
Bepaling van toetspeilen voor de regionale keringen langs de Mark-Dintel-Vliet boezem

Klaas-Jan Douben¹
Julian Maijers²

Inleiding

De beveiliging tegen overstromingen en inundaties vanuit regionale wateren vormt een wezenlijke randvoorwaarde voor de leefbaarheid in grote delen van West-Brabant. Deze veiligheid wordt in het beheergebied van waterschap Brabantse Delta gegarandeerd door regionale waterkeringen langs de Mark-Dintel-Vliet boezem met een totale lengte van ca. 170 km (afbeelding 1).

Provincies en waterschappen hebben gezamenlijk een stapsgewijze aanpak opgesteld om de veiligheid van regionale keringen te waarborgen (STOWA, 2008):

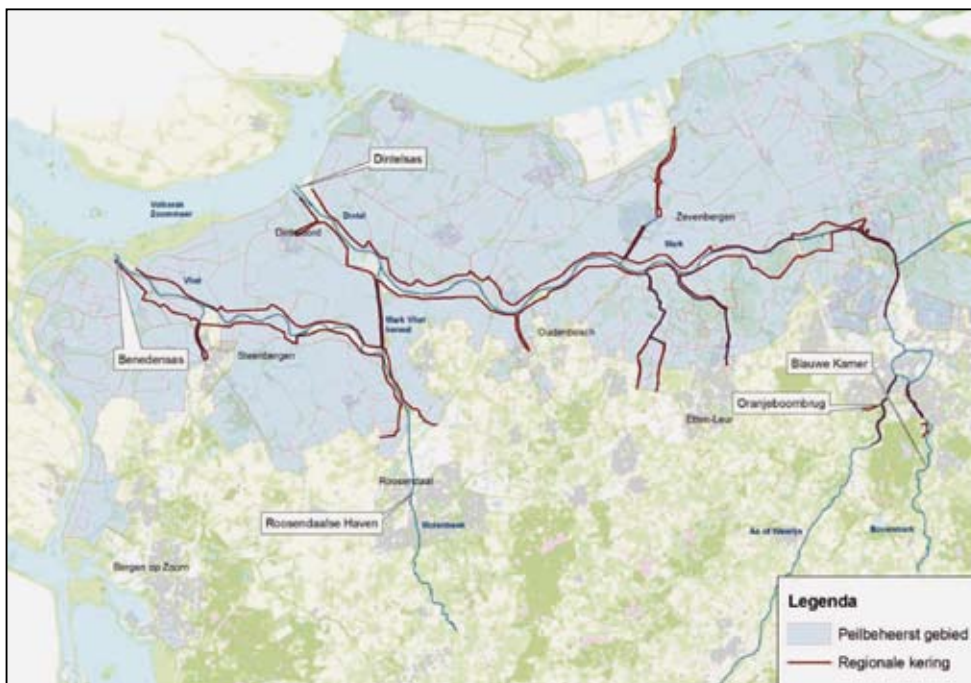
- *Stap 1.* Aanwijzing van de waterkeringen en vastleggen van het wenselijk veiligheidsniveau (norm);
- *Stap 2.* Toetsing van de veiligheid van de regionale kering aan de vastgestelde norm (o.a. bepaling toetspeilen);
- *Stap 3.* Eventueel verbeteren van de veiligheid, indien de regionale kering niet aan de norm voldoet.

De norm voor de regionale keringen is op basis van een risicobenadering (potentiële schade en slachtoffers) door Provinciale Staten vastgesteld op 1:100. De veiligheid van de regionale keringen wordt getoetst op basis van hydraulische randvoorwaarden. Deze zijn opgebouwd uit het toetspeil, de bijbehorende locatiespecifieke toeslag en golfinvloeden (zie afbeelding 2).

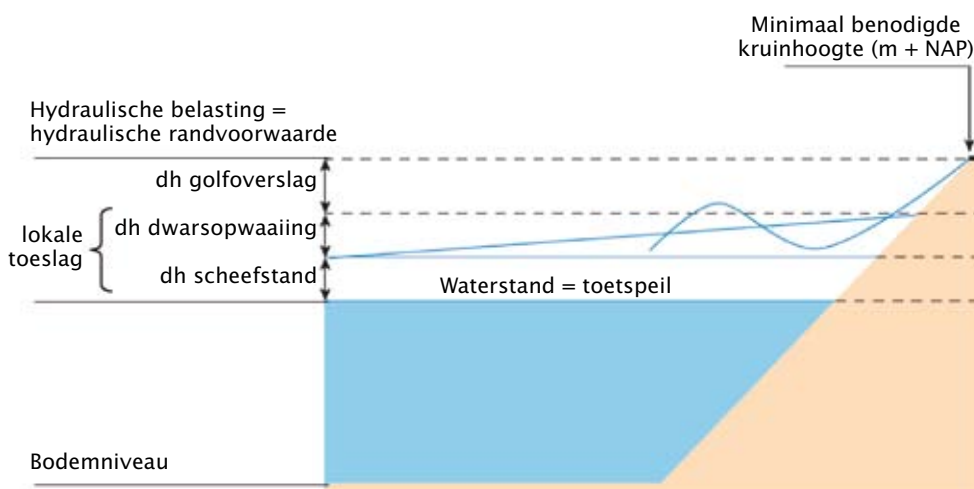
De toetspeilen van de Mark-Dintel-Vliet boezem zijn voornamelijk afhankelijk van de afvoer van vrij afstromende wateren (zoals de Bovenmark en Aa of Weerij), de capaciteit van poldergemalen in het peilbeheerst gebied en het benedenstroomse peil op het Volkerak-Zoommeer.

¹ **Klaas-Jan Douben**, waterschap Brabantse Delta, Bouvignelaan 5, 4836 AA Breda, tel.: 076-5641154, e-mail: k.douben@brabantsedelta.nl

² **Julian Maijers**, waterschap Brabantse Delta



Afbeelding 1: Mark-Dintel-Vliet boezem met regionale keringen.



Afbeelding 2: Schematisch dwarsprofiel regionale kering met toetspeil, lokale toeslagen en golfoverslag.

Momenteel zijn er (nog) geen landelijke leidraden en/of voorschriften beschikbaar voor de bepaling van toetspeilen voor regionale wateren (STOWA, 2007). Waterschap Brabantse Delta heeft in overleg met de provincie een methode ontwikkeld die op hoofdlijnen is gebaseerd op het doorrekenen van een langjarige neerslagreeks met een aanvullende extreme waarden analyse. Voorliggend artikel beschrijft de methode met bijbehorende gevoeligheids- en watersysteemanalyses.

Onderzoeksopzet en methode

De toetspeilen in de Mark-Dintel-Vliet boezem zijn afhankelijk van verschillende (dynamische) processen. Het tot hoogwater leidende neerslag-afvoer proces in het landelijke en bebouwde gebied wordt in belangrijke mate bepaald door enerzijds het grondgebruik, initiële grondwaterstanden en het operationele waterbeheer, en anderzijds door de duur, het patroon en volume van neerslaggebeurtenissen. De vorm van een hoogwatergolf heeft een locatiespecifiek karakter en bepaalt daarmee indirect de maatgevende afvoer en bijbehorende waterstand. De verandering van de golfvorm in benedenstroomse richting wordt in de Mark-Dintel-Vliet boezem voornamelijk bepaald door laterale toestroming (bijvoorbeeld gemalen), afvlakking (of demping) als gevolg van maaiveldinundaties in beekdalen, de inzet van berg-boezems en inundaties van boezemgebieden en het peil van het Volkerak-Zoommeer.

Bovenstaand beschreven processen zijn in werkelijkheid moeilijk te meten in het veld, laat staan nauwkeurig te modelleren. Vandaar dat de bepaling van toetspeilen in de Mark-Dintel-Vliet boezem niet op één enkele berekening is gebaseerd, maar dat aanvullende gevoeligheidsberekeningen en analyses van meetreeksen noodzakelijk zijn om de toetspeilen voldoende nauwkeurig te onderbouwen.

De toetspeilen zijn bepaald op basis van berekeningen met een gekalibreerd en geverifieerd (Bakker en Roelevink, 2009) eendimensionaal oppervlaktewatermodel (Sobek) en een daaropvolgende extreme waarden analyse. De modelberekeningen zijn uitgevoerd met 100-jarige daggemiddelde (deels geconstrueerde) neerslagreeksen van 7 KNMI stations in West-Brabant (Bergen op Zoom, Chaam, Ginneken, Klundert, Oudenbosch, Steenberg en Zundert). Modelresultaten zijn vergeleken met langjarige reeksen van gemeten afvoeren en waterstanden. Deze metingen zijn ook gebruikt voor hydrologische en statistische analyses die inzicht geven in het gedrag van het watersysteem bij hoge afvoeren.

De toetspeilen zijn niet gelijk gesteld aan de berekende T100 hoogwaterlijn die ten grondslag ligt aan de normering van de regionale keringen (stap 1). Deze T100 waterstanden zijn berekend met de stochasten methode (Roelevink e.a., 2009) en zijn voldoende nauwkeurig en robuust om normen op basis van een risicobenadering af te leiden. Toepassing van de stochasten methode kan voor de bepaling van locatiespecifieke toetspeilen echter tot een overschatting van waterstanden leiden doordat de kansverdeling van de stochastische variabelen en hun onderlinge relaties niet bekend zijn (Cockcroft, 2006 en Hoes, 2007).

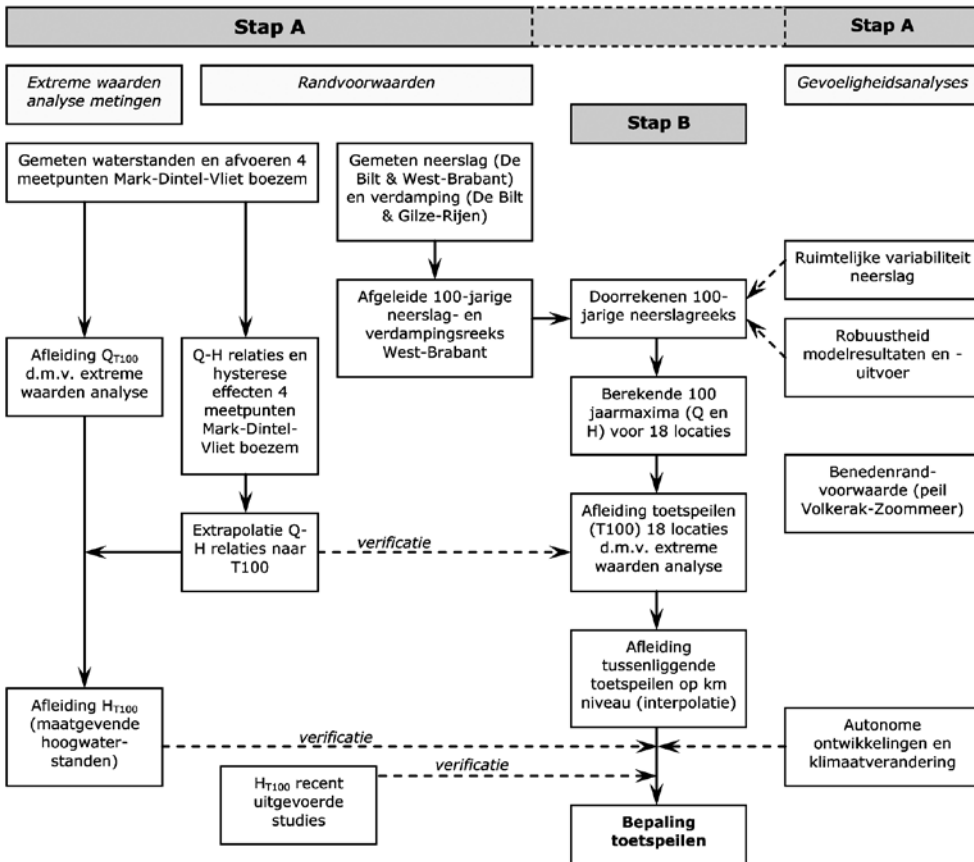
Methode bepaling toetspeilen

Voor de bepaling van de toetspeilen is een methode opgesteld waarin onderscheid wordt gemaakt tussen twee verschillende stappen (zie afbeelding 3):

- *Stap A* met activiteiten ter voorbereiding van modelberekeningen, het inzichtelijk maken van onzekerheden en de werking van het watersysteem. Van belang hierbij is met name de constructie van 100-jarige tijdreeksen voor neerslag en verdamping in West-Brabant, analyse naar het voorkomen van niet-stationaire hysteresis effecten,

extreme waarden analyses van gemeten afvoeren en het uitvoeren van gevoeligheidsberekningen.

- *Stap B* bestaat uit activiteiten voor de bepaling van de toetspeilen, zoals het doorrekenen van de 100-jarige neerslagreeks, extreme waarden analyses voor een aantal vooraf bepaalde locaties en interpolaties naar toetspeilen op kilometerniveau.



Afbeelding 3: Stroomschema methode bepaling toetspeilen.

Hysteresis effecten en Q-H relaties

Om het gedrag van het watersysteem te analyseren en modelresultaten te vergelijken met meetgegevens is het noodzakelijk om voor verschillende meetstations afvoerwaterstand (Q-H) relaties op te stellen. Bij hoogwatergolven kan echter hysteresis optreden, waardoor Q-H relaties worden ‘verstoord’.

Hysteresis manifesteert zich als een afwijkende relatie tussen de afvoer en waterstand tijdens de was en val van een hoogwatergolf. In de wassende fase treedt aan de voorzijde van de golf een groter waterspiegelverhang op, waardoor in deze fase bij een gelijke waterstand een hogere afvoer optreedt ten opzichte van de vallende fase. Afhankelijk van de steilheid van de hoogwatergolf kunnen afwijkingen optreden tot ca. 8% van de optredende afvoer (Boiten, 2008). Hysteresis effecten kunnen echter ook

optreden als gevolg van de werking (vorm) van een meetstuw, bijvoorbeeld wanneer de overstortende waterstraal de kruin van de stuw loslaat (WL, 1982).

Op basis van een analyse van gemeten waterstanden (kwartierdata) zijn bij de meetstations Blauwe Kamer (Bovenmark) en Oranjeboombrug (Aa of Weerij) significante hysteresis effecten waargenomen. De gemiddelde afwijkingen in piekwaterstanden en -afvoeren bedragen bij Oranjeboombrug respectievelijk ca. 0,25 m en ca. 7 m³/s voor 13 van de 16 beschouwde hoogwatergebeurtenissen, en bij Blauwe Kamer ca. 0,05 m en ca. 3,5 m³/s voor 5 van de 20 beschouwde hoogwatergebeurtenissen. Deze hoogwatergebeurtenissen hebben overigens allen een relatief lage herhalingstijd (T3-T10).

De Q-H relaties van de hoogwatergebeurtenissen in januari en december 2002 (Blauwe Kamer) en augustus 2002 (Oranjeboombrug), waarbij de optredende hysteresis effecten relatief gering zijn, zijn met een polynoom (R2 resp. 0,9998 en 0,9969) en machtfunctie (R2 resp. 0,9928 en 0,9786) geëxtrapoleerd naar een T100 situatie. Deze geëxtrapoleerde Q-H relaties zijn gebruikt bij de afleiding van T100 waterstanden op basis van een extreme waarden analyse van gemeten afvoeren en ter verificatie van toetspeilen.

Extreme waarden analyse gemeten afvoeren

T100 afvoeren kunnen gezien de beperkte duur van de beschikbare tijdreeksen (16-21 jaar) niet direct uit metingen worden afgeleid. Extreme waarden analyses van gemeten afvoeren bij Blauwe Kamer, Oranjeboombrug, Bovensas en Dintelsas zijn echter uitgevoerd om geschikte kansverdelingfuncties voor de bepaling van toetspeilen te selecteren en achteraf toetspeilen te verifiëren.

De analyses zijn met zowel de jaarmaxima als de Peak Over Threshold (POT) methode uitgevoerd. De reeksen voor de jaarmaxima bestaan uit onafhankelijke kwartiergegevens. Bij de POT-methode zijn reeksen samengesteld op basis van gemeten reeksen met (piek)afvoeren die boven een (iteratief bepaalde) drempelwaarde liggen. Er is hierbij een 'traject' gebruikt om de gevoeligheid voor de drempelwaarde te minimaliseren (Verkaik e.a., 2003 en Gross e.a., 1994), waardoor de kans op systematische fouten in de POT-analyse klein blijft (Neass en Clausen, 2000).

De samengestelde meetreeksen zijn met verschillende kansverdelingfuncties gefit om de T100 afvoer (T100) (indicatief) te schatten. De parameters van de kansverdelingen zijn geschat met behulp van het software programma EasyFit (MathWave Technologies), waarbij de eenvoudigst op te lossen schatter is gebruikt (Method of moments, Maximum likelihood estimates, Least square estimates of Method of L-moments). Bij de selectie van geschikte kansverdelingfuncties is het met name van belang dat het fysische proces (hoge afvoeren in de Mark-Dintel-Vliet boezem) zo goed mogelijk wordt benaderd (Chbab en van Noordwijk, 2002). Dit is echter niet eenvoudig en is tevens niet eenduidig beschreven in de literatuur. Er is in beginsel gebruik gemaakt van de volgende kansverdelingen (Chbab en van Noordwijk, 2002; USACE, 1993): Error, Exponentieel (2P), Gegeneraliseerde Pareto, Gegeneraliseerde Extreme Waarde (GEW, type 2 en 3 zonder opgelegde vormparameters), Gumbel (GEW type 1), Normaal, Rayleigh (2P) en Wakeby.

De uiteindelijk te fitten kansverdelingfuncties zijn geselecteerd op basis van:

- i. De 'goodness-of-fit' van de samengestelde meetreeks;
- ii. Visuele interpretatie van kans (probability) en kwantiel plots, waarin respectievelijk de empirische en theoretische kansverdelingen en kwantielen tegen elkaar zijn uitgezet; en
- iii. Visuele interpretatie van normaal-kwantiel-plots, waarin de standaard normale variatie van de theoretische kansverdeling is uitgezet tegen de afvoer.

Enkele resultaten van de extreme waarden analyses met samengestelde meetreeksen zijn in tabel 1 weergegeven. In deze tabel zijn ook reeds resultaten van de extreme waarde analyses van de 100-jarige modelberekening weergegeven. De Gumbel (EV1) en GEW (type 2) kansverdelingen resulteren in de beste fit, voor zowel de samengestelde meetreeksen als de reeks met 100 berekende jaarmaxima. De Gumbel (EV1) kansverdeling is overigens gelijk aan de GEW kansverdeling, eerstgenoemde heeft echter geen vormparameter (gelijk aan nul).

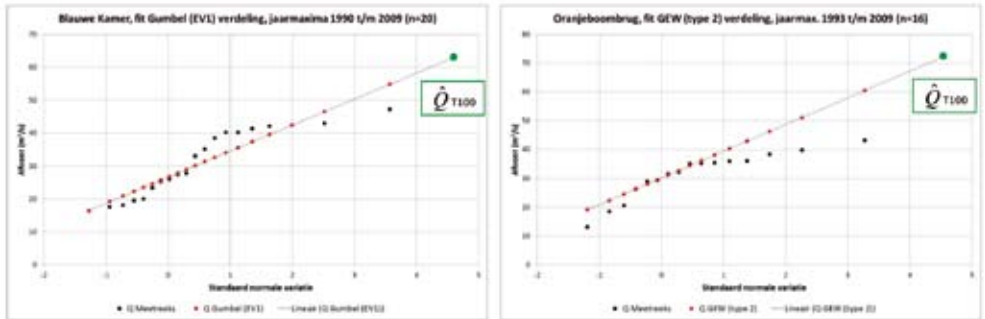
Meetstation	Samengestelde meetreeks, incl. 95% betrouwbaarheid (m³/s)					100-jarige berekening jaarmaxima (maatgevende \hat{Q}_{T100}) incl. 95% betrouwbaarheid (m³/s)	Kansverdeling
	Jaarmaxima		POT				
	T_{100}	n (-)	T_{100}	n (-)	drempel (m³/s)		
Blauwe Kamer (Bovenmark)	63 (41-85)	20	54 (43-65)	27	27,5	67 (58-76)	Gumbel (EV1)
Oranjeboombrug (Aa of Weerijs)	73 (48-98)	16	51 (43-58)	45	22,5	75 (65-86)	GEW (type 2)
Bovensas (Vliet)	23 (15-30)	21	18 (16-20)	57	10,5	20 (18-23)	Gumbel (EV1)
Dintelsas (Dintel)	214 (152-276)	21	189 (159-218)	31	105	179 (157-201)	Gumbel (EV1)

Tabel 1: Resultaten extreme waarden analyse samengestelde meetreeksen en 100-jarige berekeningen.

De geschatte momentane T_{100} afvoer (t_{T100}) op basis van de samengestelde meetreeks met jaarmaxima komt, met uitzondering van Dintelsas, redelijk goed overeen met de maatgevende \hat{Q}_{T100} op basis van de 100-jarige modelberekening. De POT-methode geeft een betere schatting voor Dintelsas, maar lijkt de \hat{Q}_{T100} over het algemeen enigszins te onderschatten.

De T_{100} heeft betrekking op de momentane piekafvoer met een tijdstap van een kwartier. Gezien het beperkte aantal waarnemingen (n) in de meetreeks is slechts één maatgevende periode beschouwd (1990 t/m 2009), waardoor geen conclusies kunnen worden getrokken ten aanzien van de golfvorm (volume en duur).

In afbeelding 4 zijn de normaal-kwantiel plots van de gemeten jaarmaxima van Blauwe Kamer (Gumbel EV1) en Oranjeboombrug (GEW type 2) weergegeven. Hieruit kan worden afgeleid dat de geëxtrapoleerde T_{100} op deze meetstations naar alle waarschijnlijkheid tot een overschatting van de maatgevende \hat{Q}_{T100} leidt.



Afbeelding 4: Normaal-kwantiel plots gemeten jaarmaxima Blauwe Kamer en Oranjeboombrug.

Neerslag data en constructie van 100-jarige tijdreeksen

De berekeningen voor de toetspeilen zijn uitgevoerd met 100-jarige daggemiddelde neerslagreeksen. In Nederland is alleen voor De Bilt een 100-jarige meetreeks beschikbaar, de oudste reeks in West-Brabant dateert van begin jaren 50. De modelinvoer is daardoor deels afgeleid van meetstation De Bilt.

Op basis van Buijsland e.a. (2009) is in beginsel aangenomen dat de tijdreeksen van De Bilt bruikbaar zijn voor langjarige berekeningen in West-Brabant. Deze vooronderstelling is nader geanalyseerd met behulp van dubbele sommatiekrommen over de periode 1953 t/m 2008, waarmee de relatieve consistentie en homogeniteit van data kan worden getoetst. De correlatie-, determinatie- en richtingscoëfficiënten van de dubbele sommatiekrommen zijn voor de relaties tussen meetstation De Bilt en 7 West-Brabantse KNMI stations berekend. Zowel de verklaarde variantie (determinatie) als de correlatie naderen 1 en bevestigen het regimegemiddelde van 1 zoals in Buijsland e.a. (2009) is afgeleid. De richtingscoëfficiënten zijn als correctiefactoren gebruikt om neerslagreeksen voor de 7 West-Brabantse KNMI stations te construeren over de periode 1906 t/m 1952 ($P_{\text{West-Brabant}^{(*)}} = r.c. * P_{\text{De Bilt}}$). De 100-jarige tijdreeksen bestaan de eerste 45 jaar uit geconstrueerde data, en de laatste 55 jaar uit gemeten neerslag.

Constructie van 100-jarige referentieverdamping reeks Gilze-Rijen

Het oppervlaktewatermodel Sobek gebruikt bij de berekening van het neerslag-afvoer proces de referentieverdamping als invoerparameter. De langste reeks voor de etmaalgemiddelde referentieverdamping (ET_{ref}) in Nederland bedraagt ca. 50 jaar (De Bilt). Voor de verdamping in het beheergebied van waterschap Brabantse Delta wordt overwegend gebruik gemaakt van KNMI station Gilze-Rijen, waar de referentieverdamping sinds 3 april 1987 wordt bepaald. Hierdoor is het noodzakelijk om een groot deel van de 100-jarige tijdreeks te construeren.

De constructie van deze tijdreeks komt overeen met de wijze waarop de 100-jarige neerslagreeksen zijn geconstrueerd. De etmaalgemiddelde ET_{ref} reeks van De Bilt is voor de periode voorafgaand aan 1 juli 1957 eveneens geconstrueerd met behulp van de Makkink formule (Schuurmans en Droogers, 2009) op basis van de maandgemiddelde globale straling en daggemiddelde temperatuur. De etmaalgemiddelde ET_{ref} over de periode 1958 t/m 2008 is ter verificatie nagerekend. De lineaire correlatie tussen de

KNMI reeks en de verificatie reeks bedraagt 0,9997 met een gemiddeld kwadratisch verschil van 0,0008 mm/etmaal. Daarnaast is de spreiding van de maandgemiddelde ET_{ref} tijdens de winterperiode, waarin zich de meeste hoogwatersituaties voordoen, klein. De periode tot 1987 is voor de 100-jarige etmaalgemiddelde ET_{ref} reeks van Gilze-Rijen geconstrueerd op basis van de richtingscoëfficiënt, afgeleid van een dubbele sommatiekromme met de cumulatieve ET_{ref} van De Bilt en Gilze-Rijen over de periode 1987 t/m 2008. De 100-jarige reeks van Gilze-Rijen bestaat uiteindelijk uit: (i) geconstrueerde data op basis van geconstrueerde data De Bilt (1-1-1909 t/m 30-6-1957), (ii) geconstrueerd data op basis van data KNMI De Bilt (30-6-1957 t/m 2-4-1987) en (iii) data KNMI Gilze-Rijen (3-4-1987 t/m 31-12-2008).

Gevoeligheidsberekeningen

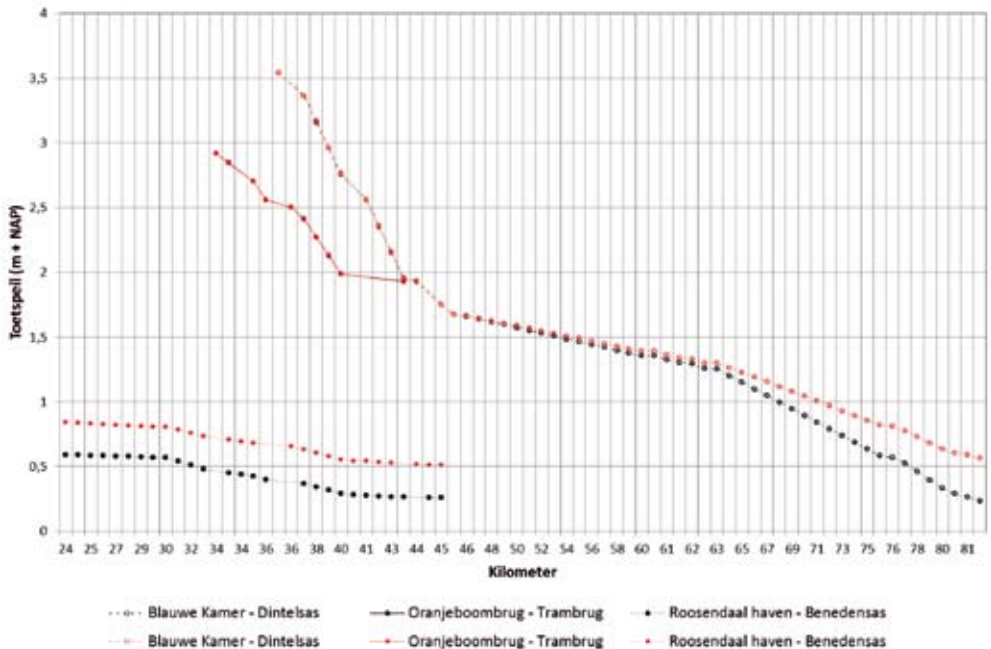
De gevoeligheid van het modelresultaat voor de ruimtelijke variabiliteit van de neerslag is geanalyseerd door een 10-jarige dagreeks (1998 t/m 2008) met drie verschillende neerslagstations door te rekenen: (i) De Bilt, (ii) het gemiddelde van 7 West-Brabantse KNMI stations en (iii) de 7 afzonderlijke KNMI stations in West-Brabant. De berekeningsresultaten zijn door middel van afvoer-duurlijnen vergeleken met gemeten afvoeren van verschillende meetstations. De berekening met neerslagreeksen van de 7 afzonderlijke West-Brabantse KNMI stations geeft verreweg het beste resultaat. Er is over het algemeen echter sprake van een lichte overschatting van afvoeren en waterstanden.

De gevoeligheid van het modelresultaat voor de benedenrandvoorwaarde (peil op het Volkerak-Zoommeer) is relatief groot vanwege het geringe waterstandverhang op het benedenstroomse deel van de Mark-Dintel-Vliet boezem. Naast modelberekeningen zijn tevens indicatieve analytische stuwkromme berekeningen uitgevoerd. De halveringslengte (Jansen, 1979) is een maat voor de afstand waarover de stuwkromme is uitgewerkt, en geeft een indicatie op welk punt de invloed van het Volkerak-Zoommeer is uitgewerkt. Uit zowel de stuwkromme- als modelberekeningen blijkt dat de invloed van het peil op het Volkerak-Zoommeer onder maatgevende omstandigheden tot in de haven van Roosendaal (Vliet) en tot aan de Roode Vaart zuid (Mark) reikt (zie afbeelding 5). De toetspeilen in Breda zijn hierdoor geheel afvoergedomineerd, en in het benedenstroomse deel van de Mark-Dintel-Vliet boezem peilgedomineerd.

De (lokale) effecten van autonome ontwikkelingen (o.a. waterberging) en klimaatverandering op de T100 waterstanden zijn relatief gering (ordegrootte 1-10 cm). De effecten van klimaatverandering dempen in benedenstroomse richting volledig uit als gevolg van de invloed van het Volkerak-Zoommeer.

De robuustheid (consistentie en plausibiliteit) van de modelresultaten is nader geanalyseerd door berekende piekwaterstanden op dagbasis te vergelijken met waargenomen waterstanden in de Mark-Dintel-Vliet boezem. Deze vergelijking is alleen voor de laatste 20 jaar uitgevoerd vanwege de beschikbaarheid van meetgegevens. De modelrobuustheid is in de trajecten die relatief ver van de boven- en benedenstroomse modelranden zijn verwijderd hoog tot zeer hoog (absolute verschillen $\leq 0,1$ m). De absolute verschillen tussen gemeten en berekende piekwaterstanden liggen voor alle meetstations ruim binnen de 95% betrouwbaarheidsmarge van de berekende toetspeilen.

Om de robuustheid van de modeluitvoer te toetsen zijn berekeningsresultaten (reken-tijdstap van 15 minuten) met een 10-jarige neerslagreeks op basis van daggemiddelde en dag maxima onderling vergeleken.



Afbeelding 5: Toetspeilen en verhanglijnen Mark-Dintel-Vliet boezem

(rood: peil Volkerak-Zoommeer = 0,5 m + NAP, zwart: peil Volkerak-Zoommeer = NAP).

De gemiddelde waterstandverschillen zijn in de hele Mark-Dintel-Vliet boezem gelijk en bedragen ca. 5 cm. De maximaal berekende verschillen in waterstand variëren over het algemeen tussen ca. 0,4 en 0,6 m. Voor de afvoeren geldt een duidelijke toename van het gemiddelde verschil, naarmate het meetstation meer benedenstrooms is gelegen, variërend van 0 tot 25 m³/s. De maximaal berekende verschillen variëren lokaal echter sterk, tussen ca. 20 en 70 m³/s. Deze verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door het effect van variërende uitslagdebieten van poldergemalen op de gemeten en berekende afvoer. Het samenvallen van het (maximale) uitslagdebiet van een gemaal met de passerende hoogwatergolf is sterk afhankelijk van het ruimtelijk neerslagpatroon. Een extreme waarden analyse op basis van berekende daggemiddelde afvoeren resulteert in een significante onderschatting van maatgevende situaties. De modeluitvoer van de 100-jarige berekening voor de bepaling van de toetspeilen bestaat daarom uit maximale afvoeren op dagbasis.

Berekening toetspeilen

De modelberekening voor de bepaling van de toetspeilen is uitgevoerd met de 100-jarige (geconstrueerde) neerslagreeksen van 7 West-Brabantse KNMI stations, zonder inzet van de vierde bergboezem en met een vaste benedenrand (0,5 m + NAP) op het Volkerak-Zoommeer (conform het vigerend waterakkoord met Rijkswaterstaat Zeeland).

De modelresultaten zijn voor 18 locaties weggeschreven als maximale afvoeren en waterstanden op dagbasis. Voor deze locaties zijn tijdreeksen met jaarmaxima samengesteld (100 afvoeren en waterstanden), die zijn gebruikt voor extreme waarden analyses met Gumbel (EV1) en GEW (type 2) kansverdelingfuncties. T100 afvoeren en waterstanden zijn afgeleid en het verhang (H/km) tussen de verschillende locaties is bepaald. De toetspeilen zijn per kilometer berekend (interpolaties) met behulp van het verhang over de verschillende trajecten.

De toetspeilen zijn ter verificatie vergeleken met T100 waterstanden, die met de geëxtrapoleerde Q-H relaties (zoals samengesteld op basis van hoogwatergebeurtenissen in 2002) en de berekende maatgevende afvoer zijn afgeleid.

De toetspeilen en verhanglijnen op de Mark-Dintel-Vliet boezem zijn in afbeelding 5 weergegeven. Hierin is tevens de invloed van het benedenstroomse peil op het Volkerak-Zoommeer (0,5 m + NAP en NAP) zichtbaar. De Vliet wordt als gevolg van het hogere peil op het Volkerak-Zoommeer met ca. 25-30 cm opgestuwd. Het hogere peil op het Volkerak-Zoommeer heeft ook invloed op de debietverdeling over de Dintel en de Vliet. De bovenstroomse afvoerdominantie van de Mark neemt af bij een hoger peil op het Volkerak-Zoommeer en het verhang op de Dintel en het benedenstroomse traject van de Mark neemt af.

Doordat de afvoercapaciteit van de Dintel onder maatgevende omstandigheden een factor 8-9 groter is dan de Vliet, heeft het peil van het Volkerak-Zoommeer verhoudingsgewijs een grotere invloed op de afvoer van de Vliet. Dit resulteert op de Dintel in een toenemende maatgevende (T100) afvoer van ca. 3%, en op de Vliet in een dito afname.

Discussie

De toetspeilen zijn vergeleken met resultaten van eerder uitgevoerde studies en de extreme waarde analyses met samengestelde meetreeksen (zie tabel 1).

De toetspeilen komen in Breda goed overeen met de resultaten van de stochastische berekeningen voor de normering en globale toetsing van de regionale keringen (Roelevink e.a., 2009). Toenemende verschillen in benedenstroomse richting ontstaan met name door de relatief geringe invloed van bergboezems ter hoogte van Nieuwveer (kruising A16) en de relatief grote invloed van initiële condities (haven Roosendaal en Vliet) bij de stochastische berekeningen. De verschillen tussen de toetspeilen en stochastische berekeningen bedragen maximaal ca. 0,15 m.

De in 1996 berekende hoogwaterlijnen voor de Mark en Vliet (Anonymus, 1996) geven geen uitsluitsel over T100 waterstanden. Vergelijking van de toetspeilen met de destijds doorgerekende T50 en T250 scenario's resulteert in logische overeenkomsten, met geringe afwijkingen nabij Bovensas en Dintelsas als gevolg van de gehanteerde benedenrandvoorwaarden.

De afgeleide T100 waterstanden op basis van de geëxtrapoleerde Q-H relaties resulteren in een onderschatting van de toetspeilen ter hoogte van Oranjeboombrug, Blauwe Kamer, Bovensas en Dintelsas. Benedenstrooms (Dintel- en Bovensas) geldt wederom de invloed van de benedenrandvoorwaarde, bovenstrooms (Blauwe Kamer en Oranjeboombrug) vindt onderschatting plaats doordat de gemeten afvoeren niet

de totale afvoer weerspiegelen als gevolg van o.a. verdrongen stuwen, achterloopsheid en optredende hysterese effecten.

In de afgelopen eeuw hebben zich aanzienlijke veranderingen in de gemiddelde neerslag voorgedaan (Buishand e.a., 2009). De jaargemiddelde neerslag nam in De Bilt met ca. 20% toe. Bij de dagwaarden die gemiddeld 5 tot 20 keer per jaar worden overschreden is sprake van een toename van ongeveer 10% in de tweede helft van de 20e eeuw. Voor extremere neerslaggebeurtenissen zijn de veranderingen echter marginaal. Het zijn juist deze extremen die in de Mark-Dintel-Vliet boezem tot maatgevende afvoeren leiden.

De relatief geringe veranderingen van het (extreme) neerslagklimaat in Nederland hebben naar verwachting een verwaarloosbare invloed op de berekende toetspeilen. Het langjarige karakter van de berekeningen, alsmede de toepassing van extreme waarden analyses, zorgen voor een middeling van eventuele veranderingen en nivellering van eventuele uitschieters. Daarnaast komt ca. 50% van de 10 hoogst berekende piekafvoeren, die in de extreme waarde analyse sterk van invloed zijn op de bepaling van de maatgevende T100 afvoer, in de laatste 15 jaar voor.

De 100-jarige berekeningen voor de bepaling van de toetspeilen zijn uitgevoerd met een modelschematisatie van de huidige situatie. De 100-jarige neerslagreeks komt dus niet geheel overeen met het bijbehorende landgebruik en watersysteem. Het landgebruik en watersysteem zijn door de jaren heen als gevolg van ruilverkavelingen, reconstructies, normalisaties en bebouwing (lokaal sterk) gewijzigd. In DHV (1965) is voor het 'bovengebied bij Breda' (Bovenmark en Aa of Weerij's) voorafgaand aan de normalisaties een T3.000 afvoer van 122 m³/s afgeleid. Op basis van de Gumbel (EV1) en GEW (type 2) kansverdelingfuncties wordt in de huidige situatie bij een overeenkomstige herhalingstijd een afvoer van ca. 200 m³/s berekend. De huidige gesommeerde T100 afvoer van de Bovenmark en Aa of Weerij's komt overeen met ca. 140 m³/s en is dus beduidend hoger dan de afvoer in 1965. Dit is mede het gevolg van de destijds optredende maaiveldinundaties en de nog niet doorgevoerde normalisatiewerken. In Grontmij en Nederlandsche Heidemaatschappij (1962) is het verwachte effect van normalisatiewerken afgeleid, waarbij de T100 afvoer met ca. 15% toeneemt. Als dit effect wordt verrekend met de huidige T100 afvoer, neemt deze af van ca. 140 naar 119 m³/s.

De discrepantie tussen het gebruik van de 100-jarige neerslagreeks en het verwaarlozen van veranderd landgebruik en aanpassingen in het watersysteem leiden hoogstwaarschijnlijk tot een geringe overschatting van de maatgevende afvoer, ondanks dat 50% van de 10 hoogst berekende piekafvoeren in de laatste 15 jaar voorkomt.

De maatgevende \hat{Q}_{T100} bij Blauwe Kamer en Oranjeboombrug (resp. 67 en 75 m³/s) bedraagt gesommeerd en omgerekend naar landbouwkundige afvoer ca. 2,31 l/s/ha (20 mm/d). Deze (neerslag)hoeveelheid wordt in de gebruikte 100-jarige neerslagreeks ca. 275 maal overschreden.

Waterschap Brabantse Delta hanteert voor een T100 situatie in het zandgebied een landbouwkundige afvoernorm van $2 * 0,67$ l/s/ha (11,6 mm/d). De gesommeerde landbouwkundige afvoer van de Bovenmark en Aa of Weerij's ligt hiermee hoger dan de norm die voor het zandgebied wordt gehanteerd. De landbouwkundige afvoer op basis van deze norm (1,34 l/s/ha) bedraagt bij Blauwe Kamer en Oranjeboombrug resp.

44 en 39 m³/s. Deze afvoerniveaus zijn echter in het verleden reeds bij meer frequente gebeurtenissen (ca. T10) gemeten, waardoor de invloed van niet-stationaire processen (o.a. maaiveldinundaties) op de maatgevende QT100 relatief groot is.

Het effect van hysteresis processen op de Q-H relatie is met name bij Oranjeboombrug relatief groot. Deze processen zijn bij Blauwe Kamer sinds het hoogwater van maart 1999 niet meer waargenomen, mede als gevolg van toegenomen berging in het beekdal en in het stroomgebied.

Het is aannemelijk dat de hysteresis effecten onder maatgevende omstandigheden groter zullen zijn dan waargenomen in de meetreeks 1993 t/m 2009. De optredende waterstanden en afvoeren kunnen bij een T100 gebeurtenis met name bij Oranjeboombrug (substantieel) afwijken van de berekende toetspeilen. De relatieve afwijkingen in de afvoer zullen verhoudingsgewijs groter zijn dan de afwijkingen in de waterstanden, gezien het karakter van de hysteresiselussen.

De toetspeilen zijn op basis van lineaire interpolatie tussen 18 verschillende locaties per kilometer afgeleid. Het verhang op de Mark-Dintel-Vliet boezem is in werkelijkheid echter niet geheel lineair, lokaal kunnen afwijkingen voorkomen als gevolg van obstructies, zoals bijvoorbeeld bruggen of vernauwingen. Het effect van deze lokale afwijkingen is in de benedenstroomse trajecten relatief groot, omdat het verhang hier gering is.

Het verloop van de toetspeilen is vergeleken met diverse verhanglijnen van individuele hoogwatergebeurtenissen uit de 100-jarige berekening. De lokale afwijkingen op bovengenoemde trajecten vallen ruim binnen de 95% betrouwbaarheidsmarges, waarmee de methode van lineaire interpolatie is gerechtvaardigd.

Conclusies en aanbevelingen

De toetspeilen in de Mark-Dintel-Vliet boezem zijn bepaald op basis van modelberekeningen met (deels synthetische) 100-jarige neerslagreeksen van 7 West-Brabantse KNMI stations en een daaropvolgende extreme waarden analyse van berekende jaarmaxima. Deze methode is in binnen- en buitenland reeds veelvuldig toegepast en resulteert in betrouwbare maatgevende afvoeren en waterstanden.

De berekende toetspeilen zijn nader onderbouwd en geverifieerd met verschillende gevoeligheidsanalyses. De toetspeilen komen goed overeen met resultaten van recent uitgevoerde studies, en liggen in lijn met berekeningen en analyses uit het verleden en met geanalyseerde meetreeksen.

De nauwkeurigheid van het regionale oppervlaktewatermodel is, met uitzondering van de bovenranden bij Blauwe Kamer en Oranjeboombrug, hoog. De absolute verschillen tussen berekende en gemeten (momentane) piekwaterstanden zijn kleiner dan 0,1 m. Verder reikt de invloed van het peil op het Volkerak-Zoommeer tot in de haven van Roosendaal (Vliet) en tot aan de Roode Vaart zuid (Mark).

De belangrijkste onzekerheden ten aanzien van de berekende toetspeilen hebben betrekking op hysteresis effecten bij Oranjeboombrug (Aa of Weerijds) en in mindere mate bij Blauwe Kamer (Bovenmark). De Q-H relatie heeft op deze locaties een sterk dynamisch karakter, waardoor grote verschillen kunnen optreden tijdens de was en val van de hoogwatergolf.

Momenteel zijn er geen landelijke leidraden en/of voorschriften beschikbaar voor de bepaling van toetspeilen voor regionale wateren. Het verdient aanbeveling om bijvoorbeeld via het Interprovinciaal Overleg (IPO) en/of de Unie van Waterschappen aan te dringen op de ontwikkeling en vaststelling van een landelijk consistente methode voor de bepaling van toetspeilen voor regionale wateren, waarbij tevens aandacht wordt besteed aan de (niet-stationaire) maatgevende golfvorm.

Literatuur

- Anonymus (1996)** Hoogwaterlijnen Mark en Vliet; Hoogheemraadschap van West-Brabant, Breda
- Bakker, M. en A. Roelevink (2009)** Aanpassing, kalibratie en validatie Sobek RR/CF model Mark-Vliet, bepaling waterstandstatistiek normering regionale keringen Brabantse Delta; HKV Lijn in water, Rapport PR1589.10, Lelystad
- Boiten, W. (2002)** Inlaatduiker Oosterhout: Herijking van de afvoerrelatie; Wageningen Universiteit, Departement Omgevingswetenschappen, Sectie Waterhuishouding, Rapport no. 108
- Buishand, T.A., R. Jilderda en J.B. Wijngaard (2009)** Regionale verschillen in extreme neerslag; KNMI Scientific report, WR 2009-01, De Bilt
- Chbab, E.H. en J.M. van Noortwijk (2002)** Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden; RIZA/HKV Lijn in Water, RIZA rapport 2002.006, Lelystad
- Cockcroft, J. (2006)** Using TERSim in Flooding Solution Development; WaPUG Meeting November 2006. <http://www.ciwem.org>
- DHV (1965)** Rapport waterbezwaar 1965; Amersfoort
- Grontmij en Nederlandsche Heidemaatschappij (1962)** Het afvoerpatroon van Boven Mark en Aa of Weerij, thans en na de toekomstige sanering
- Gross, J.L., N.A. Heckert, J. Lechner en E. Simiu (1994)** Novel extreme value estimation procedures: Application to extreme wind data; In: J. Galambos e.a. (eds) Proceedings International Conference on Extreme Value Theory and its Applications; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pag 139-158
- Hoes, O.A.C. (2007)** Aanpak wateroverlast in polders op basis van risicobeheer; Proefschrift Technische Universiteit Delft, Delft
- Jansen, P.Ph. (eds.) (1979)** Principles of river engineering: The non-tidal alluvial river; Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft
- Neass, A. en P.H. Clausen (2000)** The Peaks Over Threshold method and bootstrapping for estimating long return period design values; Proceedings 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, paper PMC2000-151, Notre Dame University, South Bend, Indiana, USA
- Roelevink, A., D. van Haaren en A. Nedderpel (2009)** Normering en globale toetsing regionale keringen Brabantse Delta, achtergrondrapport; HKV Lijn in water, Rapport PR1589.10, Lelystad

Schuurmans, J.M. en P. Droogers (2009) Penman-Monteith referentieverdamping: Inventarisatie beschikbaarheid en mogelijkheden tot regionalisatie; FutureWater, Report FutureWater: 86, Wageningen

STOWA (2007) Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen; STOWA-rapport ORK 2007-02, ISBN 978.90.5773.382.6, Utrecht

STOWA (2008) Richtlijn normering keringen langs regionale rivieren; Rapportnummer ORK 2008-04, ISBN 978.90.5773.401.4, Utrecht

TAW (1989) Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken deel 2 - benedenrivieren-gebied; Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), Uitgeverij Waltman - Delft, 's-Gravenhage

USACE (1993) Hydrologic Frequency Analysis; U.S. Army Corps of Engineers, Engineer manual 1110-2-1415, Washington DC, USA

Verkaik, J.W., A. Smits en J. Ettema (2003) Naar een nieuwe extreme waarden statistiek van de wind in Nederland; KNMI-Hydra project, Faserapport 16, KNMI, De Bilt

WL (1982) Meetstuwen West-Brabant, vaststelling van de afvoerbetrekkingen voor een elftal stuwen in het grensgebied van Nederland en België bij Breda, verslag onderzoek; Waterloopkundig Laboratorium, Rapport M1731, Delft