

Opdrachtgever:
Waterschap Hunze en Aa's

Statistische analyse extreme waterstanden

Opdrachtgever:
Waterschap Hunze en Aa's

Statistische analyse extreme waterstanden

Auteurs: Rudolf Versteeg
Nicole Jungermann

Inhoud

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Aanleiding | 1 |
| 1.2 | Doelstelling | 1 |
| 1.3 | Stappen/Leeswijzer | 1 |
| 1.4 | Uitgangspunten | 2 |
| 2 | Analyse correlatie neerslag en spuistremming | 3 |
| 2.1 | Inleiding | 3 |
| 2.2 | Aanwezigheid correlatie | 3 |
| 2.3 | Nadere analyse correlatie | 6 |
| 2.4 | Conclusies | 11 |
| 3 | Stochastische berekeningen | 13 |
| 3.1 | Inleiding | 13 |
| 3.2 | Stochast buitenwaterstand | 13 |
| 3.3 | Neerslagvolume en patronen | 18 |
| 3.4 | Beginvoorwaarde | 19 |
| 3.5 | Inzet bergingsgebieden | 20 |
| 3.6 | Uitkomsten | 24 |
| 3.7 | Vergelijking met Quick-Scan en HOWA-1 | 26 |
| 3.8 | Klimaatscenario | 28 |
| 4 | Gevoeligheidsanalyses | 31 |
| 4.1 | Inleiding | 31 |
| 4.2 | Geen inzet bergingsgebieden | 31 |
| 4.3 | Geen correlatie tussen spuistremming en neerslag | 33 |
| 4.4 | Sterkere correlatie tussen spuistremming en neerslag | 33 |
| 4.5 | Grotere kans op natte beginvoorwaarde | 35 |
| 4.6 | Gebruik jaarstatistiek neerslag | 36 |
| 5 | Tijdreeksberekening | 37 |
| 5.1 | Inleiding | 37 |
| 5.2 | Resultaten tijdreeksberekening | 37 |
| 5.3 | Vergelijking tijdreeks met stochastenmethode | 38 |
| 6 | Bevindingen en aanbevelingen | 40 |
| 7 | Referenties | 43 |

Lijst van tabellen

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 2-1: | Gemiddelde en mediaan van de neerslag bij toenemend aantal spuistremmingen.. | 9 |
| Tabel 3-1: | Aantal waarnemingen in de periode januari 1906 - maart 2012 waarbij de laagwaterstand een aantal opeenvolgende spuiperioden de drempelwaarde overschrijdt in het winterhalfjaar | 14 |
| Tabel 3-2: | Doorgerekende neerslagvolumina voor de 4-daagse en 9-daagse neerslaggebeurtenissen | 18 |
| Tabel 3-3: | Inzet bergingsgebieden | 22 |
| Tabel 3-4: | Bergingshoeveelheden (bij een waterstand van NAP+1.50 m op de boezem) | 24 |
| Tabel 3-5: | Verschillen tussen onderzoeken, NB: HOWA-1 is de uitgangssituatie zonder bergingsgebieden, ook geen meebergende gebieden | 26 |
| Tabel 3-6: | Verschillen tussen resultaten van de Quick-Scan en het voorliggende onderzoek. | 30 |
| Tabel 4-1: | Verschillen tussen onderzoeken, NB: HOWA-1 is de uitgangssituatie zonder bergingsgebieden, ook geen meebergende gebieden. Let op: de getallen in de tabel wijken af van die in hoofdstuk 3 omdat de gevoeligheidsanalyses enkel zijn berekend met de 4-daagse neerslaggebeurtenissen. | 32 |

Lijst van figuren

| | | |
|-------------|---|----|
| Figuur 2-1: | Relatie tussen aantal achtereenvolgende spuistremmingen en de neerslaghoeveelheid over vier dagen..... | 6 |
| Figuur 2-2: | Relatie tussen aantal achtereenvolgende spuistremmingen en de neerslaghoeveelheid over negen dagen. | 6 |
| Figuur 2-3: | Relatie tussen hoogte van de ebwaterstand en de neerslaghoeveelheid over vier dagen. | 8 |
| Figuur 2-4: | Relatie tussen hoogte van de ebwaterstand en de neerslaghoeveelheid over negen dagen. | 8 |
| Figuur 2-5: | Relatie tussen hoogte van de laagwaterstand en de neerslagsom over vier dagen, opgedeeld in de gebeurtenissen met meerdere spuistremmingen. | 9 |
| Figuur 2-6: | Conditionele kansverdeling van de neerslag bij 0 en meer spuistremmingen, 1, 2, 3, 4 en 5 en meer spuistremmingen. | 10 |
| Figuur 2-7: | Conditionele kansverdeling van de neerslag bij 0 en meer spuistremmingen, 1, 2, 3, 4 en 5 en meer spuistremmingen, met daarbij een illustratie van de correctie van de kansverdeling van 0 en meer spuistremmingen met 6.2 en 29.8 mm voor de situaties met respectievelijk 1 tot en met 4 spuistremmingen en 5 en meer spuistremmingen. | 11 |
| Figuur 3-1: | Zeven gebeurtenissen met hoge laagwaterstanden en 4 of meer achtereenvolgende spuistremmingen. Weergegeven is de laagste laagwaterstand per laagwater/spuiperiode. | 15 |
| Figuur 3-2: | Zes gebeurtenissen met hoge laagwaterstanden. Weergegeven is de laagste laagwaterstand per laagwater/spuiperiode. | 15 |
| Figuur 3-3: | Trekking uit Tabel 3-1 vertaald naar laagwaterstanden voor achtereenvolgende spuiperioden..... | 17 |
| Figuur 3-4: | Resultierende door te rekenen buitenwaterstanden..... | 18 |
| Figuur 3-5: | Voorbeeld van de gekozen beginvoorwaarde voor de stochast beginvoorwaarde.. | 20 |
| Figuur 3-6: | Locaties van de boezemuitbreidingen (donker groen), reguliere bergingsgebieden (geel) en noodbergingsgebieden (oranje)..... | 21 |
| Figuur 3-7: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek voor de twee doorgerekende neerslagduren..... | 25 |
| Figuur 3-8: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek voor het huidig klimaat en voor het klimaatscenario 2050 W+..... | 29 |
| Figuur 3-9: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek voor het huidig klimaat en voor het klimaatscenario 2100 W+..... | 29 |
| Figuur 4-1: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek zonder inzet van de gestuurde bergingsgebieden. | 32 |
| Figuur 4-2: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met en zonder correlatie.. | 33 |
| Figuur 4-3: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met en zonder verhoogde correlatie tussen spuistremming en extreme neerslag..... | 34 |
| Figuur 4-4: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met en zonder verhoogde kans op de natte beginvoorwaarde. | 35 |
| Figuur 4-5: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met winterstatistiek en jaarstatistiek van de neerslag. | 36 |
| Figuur 5-1: | Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek op basis van de tijdreeksberekening, berekend met jaarmaxima en Peaks-Over-Threshold waarden, 1998 gebaseerd op meerdere neerslagstations..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figuur 5-2: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek op basis van de tijdreeksberekening, berekend met Peaks-Over-Threshold waarden en op basis van de stochastenmethode. | 39 |
|--|----|

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Ter voorbereiding op de maatregelenstudie in het kader van het project Droge Voeten 2050 (DV2050) wil waterschap Hunze en Aa's de herhalingstijden van waterstanden op de Eemskanaal- en Dollardboezem bepalen met het recente model van het watersysteem voor het huidige klimaat en het klimaat volgens het scenario 2050W+.

Omdat hoogwatergebeurtenissen in het verleden met name zijn opgetreden als langdurig niet kon worden gespuid op zee in combinatie met een hoge neerslagbelasting wil het waterschap allereerst meer inzicht krijgen in de mate van correlatie tussen deze twee belangrijke factoren. In bijvoorbeeld januari 2012 en oktober 1998 viel het langdurig niet kunnen spuien samen met een hoge belasting van de boezem door neerslag.

De uit de analyse van de correlatie volgende informatie dient te worden gebruikt bij de bepaling van de herhalingstijden van waterstanden met behulp van de zogenaamde stochastenmethode. Daarnaast heeft het waterschap gevraagd om, ter toetsing van de uitkomsten van de stochastenmethode, een tijdreeksanalyse uit te voeren. Beide analyses zijn uitgewerkt in deze rapportage.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is:

Het bepalen van de herhalingstijden van waterstanden op de Eemskanaal- en Dollardboezem, rekening houdend met de eventuele correlatie tussen de beperking van de mogelijkheid tot lozing op zee en de neerslagbelasting van de boezem.

1.3 Stappen/Leeswijzer

In het onderzoek zijn de volgende stappen uitgevoerd:

1. Vaststellen van de correlatie tussen extreme neerslag en gestremde spui door opwaaiing op zee bij Delfzijl.
2. Vaststellen van de 1/100, de 1/300 en de 1/1000 jaar waterstanden voor de EemskanaalDollardboezem (EKDB) in combinatie met de Oldambtboezem voor het huidige klimaat.
3. Vaststellen van de 1/100, de 1/300 en de 1/1000 jaar waterstanden voor de EemskanaalDollardboezem (EKDB) in combinatie met de Oldambtboezem voor het klimaat van 2050W+ en 2100W+.
4. Vergelijking met de eerdere analyse in HOWA-1

Stap 1 is beschreven in hoofdstuk 2. Stap 2 is uitgevoerd met zowel een stochastische als een tijdreeksanalyse. De resultaten hiervan zijn beschreven in hoofdstuk 3 (stochastische berekeningen) en hoofdstuk 5 (tijdreeksberekening).

In hoofdstuk 4 zijn enkele gevoeligheden/aanvullende analyses op basis van de stochastische analyse beschreven, waaronder een analyse zonder de inzet van de bergingsgebieden en de gevoeligheid voor de correlatie tussen de spuistremming en de neerslag.

De belangrijkste bevindingen en conclusies zijn beschreven in hoofdstuk 6.

1.4 Uitgangspunten

Bij de stochastische berekeningen is uitgegaan van het door het waterschap toegeleverde model. Eventuele aanpassingen in dat model naar aanleiding van de herkalibratie van oktober 2012 (HKV LJN IN WATER, 2012) die nog niet waren doorgevoerd zijn in het model aangepast.

2 Analyse correlatie neerslag en spuistremming

2.1 Inleiding

Het doel van de analyse is het bepalen van de correlatie tussen neerslag en spuistremming ten behoeve van het bepalen van de kans-waterstandsrelatie op het boezemsysteem. Deze correlatie dient vervolgens als input voor de stochastische analyse.

De analyse is daarom opgedeeld in de beantwoording van de volgende vragen:

- Is er een correlatie (paragraaf 2.2)?
Alvorens een correlatie te duiden en te kwantificeren hebben we geanalyseerd óf er een relatie is tussen het aantal achtereenvolgende spuistremmingen en de neerslaghoeveelheden.
- Hoe ziet de correlatie er uit (paragraaf 2.3)?
Vervolgens hebben we de correlatie nader geanalyseerd om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de spuistremmingen en de (kansverdeling van de) neerslaghoeveelheden.
- Hoe is de correlatie te kwantificeren (paragraaf 2.3)?
Om te kunnen toepassen in een stochastische analyse hebben we de correlatie gekwantificeerd.

2.2 Aanwezigheid correlatie

Om vast te stellen of er een correlatie aanwezig is tussen het aantal achtereenvolgende spuistremmingen en de neerslag hebben we de volgende analyse uitgevoerd:

- **Bepalen aantal achtereenvolgende spuistremmingen**
We hebben voor het stormseizoen, oktober tot en met maart, bepaald wanneer 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, etc. achtereenvolgende spuistremmingen voorkomen. Perioden met meerdere achtereenvolgende spuistremming zijn doorgaans de perioden waarbinnen zich een wateroverlastsituatie kan ontwikkelen in winterperiodes in landelijk gebied. Het stormseizoen is gekozen omdat zeer extreme hoogwaterstanden (met herhalingstijden van 100 jaar of minder vaak) op de boezem enkel optreden als er sprake is van een beperkte afvoer naar zee door (achtereenvolgende) spuistremming(en).

We gebruiken hiervoor de gemeten zeewaterstanden ter plaatse van (of in de buurt van) de spuisluizen en een kritiek peil op de boezem boven welke een gemiste spui een probleem kan worden. In HOWA-I is hiervoor een grenspeil aangehouden waarbij de afvoer 30% van de maximale afvoer zou zijn: NAP-0,10 m. Dat peil hebben we aangehouden. Als de ebwaterstand niet lager komt dan NAP-0,10 m noemen we dit een spuistremming. Voor deze analyse gebruiken we de reeks van zeewaterstanden van Delfzijl, deze is in ieder geval beschikbaar voor dezelfde periode als de neerslagdata (vanaf 1906 tot maart 2012).

We hebben de zeewaterstanden gecorrigeerd voor de waargenomen trend in de zeespiegelstijging van 20 cm per eeuw als gevolg van klimaatverandering. Omdat we geïnteresseerd zijn in de huidige situatie zijn de waterstanden lineair in de tijd gecorrigeerd met 2 mm/jaar, vanaf de laatste datum in de tijdreeks (1 maart 2012). Dit betekent

bijvoorbeeld op 1 maart 2012 een correctie van 0 cm, 50 jaar daarvoor (1 maart 1962) een correctie van 10 cm en weer 50 jaar daarvoor (1 maart 1912) een correctie van 20 cm. Er is niet gecorrigeerd voor de eventuele gevolgen van de afsluiting van het IJsselmeer met de Afsluitdijk omdat er geen zichtbare trend is waargenomen.

We hebben de reeks met de zeewaterstanden doorlopen en kennen per getijperiode (of beter gezegd spuiperiode/ebperiode) een 0 of 1 toe als niet of wel het kritieke peil van NAP-0,10 m wordt overschreden. Als een volgende ebperiode ook een overschrijding van het kritieke peil kent wordt de teller opgehoogd met 1. Zo ontstaat een reeks met per spuiperiode het aantal achtereenvolgende spuistremmingen.

Omdat uit analyse van de historische hoogwaterperioden is gebleken dat een enkele beperkte spui maar een beperkte invloed heeft op de waterstanden op de boezem, en daarmee nauwelijks bijdraagt aan de verlaging van de waterstanden op de boezem, hebben we de bepaling van het aantal achtereenvolgende spuistremmingen uitgebreid. Een voorbeeld van een dergelijke gebeurtenis is januari 2012, waarbij de ebstanden vanaf 3 januari tot 6 januari achtereenvolgens NAP+0,72 m, NAP+0,50 m, NAP-0,18 m, NAP +0,97 en NAP+1,16 m. Voor en na die periode zijn de ebstanden snel lager dan NAP-1,00 m en kan volledig worden gespuid.

Met de eerder genoemde analyse zou de gebeurtenis in 2012 gekarakteriseerd zijn als maximaal 2 achtereenvolgende spuistremmingen, terwijl het effect op de maximale waterstanden op de boezem overeenkomt met 5 achtereenvolgende spuistremmingen. Er is daarom voor gekozen om het aantal achtereenvolgende spuistremmingen door te tellen als tussen twee ebperiode boven NAP-0,10 m één maal een spui Mogelijkheid is opgetreden. De gebeurtenis in januari 2012 wordt dan gekarakteriseerd als 5 achtereenvolgende spuistremmingen.

Het maximum aantal achtereenvolgende spuistremmingen in de periode 1906-2012 is zeven. Dit betekent een spuistremming met een duur van 7+1 maal 12,25 uur, oftewel circa vier dagen. Dit komt één maal voor in de reeks van 1906 tot en met 2012, namelijk december 1954. Zes achtereenvolgende spuistremmingen komt ook 1 maal voor, namelijk in november 1928. Vijf achtereenvolgende spuistremmingen komt 5 maal voor. Hieronder vallen ook de meest recente hoogwaterperioden: oktober 1998 en januari 2012. De andere perioden met 5 achtereenvolgende spuistremmingen zijn januari 1922, november 1947 en januari 1984.

- **Bepalen neerslaghoeveelheden**

Om het aantal achtereenvolgende spuistremmingen te correleren aan de neerslag hebben we vervolgens de neerslaghoeveelheden gesommeerd voor een venster van vier en een venster van negen dagen vóór de perioden met achtereenvolgende spuistremming, waarbij de laatste dag in het venster van de neerslag overlapt met de dag waarop de spuistremming begint.

Voor de analyse zijn enkel langjarige neerslagreeksen beschikbaar van de stations Ter Apel en Groningen op dagbasis. Alleen deze stations zijn beschikbaar vanaf 1906. We hebben de gemiddelde neerslag op het stroomgebied bepaald als het gemiddelde van de neerslag van deze twee stations.

We hebben nu een reeks met per spuiperiode de teller voor het aantal achtereenvolgende spuiperioden (0, 1, 2, 3 etc) én de bijbehorende neerslaghoeveelheid in de 4 en 9 dagen

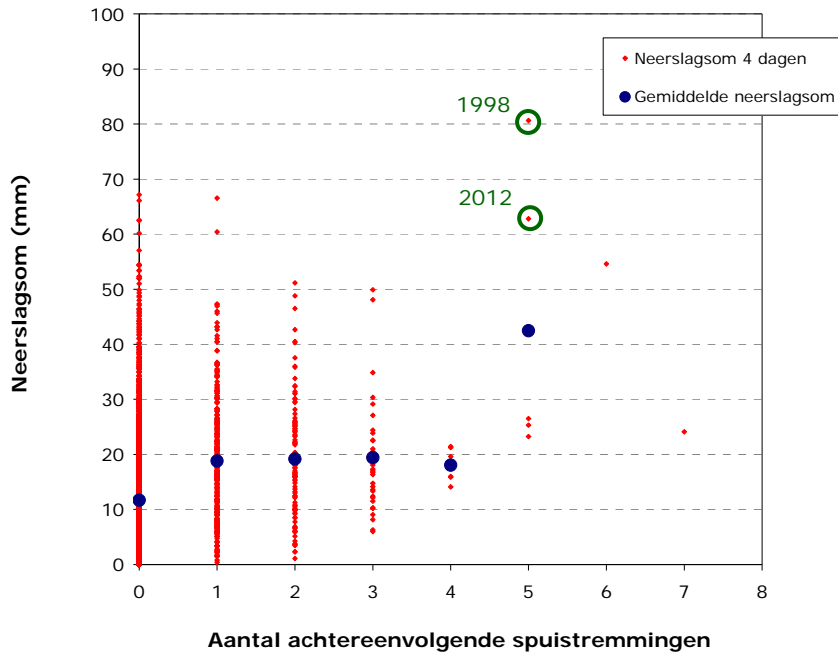
voor die spuiperiode. Om deze gebeurtenissen onafhankelijk te maken in spuistremming (0 tot 7 spuiperioden) en neerslaghoeveelheid (4 tot 9 dagen) hebben we ten eerste voor de opeenvolgende spuistremmingen enkel die waarde gebruikt vóórdat de teller weer nul wordt en daarna (voor met name de gebeurtenissen met 0 spuistremmingen) met een venster van 4 en 9 dagen de maximale neerslagsom binnen de overlappende vensters bepaald.

De zo overgebleven combinaties van gebeurtenissen zijn opgenomen in Figuur 2-1 en Figuur 2-2 voor respectievelijk de neerslagsom over 4 dagen en over 9 dagen. In de figuur is ook de gemiddelde neerslaghoeveelheid bij 1 of meer achtereenvolgende spuistremmingen weergegeven (het blauwe bolletje). Omdat 6 en 7 achtereenvolgende spuistremmingen allebei maar 1 keer voorkomen is daarvoor geen gemiddelde neerslagsom bepaald. In plaats daarvan hebben we het gemiddelde van 5, 6 en 7 spuistremmingen opgenomen bij 5 spuistremmingen. Uit de figuren concluderen we op basis van de gemiddelden dat de neerslaghoeveelheden gedurende en vóór de perioden met spuistremming hoger is dan de neerslag in de perioden waarin geen spuistremmingen optreden. Er is daarmee een duidelijke correlatie tussen de zeewaterstand en de neerslaghoeveelheden.

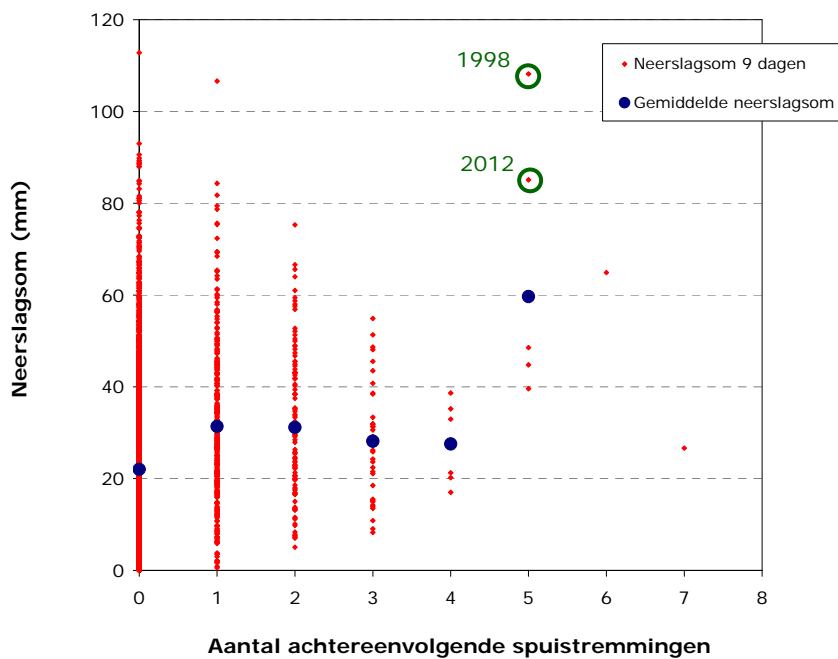
Bij 1, 2, 3 en 4 achtereenvolgende spuistremmingen is de correlatie met de neerslag praktisch gelijk en lijkt zelfs iets af te nemen. Bij vijf en meer spuistremmingen wordt de correlatie sterker. Mogelijk heeft dit te maken met twee elkaar opvolgende stormen, de zogenaamde tweelingstormen. De gebeurtenis in januari 2012 is daar een voorbeeld van. Het is aannemelijk dat alleen tweelingstormen 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen veroorzaken. Een dergelijke tweelingstorm zou onderdeel kunnen uitmaken van een front waarbij altijd een verhoogde neerslag optreedt. Hierbij merken we wel op dat die neerslag niet altijd hoog hoeft te zijn: in 4 van de 7 gebeurtenissen is de neerslag rond 25 mm. Een dergelijke neerslaghoeveelheid wordt elke winter circa 3 maal overschreden.

Ter illustratie zijn de kenmerken van de twee meest recente hoogwatergebeurtenissen (1998 en 2012) in de figuren omcirkeld. Zowel wat betreft neerslagsom als aantal achtereenvolgende spuistremmingen zijn deze twee gebeurtenissen zeer extreem en behoren tot de extreemste van de afgelopen 106 jaar.

In paragraaf 2.3 is de relatie verder geanalyseerd en uitgewerkt.



Figuur 2-1: Relatie tussen aantal achtereenvolgende spui-stremmingen en de neerslaghoeveelheid over vier dagen.



Figuur 2-2: Relatie tussen aantal achtereenvolgende spui-stremmingen en de neerslaghoeveelheid over negen dagen.

2.3 Nadere analyse correlatie

Alvorens de correlatie zoals gevonden in de vorige paragraaf nader te kwantificeren hebben we analyses uitgevoerd waarin niet alleen het aantal spui-stremmingen, maar ook de hoogte van de ebwaterstand in de analyse wordt betrokken. We kunnen daarmee analyseren of bij toenemende ebstanden ook een toename in de neerslag zichtbaar is.

Relatie van de neerslag met de hoogte van de maximale ebstand

We hebben de dataset uit de vorige paragraaf uitgebreid door per geselecteerde (onafhankelijke) periode naast de neerslagsom ook de hoogte van de laagwaterstand te registreren. Bij gebeurtenissen met meerdere spuistremmingen is de hoogste laagwaterstand in de betreffende periode gekozen.

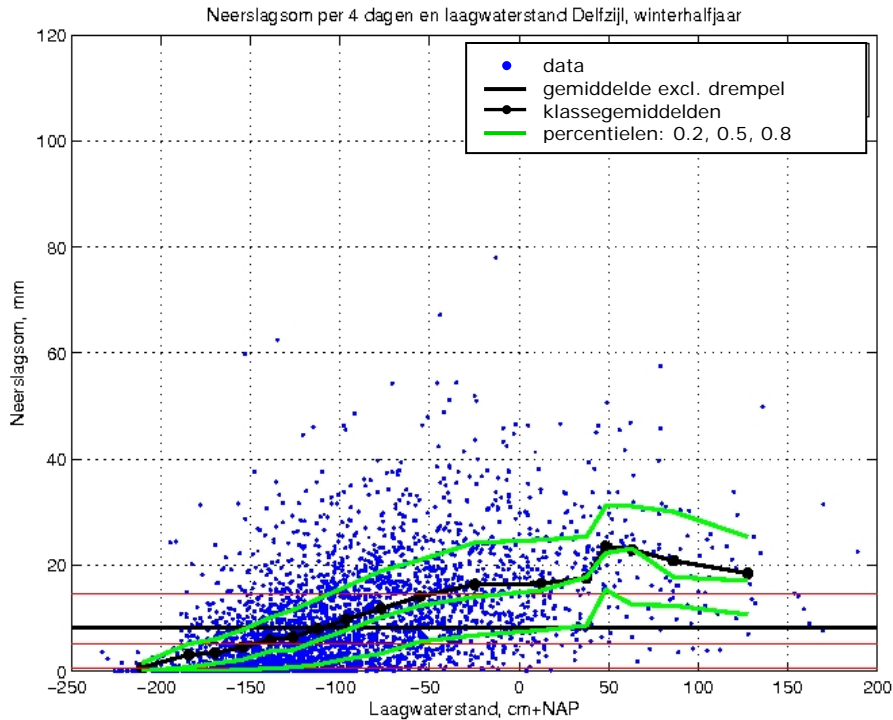
In Figuur 2-3 en Figuur 2-4 zijn de resultaten van de analyse samengevat voor respectievelijk de 4 en 9-daagse neerslagvolumes. De blauwe puntjes in de figuur zijn de combinaties van de neerslaghoeveelheid en de ebwaterstand. Daarnaast zijn in de figuur opgenomen:

- Klassegemiddelden van de combinaties (de lijn met zwarte bolletjes)
- De mediaan en het 20^{ste} en 80^{ste} percentiel van de klassen (de groene lijnen)
- Het gemiddelde van de neerslagsom van de combinaties (de zwarte lijn)

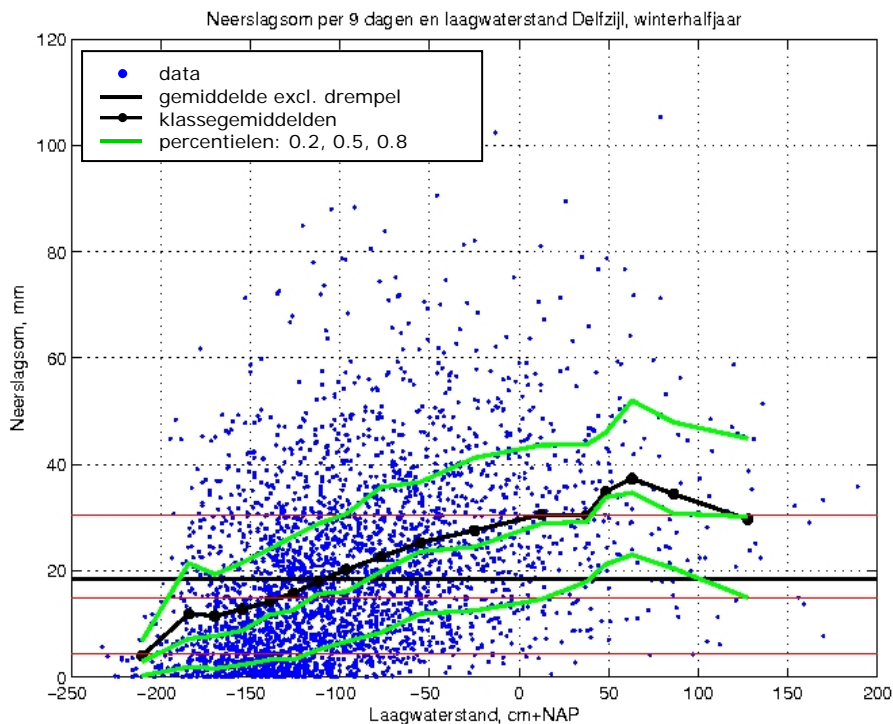
Uit de figuren concluderen we het volgende:

- De kans op neerslag bij hoge laagwaterstanden op zee (met spuistremming) is hoger dan de kans op neerslag in perioden met lage laagwaterstanden op zee (zonder spuistremming).
- Boven een laagwaterstand van NAP-0,1 m lijkt de toename in de kans op neerslag af te vlakken. Bij laagwaterstanden op zee rond NAP+0,50 m is de neerslag weliswaar hoog, maar bij verdere verhoging neemt de kans op neerslag weer af. Dit laatste is een aanwijzing dat de knik bij NAP+0,50 m wordt veroorzaakt door de beperktheid van de data in het extreme bereik.
- De bandbreedte in de neerslag rond de mediaan verandert niet bij toename van de laagwaterstand boven NAP-1,00 m. Dit betekent dat de vorm van de kansverdeling van de neerslag gelijk blijft bij toenemende buitenwaterstanden.
- De toename in de mediaan van de neerslag bij 4 en 9 dagen is respectievelijk circa 10 en 12 mm.

We hebben bovenstaande analyse tevens uitgevoerd voor correlatie tussen de neerslag en de windopzet op zee. Dit wordt ook wel de scheve opzet genoemd. Het getij is daarvoor gesplitst in het astronomisch getij en de windopzet. In theorie zou de relatie tussen de windopzet en de neerslag duidelijker zijn, omdat er dan geen verstoring van het astronomisch getij in de data aanwezig is. De bijdrage van het astronomisch getij is echter beperkt, de scheve opzet geeft daardoor hetzelfde beeld als Figuur 2-3 en Figuur 2-4.



Figuur 2-3: Relatie tussen hoogte van de ebwaterstand en de neerslaghoeveelheid over vier dagen.



Figuur 2-4: Relatie tussen hoogte van de ebwaterstand en de neerslaghoeveelheid over negen dagen.

Relatie van de neerslag met het aantal spuistremmingen

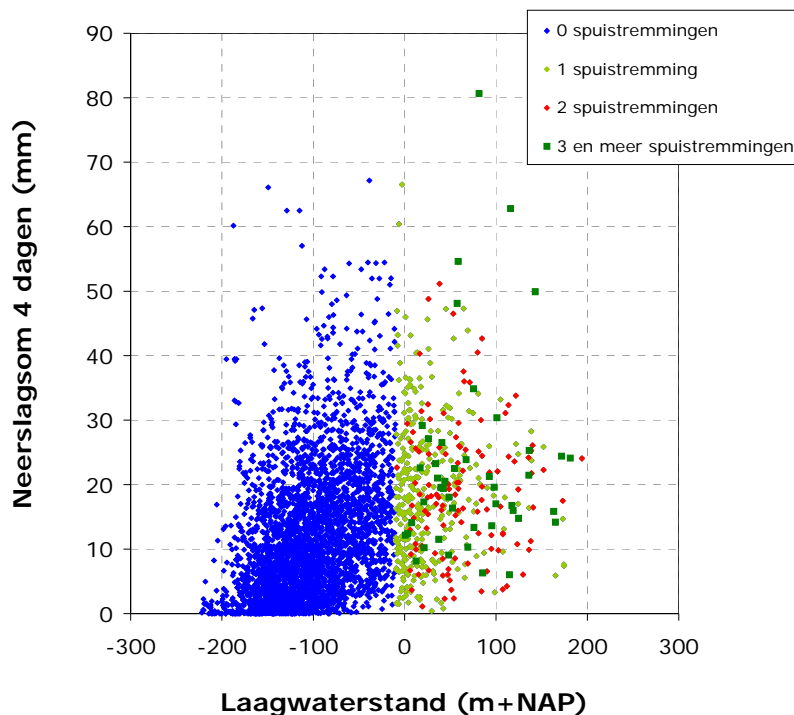
Omdat met name het aantal spuistremmingen van groot belang is voor de ernst van de hoogwatersituatie hebben we tevens geanalyseerd hoe de kansverdeling van de neerslag zich gedraagt bij toenemend aantal achtereenvolgende spuistremmingen. Om deze correlatie verder te duiden hebben we voor de punten in bovenstaande figuren bepaald welke punten geen of 1,

2 of 3 spuistremmingen kennen. Dit is geïllustreerd in Figuur 2-5. De mediaan en het gemiddelde van de neerslag voor de verschillende situaties is als volgt:

| | 4-daagse neerslagsom (mm) | | 9-daagse neerslagsom (mm) | |
|---------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|
| | Mediaan | Gemiddelde | Mediaan | Gemiddelde |
| 0 of meer spuistremmingen | 10.3 | 12.6 | 20.4 | 23.2 |
| 1 spuistremming | 17.8 | 18.8 | 29.7 | 31.4 |
| 2 spuistremmingen | 18.5 | 19.2 | 30.0 | 31.2 |
| 3 spuistremmingen | 17.3 | 19.4 | 29.7 | 28.1 |
| 4 spuistremmingen | 17.8 | 18.0 | 27.1 | 27.5 |
| 5 en meer spuistremmingen | 26.5 | 42.5 | 48.6 | 59.7 |

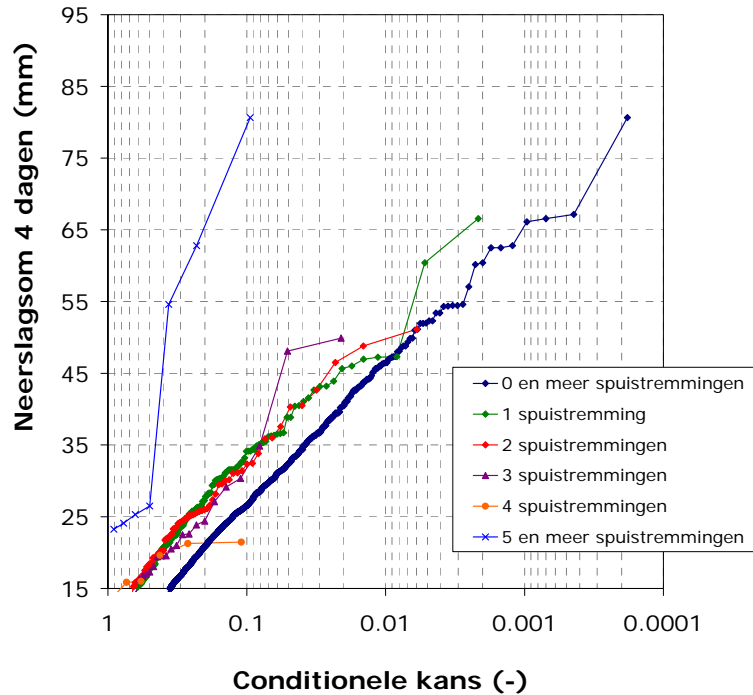
Tabel 2-1: Gemiddelde en mediaan van de neerslag bij toenemend aantal spuistremmingen

De toename in neerslag bij toenemend aantal spuistremmingen is hetzelfde zoals vastgesteld in de vorige paragraaf (zie Figuur 2-1 en Figuur 2-2).



Figuur 2-5: Relatie tussen hoogte van de laagwaterstand en de neerslagsom over vier dagen, opgedeeld in de gebeurtenissen met meerdere spuistremmingen.

Om te analyseren of de vorm van de kansverdeling wijzigt bij toename van het aantal spuistremmingen hebben we voor de situaties van 0, 1, 2, 3, 4 en 5 of meer spuistremmingen de conditionele kansverdeling bepaald. Dit is de kansverdeling van de neerslag, gegeven het aantal achtereenvolgende spuistremmingen. Deze kansverdelingen zijn afgebeeld in Figuur 2-6. In de figuur is te zien dat de vorm van de kansverdeling bij 1, 2, 3 en 4 spuistremmingen niet wijzigt ten opzichte van de situatie met 0 of meer spuistremmingen. Bij 5 of meer spuistremmingen lijkt de verdeling wel af te wijken. Het aantal waarnemingen is echter te beperkt om uitspraken te doen over een wijziging in de kansverdeling.



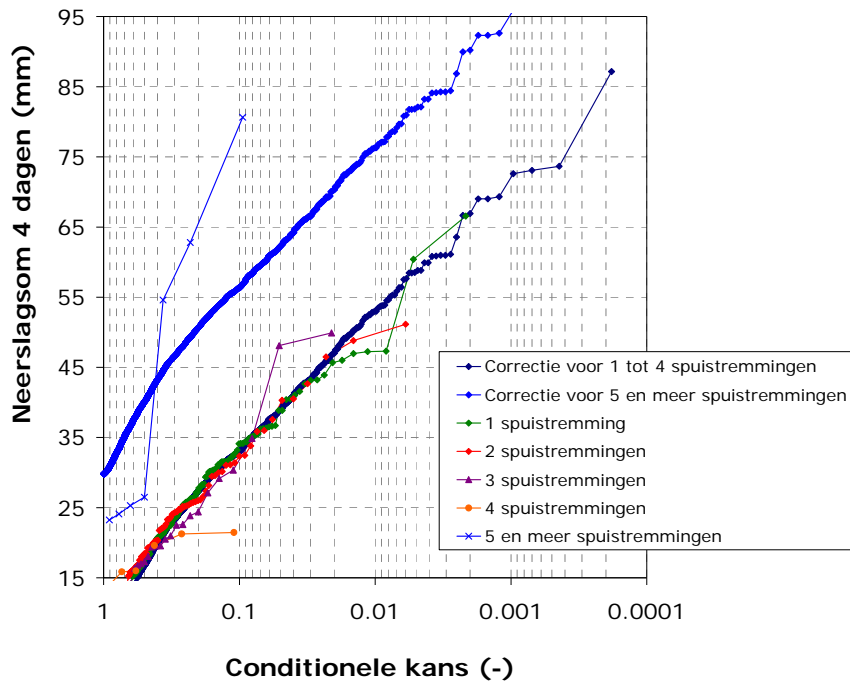
Figuur 2-6: Conditionele kansverdeling van de neerslag bij 0 en meer spuistremmingen, 1, 2, 3, 4 en 5 en meer spuistremmingen.

Uit de analyse concluderen we het volgende:

- De kans op (hoge) neerslag bij achtereenvolgende spuistremmingen is hoger dan de kans op (hoge) neerslag in perioden zonder spuistremming.
- Bij 1, 2, 3 en 4 achtereenvolgende spuistremmingen lijkt de neerslagkans niet verder toe te nemen bij toenemend aantal achtereenvolgende spuistremmingen. Bij 5 of meer spuistremmingen neemt de neerslagkans sterk toe.
- De vorm van de kansverdeling van de neerslag blijft gelijk bij toenemend aantal spuistremmingen. Over de situatie van 5 of meer spuistremmingen kan vanwege de beperkte data niet worden beoordeeld of de vorm van de kansverdeling verandert. We gaan er vooralsnog van uit dat de vorm van de kansverdeling van de neerslag niet wijzigt.
- Gegeven het niet wijzigen van de vorm van de kansverdeling kan de kansverdeling bij toenemend aantal spuistremmingen worden gekarakteriseerd als de kansverdeling van de neerslag, gecorrigeerd voor de toename in de gemiddelde neerslag bij toenemend aantal spuistremmingen (zoals opgenomen in Tabel 2-1).
 - Voor de 4-daagse neerslagsom is de toename in neerslag voor 1, 2, 3 en 4 achtereenvolgende spuistremmingen 6.2 mm. Voor 5 en meer achtereenvolgende spuistremmingen is de neerslagtoename 29.8 mm.
 - Voor de 9-daagse neerslagsom is de toename in neerslag voor 1, 2, 3 en 4 achtereenvolgende spuistremmingen 6.3 mm. Voor 5 en meer achtereenvolgende spuistremmingen is de neerslagtoename 36.5 mm.

Om in de stochastenmethode de wijzigingen in de kansverdeling toe te passen corrigeren we de kansverdeling van de neerslag met deze neerslagtoenames. In Figuur 2-7 is dit geïllustreerd door de kansverdeling van de neerslag van 0 en meer spuistremmingen te corrigeren met 6.2 en 29.8 mm. Te zien is dat de gecorrigeerde kansverdeling de kansverdeling voor 1, 2, 3 en 4 achtereenvolgende spuistremmingen goed beschrijft.

Voor 5 en meer achtereenvolgende spuistremmingen lijkt de vorm van de kansverdeling minder goed te voldoen, het aantal historische waarnemingen is echter te beperkt om hierover uitspraken te doen. Vanwege deze onzekerheid is in hoofdstuk 4 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de wijziging van kansverdeling van de neerslag bij 5 of meer spuistremmingen.



Figuur 2-7: Conditionele kansverdeling van de neerslag bij 0 en meer spuistremmingen, 1, 2, 3, 4 en 5 en meer spuistremmingen, met daarbij een illustratie van de correctie van de kansverdeling van 0 en meer spuistremmingen met 6.2 en 29.8 mm voor de situaties met respectievelijk 1 tot en met 4 spuistremmingen en 5 en meer spuistremmingen.

2.4 Conclusies

Op basis van de analyses uit de vorige paragrafen kunnen we concluderen dat:

- Tijdens gebeurtenissen met 1, 2, 3 en 4 spuistremmingen de kans op neerslag hoger is dan de kans op neerslag bij gebeurtenissen zonder spuistremming.
- De vorm van de kansverdeling van de neerslag bij 1, 2, 3 en 4 spuistremmingen gelijk is aan de kansverdeling bij gebeurtenissen zonder spuistremming.
- De kansverdeling bij 1, 2, 3 en 4 spuistremmingen bij de 4-daagse neerslagsom 6.2 mm verschuift en bij de 9-daagse neerslag 6.3 mm.
- Bij 5 en meer spuistremmingen de correlatie sterker wordt. Mogelijk heeft dit te maken met twee elkaar opvolgende stormen, de zogenaamde tweelingstormen. Het is aannemelijk dat alleen tweelingstormen 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen veroorzaken. Een dergelijke tweelingstorm zou onderdeel kunnen uitmaken van een front waarbij altijd een verhoogde neerslag optreedt. Dit fenomeen kan gevolgen hebben voor de kansverdeling van de neerslag bij 5 of meer spuistremmingen. De historische data is echter te beperkt (enkel 7 waarnemingen) om hier uitspraken over te doen.

In deze studie gaan we er van uit dat de vorm van de kansverdeling van de neerslag niet verandert. De kansverdeling bij 5 en meer spuistremmingen bij de 4-daagse neerslagsom verschuiven we met 29.8 mm en bij de 9-daagse neerslagsom met 36.5 mm. In een

gevoeligheidsanalyse hebben we daarnaast onderzocht wat de invloed van een sterkere correlatie is op de herhalingstijden van waterstanden.

Meer inzicht in de kans op samenvallen van hoge neerslag en een groot aantal achtereenvolgende spuijetsremmingen kan niet worden verkregen op basis van de beperkt beschikbare historische data. Een andere manier om inzicht te krijgen in het gedrag van weersystemen is door gebruik te maken van simulatie met meteorologische modellen die zowel de neerslag als de wind (stormen) in hun samenhang beschrijven. Door langjarige simulaties uit te voeren met dergelijke modellen (>1000 jaar) kan aanvullende data worden verkregen in de kans op samenvallen van de windopzet op zee en neerslag in het stroomgebied. Een dergelijk onderzoek wordt momenteel door Deltares en het KNMI opgestart onder de naam coincidentie. Bij een dergelijk onderzoek moet voor het watersysteem van Hunze en Aa's dan niet zozeer de hoogte van de storm, maar met name de duur van de storm (of beter gezegd: de opeenvolging van stormen) worden onderzocht. Deze bepaalt immers het aantal achtereenvolgende spuijetsremmingen.

Met de uitkomsten van een dergelijk model kan ook, vanwege de grotere beschikbaarheid aan data, per klasse van het aantal achtereenvolgende spuijetsremmingen de kansverdelingen van de neerslag worden bepaald. Door de beperkte beschikbaarheid aan historische data (maar zeven waarnemingen voor de klasse 5 en meer spuijetsremmingen) is dat nu niet mogelijk.

In de stochastische methode nemen we de toename in kans op neerslag mee door de kans op de neerslag uit STOWA (2004) te verschuiven met het aantal mm behorend bij de gebeurtenissen met 1, 2, 3, 4 en 5 of meer spuijetsremmingen.

3 Stochastische berekeningen

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de invulling van de stochastenmethode beschreven. De voor het watersysteem relevante stochasten zijn:

- Zeewaterstand;
- Neerslagvolume en neerslagpatroon;
- Initiële bodemberging.

Deze zijn beschreven in paragraaf 3.2 tot en met 3.4. De resultaten van de stochastische berekeningen zijn opgenomen in paragraaf 3.6. Om deze resultaten te beoordelen zijn in paragraaf 3.5 enkele karakteristieken van de bergingsgebieden in het watersysteem samengevat. In paragraaf 3.8 is het klimaatscenario W+ voor 2050 en 2100 opgenomen. In hoofdstuk 4 zijn de resultaten van enkele gevoeligheidsanalyses opgenomen.

De resultaten zijn weergegeven voor de locaties Tutjeshut en Zuidbroek.

3.2 Stochast buitenwaterstand

Deze paragraaf beschrijft beknopt de aanpak van het vaststellen van de stochast voor de buitenwaterstand op zee. We beschrijven achtereenvolgens:

- De basisgegevens en analyse van de perioden met achtereenvolgende spui-stremmingen/beperkingen.
- De afleiding en constructie van getijreeksen voor de buitenwaterstand ten behoeve van stochastische berekeningen.

Basisgegevens buitenwaterstand

De basis voor de bepaling van de buitenwaterstand op zee is het aantal overschrijdingen van de minimale ebstand bij een bepaalde drempelwaarde. Als de waterstand op zee langdurig door windopzet/storm verhoogd is kan meerdere keren achter elkaar gedurende perioden van laagwater niet of beperkt worden gespuid. In die perioden kan in combinatie met afvoer uit het stroomgebied een hoogwatersituatie ontstaan. De hoogte van het hoogwater hangt met name af van het aantal malen dat een spuiperiode (laagwaterperiode op zee) niet kan worden afgevoerd.

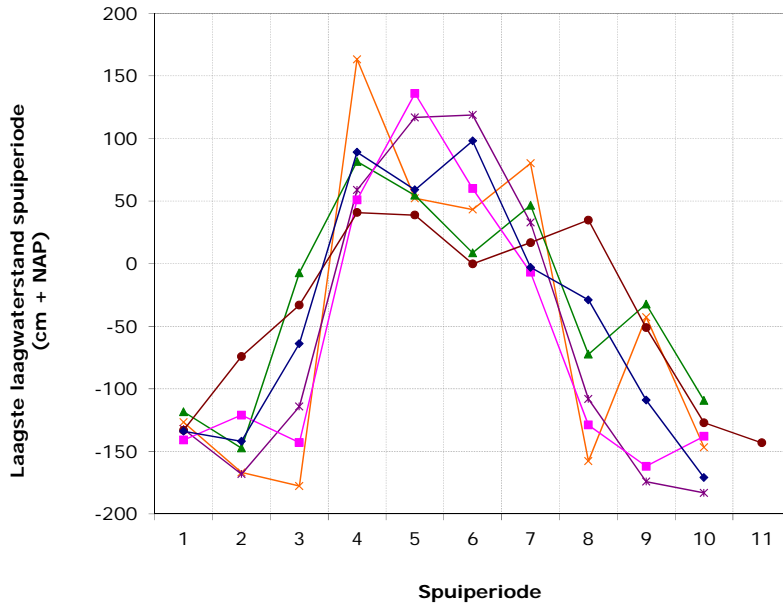
Om te analyseren hoe vaak een spui-stremming of beperking van de spui voorkomt is geanalyseerd hoe vaak de laagste laagwaterstand achtereenvolgens boven een drempelwaarde komt. Hiervoor gebruiken we dezelfde methode van het bepalen van achtereenvolgende overschrijdingen (spui-stremmingen) zoals beschreven in paragraaf 2.2. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-1. In de tabel is bijvoorbeeld te zien dat het 47 keer in de afgelopen 105 jaar is voorgekomen dat drie of meer achtereenvolgende spuiperioden een drempelwaarde van NAP-10 cm hebben overschreden. Voor het overzicht is de tabel hier deels opgenomen. De originele tabel loopt door tot een drempelwaarde van NAP-100 cm, heeft stappen van 5 cm en loopt door tot een aantal opeenvolgende overschrijdingen van de drempelwaarde van 11 maal.

Deze tabel geeft indirect de (bivariate) kansverdeling van zowel de hoogte als de duur van de waterstand op zee. Vanwege de beperkt beschikbare tijd kunnen we deze bivariate kansverdeling niet verder analyseren en vaststellen.

| Drempelwaarde cm+NAP | Aantal opeenvolgende overschrijdingen van de drempelwaarde | | | | | | | |
|-------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | >=1 | >=2 | >=3 | >=4 | >=5 | >=6 | >=7 | >=8 |
| | Aantal waarnemingen in winterhalfjaar: | | | | | | | |
| -50 | 1000 | 462 | 219 | 114 | 52 | 29 | 15 | 9 |
| -40 | 851 | 358 | 153 | 69 | 29 | 15 | 9 | 5 |
| -30 | 692 | 275 | 105 | 46 | 21 | 10 | 6 | 4 |
| -20 | 578 | 217 | 72 | 26 | 12 | 4 | 3 | 2 |
| -10 | 488 | 164 | 47 | 13 | 7 | 2 | 1 | 0 |
| 0 | 404 | 136 | 34 | 8 | 5 | 2 | 1 | 0 |
| 10 | 319 | 102 | 25 | 8 | 5 | 1 | 1 | 0 |
| 20 | 252 | 68 | 15 | 6 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| 30 | 208 | 43 | 10 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 181 | 36 | 9 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 135 | 25 | 6 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 104 | 15 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 70 | 86 | 10 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 80 | 73 | 7 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 90 | 56 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 43 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 110 | 33 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 120 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 130 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 140 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 150 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 200 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

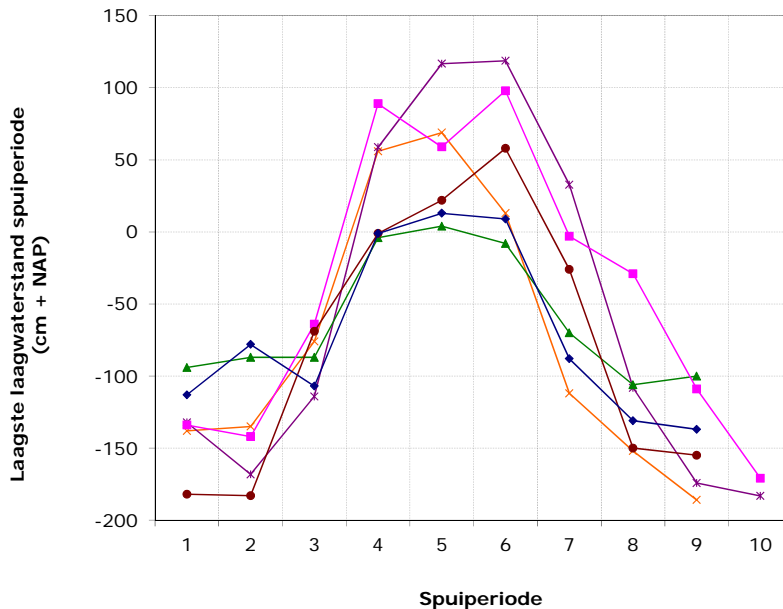
Tabel 3-1: Aantal waarnemingen in de periode januari 1906 - maart 2012 waarbij de laagwaterstand een aantal opeenvolgende spuiperioden de drempelwaarde overschrijdt in het winterhalfjaar

Daarnaast hebben we voor het interessegebied de hoogwaterperioden visueel geanalyseerd. Hiervoor hebben we de 47 perioden geselecteerd met meer dan 3 maal achter elkaar een overschrijding van NAP-10 cm. In Figuur 3-1 op de volgende pagina zijn enkele voorbeelden weergegeven met 4 of meer spuistremmingen. Uit de visuele analyse blijkt dat deze gebeurtenissen allen redelijk vergelijkbare 'golfvormen' kennen. Wel lijkt het alsof er bij 4 en meer spuistremmingen regelmatig twee golven achter elkaar komen. Deze volgen elkaar zo snel op dat de laagwaters vooral langer boven een drempelwaarde blijven. De waterstand zakt tussen de stormen maar beperkt terug, waardoor nauwelijks of geen spuimogelijkheden ontstaan. In paragraaf 2.2 is beschreven hoe we hiermee omgaan.



Figuur 3-1: Zeven gebeurtenissen met hoge laagwaterstanden en 4 of meer achtereenvolgende spuistremmingen. Weergegeven is de laagste laagwaterstand per laagwater/spuiperiode.

Analyse van de gebeurtenissen laat ook zien dat de gebeurtenissen zowel in hoogte als duur gecorreleerd zijn. Over het algemeen kan worden gesteld dat de gebeurtenissen met een langere duur ook een hogere piek kennen. Voorbeelden hiervan zijn weergegeven in Figuur 3-2. Uitzondering hierop vormen de gebeurtenis met 1 of 2 spuistremmingen. Dit zijn laagwaterstanden die relatief hoog komen, maar enkel tot één spuistremming zullen leiden. De spuiperiode daarvoor en daarna kan doorgaans voldoende worden gespuid. Deze gebeurtenissen leiden door de korte periode van spuistremming doorgaans niet tot hoge waterstanden op de boezem en vallen daarmee buiten het interessegebied voor deze analyse.



Figuur 3-2: Zes gebeurtenissen met hoge laagwaterstanden. Weergegeven is de laagste laagwaterstand per laagwater/spuiperiode.

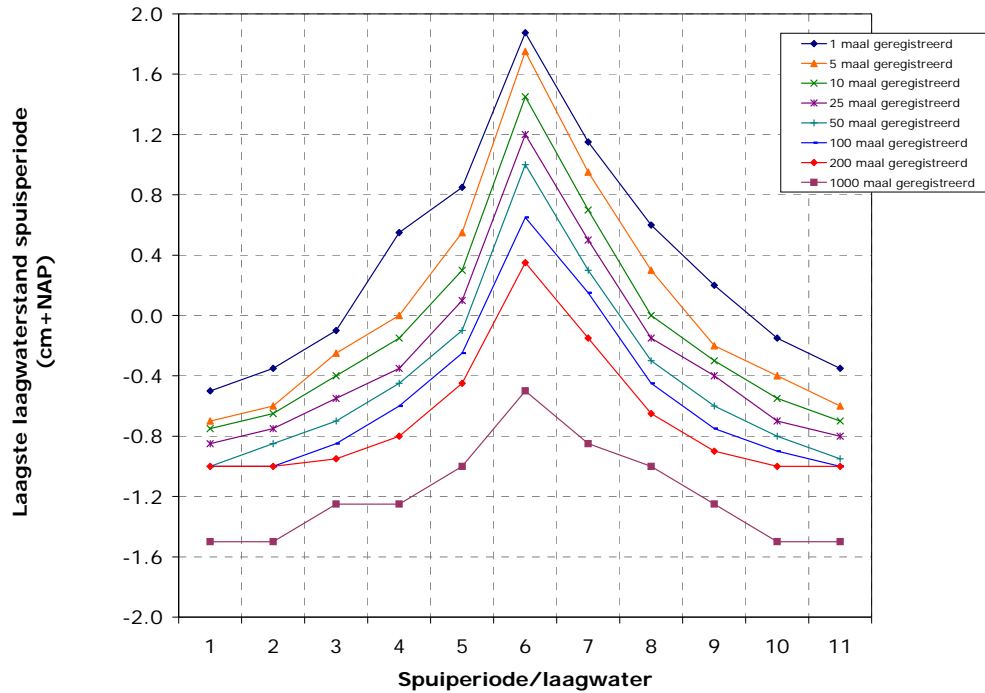
Constructie stochast buitenwaterstand

Om de stochast buitenwaterstand te construeren willen we aansluiten op de data uit Tabel 3-1. Deze geeft immers een kansverdeling voor de duur en hoogte van de zeewaterstand. Omdat de duur en hoogte gedeeltelijk aan elkaar zijn gecorreleerd kunnen we trekkingen uit de tabel uitvoeren met oplopende hoogwaterstanden en oplopend aantal overschrijdingen van drempelwaarden.

Hierbij merken we op dat we niet zozeer geïnteresseerd zijn in extrapolatie naar zeer extreme gebeurtenissen, maar meer in de combinatie van de zeewaterstanden met de neerslag-gebeurtenissen. Als ook meer extreme gebeurtenissen zouden moeten worden getrokken dient eerst een bivariate kansverdeling te worden afgeleid.

We voeren de trekkingen als volgt uit:

- We kiezen verschillende '*kansen*' die we door willen rekenen in de vorm van '*aantal waarnemingen in het winterhalfjaar*' uit Tabel 3-1. Bijvoorbeeld 1, 2, 5, 10, 20 etc. waarnemingen in het winterhalfjaar.
- In elke kolom in Tabel 1 met '*aantal opeenvolgende overschrijdingen van de drempelwaarde*' zoeken we het gekozen getal en waar nodig interpoleren we. 25 waarnemingen in het winterhalfjaar geeft bijvoorbeeld (zie Tabel 3-1):
 - NAP+120 cm voor 1 achtereenvolgende spuiperiode
 - NAP+50 cm voor 2 achtereenvolgende spuiperioden
 - NAP+10 cm voor 3 achtereenvolgende spuiperioden
 - NAP-20 cm voor 4 achtereenvolgende spuiperioden
 - NAP-35 cm voor 5 achtereenvolgende spuiperioden
 - etc.
- Omdat de perioden van opzet zich doorgaans gedragen als golven met de top in het midden sorteren we de gevonden laagwaterstanden rond de piek. Voorbeelden van het resultaat zijn weergegeven in Figuur 3-3. Voor de situatie met 25 waarnemingen geldt bijvoorbeeld:
 - NAP+120 cm voor het hoogste laagwater, nummer 6
 - NAP+50 cm voor spuiperiode nummer 7
 - NAP+10 cm voor spuiperiode nummer 5
 - NAP-20 cm voor spuiperiode nummer 8
 - NAP-35 cm voor spuiperiode nummer 4
 - etc.

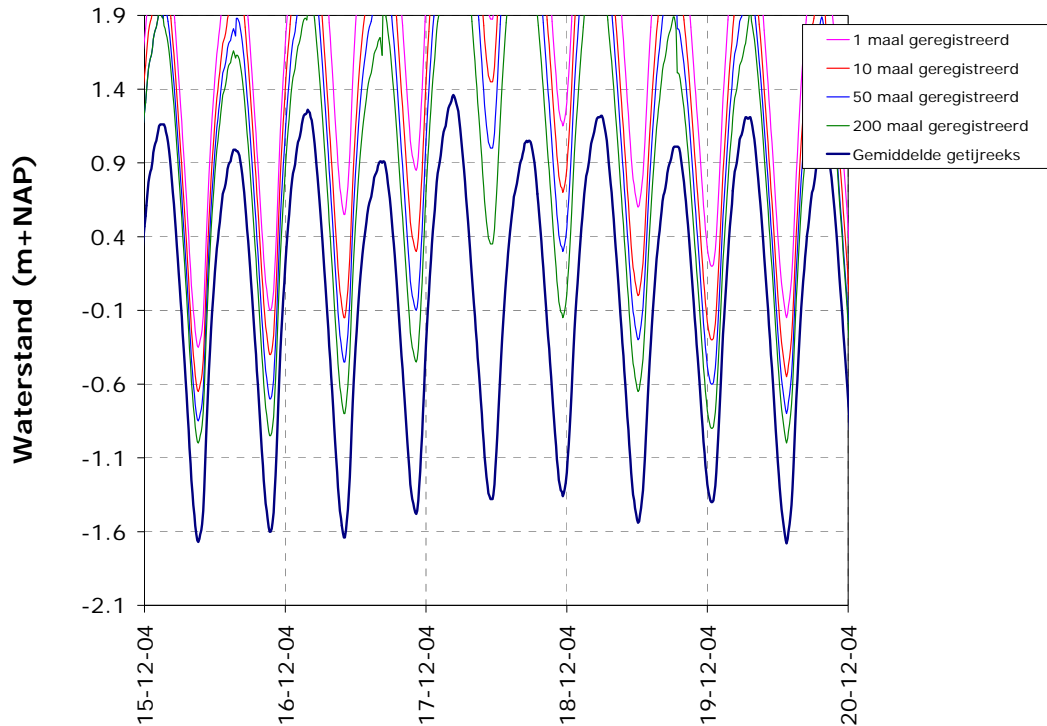


Figuur 3-3: Trekking uit Tabel 3-1 vertaald naar laagwaterstanden voor achtereenvolgende spuiperioden.

Het opvallendste verschil tussen de historische laagwaters en de zo geconstrueerde laagwaters is de hoogte van het hoogste laagwater. Zoals vóór Figuur 3-1 beschreven zijn er veel waarnemingen waarbij 1 achtereenvolgende spuistremming optreedt. Deze combineren we nu echter met de langer aanhoudende perioden van spuistremming. Voor de berekening van hoogwaters op de boezem is deze afwijking niet relevant omdat met name het aantal malen spuistremming/beperking van belang is en minder de exacte hoogte.

We vertalen de zo gereconstrueerde laagwaterstanden met een gemiddelde getijreeks naar een door te rekenen reeks. Hierbij komen de laagste laagwaterstanden per spuiperiode exact overeen met de trekkingen (zoals afgebeeld in Figuur 3-3). We doen dit door verhoging van de gehele periode rond het laagwater tot de gewenste laagste laagwaterstand. Voorbeelden hiervan zijn opgenomen in Figuur 3-4. De y-as is zo gekozen dat het verloop van de laagwaterstanden zichtbaar is. Hierbij merken we op dat de knikken die in de figuren te zien zijn bij de hoogwaterstanden op zee worden veroorzaakt door het 'optillen' van de getijreeks in de gehele periode rond de laagwaters. Dit heeft geen invloed op de berekening van de hoogwaterstanden op de boezem omdat de spuumogelijkheden hierdoor niet worden beïnvloed.

Doorgerekend zijn de gebeurtenissen die 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200 en 1000 maal zijn geregistreerd in de afgelopen 100 jaar.



Figuur 3-4: Resulterende door te rekenen buitenwaterstanden.

3.3 Neerslagvolume en -patronen

De neerslaggebeurtenissen en de gebruikte neerslagstatistiek zijn conform STOWA (2004). Dit geldt voor zowel de neerslagpatronen als de neerslagvolumes. Er is zowel gerekend met 4-daagse als met 9-daagse neerslaggebeurtenissen. Na de naverwerking in de statistiek van waterstanden toetsen we welke duur maatgevend is bij welke herhalingsijd. We discretiseren de neerslag in stappen van 10 mm en rekenen de neerslagvolumina door zoals weergegeven Tabel 3-2.

| 4 dagen | | 9 dagen | |
|----------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Neerslagklasse | Door te rekenen neerslagvolume (mm) | Neerslagklasse | Door te rekenen neerslagvolume (mm) |
| < 45 mm | 40 | < 65 mm | 60 |
| 45 tot 55 mm | 50 | 65 tot 75 mm | 70 |
| 55 tot 65 mm | 60 | 75 tot 85 mm | 80 |
| 65 tot 75 mm | 70 | 85 tot 95 mm | 90 |
| 75 tot 85 mm | 80 | 95 tot 105 mm | 100 |
| 85 tot 95 mm | 90 | 105 tot 115 mm | 110 |
| 95 tot 105 mm | 100 | 115 tot 125 mm | 120 |
| 105 tot 115 mm | 110 | 125 tot 135 mm | 130 |
| 115 tot 125 mm | 120 | 135 tot 145 mm | 140 |
| >125 mm mm | 130 | >145 mm mm | 150 |

Tabel 3-2: Doorgerekende neerslagvolumina voor de 4-daagse en 9-daagse neerslaggebeurtenissen

Voor de kans op de neerslag is de winterstatistiek van de neerslag gebruikt. Deze kans is vervolgens gecorrigeerd voor de in paragraaf 2.3 en 2.4 beschreven correctie voor de correlatie tussen windopzet/spuistremming en neerslag. Dit betekent voor de neerslaggebeurtenissen in combinatie met een buitenwaterstand waarbij 1 tot 4 maal NAP-0,10 m wordt overschreden een correctie van:

- 6.2 mm voor de 4-daagse neerslagsom.
- 6.3 mm voor de 9-daagse neerslagsom.

Voor de neerslaggebeurtenissen in combinatie met een buitenwaterstand waarbij 5 maal of vaker NAP-0,10 m wordt overschreden betekent dit een correctie van:

- 29.8 mm voor de 4-daagse neerslagsom.
- 36.5 mm voor de 9-daagse neerslagsom.

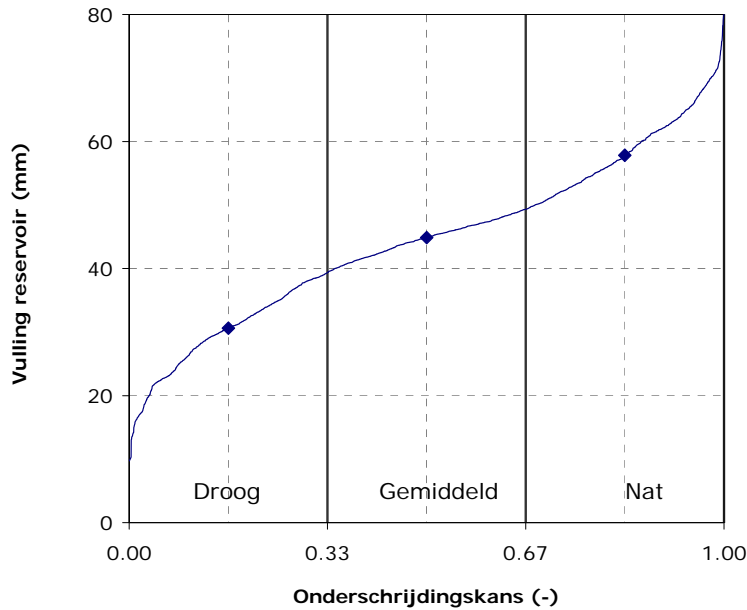
Daarnaast zijn de neerslaggebeurtenissen gecorrigeerd voor het gebiedsgrootte-effect zoals beschreven in Bijlage A.

In de combinatie met de stochast buitenwaterstand is er voor gekozen om de neerslag zo op te leggen dat de afvoergolf ten gevolge van de neerslag samenvalt met de spuistremmingen. Dit is gedaan door de neerslagpiek in de neerslaggebeurtenissen 36 uur vóór de hoogste buitenwaterstand op het model te zetten. Bij de gebeurtenissen met twee pieken valt de tweede neerslagpiek (die een hogere afvoergolf als gevolg heeft dan de eerste neerslagpiek) 36 uur vóór de hoogste buitenwaterstand. Deze timing is een bovengrensbepaling die er voor zorgt dat de gehele afvoergolf de boezem belast op het moment dat de gestremde spuien optreden.

3.4 Beginvoorwaarde

De beginvoorwaarde van het watersysteem bestaat uit de initiële vulling van de reservoirs in SACRAMENTO. Dit zijn het upper zone tension reservoir, het upper zone free water reservoir, het lower zone tension reservoir, het lower zone primary free water reservoir en het lower zone supplemental free water reservoir.

De vulling van de reservoirs is bepaald op basis van de uitkomsten van de langjarige tijdreeksberekening. Hieruit zijn enkel de winterperioden geselecteerd (oktober tot en met maart), omdat hoogwaters op het boezemsysteem doorgaans in de winterperiode voorkomen. De kansverdeling van de vulling van de reservoirs is per SACRAMENTO-knoop bepaald en gediscrèteerd in drie realisaties met allen een gelijke kans van 1/3: droog, gemiddeld en nat. De mediaan van de klasse is de doorgerekende realisatie van de stochast. De realisaties zijn vervolgens als initiële vulling opgenomen in het sacramento.3b bestand. Een voorbeeld van de kansverdeling van de vullingsgraad is weergegeven in Figuur 3-5.



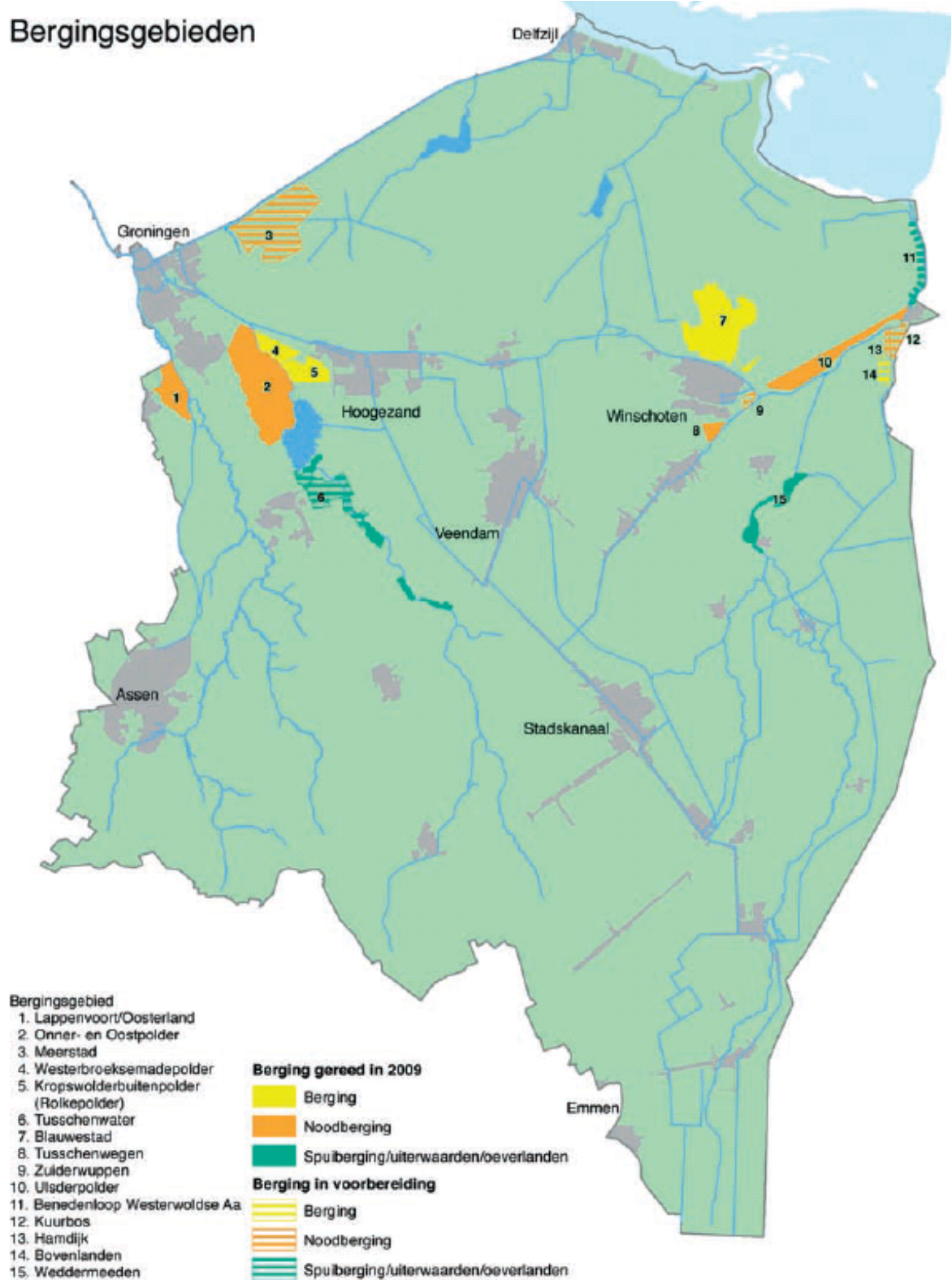
Figuur 3-5: Voorbeeld van de gekozen beginvoorwaarde voor de stochast beginvoorwaarde.

3.5 Inzet bergingsgebieden

Alvorens de uitkomsten te bespreken beschrijven we beknopt de in het toegeleverde model opgenomen bergingen en de karakteristieken daarvan. Dit gebruiken we vervolgens als eerste controle van de modeluitkomsten en om in te schatten of de uitkomsten plausibel zijn in vergelijking met eerdere studies.

In Figuur 3-6 zijn de locaties van de bergingsgebieden geïllustreerd. De in het model opgenomen bergingsgebieden zijn opgenomen in Tabel 3-3. De bergingsgebieden worden gestuurd ingezet als de waterstand bij Zuidbroek (Eemskanaalboezem), Tutjeshut (Dollardboezem) en/of Ulsda (Dollardboezem) een bepaald peil overschrijden. Deze peilen zijn opgenomen in Tabel 3-3. In de tabel is tevens een sturingsmaatregel opgenomen die ook invloed heeft op de waterstanden op de boezem. Het betreft het opzetten van de bovenstroomse kanaalpannen met 50 cm.

Bergingsgebieden



Figuur 3-6: Locaties van de boezemuitbreidingen (donker groen), reguliere bergingsgebieden (geel) en noodberginggebieden (oranje).

| | Inzetpeil |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Boezemuitbreiding | |
| Tusschenwater | Meebergend |
| Benedenloop Westerwoldsche Aa | Meebergend |
| Weddermeeden | Meebergend |
| Reguliere berging | |
| Bovenlanden | NAP+1,25 m bij Tutjeshut |
| Westerbroeksemadepolder | NAP+1,25 m bij Zuidbroek |
| Rolkepolder | NAP+1,25 m bij Zuidbroek |
| Blauwestad | NAP+1,25 m bij Ulsda |
| Noodberging | |
| Lappenvoort | NAP+1,30 m bij Zuidbroek |
| Onner- en Oostpolder | NAP+1,40 m bij Zuidbroek |
| Tusschenwegen | NAP+1,35 m bij Ulsda |
| Zuiderwuppen | NAP+1,40 m bij Ulsda |
| Ulsderpolder | NAP+1,40 m bij Ulsda |
| Kurbos | NAP+1,40 m bij Tutjeshut |
| Hamdijk | NAP+1,40 m bij Tutjeshut |
| Berging kanalenstelsel bovenstrooms | NAP+1,20 m bij Zuidbroek |

Tabel 3-3: Inzet bergingsgebieden

In Tabel 3-4 zijn de bergingsvolumes van de bergingsgebieden opgenomen (volgens opgave van het waterschap). Dit zijn de bergingsvolumes bij een maatgevende waterstand op de boezem van NAP+1,50 m. Bij lagere waterstanden is het bergend volume kleiner en afhankelijk van de diepte en het oppervlak van het bergingsgebied. Het bergingsvolume van de opzet van de kanaalpannen is geschat door de lengte van de kanalen (circa 80 km) te vermenigvuldigen met de gemiddelde breedte (circa 20 m) en de opzet in de kanalen (50 cm).

Om de bergingsvolumes te kunnen relateren aan de neerslag en de afvoer uit het stroomgebied ten gevolge van de neerslag hebben we de bergingsvolumes omgeslagen naar het oppervlak van het stroomgebied (157000 ha) en uitgedrukt in mm. In Tabel 3-4 is te zien dat het totale bergingsvolume in de bergingsgebieden 32.1 mm beslaat. Het grootste deel, bijna 70%, van dit bergingsvolume is beschikbaar in de noodberginggebieden, waarvan weer 75% beschikbaar is in de twee grootste noodberginggebieden: de Onner- en Oostpolder en de Ulsderpolder. Als we bij het totale bergingsvolume van de bergingsgebieden de berging op de Eemskanaal- en Dollardboezem (tussen streefpeil en NAP+1,30 m en plaatselijk NAP+1,50 m) optellen is het totale bergingsvolume van het boezemsysteem bijna 43 mm.

Bij een afvoer uit het stroomgebied naar de boezem van 12 mm/dag betekent dit dat deze afvoer $3\frac{1}{2}$ dagen moet aanhouden voordat de boezem én de bergingsgebieden (inclusief noodberginggebieden) volledig zijn gevuld als niet kan worden gespuid op zee. Uit de afvoermetingen, die voor eerdere kalibratie van de modellen zijn gebruikt, blijkt dat er een kleine kans is dat een dergelijk langdurige hoge afvoer optreedt. Alleen in dergelijke zeer extreme situaties zullen de noodberginggebieden volledig worden ingezet. Bij dezelfde afvoer uit het stroomgebied is na $1\frac{3}{4}$ dag de berging in de boezem en reguliere bergingsgebieden niet meer toereikend en is inzet van noodberginggebieden nodig als niet kan worden gespuid op zee.

Om de volumes van de bergingsgebieden te kunnen relateren aan waterstandsverandering op de boezem hebben we de bergingsvolumes ook omgeslagen naar het open water oppervlak van de Eemskanaal- en Dollardboezem (1650 ha). In de tabel is te zien dat optimale inzet van bijvoorbeeld de reguliere bergingsgebieden bij een waterstandsverlaging op de boezem kan hebben van 66 cm.

Naast de bergingsmogelijkheden vermelden we hier ook de afvoermogelijkheid richting gemaal Rozema. In de aanloop en gedurende hoogwaterperioden op de Eemskanaal- en Dollardboezem kan water worden afgeleid via de Oldambtboezem naar gemaal Rozema. Deze afvoercapaciteit wordt ingezet als bij Delfzijl niet op zee kan worden gespuid. In de aanloop naar een hoogwater kan op deze manier veelal 50 m³/s worden afgeleid. Als de peilen op de Oldambtboezem oplopen wordt de capaciteit van de afleiding gemaximeerd op 25 m³/s. Als de volledige capaciteit van 50 m³/s een dag lang wordt ingezet komt dit neer op een volume van 4.3 miljoen m³, oftewel 2.75 mm omgeslagen naar het oppervlak van het stroomgebied en een waterstandsverlaging op de boezem van 27 cm.

Ter vergelijking: bij normale waterstanden op de Eemskanaal- en Dollardboezem en op zee kan in totaal circa 5 tot 6 miljoen m³ per dag worden afgevoerd naar zee. Dit is per circa 4 mm omgeslagen naar het gehele stroomgebied en een waterstandsverlaging van ongeveer 40 cm op de boezem.

Ter illustratie een rekenvoorbeeld: Als bijvoorbeeld 5 maal niet kan worden gespuid kan 3 dagen lang niet worden afgevoerd naar zee via de spui. Als de afvoer uit het stroomgebied in die periode gemiddeld 12 mm/dag bedraagt komt in totaal 36 mm op de boezem. Via Rozema zou dan minimaal 4 mm kunnen worden afgevoerd (25 m³/s gedurende drie dagen). Dan is daarnaast nog 32 mm bergingsruimte nodig. Ongeveer 20 mm kan in de boezem zelf, de boezemuitbreidingen en de reguliere bergingsgebieden worden geborgen. Er is dan nog een bergingstekort van 12 mm. Bij dergelijke combinaties van afvoer en spuistremming zouden dus noodbergingsgebieden moeten worden ingezet.

In de kleinere noodbergingsgebieden kan gezamenlijk ongeveer 5 mm worden geborgen. De Ulsderpolder en Onner- en Oostpolder zouden in dat geval dus ook (deels) moeten worden ingezet.

| | Berging | | |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| | Miljoen m ³ | mm (over stroomgebied) | m (op de boezem) |
| Boezemberging vanaf streefpeil | 19.9 | 10.8 | - |
| Eemskanaal | 11.2 | 7.1 | - |
| Dollardboezem | 5.8 | 3.7 | - |
| Boezemuitbreiding totaal | 4.0 | 2.5 | 0.24 |
| Tussenwater (zuidelijk deel) | 1.2 | 0.8 | 0.07 |
| Benedenloop Westerwoldsche Aa | 0.3 | 0.2 | 0.02 |
| Weddermeeden + De Gaast | 2.5 | 1.6 | 0.15 |
| Reguliere berging totaal | 10.9 | 6.9 | 0.66 |
| Bovenlanden | 1.7 | 1.1 | 0.10 |
| Westerbroeksemadepolder | 2.3 | 1.5 | 0.14 |
| Rolkepolder | 3.4 | 2.2 | 0.21 |
| Blauwestad | 3.5 | 2.2 | 0.21 |
| Noodberging totaal | 34.8 | 22.1 | 2.11 |
| Lappenvoort | 4.5 | 2.9 | 0.27 |
| Onner- en Oostpolder | 18.4 | 11.7 | 1.12 |
| Tussenwegen | 1.5 | 1.0 | 0.09 |
| Ulsderpolder | 8.2 | 5.2 | 0.50 |
| Kuurbos | 1.5 | 1.0 | 0.09 |
| Hamdijk | 0.7 | 0.4 | 0.04 |
| Berging kanalenstelsel bovenstrooms | 0.8 | 0.5 | 0.05 |
| Totaal berging | | | |
| Exclusief boezemberging | 50.5 | 32.1 | 3.06 |
| Inclusief boezemberging | 67.5 | 42.9 | - |

Tabel 3-4: Bergingshoeveelheden (bij een waterstand van NAP+1,50 m op de boezem)

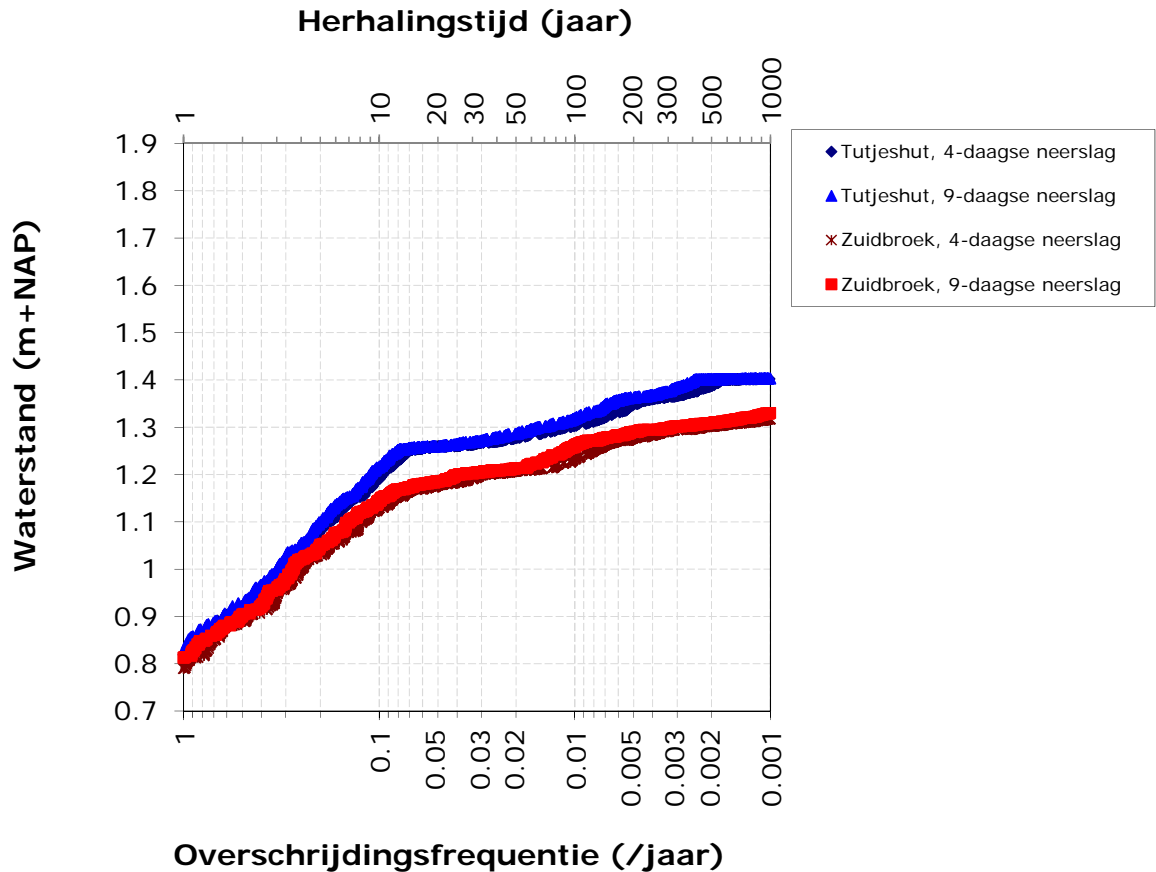
3.6 Uitkomsten

De uitkomsten van de stochastische berekeningen illustreren we voor twee belangrijke locaties in het boezemsysteem: Zuidbroek en Tustjeshut. In Figuur 3-7 zijn de resultaten weergegeven. De x-as in de figuur is weergegeven als overschrijdingsfrequentie (/jaar), ter illustratie zijn op de tweede x-as (de bovenkant) de corresponderende herhalingstijden (jaar) weergegeven.

In de figuur zijn twee uitkomsten te zien: die van de berekeningen met 4-daagse en die met 9-daagse neerslag. De 9-daagse neerslaggebeurtenis is maatgevend, maar de verschillen zijn beperkt.

In de figuur is een duidelijke afvlakking te zien bij Tustjeshut bij NAP+1,25 m. Bij dezelfde herhalingstijd is te zien dat de waterstanden bij Zuidbroek ook afvlakt. Deze afvlakking wordt veroorzaakt door de inzet van bergingsgebied Bovenlanden. Vervolgens is nog een afvlakking bij NAP+1,20 m bij Zuidbroek te zien. Deze afvlakking wordt veroorzaakt door de opzet van bovenstroomse kanaalpannen. De afvlakkingen bij de hogere waterstanden worden vervolgens veroorzaakt door de successievelijke inzet van de overige reguliere- en noodbergingsgebieden. Noodbergingsgebied Lappenvoort wordt bijvoorbeeld ingezet bij NAP+1,30 m bij Zuidbroek, met

een overschrijdingsfrequentie van 0.003/jaar (een herhalingsjijd van ongeveer 330 jaar). Bij NAP+1,40 m bij Tutjeshut treedt een sterke afvlakking op door inzet van onder andere de noodbergingsgebieden Ulsderpolder en Zuiderwuppen. Dit gebeurt bij een overschrijdingsfrequentie van 0.025/jaar (een herhalingsjijd van 400 jaar).



Figuur 3-7: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek voor de twee doorgerekende neerslagduren

Kenmerken gebeurtenissen

Nadere analyse van de gebeurtenissen toont aan dat hoogwatergebeurtenissen die leiden tot *inzet van de noodbergingsgebieden* over het algemeen worden gekenmerkt door de volgende stochasten:

- Minimaal 4 achtereenvolgende spuiستremmingen;
Als het aantal achtereenvolgende spuiستremmingen minder is dan vier treden nauwelijks situaties op waarbij de noodbergingsgebieden moeten worden ingezet. Bij minder dan vier achtereenvolgende spuiستremmingen is enkel bij de realisaties met zeer hoge en gepiekte neerslag inzet van de noodberging nodig. Door de kleine kans op die gebeurtenissen is de kansbijdrage beperkt.
Bij vier of meer achtereenvolgende spuiستremmingen is bij een minder extreme neerslag wel inzet van noodbergingsgebieden noodzakelijk. De kansbijdrage van dergelijke gebeurtenissen is veel groter en daardoor maatgevend.
- Een natte beginvoorwaarde;
Met name de gebeurtenissen met een natte beginvoorwaarde kunnen, in combinatie met een hoge neerslag en enkele achtereenvolgende spuiستremmingen, leiden tot inzet van de noodbergingsgebieden. Ook gebeurtenissen met een gemiddelde beginvoorwaarde dragen

bij, zij het beperkt. Gebeurtenissen met een droge beginvoorwaarde leiden, ook in combinatie met zeer hoge neerslag en langdurige spuistremming niet tot inzet van de noodbergingsgebieden.

- Een neerslagvolume van 70 mm of meer bij de 4-daagse neerslaggebeurtenissen en een neerslagvolume van 100 mm of meer bij de 9-daagse gebeurtenissen;
Bij een lager neerslagvolume is de berging op de boezem en in de reguliere bergingsgebieden doorgaans voldoende om de inzet van noodbergingsgebieden te voorkomen.
- Een gepiekt neerslagpatroon met één piek;
Dit betreft de vier neerslagpatronen met één piek zoals beschreven in STOWA (2004). De uniforme neerslag en de neerslaggebeurtenissen met twee pieken leiden pas tot inzet van de noodbergingsgebieden in combinatie met een zeer hoog neerslagvolume en een langdurige spuistremming, de kansbijdrage is daardoor beperkt.

Over het algemeen kan worden geconcludeerd dat ook op basis van deze uitkomsten de noodbergingsgebieden minder vaak dan eens per 100 jaar hoeven te worden ingezet. Daarmee voldoen ze - conform eerdere studies - aan de beschrijving van de noodbergingsgebieden zoals gegeven in het Waterbeheerplan 2010-2015 van Hunze en Aa's.

3.7 Vergelijking met Quick-Scan en HOWA-1

In vergelijking met eerdere onderzoeken HOWA-1 (WL Delft Hydraulics, 2001) en de Quick-Scan (Deltares, 2010) kijken de resultaten af. Een overzicht van de verschillen staat voor Zuidbroek en Tutjeshut in Tabel 3-5.

| | Waterstanden Zuidbroek (m+NAP) | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|
| Herhalingstijd (jaar) | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| Nu, stochastanalyse | 1.20 | 1.27 | 1.30 | 1.32 |
| Quick scan | | 1.27 | 1.45 | 1.93 |
| HOWA-1 Stochastanalyse (RWS methode) | 1.12 | 1.46 | 1.95 | 2.66 |
| | Waterstanden Tutjeshut (m+NAP) | | | |
| Herhalingstijd (jaar) | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| Nu, stochastanalyse | 1.28 | 1.32 | 1.38 | 1.40 |
| Quick scan* | | 1.35 | 1.48 | 2.03 |
| HOWA-1 Stochastanalyse (RWS methode) | 1.11 | 1.50 | 2.03 | 2.82 |

* Voor de Quick scan zijn de resultaten niet voor Tutjeshut maar voor Nieuw-Statenzijl beschikbaar. De waterstanden op die twee locaties wijken echter beperkt af en zijn daarom hier weergegeven.

Tabel 3-5: *Verschillen tussen onderzoeken, NB: HOWA-1 is de uitgangssituatie zonder bergingsgebieden, ook geen meebergende gebieden*

Verklaring verschillen met Quick-scan

De Quick-scan was een beknopt onderzoek met als doel te verkennen of DV2050 nodig was. Er is daarbij gebruik gemaakt van de recentste SOBEK-modellen en met de inzet van de meest recente bergingsgebieden. Er is echter geen nieuwe statistische analyse uitgevoerd voor extreme waterstanden. Voor de extreme situaties zijn de benaderingen uit HOWA-1 overgenomen. Eén van de aanbevelingen van de Quick Scan was om in het project DV2050 een nieuwe statistische analyse van extreme waterstanden uit te voeren op basis van de nieuwste modellen en inzichten.

Bij een herhalingstijd van 100 jaar komen de resultaten van de Quick-scan en het huidige onderzoek goed overeen, bij T300 en T1000 wijken ze meer af. Omdat in het voorliggende onderzoek dezelfde modellen zijn gebruikt als in de Quick-Scan komen de verschillen tussen de Quick-scan en de voorliggende analyse vooral voort uit de nieuwe statistische benadering en niet uit modelwijzigingen zoals het wel of niet inzetten van (nood)bergingsgebieden.

Bij de Quick-scan is gerekend conform de statistische methode zoals opgesteld in HOWA-1. Dit betekent dat voor de vergelijking van maatregelen is gerekend met als basis de gebeurtenis november 1998. De herhalingstijd van deze gebeurtenis is gelijk gesteld aan 100 jaar (T100). Om extremere herhalingstijden te bepalen is de afvoer uit het stroomgebied van 1998 vermenigvuldigd met 1.8 voor bepaling van de waterstanden bij T300 en met een factor 3 voor bepaling van de waterstanden bij T1000.

Deze factoren betekenen echter dat de afvoer uit het stroomgebied kan toenemen tot respectievelijk 21.6 mm/dag en 36 mm/dag gedurende circa 3 dagen. Een dergelijk hoge afvoer naar de boezem achten wij niet realistisch. Ten eerste geeft de (punt)statistiek van neerslag aan dat de herhalingstijd van een neerslag van (3×36 mm/dag =) 108 mm in 3 dagen ongeveer 1250 jaar is. Voor de gebiedsstatistiek van neerslag zal een nog hogere herhalingstijd gelden. Deze neerslag zou dan ook nog eens volledig zonder noemenswaardige berging of vertraging binnen die periode van 3 dagen moeten worden afgevoerd naar de boezem. Dat is niet reëel. Ten tweede is de capaciteit van de ontwatering en afwatering van het gebied te beperkt en zal de maximale afvoer naar de boezem eerder in de orde van 12 tot 15 mm/dag liggen. Kortdurende overschrijding van die maximale capaciteit kan zeker optreden door bijvoorbeeld stroming langs stuwen over het maaiveld, maar langdurige (meerdere dagen) overschrijding daarvan achten wij niet realistisch en blijkt ook niet uit bijvoorbeeld de afvoermetingen in 1998.

Wij achten de berekende waterstanden in de Quick-Scan bij T300 en T1000 dan ook een overschatting.

Verklaring verschillen met HOWA-1

De verschillen tussen de resultaten van de Quick-scan en HOWA-1 worden voor een groot deel veroorzaakt door de inzet van (nood)bergingsgebieden en deels door de herkalibratie van het neerslag-afvoer model en de actualisatie van de SOBEM-modellen voor de aanleg van nieuwe meebewegende berging. In HOWA-1 waren de (nood)bergingsgebieden nog niet gerealiseerd en is gerekend zonder de inzet van de (nood)bergingsgebieden. Met de inzet van de bergingsgebieden kan het verschil in waterstanden worden verklaard. Het bergingsvolume in de reguliere bergingsgebieden en de boezemuitbreidingen staat bij optimale inzet voor een waterstandsverschil van 0.9 m op de Eemskanaal-Dollardboezem (zie Tabel 3-4). Het verschil tussen de Quick-scan en HOWA-1 kan hiermee in principe volledig worden verklaard.

Bij bestudering van de RWS-methode in HOWA-1 valt op dat de gebeurtenis in december 1960 (hoge neerslag in combinatie met 1 spuistremming, in HOWA-1 overigens als 0 spuistremmingen benoemd) een maximale waterstand levert die bijna net zo hoog is als die van 1998. Dergelijke hoge waterstanden komen niet uit het huidige model met vergelijkbare berekeningen. Hoge neerslagen zonder spuistremmingen leiden in het huidige model niet tot waterstanden waarbij (meerdere) bergingsgebieden ingezet zouden moeten worden. Mogelijk is dit een verschil in de uitkomsten van het neerslag-afvoermodel ten gevolge van de aanpassingen en herkalibratie van het model.

Hierdoor, en door de bij de Quick-Scan beschreven vertaling van de afvoer naar de boezem voor T300 en T1000, zijn de uitkomsten uit HOWA-1 een overschatting van de kans op wateroverlast.

3.8 Klimaatscenario's

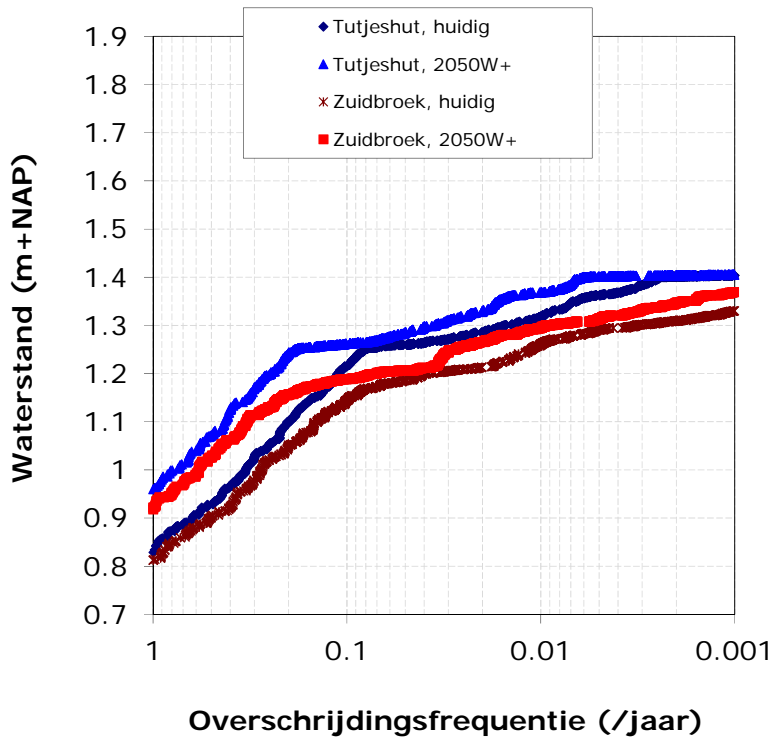
De invloed van een veranderend klimaat is onderzocht met het klimaatscenario voor 2050W+. Dit is het meest extreme scenario voor het stormseizoen, waarbij de neerslagtoename 12% is en de zeespiegelstijging 20-35 cm (bron: tabel 1 op <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/-samenvatting/index.html>). Daarnaast is ook een doorkijk gegeven voor het zichtjaar 2100, ook met het W+ scenario. De neerslagtoename voor dat zichtjaar en scenario is 24%, de zeespiegelstijging is daarbij 40-85 cm.

Om de zeespiegelstijging te verwerken in de berekeningen laten we de buitenwaterstanden, conform de eerdere studies (HOWA-1 en Quick-Scan), toenemen met het maximum van het W+ scenario: 35 cm voor zichtjaar 2050 en 85 cm voor zichtjaar 2100. Daarnaast merken we op dat het basisjaar van de KNMI'06 scenario's 1990 is. Bij de bepaling van de stochast zeewaterstand hebben we zeespiegelstijging verwerkt tot 2012. We moeten daarom de zeespiegelstijging nog corrigeren voor het verschil tussen 1990 en 2012.

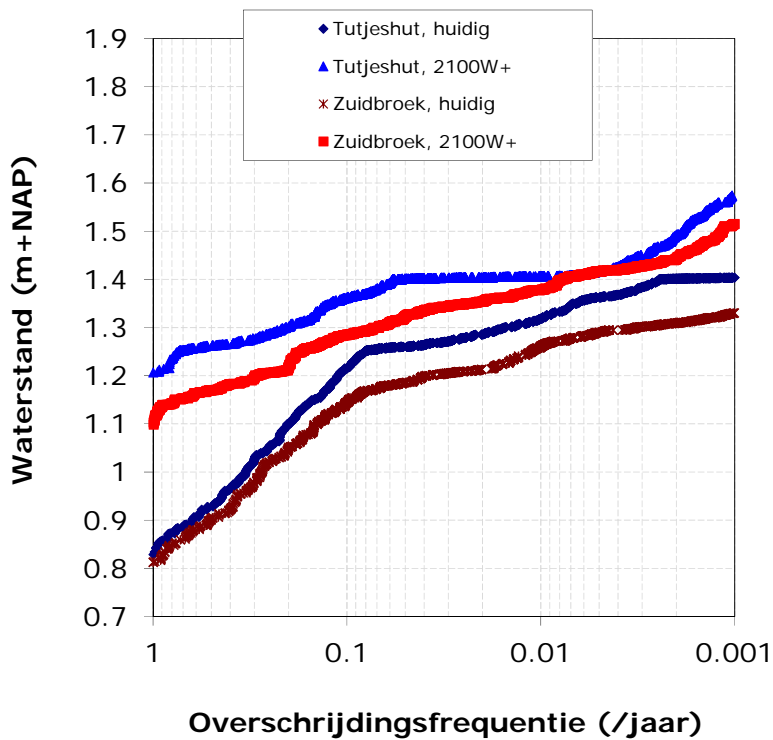
We nemen daarbij aan dat de zeespiegelstijging lineair verloopt tussen 1990 en 2050. De stijging van de zeespiegel van 2012 tot 2050 is dan 22.2 cm (27.5 cm over 60 jaar - 1990 tot 2050 - is 22.2 cm over 38 jaar - 2012 tot 2050). De zeewaterstand in de berekeningen laten we voor het zichtjaar 2050 toenemen met 22.2 cm. Voor het zichtjaar 2100 is de toename ten opzichte van 2050 50 cm, oftewel 72.2 cm ten opzichte van 2012. De neerslagtoename in de berekeningen is 12% voor zichtjaar 2050 en 24% voor zichtjaar 2100.

De resultaten van de berekeningen voor 2050W+ en 2100W+ zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 3-8 en Figuur 3-9. In de figuren is te zien dat door de neerslagtoename en zeespiegelstijging de frequentie van inzet van de (nood)bergingsgebieden sterk toeneemt. In het scenario 2100 W+ zijn de bergingsgebieden niet toereikend en is aanvullende bergingsruimte of gemaalcapaciteit noodzakelijk.

Hierbij merken we op dat de mogelijkheden voor spuien op zee sterk afnemen bij stijgende zeespiegel. Dit is dan ook een belangrijke oorzaak voor de toename van de kans op wateroverlast in de toekomstscenario's. Uit Tabel 3-1 in paragraaf 3.2 is bijvoorbeeld af te lezen dat bij een zeespiegelstijging van circa 20 cm (bij 2050W+) het aantal maal 5 achtereenvolgende spuistremmingen bij NAP-10 cm toeneemt van 7 naar 21 per 106 jaar (de getallen met het aantal waarnemingen in de tabel schuiven als het ware 20 cm, oftewel twee rijen, naar beneden). Dit betekent dat de kans op gebeurtenissen met 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen – die in combinatie met hoge neerslag tot wateroverlast kunnen leiden – 3 maal zo hoog is. Bij een zeespiegelstijging van circa 70 cm bij 2100W+ neemt het aantal maal 5 achtereenvolgende spuistremmingen verder toe tot circa 175, oftewel 25 maal zo vaak dan in het huidige klimaat.



Figuur 3-8: Kans-waterstands relatie vo or Tutjeshut en Zuidbroek voor het huidig klimaat en voor het klimaatscenario 2050 W+.



Figuur 3-9: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek voor het huidig klimaat en voor het klimaatscenario 2100 W+.

In Tabel 3-6 is de vergelijking met de Quick-scan voor 2050W+ opgenomen. Hierbij merken we op dat in de Quick-scan:

- De zeespiegelstijging in de berekening 35 cm is.
- De neerslagtoename 12% is voor de bepaling van de T100. Voor de T300 en T1000 zijn de met die neerslagtoename berekende afvoeren uit het stroomgebied vermenigvuldigd met de factor 1.8 en 3 (zoals beschreven in paragraaf 3.7).
- Rekening is gehouden met uitbreiding van afvoercapaciteiten (gemaalcapaciteiten polderbemaling). In het huidige onderzoek is hier geen rekening mee gehouden.

De in de paragraaf 3.6 geschetste overschatting van de afvoer naar de boezem in de Quick-Scan maakt verdere vergelijking van de resultaten minder zinvol voor de herhalingstijden van 300 en 1000 jaar.

| Herhalingstijd | Waterstanden Zuidbroek (m+NAP) | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|------|------|------|
| | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| Nu, stochastanalyse | 1.20 | 1.27 | 1.30 | 1.32 |
| Nu, stochastanalyse, 2050W+ | 1.25 | 1.30 | 1.33 | 1.37 |
| Quick scan | | 1.27 | 1.45 | 1.93 |
| Quick scan 2050 | | 1.35 | 1.62 | 2.26 |

Tabel 3-6: Verschillen tussen resultaten van de Quick-Scan en het voorliggende onderzoek.

4 Gevoeligheidsanalyses

4.1 Inleiding

Om de gevoeligheden van de stochastenmethode en de gevolgen van aannamen in de berekeningen voor de berekende herhalingstijden van waterstanden te duiden hebben we enkele gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

- Geen inzet bergingsgebieden (paragraaf 4.2).
- Geen correlatie tussen spuistremming en neerslag (paragraaf 4.3).
- Sterkere correlatie tussen spuistremming en neerslag (paragraaf 4.4).
- Grotere kans op natte beginvoorwaarde (paragraaf 4.5).
- Gebruik van jaarstatistiek van de neerslag in plaats van winterstatistiek (paragraaf 4.6).

De resultaten voor Tutjeshut en Zuidbroek zijn in de volgende paragrafen beschreven. De gevoeligheidsanalyses zijn enkel uitgevoerd voor de neerslagduur van 4 dagen en het huidige klimaat.

4.2 Geen inzet bergingsgebieden

Er is een berekening gemaakt waarbij de gestuurde reguliere en noodbergingsgebieden niet zijn ingezet. In Tabel 4-1 zijn de resultaten samengevat en in Figuur 4-1 gevisualiseerd voor het bereik eens per jaar tot eens per 1000 jaar. Let op: de getallen in de tabel wijken af van die in hoofdstuk 3 omdat de gevoeligheidsanalyses enkel zijn berekend met de 4-daagse neerslaggebeurtenissen.

Uit de tabel blijkt dat voor de 1/100 jaar situatie de maximale waterstand berekend met de huidige statistische methode en zonder bergingsgebieden niet veel afwijkt van de HOWA uitkomsten, die ook zijn berekend zonder bergingsgebieden. Voor de 1/300 jaar en 1/1000 jaar wijken de resultaten wel sterk af. Een verklaring voor deze afwijking is gegeven in paragraaf 3.7.

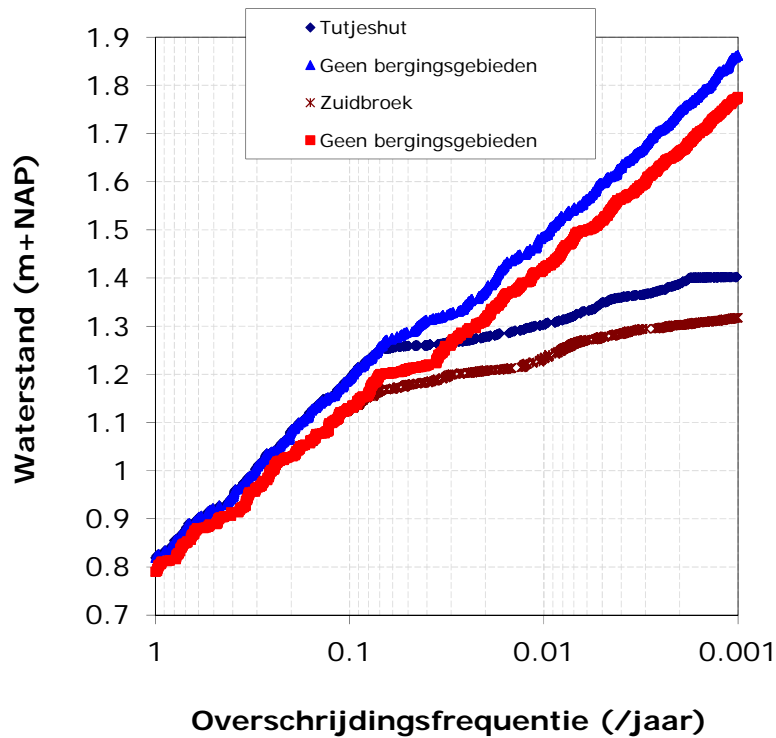
In Figuur 4-1 is te zien dat de waterstanden door blijven stijgen boven de kruinhoogten van de kades. Dit komt omdat de mogelijkheid tot overstroming van kades niet in de modellering is opgenomen. De boezem is als het ware gemodelleerd met oneindig hoge kades.

In de figuur is verder een duidelijke knik te zien bij Zuidbroek in de lijn zonder bergingsgebieden (net boven NAP+1,2 m). Deze knik wordt veroorzaakt doordat in de bovenstroomse kanaalpanden de waterstanden 50 cm worden opgezet. Uit die knik kunnen we halen dat dit toch een redelijk effectieve maatregel is. Het effect op de waterstanden bij Tutjeshut en Zuidbroek is ongeveer 5 cm.

Daarnaast zijn de nieuwe boezemuitbreidingen ook niet uit het model verwijderd. Deze bergingsgebieden blijken in de modellen gedurende ongeveer een etmaal een afvoer van circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$ te bergen tijdens de hoogwatergebeurtenissen. Als aangenomen wordt dat de boezem een oppervlak van 1650 ha heeft betekent een afvoer naar de boezemuitbreidingen van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ gedurende 1 etmaal een waterstandsverschil op de boezem van ongeveer 5 cm. Deze nieuwe boezemuitbreidingen kunnen het verschil tussen de T100 van de stochastenanalyse en de uitkomsten uit HOWA-1 volledig verklaren.

| Herhalingstijd | Waterstanden Zuidbroek (m+NAP) | | | |
|--|--------------------------------|------|------|------|
| | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| Nu, stochastanalyse | 1.20 | 1.24 | 1.28 | 1.30 |
| Nu, stochastanalyse, geen bergingsgebieden | 1.27 | 1.42 | 1.60 | 1.77 |
| HOWA-1 Stochastanalyse (RWS methode) | 1.12 | 1.46 | 1.95 | 2.66 |

Tabel 4-1: Verschillen tussen onderzoeken, NB: HOWA-1 is de uitgangssituatie zonder bergingsgebieden, ook geen meebergende gebieden. Let op: de getallen in de tabel wijken af van die in hoofdstuk 3 omdat de gevoeligheidsanalyses enkel zijn berekend met de 4-daagse neerslaggebeurtenissen.

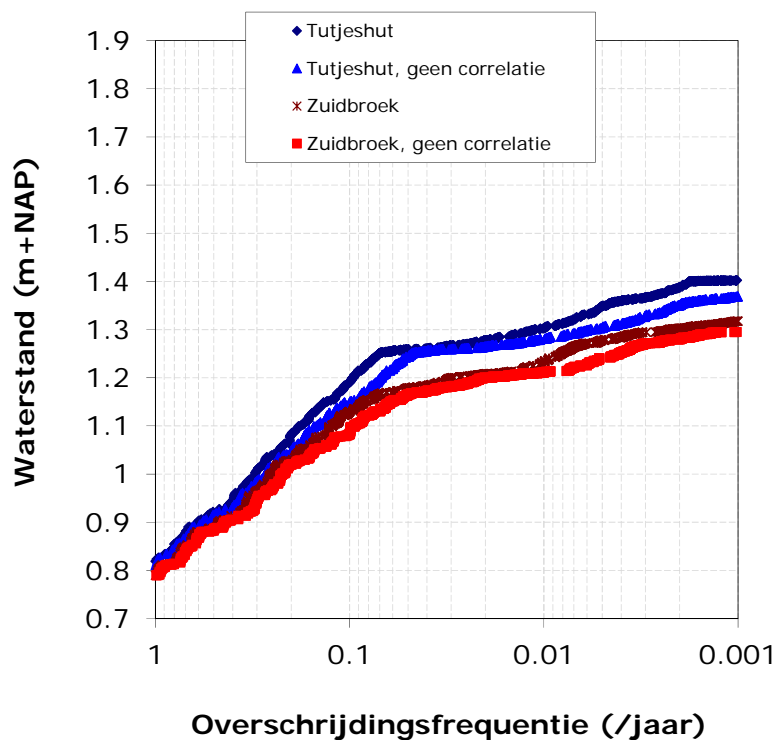


Figuur 4-1: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek zonder inzet van de gestuurde bergingsgebieden.

4.3 Geen correlatie tussen spuistremming en neerslag

We hebben tevens een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij we veronderstellen dat er geen correlatie is tussen de spuistremming en de neerslaghoeveelheid. Hiermee wordt inzichtelijk gemaakt wat de invloed van de in hoofdstuk 2 beschreven hogere kans op de neerslag gedurende perioden met spuistremmingen is op de herhalingstijd van waterstanden.

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4-2. Te zien is dat met name in het extreme bereik de waterstanden lager zijn. Er zouden in deze situatie minder noodbergingsgebieden worden ingezet en bij een 1/1000 jaar situatie zouden ze minder vol zitten.



Figuur 4-2: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met en zonder correlatie.

4.4 Sterkere correlatie tussen spuistremming en neerslag

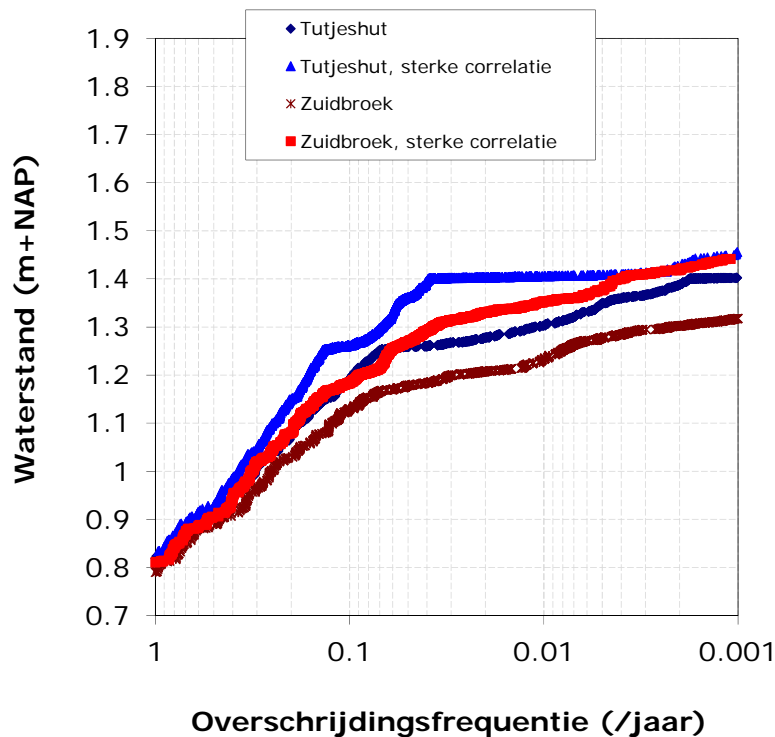
In hoofdstuk 2 is geschetst dat de correlatie tussen de neerslag en 5 en meer opeenvolgende spuistremmingen mogelijk sterker is dan nu geschat. Geanalyseerd is wat de invloed is op de herhalingstijden bij een nog sterkere correlatie tussen neerslag en 5 en meer opeenvolgende spuistremmingen.

Deze sterkere relaties is uitgewerkt als een nog hogere kans op neerslag bij 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen. Bij de uitwerking is de kansverdeling van de neerslag zodanig gecorrigeerd dat de kans op de neerslag in de gebeurtenissen met 5 of meer spuistremmingen gelijk is aan de kans op neerslag in de winterperiode. We gaan er daarbij dus van uit dat alle extreme neerslaggebeurtenissen in de winter altijd samenvallen met 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen.

Dit is een duidelijke overschatting van de kans op de neerslag. In de waarnemingen van de afgelopen 106 jaar is het immers niet zo dat alle gebeurtenissen met 5 of meer spuistremmingen een hoge neerslag kennen (zie paragraaf 2.3, Figuur 2-6). Van de 7 gebeurtenissen met 5 of meer spuistremmingen kennen er namelijk 4 een veel lagere neerslag (minder dan 30 mm). De correlatie is dus minder sterk dan in deze gevoeligheidsanalyse verondersteld.

In Figuur 4-3 zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse af te lezen. Zoals verwacht heeft de sterke correlatie grote invloed op de herhalingsstijden van waterstanden. Bij de sterke correlatie berekenen we dat de inzet van noodbergingsgebieden IJsselpolder en Lappenvoort bij een overschrijdingsfrequentie van 0.04/jaar (een herhalingsstijd van 25 jaar) voorkomt. De inzet van de noodbergingsgebieden vakt vervolgens de waterstanden af. Bij een herhalingsstijd van 250 jaar stijgt de boezemstand verder doordat de bergingsgebieden gevuld zijn, maar komt niet uit boven de maatgevende waterstanden van NAP+1,50 m.

Voor de volledigheid vermelden we dat dit geldt voor het huidige klimaat, bij het klimaatscenario 2050W+ treedt de inzet van noodbergingsgebieden nog vaker op en stijgt de waterstand verder dan NAP+1,50 m.

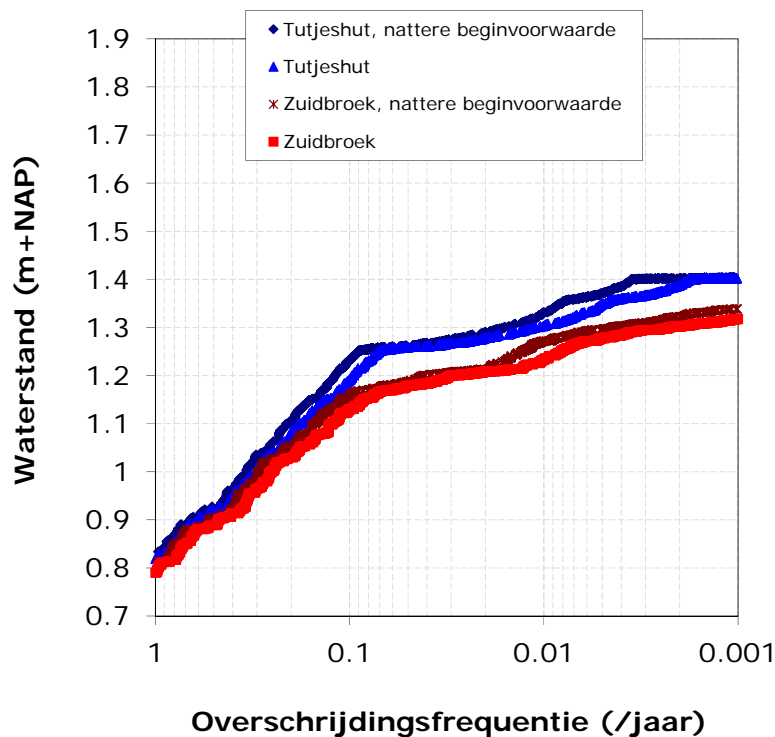


Figuur 4-3: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met en zonder verhoogde correlatie tussen spuistremming en extreme neerslag.

4.5 Grotere kans op natte beginvoorwaarde

Mogelijk gaat het weersysteem dat leidt tot meerdere achtereenvolgende spuistremmingen gepaard met een voorafgaande langdurige neerslagperiode. Hierdoor kan de natte beginvoorwaarde een hogere kans van optreden hebben dan nu aangenomen. Voor deze gevoeligheidsanalyse hebben we aangenomen dat de gebeurtenissen met 5 of meer spuistremmingen altijd worden voorafgegaan door een natte beginvoorwaarde. Voor die gebeurtenissen is de kans op de natte beginvoorwaarde op 1 gesteld (en de kans op een droge en gemiddelde beginvoorwaarde op nul gesteld).

De resultaten van de analyse is weergegeven in Figuur 4-3. De invloed op de herhalingstijden van waterstanden is beperkt. Wel wordt de waterstand van NAP+1,40 m bij Tutjeshut vaker bereikt, namelijk in plaats van 0,002/jaar ongeveer 0,004/jaar, oftewel van eens in de 500 jaar naar eens in de 250 jaar.

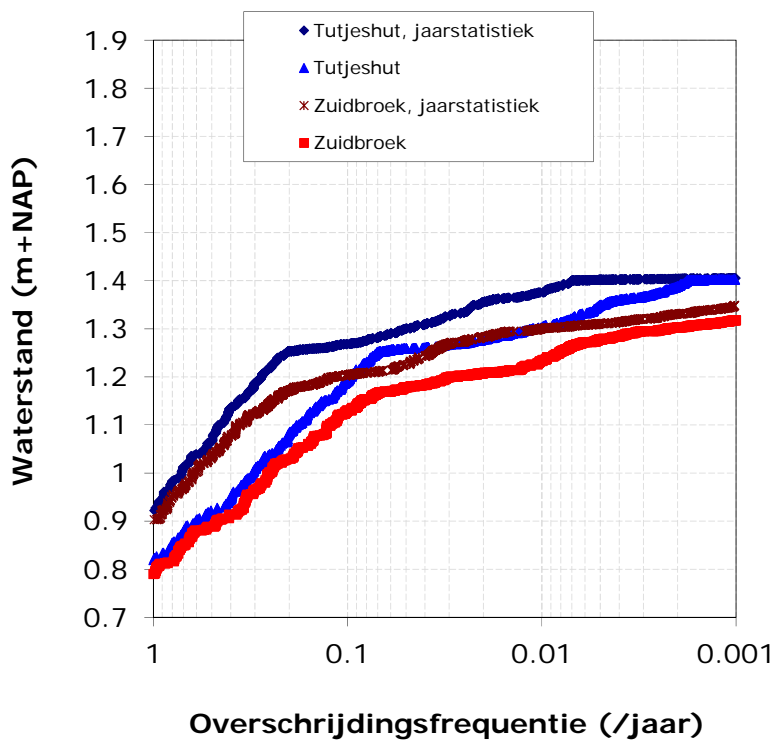


Figuur 4-4: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met en zonder verhoogde kans op de natte beginvoorwaarde.

4.6 Gebruik jaarstatistiek neerslag

In plaats van de winterstatistiek van de neerslag is in deze gevoeligheidsanalyse de jaarstatistiek voor de neerslag gebruikt. De jaarstatistiek van de neerslag geeft bij eenzelfde herhalingstijd een hogere neerslag. Omdat de achtereenvolgende spuistremmingen enkel in de winter voorkomen en een noodzakelijke voorwaarde zijn voor hoge waterstanden op de boezem geeft deze gevoeligheidsanalyse een overschatting van de herhalingstijden van waterstanden op de boezem.

In Figuur 4-5 zijn de resultaten weergegeven. In de figuur is te zien dat de kans op hogere waterstanden fors toeneemt. Als de stormen die leiden tot langdurige spuistremmingen door klimaatverandering vaker voor gaan komen buiten de winterperiode, bijvoorbeeld vroeg in het najaar, zal dit grote invloed hebben op de kans op wateroverlast. Vooral nog is er geen kwantificering voor wat betreft dergelijke ontwikkelingen in de huidige KNMI'06 klimaatscenario's.



Figuur 4-5: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek met winterstatistiek en jaarstatistiek van de neerslag.

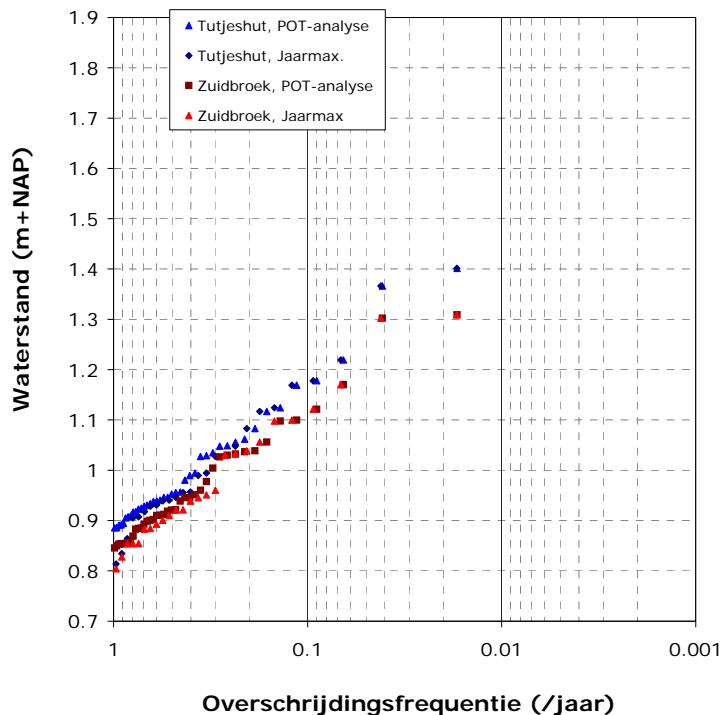
5 Tijdreeksberekening

5.1 Inleiding

Er is een tijdreeksberekening uitgevoerd waarbij de periode 1971 tot en met maart 2012 is doorgerekend. Enkel voor deze periode waren de waterstanden op zee beschikbaar met een voldoende kleine tijdresolutie van 1 uur. Daarvóór zijn enkel drie-uurlijkse data beschikbaar. Als neerslagbelasting is de uurreeks van KNMI-station Eelde opgelegd, de enige langjarige uurreeks in het gebied.

5.2 Resultaten tijdreeksberekening

De naverwerking van de berekeningen hebben we uitgevoerd op basis van jaarmaxima en Peaks-Over-Threshold waarden. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5-1. De resultaten van beide methoden zijn vergelijkbaar. Hierbij merken we op dat de gebeurtenis 1998 is herberekend met gespreide neerslag over het gebied omdat de neerslag in Eelde voor die periode niet representatief was (25% te laag) voor de neerslag op het beheersgebied.



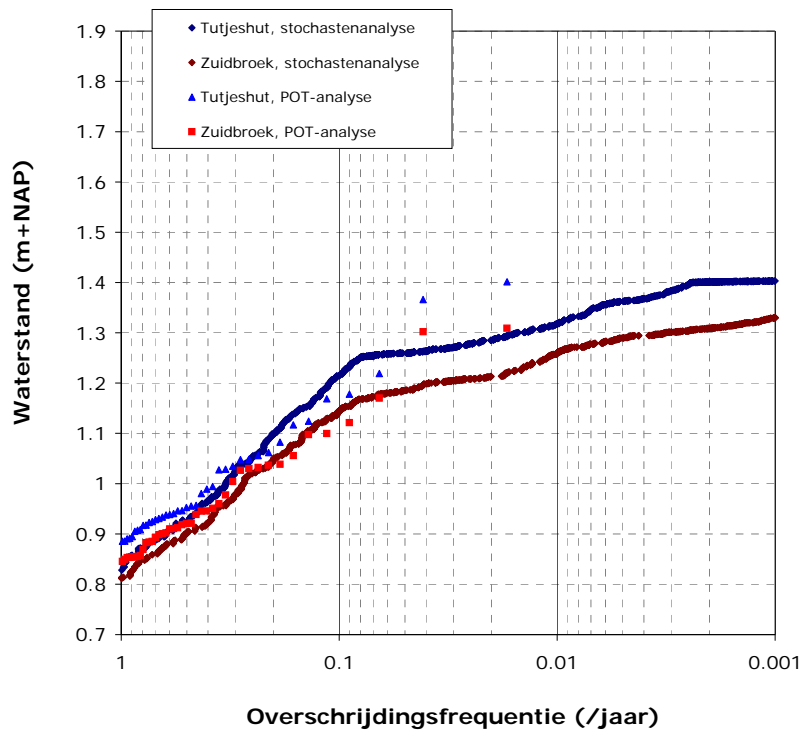
Figuur 5-1: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek op basis van de tijdreeksberekening, berekend met jaarmaxima en Peaks-Over-Threshold waarden, 1998 gebaseerd op meerdere neerslagstations.

5.3 Vergelijking tijdreeks- met stochastenmethode

De vergelijking van de tijdreeksmethode en de stochastenmethode is weergegeven in Figuur 5-2. Met name de twee meest extreme gebeurtenissen van 1998 en 2012 in de tijdreeks wijken af van de stochastanalyse. Dit zijn twee zeer extreme gebeurtenissen als gekeken wordt naar de bepalende invloeden voor de hoge waterstanden:

1. De buitenwaterstand was langdurig hoog en daardoor was de spui langdurig gestremd. Beide gebeurtenissen kennen 5 achtereenvolgende gestremde spuiperioden. Dit is maar zeven keer voorgekomen in de afgelopen 100 jaar.
2. De 4-daagse neerslagvolumes van 2012 en 1998 waren respectievelijk 63 mm en 83 mm. Dit zijn wat betreft de neerslag de twee meest extreme gebeurtenissen met 5 en meer spuistremmingen van de afgelopen 106 jaar (vastgesteld uit de gegevens zoals gebruikt in de correlatieanalyse in hoofdstuk 2, en weergegeven in Figuur 2-1 en Figuur 2-2). Op basis hiervan concluderen we dat deze gebeurtenissen meer extreem zijn dan op basis van de 40-jarige tijdreeks mag worden verondersteld en eerder vergelijkbaar zijn met een herhalingstijd die hoort bij een 106-jarige tijdreeks. De overschrijdingsfrequenties van de berekende waterstanden voor respectievelijk 2012 en 1998 worden dan circa 0.01/jaar en 0.02/jaar (herhalingstijden van ongeveer 100 en 50 jaar) in plaats van de nu in Figuur 5-2 opgenomen overschrijdingsfrequenties van circa 0.02 en 0.04 (herhalingstijden van ongeveer 50 en 25 jaar).
3. Als we kijken naar alle neerslaggebeurtenissen van de afgelopen 106 jaar - ongeacht het aantal spuistremmingen - is 1998 de meest extreme gebeurtenis van de afgelopen 106 jaar en 2012 de 5-na meest extreme gebeurtenis. Dit duidt op een zeer sterke correlatie tussen neerslag en 5 en meer opeenvolgende spuistremmingen, zoals ook beschreven in hoofdstuk 2. De beschikbare lengte van de tijdreeks is echter te beperkt om te bepalen of het samenvallen van deze extreem hoge neerslag en het groot aantal spuistremmingen berust op toeval of dat de sterke correlatie ook daadwerkelijk aanwezig is. De correlatie kan met de beperkte lengte van de tijdreeks niet statistisch verantwoord worden gekwantificeerd. Als we aannemen dat deze sterke correlatie aanwezig is moeten we de uitkomsten van de tijdreeksmethode vergelijken met de gevoeligheidsanalyse voor de stochastenmethode in paragraaf 4.4, Figuur 4-3. De gebeurtenissen 1998 en 2012 passen inderdaad binnen die analyse.
4. Gezien de neerslag in de periode voor de gebeurtenis was de bodem voor de hoogwaterperiode volledig verzadigd.

Voor de lagere herhalingstijden komen de resultaten van de stochastische analyse goed overeen met de tijdreeksanalyse. De verschillen tussen de tijdreeksmethode en de stochastenmethode worden met name veroorzaakt door de twee meest extreme gebeurtenissen in de tijdreeksmethode, namelijk 1998 en 2012. Het lijkt vooral toeval dat de twee meest extreme gebeurtenissen van de afgelopen 106 jaar in de korte periode van de beschikbare meetreeks optreden. In werkelijkheid komen ze hoogstwaarschijnlijk minder vaak voor dan uit de tijdreeksanalyse blijkt.



Figuur 5-2: Kans-waterstands relatie voor Tutjeshut en Zuidbroek op basis van de tijdreeksberekening, berekend met Peaks-Over-Threshold waarden en op basis van de stochastenmethode.

6 Bevindingen en aanbevelingen

Dit onderzoek bestond uit twee hoofdonderdelen:

1. De analyse van de correlatie tussen spuistremmingen en neerslag.
2. Het bepalen van de herhalingstijden van waterstanden met medeneming van de correlatie tussen spuistremmingen en neerslag

De bevindingen uit deze onderdelen zijn hieronder beknopt toegelicht:

Correlatie tussen spuistremmingen en neerslag

Uit de analyse van de correlatie tussen spuistremming en neerslag volgen deze constatering:

- Er is een correlatie tussen het optreden van spuistremmingen en de hoogte van de neerslag. Tijdens gebeurtenissen met spuistremmingen is de kans op extreme neerslag hoger dan de kans op neerslag bij gebeurtenissen zonder spuistremming.
- Bij 1, 2, 3 en 4 achtereenvolgende spuistremmingen is de correlatie beperkt, bij 5 en meer spuistremmingen wordt de correlatie veel sterker. Mogelijk heeft dit te maken met twee elkaar opeenvolgende stormen, de zogenaamde tweelingstormen. Het is aannemelijk dat alleen tweelingstormen 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen veroorzaken. Dit blijkt ook uit analyse van het verloop van de laagwaterstanden van deze gebeurtenissen. Een dergelijke tweelingstorm zou onderdeel kunnen uitmaken van een front waarbij altijd een (sterk) verhoogde neerslag optreedt.
- De beschikbare lengte van de tijdreeks is echter te beperkt om te bepalen of deze (vermeende) correlatie bij 5 of meer spuistremmingen berust op toeval of ook daadwerkelijk aanwezig is. De correlatie kan met de beperkte lengte van de tijdreeks niet statistisch verantwoord worden gekwantificeerd. Daarom is in een gevoeligheidsanalyse het gevolg van de mate van correlatie op de herhalingstijden van waterstanden gekwantificeerd.

Herhalingstijden van waterstanden

Voor de bepaling van de herhalingstijden van waterstanden is zowel de tijdreeksmethode als de stochastenmethode toegepast. Uit analyse van de berekeningsresultaten van zowel de stochastenmethode als de tijdreeksmethode blijkt dat hoogwatergebeurtenissen die leiden tot inzet van de noodbergingsgebieden worden gekenmerkt door:

- Minimaal 4 achtereenvolgende spuistremmingen;
- Een neerslagvolume van 70 mm of meer als gekeken wordt naar de 4-daagse neerslag en een neerslagvolume van 100 mm of meer als gekeken wordt naar de 9-daagse neerslag;

De herhalingstijden van waterstanden zijn zeer gevoelig voor de correlatie tussen de neerslag en de spuistremming. Uit analyse van de correlatie blijkt dat deze correlatie met name sterk is bij de gebeurtenissen met 5 of meer spuistremmingen. Zoals bij de bespreking van de correlatie geschetst, is het vanwege de beperktheid van de data niet mogelijk om de correlatie statistisch verantwoord te kwantificeren.

Daarom is in een beknopte gevoeligheidsanalyse het gevolg van de mate van correlatie op de herhalingstijden van waterstanden gekwantificeerd. Hierbij is in de gevoeligheidsanalyse verondersteld dat de extreme neerslaggebeurtenissen in de winter altijd samenvallen met 5 of meer achtereenvolgende spuistremmingen. Deze gevoeligheidsanalyse geeft daarmee een bovengrensbepaling van de correlatie tussen de spuistremmingen en de neerslag. De

gevoeligheidsanalyse geeft in combinatie met de oorspronkelijke analyse een bandbreedte voor de herhalingstijden van waterstanden.

Door de effectiviteit van inzet van de bergingsgebieden wordt de maatgevende waterstand van NAP+1,50 m op de boezem voor het huidige klimaat niet overschreden bij een herhalingstijd van 1000 jaar, ook niet in het geval van de bovengrensbenadering. Dit geldt niet volledig voor het klimaatscenario 2050 W+: in de oorspronkelijke stochastische analyse zijn de bergingsgebieden dan nog steeds toereikend, maar bij de genoemde bovengrensbenadering wordt de maatgevende waterstand bij een eens per 1000 jaar situatie wel overschreden. In het klimaatscenario 2100W+ worden zowel in de oorspronkelijke stochastische analyse als de bovengrensbenadering de maatgevende waterstanden bij een eens per 1000 jaar situatie overschreden.

Samenvatting van de resultaten

Samengevat betekent dit dat:

- Voor het huidige klimaat en voor het klimaat scenario W+ in 2050 zijn de huidige bergingsgebieden van de Eemskanaal- Dollardboezem afdoende om in extreme situaties van 1/300 of 1/1000 jaar de waterstanden beneden de maximaal toegestane waarden te houden. Er zijn daarom tot 2050 geen extra maatregelen nodig om de afvoer- en/of de bergingscapaciteit van het watersysteem van de Eemskanaal- Dollardboezem te vergroten.
- In 2100 is voor het klimaatscenario W+ echter te weinig bergingscapaciteit beschikbaar in de Eemskanaal- Dollardboezem. Ergens tussen 2050 en 2100 zullen dus extra maatregelen moeten worden uitgevoerd om de afvoer- en/of de bergingscapaciteit van het watersysteem van de Eemskanaal- Dollardboezem te vergroten.

Aanbevelingen

Om de herhalingstijden van waterstanden in het extreme bereik met meer zekerheid te kwantificeren moet meer inzicht worden verkregen in de correlatie tussen meerdere achtereenvolgende spuijets (5 maal achter elkaar en vaker) en de neerslag. Dit inzicht kan niet worden verkregen op basis van de beperkt beschikbare historische data van 106 jaar. Een manier om dit inzicht in het gedrag van weersystemen (wind en neerslag) te krijgen is door gebruik te maken van simulaties met meteorologische modellen die zowel de neerslag als de wind (stormen) in hun samenhang beschrijven. Door langjarige simulaties uit te voeren met dergelijke modellen (>1000 jaar) kan aanvullende data worden verkregen over de kans op samenvallen van de windopzet op zee en neerslag in het stroomgebied.

Een dergelijk onderzoek wordt momenteel door Deltares en het KNMI opgestart onder de naam 'coincidentie'. Bij een dergelijk onderzoek moet, specifiek voor het watersysteem van Hunze en Aa's, niet zozeer de correlatie van de neerslag met de hoogte van de storm, maar met name met de duur van de storm (of beter gezegd: de opeenvolging van stormen) worden onderzocht. Deze bepaalt immers het aantal achtereenvolgende spuijets en daarmee de mate van wateroverlast.

Met de uitkomsten van een dergelijk model kan ook, vanwege de grotere beschikbaarheid aan data, per klasse van het aantal achtereenvolgende spuijets de kansverdelingen van de neerslag worden bepaald. Door de beperkte beschikbaarheid aan historische data in het extreme bereik (maar zeven waarnemingen in 106 jaar voor de klasse 5 en meer spuijets) is dat nu niet mogelijk.

Het is niet bekend wanneer uitkomsten van bovenstaand onderzoek beschikbaar komen. Om daarvoor meer inzicht te krijgen in de invloed van de genoemde correlatie op de herhalingstijden van waterstanden (buiten de in dit onderzoek geschetste bovengrens) adviseren wij om te onderzoeken hoe de herhalingstijden van waterstanden veranderen bij een oplopende correlatie, voor zowel het huidige klimaat als het toekomstscenario.

Daarnaast komen doorgaans eens in de 5 tot 10 jaar nieuwe inzichten over klimaatverandering beschikbaar in de door het KNMI opgestelde klimaatscenario's. Gezien de gevoeligheid van de kans op wateroverlast voor de toename van neerslag, de zeespiegelstijging en het samenvallen van hoge neerslag met meerdere achtereenvolgende spuiستremmingen dient de actuele kennis die daar vrijkomt te worden meegewogen bij de bepaling van nut en noodzaak van maatregelen om wateroverlast te voorkomen.

7 Referenties

Deltares, 2010 *Quick Scan HOWA 3 Hunze & Aa's*; Project 1201123-003, november 2010

HKV LIJN IN WATER, 2012 *Verificatie en verbetering SACRAMENTO modellen*; Notitie PR2372.10, oktober 2012

STOWA, 2004 *Statistiek van extreme neerslag in Nederland*; STOWA, 2004, nr. 26

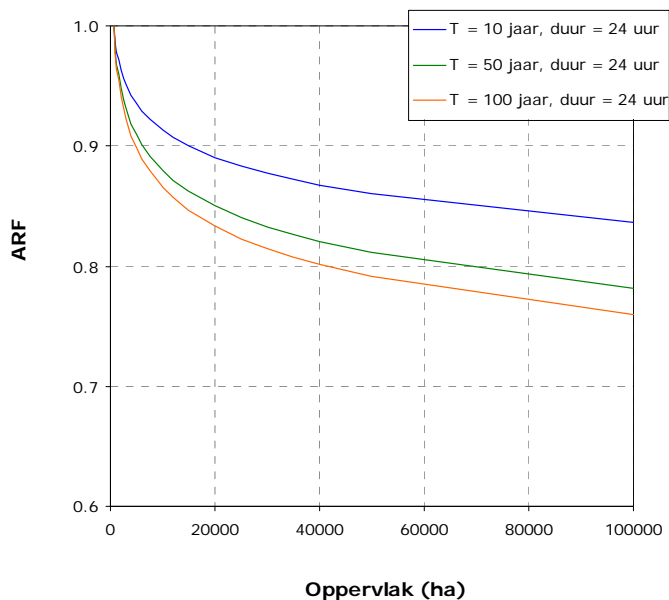
WL Delft Hydraulics, 2001 *Hoog Water*; Project T2368, juni 2001

Overeem A. en A. Buishand, 2012 *Statistiek van extreme gebiedsneerslag in Nederland*; KNMI Technical report TR-332, mei 2012

Bijlagen

Bijlage A: Gebiedsreductiefactor

Overeem [Overeem, 2012] heeft de gebiedsreductiefactor als volgt gekwantificeerd. Allereerst zijn jaarlijkse maxima uit de radardata gehaald voor duren van 15 minuten tot 24 uur en gebiedsgroottes van 2,5x2,5 km (de grootte van 1 radarcel op het moment dat hij zijn analyses uitvoerde) tot 40x40 km. Deze data is de data na aanpassingen op basis van grondregensmeters. Door deze aanpassing is de puntstatistiek vergelijkbaar met de statistiek voor één radarcel. Voor elke duur en elk oppervlak heeft hij de extreme waarden statistiek bepaald op basis van de GEV verdeling. De parameters van de GEV verdeling zijn vervolgens gemodelleerd (en gefit) als functie van duur en gebiedsgrootte. Deze methodiek is analoog aan die voor de bepaling van de neerslagstatistiek in Smits et al. [Smits, 2004]. Op basis van de zo berekende statistiek per duur en gebiedsgrootte zijn de gebiedsreductiefactoren uitgerekend. In Figuur B-1 is als voorbeeld de gebiedsreductiefactor (ARF) weergegeven bij oplopend oppervlak, een duur van 24 uur en herhalingstijden van 10, 50 en 100 jaar.



Figuur B-1: Gebiedsreductiefactor (ARF) bij oplopend oppervlak, een duur van 24 uur en herhalingstijden van 10, 50 en 100 jaar

Met behulp van de door Overeem gegeven functie kan voor elke herhalingstijd, duur en oppervlak de gebiedsreductiefactor worden bepaald. Deze kunnen vervolgens worden gebruikt om de puntstatistiek of de op een punt geregistreeerde neerslag, te vertalen naar gebiedsstatistiek of gebiedsneerslag.

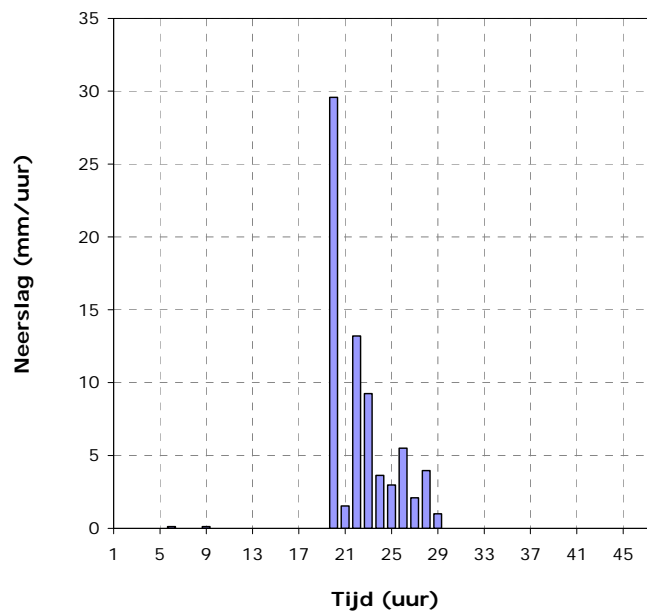
Hierbij wordt verder opgemerkt dat andere literatuurbronnen voor het Nederlandse klimaat, te weten Buishand en Velds [Buishand, 1980] en Witter [Witter 1983], vergelijkbare waarden voor de gebiedsreductiefactor laten zien als gekeken wordt naar de langere duren. Afwijkingen zijn orde +/- 5 procent voor duren van 24 uur (alleen voor die duur was in die tijd voldoende gebiedsdekkende data beschikbaar).

Hierbij (en ook voor de kortere duren) moet in acht worden genomen dat de dataset (met name in ruimtelijke zin) van Overeem vele malen groter is dan die van Witter of Buishand. Hij gebruikt radarbeelden waardoor de dichtheid van neerslaginformatie vele malen groter is, Witter

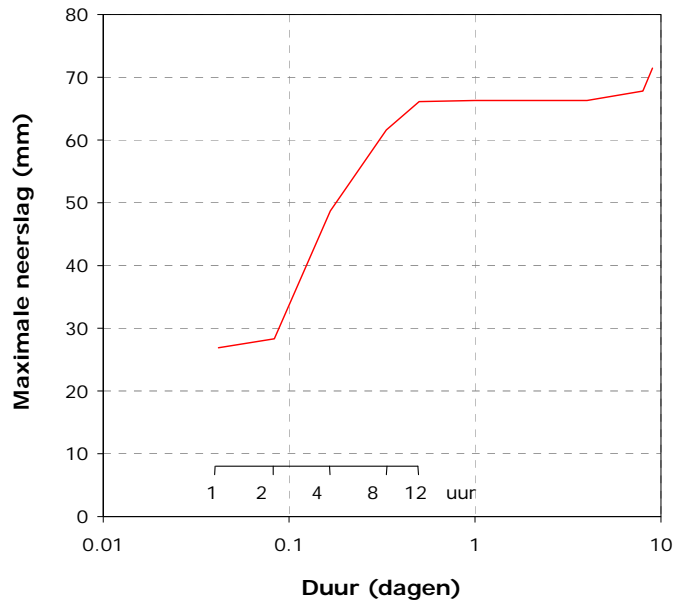
en Buishand hadden maar een beperkt aantal neerslagstations beschikbaar in 1980. Afwijkingen tussen de getallen uit oudere literatuur en Overeem is mede daardoor verklaarbaar. De betrouwbaarheid van de gebiedsreductiefactoren zoals bepaald door Overeem is door de grotere dichtheid aan gegevens waarschijnlijk ook groter.

Methodiek

Voor de vertaling van puntneerslag naar gebiedsneerslag stellen wij voor de methodiek zoals hieronder beschreven te gebruiken. De methodiek is toegelicht op basis van een voorbeeldgebeurtenis. De neerslagintensiteiten van die gebeurtenis zijn weergegeven in Figuur B-2. Met een venster van 1, 2, 4, 8, 12 uur en 1, 2, 4, 8 en 9 dagen is de neerslaggebeurtenis doorlopen en is het maximale neerslagvolume per duur bepaald. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur B-3. Om later de gebiedsreductie toe te kunnen passen is ook per duur het begintijdstip van het venster waarbinnen het maximale volume valt bepaald. In dit geval is dat voor alle duren het twintigste uur.

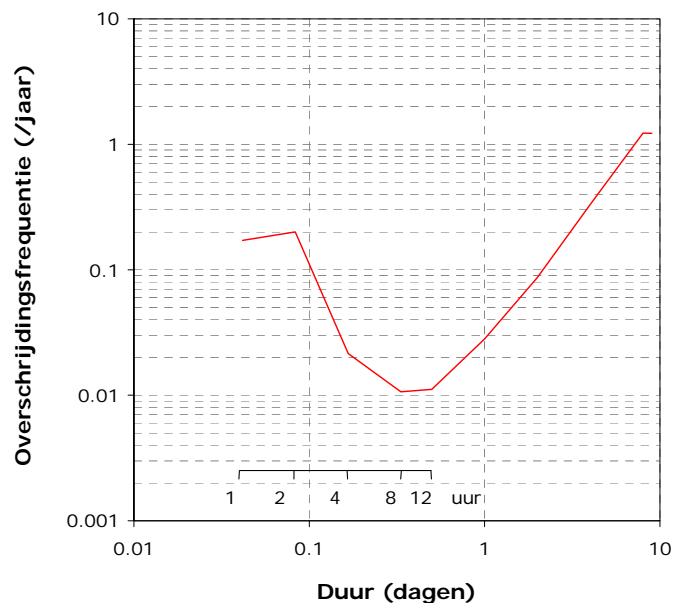


Figuur B-2: Uurintensiteiten van de neerslag voor de gebeurtenis juli 1952



Figuur B-3: Maximale neerslagvolumina voor oplopende duren voor de gebeurtenis juli 1952

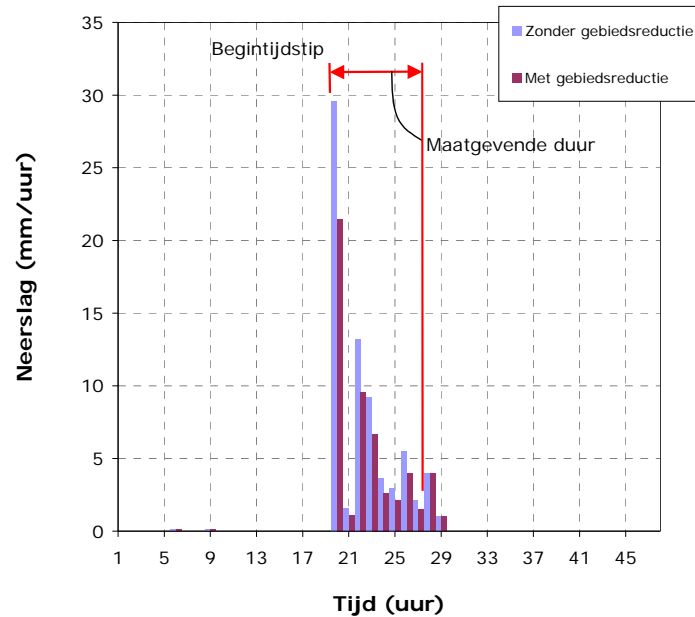
Voor elk van de duren en maximale neerslagvolumes in Figuur B-3 is de herhalingsstijd bepaald. Dit levert Figuur B-4. De maatgevende duur is gekozen als de laagste overschrijdingsfrequentie. Voor deze gebeurtenis is dat bij een duur - of beter gezegd: venster - van 8 uur. Voor deze duur ($D = 8$ uur) en overschrijdingsfrequentie ($F_{\text{jaar}} = 0,011/\text{jaar}$) en een oppervlak van bijvoorbeeld 35.000 ha is de gebiedsreductiefactor (afhankelijk van herhalingsstijd, duur en oppervlak) bepaald op basis van de in Overeem [Overeem, 2009] gegeven functie. De gebiedsreductiefactor is 0.73.



Figuur B-4: Overschrijdingsfrequenties voor oplopende duren voor de gebeurtenis juli 1952

De gebiedsreductiefactor is vervolgens toegepast op het maatgevende deel van de gebeurtenis met de maatgevende duur van 8 uur (de duur waarbij de overschrijdingsfrequentie het kleinst is) en het begintijdstip 20. De gebiedsreductie wordt niet toegepast op de gehele neerslaggebeurtenis maar enkel op het maatgevende deel van de gebeurtenis. De overige

neerslag in de neerslaggebeurtenis is niet aangepast. De gebiedsreductiefactor is immers enkel geldig voor de extreme waarden. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur B-5.



Figuur B-5: Neerslagintensiteiten ten gevolge van gebiedsreductie voor de gebeurtenis juli 1952

Met deze methodiek kan elke (punt)neerslaggebeurtenis worden vertaald naar gebiedsneerslag, waarbij de gebruikte gebiedsreductiefactor afhankelijk is gesteld van duur en herhalingstijd van de neerslag van elke afzonderlijke specifieke gebeurtenis. Er is dus niet één vastgesteld gebiedsreductiefactor.

Bovenstaande methode is in principe gelijk aan de toepassing van de gebiedsreductiefactor in hoogwaterberekeningen in het verleden. Toen was de volledige relatie tussen gebiedsreductiefactor, duur, herhalingstijd en gebiedsgrootte echter niet beschikbaar (alleen voor 1 uur en 24 uur en voor enkele vaste gebiedsgrootten), en werd daarom doorgaans voor de volgende uitgangspunten voor de gebiedsreductiefactor gekozen:

- 24 uur als duur (alleen 24 uur was met voldoende betrouwbaarheid beschikbaar);
- een vaste herhalingstijd van 10 jaar voor alle gebeurtenissen;
- ongeveer de gewenste gebiedsgrootte.

De op basis hiervan bepaalde vaste gebiedsreductiefactor werd vervolgens op alle berekende neerslaggebeurtenissen toegepast.

Omdat de gebiedsreductiefactor nu voor de drie afhankelijkheden volledig beschikbaar is, is de methode beter afgestemd op die afhankelijkheden. De methodiek blijft in de basis hetzelfde als die in het verleden is gebruikt.



Bezoekadressen Botter 11-29
Lelystad
Elektronicaweg 12
Delft

Postadres Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Telefoon 0320 294242
Fax 0320 253901
E-mail info@hkv.nl
Internet www.hkv.nl