

Probabilistisch model voor het bepalen van meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer

CHRIS GEERSE, BASTIAAN KUIJPER, DIRK VAN HAAREN, HERBERT BERGER,
ARTHUR KORS & HANS VAN TWUIVER

Artikel

Rijkswaterstaat heeft door middel van peilbesluiten en waterakkoorden afspraken gemaakt met andere partijen over peilhandhaving, hoogwaterafvoer, wateraanvoer en verziltingsbestrijding. De beschikbaarheid van kunstwerken als stuwen, spuisluizen en gemalen is belangrijk om deze afspraken na te komen. Echter, in de praktijk is 100% beschikbaarheid onmogelijk, storingen kunnen zich altijd voordoen. Deze storingen beïnvloeden weer de mate waarin gemaakte afspraken kunnen worden nagekomen. Er is dus een relatie tussen de intensiteit van beheer en onderhoud (en de bijbehorende kosten) en de mate van nakomen van de gemaakte afspraken. Rijkswaterstaat wil deze relatie transparant maken, om zo de kosten van het beheer en onderhoud af te stemmen op de gemaakte afspraken (prestatie management). Om dit mogelijk te maken heeft Rijkswaterstaat aan HKV Lijn in Water gevraagd een model (proof-of-concept) te ontwikkelen voor het Volkerak-Zoommeer. Tijdens hoge aanvoeren op dit meer kan overtollig water worden gespuid via de Bathse spuisluis. Het model berekent de invloed van storingen van de spuisluis op de meerpeilstatistiek, waarbij het meerpeil in dit geval de ruimtelijk gemiddelde waterstand van het meer betreft: een maat voor de 'vulling van de bak'. Dit model, DEVO genaamd, wordt in dit artikel gepresenteerd. Omdat een aanpak via het gepresenteerde modelconcept veelbelovend blijkt, zullen we in de komende jaren ook voor de andere functies en watersystemen soortgelijke modellen ontwikkelen.

Inleiding

Het Volkerak-Zoommeer (VZM) ligt in Zuidwest Nederland. Het is ontstaan na aanleg van diverse dammen in het kader van de Deltawerken. Het VZM ontvangt water vanuit de Brabantse boezem via de Dintel en de Steenbergse Vliet. Ook wateren gemalen af op het meer en kan de directe neerslag die op het meer valt het meerpeil doen stijgen. Bij de Bathse spuisluis wordt onder vrij verval gespuid op de Westerschelde, waarbij gestreefd wordt het meerpeil tussen NAP -0,10 m en NAP +0,15 m te houden. Bij meerpeilen hoger dan NAP +0,50 m kan ook via de Krammersluizen worden gespuid richting de Oosterschelde. Sinds kort is de Ruimte voor de Rivier maatregel 'waterberging VZM' operationeel. Deze maatregel houdt in dat, bij een gesloten Maeslantkering, via de Volkeraksluizen water van het Hollandsch Diep naar het VZM wordt gevoerd. De maatregel wordt ingezet wanneer de voorspelde waterstand bij Rak Noord op het Hollandsch Diep NAP +2,60 m of hoger wordt. De spuisluis bij Bath is het belangrijkste spuimiddel om het peil op het VZM te beheersen. Deze spuisluis bestaat uit 6 kokers die afzonderlijk ingezet kunnen worden. Circa 85% van de tijd volstaat inzet van maximaal 2 spuikokers. In slechts 2% van de tijd zijn alle kokers nodig.



Afbeelding 1 Weergave van het VZM en de spuisluis nabij Bath (oranje cirkel + inzet)

Globale beschrijving van het ontwikkelde modelconcept

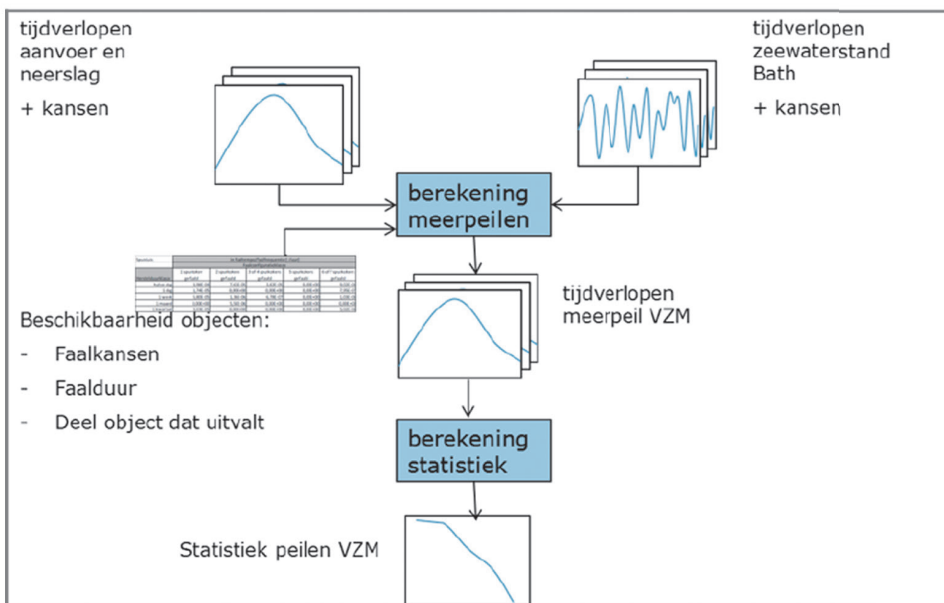
Teneinde te kunnen bepalen welke invloed het falen van de spuisluis Bath heeft op de meerpeilstatistiek van VZM is een waterbalansmodel ontwikkeld, DEVO genaamd (Geerse e.a., 2017). Dit model rekent hoogwatergebeurtenissen door volgens de zogenaamde stochastenmethode.

Om meerpeilstatistiek te bepalen moet in het model een tijdsperiode worden gehanteerd die overeenstemt met de duur van afvoer- en meerpeilgolven. Daartoe is in DEVO gekozen voor een zogenaamde basisduur van 20 dagen. In het model zijn, gerelateerd aan deze basisduur, de volgende stochasten opgenomen:

- De Brabantse rivierafvoer, die gelijk is aan de som van de Dintel en de Steenbergse Vliet.

- De neerslag die direct op het VZM valt of indirect daarop afwatert via sluisjes, gemalen en andere (kleine) waterlopen, voor zover niet inbegrepen in de genoemde Brabantse rivierafvoer.
- Gemeten buitenwaterstanden Westerschelde bij de Bathse spuisluis en Oosterschelde bij de Krammersluizen, met bijbehorende gemeten windsnelheden/-richtingen.
- De toevoer via de Volkeraksluizen wanneer de Ruimte voor de Rivier-maatregel 'waterberging VZM' operationeel wordt.
- Falen Bathse spuisluis. Hierbij worden meerdere manieren van falen (faalmodi genoemd) beschouwd en meerdere tijdstippen waarop deze kunnen starten.

De bijdrage van het zomerhalfjaar (april t/m september) wordt in het model verwaarloosd aangezien hoge afvoeren en zeewaterstanden in de zomermaanden aanzienlijk minder vaak voorkomen dan in het winterhalfjaar. Onderstaande afbeelding verduidelijkt de rekenwijze.



Afbeelding 2 Globaal overzicht rekenwijze DEVO

Gedetailleerde beschrijving van het modelconcept

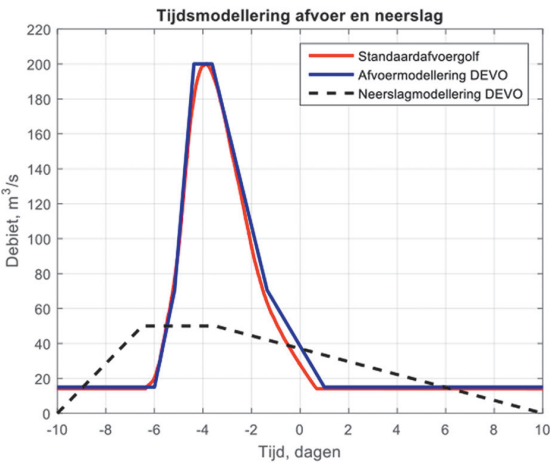
Statistiek en tijdsverloop neerslag en afvoer

In DEVO wordt statistiek gebruikt voor de Brabantse afvoer uit een probabilistisch model beschreven in Kuijper e.a. (2014). De statistiek betreft de *piek*afvoer van afvoergolven, en is afgeleid op basis van *gesimuleerde* afvoeren uit een neerslag-afvoermiddel, voor de periode 1902-2003. Voor de neerslag (20-daagse neerslagsom) wordt statistiek gebruikt die apart voor DEVO is afgeleid in Geerse e.a. (2017), op basis van de periode oktober 1976 t/m mei 2015 voor station Gilze-Rijen; daarbij is ook een trendcorrectie uitgevoerd. Tabel 1 geeft de bijbehorende stochastwaarden voor een aantal terugkeertijden. Ook het gemiddelde van de dagafvoer uit Brabant is weergegeven en het gemiddelde van de 20-daagse neerslagsom.

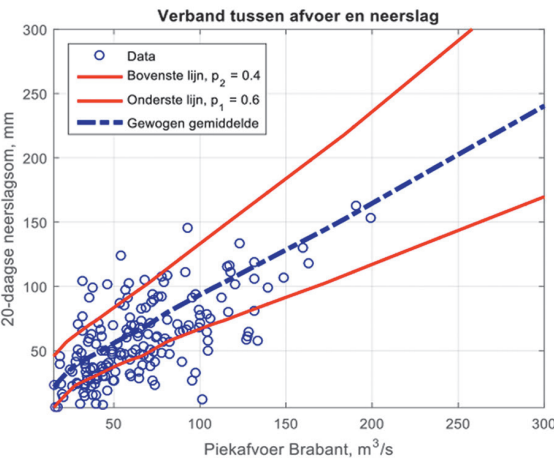
Tabel 1 Standaard in DEVO gebruikte statistiek voor afvoer en de neerslag.

Terugkeertijd [jaar]	Afvoer Brabant [m ³ /s]	20-daagse neerslagsom [mm]
1	82	91
10	142	152
100	200	212
1.000	255	272
10.000	309	332
Gemiddeld	20	52

In DEVO wordt in de basisduur een geschematiseerde afvoergolf gebruikt als tijdsmodellering (afbeelding 3). Als voorbeeld wordt een standaardafvoergolf getoond (rode lijn), met piekwaarde 200 m³/s (Kuijper e.a., 2014). De blauwe lijn geeft de modellering uit DEVO, door middel van een 'geknikt' trapezium.



Afbeelding 3 Standaard gebruikte tijdsmodellering voor de afvoer en de neerslag in DEVO



Afbeelding 4 Simultane data voor afvoer en neerslag (oktober 1976-mei 2015), samen met de twee rode lijnen die worden gebruikt als modellering voor de correlatie, en de blauwe gestreepte lijn als gewogen gemiddelde. Het betreft gehomogeniseerde waarden voor de neerslag.

Om correcte rekenresultaten te krijgen is het van groot belang rekening te houden met de positieve correlatie die bestaat tussen de piekafvoer en de neerslag. In DEVO wordt die correlatie vereenvoudigd behandeld, door de data als het ware te vervangen door twee lijnen, in afbeelding 4 in rood weergegeven (bovenste lijn heeft kans 0,4 en de onderste 0,6). Die twee lijnen zijn zo gekozen dat ze in combinatie met de statistiek van de piekafvoer de juiste overschrijdingskansen voor de neerslag opleveren.

Overigens is bij de validatie van DEVO gebleken dat het niet zo precies komt met *hoe* de correlatie tussen afvoer en neerslag wordt gemodelleerd, *als* die correlatie maar wordt gemodelleerd.

Statistiek voor wind en zeewaterstand

Voor de spuicapaciteit ter plaatse van Bath en de Krammer zijn de lokale zeewaterstanden en waterstanden bovenstrooms van de spuisluizen van belang. De waterstanden bovenstrooms van de spuisluizen worden bepaald door een op-/afwaaiingscorrectie op het meerpeil toe te passen. Immers, onder invloed van de wind staat het wateroppervlak op VZM nooit precies horizontaal, er is altijd sprake van een zekere scheefstand. Om dit netjes te kunnen verrekenen worden samenhangende zeewaterstand-windreeksen gebruikt, zogenaamde wind-waterstandblokken. Onderstaande aanpak geeft een wat versimpelde beschrijving van het bepalen van deze blokken; zie voor details (Geerse e.a. 2017).

Voor de zeewaterstanden worden tijdseries ontleend aan bestaande (door ons gehomogeniseerde) meetreeksen ter plaatse van Bath en de Krammersluizen. De metingen – die ook windopzet bevatten – betreffen uurwaarden uit (ongeveer) de periode 1971 t/m 2014.

Voor de periode 1971 t/m 2014 zijn naast de zeewaterstanden ook uurwaarden beschikbaar voor de windsnelheid en de windrichting. Om 20-daagse statistiek te verkrijgen voor de zeewaterstanden en de wind worden zogenaamde wind-waterstandblokken (ww-blokken) uit de metingen geconstrueerd. De meetreeksen worden simpelweg opgeknipt in opeenvolgende blokken die elk 20 dagen duren. Ieder blok bestaat dan uit $24 \times 20 = 480$ uurwaarden voor:

- Zeewaterstand Westerschelde (m+NAP) bij de Bathse spuisluis.
- Zeewaterstand Oosterschelde (m+NAP) bij de Krammersluizen West (KW).
- Windsnelheid.
- Windrichting.

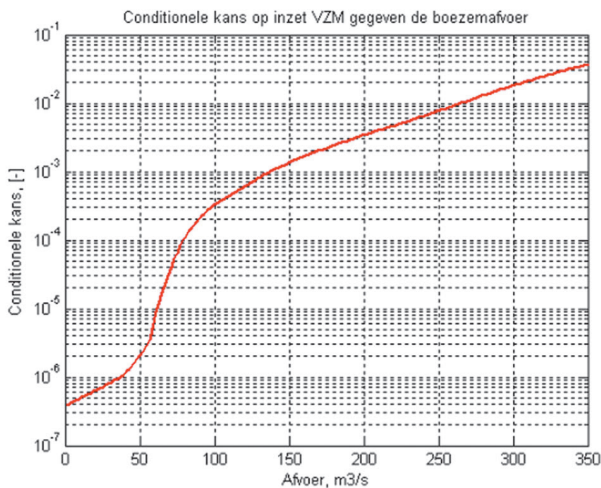
Ieder wind-waterstandblok bestaat dus uit een hele collectie van waarden, namelijk vier tijdreeksen met elk 480 waarden. In DEVO krijgt elk wind-waterstandblok dan dezelfde kans (bij N blokken heeft elk blok kans $1/N$). Merk op dat door deze aanpak de statistiek van wind en zeewaterstand geen extremere gebeurtenissen bevat dan eens per 44 jaar; de autocorrelaties tussen wind en zeewaterstand zijn echter heel precies aanwezig, omdat echte meetdata worden gebruikt.

Uit de meetdata blijkt dat de zeewaterstanden – die ook opzet door wind bevatten – bij Bath en Krammer positief gecorreleerd zijn met de Brabantse afvoer (fysisch

komt deze samenhang omdat regenfronten vaak samen gaan met wind, die opzet veroorzaakt). Die correlatie is het sterkst als de zeewaterstand wordt vergeleken met de Brabantse afvoer 1 of 1,5 dag later. In DEVO wordt deze correlatie meegenomen door de zeewaterstanden in de ww-blokken aan te passen (Geerse e.a. 2017).

Inzet van de Ruimte voor de Rivier-maatregel 'waterberging op VZM'

In het kader van Ruimte voor de Rivier (RvdR) wordt, bij hoge Rijnafvoer en gesloten Maeslantkering, water vanaf het Hollandsch Diep naar het VZM gevoerd om daar tijdelijk geborgen te worden. De maatregel wordt van kracht wanneer de voorspelde waterstand bij Rak Noord op het Hollandsch Diep NAP +2,60 m bereikt of overschrijdt. Uit eerdere studies is gebleken dat de Rijnafvoer en de afvoer uit Brabant, met enkele dagen tijdsverschuiving, sterk gecorreleerd zijn. Dat heeft tot gevolg dat de kans op inzet het grootst is bij hogere Brabantse afvoeren. Afbeelding 5 verduidelijkt dit verband.



Afbeelding 5 De kans op inzet van de RvdR-maatregel 'waterberging op VZM' als functie van de Brabantse afvoer (bij inzetfrequentie van de maatregel $f_{inz} = 1/1430$ per jaar)

Om het debiet door de Volkeraksluizen te kunnen bepalen is het nodig om het tijdsverloop van de waterstand bij Rak Noord te kennen. Dit tijdsverloop zal per stormafvoersituatie anders zijn. Ten behoeve van DEVO is de volgende vereenvoudiging doorgevoerd: aan berekeningen voor het zogenaamde Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 is een representatieve *stormopzet* ontleend voor het bereiken van NAP +2,60 m te Rak Noord. Deze stormopzet wordt bij een gemiddeld getij opgeteld, resulterend in een representatief waterstandverloop voor Rak Noord. In DEVO wordt er vervolgens (als benadering van het werkelijke beheer) van uitgegaan dat de maatregel 16 uur voordat de waterstand op Rak Noord NAP +2,60 m bereikt in werking treedt.

Falen Bathse spuisluis

Een belangrijk doel van DEVO is te kunnen bepalen in welke mate het falen van één of meerdere spuikokers van invloed is op de kans van optreden van (extreme) meerpeilen. Falen staat hier voor het niet-beschikbaar zijn van één of meer kokers

voor het spuien. Daarbij worden meerdere faalmodi beschouwd. Een faalmodus wordt gespecificeerd door drie elementen:

- het aantal falende kokers,
- de duur van falen (ofwel de hersteltijd) en
- de kans waarmee de faalmodus optreedt.

Gegevens voor het falen zijn ontleend aan RCM-Cost analyses, uitgevoerd door RWS. Uitkomsten van deze analyses betreffen RWS-bedrijfsinformatie en worden om die reden hier niet gerapporteerd. Daarbij zijn uitkomsten van faalkansanalyses sterk afhankelijk van uitgevoerd onderhoud en dus in de tijd (sterk) fluctuerend. Hieronder wordt ter verheldering wel de structuur weergegeven van faalkansinformatie die in DEVO wordt gebruikt.

Tabel 2 Denkbeeldige faalkansinformatie waarmee DEVO rekent. Per aantal falende kokers en per faalduur is een faalkans bepaald. De waarden van de faalkansen liggen in de orde 10^{-2} à 10^{-7} (op basisduur). Indien bepaalde combinaties van aantal falende kokers en faalduur niet voorkomen dan is de faalkans voor die combinaties 0.

Faalduurklasse	Faalfrequentie			
	1-2 falende kokers	3-4 falende kokers	5 falende kokers	6 falende kokers
≤ 2 dagen	F12,1	F34,1	F5,1	F6,1
1 week	F12,2	F34,2	F5,2	F6,2
2 weken	F12,3	F34,3	F5,3	F6,3
≥ 3 weken	F12,4	F34,4	F5,4	F6,4

Hydraulische berekening van het meerpeilverloop

Voor de hydraulische berekening wordt een waterbalansmodel gebruikt, waarbij de volumeverandering in de tijd wordt bepaald door het verschil tussen instroom en uitstroom van het VZM. De tijd wordt gediscrètiseerd met tijdstap Δt (standaard geldt $\Delta t = 3$ uur). Gegeven meerpeil $m(t-1)$, het meerpeil op de 'voorgaande stap', wordt het meerpeil $m(t)$ op tijdstip t als volgt bepaald:

- De instroom wordt bepaald door de tijdreeksen van de rivierafvoer, de afwaterende neerslag en de waterstand bij Rak Noord (bij inzet).
- De scheefstand van het meer wordt bepaald met de tijdreeksen van de zee- en de windomstandigheden, en de waterstandsvervalen ter plaatse van de Volkeraksluizen (bij inzet) en de spuisluisen te Bath en Krammer.
- De debieten door de sluizen bij Bath en Krammer worden bepaald met standaard overlaatformules, waarbij het beheer in het model de regels uit de praktijk zo goed mogelijk volgt. In DEVO wordt een streefpeil aangenomen van NAP +0,10 m; bij Bath wordt indien mogelijk gespuid indien dit streefpeil wordt overschreden (rekening houdend met het zoutsloot), terwijl bij de Krammer wordt gespuid indien het meerpeil de waarde NAP +0,50 m overschrijdt.
- Door vermenigvuldigen van de in- en uitstroombebieten met Δt wordt de volumeverandering bepaald, waarna $m(t)$ wordt berekend door $m(t-1)$ te vermeerderen met ΔV gedeeld door het oppervlak van het VZM. N.B. Dit oppervlak is een functie van het meerpeil (hogere meerpeilen corresponderen met een groter oppervlak vanwege onderlopende platen in het meer).

Probabilistische berekening van de meerpeilstatistiek

Zoals hiervoor beschreven berekent DEVO meerpeilverlopen waaruit per doorgerekende stochastencombinatie een maximumwaarde wordt geselecteerd. Van de geselecteerde meerpeilmaxima wordt een overschrijdingskans berekend met behulp van formule (1). Vervolgens kunnen de overschrijdingsfrequenties in keren/jaar worden berekend door de kansen te vermenigvuldigen met een factor 9, zijnde het aantal basisduren van 20 dagen in het winterhalfjaar (oktober t/m maart). Om de overschrijdingskans van een meerpeil te berekenen *zonder falen* van de Bathse spuisluis moet worden gesommeerd over alle combinaties van afvoerpiek, neerslagsom, wind-waterstandblok, inzet van de RvdR-maatregel:

$$P(S > s) = \sum_{\omega=0}^1 \sum_{\gamma=1}^2 P(\gamma) \sum_{b=1}^{N_{wy}} P(y_b) \int_{k:s(k,y_b,\gamma,\omega) \geq s} dk f(k) P(\omega | k) \quad (1)$$

S	de stochast meerpeil, waarvan s een realisatie is
Γ	de stochast die de correlatie modelleert van de neerslagsom met de piek-afvoer, waarvan γ een realisatie is ($\gamma = 1$ betreft de onderste lijn en $\gamma = 2$ de bovenste uit afbeelding 4)
Y	de stochast wind-waterstandblok, waarvan y_b een realisatie is
K	de stochast afvoerpiek, waarvan k een realisatie is
Ω	de stochast inzet RvdR-maatregel, waarvan ω een realisatie is. Merk op dat de inzet van de RvdR-maatregel geconditioneerd is op de afvoer k
$P(\dots)$	kans waarmee een stochastwaarde gerealiseerd kan worden
$f(k)$	kansdichtheid van de afvoerpiek in k

Als *wel falen* van de Bathse spuisluis wordt meegenomen, moet formule (2) worden gebruikt; het eerste deel beschrijft de situatie zonder falen (aantal falende kokers $i=0$), het tweede deel de situatie met falen (aantal falende kokers $i > 0$):

$$P(S > s) = \sum_{\omega=0}^1 \sum_{\gamma=1}^2 \sum_{b=1}^{N_{wy}} P(i=0) P(\gamma) P(y_b) \int_{k:s(k,y_b,\gamma,\omega) \geq s} dk f(k) P(\omega | k) \quad (2)$$

$$+ \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{n_{ij}} \sum_{\omega=0}^1 \sum_{\gamma=1}^2 \sum_{b=1}^{N_{wy}} \frac{1}{n_{ij}} P(F_{ij}) P(\gamma) P(y_b) \int_{k:s(k,y_b,\gamma,\omega,i,t_{ij}(m),\tau_{ij}) \geq s} dk f(k) P(\omega | k)$$

F	de stochast faalmodus, waarvan F_{ij} een realisatie is. Het subscript i geeft het aantal falende kokers weer. Het subscript j betreft een nummering van de faalmodi per aantal falende kokers i .
N_i	aantal faalmodi per aantal falende kokers i .
n_{ij}	het aantal mogelijke startmomenten van falen in de basisduur voor faalmodus F_{ij} , de teller hiervoor is m
t_{ij}	het begintijdstip van falen voor het m -de startmoment

Formule (2) zegt dat per gebeurtenis de kansen van de 'onderliggende' stochasten vermenigvuldigd moeten worden om de kans op een combinatie van omstandigheden te krijgen; vervolgens worden de kansen van de gebeurtenissen die s over-

schrijden bij elkaar op geteld. Eigenlijk is het niet meer dan een beetje zorgvuldig de (kans)boekhouding bijhouden.

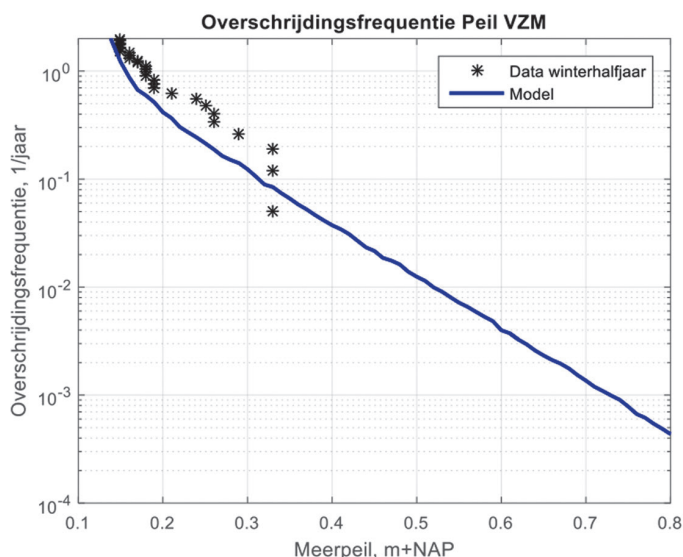
Modelvalidatie

Er is een uitgebreide modelvalidatie uitgevoerd op het model zonder inzet van de Krammer, zonder inzet van de RvdR-maatregel en zonder eventueel falen van Bath.

De validatie beschrijven we hier niet uitgebreid, we geven slechts een korte samenvatting. In de kern komt de validatie neer op beantwoording van de volgende vragen:

- Hoe goed passen de berekende meerpeilen op de metingen?
- Voor welke modelinstellingen zijn de resultaten vooral gevoelig?

Afbeelding 6 geeft weer hoe de modelresultaten zich verhouden tot de metingen.



Afbeelding 6 De data met het resultaat volgens DEVO (zonder falen en zonder inzet Krammersluizen)

Met de standaardinstellingen komen metingen en berekende peilen redelijk overeen. Een belangrijke reden hiervoor is dat veel zorg is besteed aan de analyse van de statistische eigenschappen van de stochasten waarmee het model rekent. Dat het model toch niet precies op de metingen komt, heeft verschillende oorzaken; we noemen hier:

- In het werkelijke meerpeilbeheer wordt geen vast streefpeil gehanteerd, maar een bandbreedte van peilen tussen -0,10 en 0,15 m+NAP. In DEVO wordt echter een vast streefpeil gebruikt van 0,10 m+NAP.
- De vrij korte reeks van betrouwbare metingen (slechts 14 jaren) levert een grote mate van statistische ruis.
- In het modelresultaat is geen falen meegenomen van de Bathse spuisluis. Als dat wel wordt meegenomen komt de blauwe lijn hoger te liggen, zoals blijkt uit de bovenste grafiek uit afbeelding 10: bij meenemen van alle faalmodi (zie de lijn voor Fall) wordt bijvoorbeeld bij een overschrijdingsfrequentie van 0,1 per jaar

een meerpeil gevonden van 0,40 m+NAP. Deze waarde past duidelijk beter bij de metingen uit afbeelding 6.

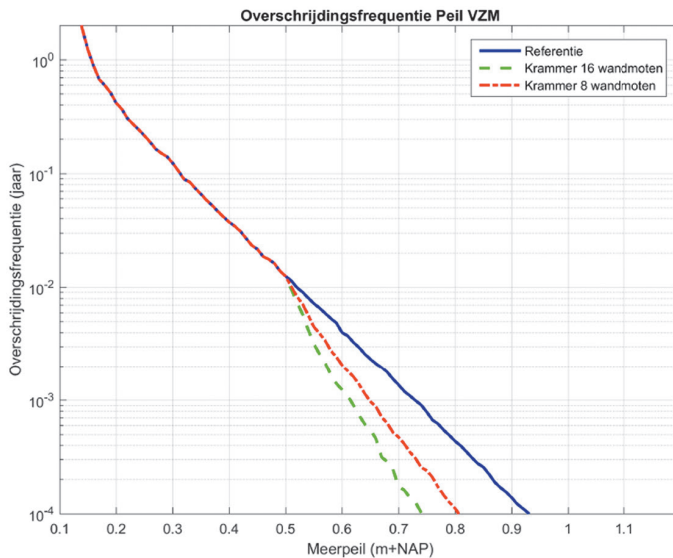
Uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen laten zien dat voor de modelresultaten vooral de volgende zaken van belang zijn:

- Het kombergend oppervlak van VZM; het loont om hier rekening te houden met de variatie in oppervlak door het onderlopen van platen bij verschillende peil-niveaus.
- Juiste modellering van de totale toevoer naar VZM.
- Bestaande correlaties moeten worden meegenomen, maar de resultaten blijken niet heel gevoelig voor de precieze modellering daarvan.

Minder van belang is het in rekening brengen van op- en afwaaiing, de rekentijdstap en hoeveel wind-waterstandblokken uit de totale set worden getrokken. De elementen waar het model gevoelig voor is zijn vrij goed te bepalen. Dit maakt de rekenwijze behoorlijk robuust.

Resultaten

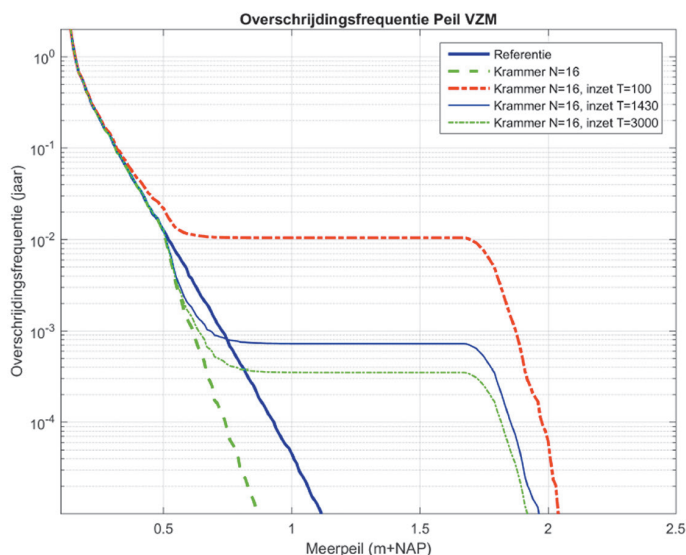
Nu worden de rekenresultaten gepresenteerd. Om te beginnen laten we het effect zien van inzet van de Krammersluizen wanneer het peil op het VZM hoger wordt dan NAP +0,50 m. Dat blijkt aanzienlijk (afbeelding 7). Wanneer het maximale aantal van 16 wandmoten (oftewel wandschuiven) beschikbaar is gaat het meerpeil voor T = 10000 jaar omlaag met ca. 0,2 m, terwijl die verlaging bijna 0,15 m is bij gebruik van 8 wandmoten.



Afbeelding 7 Invloed Krammersluizen

Vervolgens bekijken we het effect van inzet van de Ruimte voor de Rivier-maatregel, in combinatie met inzet van de Krammersluizen met 16 wandmoten. Afbeelding 8 laat zien dat deze inzet een groot effect heeft op meerpeilen met frequenties kleiner dan de inzetfrequentie. Overigens blijkt uit berekeningen dat niet alleen

de inzetfrequentie van belang is voor de resulterende meerpeilen. Ook het voor-spellingspeil op Rak Noord waarbij de RvdR-maatregel wordt ingezet is van belang. Daarnaast is de timing van inzet van de maatregel (het moment van openen van de Volkeraksluizen) belangrijk. Ook moet bedacht worden dat in werkelijkheid de waterstanden bij Rak Noord heel verschillende tijdsverlopen kunnen hebben. Het meenemen van meerdere verlopen en andere keuzes voor de inzet kan tot decimeters verschil in de meerpeilen leiden.



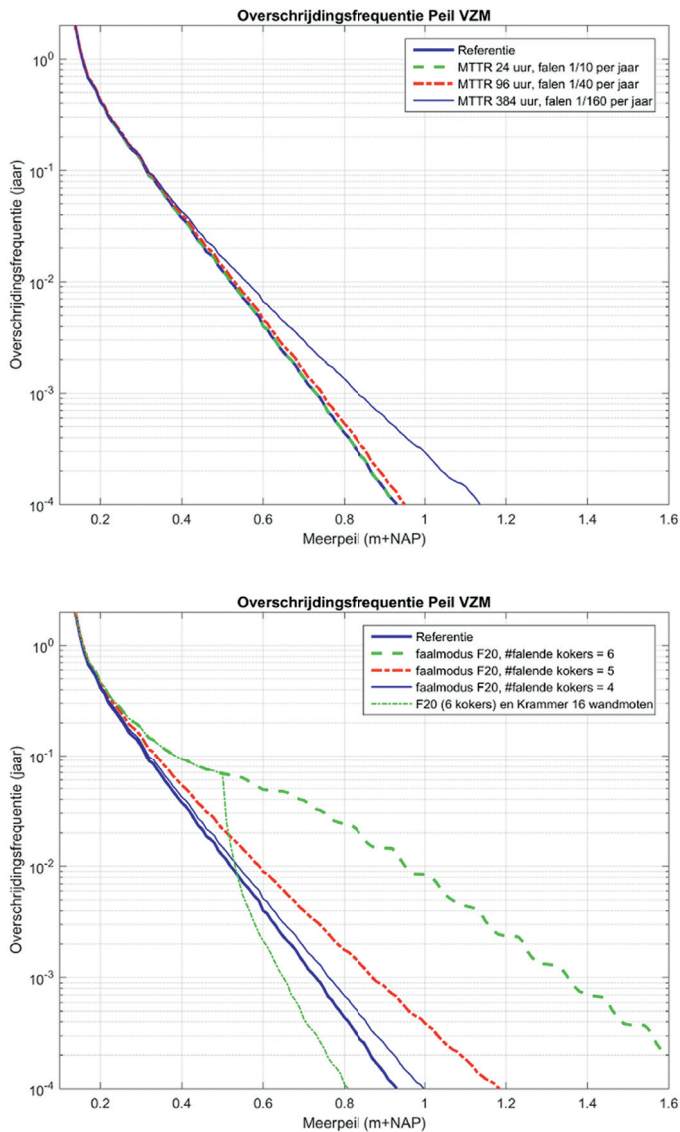
Afbeelding 8 Effect RvdR-maatregel, in combinatie met inzet van de Krammersluizen

Nu tonen we resultaten van enkele theoretische berekeningen voor falen van de spuisluis Bath. De bovenste grafiek van afbeelding 9 toont het effect van een geheel falende spuisluis bij Bath, waarbij het product van faalkans en faalduur (Mean Time To Repair, afgekort MTTR) in alle berekeningen constant is. De onderste grafiek van afbeelding 9 toont het effect van 4, 5 of 6 falende kokers met een faalduur van 20 dagen (of langer). N.B. De toevoeging 20 in F20 slaat hier op het aantal dagen uitval. Een dergelijke lange faalduur betekent dat de kokers gedurende een gehele hoogwatergebeurtenis niet operationeel zijn.

Het effect van de faalduur (MTTR) op de peilfrequenties blijkt groter te zijn dan de faalkans. Dit effect zien we overigens niet alleen op het VZM maar ook op andere onderzochte watersystemen. In het onderhoud moeten we dus eerder naar zo kort mogelijke reparatietijden streven dan naar kleine faalkansen, wat echter niet betekent dat de faalkans onbelangrijk is.

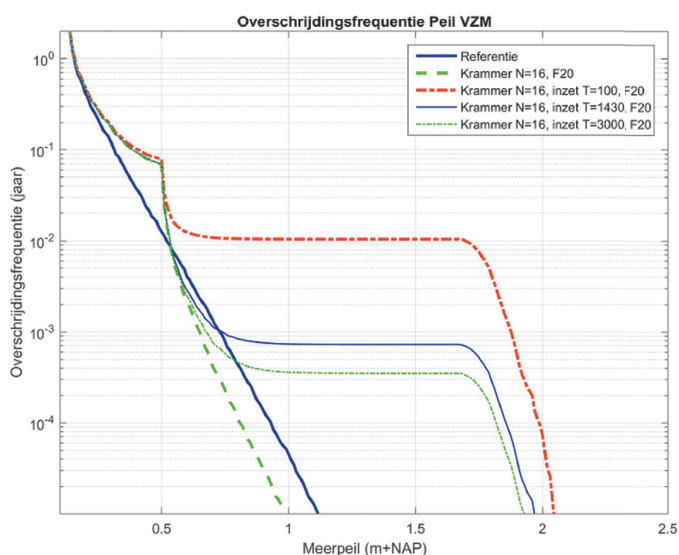
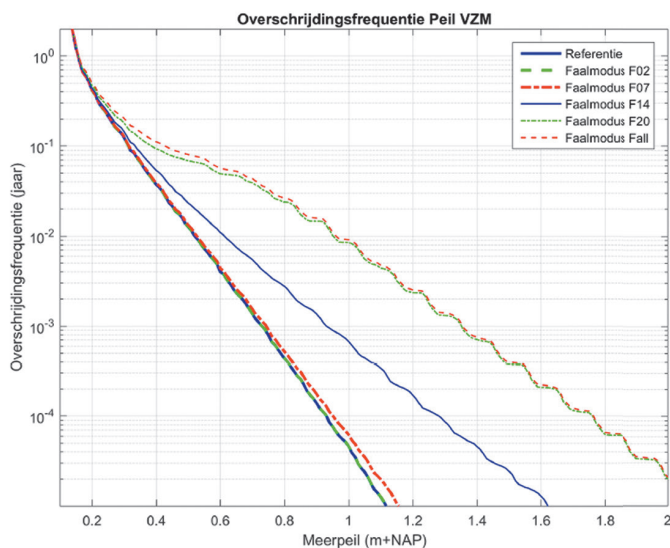
De onderste grafiek laat zien dat geheel falen van het complex (6 kokers doen het niet) veel ernstiger is dan het falen van 5 kokers. Het langdurig falen van 4 kokers heeft eigenlijk helemaal niet zo'n groot effect op de peilfrequenties. Verder laat de deze grafiek goed zien dat het effect van geheel falen van Bath goed opgevangen kan worden door de Krammer. Dat is goed te begrijpen als we bedenken dat het overgrote deel van de tijd maar 2 of minder kokers nodig zijn voor de waterafvoer. We zien

ook bij andere tot nu toe onderzochte watersystemen dat geheel falen van spuimiddelen/gemalen een veel grotere invloed op de peilstatistiek heeft dan partieel falen.



Afbeelding 9 Effect faalduur versus faalkansen (boven) en aantal falende kokers (onder)

Tot slot tonen we resultaten van berekeningen met meest recente inzichten in faalkansen en faalduren (afbeelding 10). De bovenste grafiek toont het effect van meerdere faalmodi zonder inzet van de Krammer en de RvdR-maatregel. Gegeven de huidige faalgegevens is de faalmodus waarbij gedurende 20 dagen volledig falen optreedt allesoverheersend; ook 14 dagen falen levert nog een flinke bijdrage. Faalmodi die 2 of 7 dagen falen veroorzaken doen er eigenlijk niet zoveel toe. Deze constatering geldt alleen voor de hier gebruikte faalkansen.



Afbeelding 10 Effect van faalmodi (boven) en inzet RvdR-maatregel en Krammer (onder)

De onderste grafiek van afbeelding 10 laat een totaalresultaat van de berekeningen zien, waarbij falen van Bath is vereenvoudigd tot de dominante faalmodus. Deze grafiek laat zien dat als de Krammer volledig operationeel is, deze het effect van falen van Bath geheel kan opvangen bij peilen hoger dan het inzetpeil van de Krammer. Deze grafiek laat ook zien dat inzet van de RvdR-maatregel vanaf de inzetfrequentie uiteindelijk de peilfrequentie sterk domineert (zie ook afbeelding 8). Dat is eenvoudig te begrijpen: de aanvoer met de RvdR-maatregel via de Volkeraksluizen is veel groter dan de afvoer uit de Brabantse boezem en de afvoer bij Bath en de Krammer.

Conclusies

Het model DEVO is gevalideerd aan de hand van metingen voor het VZM. De uitkomsten van het model blijken heel behoorlijk overeen te stemmen met de belangrijkste statistische kenmerken van de metingen (gemiddelde meerpeil en overschrijdingsfrequentie). Daarbij blijken de rekenresultaten vooral gevoelig voor modelparameters die goed te bepalen zijn.

In aansluiting op de validatie blijkt het model plausibele resultaten te geven voor inzet van de Krammersluizen, de inzet van de RvdR-maatregel waterberging op VZM, en voor de invloed van falen van de Bathse spuisluis. Een belangrijke conclusie is dat meenemen van falen van de spuisluis grote consequenties kan hebben voor de kansen waarmee extreme meerpeilen voorkomen – die kansen worden door falen aanzienlijk vergroot. Het model blijkt een handig instrument om te analyseren welke faalmodi er voor de peilstatistiek toe doen en welke minder relevant zijn. Specifiek voor VZM geldt dat door inzet van de Krammersluizen de invloed van falen sterk gedempt wordt. Ook blijkt dat inzet van de RvdR-maatregel de meerpeilstatistiek domineert vanaf de inzetfrequentie.

In het algemeen heeft RWS met het in DEVO ontwikkelde modelconcept een instrument om een relatie te leggen tussen het onderhoud aan de kunstwerken en het peilregime op de beheerde peilgereguleerde watersystemen.

Met het model kunnen tevens eenvoudig diverse (klimaat)scenario's worden doorge-rekend.

Summary Probabilistic model to determine lake level statistics for the Volkerak-Zoommeer

Rijkswaterstaat has made agreements with other parties such as Water Authorities with respect to the functions of water level maintenance, flood discharge, water supply and preventing salt water intrusion. The availability of civil structures such as weirs, sluices and pumping stations is essential to meet these agreements. However, in practice 100% availability is impossible and failures may impact the degree of compliance with the agreements. This implies that there is a relationship between the level of maintenance (and their costs) and the degree of compliance. Rijkswaterstaat wants to make this relationship transparent, allowing it to optimize the maintenance costs (performance management).

This resulted in the development of the lake Volkerak-Zoommeer model named 'DEVO'. DEVO quantifies in a relatively simple concept the relation between the uptime of the sluices near Bath and the statistics of lake levels. DEVO proves to be a powerful tool in analyzing the influence of individual failure mechanisms or sets of failure mechanisms on the statistics of the lake levels. Results of these analyses are suitable to optimize sluice maintenance. Since DEVO proves to be a powerful concept also for the other functions and water systems, similar models will be developed.

Literatuur

- Geerse, C., D. van Haaren en B. Kuijper (2017).** Probabilistisch model meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer (DEVO) – Versie 2.1. HKV-rapport PR3689.10, Lelystad.
- Kuijper, B., C. Geerse, J. Stijnen, T. Botterhuis, R. Versteeg, M. Duits en I. Vreugdenhill (2014).** Effect waterberging Volkerak-Zoommeer op waterstanden Mark-Dintel-Vliet boezem. Aanvullende analyses. HKV-rapport PR2904.10, Lelystad.

Auteurs

CHRIS GEERSE
HKV Lijn in Water, Lelystad
geerse@hkv.nl

BASTIAAN KUIJPER
HKV Lijn in Water, Lelystad
kuijper@hkv.nl

DIRK VAN HAAREN
HKV Lijn in Water, Lelystad
haaren@hkv.nl

HERBERT BERGER
Rijkwaterstaat – WVL, Lelystad
herbert.berger@rws.nl

ARTHUR KORS
Rijkwaterstaat – WVL, Lelystad
arthur.kors@rws.nl

HANS VAN TWUIVER
Rijkwaterstaat – WVL, Lelystad
hans.van.twuiver@rws.nl

