hieruit is gebleken dat het verschil voor een Rijn-debiet tussen 4000~6000m³/s het kleinst is. Een groter verschil treedt niet alleen bij hoger debiet en hogere windsnelheden ($Q \geq 10000$

m³/s en U₁₀≥30m/s) op, maar ook bij lager debiet en lagere windsnelheden (Q=2000m³/s en U₁₀≤ 20m/s).

Voor Q=2000m³/s is het verschil in de (lokale) waterstanden voor locatie Hellevoetsluis is ongeveer 0,5m. Dit verklaart het verschil (0,517m, zie tabel 9) tussen Hydra-B en Dijkkring. Door probabilistische berekeningen in beide rekenmodellen is het niet mogelijk om het precieze verschil achter te halen.

Er moet worden gewezen op het feit dat de invloed van de lokale waterstanden op de berekende belastingniveaus per locatie verschilt.

6.7 Verschillen in wind –Zeewaterstandstatistiek

De wind-waterstandsstatistiek van Volker(Volker, 1989), welke in Dijkkring is toegepast, is niet meer gebruikt. De statistiek van Volker is gebaseerd op de gegevens van De Ronde(1986) die op basis van de toestand van 1985, een basispeil van 5,15m+NAP(de zeewaterstand met een terugkeertijd van T=10000 jaar) heeft gehanteerd.

In Hydra-B heeft Geerse e.a. (2003) de statistiek van Volker aangepast waarbij de recente gegevens zijn gebruikt. Hierbij betreft een basispeil van 5,0m+NAP(Dillingh,1993), eveneens op basis van de toestand van 1985. De conditionele kansverdeling g(mlr) voor zeewaterstand is met een Pareto-verdeling vervangen. Daarnaast is in Hydra-B voor de windsnelheden, die vaker dan eens per jaar voorkomen, de maximale windsnelheid over een getijperiode gekozen, i.p.v. een momentane windsnelheid.

In vergelijking met de oude (Volker) wind-waterstandstatistiek geeft de nieuwe (Hydra-B) statistiek in het bereik van de data hogere windsnelheden. Voor de richtingen ZW t/m NW liggen de mediaanlijnen volgens Hydra-B circa 1 ~2m/s hoger dan die volgens Volker.

Bij een langere terugkeertijd (b.v. T=1,000 jaar en T=10,000 jaar) zijn de verschillen tussen de statistiek van Volker en die van Hydra-B groot. Figuur 13~14 geven vergelijkingen weer bij een 50% percentiel voor de windrichtingen WZW resp. WNW. Het verschil in windsnelheden varieert tussen 2~7m/s, afhankelijk van de richtingsector. Tabel 10 geeft de door Hydra-B resp. Dijkkring afgeleide windsnelheden bij de richtingsector WNW bij de gegeven zeewaterstanden. Het verschil tussen de twee modellen komt redelijk over een met Figuur 14.

	Zeewaterstand [m]	Hydra-B U[m/s]	Dijkkring U[m/s]	DU [m/s]
Strijen	4.27	31.1	29.7	1.4
Moerdijk	3.73	30.5	25.9	4.6
Numansdorp	5.15	37.1	34.2	2.9
Willemstad	4.77	34.8	32.7	2.1
Hellevoetsl	4.86	35.1	33.0	2.1
Goedereede	5.26	36.8	34.6	2.2
Dordrecht	3.50	26.9	24.6	2.3
Rotterdam	3.89	29.3	27.0	2.3

Tabel 10 Vergelijking tussen de windsnelheden uit Hydra-B resp. Dijkkring voor de gegeven zeewaterstand voor de richtingsector WNW.

De windsnelheden voor Dijkkring zijn afgeleid volgens stap 1 tot 4 in de paragraaf 4.1.

Golfparameters(golfhoogte en piekperiode) zijn zeer gevoelig voor windsnelheden. Verschil in windsnelheden tussen de twee statistieken zal tot verschillen in de berekende belastingniveaus leiden. Hoe groot het verschil precies is, is het echter niet mogelijk om achter te halen vanwege de verschillen in probabilistische berekeningen in de twee modellen.

6.8 Correlatie met verschil in overloophoogten

Figuur 15 geeft de berekende overloophoogten voor de 8 testlocaties weer. Deze zijn de waterstanden die met de gegeven normfrequenties overeenkomen, waarbij geen rekening met golfoploop/overslag wordt gehouden. Gelet moet worden dat Hydra-B de hoogten per oeverlocatie geeft, terwijl deze in Dijkkring langs riviervas zijn (zie tabel 11).

De waterstanden zijn berekend met SOBEK in Hydra-B, resp. met ZWENDL in Dijkkring. Ten opzicht van ZWENDL was de schematisatie van SOBEK voor de gebieden Haringvliet en Hollandse Diep uitgebreid zodat er rekening gehouden kan worden met dwars opwaaiing. Hierbij kan een verschil van 1 tot 4 cm met ZWENDL worden verwacht (maximaal 10 centimeter tussen beide oevers)

Meestal berekent Dijkkring lagere waterstanden dan Hydra-B, behalve voor de locatie Rotterdam waarin Dijkkring een hogere waterstand heeft berekend. Figuur 16 geeft de correlatie tussen het verschil in de belastingniveaus en het verschil in de overloophoogten weer (altijd Hydra-B – Dijkkring, zie ook tabel 11). De perfecte correlatie (rechte lijn) is ook weergegeven. Voor kleinere verschillen zijn de correlaties beter dan voor de grotere verschillen.

Voor het berekenen van de overloophoogten is wind minder belangrijker dan afvoer en zeewaterstand. Dit komt omdat hogere windsnelheid veel kleinere kans van optreden heeft dan hoge afvoer. Om het effect van het verschil in de windsnelheid naar voren te brengen moet de correlatie tussen de lokale waterstanden en de belastingniveaus worden onderzocht (zie volgende paragraaf).

		Ov-hoogte Hydra-B	Ov-hoogte Dijkkring	Vershil in Ov-hoogte	Vershil in belastingniveaus
Locaties	Ov. freq.	Ws[m]	Ws.[m]	DH[m]	DBn-2
Strijen	1/2000	2,823	2,73	0,053	-0,015
Moerdijk	1/2000	2,831	2,73	0,101	0,155
Numansdorp	1/2000	2,747	2,60	0,147	0,364
Willemstad	1/2000	2,758	2,60	0,158	0,045
Hellevoetsluis	1/4000	2,701	2,47	0,231	0,517
Goedereede	1/4000	2,698	2,47	0,228	0,062
Dordrecht	1/2000	2,989	2,98	0,009	-0,083
Rotterdam	1/10000	3,407	3,53	-0,123	-0,213

Tabel 11 Vergelijking overslaghoogten van Dijkkring resp. Hydra-B Als referentie wordt het verschil in belastingniveaus ook opgegeven.

Ov-hoogte: overloophoogte.

6.9 Correlatie met lokale waterstanden

Het hydraulische belastingniveau is de som van de lokale waterstand en de hoogte van de golfoploop of golfoverslag. De lokale waterstand draagt daarom rechtstreeks de contributie aan het berekende belastingniveau bij. Het is daarom zinvol om de correlatie tussen de verschillen in lokale waterstanden en de verschillen in belastingniveaus te bekijken.

De verschillen in de lokale waterstand (zie figuur 17) komen door het verschil in de manieren waarop afvoer, zeewaterstanden en windsnelheden worden uitgerekend. Voor de gegeven faalkans wordt de maximale benodigde kruinhoogte afgeleid welke ten gevolg is van lokale waterstanden en windgolven. Deze zijn weer, hun buurt, combinaties van zeewaterstanden,

de afvoeren, de windsnelheid en de windrichtingen. Vanwege de verschillen in de combinaties leidt Hydra-B, voor de gegeven faalkans, ook hogere windsnelheden resp. waterstanden af dan Dijkkring.

		Lokale ws Hydra-B	Lokale ws Dijkkring	Het verschil in lokale ws	Het verschil in Belastingniveaus
Locaties	Ov. Frequentie	Ws[m]	ws.[m]	DH[m]	DBn-2
Strijen	1/2000	1.79	1.794	-0.004	0.055
Moerdijk	1/2000	2.46	2.213	0.247	0.155
Numansdorp	1/2000	2.04	1.574	0.466	0.364
Willemstad	1/2000	2.50	2.243	0.257	0.045
Hellevoetsluis	1/4000	1.98	1.351	0.629	0.517
Goedereede	1/4000	2.39	2.093	0.297	0.062
Dordrecht	1/2000	2.85	2.796	0.054	0.083
Rotterdam	1/10000	3.42	3.278	0.142	-0.213
Tabel 12 Vergelijking tussen de lokale waterstanden van de twee modellen.					

Tabel 12 geeft de lokale waterstanden en de verschillen van de twee rekenmodellen. De invloed van de lokale waterstand op het berekende belastingniveau is verschillend per locaties. Omdat andere factoren ook invloed hebben op de berekende belastingniveaus, is het echter niet mogelijk om een precies verschil te weten te komen. Hiertoe wordt de correlatie tussen de verschillen in berekende lokale waterstanden en in de berekende belastingniveaus in figuur 18 weergegeven. Voor grotere verschillen is de correlatie ook goed maar niet perfect (rechte lijn). De verschillen bij de locaties Numansdorp en Hellevoetsluis kunnen door de verschillen in de lokale waterstanden goed worden verklaard.

7. Conclusies

Doel van deze studie is de oorzaken van de verschillen tussen de twee modellen, Hydra-B 1.1 en Dijkring 5, aantonen en op een juiste manier te verklaren.

In deze studie zijn eerst de rekenformules van Hydra-B beschreven.

Daarna werden voor 8 testlocaties de berekende belastingniveaus van Hydra-B resp. Dijkring vergeleken. Vervolgens werden de resultaten van Dijkring gereproduceerd en geanalyseerd. In het hoofdstuk 6 werd de invloed van de keuzen en methodieken van de twee modellen op de belastingniveaus onderzocht. Hieruit kan grotendeels de oorzaak van de verschillen verklaard worden. Gebaseerd op de onderzoeksresultaten kunnen we de volgende conclusies trekken.

1. Door de beperkingen in het computergeheugen en de rekensnelheid van de PC's in de jaren 90 is Dijkring sterk vereenvoudigd. De vereenvoudigingen hebben groot gevolg tot de nauwkeurigheid van de benodigde kruinhoogten.
2. Bij het berekenen van golfoverslag is in Dijkring, i.p.v. piekperiode, de significante periode gekozen. Hierdoor worden de benodigde kruinhoogten onderschat.
3. De sluitingscriteria van de keringen SVKH en SVKW in de twee rekenmodellen zijn verschillend, welke ook gevolg hebben voor de berekende kruinhoogten voor de locaties die gelijk achter de keringen liggen, b.v. Rotterdam.
4. In SOBEK zijn de resultaten van de modelschematisatie voor Haringvliet en Hollandse Diep uitgebreid met dwars opwaaiing, terwijl in ZWENDL de waterstanden voor de genoemde gebieden alleen langs de rivieras zijn berekend. Hierbij kan een verschil van 1~5cm voor deze gebieden worden verwacht.
5. De oorzaken van verschillen in de berekende belastingniveaus kunnen grotendeels worden verklaard door:
 - a) het gebruik van de significante golfperiode T_s in Dijkring (een bewuste keuze);
 - b) het verschil in de berekende lokale waterstanden;
 - c) het verschil in besturing van de keringen SVKW en SVKH;
 - d) het verschil in probabilistische verwerkingen van zeewaterstand.
6. In Hydra-B worden zowel windgolven als de stormopzet van zeewaterstanden volledig probabilistisch behandeld.
7. In Hydra-B is er gebruik gemaakt van de verbeterde kennis en de meetgegevens in het rekengebied. De rekenprocedure van Hydra-B is helder en de berekende resultaten kunnen worden gecheckt. Vandaar dat het rekenmodel Hydra-B ook betrouwbaar is.

Bijlage A. Formules voor windgolven

A.1 Formules van Bretschneider

De significante golfhoogte en piekperiode kunnen met de formules van Bretschneider worden uitgerekend. Deze empirische relaties zijn alleen toepasbaar voor de groeiende golven welke zich langs een rechte lijn voortplanten. Mochten de golven langs de groeilijn worden gedempt, gereflecteerd of gereflecteerd, dan zijn de formules niet van toepassing!

De formules in deze notitie zijn afkomstig uit de Leidraad Rivierdijken deel 2 van TAW(1989) waarbij de golfhoogte en periode zijn uitgedrukt als functie van dimensieloze waterdiepte en strijklengte.

$$\begin{aligned} H_s^* &= 0.283 \nu_1 \tanh \left[\frac{0.0125 F_*^{0.42}}{\nu_1} \right] & \nu_1 &= \tanh [0.53 D_*^{0.75}] \\ T_s^* &= 2.4 \pi \nu_2 \tanh \left[\frac{0.077 F_*^{0.25}}{\nu_2} \right] & \nu_2 &= \tanh [0.833 D_*^{0.375}] \end{aligned} \quad (A1)$$

waarbij parameters gescaled worden met windsnelheid U_{10} en zwaartekrachtversnelling g

$$H_s^* = \frac{g H_s}{U_{10}^2}; \quad T_s^* = \frac{g T_s}{U_{10}}; \quad D_* = \frac{g D}{U_{10}^2}; \quad F_* = \frac{g F_e}{U_{10}^2} \quad (A2)$$

waarin

H_s	[m]	significante golfhoogte
T_s	[s]	significante golfperiode
D	[m]	waterdiepte
F_e	[m]	effectieve strijklengte
U_{10}	[m/s]	windsnelheid
g	[m/s ²]	zwaartekrachtsversnelling.

Vergelijking A.2 is gebaseerd op zogenaamde U_{10} -scaling welke ook toegepast is in Dijkkring en Hydra -B. Voor het bepalen van golfoploop/overslag is de piekperiode van belang, de relatie tussen de significante golfperiode en de piekperiode is als volgt:

$$T_p = 1.08 T_s \quad (A3)$$

A.2 Definities voor effectieve strijklengte en bodemhoogte

Verder moeten de effectieve strijklengte en de waterdiepte worden bepaald. Ten eerst wordt een gebied opgedeeld naar sectoren. Per sector is er een representatieve strijklengte $R(\theta)$ die een hoek θ met de windrichting vormt. Daarna wordt volgens Leidraad Bovenrivier(TAW, 1985) de effectieve strijklengte F_e bepaald met een gewogen functie cosinus,

$$F_e = \frac{\sum l(\theta_i) \cdot \cos(\theta_i)}{\sum \cos \theta} = \frac{\sum R(\theta_i) \cdot \cos^2(\theta_i)}{\sum \cos \theta} \quad (A4)$$

waarin $l(\theta)$ de projectie van de strijklengte van de beschouwde richting op de windrichting is. De bodemhoogte is ook gemiddeld over een strijklengte welke in een aantal vakken wordt opgedeeld;

$$D = \frac{d_1 F_1 + d_2 F_2 + d_3 F_3 + \dots}{F_1 + F_2 + F_3 + \dots} \quad (A5)$$

met

D	gemiddelde bodemhoogte in m +NAP
F_1	de strijklengte van vak 1 in m
d_1	de bodemhoogte van vak 1 in m +NAP
F_2	de strijklengte van vak 2 in m
d_2	de bodemhoogte van vak 2 in m+NAP
F_3	de strijklengte van vak 3 in m
d_3	de bodemhoogte van vak 3 in m+NAP

Bijlage B. Formules voor golfoverslag

In de Leidraad voor de Benedenrivieren (TAW, 1985) wordt gesteld dat de golfoploop/golfoverslag de belangrijke component is bij het vaststellen van de waakhoogte. Tijdens het maken van de Leidraad is uitgegaan van formules die in toen geldende dagelijkse ontwerppraktijk werd toegepast.

In de afgelopen decennia is er veel onderzoek verricht naar de invloed van taludruwheid, taludhelling, bermen hoek van invallende golven op de berekende golfoploop/overslag. Hiertoe zijn de formules voor golfoploop/overslag steeds bijgesteld door de verbeterde inzichten. In deze bijlage wordt formules van Van der Meer (1994) voor golfoverslag gegeven. Deze formules zijn geïmplementeerd in Dijkkring en ook in Hydra-M in gewijzigde vorm (de Waal 1999).

B.1 Golfoverslag

Van der Meer & Janssen (1994) heeft empirische formules gepresenteerd voor het berekenen van golfoverslag. Voor brekende golven ziet de dimensioneloze overslag Q_b er uit als volgt:

$$Q_b = \frac{q_c}{\sqrt{gH_s^3 \tan \alpha}} \xi_{op}; \quad \xi_{op} < 2 \quad (B1)$$

De dimensioneloze kruinhoogte

$$R_b = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\xi_{op}} \frac{1}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta}; \quad (B2)$$

waarin ξ_{op} de brekingsparameter is,

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_d}}}; \quad L_d = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (B3)$$

De dimensioneloze variabelen Q_b , R_b zijn met de metingen uit laboratoria gefit, de volgt relatie wordt afgeleid,

$$Q_b = a_b \bullet \exp(-b_b \bullet R_b) \quad (B4)$$

waarin $a_b=0,06$ en $b_b=5,2$ voor een gemiddelde waarde. Voor iets conservatiefs wordt $b_b=4,7$ aangehouden.

H_s	significante golfhoogte
L_d	golflengte in diep water
T_p	piekperiode
q_c	gemiddelde debiet in m ³ /s/l/m
Q_b	overslag voor brekende golven ($\xi_{op} < 2$)
R_b	dimensioneloze kruinhoogte
α	dijktalud
γ_b	reductiefactor voor berm
γ_f	reductiefactor voor ruwheid

γ_β reductiefactor voor strijkgolven
 ξ_{op} brekingsparameter

Voor niet-brekende golven,

$$Q_n = \frac{q_c}{\sqrt{gH_s^3}}; \quad \xi_{op} > 2 \quad (B5)$$

$$R_n = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta}; \quad (B6)$$

Uit laboratoriummetingen is de relatie tussen Q_n en R_n als volgt:

$$Q_n = a_n \bullet \exp(-b_n \bullet R_n) \quad (B7)$$

waarin $a_n=0,2$ en $b_n=2,6$. Voor iets conservatiefs wordt $b_n=2,3$ aangehouden.

Vgl.B1~B7 werden gegeven in van der Meer (1994 en 1997). In de Waal (1999) zijn de formules voor golfoverslag iets compacter geschreven,

$$Z_{opl,b} = \frac{1}{4.7} H_s \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \left(-\ln \left(\frac{1}{0.06} \frac{q_c}{gH_s^3} \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{\gamma_b \xi_{op}} \right) \right); \quad \xi_{op} < 2 \quad (B8)$$

$$Z_{opl,n} = \frac{1}{4.7} H_s \gamma_f \gamma_\beta \left(-\ln \left(\frac{1}{0.2} \frac{q_c}{gH_s^3} \right) \right); \quad \xi_{op} > 2 \quad (B9)$$

waarin $Z_{opl,b}=R_b$ en $Z_{opl,n}=R_n$. Voor een geleidelijke overgaan van brekende en niet-brekende golven wordt de golfoverslag zo gedefinieerd,

$$Z_{opl} = \min(Z_{opl,b}, Z_{opl,n}) \quad (B9)$$

B2. Reductiefactor voor strijkgolven

In vgl.(B.2) dient men de reductiefactor voor strijkgolven γ_β , berm γ_b en bodemruwheid γ_f op te geven. In verband met deze studie zal in deze paragraaf alleen de reductiefactor voor strijkgolven worden gegeven. Over de reductiefactors voor berm en taludruwheid wordt gerefereerd naar van der Meer (1994) en Hydra_M(2002).

In Dijkkring is de reductiefactor voor strijkgolven gedefinieerd als volgt:

$$\gamma_\beta = 1 - 0,0033 \beta \quad (0 \leq \beta \leq 90^\circ); \quad (B10)$$

$$\gamma_\beta = 0 \quad (\beta > 90^\circ);$$

waarin β de hoek is tussen de dijknormaal en de invalgolven.

In Hydra-B (ook in Hydra-M) wordt een vloeiende overgang voor de strijkgolven die een hoek hebben tussen 80° en 110° .

$$\gamma_\beta = \gamma_{\beta 1} * \gamma_{\beta 2}; \quad (B11)$$

waarin $\gamma_{\beta 1}$ is gedefinieerd als volgt:

$$\gamma_{\beta 1} = 1 - 0.0033\beta \quad (0 \leq \beta \leq 80^\circ); \quad (B12)$$

$$=0.736 \quad (\beta > 80^\circ)$$

En $\gamma_{\beta 2}$ is gedefinieerd als volgt:

$$\gamma_{\beta 2} = \frac{1}{30} \int_{\beta-20}^{\beta+10} \gamma_x d\beta' \quad (\text{B13})$$

waarin de integrant γ_x gedefinieerd wordt:

$$\gamma_x = \begin{cases} = 1 & 0 \leq \beta \leq 80^\circ \\ = 1 - (\beta - 80)/30 & 80^\circ \leq \beta \leq 110^\circ \\ = 0 & \beta > 110^\circ \end{cases} \quad (\text{B14})$$

Bijlage C. Verhouding tussen T_p en T_s

Voor het berekenen van golfloop of golfoverslag wordt in Hydra-B piekperiode T_p gebruikgemaakt terwijl in Dijkkring T_s is toegepast waarbij uitgegaan is dat $T_s = T_p$.

In het 'Technische rapport Golfloop en Golfoverslag bij Dijken' (TAW, 2002) staat er in pg. 8 de volgende beschrijving:

Bij een golfspectrum kunnen verschillende golfperioden worden gedefinieerd. Dit zijn naast de genoemde spectrale periode $T_{m-1,0}$, onder andere de piekperiode T_p (de periode die de piek van het spectrum geeft), de gemiddelde periode T_m (berekend vanuit het spectrum of vanuit tijdsignaal) en de significante periode $T_{1/3}$ (het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golfperioden). Er geldt dat de verhouding T_p/T_m meestal ligt tussen 1,1 en 1,25 en dat T_p en $T_{1/3}$ vrijwel aan elkaar gelijk zijn. In de leidraad Rivierdijken [TAW, 1989] wordt een verhouding aangehouden: $T_m = T_{1/3} / 1,15$.

($T_{1/3}$ wordt ook wel als de significante golfperiode T_s bedoeld)

In de loop der jaren zijn er verschillende golfperioden toegepast voor het berekenen van golfloop of golfoverslag in hydraulische belastingmodellen:

Hydraulische belasting model	Gebruikte golfperiode
Dijkkring(leidraad Bovenrivier)	T_m
Dijkkring(TAW 1994)	$T_s (T_p = T_s)$
Hydra-B en Hydra-M	$T_p (T_p = 1,08 T_s)$
PC-Ring	T_p
DTH99	$T_s (T_p = T_s)$
Hydra-K	$T_p (T_p = 1,08 T_s)$
Onzekerheidsanalyse	T_p
PC-overslag	$T_p (T_p = 1,1 T_{m-1,0})$

Er zijn dus verschillende aannames gebruikt voor de verhouding tussen de piekperiode en andere golfperioden. Tevens is er ook vraag gesteld waarom $T_p = 1,08 T_s$ beter is dan $T_p = T_s$. Deze en andere zullen in de onderhavige bijlage worden beantwoord.

Op het gebied van het dijkontwerp of het dijktoetsen is in de jaren '70 en daarvóór verondersteld dat het kenmerkende golfsysteem op het kustgebied uit deining bestaat. Voor deze golven is de aanname $T_p = T_s$ vrij goed.

In jaren '80 en daarna realiseert men zich dat de windgolven de kernmerkende belasting zijn, zowel op het kustgebied, in de meren als in de benedenrivieren. Windgolven bestaan uit golven die verschillende golflengten en perioden hebben en kunnen vrij goed met golfspectrum worden beschreven. De verhouding tussen T_s en T_p kan daarom worden bepaald uit golfmetingen en spectrale analyse.

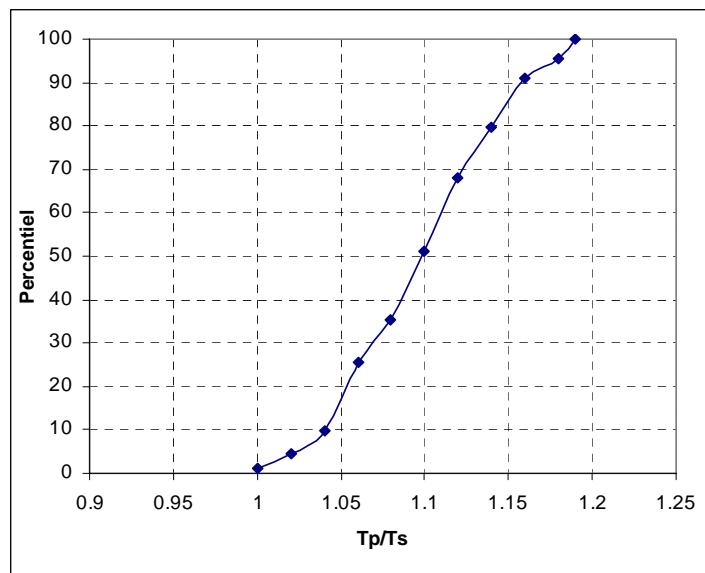
De verhouding $T_p = 1,08 T_s$ is aanbevolen in het hydraulische randvoorwaardenboek 1996. Hoe de factor (1,08) is afgeleid, is niet bekend. Wel wordt daarbij een spreiding (1,04 ~ 1,11) gegeven.

In veel literatuur, onder andere 'Windgolven' (Battjes, Handleiding College b78, sept. 1982), werd aangegeven dat T_s ongeveer gelijk is aan $0,9T_p$, ofwel $T_p = 1,11T_s$ ($T_{1/3} = 0,9/f_m$ in 'Windgolven', waarbij f_m de piekfrequentie is).

Uit golfmetingen van 15-17 februari 1995 en 27 februari – 05 maart 1995 bij locatie RDH in het IJsselmeer zijn er volgende gegevens beschikbaar voor $T_p = \text{factor} * T_s$

totaal golfgegevens	714
gemiddelde factor's waarde	1,10
maximale factor's waarde	1,34
minimale factor's waarde	0,93

Uit de bovenstaande gegevens blijkt er een behoorlijke spreiding voor de factor (0,93 ~1,34) te hebben. De onderstaande figuur geeft de verhouding tussen factor's waarden en percentiel weer. Hieruit heeft een waarde 1,10 een percentiel van 51% (de gemiddelde waarde heeft een percentiel van 50%). Als men een conservatieve waarde wil nemen voor het toetsen van dijken, dan kan factor=1,14 worden gebruikt. Hierbij ligt 80% van de factor's waarde onder 1,14.



Uit bovenstaande analyses wordt geconcludeerd dat voor windgolven de keuze voor $T_p = 1,08T_s$ beter is dan $T_p = T_s$, maar dit is niet de beste keuze. De beste keuze is $T_p = 1,11T_s$. Deze verhouding wordt in veel literatuur aanbevolen en ligt ook nabij de gemiddelde waarde van de meetgegevens.

Maar dit betekent niet dat de veiligheidsmarge in Hydra-B met de factor 1,08 wordt onderschat. In de module golfoploop/golfoverslag is een hogere veiligheidsmarge aangehouden ($b_b=4,7$, bijlage B). Daardoor compenseren beide aspecten elkaar waarschijnlijk.

Mocht Hydra-B als een complexe model worden beschouwd, dan moet de veiligheidsmarge van het model systematische worden geëvalueerd. In verband met statistieken bestaan er veel onzekerheden, zoals onzekerheid in windstatistiek, in afvoerstatistiek en in zeewaterstandenstatistiek. Bij bepaling van deze statistieken zijn gepaard gegaan met de veiligheidsmarges. Daarnaast is er ook onzekerheid in de relaties tussen potentiële windsnelheid en deze op openwater. De veiligheidsmarge van Hydra-B als een systeem kan

daarom alleen worden beoordeeld als alle onzekerheden in het systeem zijn geanalyseerd en geëvalueerd.

Literatuur

Boertien I, 1993, Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen, aanvullend deelrapport 2: werklĳn Rĳn en Maas, Waterloopkundig Laboratorium en EAC-RAND, 1993.

Deugd, H., 2002, Waterloopkundige berekeningen in het Benedenrivierengebied voor het Randvoor-waardenboek 2001. RIZA-werkdocument 2002.203X, december 2002.

Deugd, H., 1994, Het optreden van Hoogwaterstanden in het Noordelijk Deltagebied in de Situatie met Toekomstige Infrastructurele Aanpassingen. RIZA-werkdocument, 94.014X, maart 1995.

Den Heijer, F., 1994, Beheerdershandleiding van Dijkkring 4.0(Concept). DWW, 23 september 1994.

Dillingh, D. e.a. 1993, De basispeil langs de Nederlandse Kust - Statistisch onderzoek.Report DGW-93.023. RIKZ Den Haag, 1993.

Duits, M., 2002, Special Hydra-B, Stochastische nawerkingsroutine MHW-processor Systeem-documentatie, Versie 1.3, HKV Lĳn in Water, PR559.10, december 2002

Geerse, C., M. Duits, H. Kalk, I. Lemmers, 2002, Wind-waterstatistiek, Hoek van Holland, HKV Lĳn in Water, PR456, juli 2002.

Geerse, C., 2000, Probabilistisch model voor het Benedenrivierengebied (Concept). RIZA, 28 juni 2000.

Hydra-M, 2002, Gebruikershandleiding Hydra-M, versie 1.1; HKV Lĳn in Water, PR369.10, April 2002.

Lammers, I.B.M, M. Duits, 2002, Testrapport Hydra-B 1.0.0, HKV Lĳn in Water, PR559, november 2002.

Stijnen, J., M. Duits, I. Lemmers, 2003, Vergelijking golfoverslagmodules, HKV Lĳn in Water, PR630.20, februari 2003.

TAW 1985, Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1- Bovenriviergebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. 1985.

Van der Meer, J.W. 1997, Golfoploop en golfoverslag bij dijken. Waterloopkundig Laboratorium, verslag H2458 / H3051.

Van der Meer, J.W., J. Janssen 1994, Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Publication no. 485, August 1994, Delft Hydraulics, The Netherlands.

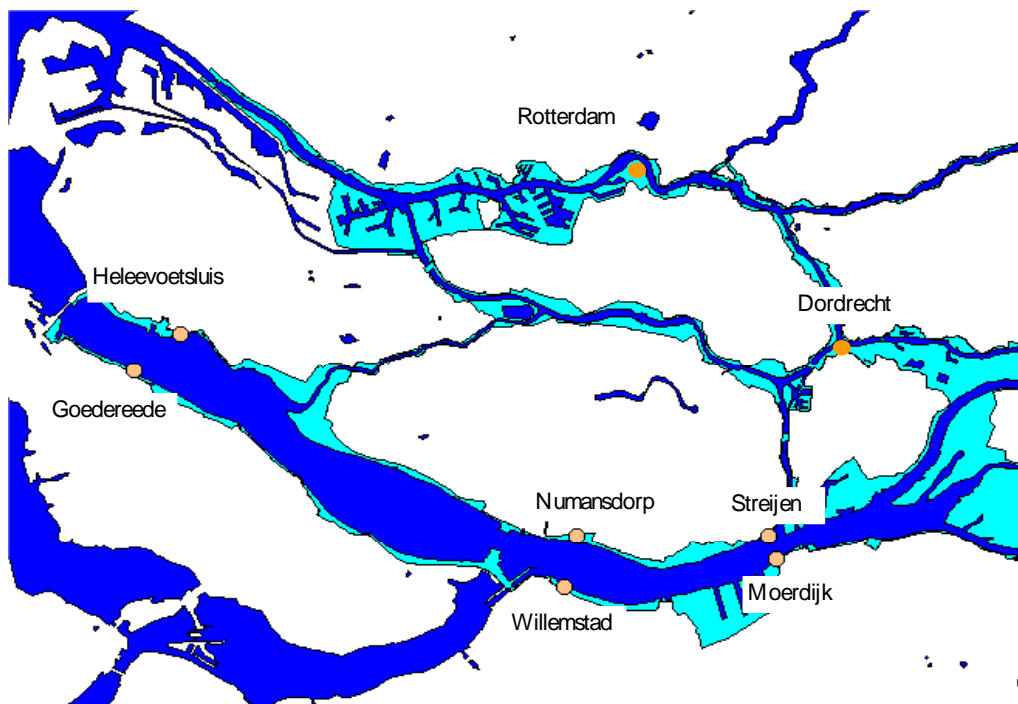
Volker, W., 1989, Statistiek voor de wind en waterstanden in Hoek van Holland. Nota WBVO-N-89015, RWS-DWW, 1989.

De Waal, J., 1999, Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied, deelrapport 9, Modellerings dammen, voorlanden en golfoploop. RIZA rapport 99.046, maart 1999.

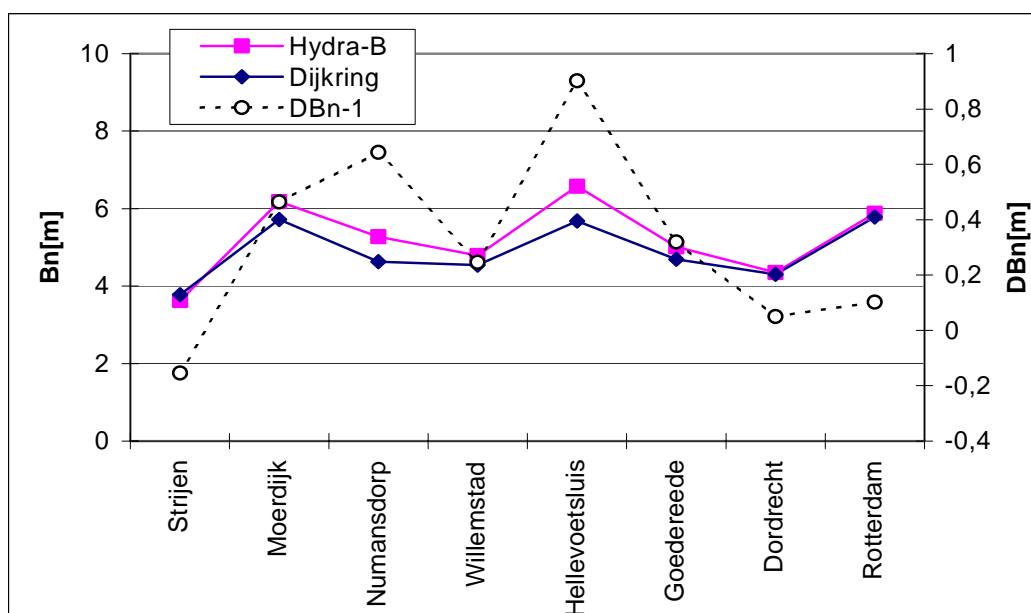
Vrouwenvelder, Prof. Ir. A.C.W.M. Steenbergern, ir. H.M.G.M., Diermanse, dr. Ir. F.L.M. Belastingmodellen Benedenrivierengebied fase 2, 2 april 2002

Zetten, J., 1998, Een SOBEK-model van het Noordelijk Deltabekken, stand van zaken, mei 1998. RIZA-werkdocument 98.082X.

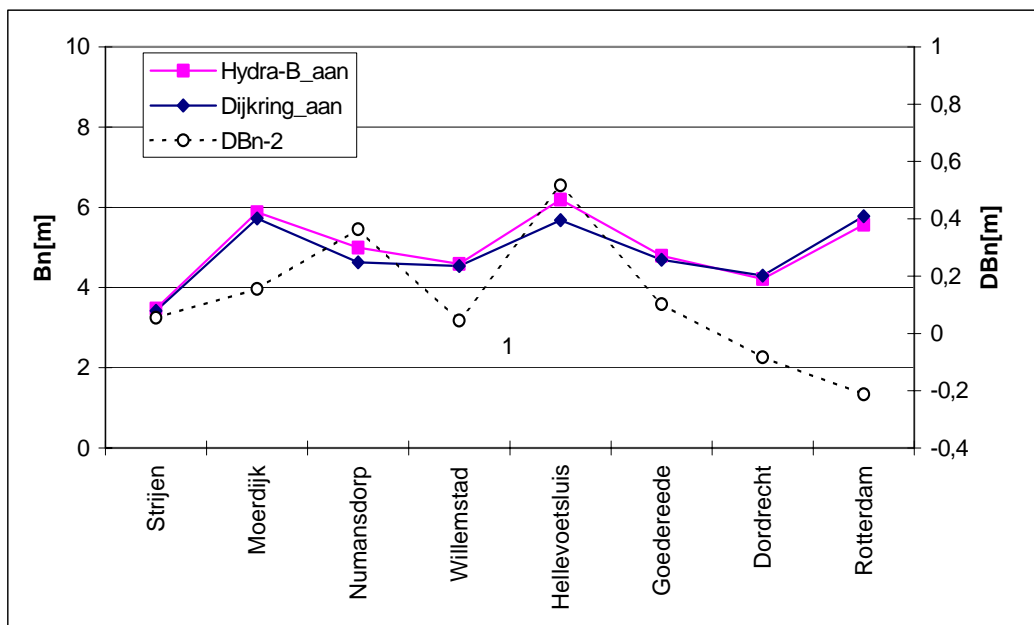
Figuur



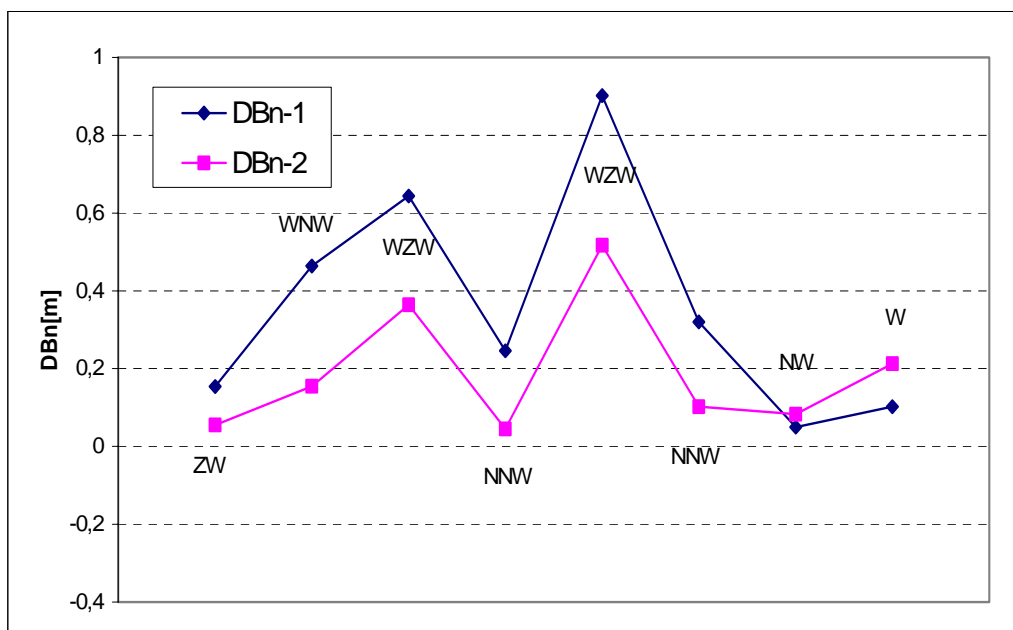
Figuur 1 De 8 testlocaties bevinden zich in het zee- en overgangsgebied van het benedenrivieren-gebied.



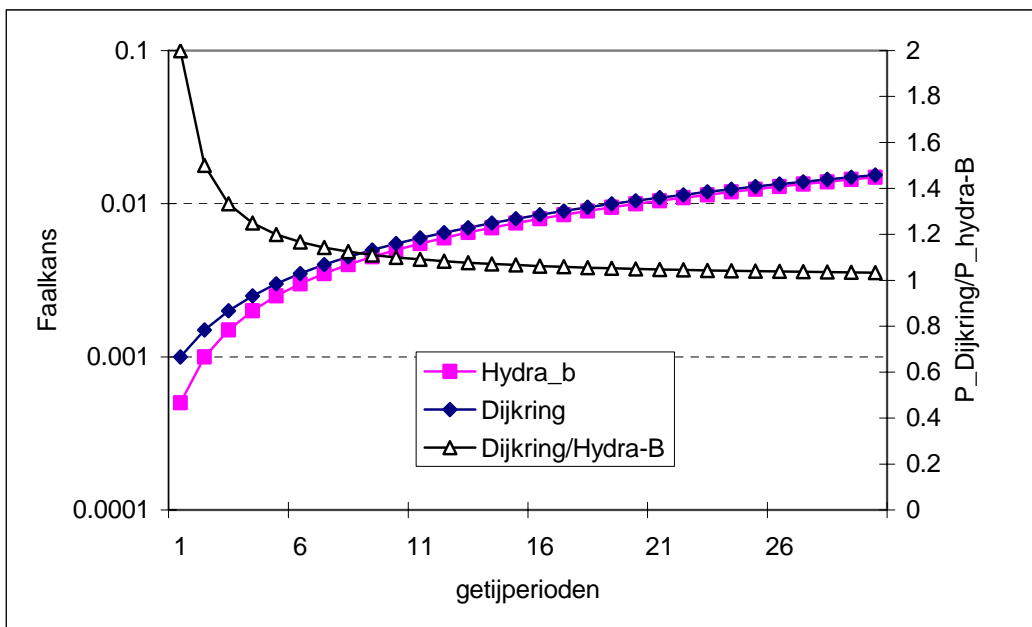
Figuur 2 Berekende hydraulische belastingniveaus volgens Hydra-B resp. Dijkring voor 8 locaties. De legenda's hebben de betekenis als volgt: Hydra-B: De door Hydra-B berekende belastingniveaus; Dijkring: de door Dijkring berekende belastingniveaus; DB_n-1 : de verschillen tussen de twee.



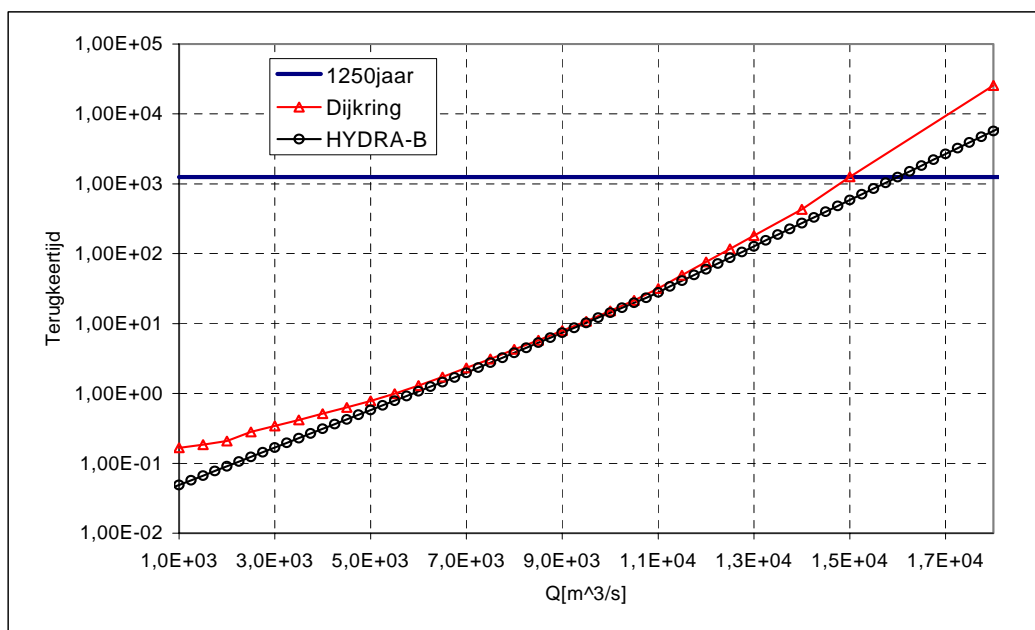
Figuur 3 De berekende belastingniveaus volgens Hydra-B resp. Dijkkring voor 8 locaties waarbij beide modellen zijn aangepast (zie ook tabel 9). DBn-2: verschillen na de aanpassingen.



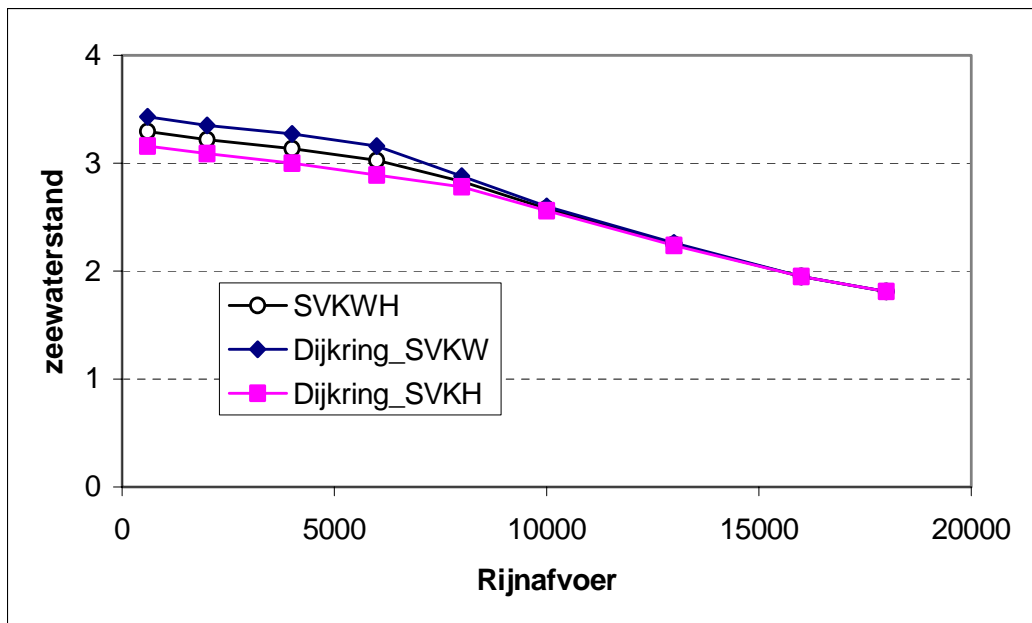
Figuur 4 De verschillen tussen de twee rekenmodellen. De legenda's hebben volgende betekenissen: DBn-1: verschillen vóór de aanpassingen; DBn-2: verschillen na de aanpassingen (zie ook DBn-1 in figuur 2 en DBn-2 in figuur 3).



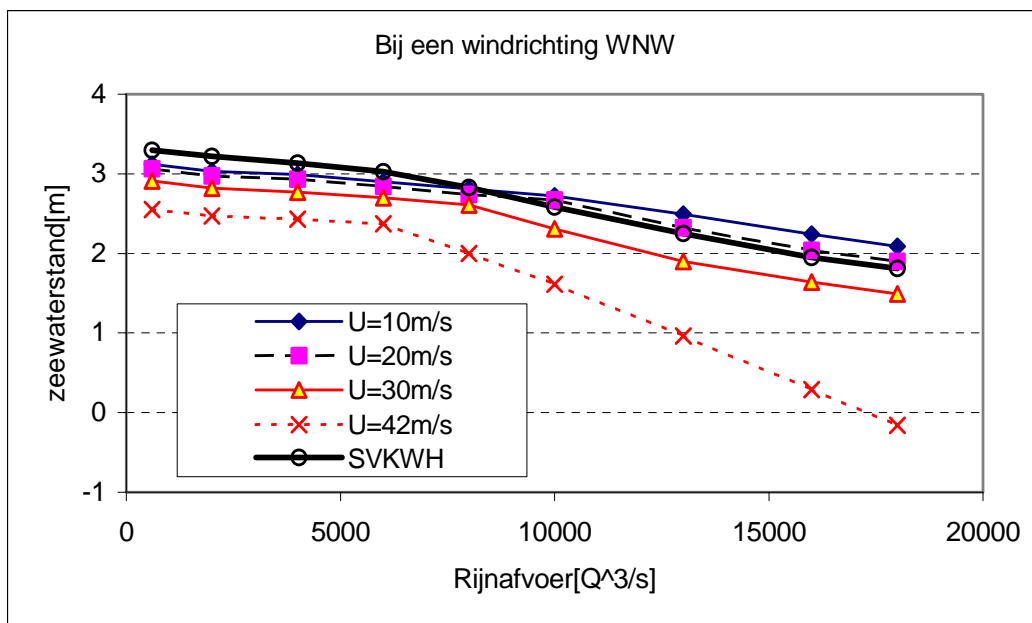
Figuur 5 Relatief verschil tussen de faalkansen van Hydra-B en Dijkkring.



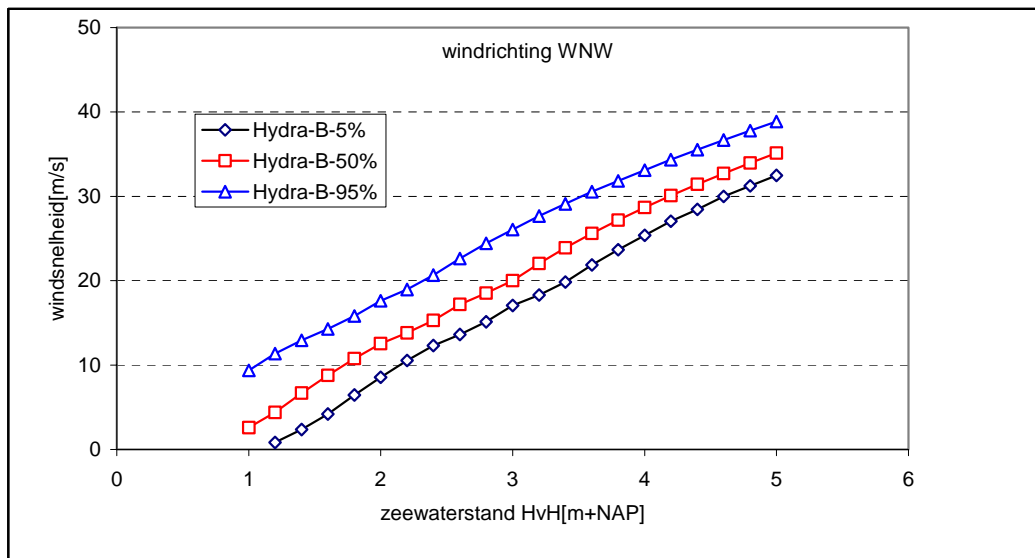
Figuur 6 Vergelijking de terugkeertijd van Rijnaafvoer. Horizontale as: debiet in m³/s; Verticale as, terugkeertijd in jaar.



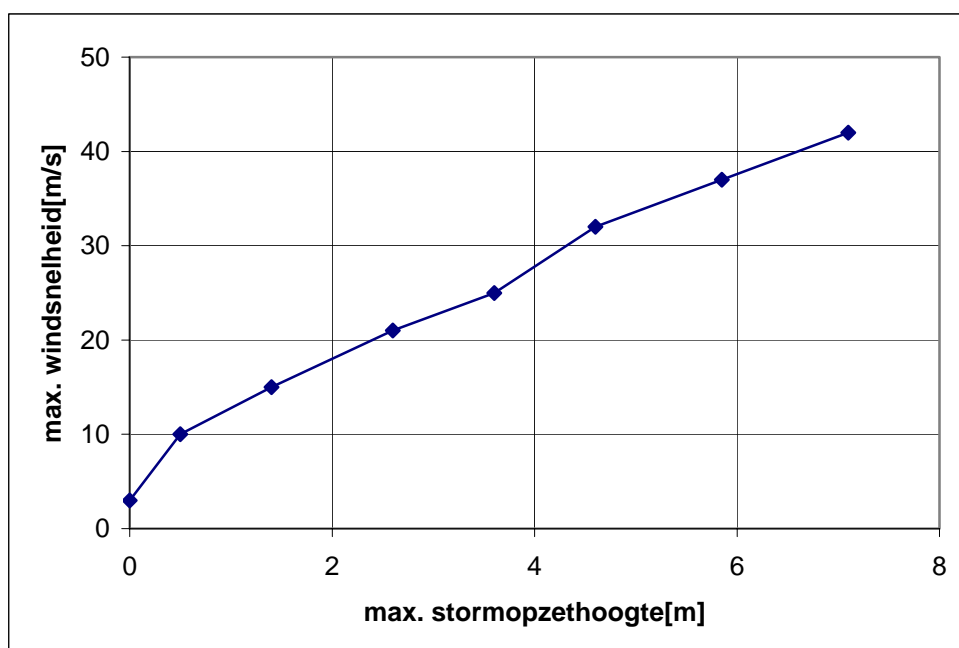
Figuur 7 Sluitstrategie voor de keringen in Dijkring. SVKWH is de gemiddelde waarde van SVKH en SVKW.



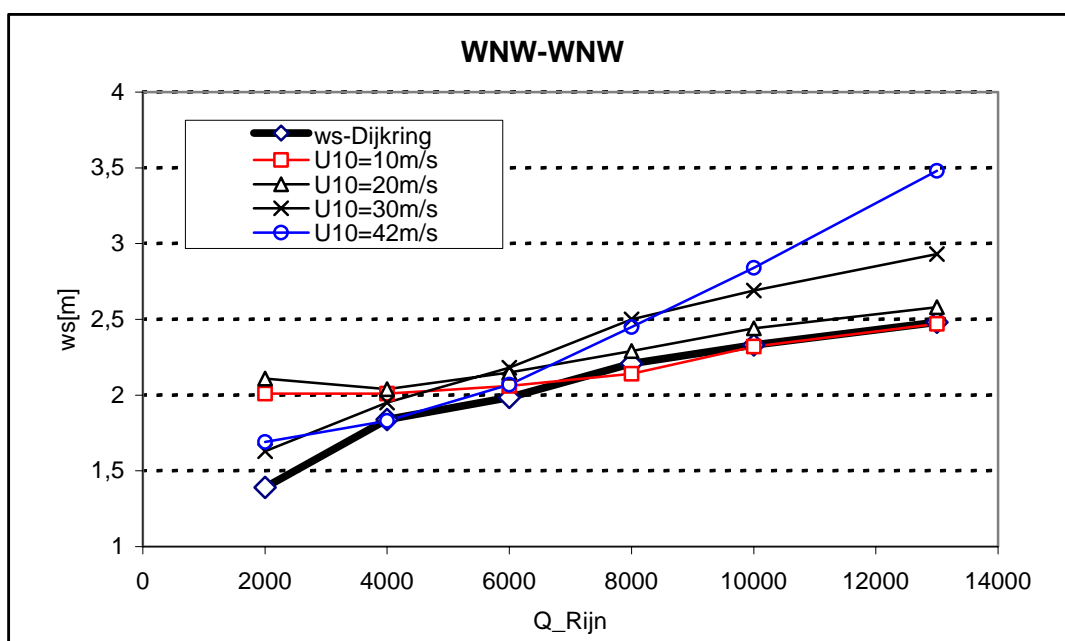
Figuur 8 Vergelijking sluitstrategie tussen Dijkring (gemiddeld waarde) en Hydra-B (alleen voor richtingsector WNW).



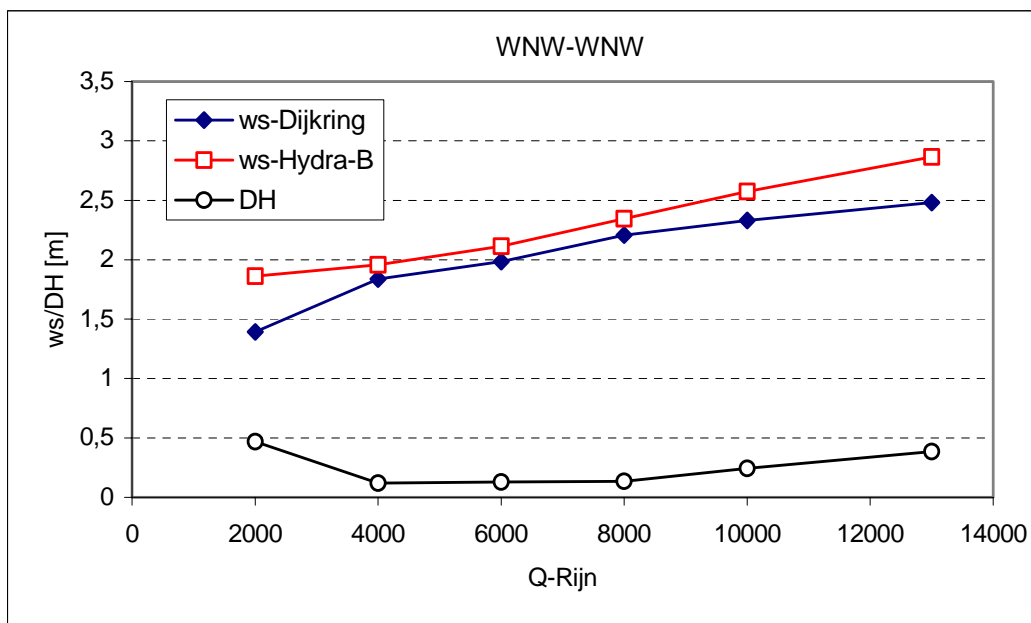
Figuur 9 Relaties tussen zeewaterstand en windsnelheid voor de mediane lijn, de 5% en 95% percentiellijnen in Hydra-B (overgenomen uit Geerse e.a, 2003). Hieruit is het duidelijk dat een zeewaterstand met een aantal windsnelheden kan associëren.



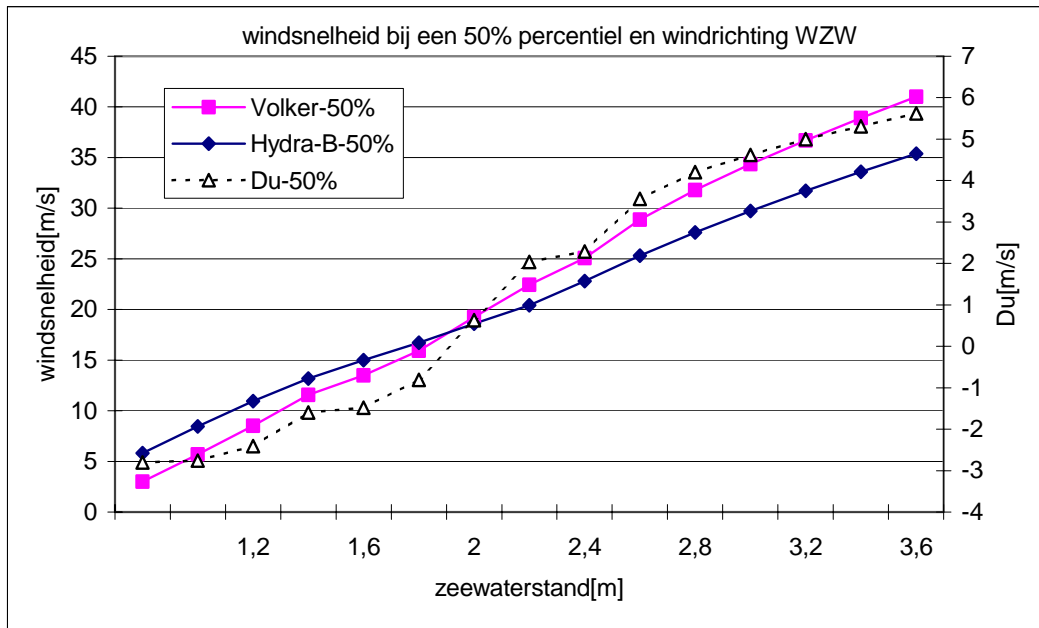
Figuur 10 Relatie tussen de hoogten van stormopzet en windsnelheden bij de windrichting WNW (overgenomen uit Deugd, 1994).



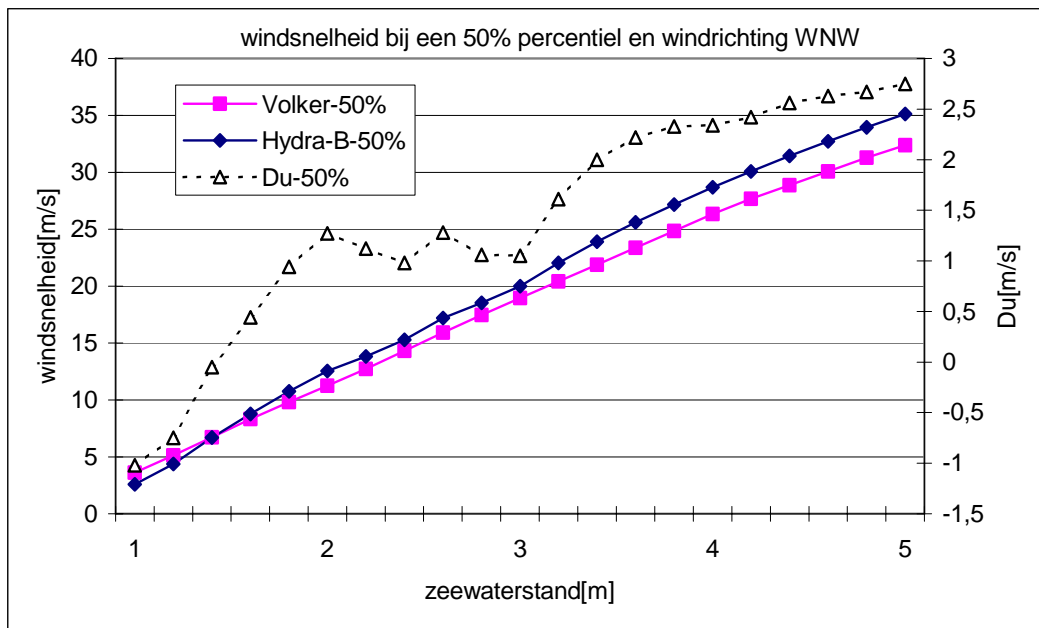
Figuur 11 Berekende waterstanden ter Hellevoetsluis als functie van Rijndebiet voor een zeewaterstand van 3m+NAP(Dijkkring) en 3,05m+NAP(Hydra-B). De windrichting komt uit WNW. Legendas hebben volgende betekenis; ws-Dijkkring: waterstand voor Dijkkring(berekende met ZWENDL); de overige zijn de waterstanden (berekende door SOBEK) voor Hydra-B voor 4 windsnelheden.



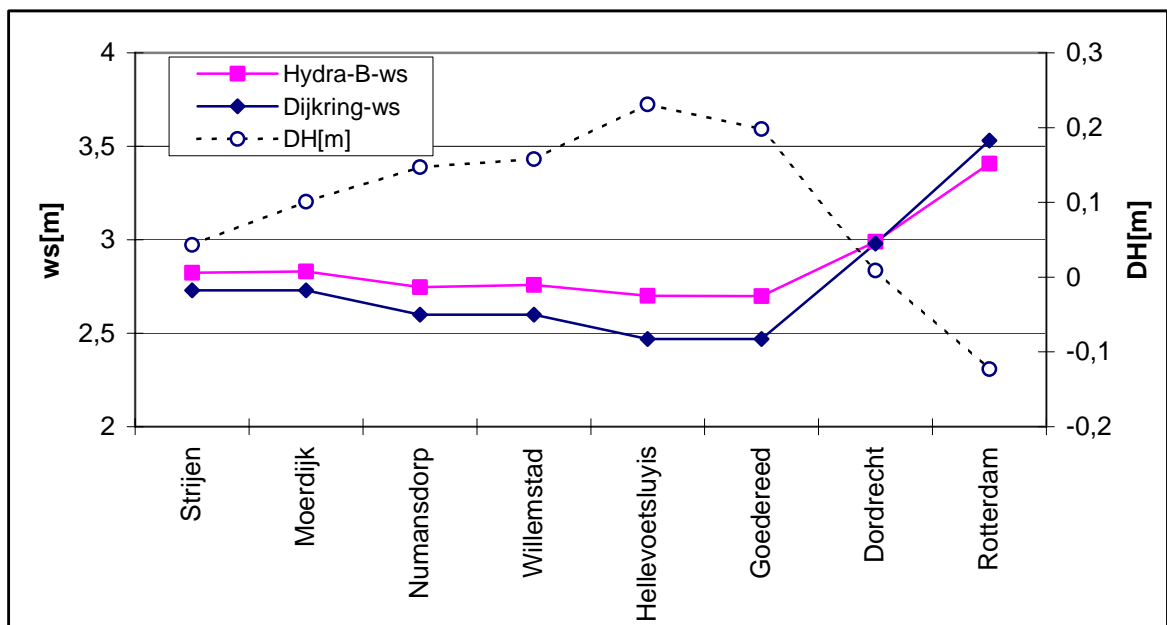
Figuur 12 Vergelijking waterstanden tussen Dijkkring en Hydra-B(gemiddeld) ter locatie Hellevoetsluis. De windrichting komt uit WNW. DH: verschil in waterstanden tussen Hydra-B en Dijkkring.



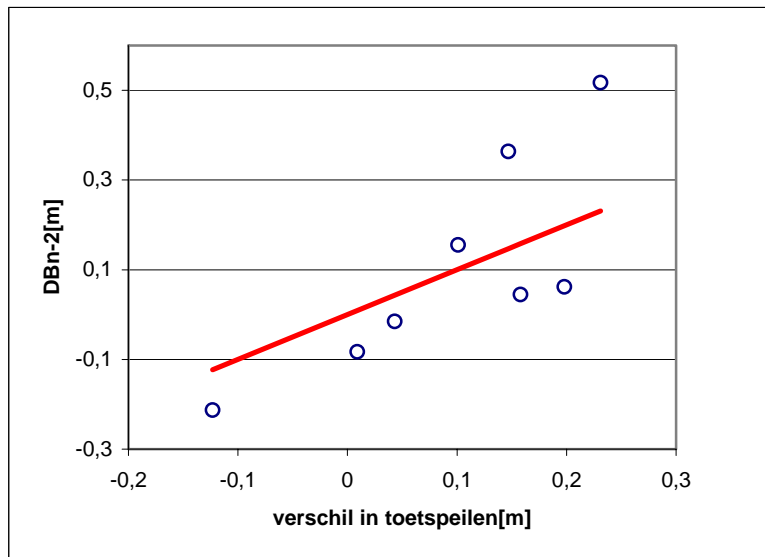
Figuur 13 Vergelijking Wind-zeewaterstand statistieken tussen Volker en Hydra-B, bij een gegeven percentiel(50%) en een gegeven windrichting(WZW)



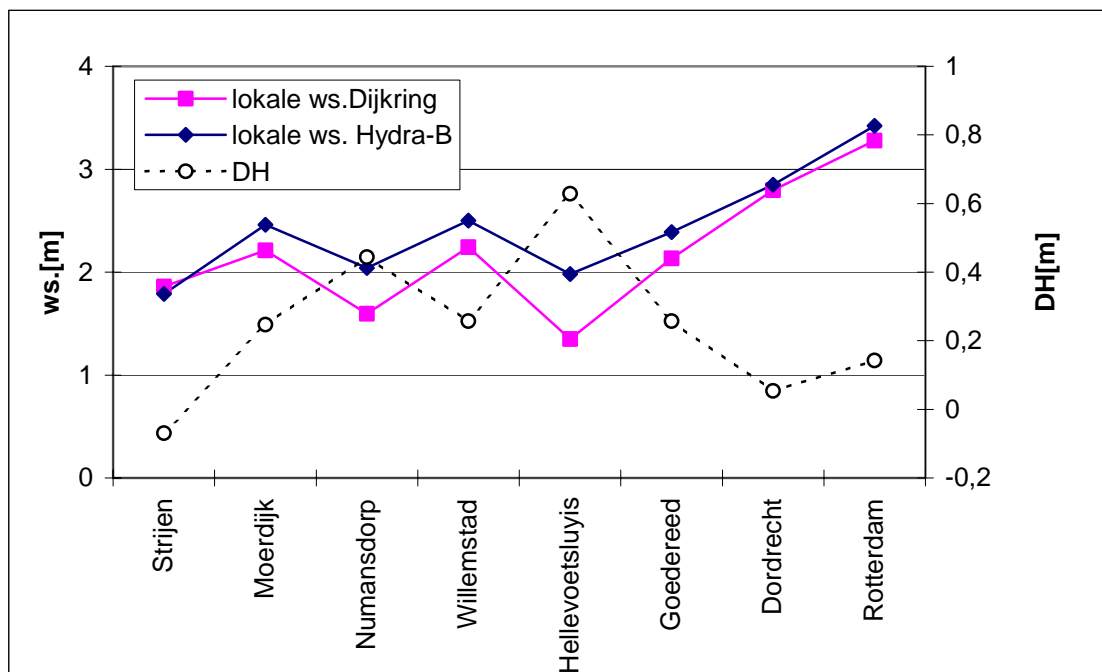
Figuur 14 Vergelijking Wind-zeewaterstand statistiek bij een gegeven percentiel (50%) en een gegeven windrichting WNW.



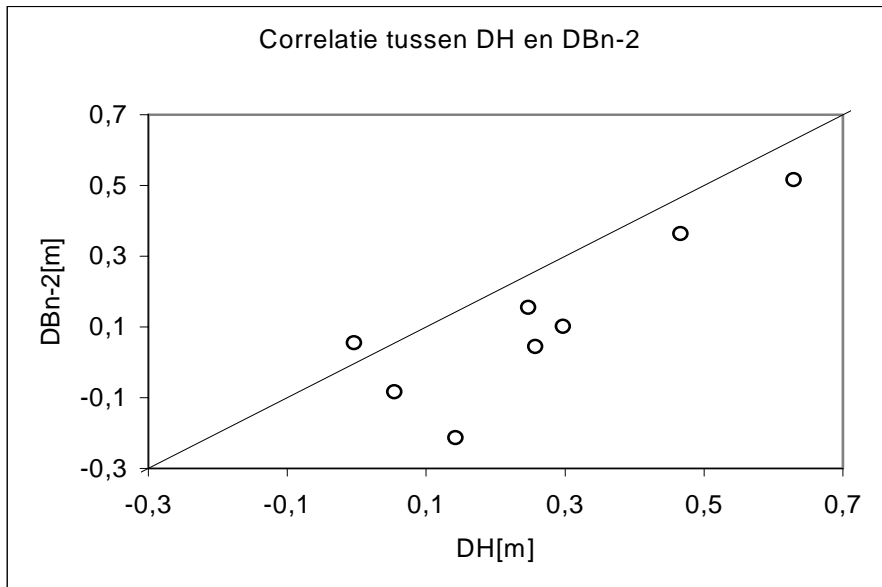
Figuur 15 De door Dijkkring resp. Hydra-B berekende hoogten voor wateroverloop. Dit zijn tevens toetspeilen (zonder rekening gehouden met windgolven) voor 8 testlocaties.



Figuur 16 Correlatie tussen verschillen in toetspeil en verschillen in de berekende belastingniveaus.



Figuur 17 De door Dijkkring resp. Hydra-B berekende lokale waterstanden. Het berekende belasting-niveau is de som van de lokale waterstand en de hoogte van de golfoverslag.



Figuur 18 Correlatie tussen de verschillen in lokale waterstanden en de verschillen in de berekende belastingniveaus.