

Memo

Aan

Marcel Bottema

Datum

1 december 2023

Contactpersoon

Jacco Groeneweg

Ons kenmerk

11209262-014-ZWS-0001

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8426

E-mail

Jacco.Groeneweg@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 3

Onderwerp

Oplegnotitie ontwikkelstrategie seizoensafhankelijke hydraulische randvoorwaarden

Inleiding

Werkzaamheden aan dijken en kunstwerken worden normaal gesproken uitgevoerd buiten het stormseizoen. De omvang van het onderhoud en versterkingsopgaven is dermate groot dat het steeds moeilijker wordt dit te realiseren. Klimaatverandering kan het in de toekomst zelfs onmogelijk maken om alle werkzaamheden in het open seizoen te passen. Dat heeft tot gevolg dat we er niet aan ontkomen om werkzaamheden in het stormseizoen uit te voeren. Daarbij is het van belang dat uitvoeringsrisico's van werken aan dijken en kunstwerken goed ingeschat kunnen worden. De hydraulische randvoorwaarden op de keringen spelen daarbij een belangrijke rol. Het betreft hier waterstanden, golven en meteorologische condities, zowel voor de primaire als voor de regionale keringen.

In 2022 is in het kader van KPP-VOW (inmiddels SITO-VOW) een inventarisatie uitgevoerd van de informatiebehoefte met betrekking tot seizoensafhankelijke statistiek van hydraulische randvoorwaarden. Hieruit blijkt dat op beleidsmatig niveau de systematiek van open en gesloten seizoenen ter discussie staat, omdat deze systematiek niet aansluit bij de gewenste risico-gestuurde manier van werken. Voor het inschatten van risico's voorafgaand aan de uitvoering van werken aan dijken en kunstwerken is een brede vraag naar seizoensafhankelijke statistiek van de hydraulische randvoorwaarden. Deze statistiek faciliteert het inplannen van de werkzaamheden en het voorbereiden van de vereiste noodmaatregelen. Wanneer de werken aan dijken en kunstwerken daadwerkelijk in uitvoering zijn, is er behoefte aan operationele voorspellingen van zowel de zwaarte van de hydraulische randvoorwaarden als van de tijdshorizon waarop deze plaatsvinden.

De beleidskant valt buiten de scope van de hier besproken studie. De operationele kant wordt door WMCN opgepakt. Blijft over de behoefte aan seizoensafhankelijke statistiek van hydraulische randvoorwaarden. Deze is niet zondermeer voorhanden en over de afleiding moet goed worden nagedacht. De doelstelling van het SITO-VOW onderzoek voor 2023 is dan ook het opstellen van een ontwikkelstrategie voor het afleiden van seizoensafhankelijke statistiek van hydraulische randvoorwaarden.

In nauw overleg met Deltares (Hans de Waal en Jacco Groeneweg) en Rijkswaterstaat-WVL (Marcel Bottema) heeft HKV een inventarisatie gemaakt voor mogelijke manieren om deze statistiek af te leiden en daarvan de haalbaarheid ingeschat. Deze is gevat in de rapportage PR5066.10 "Ontwikkelstrategie seizoensafhankelijke randvoorwaarden", toegevoegd als bijlage bij deze oplegnotitie. De belangrijkste bevindingen zijn hieronder samengevat, alsmede de openstaande afwegingen om daadwerkelijk tot seizoensafhankelijke statistiek te komen.

Haalbaarheid seizoensafhankelijke statistiek

De samenvatting van het HKV rapport geeft een goede beschrijving van de uitgevoerde werkzaamheden die hebben geleid tot de voorgestelde ontwikkelstrategie. De werkwijze richt zich op maandstatistiek van de basisstochasten. De basisstochasten zijn invoer voor het huidige instrumentarium (BOI) voor de bepaling van hydraulische belastingen: neerslag, afvoer, wind, zeewaterstand en meerpeil. Daarbij wordt uitgegaan van het huidige klimaat. De stap van het huidige klimaat naar klimaatscenario's kan nader worden ingevuld wanneer de maandstatistiek voor het huidige klimaat is afgeleid. De haalbaarheid van de maandstatistiek van de basisstochasten en van de implementatie daarvan in bestaande modellen (DEZY, Hydra-NL, Hydra-Ring, PROMOTOR) is uitgebreid beschreven. Merk op dat seizoensafhankelijke statistiek kan worden afgeleid uit maandstatistiek.

In het HKV rapport worden meerdere strategieën gepresenteerd. Een 'basis' strategie (1) betreft enkel de afleiding van maandstatistiek. Een 'plus' strategie (2) betreft óók de uitbreiding van bestaande software/modellen. De 'uitgebreide' strategie (3) bevat ook aanpassingen in de databases fysica, die worden gebruikt voor de vertaling van statistiek van basisstochasten naar statistiek van hydraulische belastingen. Voor de korte en middellange termijn wordt aanbevolen om voor het afleiden van maandstatistiek van de basisstochasten de factormethode¹ of de beschikbare modelreeksen² te gebruiken. Zelfs als er geen software-aanpassingen worden gedaan, dan kunnen relatief snel handreikingen met work-arounds aan de gebruikers van Hydra-Ring, Hydra-NL, DEZY en Promotor worden gemaakt.

Afwegingen

Het beschikbare budget is een belangrijke factor in het kiezen tussen de factormethode en de beschikbare modelreeksen. Ook de gewenste betrouwbaarheid speelt een belangrijke rol. De beschikbare modelreeksen leveren namelijk betrouwbaardere extreme-waarden verdelingen op dan de factormethode, maar dit kost meer inspanning en gaat gepaard met hogere kosten.

De keuze hangt ook van de toepassing af. De factormethode is vooral interessant wanneer men geïnteresseerd is in niet zo extreme gebeurtenissen, die relevant zijn voor o.a. ARBO-eisen en inschatting van werkbaar weer. Voor andere toepassingen ligt een meer geavanceerde methode voor de hand. Denk hierbij aan inschattingen voor de waterveiligheid.

Belangrijke afwegingen die nog gemaakt moeten worden, en per toepassing kunnen verschillen, is of correlaties tussen stochasten en statistische onzekerheden seizoensafhankelijk moeten worden beschouwd en dus opnieuw worden afgeleid, of dat wordt volstaan met de reeds beschikbare waarden op jaarbasis. Ook hier speelt beschikbaar budget en gewenste betrouwbaarheid een rol in de keuze.

De keuze voor het doen van aanpassingen aan software is enerzijds sterk afhankelijk van het beschikbare budget en anderzijds van de gebruikerswensen.

Hoe nu verder?

Binnen SITO-VOW is aldus een ontwikkelstrategie voor het afleiden van seizoensafhankelijke statistiek van hydraulische randvoorwaarden opgesteld. Door aanvullend meerdere experts te

¹ De factormethode is een grove, pragmatische werkwijze om maandstatistiek af te leiden. Voor iedere maand wordt een factor bepaald, die het percentuele verschil tussen de hoogste waarnemingen van maanden uitdrukt. Deze methode is door Geerse en Zethof (2011) toegepast op neerslaggegevens.

² Met behulp van modelberekeningen zijn lange tijdreeksen voor zowel afvoer als wind en zeewaterstand gegenereerd. Deze reeksen vormen de basis voor statistiek op jaarbasis, maar kunnen ook gebruikt worden om maandstatistiek af te leiden. Voor afvoer wordt hierbij gebruik gemaakt van GRADE en de hydrologische en hydrodynamische modellen daarbinnen. Voor wind en zee-waterstand heeft KNMI gebruik gemaakt van ECMWF seizoensverwachtingen van wind en deze met WAQUA vertaald naar waterstanden.

bevragen om de strategieën te beoordelen zouden nog nieuwe inzichten naar voren kunnen komen. Duidelijk is wel dat er nog diverse keuzes te maken zijn. Deze hangen af van randvoorwaarden, ten aanzien van beschikbaar budget, gewenste betrouwbaarheid van de statistiek en gebruikersvriendelijkheid voor de gebruiker.

De behoeftes en daarmee de randvoorwaarden zullen waarschijnlijk per project verschillen. Het ligt daarom in de lijn der verwachtingen dat een generiek toepasbare set aan seizoensafhankelijke statistiek van hydraulische randvoorwaarden en software om deze te verwerken en af te leiden niet zondermeer te genereren is. We bevelen aan om de gegenereerde bouwstenen voor statistiek en software in beheer te nemen. Op deze manier kunnen de verschillende projecten profiteren van de ontwikkelingen die zijn opgedaan bij projecten, waarbij ontwikkelingen ten aanzien van seizoensafhankelijke statistiek hebben plaatsgevonden. Een verdere uitwerking van de bouwstenen onder SITO-VOW ligt daarmee niet voordehand. Het lijkt logischer om de aansluiting bij bijvoorbeeld HWBP en STOWA te zoeken, als zijnde de programma's verantwoordelijk voor projecten die profiteren van de seizoensafhankelijke statistiek van hydraulische randvoorwaarden.

Bijlage(n)

Rapport PR5066.10 Ontwikkelstrategie seizoensafhankelijke randvoorwaarden

Ontwikkelstrategie seizoensafhankelijke randvoorwaarden



Opdrachtgever



Rijkswaterstaat
Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Ontwikkelstrategie seizoensafhankelijke randvoorwaarden



Eindrapport



Auteurs

J.J. Caspers
R.P. Nicolai

PR5066.10
november 2023

Samenvatting

In Boers (2022) is een inventarisatie uitgevoerd van de informatiebehoefte met betrekking tot seizoensafhankelijke hydraulische condities. Voor het inschatten van risico's voorafgaand aan de uitvoering van werken aan dijken en kunstwerken blijkt er een grote diversiteit aan vragen te bestaan naar maandstatistiek van de hydraulische condities. Het laatste decennium (of de laatste jaren) zijn meermalen extreme condities opgetreden (droogtes, zomerstormen, extreme afvoeren). In Boers (2022) staat dat beheerders van stormvloedkeringen zich onder andere afvragen wat dit betekent voor de bemensing van de kering in het zomerseizoen.

Voordat begonnen wordt met het afleiden van maandstatistiek, wil Rijkswaterstaat eerst een ontwikkelstrategie opstellen. Rijkswaterstaat en Deltares hebben HKV gevraagd de ontwikkelstrategie op te stellen waarin aandacht is voor de verschillende watersystemen en implementatie in de bestaande software van WBI en BOI.

Om tot een ontwikkelstrategie van 'seizoensafhankelijke' statistiek te komen is een werkwijze opgesteld die aansluit bij de afleiding van hydraulische randvoorwaarden: afleiding van de statistiek van basisstochasten, modelberekeningen fysica en probabilistische berekeningen van de hydraulische condities (combineren van statistiek en fysica). Door gesprekken en interviews met experts is bepaald wat er voor de toepassing van maandstatistiek nu al mogelijk is en/of wat er gedaan moet worden om maandstatistiek af te leiden dan wel te implementeren. De studie richt zich op maandstatistiek van de basisstochasten die invoer zijn in het huidige instrumentarium voor hydraulische condities: neerslag, afvoer, wind, zeewaterstand en meerpeil. Statistiek per seizoen kan afgeleid worden uit de maandstatistiek.

Uit deze studie volgen meerdere strategieën. Een 'basis' strategie (1) betreft enkel de afleiding van maandstatistiek. Een 'plus' strategie (2) betreft óók de uitbreiding van bestaande software. De 'uitgebreide' strategie (3) bevat ook aanpassingen in de databases fysica (productieberekeningen). Voor de afleiding van maandstatistiek is de keuze afhankelijk van het beschikbare budget en het detailniveau van de statistiek. De keuze voor het doen van aanpassingen aan software is evenzo afhankelijk van het beschikbare budget en in hoeverre waarde wordt gehecht aan het ondersteunen van de gebruiker (op zijn beurt mogelijk afhankelijk van het aantal gebruikers en hun precieze behoeften). Aanpassingen zijn relatief duur, maar de meeste modellen zijn al deels geschikt om te rekenen met maandstatistiek.

Wanneer gestart wordt met de uitwerking van een ontwikkelstrategie zullen ook verschillende gebruikerswensen naar voren komen die door een (iteratieve) afweging kunnen worden meegenomen. Daardoor worden de gebruikerswensen weer verder aangescherpt en geprioriteerd. Ook door meerdere experts te bevragen om de strategieën te beoordelen kunnen nieuwe inzichten naar voren komen voor een gewenste implementatiestrategie. Dit is een iteratief proces.

Klimaatverandering is een belangrijke aanleiding voor de brede, diffuse vraag naar maandstatistiek, maar het is niet mogelijk om met de ontwikkeling van één softwaretool te voorzien in alle vragen. Deze studie heeft zich gericht op de ontwikkeling van maandstatistiek voor het huidige klimaat. De stap van het huidige klimaat naar klimaatscenario's is methodisch gezien niet groot. Deze stap kan nader worden ingevuld wanneer de maandstatistiek voor het huidige klimaat is afgeleid.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	2
1.3	Scope	2
1.4	Leeswijzer	2
2	Uitgangspunten en werkwijze opstellen ontwikkelstrategie	3
3	Haalbaarheid maandstatistiek basisstochasten	5
3.1	Neerslag	5
3.2	Afvoer	8
3.3	Wind	13
3.4	Zeewaterstand	14
3.5	Meerpeil	17
4	Haalbaarheid implementatie in bestaande modellen	21
4.1	DEZY	21
4.2	Hydra-NL	21
4.3	Hydra-Ring	22
4.4	PROMOTOR	24
5	Toepassingsgebied	27
5.1	Toepassingen buiten bestaande modellen	27
5.2	Toepassingen binnen bestaande modellen	28
6	Ontwikkelstrategie	31
7	Aanbevelingen	35
8	Referenties	37
	Bijlagen	41
A	Interviews	43

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In Boers (2022) is een inventarisatie uitgevoerd van de informatiebehoefte met betrekking tot seizoensafhankelijke hydraulische condities. Voor het inschatten van risico's voorafgaand aan de uitvoering van werken aan dijken en kunstwerken blijkt er een grote diversiteit aan vragen te bestaan naar maandstatistiek van de hydraulische condities. Het betreft hierbij waterstanden, golven en meteorologische condities, zowel voor de primaire als voor de regionale keringen. Deze maandstatistiek faciliteert het inplannen van de werkzaamheden en het voorbereiden van de vereiste noodmaatregelen¹. Voordat begonnen wordt met het afleiden van maandstatistiek, wil Rijkswaterstaat eerst een ontwikkelstrategie opstellen.

Voor deze ontwikkelstrategie zijn de volgende onderwerpen van belang:

- Kenmerken van het watersysteem: Uit de inventarisatie blijkt dat er grote verschillen bestaan tussen de verschillende watersystemen ten aanzien van dreiging door extreme hydraulische condities. Deze verschillen betreffen:
 - De oorzaak van de extreme omstandigheden (afvoer, neerslag, stormopzet)
 - De mate van onzekerheid (is één dominante stochast of dient er rekening te worden gehouden met meerdere stochasten)
 - De mogelijkheden voor menselijk ingrijpen (peilbeheer, sluiten keringen)
- Klimaatontwikkeling: Het laatste decennium (of de laatste jaren) zijn meermalen extreme condities opgetreden (droogtes, zomerstormen, extreme afvoeren). In Boers (2022) staat dat beheerders van stormvloedkeringen zich onder andere afvragen wat dit betekent voor de bemensing van de kering in het zomerseizoen.
- Maandstatistiek van basisstochasten en implementatie hiervan in bestaande software van WBI en BOI:
 - In hoeverre maak je hierbij gebruik van historische gegevens, klimaatscenario's of lange KNMI-(ensemble)modelreeksen? Laatstgenoemde bieden duizenden jaren aan equivalente data en hebben potentie, zoals o.a. bleek na het Maashoogwater juli 2021. Soortgelijke maar iets minder lange reeksen bestaan er ook voor toekomstige klimaatscenario's.
 - Voer je een pilot uit of hou je het juist algemeen en daarmee gebiedsoverstijgend?
 - Welke tools / informatie bestaat al, en wat ontbreekt?
 - Hydra-Ring/Riskeer: bij de verdere uitwerking van de ontwikkelstrategie de (on)mogelijkheden bepalen om de maandstatistiek in Hydra-Ring te implementeren.

Rijkswaterstaat en Deltares hebben HKV gevraagd de ontwikkelstrategie op te stellen. Dit rapport geeft hier invulling aan. Het is tot stand gekomen onder begeleiding van, en in nauwe samenwerking met, Marcel Bottema (Rijkswaterstaat WVL) en Hans de Waal (Deltares).

¹ Er zijn aanwijzingen dat STOWA in het a.s. 5e Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen aan de slag gaat met de vraag "Is er nog wel sprake van een afgebakend stormseizoen?".

1.2 Doel

Het doel van dit project is het opstellen van een ontwikkelstrategie waarmee Rijkswaterstaat de afleiding van maandstatistiek van hydraulische condities kan programmeren in de komende jaren. Dit betekent dat Rijkswaterstaat inzicht nodig heeft in de benodigde projecten / activiteiten om tot maandstatistiek te komen. De ontwikkelstrategie betreft zowel de methode-ontwikkeling als de implementatie in software. Dit rapport beschrijft de haalbaarheid, de benodigde inspanning en de projectrisico's voor het afleiden van de maandstatistiek en de implementatie in (bestaande) software. Voor een aantal onderdelen zijn ook (ontwikkel)kosten beschreven.

1.3 Scope

De uitgangspunten en de afbakening van de ontwikkelstrategie zijn onderwerp van Hoofdstuk 2.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 presenteren we de uitgangspunten en werkwijze waarin we de ontwikkelstrategie opstellen. De uitgangspunten geven een afbakening voor de op te stellen ontwikkelstrategie. Hoofdstuk 3 richt zich op de haalbaarheid van de afleiding van de maandstatistiek van stochasten die een rol spelen binnen waterveiligheid van primaire en regionale keringen. De haalbaarheid van de implementatie van deze statistiek in de bestaande modellen is het onderwerp van Hoofdstuk 4. Enkele voorbeelden van de toepasbaarheid van de maandstatistiek, zowel binnen als buiten de bestaande modellen, worden gegeven in Hoofdstuk 5. Ten slotte wordt in Hoofdstuk 6 de ontwikkelstrategie uitgewerkt, waarbij diverse strategieën worden beschouwd in termen van meerwaarde, doorlooptijd en projectrisico's. In Hoofdstuk 7 volgen de aanbevelingen.

2 Uitgangspunten en werkwijze opstellen ontwikkelstrategie

Om tot een ontwikkelstrategie van 'seizoensafhankelijke' statistiek te komen is een werkwijze opgesteld. Deze werkwijze sluit aan bij de afleiding van hydraulische randvoorwaarden:

- Basisstochasten: afleiding van de statistiek van basisstochasten
- Modelberekeningen fysica: waterstanden en golven voor gegeven waarden van de basisstochasten
- Probabilistische berekeningen van de hydraulische condities: combineren van statistiek en fysica, hetgeen leidt tot een kansverdeling van een belastingparameter zoals de lokale waterstand of golfhoogte.

In de volgende hoofdstukken wordt deze werkwijze nader uitgewerkt en dit resulteert uiteindelijk in de ontwikkelstrategie (Hoofdstuk 6). Hier gelden de volgende uitgangspunten:

- De informatiebehoefte uit de inventarisatie van Boers (2022) is leidend. Deze inventarisatie wordt in deze opdracht niet verder geconcretiseerd.
- Door gesprekken en interviews met experts wordt bepaald wat er voor de toepassing van maandstatistiek nu al mogelijk is en/of wat er gedaan moet worden om maandstatistiek af te leiden dan wel te implementeren.
- Het onderzoek richt zich niet op seizoensafhankelijkheid in operationele voorspellingen van belastingstochasten; dit wordt binnen Rijkswaterstaat door het WMCN opgepakt.
- Deze studie richt zich op maandstatistiek van de basisstochasten die invoer zijn in het huidige modelinstrumentarium voor hydraulische condities: neerslag, afvoer, wind, zeewaterstand en meerpeil. Statistiek per seizoen kan afgeleid worden uit de maandstatistiek.
 - o De correlaties tussen stochasten en de statistische onzekerheden van stochasten kunnen ook per maand/seizoen verschillen. We zullen niet inhoudelijk op de seizoensafhankelijkheid van correlaties en statistische onzekerheden ingaan, maar wel aanbevelingen doen hoe hiermee om te gaan.
 - o In WBI en BOI is de toestand stormvloedkering ook een basisstochast. Deze beschouwen we hier niet. Het is echter goed om te realiseren dat de kans op een open kering per sluitvraag seizoensafhankelijk kan zijn.
- De ontwikkeling van maandstatistiek staat centraal in dit rapport. Klimaatverandering een belangrijke aanleiding voor de brede, diffuse vraag naar maandstatistiek, maar het is niet mogelijk om met de ontwikkeling van één softwaretool te voorzien in alle vragen. We zullen ons in dit rapport richten op de ontwikkeling van maandstatistiek voor het huidige klimaat. De stap van het huidige klimaat naar klimaatscenario's is methodisch gezien niet groot. Deze stap kan nader worden ingevuld wanneer de maandstatistiek voor het huidige klimaat is afgeleid.
- De consistentie met de jaarstatistiek is van belang bij de afleiding van maandstatistieken:
 - o Als we spreken over 'maandstatistiek' kijken we naar alle maanden van het jaar. Wat betreft consistentie betekent dit dat de statistiek van de winterhalfjaar-maanden consistent zou moeten zijn met de statistiek van het winterhalfjaar; dit is wat we nu 'jaarstatistiek' noemen. De statistiek van alle maanden samen zou consistent moeten zijn met de echte jaarstatistiek; die we nu nog niet hebben.
 - o Iets dat niet in dit rapport wordt beschouwd, maar waar wel aandacht voor moet zijn is dat extreme gebeurtenissen in twee opeenvolgende maanden kunnen optreden. De

kans hierop is vooral bij een trage stochast zoals de afvoer relatief groot. In de ontwikkeling van methoden voor maandstatistiek moet besloten worden of een gebeurtenis aan één of meer maanden kan worden toegekend.

- De ontwikkelstrategie gaat uit van een bescheiden (uitbreiding op bestaand) instrumentarium waar niet teveel kosten aan verbonden zijn. Zie ook Boers (2022).
 - o Instrumentarium zoveel mogelijk onaangepast laten;
 - o Data fysica ongemoeid laten;
 - o Onzekerheden ongemoeid laten.
- Indien verschillende strategieën mogelijk zijn worden deze als keuze opgenomen in de ontwikkelstrategie met bijhorend risicoprofiel.
- De ontwikkelstrategie wordt generiek uitgewerkt (en niet voor ieder watersysteem apart). Wel worden er voorbeelden gegeven van de toepassing van deze maandstatistiek voor toepassingen binnen en buiten de bestaande modellen².

De ontwikkelstrategie start met een beschrijving van de huidige statistiek van de basisstochasten. Dit zijn wind, neerslag, afvoer, zeewaterstand en meerpeil. Een inventarisatie onder experts moet inzicht geven in de (on)mogelijkheden om de maandstatistiek van deze basisstochasten af te leiden. De inventarisatie is grotendeels gebaseerd op de volgende vier basisvragen:

- Kun je schetsen welke statistiek voor basisstochast X wordt afgeleid / beschikbaar is?
Gaat dit om jaar, (winter)halfjaar of maandstatistiek?
- Wat is de toepassing voor deze maandstatistiek?
Hoe generiek is het toepasbaar in verschillende watersystemen?
- Wat is de impact van maandstatistiek (op de huidige softwaremodellen)?
Hoeveel inspanning/tijd kost de afleiding (implementatie in de bestaande software)?
- Wat zijn de consequenties van deze maandstatistiek?
Welke hiaten zijn er in het gebruik/afleiden van deze data?

De ontwikkelstrategie gaat niet alleen in op het afleiden van de maandstatistiek, maar ook op de inpassing van deze maandstatistiek in de bestaande (of indien nodig nieuwe) modellen binnen het huidige instrumentarium. De inventarisatie onder experts moet daarom ook inzicht geven in de (on)mogelijkheden om de maandstatistiek van de basisstochasten te implementeren in de modellen als Hydra-NL, Hydra-Ring, DEZY en Promotor.

Voor sommige toepassingen is de (maand)statistiek van een basisstochast al voldoende. Voor andere toepassingen zoals het bepalen van de overschrijdingsfrequentie van de lokale waterstand op een kanaal in de maand oktober moeten alle stappen worden uitgevoerd. Weer andere toepassingen gebruiken onderdelen van deze keten en vragen specifieke in- en uitvoervariabelen die nu niet in de door Rijkswaterstaat beheerde software beschikbaar zijn. Voorbeelden hiervan zijn de tijdsduur dat onder vrij verval gespuid kan worden of de statistiek van laagwaterstanden. Het mogelijke toepassingsgebied is groot. Het inventariseren van latente behoeften is echter geen doel van dit rapport. We richten ons vooral op de toepassing binnen de bestaande modellen. Ter illustratie zijn een paar voorbeeldtoepassingen buiten het instrumentarium uitgewerkt.

Op basis van de verzamelde informatie wordt de ontwikkelstrategie opgesteld met in achtname van de gehanteerde uitgangspunten. Indien uit de inventarisatie blijkt dat verschillende mogelijkheden bestaan, worden deze uitgesplitst met bijbehorende doorlooptijd en risico's.

² Dit betreft zowel de directe toepassing van maandstatistiek van basisstochasten als de (indirecte) toepassing bij het bepalen van hydraulische condities voor primaire en regionale keringen (waterstanden, golven, ...).

3 Haalbaarheid maandstatistiek basisstochasten

In dit hoofdstuk bespreken we de afleiding van de statistiek van de basisstochasten. De beschrijvingen van de natuurlijke basisstochasten in het beoordelingsinstrumentarium (afvoer, meerpeil, zeewaterstand en wind) zijn gebaseerd op de beschrijvingen in De Waal (2018). De beschrijving van neerslag is gebaseerd op STOWA (2019). De totstandkoming van de huidige statistiek van de basisstochasten is gebaseerd op Chbab (2018).

Naast een beschrijving van de stochasten en de huidige statistiek worden de (on)mogelijkheden voor de afleiding van de maandstatistiek beschreven. De informatie waar de afleiding van de maandstatistiek op is gebaseerd komt voort uit interviews met Henk van den Brink, Nicole Jungermann, Bastiaan Kuijper en Chris Geerse.

3.1 Neerslag

3.1.1 Beschrijving stochast

Wanneer in korte tijd een grote hoeveelheid neerslag valt kan wateroverlast ontstaan. Ook kunnen beken buiten hun oevers treden. Grote rivieren zoals de Rijn en de Maas worden gevoed door zowel smeltwater van sneeuw als door regenval. Voor hoogwaterstanden op de Vecht is vooral regenval in het stroomgebied van belang. Omdat hoge afvoeren van genoemde rivieren (zie paragraaf 3.2) kunnen leiden tot hoge waterstanden langs de primaire waterkeringen, is neerslag ook voor waterveiligheid (indirect) een belangrijke stochast. In het beoordelingsinstrumentarium voor primaire waterkeringen is neerslag echter geen basisstochast. De afvoer is dat wel.

Bij regionale keringen is neerslag één van de parameters die de lokale waterstand op een boezem of een kanaal bepalen. Beheerders kunnen ten behoeve van de beoordeling van regionale keringen op verschillende manieren boezempeilstatistiek afleiden. Sommige beheerders passen de tijdreeksmethode toe en analyseren hiertoe voornamelijk waargenomen neerslag(extremen) in het beheergebied. Anderen passen de stochastenmethode toe, waarbij neerslag één van de stochasten is. STOWA (2019) bevat de basisstatistiek voor neerslag in heel Nederland voor verschillende duren. Weer andere beheerders kiezen een maatgevende neerslaggebeurtenis(sen), met een bepaalde terugkeertijd, en rekenen door wat het effect op het watersysteem en de keringen is. Merk op dat statistiek van extreme neerslag ook relevant is voor het toetsen op de normen voor wateroverlast³. Dit valt niet binnen de scope van dit rapport (primaire en regionale keringen).

³ Sinds de inwerkingtreding van de Waterwet zijn normen voor wateroverlast juridisch verankerd in de provinciale waterverordeningen (deze kunnen onderdeel zijn van omgevingsverordeningen). Provincies zijn hiertoe verplicht op grond van artikel 2.8 van de Waterwet. Er worden in het algemeen normen onderscheiden voor vijf vormen van grondgebruik.

3.1.2 Huidige statistiek

In de huidige neerslagstatistiek (STOWA, 2019) wordt onderscheid gemaakt tussen statistiek van extreme neerslag voor het hele jaar en voor de winter (de maanden november, december, januari en februari: NDJF⁴) voor duren van 10 minuten tot 10 dagen. De jaarstatistiek wordt gedomineerd door zomergerbeurtenissen (maart t/m oktober), waardoor de zomerstatistiek vrijwel gelijk is aan de jaarstatistiek.

Dit blijkt bijvoorbeeld uit het geringe verschil tussen de zomer- en jaarstatistiek voor duren tussen 2 uur en 8 dagen in STOWA2015 (vergelijk tabellen 3.1 en 3.2, pag. 58). Dit geldt zo mogelijk nog sterker voor neerslagduren korter dan 2 uur waarvoor de jaarstatistiek vooral gedomineerd wordt door kortdurende convectieve buien die typisch zijn voor de zomermaanden.

De statistiek in STOWA (2019) is afgeleid voor duren van 10 minuten tot 10 dagen. De terugkeertijden lopen van 0,5 jaar tot 1.000 jaar. Dit wordt de basisstatistiek 2019 genoemd. Voor korte duren tot 12 uur is de statistiek gebaseerd op gepoolde (gecombineerde) jaarmaxima van 10-minutengegevens op ongeveer 36 stations in Nederland in de periode 2003-2016. Op de gepoolde jaarmaxima is een GLO-verdeling gefit. De statistiek voor korte duren is van toepassing op punten in heel Nederland. Er is geen onderscheid naar regio's.

Voor de langere duren (12 uur en langer) is de neerslagstatistiek gebaseerd op gehomogeniseerde en gedetrende uurlijkse metingen in De Bilt in de periode 1906-2014. Op de jaarmaxima van deze reeks is een GEV-verdeling gefit. Een nabewerking is uitgevoerd om de statistiek van korte en lange duren op elkaar aan te laten sluiten.

Ruimtelijke verschillen in extreme neerslag manifesteren zich voor duren van 24 uur en langer. Daarom zijn voor heel Nederland regiofactoren afgeleid om de basisstatistiek voor andere puntlocaties te kunnen berekenen. Deze regionale neerslagstatistiek kent 4 regimes voor het gehele jaar en 3 regimes voor het winterseizoen (NDJF).

STOWA (2019) bevat naast de basisstatistiek ook statistiek van extreme neerslag voor de KNMI'14 klimaatscenario's GL, GH, WL en WH, voor de zichtjaren 2050 en 2085. De doorvertaling van de KNMI'23 scenario's naar statistiek van extreme neerslag zal vermoedelijk in 2024 gereed komen.

3.1.3 Afleiding maandstatistiek

Voor het afleiden van maandstatistiek van extreme neerslag bestaat een aantal mogelijkheden. We bespreken deze hier relatief uitgebreid, omdat de ideeën ook (deels) van toepassing zijn op de andere basisstochasten.

1. Toepassen factormethode Geerse en Zethof (2011) op de neerslaggegevens die in STOWA2015, STOWA2018 en STOWA2019 zijn geanalyseerd. De factormethode is een grove, pragmatische werkwijze om maandstatistiek af te leiden. Voor iedere maand wordt een factor bepaald, die het percentuele verschil tussen de hoogste waarnemingen van maanden uitdrukt. Voor de maand januari wordt meestal factor 1.0 gekozen. De factorwaarden van de andere maanden worden dan telkens ten opzichte van de voorgaande maand bepaald. De factoren kunnen later nog zodanig worden aangepast dat consistentie met de statistiek van het hele jaar (of een bepaald seizoen) wordt verkregen. De methode is verder uitgewerkt voor de stochast afvoer in paragraaf 3.2.3.

⁴ Dit verschilt met het winterhalfjaar voor de afvoer. Daar wordt uitgegaan van oktober t/m maart (ONDJFM).

2. Toepassen statistische methoden uit STOWA2015, STOWA2018 en STOWA2019 op de in die studies beschikbare metingen, waarbij dan maandmaxima worden geanalyseerd in plaats van jaarmaxima. Meer recente gegevens kunnen worden toegevoegd. Deze dienen eerst te worden gevalideerd (vooral de 10-minutengegevens). Aandachtspunten bij deze aanpak zijn:
 - Maandmaxima zijn minder extreem dan de jaarmaxima en de extremewaardenverdelingen zijn hier minder voor geschikt. Een oplossing is het combineren van maanden in seizoenen of het bepalen van het maximum van, zeg, 10 maandmaxima. De beschikbare reeks van De Bilt (voor lange duran) is echter ongeveer 110 jaar lang, waardoor de onbetrouwbaarheid van extreme maandneerslag bij hogere terugkeertijden groot zal zijn. Voor korte duran zijn ongeveer 550 gepoolde jaarmaxima beschikbaar doordat neerslag van ongeveer 36 stations (over 14 jaar) is gecombineerd.
 - Het poolen van jaarmaxima voor korte duran is gebaseerd op de aanname dat de krommingsterm van de extremewaardenverdeling voor extreme neerslag in hele jaren bij korte duran gelijk is voor heel Nederland. De vraag is of deze aanname ook geldt voor extreme neerslag in maanden (seizoenen).
3. Modelreeksen van GRADE gebruiken in combinatie met waarnemingen. GRADE wordt nader toegelicht in paragraaf 3.2. De lengte van de GRADE-modelreeksen is zodanig dat de reeksen geschikt zijn om de statistiek van extreme neerslag af te leiden voor maanden of seizoenen. Hier gelden twee voorbehouden. Ten eerste wordt in GRADE met een lopend venster van een maand gewerkt, waardoor de waarden van bijvoorbeeld de maand augustus gebaseerd zijn op data uit juli, augustus en september. Dit maakt het niet geschikt voor het bepalen van maandstatistiek, maar mogelijk wel voor kwartaalstatistiek. Ten tweede is de temporele resolutie beperkt tot 1 dag, waardoor het niet mogelijk is om GRADE te gebruiken voor de korte duran (van 10 minuten t/m 12 uur). Van Voorst en Van den Brink (2022) concluderen dat zelfs de 2- en 3-daagse extremen (fors) onderschat worden (voor hoge terugkeertijden). Voor langere duran kan een hybride aanpak worden gevolgd. Het combineren van de lange modelreeksen met waarnemingen heeft als voordeel dat de inherent moeilijk te schatten krommingsparameter van de extremewaardenverdeling kan worden geschat uit de lange modelreeksen. De locatie- en schaalparameter kunnen op basis van de waarnemingen worden geschat. Aandachtspunten:
 - Het wordt verstandig geacht om de maxima te fitten die eens-in-de-10-jaar in het betreffende seizoen voorkomen (en niet eens-per-jaar), om de analyse zodoende voldoende diep in de staart van de verdeling toe te kunnen passen.
 - Doordat de gegevens voor heel Nederland beschikbaar zijn kunnen de kansverdelingen op verschillende locaties worden afgeleid.
 - In GRADE zijn de nieuwste inzichten over het huidige klimaat verwerkt, maar het is wel de vraag of de resulterende maandstatistiek consistent is met de huidige jaarstatistiek.
 - Het KNMI werkt in de komende jaren aan een versie van GRADE met een hogere temporele resolutie.
4. Modelreeksen van RACMO gebruiken in combinatie met waarnemingen. RACMO is een regionaal model dat door het KNMI is ontwikkeld (van Meijgaard et al, 2008). RACMO is onlangs gebruikt voor het ontwikkelen van de KNMI'23 scenario's. Hierdoor zijn 16 ensembleleden van elk ongeveer 70 jaar (1950-2020) beschikbaar, die o.a. straling, druk, neerslag, temperatuur en wind bevatten. RACMO is een model met een hogere ruimtelijke en temporele resolutie dan GRADE. De ruimtelijke resolutie is 12 x 12 km². De temporele resolutie van RACMO is 1 uur (versus 1 dag voor GRADE). Dit maakt RACMO geschikt(er) voor het afleiden van de statistiek van extreme neerslag voor zowel lange als korte duran (maar niet voor hele korte duran van 10 minuten t/m 1 uur; bovendien zijn de uurwaarden representatief

voor een gebied van 144 km² en niet op puntlocaties). De RACMO-modelreeksen kennen een bias ten opzichte van de waarnemingen. Op de dagwaarden van de neerslag is daarom een biascorrectie toegepast, zodat de uitkomsten van de modelreeksen beter aansluiten op de waarnemingen. Het combineren van RACMO-modelreeksen met waarnemingen heeft als voordeel dat de inherent moeilijk te schatten krommingsparameter van de extremewaardenverdeling kan worden geschat uit de lange modelreeksen. De locatie- en schaalparameter kunnen nauwkeurig genoeg op basis van de waarnemingen worden geschat.

- Net als eerder opgemerkt wordt het verstandig geacht om de maxima te fitten die eens-in-de-10-jaar in het betreffende seizoen voorkomen (en niet eens-per-jaar), om de analyse zodoende voldoende diep in de staart van de verdeling toe te kunnen passen.
- Doordat de gegevens voor heel Nederland beschikbaar zijn kunnen de kansverdelingen op verschillende locaties worden afgeleid.
- In RACMO zijn de nieuwste inzichten over het huidige klimaat verwerkt, maar het is wel de vraag of de resulterende maandstatistiek consistent is met de huidige jaarstatistiek.
- Het KNMI-model HARMONIE kan binnen RACMO worden geplaatst. HARMONIE heeft een tijdstap van 10 minuten, waardoor het interessante kortdurende gebeurtenissen kan doorrekenen. HARMONIE presteert beter op lokaal niveau en is beter in staat dan RACMO om convectie realistisch te representeren.

Een algemeen aandachtspunt is het verschil tussen winterse en zomerse buien. De zomerse buien zijn maatgevend voor de jaarmaxima van korte durren. De zomerse piekbuien zijn convectieve buien. De huidige jaarmaxima van lange durren vinden over het algemeen in de winter plaats. Bij het samenstellen van statistiek op maandniveau moet niet alleen rekening gehouden worden met consistentie op jaarbasis, maar de seizoenen moeten ook op elkaar aansluiten. Indien de data bijvoorbeeld uitwijzen dat de extremen voor korte durren vooral in de zomer optreden en de extremen voor lange durren vooral in de winter, dan heb je te maken met twee neerslagpopulaties en kan de neerslagstatistiek voor het jaar niet door één kansverdelingsfunctie worden samengevat. Hier moet dan een oplossing voor worden gevonden door bijvoorbeeld verschillende kansverdelingsfuncties voor winter en zomer te gebruiken. Binnen een seizoen is de kansverdelingsfunctie hetzelfde, maar verschillen de parameters per maand. De statistiek voor het hele jaar is een mengsel ('mixture') van de kansverdelingen per maand.

3.2 Afvoer

3.2.1 Beschrijving stochast

Afvoer ofwel afvoerdebiet is de hoeveelheid water, die in een bepaalde tijd, op een bepaald punt, door een rivier stroomt. Het wordt doorgaans uitgedrukt in kubieke meters per seconde.

Rivierafvoer is ten opzichte van de wind en zeewaterstand een trage stochast. De statistische informatie voor de afvoerstochasten bestaat uit overschrijdingsfrequenties en topduren. We beschouwen hier conform WBI 2017 de afvoer van de Maas, Rijn, Vecht en IJssel.

De Maas wordt in twee watersystemen opgedeeld, met de scheiding ongeveer bij Boxmeer. Voor het bovenstroomse deel wordt de statistische informatie gebruikt van locatie Borgharen en voor

het benedenstroomse deel die van locatie Lith⁵. Achtergrond hiervan is het feit dat in het traject bovenstrooms van Boxmeer de topvervlakking van de afvoergolf van belang is: in het traject tussen Borgharen en Boxmeer wordt de afvoergolfvorm geleidelijk vlakker en breder. De golfvorm verandert benedenstrooms van Boxmeer veel minder.

Voor de Rijn wordt de statistische informatie gebruikt van locatie Lobith; voor de Overijsselse Vecht die bij Dalfsen, en voor de IJssel die bij Olst⁶.

N.B. De afvoergolfvorm, de topduur van de afvoertrapezia en de duurlijnen (in de FBC methode in Hydra-Ring) worden hier niet beschouwd.

3.2.2 Huidige statistiek

In het verleden werd de statistiek van de rivierafvoer van de Rijn en de Maas gebaseerd op een statistische analyse van waargenomen afvoerdebieten. Vanaf WBI 2017 is de afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith afgeleid met GRADE (zie kader).

GRADE (Hegnauer et al, 2014)

Het instrument GRADE (Generator of Rainfall And Discharge Extremes) maakt gebruik van simulatie van het weer en een combinatie van hydrologische en hydrodynamische modellen om afvoerstatistiek te berekenen. GRADE bestaat uit drie componenten.

- Stochastische weergenerator. De weergeneratoren voor het stroomgebied van de Maas en de Rijn produceren dagelijkse reeksen van neerslag en temperatuur. De simulatie is gebaseerd op de 'nearest neighbour resampling' (trekken met terugleggen) op basis van meteowaarnemingen uit de laatste ca. 60 jaar en de resulterende synthetische neerslag- en temperatuurreeksen hebben dezelfde statistische eigenschappen als de originele reeksen. De reeksen beslaan 50.000 jaar.
- HBV model⁷. Het neerslag-afvoermodel HBV berekent de afvoer uit de twee synthetische reeksen. Via de temperatuur wordt rekening gehouden met tijdelijke opslag van sneeuw en verdamping.
- Hydrologische en hydrodynamische modellering. Dit onderdeel van GRADE bepaalt hoe de afvoer door de rivier stroomt. Voor de Maas wordt hiertoe het hydrodynamische model Sobek gebruikt op het belangrijkste riviertraject tussen Chooz (op de Frans/Belgische grens) en Borgharen. Voor het belangrijkste deel van de Rijn, van Maxau naar Lobith, worden twee Sobek-modellen gebruikt; het ene model neemt het effect van overstromingen in Duitsland op het verloop van de rivier wel mee, het andere model neemt overstromingen in Duitsland niet mee.

In Hegnauer et al (2014) is de toepassing van GRADE op de rivierafvoeren van de Maas en de Rijn beschreven. Dit resulteert in werklijnen voor de beide afvoeren. In Prinsen et al (2015) zijn de onzekerheden in het SOBEK-model voor de Rijn binnen GRADE gekwantificeerd. Dit heeft geleid tot een nieuwe schatting voor de werklijn en de bijbehorende onzekerheden voor de Rijn bij Lobith.

⁵ In 2021 is in het BOI-HB-uitgangspuntendocument het volgende uitgangspunt vastgelegd "De afvoerstatistiek bij Lith en Olst worden niet meer gebruikt, maar worden vervangen door resp. de statistiek van Borgharen en Lobith".

⁶ In 2021 is in het BOI-HB-uitgangspuntendocument het volgende uitgangspunt vastgelegd "De afvoerstatistiek bij Lith en Olst worden niet meer gebruikt, maar worden vervangen door resp. de statistiek van Borgharen en Lobith".

⁷ Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model. Voor toekomstige GRADE-versies wordt overigens een overstap op het WFlow-model overwogen, dat beter in staat is zowel hoog- als laagwater te modelleren.

Hetzelfde geldt voor de statistiek van de Maasafvoer bij Borgharen. De statistiek van de Maasafvoer bij Lith is op basis van modelberekeningen gekoppeld aan de afvoerstatistiek bij Borgharen. Om precies te zijn is de werklijn van de Maas bij Lith gereconstrueerd op basis van de werklijn van de Maas bij Borgharen en modelberekeningen. Hierbij is aangenomen dat een afvoer bij Borgharen dezelfde herhalingstijd heeft als de bijbehorende afvoer bij Lith (volledige correlatie). Dezelfde aanpak wordt bij de IJssel gevolgd, bij de vertaling van de afvoer van Lobith naar die van Olst.

De statistiek van de Vechtafvoer bij Dalfsen is op een andere manier afgeleid dan de Maasafvoer en de Rijnaafvoer. In het verleden is de werklijn (de frequentielijn) vastgesteld door middel van statistische extrapolatie van afvoergegevens bij Dalfsen in combinatie met een neerslag-afvoermodel, zie Klopstra et al (2002). Later is ten behoeve van de HR2006 een beperkte wijziging doorgevoerd in deze statistiek op basis van aanvullende (Bayesiaanse) analyses. In het kader van WBI 2017 is een studie uitgevoerd naar het effect van het verlengen van de afvoerreeks bij Dalfsen op de bestaande werklijn. Verlenging van de meetreeks resulteert in een iets lagere afvoer met een terugkeertijd van 1250 jaar. De twee frequentielijnen zijn puur statistisch tot stand gekomen, ondanks dat extreem hoge afvoeren tot overstromingen op de bovenloop van de Vecht en de Zijleidingen leiden. Deze overstromingen hebben een waterstand verlagend effect bij Dalfsen. Daarom is in het kader van WBI2017 een nieuwe werklijn afgeleid, waarbij op pragmatische wijze het effect van overstromingen bovenstrooms van Dalfsen is meegenomen. Deze werklijn is tot stand gekomen door op zowel de frequentielijn als bijbehorende onzekerheidsband een bepaalde transformatie toe te passen, waarbij afvoeren bij Dalfsen zonder overstromingen worden vertaald naar afvoeren inclusief overstromingen. Hierbij is rekening gehouden met overstromingen in de bovenloop van de Vecht en overstromingen van de zijleidingen (Geerse, 2016a).

In de afgelopen jaren is GRADE-Vecht ontwikkeld. De neerslaggenerator binnen deze processingketen gebruikt als invoer een historische reeks van 50 jaar neerslag en klimaatstatistiek. Door resampling ontstaat een lange reeks van 50.000 jaar. GRADE-Vecht is onder andere ingezet om de effecten van systeemmaatregelen op extreme afvoeren te onderzoeken. Het is mogelijk om afvoerstatistiek bij Dalfsen af te leiden met GRADE-Vecht; binnen WBI2017 is voor de werklijn van Geerse (2016a) gekozen. Een voordeel van GRADE-Vecht is dat de historische reeks ook extreme afvoeren in de zomer bevat.

3.2.3 Afleiding maandstatistiek

Voor het afleiden van maandstatistiek van afvoeren beschouwen we verschillende methoden. Iedere methode heeft zijn eigen kenmerken met bijbehorende implicaties voor de betrouwbaarheid en implementatie.

Factormethode Geerse en Zethof (2011)

De factormethode is een grove, pragmatische werkwijze om maandstatistiek af te leiden op basis van waargenomen afvoeren. In Geerse en Zethof (2011) is deze methode geïntroduceerd en toegelicht voor afvoeren. Definieer voor maand of seizoen i de factor a_i op zo'n manier dat deze factor representatief wordt voor de mate waarin extreme afvoeren in deze maand voorkomen. Als maand i_1 bijvoorbeeld 20% hogere afvoeren laat zien dan maand i_2 , is de verhouding $a_{i_1}/a_{i_2} = 1.2$. Het is handig om in eerste instantie de maand januari, die doorgaans de hoogste afvoeren laat zien, een factor $a_i = 1$ toe te kennen. Deze factoren kunnen later nog worden bijgesteld om consistentie met het winterhalfjaar te verkrijgen.

Om de a-factoren te bepalen wordt vooral gelet op de hoogste waarnemingen, omdat die (uiteraard) het meest bepalend zijn voor hoge waterstanden (hydraulische belastingen). We kunnen bijvoorbeeld in elke maand de 5 hoogste waarnemingen selecteren, en voor elke maand deze 5 getallen middelen. Voor bijvoorbeeld januari levert de middeling van de 5 hoogste waarnemingen 10965 m³/s op, en voor februari 9658 m³/s. Omdat de laagste Rijnafvoer in de probabilistische modellering van hydraulische belastingen gelijk is aan 750 m³/s, wordt de factor dan bepaald ten opzichte van deze laagste afvoer. De factor wordt op basis van de 5 hoogste waarnemingen dan gelijk aan $(9658 - 750)/(10965 - 750) = 0.872$. Aldus kan voor iedere maand een factor worden bepaald.

De consistentie-eis voor de afvoer wordt ingegeven door de wens dat als een dijk alleen door de afvoer wordt bedreigd, de hydraulische belastingen volgens de aangepaste afvoerstatistiek precies moeten overeenkomen met de resultaten op basis van de originele statistiek. In de rekenmodellen Hydra-NL en Hydra-Ring wordt op dit moment alleen het winterhalfjaar beschouwd, vanuit de gedachte dat tijdens de zomermaanden geen significante bedreigingen voorkomen. De aanpassing van de statistiek dient dan zodanig te zijn dat, losjes gezegd, het totale aantal afvoergolven in het winterhalfjaar na de aanpassing hetzelfde is gebleven. Als er meer extreme afvoeren in januari voorkomen, moeten er in de overige wintermaanden minder extreme afvoeren voorkomen, op zo'n manier dat het totale aantal afvoergolven dat een bepaald niveau overschrijdt hetzelfde blijft.

Statistische analyse van extremen

Extreme afvoeren in seizoenen, kwartalen en maanden kunnen in principe op dezelfde manier statistisch worden geanalyseerd als de jaarextremen. Op maandniveau zullen de extremen echter minder extreem zijn dan op jaarniveau, waardoor de extremewaardenverdeling minder geschikt is om de afvoerstatistiek te beschrijven.

Het ligt meer voor de hand om afvoerstatistiek voor kwartalen/seizoenen of zomerhalfjaar en winterhalfjaar af te leiden uit waarnemingen. Dit kan door naar de hoogste afvoeren per periode te kijken of met een peaks-over-threshold methode. In ENW2021 is de statistiek van de extreme Maasafvoer bij Borgharen bijvoorbeeld bepaald voor zowel het hele kalenderjaar als het zomerhalfjaar door een GEV- en Gumbelverdeling op de hoogst waargenomen afvoeren in de kalenderjaren respectievelijk zomerhalfjaren te fitten.

GRADE

In paragraaf 3.2.2 is toegelicht hoe de (winterhalf)jaarstatistiek van de afvoer met GRADE is afgeleid voor de Maas, de Rijn en de Vecht. In ENW2021 is de afvoerstatistiek van de Maasafvoer in het zomerhalfjaar met GRADE bepaald.

De lange reeksen van GRADE bevatten voldoende gegevens om extremewaardeverdelingen te schatten voor delen van jaren. GRADE werkt met een schuivend tijdvenster van een maand, waardoor de waarden van bijvoorbeeld de maand augustus gebaseerd zijn op data uit juli, augustus en september. Dit maakt het minder geschikt voor het bepalen van maandstatistiek. Het is logischer om kwartaalstatistiek te bepalen. Een hybride aanpak waarin GRADE modelreeksen met waarnemingen worden gecombineerd biedt als voordeel dat de krommingsparameter van de extremewaardenverdeling met de lange modelreeksen kan worden gefit. De andere parameters kunnen uit de waargenomen afvoeren worden gefit.

Voorbeeld GRADE-Vecht

Welke inspanning is nodig om seizoensafhankelijke statistiek van de Vecht te Dalen af te leiden? Jungermann (HKV) stelt dat het op basis van de huidige uitkomsten van GRADE-Vecht relatief eenvoudig is om hieruit de statistiek op maandniveau te bepalen. Dit kan met de peaks-over-threshold of de methode van jaarmaxima. Als je ook de impact op de hydraulische belastingen (waterstanden) wilt inschatten, dan ben je met een inspanning van 10 dagen al een heel eind.

Voor de Maas en de Rijn kan je het ook op deze manier proberen, maar de vraag is of een betrouwbare inschatting mogelijk is van de afvoerstatistiek in de zomer. Hoge afvoerpieken in de zomer zijn namelijk niet goed vertegenwoordigd in de historische reeksen van de Rijn en Maas. Bijkomend probleem is dat het inherent lastig is om in te schatten hoe een droog rivierbed in de zomer reageert op een hoge afvoer.

De vervolgstap is het doorrekenen van de HR. Hier worden waterbewegingsmodellen voor gebruikt. Over het algemeen worden stationaire berekeningen gemaakt. De vraag is of dit niet beter kan. Theoretisch kan het, maar het is volgens Jungermann beter om eerst te beginnen met het aanpassen van GRADE (voor seizoensafhankelijke statistiek). Hieruit kan geleerd worden wat de belangrijkste triggers zijn. Voer use cases uit, bepaal de impact op de hydraulische belastingen en test het model.

Beperking van het GRADE Vecht model is dat het is gebaseerd op dagdata. In werkelijkheid reageert het systeem op uurlijkse veranderingen in neerslag. Dit speelt ook bij de Maas, minder bij de Vecht. Ook is GRADE gekalibreerd op het hoogfrequente bereik bij de huidige statistiek. Het is geschikt voor terugkeertijden tussen 10 en 5.000 jaar.

RACMO

Modelreeksen van RACMO gebruiken in combinatie met waarnemingen. RACMO is een regionaal model dat door het KNMI is ontwikkeld (van Meijgaard et al, 2008). In paragraaf 3.1.3 is RACMO beschreven aan de hand van de stochast neerslag. RACMO is een model met een hogere ruimtelijke en temporele resolutie dan GRADE. Dit maakt RACMO geschikt(er) voor het afleiden van de statistiek van extreme neerslag voor zowel lange als korte dueren die benodigd zijn voor het modelleren van de afvoer.

Het algemene aandachtspunt van het verschil tussen winterse en zomerse buien werkt ook door op de bepaling van de winterse en zomerse afvoeren. De zomerse buien zijn maatgevend voor de jaarmaxima van korte dueren. De jaarmaxima van lange dueren vinden over het algemeen in de winter plaats. Bij het samenstellen van statistiek op maandniveau moet niet alleen rekening gehouden worden met consistentie op jaarbasis, maar de seizoenen moeten ook op elkaar aansluiten.

3.3 Wind

3.3.1 Beschrijving stochast

Wind is de primaire opwekkende kracht achter golven en daarom is de wind in nagenoeg alle watersystemen van belang. De stochast wind is een snelle stochast, dat wil zeggen een stochast waarvan de waarde relatief snel fluctueert in de tijd.

De stochast bestaat uit twee componenten: de windrichting en de windsnelheid.

Windrichting

De windrichting (in veel gevallen de windrichting ten tijde van de maximale windsnelheid) wordt behandeld als een discrete stochast: deze stochast heeft in de rekenmethode van het beoordelingsinstrumentarium een beperkt aantal mogelijke realisaties. In de meeste watersystemen wordt standaard uitgegaan van de 16 windrichtingen: 22.5, 45.0, ..., 360.0 graden ten opzichte van Noord. Voor een aantal andere watersystemen wordt nog gewerkt met 12 windrichtingen⁸: 30, 60, ..., 360 graden ten opzichte van Noord, zolang er nog geen nieuwe productiesommen voor 16 sectoren beschikbaar zijn.

Elk van deze windrichting-realisaties representeert de windrichtingsector rond de betreffende windrichting. De kans van voorkomen van elk van deze realisaties wordt gespecificeerd in een tabel.

Windsnelheid

De windsnelheid is een continue stochast. De (windrichtingsafhankelijke) overschrijdingskansen van de windsnelheid worden gespecificeerd voor een referentielocatie. Doorgaans is dit een KNMI meetstation, voor veel watersystemen wordt de statistiek gebruikt die is afgeleid voor KNMI meetstation Schiphol. Voor de Bovenrivieren wordt echter een ander KNMI-referentiestation gebruikt (Deelen), en ook voor de Kust en Scheldes worden gebiedsspecifieke keuzes gemaakt.

3.3.2 Huidige statistiek

De statistiek van extreme windsnelheden is in WBI 2017 zowel per windrichting als omnidirectioneel afgeleid. Voor de statistische analyse zijn windmetingen van 21 windstations verspreid over heel Nederland uit de periode 1970-2008 (39 jaar) beschouwd. Deze periode bevat weinig hiaten en is voldoende betrouwbaar bevonden (Caires, 2009). Beschouwd is de potentiële windsnelheid.

Uit de series potentiële windsnelheden zijn twee sets geselecteerd voor de statistische analyse. Een serie jaarmaxima en een serie pieken van windsnelheden boven een bepaalde drempelwaarde, de zogenoemde Peaks over Threshold (POT-series). Zowel de omnidirectionele als de richtingsafhankelijke series zijn beschouwd. Hierbij zijn windsectoren van 30 graden beschouwd.

De analyse van de jaarmaxima is uitgevoerd met behulp van de Gegeneraliseerde Extreemwaarden verdeling (GEV) en die van de POT-series met de Gegeneraliseerde Pareto Verdeling (GPV). Na uitgebreide statistische analyse blijkt dat GEV kansverdeling Type I (de Gumbel verdeling) de beste

⁸ "Voor watersystemen met 12 windrichtingen wordt binnen BOI geleidelijk overgestapt naar 16 windrichtingen".

keuze voor de verdeling van jaarmaxima van windsnelheden. De POT series blijken volgens GPV Type I (exponentiële verdeling) te zijn verdeeld. Dit geldt voor zowel de omnidirectionele als de richtingsafhankelijke series. De exponentiële kansverdeling op basis van POT series blijkt verder beter te fitten dan de Gumbel kansverdeling op basis van jaarmaxima. Er is daarom besloten om de windstatistiek ten behoeve van WBI 2017 te baseren op de exponentiele kansverdeling gefit op POT series, zie (Caires, 2009). Deze kansverdeling is geldig voor het gehele jaar.

N.B. Rijkswaterstaat is voornemens om voor de Kust over te stappen op de zeewaterstand- en windstatistiek van De Valk en Van den Brink (2023), zie ook paragraaf 3.4.

3.3.3 Afleiding maandstatistiek

Voor het afleiden van maandstatistiek (of seizoenstatistiek) zijn net als voor de afvoeren meerdere aanpakken mogelijk:

- *Factormethode*

In Geerse en Zethof (2011) is verkend in hoeverre de voorkeur van storm en afvoer samenvalt op maandniveau, en wat de invloed daarvan zou zijn op de waterstanden en benodigde kruinhoogten in het Benedenrivierengebied. Hierbij is de factormethode toegepast om statistiek per maand af te leiden. Dat is gedaan op grond van een eenvoudige data-analyse, waaruit voor de rivieren en voor Schiphol voor elke maand een factor volgt waarmee de bestaande statistiek wordt aangepast. Daarna is ervoor gezorgd dat de maandstatistieken consistent zijn met de bestaande statistiek voor het winterhalfjaar. Bij benadering betekent die consistentie dat het aantal extreme afvoeren en stormen in de bestaande en aangepaste statistiek gelijk blijft.

- *Combineren van modelreeksen (RACMO) met waarnemingen.*

De in paragrafen 3.1.3 en 3.2.3 beschreven aanpak kan ook op de RACMO-modelreeksen van de wind worden toegepast. Door de beperkte lengte van de huidige reeks - 40 jaar - is het niet mogelijk om direct op basis van (uitsluitend) waarnemingen betrouwbare maandstatistieken af te leiden.

N.B. Voor het berekenen van hydraulische belastingen zijn de kansverdelingen van de wind op verschillende stations per windrichting en omnidirectioneel nodig. Verder dient de maandstatistiek aan te sluiten op de huidige (winterhalf)jaarstatistiek.

3.4 Zeewaterstand

3.4.1 Beschrijving stochast

De zeewaterstand is een snelle stochast (met een korte tijdschaal). In WBI 2017 wordt onderscheid gemaakt tussen de zeewaterstand op de gebiedsrand en de zeewaterstand lokaal.

- Zeewaterstand op de gebiedsrand

In Hydra-Ring wordt de stochast 'zeewaterstand op gebiedsrand' gebruikt voor de watersystemen Benedenrivieren en Oosterschelde. De statistiek van de stochast zeewaterstand is in WBI 2017 gegeven in de vorm van een kansverdeling van de zeewaterstand bij gegeven windrichting. De kansverdelingen hebben betrekking op de maximale waterstanden gedurende een getijperiode. Er is geen waterstandsverloop afgeleid.

- Zeewaterstand lokaal.

In de watersystemen van het watersysteemtype Zee wordt de statistiek van de lokale waterstand bepaald uit:

- o triangulaire interpolatie van de statistiek van drie basisstochasten 'zeewaterstand op referentielocatie X', namelijk op referentielocaties X1, X2 en X3.

3.4.2 Huidige statistiek

De statistiek van zeewaterstanden langs de Nederlandse kust is gebaseerd op de een studie uit 1993. Hierin worden de "Basispeilen 1985" geïntroduceerd. De basispeilen zijn maatgevende hoogwaterstanden met een overschrijdingsfrequentie van eens in 10.000 jaar. Uitgangspunt van WBI 2017 is dat de vigerende basispeilen gehandhaafd blijven en er geen actualisatie plaatsvindt. De vigerende basispeilen zijn in 1993 afgeleid voor de zogenaamde hoofdstations langs de Nederlandse kust (Dillingh, 1993). Hierbij is gebruik gemaakt van hoogwatermetingen (HW) tot en met 1985; de afgeleide basispeilen gelden dan ook voor de situatie in het jaar 1985. Bij het bepalen van de basispeilen is in eerste instantie een statistische onderzoek uitgevoerd op basis van individuele stations; hierbij zijn diverse statistische methoden onderzocht zoals het fitten van een Gegeneraliseerde Pareto Verdeling (GPV), de Gegeneraliseerde Extreme waarden Verdeling (GEV) of de zogenaamde VVM-0 (een niet parametrische methode ontwikkeld door Laurens de Haan van de Erasmus universiteit). Dit is een methode waarbij extremen behorende bij lage frequenties of kansen worden geschat zonder gebruik te maken van parametrische verdelingsfuncties. Uitgaande van de 5 hoofdstations kwam de VVM-0 als meest geschikte methode naar voren, zie (Dillingh, 1993) voor meer details. Naast het statistische onderzoek is ook onderzoek gedaan naar fysica waarbij voornamelijk de samenhang tussen verschillende hoofdstations is beschouwd.

In het eindverslag van de basispeilen langs de Nederlandse kust (Dillingh et al., 1993) worden de volgende hoofdstations genoemd, waarbij ook de lengtes van de beschikbare meetreeksen van HW-standen zijn gegeven:

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

Later is ook het basispeil voor station West Terschelling toegevoegd. Naast deze 6 stations is er een set zeewaterstandsstations nodig voor het uitvoeren van de zogenoemde triangulaire interpolaties. Het betreft de volgende stations: Lauwersoog, Hansweert, Den Oever, IJmuiden en Huibertgat.

In het kader van WTI-2011 is onderzoek gedaan naar het effect van het verlengen van de meetreeksen met data uit de periode 1986 t/m 2007. De verschillen waren dusdanig klein dat besloten is om verder te werken met de basispeilen (en de bijbehorende statistiek). In WBI 2017 zijn de vigerende basispeilen uit 1993 op basis van HW metingen t/m 1985 gehandhaafd. Wel zijn toeslagen op de basispeilen berekend voor het peiljaar 2023 in verband met de stijging van het hoogwater (zeespiegelrijzing en lokale effecten) na 1985. Chbab (2017) vermeldt de precieze toeslagen die voor de verschillende kuststations zijn verwerkt in Hydra-Ring.

Ontwikkelingen na WBI 2017

Recent zorgt de beschikbaarheid van zeewaterstanden gesimuleerd met het WAQUA DCSM-v5 model op basis van de SEAS5 schuifspanning en luchtdruk voor meer inzichten in de extreme

waarden. Er zijn effectief ongeveer 8000 jaar⁹ gesimuleerde gegevens beschikbaar (van den Brink, 2020). Deze gegevens zijn relevant om windrichting-afhankelijke staartverdelingen en terugkeerwaarden van potentiële windsnelheid (een gestandaardiseerde windsnelheid) en hoogwaterstand (de hoogste zeewaterstand bereikt tijdens een hoogwater) af te leiden. Om systematische fouten in modelsimulaties van de zeewaterstanden te corrigeren zijn meetgegevens gebruikt (De Valk en Van den Brink, 2023).

Er kan gesteld worden dat de gesimuleerde gegevens met name van waarde zijn voor de schatting van de *vormparameter* van de staartverdeling, want dit is de dominante bron van onzekerheid in schattingen van staartverdelingen. Fouten in *schaal* en *niveau* zijn nauwkeurig te corrigeren aan de hand van relatief kleine datasets van meetgegevens (de Valk en van den Brink, 2020; 2021).

3.4.3 Afleiding maandstatistiek

Voor de bepaling van maandstatistiek zijn verschillende opties mogelijk. Het is mogelijk om enkel waarnemingen gebruiken of een combinatie van waarnemingen en modelreeksen. Het gebruik van alleen modelreeksen is momenteel nog niet accuraat genoeg om de statistiek geheel te baseren op gesimuleerde gegevens. Om systematische fouten in modelsimulaties van de zeewaterstanden te corrigeren worden meetgegevens gebruikt (De Valk en Van den Brink, 2023).

Factormethode

De factormethode is een pragmatische manier om statistiek per maand af te leiden. In Geerse en Zethof (2011) is geconstateerd dat voor de zeewaterstand (per windrichting) een afwijkende methode nodig was in vergelijking met de stochasten afvoer en wind. De aangepaste aanpak voor de zeewaterstand bestond er uit dat per maand een percentage werd gekozen waarmee deze bijdraagt in het totaal van de aantallen overschrijdingen binnen het winterhalfjaar.

Uit (een gesprek na) het interview met Geerse (HKV) blijkt dat hij deze methode voor de zeewaterstand niet meer zou toepassen. Door het vrijkomen van lange ECMWF-reeksen ligt het meer voor de hand om daar maandstatistiek uit af te leiden.

Modelreeksen met metingen

ECMWF seizoensverwachtingen

Met het WAQUA DCSM-v5 model zijn ECMWF ensembles beschikbaar die in verschillende maanden starten (en een halfjaar doorlopen). Daardoor zijn er gegevens over de zeewaterstand per maand beschikbaar¹⁰. Deze extreme waarden, uitgesplitst per windrichting, kunnen worden gebruikt om de vormparameter van een staartverdeling (zoals de gegeneraliseerde Weibull) af te leiden. De schaal- en niveauparameter kunnen worden bepaald aan de hand van metingen, die uitgesplitst worden per maand en per windrichting.

Indien er te weinig datapunten overblijven is er nog de mogelijkheid om toch de factormethode te betrekken in deze aanpak. Dan is het bijvoorbeeld mogelijk om de analyse per windrichting uit te voeren waarmee de vorm-, schaal- en niveauparameter worden afgeleid en vervolgens factoren uit de modelreeks per maand worden afgeleid om deze verdelingen te schalen naar de verschillende

⁹ Iedere maand vanaf 1981 is een ensemble van 25-50 seizoensverwachtingen gestart; van elke run over 7 maanden is de eerste maand verwijderd om te verzekeren dat de data van verschillende ensemble-leden vrijwel onafhankelijk zijn (De Valk en Van den Brink, 2023).

¹⁰ van den Brink (KNMI) zal de ECMWF seizoensverwachtingen herberekenen in 2024 en dan zijn de nieuwe zeewaterstandreeksen medio 2024 beschikbaar.

maanden. Aandachtspunt is dat er voor gezorgd moet worden dat de maandstatistieken consistent zijn met de bestaande statistiek voor het winterhalfjaar.

RACMO

Op dezelfde manier als hierboven is beschreven voor de ECMWF ensembles en op dezelfde wijze als in paragraaf 3.1.3 kan de maandstatistiek van zeewaterstanden ook worden gebaseerd op nog uit te voeren runs met RACMO¹¹ in combinatie met waarnemingen.

3.5 Meerpeil

3.5.1 Beschrijving stochast

Het meerpeil is de ruimtelijk gemiddelde waterstand in een meer en is daarmee een maat voor het volume water in het beschouwde meer. Het meerpeil is veelal een afgeleide van de combinatie van peilbeheer, aanvoer van water (uit bijvoorbeeld rivierafvoer en/of gemalen) en de mogelijkheden om water af te voeren (doorgaans beïnvloed door wind en zeewaterstand). Het meerpeil is een trage stochast. Daarmee speelt ook de duur een rol.

In WBI 2017 is het IJsselmeerpeil een basisstochast voor de regio's IJsselmeer, Vechtdelta en IJsseldelta. Het Markermeerpeil is een basisstochast voor het belastingmodel voor het Markermeer.

De stochast IJsselmeerpeil is gerelateerd aan de afvoerstochast Olst (IJssel), zowel in termen van statistische correlatie als in termen van schematisatie van het faseverschil tussen de twee golfvormen in het probabilistisch model. Deze correlatie is alleen relevant voor de watersystemen IJsseldelta en Vechtdelta, niet voor het IJsselmeer zelf.

De keringen langs de 'kleine Meren' Grevelingen, het Volkerak-Zoommeer en het Veluwerandmeer zijn ook primaire waterkeringen. Voor berekeningen van hydraulische belastingen op de waterkeringen is ook voor deze meren meerpeilstatistiek benodigd.

3.5.2 Huidige statistiek

IJsselmeerpeil

Voor WBI 2017 is besloten om de IJsselmeerpeilstatistiek zoals aanvankelijk afgeleid en geïmplementeerd in Hydra-VIJ, en later in Hydra-zoet, te handhaven. Dit betekent dat er geen hernieuwd onderzoek is uitgevoerd naar de meerpeilstatistiek. De meerpeilstatistiek van Hydra-VIJ is uitvoerig beschreven in (Geerse, 2006), en is gebaseerd op statistische extrapolatie van meet- en modelgegevens. De gehanteerde meetreeksen omvatten de periode 1932 tot en met 2002. Dit is met inbegrip van de laatste hoge meerpeilsituaties, waaronder die van 1998 en 2002. De IJsselafvoer te Olst is het meest bepalend voor de statistiek van het IJsselmeerpeil.

De werklijn van het IJsselmeerpeil bestaat uit drie rechte lijnstukken. Deze werklijn is onder andere gebaseerd op een extreme-waarden analyse op basis van de zogenoemde Peaks Over Threshold (POT) series; dergelijke series bevatten onafhankelijke pieken die boven een bepaalde niveau uitsteken, de drempelwaarde. Daarnaast wordt voor de selectie van pieken een zichtduur

¹¹ van den Brink verwacht in Q1 2024 de op RACMO gebaseerde zeewaterstandreeksen te hebben gegenereerd.

toegepast om onafhankelijkheid te garanderen van opeenvolgende pieken. Voor het meerpeil geldt een drempelwaarde van $-0,20 \text{ m+NAP}$ met een zichtduur van 15 dagen, zie (Geerse, 2006).

De 95%-betrouwbaarheidsintervallen zijn afgeleid met de zogenoemde bootstrapmethode; zie voor details over de toegepaste methode en afgeleide betrouwbaarheidsbanden (Geerse en Wojciechowska, 2014). Deze grenzen zijn nodig om de statistische onzekerheid in meerpeilstatistiek te kwantificeren.

Markermeerpeil

Voor WBI 2017 is besloten om de vigerende meerpeilstatistiek van het Markermeer te handhaven. Deze statistiek is afgeleid in 1996. Het Markermeer is ontstaan in 1976 door de aanleg van de dijk van Enkhuizen naar Lelystad. De tijdreeks van meetgegevens besloeg daarmee in 1996, toen de meerpeilstatistiek werd afgeleid, 20 jaar. De reeks is kunstmatig verlengd met gereconstrueerde meerpeilen voor de periode 1932-1976. Op basis van de samengestelde tijdreeks is een frequentielijn en een duurlijn gegenereerd. De frequentielijn en duurlijn zijn beschreven in (Lodder, 2007). Voor een nadere onderbouwing van de gebruikte statistiek wordt verwezen naar (WL | Delft Hydraulics, 1998) en (RWS-RIZA, 1999). Deze statistiek is gebruikt voor de Hydra-M berekeningen ten behoeve van HR-2006 (Lodder, 2007).

De 95%-betrouwbaarheidsintervallen zijn bepaald met de bootstrapmethode (Geerse en Wojciechowska, 2014).

Tussen de statistiek van het IJsselmeer- en Markermeerpeil bestaat een sterke relatie. Mede om deze reden wordt evenals voor het IJsselmeer geen fysisch maximum aangehouden voor het Markermeer.

Kleine meren

In Geerse (2012) is de statistiek van de meerpeilen van de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer afgeleid. De overschrijdingskans voor het Veluwerandmeer is afgeleid in Geerse (2007). In Geerse (2016b) is voor deze meren de meerpeilstatistiek inclusief statistische onzekerheid afgeleid. De statistiek betreft de overschrijdingskans van het piekmeerpeil. Meerpeilgolven worden geschematiseerd door trapezia met een bepaalde basisduur B . Daarbij wordt het winterhalfjaar gevuld met een aantal trapezia. Het piekmeerpeil is het maximum van het trapezium. Als $B=30$ dagen, dan gaan er 6 trapezia in een winterhalfjaar. De basisduren en minimum meerpeilen van de kleine meren staan in onderstaande Tabel 3-1.

Meer		Basisduur B	Minimum meerpeil m_0
		dagen	m+NAP
Naam	Afkorting		
Veluwerandmeer	VRM	60	-0.30
Volkerak-Zoommeer	VZM	20	-0.10
Grevelingen	GRV	10	-0.23

Tabel 3-1 Enkele gegevens voor de kleine meren.

Ontwikkelingen na WBI 2017

In het BOI zal de meerpeilstatistiek van het IJsselmeer en het Markermeer worden afgeleid met het probabilistische model DEZY (Kuijper en Geerse, 2021). Dit model gebruikt als invoer onder andere statistiek van neerslag, afvoer, wind en zeewaterstand. In het onderstaande kader staat enige achtergrond bij het model DEZY.

DEZY

Voor goed peilbeheer in het IJsselmeergebied is het essentieel om inzicht te hebben in de waterstandstatistiek. Dat geldt zowel voor huidige situatie als in de toekomst wanneer rivierafvoeren, neerslag en zeewaterstanden toenemen als gevolg van klimaatverandering. Om daar op in te kunnen spelen is het wenselijk snel en eenvoudig de effecten van systeemmaatregelen op de waterstandstatistiek te kunnen berekenen.

Met dit doel is door HKV, in samenwerking met Rijkswaterstaat en de projectgroep Slim Watermanagement, het model DEZY ontwikkeld. Het is een probabilistisch model, waarin de statistiek van afvoer, neerslag, wind en zeewaterstand wordt gecombineerd met een relatief eenvoudig reservoirmodel en een fysische relatie voor de spuidebieten. De kracht van het model zit in de korte rekentijden, waardoor de effecten van klimaatverandering en systeemmaatregelen snel zichtbaar gemaakt kunnen worden.

Het model is toegepast in onder andere het project Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) om de benodigde pompcapaciteit op de Afsluitdijk te bepalen om de meerpeilen op het IJsselmeer en Markermeer te kunnen handhaven. Maar bijvoorbeeld ook in faalkansstudies voor het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, waarbij onderzocht is wat de huidige faalkans is van het systeem en hoe deze kan worden verlaagd door toepassen van slim watermanagement maatregelen (Vermeulen en Kuijper, 2021).

3.5.3 Afleiding maandstatistiek

De maandstatistiek voor het IJssel- en Markermeer en die voor het Volkerak-Zoommeer kan met het model DEZY worden afgeleid. DEZY is niet toepasbaar op de Veluwerandmeren en de Grevelingen. Voor het afleiden van de maandstatistiek van de Veluwerandmeren en de Grevelingen moet nog een methode worden opgesteld, die aansluit op de jaarstatistiek uit Geerse (2012) en Geerse (2007).

DEZY

Op dit moment is het al mogelijk om met maandstatistiek als invoer te rekenen in DEZY. De gebruiker dient hiertoe wel maandstatistiek van afvoer, neerslag, wind en zeewaterstand in te voeren. Voor wind en zeewaterstand, waarbij tijdsverlopen worden getrokken uit een langjarige meetreeks, kan de gebruiker dat doen door de maand(en) te specificeren waaruit getrokken wordt. Vervolgens moet de gebruiker nog enkele nabewerkingen op de uitvoer uitvoeren om maandstatistiek van het meerpeil te verkrijgen.

Afvoerstatistieken per maand voor DEZY

Om statistiek per maand voor het meerpeil te bepalen, moet de maandstatistiek van de afvoer bij Olst en Dalfsen in DEZY worden opgegeven¹². Het ligt voor de hand om daarvoor gegevens te gebruiken zoals afgeleid in Geerse en Zethof (2011). Een probleem is echter dat DEZY indertijd is afgeregeld op basis van afvoerstatistiek die niet geheel overeenstemt met de statistiek uit de HR2006. Omdat de details van de afvoerstatistiek niet heel nauw steken voor de uitkomsten van DEZY, worden daarom maandfactoren gebruikt om de gebruikelijke afvoerstatistiek uit DEZY om te vormen naar afvoerstatistiek per maand. Deze factoren zijn afkomstig uit Geerse en Zethof (2011).

¹² Ook de afvoerstatistiek voor de Eem moet worden opgegeven in DEZY, de keuzes daarvoor zijn wel relevant voor het Markermeer maar hebben vrijwel geen effect op de uitkomsten voor het IJsselmeer.

Wel zijn de factoren uit deze referentie nog geschaald, op zo'n manier dat een factor 1 ongeveer overeen stemt met de afvoerstatistiek voor het (gehele) winterhalfjaar uit de HR2006.

Wind en zeewaterstand per maand voor DEZY

In DEZY wordt voor de wind en de zeewaterstand (bij Kornwerderzand, Den Oever en IJmuiden) gebruik gemaakt van een dataset afkomstig van uurmetingen uit de periode 1981 t/m 2010. Als voor bijvoorbeeld januari statistiek moet worden afgeleid, kan in DEZY worden aangegeven dat data voor wind en zeewaterstand 'moeten worden getrokken' uit al de maanden januari die in de dataset voorkomen. Een probleem is dan dat wel erg weinig data overblijven, waardoor de statistische ruis groot wordt. Vandaar dat ook de metingen uit de 'omliggende maanden' december en februari worden gebruikt. Analoog hieraan worden voor het afleiden van maandstatistiek voor februari dan data gebruikt uit januari, februari en maart, met een analoge aanpak voor de overige maanden. Dit is nodig omdat DEZY (standaard) met een rekenperiode van 45 dagen werkt, ook al is de basisduur 30 dagen. Er is sprake van een 'inspeelperiode' waardoor enkel de meetdata uit één maand te kort is.

N.B. De zeewaterstand en wind zijn momenteel anders geïmplementeerd dan de afvoer en neerslag in DEZY. Er worden namelijk tijdreeksen getrokken met een uniforme verdeling. Het is wel een wens om de zeewaterstand als stochast mee te nemen, maar dat geeft complicaties in de modellering. Het moet nog onderzocht worden of modelreeksen hiertoe kunnen worden benut.

4 Haalbaarheid implementatie in bestaande modellen

In dit hoofdstuk bespreken we de haalbaarheid van de implementatie van maandstatistiek in de bestaande modellen. Beknopte beschrijvingen van de modellen in het beoordelingsinstrumentarium (Hydra-Ring en -NL) worden gegeven in Diermanse et al. (2013) en Duits (2020).

Naast een beschrijving van de modellen worden de (on)mogelijkheden voor de implementatie van de maandstatistiek beschreven. De informatie over de haalbaarheid is gebaseerd uit interviews met Karolina Wojciechowska, Matthijs Duits en Bastiaan Kuijper.

4.1 DEZY

4.1.1 Beschrijving

DEZY is beschreven paragraaf 3.5. Met DEZY kan onder andere meerpeilstatistiek voor het IJsselmeergebied worden berekend.

4.1.2 Huidige mogelijkheden

In paragraaf 3.5 is toegelicht dat DEZY op dit moment al met maandstatistiek van afvoer en wind kan rekenen. De gebruiker kan echter slechts statistiek voor 1 periode tegelijk invoeren in de vorm van een invoerbestand. Om te rekenen met maandstatistiek dient de gebruiker daarom voor iedere maand een berekening te maken door telkens de inhoud van het invoerbestand aan te passen. Vervolgens moet de gebruiker zelf een nabewerking doen op de uitvoer van de berekeningen om de overschrijdingskansen per maand en per jaar te bepalen.

4.1.3 Implementatie maandstatistiek

Om geautomatiseerd met de statistiek van iedere maand te kunnen rekenen zijn aanpassingen aan DEZY nodig. De meest eenvoudige oplossing is het schrijven van een script dat DEZY meerdere keren aanroept met telkens het invoerbestand voor de betreffende maand en dan de resultaten combineert tot jaarstatistiek. Gegeven dat de benodigde maandstatistiek voor de neerslag en de afvoer al beschikbaar is, zijn de kosten van deze oplossing minder dan 10.000 euro.

4.2 Hydra-NL

4.2.1 Beschrijving

Hydra-NL is een probabilistisch beoordelingsprogramma voor de veiligheid van de harde primaire waterkeringen in Nederland (Duits, 2020). Met Hydra-NL zijn voor opgegeven terugkeertijden

waterstanden, significante golfhoogtes, spectrale golfperiodes, piekperiodes, hydraulische belastingniveaus, optredende overslagdebieten en golfcondities voor de bekleding te berekenen. Daarnaast zijn illustratiepunten, percentielen, uitsplitsingen en bijdragen aan het overbelasten te berekenen. Voor het vervolg is het relevant om te weten dat Hydra-NL rekenkernen heeft voor de kust (zoute wateren inclusief Oosterschelde), de Hollandse IJssel, het Volkerak-Zoommeer en voor overige zoete wateren (IJsselmeergebied, Bovenrivierengebied, Benedenrivierengebied). Voor meer informatie over Hydra-NL wordt verwezen naar (Duits, 2020) en de website van het Informatiecentrum Leefomgeving (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/software-beoordelings-ontwerpinstrumentarium/>).

Hydra-NL maakt onderdeel uit van de Software Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium. Het kan bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen door beheerders gebruikt worden om de statistiek van de hydraulische belastingen te berekenen. Met de ontwikkeling van Hydra-Ring en Riskeer is de discussie ontstaan of Hydra-NL nog wel moet worden doorontwikkeld.

4.2.2 Huidige mogelijkheden

Met uitzondering van de zoute wateren¹³ kan Hydra-NL in de testmodus met maandstatistiek voor 12 maanden rekenen. De rekenkernen voor de zoete wateren zijn hier al op aangepast. De uitvoer van Hydra-NL met als invoer maandstatistiek bestaat uit overschrijdingskansen per jaar alsmede illustratiepunten en uitsplitsingen per maand.

De gebruiker kan via een work-around ook maandstatistiek doorrekenen voor de zoute wateren. Deze work-around betreft het maken van 12 berekeningen: 1 berekening voor iedere maand met als invoer de statistiek van de betreffende maand. De uitvoer dient dan nog wel naar maandkansen te worden omgezet en/of gecombineerd te worden tot een jaarkans.

4.2.3 Implementatie maandstatistiek

Een aanpassing van het rekenhart van de zoute wateren en de GUI, zodanig dat dezelfde functionaliteit beschikbaar is als voor de zoete wateren, vergt een inspanning van ongeveer 30-40 dagen werk en een investering van 40.000-50.000 euro.

4.3 Hydra-Ring

4.3.1 Beschrijving

Hydra-Ring is een probabilistisch beoordelingsprogramma voor de veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland (Diermanse et al., 2013). Het maakt onderdeel uit van het WBI 2017 modelinstrumentarium. Het is als rekenkern opgenomen in Riskeer, het programma dat de beheerder van waterkeringen ondersteunt bij het uitvoeren van een beoordeling van waterkeringen. De faalkansberekeningen in Riskeer (user-interface) worden door de rekenkern van Hydra-Ring uitgevoerd. De drie belangrijkste onderdelen van Hydra-Ring zijn:

¹³ Voor de zoete wateren (en niet voor de zoute wateren) is destijds budget beschikbaar gesteld om Hydra-NL aan te passen om met maandstatistiek te kunnen rekenen. Wat wellicht heeft meegespeeld voor het beschikbaar stellen van dit budget is dat voor de zoute wateren via een work-around ook met maandstatistiek kan worden gerekend.

- Modellen voor de hydraulische belastingen op waterkeringen
- Faalmechanismemodellen die beschrijven onder welke belastingomstandigheden de waterkering zal falen
- Probabilistische rekentechnieken waarmee de faalkans van de waterkering kan worden bepaald.

Voor meer informatie over Hydra-Ring wordt verwezen naar Diermanse et al. (2013). Voor meer informatie over Riskeer wordt verwezen naar de website van het Informatiecentrum Leefomgeving (<https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/software-beoordelings-ontwerpinstrumentarium/>). Merk op dat Hydra-Ring niet als stand-alone applicatie beschikbaar wordt gesteld op deze website.

4.3.2 Huidige mogelijkheden

Met Hydra-Ring kunnen hydraulische belastingen op waterkeringen en faalkansen worden berekend. Hydra-Ring kan betrouwbare uitvoer genereren in het bereik van $1/10^e$ per jaar en kleiner. De invoer bestaat onder andere uit databases fysica en statistiek van basisstochasten. De statistiek van trage stochasten zoals afvoer is statistiek voor perioden van 30 dagen of langer¹⁴ in het winterhalfjaar. Hydra-Ring rekent een overschrijdingsfrequentie van de belastingparameter per winterhalfjaar uit ($\sim 6 \times$ de kans per 30 dagen).

De huidige statistiek zit in de HLCD database vervat. Als specifieke maandstatistiek van een bepaalde maand wordt opgenomen in de HLCD, dan kan Hydra-Ring nu al de overschrijdingskans van hydraulische belastingen in die maand berekenen. Dit is een kwestie van configureren van de HLCD database.

Op dit moment kan een gebruiker via een work-around met de maandstatistiek van 12 maanden rekenen door voor iedere maand een aparte berekening te maken met als invoer de betreffende maandstatistiek. De gebruiker dient de uitvoer nog wel zelf te combineren tot een overschrijdingsfrequentie per jaar (onder de aanname van onafhankelijke perioden). Er is momenteel geen schil rond Hydra-Ring die dit doet.

4.3.3 Implementatie maandstatistiek

Hieronder zijn de stappen beschreven die gedaan moeten worden om geautomatiseerd met Hydra-Ring overschrijdingsfrequenties van belastingen op basis van maandstatistiek van de basisstochasten te berekenen.

1. Voor iedere basisstochast moet de maandstatistiek in de HLCD database worden ingevoerd. De HLCD database wordt hiermee 12 keer zo groot.
2. De inleesroutines van Hydra-Ring moeten worden aangepast.
3. De statistiek moet worden opgeschaald van 30 dagen (of 12 uur bij zeewaterstanden) naar 1 jaar. Op dit moment voert Hydra-Ring de berekening voor 1 set kansverdelingen uit, niet voor 12 verschillende statistieken. Deze wijziging lijkt de meest uitdagende van de drie en vereist een nauwkeurige boekhouding.

Aandachtspunten hierbij:

¹⁴ Voor het meerpeil van het Markermeer is deze periode bijvoorbeeld 60 dagen.

- Voor de methode FBC maakt Hydra-Ring gebruik van duurlijnen die in de HLCD zijn opgeslagen. Deze leggen vast hoe lang de afvoer aanhoudt (anders dan de topduren in Hydra-NL). Deze moeten ook per maand worden afgeleid en aangeleverd.
- Als de bodemruwheid een stochast is met een aantal realisaties, dan neemt de rekentijd toe. Het inlezen van de databases kost ook meer tijd.
- Als er productieberekeningen per maand beschikbaar zijn, dan neemt de rekentijd met een factor 12 toe. Door de parallellisatie kan de rekentijd wel worden verkort.
- Ook correlaties en statistische onzekerheden moeten waarschijnlijk per maand worden afgeleid/ingevoerd.

De product owner van Hydra-Ring schat dat de doorlooptijd om Hydra-Ring aan te passen in de orde van weken ligt. De auteurs van dit rapport hebben dit naar eigen inzicht vertaald naar een inspanning van 30 tot 40 dagen, met bijbehorende kosten van 40.000 tot 50.000 euro.

4.4 PROMOTOR

4.4.1 Regionale waterkeringen

In Boers (2022) is tijdens de gesprekken met waterkeringbeheerders ook veel aandacht besteed aan werken op regionale keringen. Uit deze gesprekken blijkt dat er, net als bij de hoofdwatersystemen, verschillen zitten in de watersystemen met betrekking tot de regionale keringen:

- In de lager gelegen delen van Nederland is er sprake van een gereguleerd peil. Met behulp van gemalen en spuisluizen zijn waterkeringbeheerders normaliter goed in staat om het peil in de boezems te beheersen. Vaak is het zomerpeil hoger dan het winterpeil om te kunnen anticiperen op droogte in de zomer en neerslag in de winter. In de hoger gelegen delen van Nederland zorgen kanalen niet alleen voor de afvoer van de lokale neerslag maar ook voor de afvoer van water uit de hoge gronden. Door de variatie van de neerslag gedurende een jaar is hierbij ook sprake van seizoensvariatie.
- Voor lange regionale boezems kan er door harde wind scheefstand van de waterstand optreden. Dit kan lokaal voor problemen zorgen. Door de variatie van de weersystemen gedurende een jaar zal hier ook sprake zijn van een seizoensafhankelijkheid. Door langdurige droogte in het zomerseizoen nemen de risico's van met name veenkades toe.

De auteurs van dit rapport hebben bij de STOWA en Rijkskeringen nagevraagd of zij zich herkennen in de behoefte aan seizoensafhankelijke statistiek met betrekking tot regionale keringen. De contactpersonen zagen de meerwaarde hiervan niet voor de door RWS beheerde regionale keringen, omdat de peilen van de wateren (veelal kanalen) sterk gereguleerd zijn. Ten aanzien van het spuien konden zij zich wel voorstellen dat seizoensafhankelijke belastingen meerwaarde kunnen bieden. Voordat statistiek op maand- of seizoensniveau wordt afgeleid achten de auteurs van dit rapport het verstandig om de meerwaarde hiervan voor Rijkswaterstaat nader te inventariseren / onderzoeken.

4.4.2 Beschrijving

Met het probabilistische model PROMOTOR kunnen beheerders regionale waterkeringen op hoogte toetsen. De traditionele toetsing van regionale waterkeringen op hoogte geeft vaak conservatieve

uitkomsten, omdat de factoren die de waterhoogte bepalen veelal worden 'gestapeld'. Er wordt geen rekening gehouden met de kans dat al deze effecten tegelijkertijd voorkomen. PROMOTOR doet dit wel. Gebruikers kunnen bij een gegeven overschrijdingsfrequentie het bijbehorende hydraulische belastingniveau berekenen, of andersom, bij een gegeven kruinhoogte de overschrijdingsfrequentie berekenen. Voor meer informatie over PROMOTOR wordt verwezen naar Kuijper (2021) en naar de website van de STOWA (<https://www.stowa.nl/publicaties/promotor-gebruikershandleiding-plus-instrument-update-43>).

Hoewel er geen cijfers voor handen zijn van de aantallen gebruikers van PROMOTOR is de indruk dat weinig beheerders van Rijkswaterstaat gebruik maken van dit rekenmodel. Dit kan te maken hebben met de aard van de door RWS beheerde regionale wateren en keringen. De peilen van de kanalen zijn bijvoorbeeld sterk gereguleerd en extremen zullen niet veel afwijken van de dagelijkse omstandigheden. Vaak voert de beheerder een grove analyse uit op basis van een historische gebeurtenis om tot statistiek van lokale waterstanden in het regionale systeem te komen.

Een ander punt is dat PROMOTOR als invoer de waterstandstatistiek van het betreffende regionale watersysteem nodig heeft. Dit wordt ook wel de boezempeilstatistiek genoemd. Over het algemeen leiden beheerders deze boezempeilstatistiek zelf af (of zij verstrekken hiertoe een opdracht aan een ingenieursbureau). Verschillende variabelen spelen hierbij een rol: neerslag, wind, maar ook het peilbeheer en de kunstwerken (spuicapaciteit, mogelijkheid om onder vrij verval te lozen). De manier waarop de statistiek wordt afgeleid kan daardoor erg verschillen per watersysteem. In paragraaf 3.1 worden drie generieke manieren onderscheiden:

- Een analyse met een stochastenmethode, waarbij neerslag en wind stochasten kunnen zijn;
- Analyse van waargenomen (extreme) neerslag in het beheergebied;
- Het doorrekenen van maatgevende neerslaggebeurtenissen.

In de stochastenmethode kent de maandstatistiek een toepassing. In de nadere twee manieren niet. In Van Haaren en Versteeg (2015) is voor regionale waterkeringen in beheer van Rijkswaterstaat (regionale Rijkskeringen) beschreven hoe de boezempeilstatistiek is afgeleid.

4.4.3 Huidige mogelijkheden

Op dit moment kan de wind moment al seizoensafhankelijk worden ingevoerd in PROMOTOR. Dit geldt echter niet voor het boezempeil. Het is mogelijk om berekeningen uit te voeren met telkens andere statistiek (per seizoen of per maand), maar dit is vrij omslachtig.

4.4.4 Implementatie maandstatistiek

PROMOTOR kan niet met maandstatistiek rekenen. Het kost naar verwachting 20.000 tot 30.000 euro om het programma (rekenkern en GUI) zodanig aan te passen dat er met zomer- en winterstatistiek van het boezempeil kan worden gerekend. Het benodigde budget voor een aanpassing naar maandstatistiek is hoger.

De uitvoer van PROMOTOR is een overschrijdingsfrequentie per jaar. De vraag is of de gebruiker als de overschrijdingsfrequentie per maand/seizoen of per jaar wil berekenen, op basis van de maand/seizoensstatistiek. We stellen voor deze vraag mee te nemen in een nadere inventarisatie van de behoefte aan seizoensstatistiek van het boezempeil en de lokale waterstand op de regionale wateren onder de RWS beheerders.

5 Toepassingsgebied

Het beschikbaar komen van de maandstatistiek uit Hoofdstuk 3 zorgt voor verschillende toepassingsmogelijkheden. In dit hoofdstuk komt het toepassingsgebied van seizoensafhankelijke hydraulische condities aan bod. Onderscheid wordt gemaakt tussen toepassingen buiten bestaande modellen (enkel gebruik van de maandstatistiek) en binnen de bestaande modellen die in Hoofdstuk 4 zijn toegelicht.

Dit toepassingsgebied heeft grote overlap met de inventarisatie door Boers (2022) waarin is gevraagd welke statistische en/of klimatologische informatie waterkeringbeheerders willen ontvangen met betrekking tot seizoensgerelateerde stormen, afvoeren en neerslag.

In paragraaf 5.1 worden toepassingen van de maandstatistiek van de afvoer, wind en neerslag besproken (macroniveau). In paragraaf 5.2 toepassingen in Hydra-NL/Hydra-Ring/DEZY (mesoniveau).

5.1 Toepassingen buiten bestaande modellen

Directe toepassing van de maandstatistieken op het schaal van een watersysteem valt onder het macroniveau (Boers, 2022). Maandstatiek van verhoogde afvoeren of zeewaterstanden die uit metingen of modelreeksen volgen kan worden ingezet om de regelgeving met betrekking tot werken op waterkeringen verder te ontwikkelen. Het uitvoeren van werkzaamheden aan primaire en regionale waterkeringen is namelijk alleen toegestaan wanneer vergunning wordt verleend door de waterkeringbeheerder (rijk of waterschappen).

Maandstatiek van extreme neerslag en windsnelheden die uit metingen of modelreeksen volgen kan worden ingezet om de risico's voor boezems te kwantificeren. Zo wordt het boezempeil in de Friese boezem vooral bepaald door de neerslag en scheefstand door de wind. Wanneer het peil enkele decimeters hoger is dan gewenst, en er is aanzienlijke scheefstand door wind, dan kan er sprake zijn van overloop van sluisdeuren hetgeen onwenselijk is voor de aanwezige elektronica (Boers, 2022).

Bij het spuien van water komen het regionale en primaire systeem samen. Met maandstatistiek is het mogelijk om een uitspraak te doen over de mogelijkheden om onder vrij verval te spuien. Doordat bijvoorbeeld de boezempeil-en zeewaterstandstatistiek per maand verschillen, verschilt ook de kans per maand dat er niet onder vrij verval gespuid kan worden. Dit kan relevante informatie voor de waterkeringbeheerder zijn bij het inplannen van beheer & onderhoud werkzaamheden.

Dit zijn enkel een aantal voorbeelden, maar er zijn verder nog tal van toepassingen mogelijk met de beschikbaarheid van maandstatistiek voor het optreden van stormen (kust, meren, benedenrivierengebied), verhoogde afvoerdebieten (bovenrivierengebied) of extreme neerslag (regionale keringen). Om dergelijke informatie beschikbaar te stellen kunnen simpele data- en softwaretools uitkomst bieden. Denk hierbij aan (online) python packages of een online portaal waarin datasets met afgeleide maandstatistieken zijn opgenomen.

5.2 Toepassingen binnen bestaande modellen

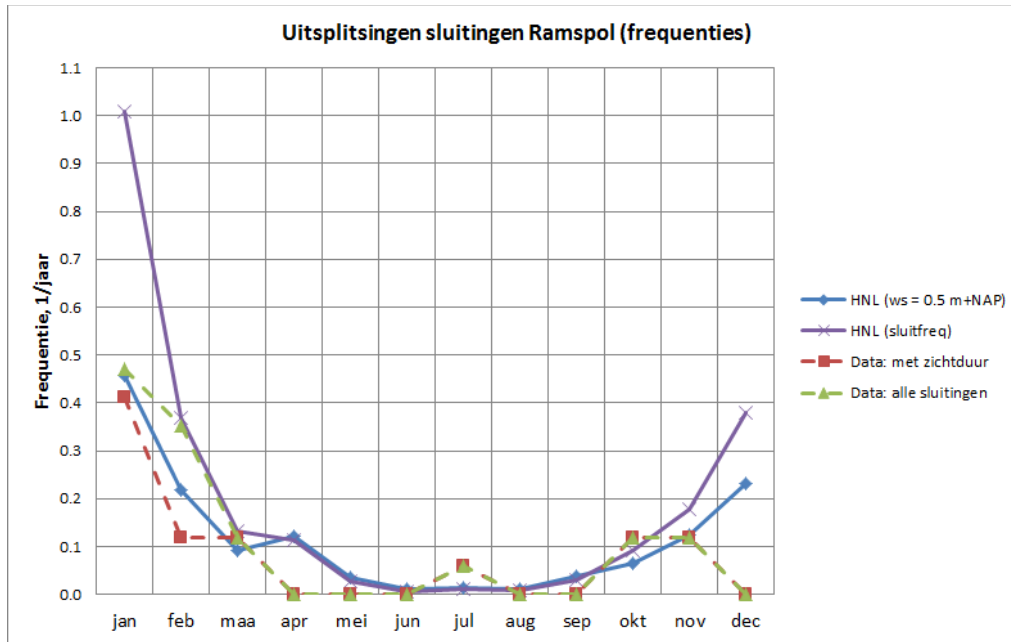
Toepassing van de maandstatistieken via hydraulische belastingen op lokaal niveau valt onder het mesoniveau (Boers, 2022). Maandstatiek van verhoogde afvoer, windsnelheid en zeewaterstand die uit metingen of modelreeksen volgt kan worden ingezet in bestaande modellen om de risico's ter plaatse van de uit te voeren werken aan de waterkering in kaart te brengen. De kans op lokale waterstanden (en golfparameters) zijn benodigd om uitspraak te doen over bijvoorbeeld het jaarrond werken aan dijkversterkingsprojecten of beheer & onderhoud aan kunstwerken.

Ook operationele of beleidsmatige keuzes kunnen worden ondersteund met de beschikbare informatie over lokale waterstanden. Zoals in H4 is benoemd zijn de huidige modellen al geschikt of met beperkte inspanning geschikt te maken om maandstatistiek te combineren met fysica. Dit resulteert in hydraulische condities op specifieke locaties. Met deze condities kan het beheer van waterkeringen en kunstwerken worden aangescherpt. In plaats van werken in het open seizoen (zomerperiode) kan ook worden ingezet voor werken in het gesloten seizoen (winterperiode). Voor het werken in het gesloten seizoen zijn de hydraulische condities nodig om de risico's tijdens de uitvoering en noodzakelijke noodmaatregelen te bepalen (Boers, 2022). Dat laatste geldt overigens evenzeer voor het open seizoen, waarbij in het laatste geval eveneens kennis van de extremenstatistiek voor het open seizoen gewenst is om de overstromingskansen ten gevolge van een openliggende kering te kunnen inschatten.

Een concreet voorbeeld van de toepassing van maandstatistiek is een studie naar het verloop van de sluitfrequentie van de Ramspol over het jaar door Geerse et al. (2018). Maandstatistiek voor de afvoer bij Dalfsen en wind bij Schiphol uit Geerse et al. (2011) is toegepast in de studie door de toepassing van de *factorenmethode*. Maandstatistiek voor het IJsselmeerpeil is in de studie bepaald met DEZY v3.4 door het toepassen van de maandstatistiek voor afvoer en wind en uurmetingen van de zeewaterstand uit 1981-2010 (per maand). Er zijn vervolgens twee manieren om de sluitfrequenties te bepalen. De 'reguliere' berekening van de sluitfrequentie met Hydra-NL¹⁵ en een 'alternatieve' manier is de overschrijdingsfrequentie te bepalen van de sluitwaterstand (0.5 m+NAP), bij een altijd geopende kering¹⁶ (Geerse et al, 2018). Onderstaand Figuur 1 uit Geerse et al (2018) laat zien dat de toepassing van deze maandstatistieken en de 'alternatieve' methode om de sluitfrequentie te bepalen overeenkomen met de meetgegevens van de sluitingen van de Ramspolkering. In dezelfde studie is ook het effect van de peilopzet in maart (de voorjaarsopzet) onderzocht.

¹⁵ Een probleem daarbij is dat intern in Hydra-NL dan (per richting) een sluitwindsnelheid moet worden bepaald, waarbij wordt geïnterpoleerd tussen WAQUA-resultaten met en zonder sluiting van de kering.

¹⁶ In principe wordt de sluitfrequentie dan overschat, omdat overschrijdingen van 0.5 m+NAP met stroming van west naar oost dan ten onrechte ook worden meegeteld.



Figuur 1 Uitsplitsingen sluitingen Ramspol (Geerse et al, 2018).

Een andere voorbeeldtoepassing van DEZY is het bepalen van de overschrijdingsfrequentie van de waterstand op het Noordzeekanaal (NZK). Het NZK is neerslaggedomineerd. De overschrijdingsfrequentie kan bepaald worden door de resultaten van berekeningen met winter- en zomerstatistiek op te tellen.

Dit zijn enkel een aantal voorbeelden maar er zijn verder nog tal van toepassingen mogelijk met de beschikbaarheid van maandstatistiek in de bestaande modellen. Om lokale hydraulische condities beschikbaar te stellen bieden de huidige modellen met geringe aanpassingen uitkomst.

6 Ontwikkelstrategie

De ontwikkelstrategie van 'seizoensafhankelijke' statistiek sluit aan bij de afleiding van hydraulische randvoorwaarden: statistiek van basisstochasten, modelberekeningen fysica en probabilistische berekeningen van de hydraulische condities. De ontwikkelstrategie is gebaseerd op deze modelketen. Een 'basis' strategie (1) betreft enkel de afleiding van maandstatistiek. Een 'plus' strategie (2) betreft óók de uitbreiding van bestaande software. De 'uitgebreide' strategie (3) bevat ook aanpassingen in de databases fysica (productieberekeningen).

1. Basis: afleiding maandstatistiek basisstochasten

De afleiding van de maand- (of seizoen-) statistiek van de basisstochasten is besproken in Hoofdstuk 3. Vanuit de inventarisatie zijn er drie hoofdvarianten naar voren gekomen ter bepaling van de maandstatistiek.

- a. **Factorenmethode.** De factorenmethode is een pragmatische benadering voor de maandstatistiek. De methode bevat de cruciale, maar op dit moment nog ongevalideerde, aanname dat zowel de kromming (vormparameter) van de extremewaardenverdelingen als de correlaties tussen basisstochasten niet significant veranderen.
Deze methode kan met geringe inspanning worden toegepast op meet- en of modelgegevens. Deze methode is wel een schatting omdat de factoren worden afgeleid vanuit een referentiemaand. Opgemerkt wordt dat voor de zeewaterstand de factorenmethode minder geschikt is, omdat deze door de aard van de beschikbare zeewaterstandgegevens nog grover is dan voor de afvoer en de windsnelheid.
In de factorenmethode wordt er expliciet voor gezorgd dat de afgeleide maandstatistiek consistent is met de beschikbare (winterhalf)jaarstatistiek.
De projectrisico's ten aanzien van doorlooptijd en kosten van deze variant zijn gering.
- b. **Beschikbare modelreeksen en waarnemingen.** Deze variant zet in op betrouwbare extremewaardenstatistiek voor de maanden. Met de KNMI-modelreeksen zijn lange datareeksen beschikbaar, waardoor de extremewaardenanalyse voldoende diep in de staart van de verdeling kan worden toegepast. GRADE, EWMCF en RACMO zijn voorbeelden van dergelijke modelreeksen. De temporele resolutie van deze modelreeksen verschilt wel: respectievelijk 1 dag, 6 uur en 3 uur.
Aangezien de huidige beschikbare modelreeksen nog niet geheel correct de metingen representeren is het advies om de kromming in het extreme bereik af te leiden met de modelreeksen en in het meetbereik de meetgegevens te gebruiken.
De projectrisico's zijn wel groter omdat de methode nog niet (vaak) is toegepast en het verkrijgen van consistentie tussen de vigerende jaarstatistiek en de nieuw af te leiden maandstatistiek ook geen standaard is.
- c. **Representatieve modelreeksen.** Als stip op de horizon is de beste benadering een lange modelreeks die goed past op het meetbereik (iets wat niet standaard het geval is). Hiermee kan dan de maandstatiek worden afgeleid over het gehele bereik aan terugkeertijden. Zo werkt het KNMI aan een verfijning van GRADE voor de afvoer en is de verwachting dat ook vanuit RACMO en ECMWF zeewaterstanden beschikbaar komen naast de al beschikbare parameters (zoals wind). Dit heeft echter een langere doorlooptijd nodig, omdat er nog kennis ontwikkeld moet worden om het meetbereik goed te representeren.

Het is mogelijk om enkel de basisstrategie (1) uit te voeren voor toepassingen buiten de bestaande modellen, zie paragraaf 5.1. Toepassingen binnen bestaande modellen zijn mogelijk met een 'work-around' of in combinatie met de uitvoering van de 'plus' strategie (2). Deze toepassingen zijn beschreven in paragraaf 5.2.

2. Plus: uitbreiding basisvarianten met aanpassingen in software

De implementatie van de maand- (of seizoen-) statistiek in de bestaande software/modellen is besproken in Hoofdstuk 4. De afleiding van maandstatistiek is voor deze implementatie dus vereist. Vanuit de inventarisatie zijn de volgende varianten naar voren gekomen.

- a. Work-around. Een eenvoudige aanpak kan zijn om de beschikbare modellen door te rekenen per maand (door de jaarstatistiek te vervangen met maandstatistiek). Dit resulteert in het 12 keer aanroepen van de programmatuur waarvan de resultaten, indien gewenst, met elkaar gecombineerd kunnen worden. Voor programma's als DEZY en PROMOTOR is dit een reële optie gezien de beperkte gebruiksintensiteit. Deze aanpak heeft een geringe doorlooptijd en weinig risico's maar het gebruiksgemak is niet erg hoog. Als onderdeel van deze variant kan een handreiking worden opgesteld waarin staat hoe gebruikers te werk moeten gaan.
- b. Aanpassing van software: Aanpassingen in bestaande software is nodig om de statistiek van de basisstochasten per maand te kunnen opgeven en/of aanpassingen in de user interface door te voeren. Met deze aanpassingen worden de onderliggende correlatiemodellen ongemoeid gelaten. Wanneer deze uitbreiding is uitgevoerd kan de software resultaten per maand combineren, maar ook uitsplitsingen per maand teruggeven. De benodigde doorlooptijd en mogelijke risico's zijn concreet te maken en ook niet groot, waardoor deze variant een uitvoerbare optie is om hydraulische condities af te leiden. Bovendien is het nu al mogelijk om in de zoete wateren van Hydra-NL met maandstatistiek te rekenen.
- c. Aanpassing van software en correlatiemodellen. Aanpassingen in bestaande software zijn nodig om de statistiek van de basisstochasten per maand te kunnen opgeven en/of aanpassingen in de user interface door te voeren. Om een volledige implementatie door te voeren dienen ook onderliggende correlatiemodellen te worden aangepast (uitgesplitst per maand). Wanneer deze uitbreiding is uitgevoerd kan de software resultaten per maand combineren maar ook uitsplitsingen per maand teruggeven op een hoog detailniveau. De doorlooptijd van deze variant is langer vanwege extra aanpassingen in de programmatuur.

Varianten 2b en 2c zijn voor Hydra(-NL/Ring) relevant gezien de grotere gebruiksintensiteit ten opzicht van DEZY en PROMOTOR. Opgemerkt wordt dat voor Hydra-NL vooral investeringen nodig zijn voor het aanpassen van de userinterface en de aanpassing van de software voor de zoute wateren. Voor Hydra-Ring zijn ook investeringen nodig voor het aanpassen van de software, omdat het programma voor zowel de zoute en zoete wateren 12 statistiekbestanden moet kunnen verwerken en de uitkomsten moet bundelen.

3. Uitgebreid: uitbreiding plusvarianten met aanpassingen databases fysica

De uitbreiding van de databases fysica door modelberekeningen voor alle maanden/seizoenen uit te voeren¹⁷ is in deze studie buiten de scope gelaten. In de werkwijze van Hoofdstuk 2 is beschreven dat de studie zich richt op een bescheiden (uitbreiding op bestaand) instrumentarium waar niet teveel kosten aan verbonden zijn. De 'uitgebreide' strategie met de aanpassingen databases fysica maar ook het toevoegen van de statische en model onzekerheden valt dus niet onder dit uitgangspunt. Daarom is deze strategie niet opgenomen in onderstaand overzicht.

Overzicht van de verschillende ontwikkelstrategieën

In onderstaande overzicht zijn de varianten voor het afleiden van maandstatistiek voor de basisstochasten en het aanpassen van software tegen elkaar uitgezet. Iedere combinatie is kwalitatief beoordeeld op de meerwaarde voor de gebruiker, de benodigde inspanning/doorlooptijd om de optie te realiseren en de projectrisico's van de benodigde activiteiten. Hierbij is de volgende schaal gehanteerd: --- (zeer negatief), --, -, 0 (neutraal), +, ++ en +++ (zeer positief). De auteurs hebben de beoordeling telkens uitgevoerd voor de combinatie van de varianten. Een score vanuit meerdere experts is gewenst bij een keuze uit de verschillende ontwikkelstrategieën.

Afleiden maandstatistiek basisstochasten			
Software aanpassingen	1a Factorenmethode	1b Beschikbare modelreeksen	1c Representatieve modelreeksen
geen	Meerwaarde: 0 Doorlooptijd: +++ Risico's: +++	Meerwaarde: + Doorlooptijd: + Risico's: ++	Meerwaarde: ++ Doorlooptijd: -- Risico's: --
2a Work-around	Meerwaarde: 0 Doorlooptijd: +++ Risico's: +++	Meerwaarde: + Doorlooptijd: + Risico's: ++	Meerwaarde: ++ Doorlooptijd: -- Risico's: --
2b Aanpassing	Meerwaarde: ++ Doorlooptijd: + Risico's: +	Meerwaarde: ++ Doorlooptijd: 0 Risico's: +	Meerwaarde: +++ Doorlooptijd: -- Risico's: --
2c Aanpassing inclusief correlatiemodellen	Meerwaarde: +++ Doorlooptijd: 0 Risico's: 0	Meerwaarde: +++ Doorlooptijd: - Risico's: 0	Meerwaarde: +++ Doorlooptijd: --- Risico's: ---

De meest realistische varianten zijn grijs gemarkeerd. We leggen uit waarom de auteurs de andere varianten als minder realistisch zien:

- Voor het afleiden van maandstatistiek van de basisstochasten zijn de factorenmethode en het gebruik van de beschikbare modelreeksen op korte- en middellange termijn het meest realistisch. Representatieve modelreeksen (optie 1c) zijn immers nog niet snel beschikbaar.
- Zelfs als er geen software-aanpassingen worden gedaan, dan kunnen relatief snel handreikingen met work-arounds aan de gebruikers van Hydra-Ring, Hydra-NL, DEZY en Promotor worden gemaakt. De optie 'geen' zien wij daarom niet als realistisch. De optie 2c is een relatief dure variant die niet binnen het uitgangspunt 'bescheiden inspanning op bestaand instrumentarium' past.

¹⁷ Concreet werd in interviews gesteld dat het zinnig is om met een stochast bodemruwheid te rekenen. De kansverdeling van deze stochast kan seizoensafhankelijk worden gemaakt.

7 Aanbevelingen

Uit de inventarisatie van Boers (2022) volgt dat beheerders van waterkeringen behoefte hebben aan seizoensafhankelijke belastingen, specifiek maandstatistiek van hydraulische belastingen. Klimaatverandering is één van de aanleidingen hiervoor. De behoefte en beoogde toepassing is echter nog diffuus, maar het is wel duidelijk dat de concrete behoeftes zeer divers zijn. Het is dus de strategische vraag waar Rijkswaterstaat op moet inzetten om aan deze behoeftes te voldoen. Deze studie richt zich op een ontwikkelstrategie waarmee naar verwachting aan de meeste behoeftes wordt voldaan. We hebben verschillende ontwikkelstrategieën voor het afleiden en het implementeren van maandstatistiek van de basisstochasten neerslag, afvoer, meerpeil, zeewaterstand en wind opgesteld. Aan deze strategieën zijn in Hoofdstuk 6 scores toegekend aan de meerwaarde, doorlooptijd en risico's. Hieronder zijn eerst de afwegingen tussen de verschillende strategieën op een rijtje gezet en vervolgens komen we terug op de bredere context achter de strategische vraag van Rijkswaterstaat.

Afwegingen tussen de verschillende ontwikkelstrategieën

De keuze tussen de factorenmethode en de beschikbare modelreeksen is sterk afhankelijk van het beschikbare budget en in hoeverre waarde wordt gehecht aan betrouwbare kansverdelingen. De beschikbare modelreeksen leveren namelijk betrouwbaardere extremewaardenverdelingen op dan de factorenmethode, maar dit kost meer inspanning en gaat gepaard met hogere kosten. De keuze hangt ook van de toepassing af. De factorenmethode is vooral interessant wanneer men geïnteresseerd is in niet zo extreme gebeurtenissen. Denk hierbij aan ARBO-eisen/werkbaar weer en daarnaast aan bijvoorbeeld sluitpeilen (zoals voor de Ramspol-balgstuwkering). Voor andere toepassingen ligt een meer geavanceerde methode voor de hand, bijvoorbeeld als je in beeld wilt brengen in welke mate een in het open seizoen openliggende kering bijdraagt aan de overstromingskans (en welk risico je dus moet af zien te dekken via noodmaatregelen).

De keuze tussen het wel of niet aanpassen van de correlaties heeft grote impact op de implementatie. Correlaties tussen stochasten kunnen seizoensafhankelijk zijn. In sommige vraagstukken is het niet nodig om die afhankelijkheid mee te nemen, maar het buiten beschouwing laten van deze seizoensafhankelijkheid dient wel een overwogen keuze te zijn. Omdat het uitgangspunt een instrumentarium is waar niet teveel kosten aan verbonden zijn wordt het buiten beschouwing blijven als een realistische optie gezien.

Ook voor de statistische onzekerheden moet een onderbouwde keuze worden gemaakt: hanteren van een al dan niet geschaalde versie van de onzekerheden op jaarbasis, of het afleiden van onzekerheden afzonderlijk per maand (waardoor ze potentieel wel ruim 3x groter kunnen worden). Het is daarom verstandig om in het vervolg een quick-scan uit te voeren naar situaties waarin seizoensafhankelijkheid van correlaties en statistische onzekerheden relevant is.

De keuze voor het doen van aanpassingen aan software is evenzo afhankelijk van het beschikbare budget en in hoeverre waarde wordt gehecht aan het ondersteunen van de gebruiker (op zijn beurt mogelijk afhankelijk van het aantal gebruikers en hun precieze behoeften). Aanpassingen zijn relatief duur, maar de meeste modellen zijn al deels geschikt om te rekenen met maandstatistiek.

Bredere context

Het afleiden van maandstatistiek van basisstochasten is in feite een no-regret actie, waarbij het beschikbare budget impact heeft op het detailniveau en de kwaliteit van de statistiek. In het algemeen is het ontwikkelen van seizoensafhankelijke belastingen een iteratief proces. De ontwikkelstrategieën uit Hoofdstuk 6 voorzien niet in alle mogelijke informatiebehoeften van waterkeringbeheerders. We hebben ons voornamelijk gericht op de meest gangbare behoeftes op basis van het huidige instrumentarium. Wanneer gestart wordt met een ontwikkelstrategie zal ook door de uitwerking verschillende gebruikerswensen naar voren komen die door een (iteratieve) afweging kunnen worden meegenomen. Daardoor worden de gebruikerswensen weer verder aangescherpt en geprioriteerd. Maar ook door meerdere experts te bevragen om de strategieën te beoordelen kunnen nieuwe inzichten naar voren komen voor een gewenste implementatiestrategie. Hieronder zijn aspecten behandeld waar in het vervolg nog aandacht voor moet zijn.

Klimaatverandering/klimaatscenario's

De stap van maandstatistiek voor het huidige klimaat naar maandstatistiek voor klimaatscenario's is wat betreft methode op het eerste gezicht geen grote sprong. Het grote verschil met het huidige klimaat is dat waarnemingen niet of nauwelijks bruikbaar zijn.

Regionale keringen

Het is zeer de vraag welke informatiebehoeftes beheerders van regionale waterkeringen precies hebben. Seizoensafhankelijkheid van belastingen speelt vermoedelijk een kleine rol bij de sterk gereguleerde peilen van regionale wateren. We bevelen aan om de behoeftes van regionale keringbeheerders aan te scherpen en waar mogelijk concreet te maken met voorbeelden.

8 Referenties

Boers M, 2022

Informatiebehoefte seizoensafhankelijke hydraulische condities. Marien Boers. In opdracht van Rijkswaterstaat.

Caires S, 2009

Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject 'Wind modelling'. Deltares Report 1200264-005.

Chbab H, 2017

Basisstochasten WBI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares report 1209433-012-HYE-0007, 16 juni 2017, definitief.

Diermanse F Roscoe K Lopez De La Cruz J Steenbergen H en T Vrouwenvelder, 2013

Hydra Ring Scientific Documentation. Ferdinand Diermanse, Kathryn Roscoe, Juliana Lopez de la Cruz, Henri Steenbergen en Ton Vrouwenvelder. Deltares rapport 1206006-004, 2013.

Dillingh D de Haan L Helmers R Können GP van Malde J, 1993

De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren/RIKZ, Dillingh, D., de Haan, L., Helmers, R., Können, G.P., en van Malde J., Report DGW-93.023.

Duits MT 2020

Hydra-NL Gebruikershandleiding versie 2.8. Opdrachtgever Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. Matthijs Duits, HKV rapport PR4315.10, oktober 2020.

ENW 2021

Task Force Fact Finding hoogwater 2021 (2021). Hoogwater 2021: Feiten en Duiding. Expertise Netwerk Waterveiligheid. <https://doi.org/10.4233/uuid:06b03772-ebe0-4949-9c4d-7c1593fb094e>. Versie 2, 20 september 2021.

Geerse CPM, 2004

Geerse, C.P.M. 2004. Probabilistische versus deterministische stormduur Vecht – en IJsseldelta. RIZA werkdocument 2004.206X. 2004.

Geerse CPM, 2006

Geerse, C.P.M. 2006, Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta, Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ, RWS RIZA werkdocument 2006.036x, Lelystad 2006

Geerse CPM, 2007

Gegevensverzameling Categorie C keringen. Hydra-VIJ invoer Veluwerandmeer. HKV-memo PR 1322.30. Chris Geerse. HKV Lijn in Water, Lelystad, 31 oktober 2007.

Geerse CPM, 2012

Statistiek Zeeuwse meren Hydra-Zoet. HKV-rapport PR1564.14. C.P.M. Geerse. HKV Lijn in Water, mei 2012.

Geerse CPM Wojciechowska KA, 2014

Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. HKV lijn in water. PR2829.20

Geerse CPM, 2016a

Voorstel voor aanpassing Vechtstatistiek en modelonzekerheid waterstand. HKV memo PR3280.20. 12 september 2016. Lelystad.

Geerse CPM, 2016b

Statistiek kleinere meren inclusief onzekerheid. Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen. C.P.M. Geerse. HKV rapport PR3280.20. September 2016, Lelystad.

Geerse CPM 2017

Memo ten behoeve van de implementatie van nieuwe werklijnen voor Vechtafvoer bij Dalfsen. HKV lijn in water, 2017. In opdracht van Deltares.

Geerse CPM en Zethof M, 2011

Invloed op waterstanden en kruinhoogten van correlatie tussen afvoer, wind en zeewaterstand. Gevoeligheidsonderzoek met Hydra-Zoet. HKV rapport 2253.10. Oktober 2011.

Geerse CPM en Zethof M, 2018

Achterlandstudie Ramspol. Verloop sluitfrequentie over het jaar. HKV rapport PR3451.20. September 2018.

Van Haaren DH en Versteeg RP, 2017

Hydraulische randvoorwaarden voor regionale keringen in beheer bij het Rijk. Achtergrondrapportage. HKV lijn in water, rapport PR2871.10. December, 2015.

Hegnauer M Beersma JJ Van den Boogaard HFP Buishand TA en Passchier RH, 2014

Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0. Deltares report 1209424-004-ZWS-0018, Delft, The Netherlands.

KNMI (2023)

KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. R. van Dorland, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink, M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel. Scientific report; WR-23-02. De Bilt, 2023.

Klopstra, D., Braak, E. van den, Kalk, H. en Termes, P. 2002.

Maatgevende afvoer en afvoerstatistiek Overijsselse Vecht bij Dalfsen RVW2006, Deelrapport 8, HKV lijn in water in opdracht van RWS RIZA, Lelystad, december 2002.

Kuijper B, 2021

PROMOTOR. Gebruikershandleiding versie 4.3. Bastiaan Kuijper. HKV project PR4347.20, november 2021.

Kuijper B en Geerse CPM, 2016

Bastiaan Kuijper en Chris Geerse. Doorontwikkeling DEZY 2.0; Modelling faalkansen kunstwerken. HKV lijn in water, rapport PR3232.10, juli 2016.

Kuijper B en Geerse CPM, 2021

Bastiaan Kuijper en Chris Geerse. DEZY versie 5.1; Systeemdokumentatie deel 1: IJsselmeergebied. HKV lijn in water, rapport PR4383.20, februari 2021.

Van Meijgaard E et al, 2008

The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. Meijgaard, E. van et al. Tech. rep. TR-302. KNMI, pp43, 2008.

Vermeulen CJ en Kuijper B, 2021

Slim Watermanagement. DEZY-berekeningen ten behoeve van het project Vervanging en Renovatie spui- en maalcomplex IJmuiden. HKV lijn in water, rapport PR4567.10. November, 2021.

Van Voorst L en Van den Brink H, 2022

Improving the GRADE Weather generator by using synthetic datasets from RACMO and SEAS5. L. van Voorst en H. van den Brink. Technical report; TR-398. De Bilt, 2022.

Lodder C, 2007

Achtergrondrapport HR-2006 voor de meren. Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het Markermeer. C. Lodder. RWS RIZA rapport 2007.025. Lelystad 2007.

WL | Delft Hydraulics, 1998

Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en integrerende studie, verslagen fasen 1 t/m 5. H3211

RWS-RIZA, 1999

RWS-RIZA. Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 1 t/m 10. RIZA rapport 99.047. Lelystad 1999

Prinsen G Den Boogaard H en Hegnauer M, 2015

Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010-ZWS-0001. Delft.

STOWA 2019

Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019. Jules Beersma (KNMI), Hans Hakvoort (HKV), Rudmer Jilderda (KNMI), Aart Overeem (KNMI) en Rudolf Versteeg (HKV). ISBN 978.90.5773.860.9. STOWA rapport 2019-19.

STOWA 2018

Neerslagstatistieken voor korte duren. Actualisatie 2018. Jules Beersma, KNMI, Rudolf Versteeg, HKV, Hans Hakvoort, HKV ISBN 978-90-5773-785-5 STOWA rapport 2018-12.

STOWA 2015

Actualisatie meteogegevens voor waterbeheer 2015. Jules Beersma, Janette Bessembinder, Theo Brandsma (KNMI) en Rudolf Versteeg en Hans Hakvoort (HKV). ISBN 978.90.5773.706.0. STOWA rapport 2015-10.

De Waal H, 2018

Basisrapport WBI 2017. Versie 1.2. Deltares rapport.

Van den Brink HW, 2020

Het gebruik van de ECMWF seizoens-verwachtingen voor het berekenen van de klimatologie van extreme waterstanden langs de Nederlandse kust. Report TR-385, KNMI, de Bilt.

De Valk CF en Van den Brink HW, 2023

Update van de statistiek van extreme zeewaterstand en wind op basis van meetgegevens en modelsimulaties. Report TR-406, KNMI, de Bilt, 2023.

De Valk CF en Van den Brink HW, 2020

Estimation of wind speeds with very high return periods from large datasets generated by weather prediction models: statistical aspects. Report WR-2020-01, KNMI, De Bilt.

De Valk CF en Van den Brink, HW, 2021

Comparison of tail models and data for extreme value analysis of high tide water levels along the Dutch coast. Draft report, KNMI, De Bilt, 2021.

Bijlagen

A Interviews

A.1 Vragen

De basisvragen voor ieder interview zijn:

- 1) Kun je schetsen welke statistiek voor X wordt afgeleid/ beschikbaar is?
 - a) Gaat dit om jaar, (winter)halfjaar of maand statistiek?
- 2) Wat is de toepassing voor deze maandstatiek?
 - a) Hoe generiek is het toepasbaar?
- 3) Wat is de impact van maandstatistiek voor het huidige model?
 - a) Hoeveel inspanning/tijd kost dit?
- 4) Wat zijn de consequenties van deze maandstatistiek?
 - a) Welke hiaten zijn er? Input/Output wijzigingen?

A.2 Geïnterviewden

Karolina Wojciechowska Deltares Hydra-Ring
Chris Geerse HKV Statistiek basisstochasten en Hydra-NL
Bastiaan Kuijper HKV Promotor, DEZY, Hydra-NL
Nicole Jungermann HKV GRADE Vecht
Henk van den Brink KNMI Statistiek basisstochasten
Henk van Hemert STOWA/RWS Regionale keringen
Andries Paarlberg HKV Productieberekeningen
Dorien Lugt HKV Neerslagstatistiek
Matthijs Duits HKV Hydra-NL



HKV lijn in water BV

Locatie Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Locatie Delft

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

Locatie Amersfoort

Berkenweg 7
3818 LA Amersfoort

0320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl