
Statistiek vóóraf of statistiek achteraf?

Afstudeerrapport

J.C. Bossenbroek

Begeleidingscommissie:

Prof. ir. R. Brouwer	TU-Delft
Ir. O.A.C. Hoes	TU-Delft
Ir. W.M.J. Luxemburg	TU-Delft
Dr. ir. A.J.M. Nelen	TU-Delft/ Nelen & Schuurmans Consultants
Ir. J. van Dansik	Hoogheemraadschap van Delfland
Ir. M. van den Brink	Waterschap Vallei & Eem

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerrapport 'Statistiek vóóraf of statistiek achteraf?'. Dit rapport is het eindrapport in het kader van mijn afstudeerproject aan de Faculteit der Civiel Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd in de periode november 2003 – mei 2004 bij de TU-Delft en Nelen & Schuurmans Hydroinformatics.

Hierbij wil ik graag de afstudeer commissie bedanken: prof. ir. R. Brouwer voor de algemene begeleiding van mijn afstuderen, ir. O.A.C. Hoest en dr. ir. A.J.M. Nelen voor de dagelijkse begeleiding van het afstuderen, Ir. W.M.J. Luxemburg, Ir. J. van Dansik van het Hoogheemraadschap van Delfland, ir. M. van den Brink van Waterschap Vallei & Eem voor hun opbouwende commentaar gedurende het hele afstudeerproces en het leveren van informatie. Ten slotte wil ik Nelen & Schuurmans Hydroinformatics bedanken voor het beschikbaar stellen van een afstudeerplaats.

Delft, juni 2004

Jan-Kees Bossenbroek
j.c.bossenbroek@planet.nl

Samenvatting

In 2000 heeft de overheid een breed onderzoek naar het waterbeheer in de 21^e eeuw afgerond. Aanleiding voor dit onderzoek waren aan de ene kant enkele ervaringen uit het verleden: de dreigende overstromingen van de Rijn in 1993 en 1995 en de wateroverlast door extreme neerslag van 1998. Daarnaast, de verwachting dat in de toekomst dergelijke gebeurtenissen vaker plaats gaan vinden door processen als klimaatverandering en zeespiegelrijzing. Een van de conclusies van het onderzoek was, dat het waterbeheer van regionale watersystemen niet op orde is. Aanbevolen is toen om een normering voor regionale watersystemen op te stellen.

Deze (concept)normering is in juni 2003 landelijk vastgelegd in het 'Nationaal Bestuursakkoord Water'. De normering bestaat uit herhalingstijden voor inundatie van maaiveld gedifferentieerd naar vijf verschillende vormen van grondgebruik. Van alle waterschappen wordt verwacht dat zij voor eind 2005 al hun regionale watersystemen hebben getoetst aan de normering. De wijze waarop een regionaal watersysteem moet worden getoetst is echter niet vastgesteld.

In de praktijk worden door de waterschappen grofweg twee verschillende methoden gehanteerd. De eerste methode bepaald eerst de kans op een ontwerpgebeurtenis en berekent dan de bijbehorende waterstanden (statistiek vóóraf) en de andere methode berekent eerst de waterstanden en dan de herhalingstijden (statistiek achteraf). Veel waterschappen staan nog voor de keuze in welke volgorde zij de waterstanden en herhalingstijden gaan berekenen. Echter een overzicht van de werkwijzen en toepasbaarheid voor de praktijk van het Nederlandse waterbeheer is nog nooit gemaakt. De waterschappen hebben dan ook geen materiaal waarmee zij een keuze kunnen maken. In dit afstudeeronderzoek is aan de hand van twee casestudies een vergelijking gemaakt tussen de twee methodes.

De methode statistiek achteraf is eenvoudiger dan de statistiek vóóraf. De herhalingstijden worden bepaald uit een lange reeks van gesimuleerde waterstanden. De methode statistiek vóóraf is een stuk complexer. De herhalingstijden worden bepaald door de statistische verdelingen van verschillende variabelen te combineren. Deze verdelingen zijn vaak niet bekend, onderling afhankelijk en verschillen per watersysteem en zullen dus keer op keer moeten worden bepaald. In essentie leiden beide methoden, indien correct uitgevoerd, tot hetzelfde resultaat. Voor de praktijk van het Nederlandse waterbeheer wordt aanbevolen om waar mogelijk de eenvoudigste methode te kiezen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Probleemstelling	8
1.3 Doelstellingen	9
1.4 Werkwijze	9
1.5 Randvoorwaarden en uitgangspunten	9
1.6 Leeswijzer	9
2 Hydrologie van een watersysteem (achtergrondinformatie)	10
2.1 Het neerslag-afvoer proces	10
2.2 Factoren die de afvoer beïnvloeden	12
2.3 Looptijd	13
3 Beschrijving methoden	15
3.1 Methode 'statistiek vooraf'	15
3.1.1 Beschrijving	15
3.1.2 De ontwerpgebeurtenissen	16
3.1.3 Werkwijze	19
3.1.4 Neerslagduur	20
3.1.5 Afhankelijkheid tussen neerslag en grondwaterstand	20
3.2 Methode 'statistiek achteraf'	23
3.2.1 Beschrijving	23
3.2.2 Toepassing statistiek op waterstanden	23
3.2.3 Werkwijze	25
3.2.4 Betrouwbaarheid	26
3.3 Modelleren	27
4 Resultaten casestudies	28
4.1 Oranjepolder	28
4.1.1 Gebiedsbeschrijving	28
4.1.2 Statistiek vooraf	31
4.1.3 Statistiek achteraf	34
4.1.4 Resultaten	35
4.2 Heiligenbergerbeek	36
4.2.1 Gebiedsbeschrijving	36
4.2.2 Statistiek vooraf	37

4.2.3	<i>Statistiek achteraf</i>	38
4.2.4	<i>Resultaten</i>	38
4.3	Discussie	40
4.4	Samenvatting van de kenmerken van beide methoden	41
5	Conclusies en aanbevelingen	43
5.1	Conclusies	43
5.2	Aanbevelingen	44
6	Literatuur	45

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2000 heeft de overheid een breed onderzoek naar het waterbeheer in de 21^e eeuw afgerond (WB21, 2000). Aanleiding voor dit onderzoek waren aan de ene kant enkele ervaringen uit het verleden: de dreigende overstromingen van de Rijn in 1993 en 1995 en de wateroverlast door extreme neerslag van 1998. Daarnaast de verwachting dat in de toekomst dergelijke gebeurtenissen vaker plaats gaan vinden door klimaatverandering, zeespiegelrijzing, bodemdaling, verstedelijking, verbeterde drainage in de landbouw en ontbossing. Een van de conclusies van het onderzoek was dat het waterbeheer van een aantal regionale watersystemen niet meer voldoet aan de huidige eisen die aan de watersystemen gesteld worden. Aanbevolen is toen om een normering voor regionale watersystemen op te stellen.

Deze (concept)normering is in juni 2003 landelijk vastgelegd in het 'Nationaal Bestuursakkoord Water'. De normering bestaat uit herhalingstijden voor inundatie van maaiveld gedifferentieerd naar vijf verschillende vormen van grondgebruik (Zie Tabel 1.1). Het idee achter deze differentiatie is dat kapitaalintensieve gebieden (stedelijk) beter beschermd worden dan kapitaalextensieve gebieden (grasland).

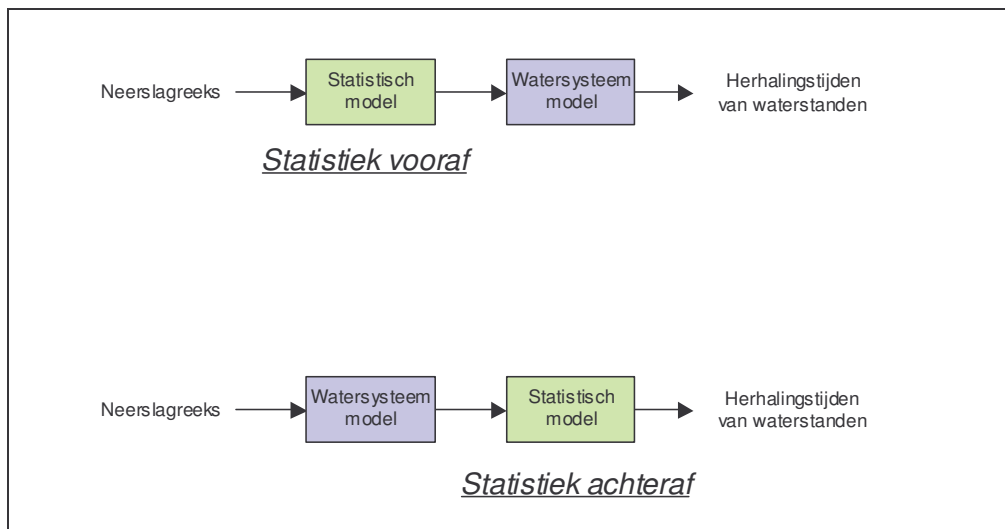
Tabel 1.1: Werknormen uit het Nationaal Bestuursakkoord Water

Grondgebruiktype	Maaiveldcriterium	Basis werk criterium [1/jr]
Grasland	5 %	1/10
Akkerbouw	1 %	1/25
Hoogwaardige land- en tuinbouw	1 %	1/50
Glastuinbouw	1 %	1/50
Bebouwd gebied	0 %	1/100

Van alle waterschappen wordt verwacht dat zij voor eind 2005 hun regionaal watersysteem hebben getoetst aan de normering en kunnen opgeven wat de benodigde financiële, ruimtelijke en technische inspanning is om aan de normering te voldoen. Daarna zullen de werknormen worden geëvalueerd en al dan niet aangepast definitief worden gemaakt. De verwachting is dat de kosten aan maatregelen om de regionale watersystemen aan de normering te laten voldoen circa 9 miljard euro gaan bedragen (IBO, 2004).

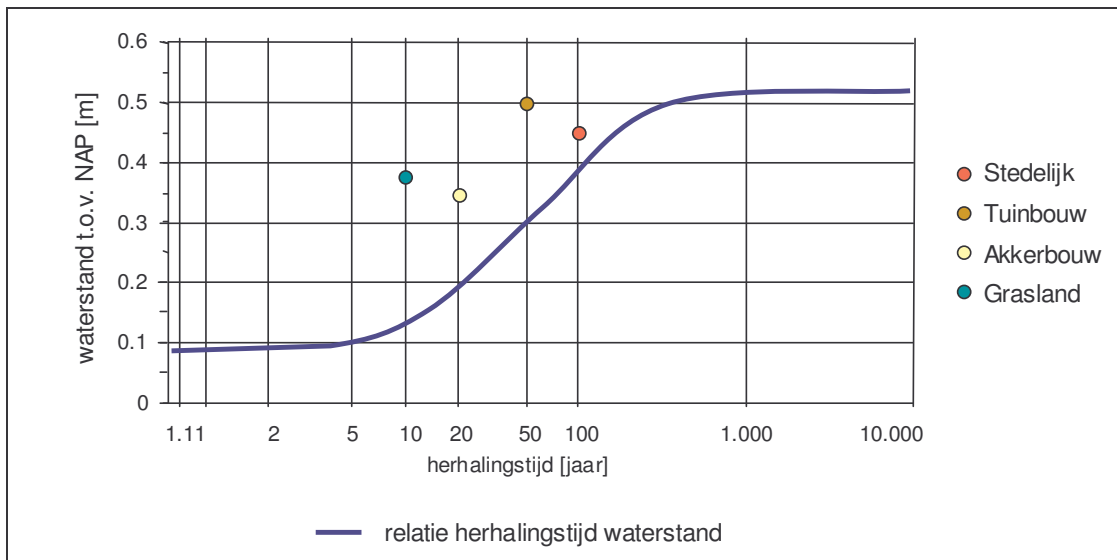
In het Nationaal Bestuursakkoord Water is de wijze waarop een regionaal watersysteem moet worden getoetst aan de werknormen niet vastgesteld.

In de praktijk worden door de waterschappen die al begonnen zijn aan het toetsen van hun watersystemen grofweg twee methoden gebruikt. De eerste methode bepaald eerst de kansen op extreme gebeurtenissen en berekent dan de bijbehorende waterstanden (statistiek vóóraf) en de andere methode berekent eerst de waterstanden en dan de herhalingstijden (statistiek achteraf) (Figuur 1.1).



Figuur 1.1: Statistiek vooraf of achteraf

Welke methode ook gekozen wordt, ze berekenen allebei de herhalingstijden van extreme waterstanden. Deze worden normaliter gevisualiseerd in een kans-waterstandgrafiek, waarin ook de normering wordt uitgezet (Zie Figuur 1.2).



Figuur 1.2: Voorbeeld van een waterstand - kans grafiek. Beide methoden produceren op hun eigen manier de blauwe lijn.

Veel waterschappen staan nog voor de keuze in welke volgorde zij de waterstanden en herhalingstijden gaan berekenen. Echter een overzicht van de werkwijzen en toepasbaarheid voor de Nederlandse waterbeheerspraktijk is nog nooit gemaakt. De waterschappen hebben dan ook onvoldoende informatie waarmee zij een keuze kunnen maken, waardoor zij afwachtend zijn in het starten met het toetsen van hun watersystemen aan de werknormen of laten leiden door de voorkeur van een adviesbureau.

Het gebruik van deze twee verschillende methoden door de waterschappen is aanleiding voor dit afstudeeronderzoek.

1.2 Probleemstelling

Er zijn twee verschillende methoden binnen het waterbeheer in gebruik om overschrijdingskansen van waterstanden in regionale watersystemen te bepalen. Er is echter onduidelijkheid over:

- Wat de methoden precies inhouden,
- en in hoeverre de resultaten van beide methoden overeenstemmen.

Er is hierdoor onvoldoende informatie beschikbaar voor de waterbeheerders om een gefundeerde keuze te maken uit beide methoden.

1.3 Doelstellingen

Het doel van het afstudeeronderzoek is het vergelijken van de beide genoemde methoden, waarbij gestreefd wordt om een zo goed mogelijk overzicht te geven van de kenmerken van de twee verschillende methoden, waarmee waterschappen over voldoende informatie beschikken om te kunnen kiezen tussen beide methoden.

1.4 Werkwijze

Om aan de doelstelling te voldoen wordt een beschrijving van de te volgen werkwijze voor beide methode gegeven. De studie is gedaan aan de hand van een tweetal casestudies, één van een vrij afwaterend gebied: de Heiligenbergerbeek in het beheersgebied van Waterschap Vallei & Eem en één van een polder: de Oranjepolder in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Delfland.

1.5 Randvoorwaarden en uitgangspunten

- Modelberekeningen zijn gemaakt met de door de waterschappen beschikbaar gestelde modellen.
- De modellen zijn onvoldoende gekalibreerd, maar geven een redelijke representatie van de werkelijkheid. De kwaliteit van het model is echter geen enkel probleem, omdat de twee methoden met elkaar worden vergeleken en niet met de werkelijkheid.
- Uitgangspunt is dat de methoden worden vergeleken op de bruikbaarheid voor het toetsen aan de werknormen uit het Nationaal Bestuursakkoord Water. Dat wil zeggen voor waterstanden met herhalingstijden tot honderd jaar.

1.6 Leeswijzer

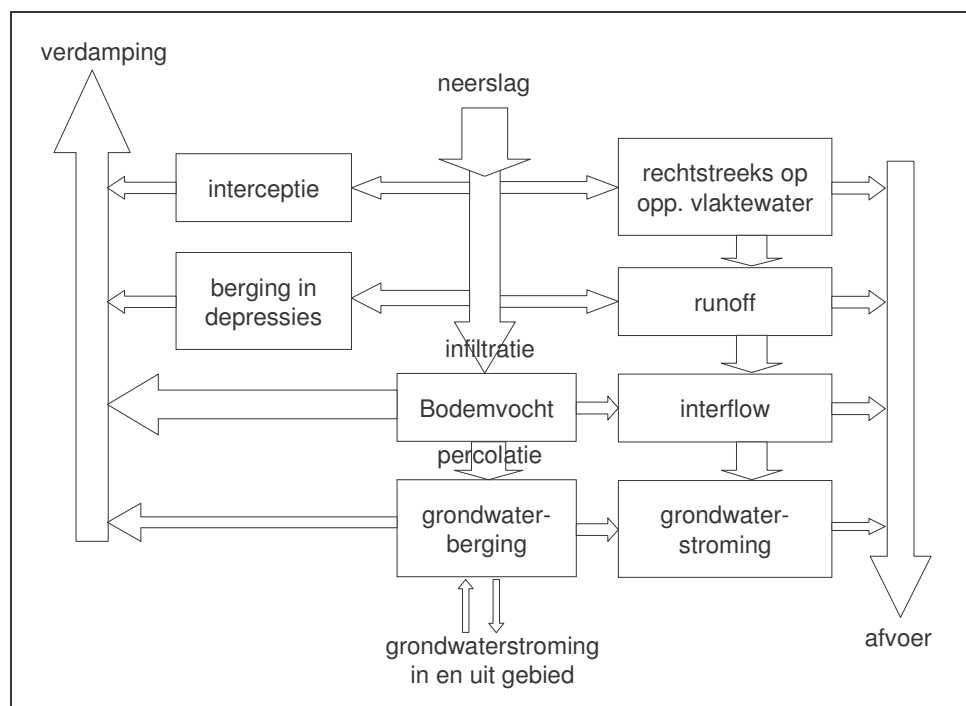
In hoofdstuk 2 zijn de achtergronden van het onderzoek beschreven. In dit hoofdstuk worden eerst de relevante hydrologische processen beschreven. In hoofdstuk 3 wordt een uitgebreide beschrijving van beide analysemethoden gegeven. De casestudies zijn in hoofdstuk 4 uitgewerkt. In hoofdstuk 5 zijn de conclusies en de aanbevelingen die uit dit onderzoek volgen weergegeven.

2 Hydrologie van een watersysteem (achtergrondinformatie)

Aan het optreden van extreme waterstanden ten gevolge van neerslag liggen verschillende hydrologische processen ten grondslag. In dit hoofdstuk worden deze hydrologische processen beschreven. Omdat de processen vaak met de Engelse term worden aangeduid, worden deze tussen haakjes er bij genoemd. Eerst wordt het neerslag-afvoer proces beschreven, vervolgens de factoren die het neerslag-afvoer proces beïnvloeden en ten slotte wordt ingegaan op de looptijd van een watersysteem (concentration time).

2.1 Het neerslag-afvoer proces

Het neerslag-afvoer proces beschrijft de processen in de hydrologische kringloop die zich afspelen op of onder het aardoppervlak (zie Figuur 2.1). De verschillende processen worden hieronder beschreven.



Figuur 2.1: Gedeelte van de hydrologische kringloop dat zich op het land afspeelt [bron: Van den Akker, 1996]

Neerslag

Een neerslag gebeurtenis wordt gekarakteriseerd door het volume, de duur en de frequentie van optreden. Bijvoorbeeld, een bui met een volume van 65 mm en een duur

van 10 uur komt statistisch gezien één keer per 100 jaar voor. Gemiddeld viel er in deze bui 6,5 mm/uur. De herhalingsjijd van deze 6,5 mm/uur is echter niet gelijk aan één keer in de honderd jaar, maar komt in een jaar gemiddeld 5 keer voor.

Interceptie en berging in depressies

De neerslag die op een bepaald gebied valt komt op verschillende manieren in het watersysteem terecht. Een deel van de neerslag komt door interceptie niet op het aardoppervlak terecht. Dit deel van de neerslag blijft liggen op objecten boven de grond (voornamelijk vegetatie) totdat het door verdamping terugkomt in de atmosfeer. Een deel van de neerslag die wel het aardoppervlak bereikt, wordt geborgen in depressie, zoals plassen. Dit water komt via verdamping weer terug in de atmosfeer.

Infiltratie en percolatie

Infiltratie is het binnentreden van oppervlaktewater in de grond. Het water komt dan in de onverzadigde zone terecht. Het wegzakken van het water uit de onverzadigde zone naar de verzadigde zone wordt percolatie genoemd. Het percolatieproces zorgt voor aanvulling van grondwater.

Oppervlakteafoer

Oppervlakteafoer (surface runoff) is het proces waarbij water over het land naar het oppervlaktewater stroomt. Dit proces treedt op wanneer de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit overtreft. Er ontstaat dan een waterfilmpje op het maaiveld waarna het water via het oppervlak wordt afgevoerd. Dit proces wordt Hortonse oppervlakteafoer genoemd. Een andere vorm van oppervlakteafoer, is de verzadigde oppervlakteafoer. Dit proces treedt op wanneer zich een verzadigde zone opbouwt boven een slecht doorlatende laag of wanneer de grondwaterspiegel stijgt tot aan het maaiveld [van den Akker, 1996]. Oppervlakteafoer hangt nauw samen met andere processen in de hydrologische kringloop, zoals neerslag en infiltratie.

Interflow

Interflow (subsurface flow) is het proces waarbij water onder het landoppervlak maar boven de grondwaterspiegel afstroomt. Het proces gaat door totdat het water is afgestroomd naar het oppervlaktewater, of verdampt is. Interflow wordt meestal niet apart gekwantificeerd omdat interflow in de praktijk moeilijk is te onderscheiden van oppervlakteafoer. Meestal wordt interflow beschouwd als een deel van de oppervlakteafoer. Oppervlakteafoer, interflow, en neerslag die direct op het

oppervlaktewater valt, worden soms samengevoegd en als één proces beschouwd. Dit wordt het 'neerslagoverschot' (direct runoff) genoemd

Grondwaterstroming

Grondwaterstroming (base flow) is de stroming van water beneden de grondwaterspiegel naar het open water.

2.2 Factoren die de afvoer beïnvloeden

De processen uit de hydrologische kringloop die hierboven beschreven zijn, zijn belangrijk om inzicht te krijgen in de factoren die leiden tot extreme waterstanden in een watersysteem. Of neerslaggebeurtenissen leiden tot hoge afvoeren en extreme waterstanden hangt af van diverse gebiedseigenschappen. Deze eigenschappen bepalen welke afvoerprocessen in een systeem domineren. Als oppervlakteafvoer het dominante afvoerproces is, zal de afvoergolf er anders uitzien dan als grondwaterstroming het dominante afvoerproces is. Oppervlakteafvoer is een veel sneller proces dan grondwaterstroming. In het geval dat oppervlakteafvoer het dominante proces is, zal de afvoergolf een kortere duur hebben met een hogere piek dan in het geval dat grondwaterstroming het dominante afvoerproces is. De meest relevante gebiedseigenschappen worden hieronder kort besproken.

Bodemtype

De infiltratiecapaciteit van de bodem hangt onder ander af van de porositeit van de bodem die de bergingscapaciteit bepaalt. Porositeit verschilt per bodemtype. De hoogste infiltratiecapaciteiten komen voor in zandige bodems, terwijl zware klei een zeer lage infiltratiecapaciteit heeft. Een hoge infiltratiecapaciteit zorgt ervoor dat een groot deel van het regenwater in de bodem kan infiltreren. Bij een bodem met een lage infiltratiecapaciteit kan er echter maar weinig neerslag infiltreren en zal een groot deel van de neerslag afgevoerd worden door oppervlakteafvoer.

Vegetatie

De hoeveelheid neerslag die niet op de grond terecht komt door interceptie hangt af van de soort en de hoeveelheid vegetatie. Ook verbeteren planten de structuur van de grond en vergroten de porositeit, zodat de infiltratiecapaciteit toeneemt. Als er geen vegetatie aanwezig is, zal de grond na verloop van tijd dichtslibben wat de infiltratiecapaciteit drastisch vermindert.

Helling en grootte stroomgebied

De helling en de grootte van het stroomgebied zijn van invloed op de oppervlakteafvoer. In het algemeen kan gesteld worden dat steile hellingen meer oppervlakteafvoer produceren dan minder steile hellingen. Verder heeft onderzoek aangetoond dat de oppervlakteafvoer toeneemt naarmate de grootte van het stroomgebied afneemt [Critchley & Siegert, 1991].

Landgebruik

Het landgebruik heeft grote invloed op de verschillende afvoerprocessen. Veel open water in een gebied vlakt de afvoerpieken af doordat er veel neerslag direct geborgen kan worden. Als het oppervlak verhard is zal er geen of nauwelijks neerslag infiltreren en zal direct over het oppervlak afstromen naar het open water. Gebieden die gekenmerkt worden door veel verhard oppervlak, zoals stedelijke gebieden en glastuinbouwgebieden, zullen dus snel hun water afvoeren. Het watersysteem zal de neerslag in korte tijd moeten kunnen afvoeren. In gebieden daarentegen met weinig verhard oppervlak zal een groot deel van de neerslag kunnen infiltreren en in de bodem geborgen kunnen worden. Dit water zal langzaam naar het oppervlaktewater toestromen wat resulteert in een langdurige afvoergolf met relatief lage pieken.

Door verstedelijking of inrichting van landelijke gebieden als glastuinbouwgebied kan de wijze waarop de neerslag wordt afgevoerd naar het open water drastisch veranderen, waardoor watersystemen mogelijk een ander gedrag gaan vertonen waardoor die systemen niet meer voldoen aan de normering.

2.3 Looptijd

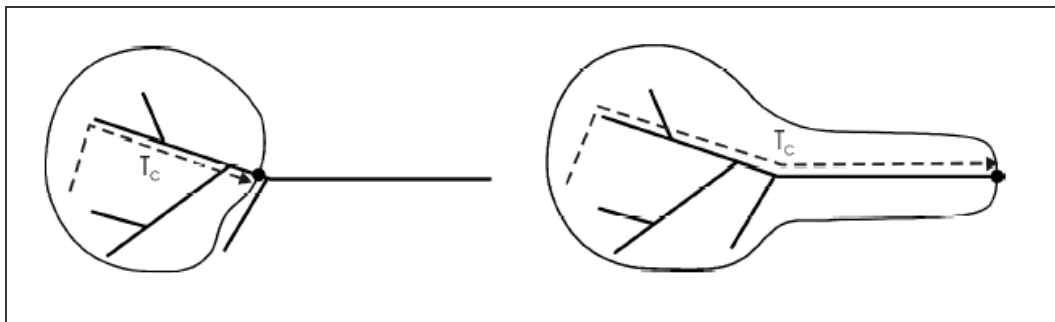
De neerslaggebeurtenissen die bijvoorbeeld waterstanden opleveren met een herhalingsperiode van 100 jaar zijn per watersysteem verschillend. In kleine systemen waar een groot deel van het oppervlak verhard is zullen felle, korte convectieve buien tot extreme waterstanden leiden, terwijl in andere grote watersystemen, waar veel landbouw is, langdurige aanhoudende buien tot extreme waterstanden leiden.

Welke neerslaggebeurtenissen in een watersysteem tot extreme waterstanden leiden, hangt af van de bovengenoemde gebiedseigenschappen. Deze gebiedseigenschappen bepalen een belangrijke parameter in het watersysteem: de looptijd (concentration time). De looptijd is de tijd die een waterdeeltje nodig heeft om van het hydrologisch verste punt in het stroomgebied naar de locatie waar het waterpeil berekend wordt te stromen [Brouwer, 2000]. Op deze locatie wordt na een tijd die gelijk is aan de looptijd door het hele toevoerende gebied een bijdrage geleverd aan de afvoer van de neerslag.

Bij een constante neerslag wordt op deze locatie dus het maximale debiet bereikt na een neerslagduur die gelijk is aan de looptijd. Dit wordt in de literatuur ook wel de kritieke buiduur genoemd [Berlemont, 2003]. Dit principe wordt ook toegepast in de veelgebruikte Rationele Methode. Met deze methode worden piekafvoeren berekend in een stroomgebied met de empirische formule $Q = C \cdot i \cdot A$. Hierin wordt gebruik gemaakt van een neerslagintensiteit bij een neerslagduur gelijk aan de looptijd (i). Deze intensiteit wordt vermenigvuldigd met een run-off coëfficiënt (C) en de oppervlakte van het stroomgebied (A).

De looptijden verschillen niet alleen tussen watersystemen onderling, maar verschillen ook binnen een systeem. Elk punt in een watersysteem heeft een ander looptijd en daarom heeft ook elk punt in het systeem een eigen kritieke buiduur. In een vertakt netwerk kan een punt ook meerdere kritieke buiduren hebben.

Bovenstrooms in het stroomgebied zijn de looptijden kleiner (enkele uren) dan benedenstrooms (enkele dagen) (zie Figuur 2.2). Hoe groot de verschillen zijn hangt af van de grootte van het stroomgebied. Als de extreme waterstanden in een watersysteem bepaald worden met behulp van ontwerpbuien, of -gebeurtenissen moet er dus rekening worden gehouden met alle mogelijke kritieke buiduren tot de maximale looptijd.



Figuur 2.2: Illustratie van de fysieke betekenis van de looptijd T_c voor twee verschillende ontwerppunten (•) [bron: Berlemont, 2003]

3 Beschrijving methoden

In dit hoofdstuk worden de werkwijzen van de twee analysemethoden, 'statistiek vooraf' en 'statistiek achteraf', beschreven.

In paragraaf 3.1.1 wordt de methode 'statistiek vooraf' beschreven. Eerst wordt het principe uitgelegd waarna in de volgende paragraaf dieper op de ontwerpgebeurtenissen wordt ingegaan. In paragraaf 3.1.2 is de werkwijze samengevat. In de volgende twee paragrafen komen twee aspecten aan de orde waarbij bij het gebruik van de methode 'statistiek vooraf' rekening dient te worden gehouden. Dit zijn de neerslagduur en de afhankelijkheid tussen neerslag en grondwaterstand.

De methode 'statistiek achteraf' wordt in paragraaf 3.2.1 beschreven. In paragraaf 3.2.2 worden de diverse manieren beschreven waarop de berekende waterstanden kunnen worden bewerkt. Daarna volgt een paragraaf waarin de werkwijze is beschreven en een paragraaf over de betrouwbaarheid van de resultaten. Het hoofdstuk eindigt met een paragraaf over modelleren.

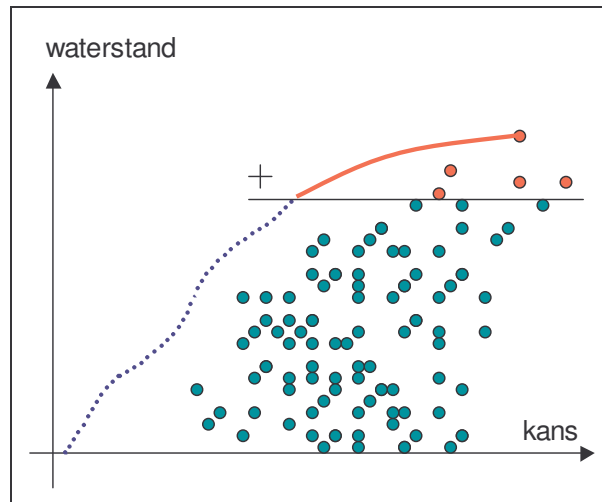
3.1 Methode 'statistiek vooraf'

3.1.1 Beschrijving

De methode 'statistiek vooraf' bepaalt eerst de herhalingstijden en berekent daarna de waterstanden. Hiertoe worden alle mogelijke 'situaties' opgesteld met een van te voren bekende kans van voorkomen. Deze 'situaties' worden in de rest van dit rapport gebeurtenissen genoemd.

De gebeurtenissen vormen de invoer van een model van het watersysteem. Met behulp van het model van het watersysteem wordt bij elke gebeurtenis de bijbehorende maximale waterstand berekend. Deze waterstand krijgt dan een kans van voorkomen toegekend die gelijk is aan de kans van de doorgerekende gebeurtenis.

Als alle gebeurtenissen zijn doorgerekend kan voor elke waterstand de overschrijdingsfrequentie bepaald worden door de frequenties op te tellen van de berekende waterstanden die boven deze waterstand liggen. De waterstanden worden geplott in een waterstand-herhalingstijdgrafiek (Zie Figuur 3.1).



Figuur 3.1: Optellen van gebeurtenissen in een waterstand-kansgrafiek

3.1.2 De ontwerpgebeurtenissen

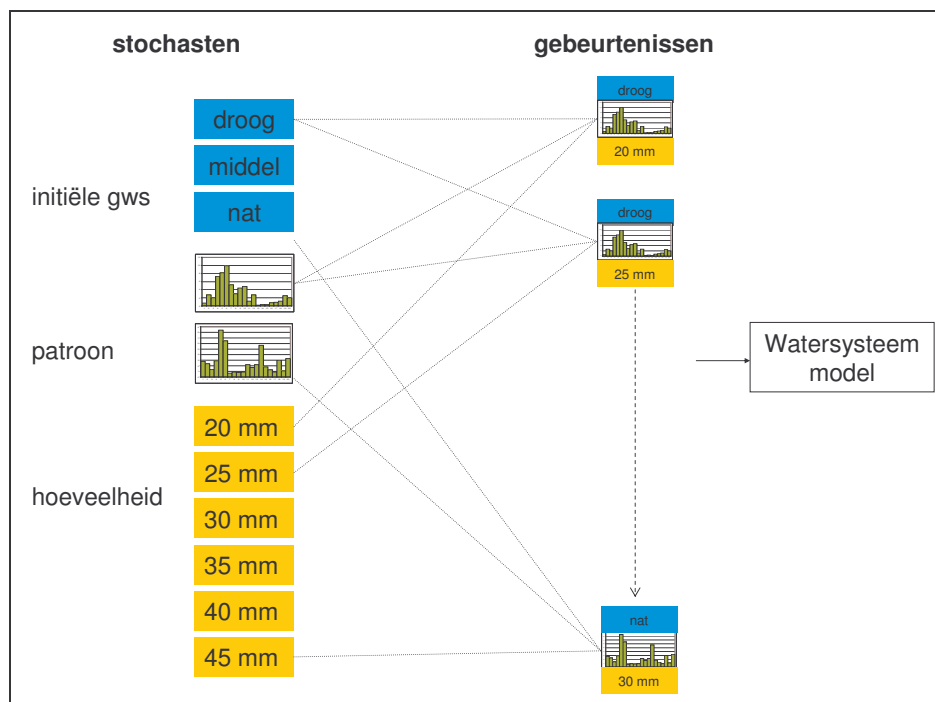
De crux van de methode 'statistiek vooraf' zit hem in het opstellen van alle gebeurtenissen. Deze gebeurtenissen worden bepaald door de mechanismen die tot hoge waterstanden leiden (zie hoofdstuk 2), zoals neerslagvolume, neerslagduur, herhalingstijd, grondwaterstand, bodemvocht, beschikbare pompcapaciteit, interne looptijden etc. In theorie kan met al deze aspecten rekening worden gehouden. In de praktijk gebeurt dit echter niet, omdat bijvoorbeeld de kansdichtheidfunctie moeilijk of niet te bepalen is. De gebeurtenissen die in de praktijk doorgerekend worden variëren alleen op neerslagvolume, neerslagpatroon en grondwaterstand van het watersysteem.

Door de volumes en patronen met elkaar te combineren ontstaat een serie ontwerpbuïen. Deze serie ontwerpbuïen wordt ingevoerd in een watersysteemmodel waarmee voor elke ontwerpbui de maximale waterstand berekend wordt.

De waterstanden die optreden hangen echter niet alleen af van de grootte en de opbouw van de ontwerpbui. Deze hangen ook af van de grondwaterstanden in het systeem die op het moment dat de bui valt aanwezig zijn. Als de grondwaterstanden in het watersysteem hoog zijn, is er minder berging in het systeem aanwezig. Dit leidt tot hogere waterstanden, dan wanneer er een lage grondwaterstand is en er dus meer berging in het systeem aanwezig is. In werkelijkheid zijn de grondwaterstanden in een systeem afhankelijk van het seizoen, met in de winter hoge grondwaterstanden en in de zomer

lage grondwaterstanden. Daarom worden alle ontwerpbuien bij verschillende grondwatercondities doorgerekend

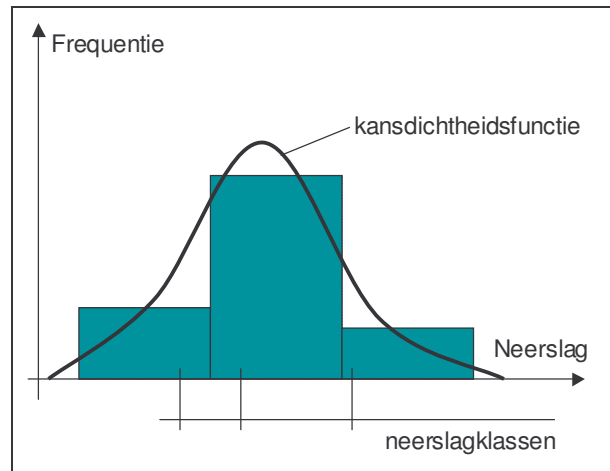
Er worden dus een aantal neerslagvolumes, een aantal neerslagpatronen en een aantal initiële grondwaterstanden gedefinieerd. Elke ontwerpgebeurtenis is opgebouwd deze drie factoren (zie Figuur 3.2). Het neerslagvolume bestaat uit een bepaalde hoeveelheid neerslag die in een vaste duur gevallen is, het neerslagpatroon beschrijft hoe het volume neerslag over de tijd verdeeld is en de initiële grondwaterstand is de grondwaterstand op het moment dat een neerslaggebeurtenis begint. Elke factor varieert in de tijd en krijgt een kansverdeling toegekend. Deze factoren worden daarom toevalsvariabelen of stochasten genoemd.



Figuur 3.2: Opbouw van de ontwerpgebeurtenissen

In de figuur is te zien dat de stochasten in een klein aantal klassen zijn gediscetiseerd, omdat het aantal combinaties de totale reketijd bepaalt voor het doorrekenen van de gebeurtenissen. Voor het voorbeeld uit bovenstaand figuur zullen $3 \cdot 2 \cdot 6 = 36$ gebeurtenissen moeten worden doorgerekend.

Het *neerslagvolume* bestaat uit een bepaalde hoeveelheid neerslag die in een bepaalde tijdsduur gevallen is. Bij een bepaalde neerslagduur worden een aantal neerslagvolumes of klassen gekozen, die de kansdichtheidsfunctie zo goed mogelijk beschrijven (zie Figuur 3.3).



Figuur 3.3: Onderverdeling van kansdichtheidsfunctie in neerslagklassen

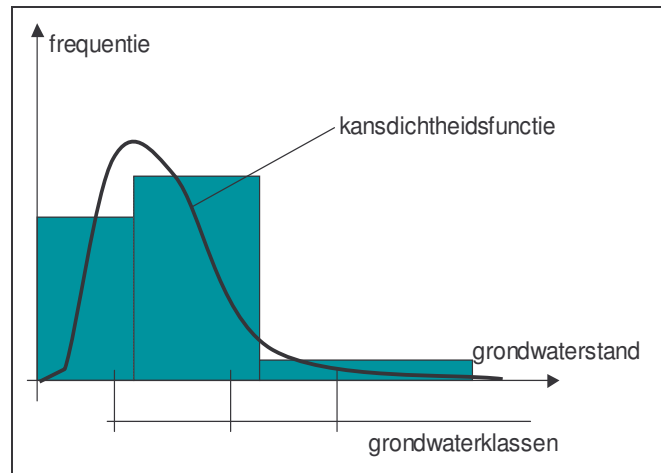
Elke neerslagvolume heeft een herhalingsduur T jaar. Zo wordt bijvoorbeeld een neerslagvolume van 50 mm in 10 uur eens per 50 jaar overschreden. Op basis van de gemeten historische neerslag kan voor elk neerslagvolume en duur een herhalingsduur berekend worden.

Door middel van extrapolatie kunnen ook neerslaghoeveelheden berekend worden met veel grotere herhalingsduuren dan de lengte van de beschikbare meetreeks. De neerslaghoeveelheden bij deze grote herhalingsduuren kennen echter grote onzekerheden.

Het *neerslagpatroon* beschrijft hoe de hoeveelheid neerslag over de tijd verdeeld is. Er kunnen een aantal kunstmatige neerslagpatronen gecreëerd worden. Elk neerslagpatroon heeft een kans van voorkomen. De som van de kansen is gelijk aan 1, elke neerslaggebeurtenis heeft immers een neerslagpatroon.

De *initiële grondwaterstand* wordt afgeleid uit een grondwaterreeks. De grondwaterreeks wordt verkregen door eerst de neerslagreeks met het watersysteemmodel door te rekenen. Hieruit volgt een reeks van waterstanden die gesorteerd wordt van hoge naar lage grondwaterstand die vervolgens verdeeld kan worden in een aantal klassen.

Bijvoorbeeld een droge situatie met een lage grondwaterstand, een natte situatie met een hoge grondwaterstand en een situatie die daartussen zit. De grondwaterstanden kunnen ook in meer klassen worden verdeeld. Elke klasse krijgt een kans van voorkomen toegekend (Zie Figuur 3.4).



Figuur 3.4: Onderverdeling van grondwaterstanden in klassen

Elke gebeurtenis is opgebouwd uit een combinatie van de drie stochasten. Een gebeurtenis bestaat bijvoorbeeld uit een neerslagvolume van 10 mm in een uur, neerslagpatroon 1 en een hoge initiële grondwaterstand. Deze gebeurtenis komt voor met een frequentie die het product is van de frequentie van het neerslagvolume en de kansen van het neerslagpatroon en de initiële grondwaterstand. (Zie hiervoor ook Bijlage A, waarin een voorbeeldberekening is gegeven.)

In de bovenstaande beschrijving is uitgegaan van gebeurtenissen die opgebouwd zijn uit drie stochasten. In het geval ook met andere factoren, zoals maalstops, buitenwaterstanden en dergelijke, rekening gehouden moet worden, moeten deze worden meegemodelleerd en kunnen daarna als stochast worden toegevoegd.

3.1.3 Werkwijze

De werkwijze van methode 'statistiek vooraf' zoals die hierboven is beschreven kan als volgt samengevat worden.

1. Kiezen van stochasten en een kansverdeling aan elke stochast toekennen
2. Het genereren van gebeurtenissen
3. Voor elke gebeurtenis frequentie van voorkomen bepalen

4. Voor elke gebeurtenis maximale waterstand berekenen met behulp van een watersysteemmodel
5. Kansverdeling voor extreme waterstanden bepalen
6. Watersysteem toetsen aan de normering

Over de onnauwkeurigheid van deze methode is niets bekend.

In bijlage A is deze werkwijze aan de hand van een voorbeeld uitgewerkt.

3.1.4 *Neerslagduur*

De neerslagduur die voor een bepaald watersysteem maatgevend is, hangt onder andere af van het type grondgebruik. Elk watersysteem heeft een bepaald type grondgebruik. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen snel reagerende systemen en langzaam reagerende systemen. Snel reagerende systemen zijn systemen waarin een groot verhard oppervlak is, zoals glastuinbouwgebieden en stedelijke gebieden. Langzaam reagerende systemen bestaan bijvoorbeeld uit veel grasland. Voor snel reagerende systemen is korte convectieve neerslag periode met hevige lokale neerslag maatgevend, terwijl voor langzaam reagerende systemen lang aanhoudende periode met een meer gespreide neerslag maatgevend is.

De parameter waarmee in de hydrologie wordt beschreven hoe snel een watersysteem reageert op de gevallen neerslag is de looptijd (zie paragraaf 2.3). Voor de bepaling van de ontwerpgebeurtenissen moet een neerslagduur gekozen worden die maatgevende waterstanden oplevert. De maatgevende neerslagduur hangt af van de looptijd en verschilt per watersysteem. Ook binnen een watersysteem kunnen op verschillende locaties verschillende neerslagduren maatgevend zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een polder die uit verschillende peilvakken bestaat die elk een ander grondgebruik hebben. In een dergelijke polder met meerdere kritieke buiduren zullen dus ontwerpbuizen met meerdere tijdsduren doorgerekend moeten worden.

3.1.5 *Afhankelijkheid tussen neerslag en grondwaterstand*

Bij de methode 'statistiek vooraf' wordt in de praktijk de frequentie van een ontwerpgebeurtenis bepaald door kansen van de afzonderlijke stochasten met elkaar te vermenigvuldigen. De correlatie tussen de kansverdelingen wordt in de praktijk vaak verwaarloosd. Het is echter de vraag of de stochasten onderling onafhankelijk kunnen worden beschouwd. De grondwaterstanden in een watersysteem worden voor een groot deel bepaald door de neerslag. In droge periodes zal er over het algemeen een lage grondwaterstand zijn en in natte periodes zal de grondwaterstand hoog zijn.

Het is eenvoudig aan te tonen dat er een verband bestaat tussen de grondwaterstand en het moment waarop extreme neerslaggebeurtenissen plaatsvinden. Met ander woorden: het is te verwachten dat een neerslaggebeurtenis die leidt tot extreme waterstanden eerder in een periode zal vallen waarin de grondwaterstanden hoog zijn dan in een periode waarin de grondwaterstanden laag zijn.

De sterkte van de lineaire afhankelijkheid tussen twee variabelen wordt uitgedrukt als een eenheidsloos getal, de correlatie. De correlatie is een reëel getal dat varieert tussen -1 en 1. Een positieve correlatie betekent dat een stijging in de ene variabele ook aanleiding geeft tot een stijging in de andere variabele. Een negatieve correlatie geeft aan dat een stijging in de eerste variabele tot gevolg heeft dat de tweede variabele gaat dalen. Een correlatie in de buurt van de nul geeft aan dat de twee variabelen lineair onafhankelijk zijn van elkaar.

De correlatie geeft dus een indicatie van de afhankelijkheid tussen twee variabelen. Het is echter niet noodzakelijk dat er dan ook een oorzakelijk verband bestaat tussen die twee variabelen. Een extreme neerslaggebeurtenis hoeft dus niet het gevolg te zijn van een hoge grondwaterstand, maar deze twee kunnen wel gecorreleerd zijn.

Met behulp van een correlatiecoëfficiënt kan onderzocht worden in welke mate er een correlatie bestaat tussen twee variabelen. De meest gebruikte maat voor correlatie is de Pearson-correlatie. De correlatie tussen de variabelen x en y wordt gegeven door de volgende formule:

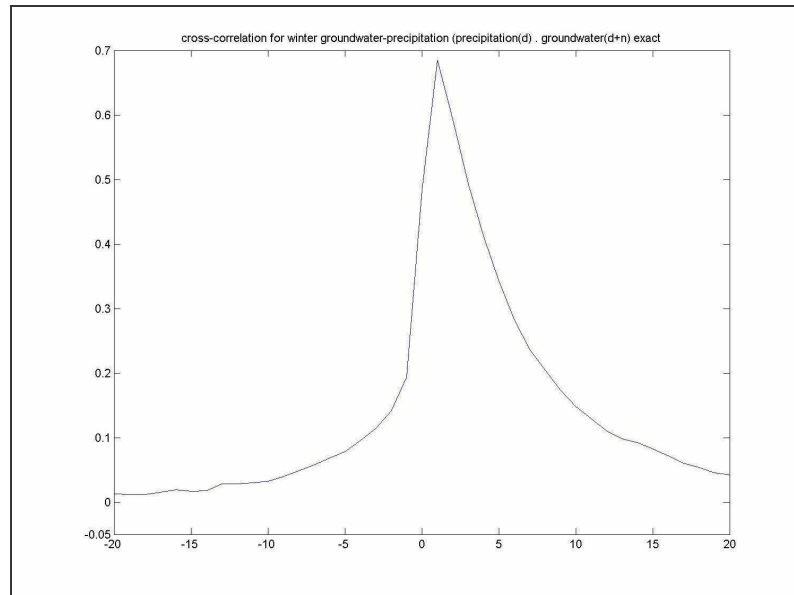
$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Hierbij staan x_i en y_i voor de i^{de} observaties van de twee bestudeerde variabelen x en y . Deze zijn in dit geval de grondwaterstand en het 24-uurs neerslaghoeveelheid.

Om de correlatie aan te tonen is een eenvoudige simulatie gedraaid van 100 jaar neerslag in een gestuwd peilvak met lichte klei van 100 ha.

Vervolgens is de neerslag vergeleken met de grondwaterstanden in de dagen voor en na de neerslag (cross-correlatie). In onderstaande correlogram is de cross-correlatiecoëfficiënt voor de winterperiode weergegeven (Figuur 3.5). Op de verticale as

is de correlatiecoëfficiënt uitgezet en op de horizontale as het aantal dagen ten opzichten van de dag waarop de neerslag viel (dag 0 is dus de dag van de neerslag).



Figuur 3.5: Correlatie tussen grondwater en neerslag [Bron: O.A.C. Hoefs]

In de grafiek is te zien dat voor de dagen dat er neerslag viel de correlatiecoëfficiënt boven de 0 is. Deze neemt toe tot circa 0,4 op de dag van de neerslag. Er blijkt dus dat er een correlatie bestaat tussen de neerslag en de grondwaterstand. Deze correlatie is 5 dagen voor de neerslag nog goed zichtbaar. Een dergelijke correlatie blijkt in het zomerhalfjaar, zij het minder nadrukkelijk, ook aanwezig. Als de grondwaterstand en de neerslag onafhankelijk van elkaar worden verondersteld worden de waterstanden in dit watersysteem dus onderschat. Opmerking: dit geldt voor lichte klei. Voor zand zal de cross-correlatie sneller uitzakken of bij zware klei langer aanwezig zijn.

In gebieden, zoals glastuinbouwgebieden, waar veel gebruik gemaakt wordt van regenbassins voor de watervoorziening speelt een soortgelijke relatie als de relatie tussen grondwaterstand en neerslag een rol. Deze bassins kunnen voor veel berging zorgen in een gebied. De beheerders ervan zullen echter streven naar maximale vulling van de bassins. Op de momenten dat extreme neerslaggebeurtenissen plaatsvinden, zullen deze bassins dus vaak gevuld zijn. Dit probleem kan opgelost worden door bij de berekening van extreme waterstanden er van uit te gaan dat de bassins volledig gevuld zijn en er geen berging in aanwezig is.

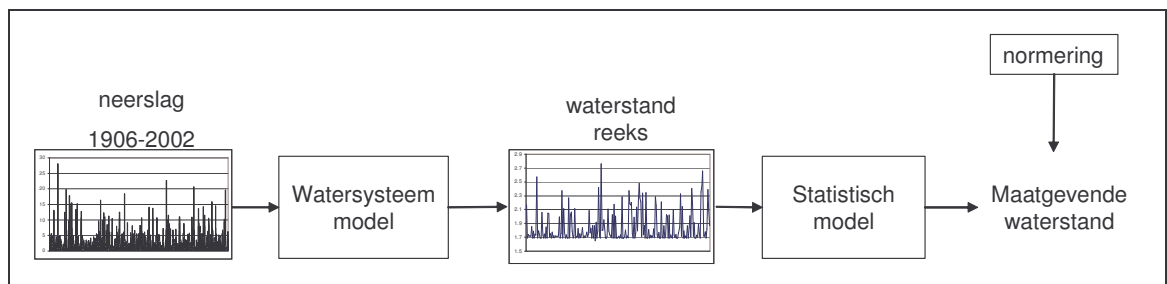
3.2 Methode 'statistiek achteraf'

3.2.1 Beschrijving

De methode 'statistiek achteraf' berekent eerst de waterstanden en bepaalt dan de herhalingstijden. Hiertoe wordt met dezelfde schematisatie van het watersysteem geen gebeurtenissen doorgerekend, maar een simulatie gedraaid met een langjarige neerslagreeks. De langst bekende neerslagreeks is door de KNMI gemeten neerslagreeks in uurwaarden van De Bilt die begint in 1906, zodat de huidige neerslagreeks een lengte heeft van 97 jaar.

Deze reeks vormt de invoer van het model van het watersysteem. Met behulp van dit model wordt een reeks van waterstanden berekend met een lengte die gelijk is aan de lengte van de neerslagreeks. Het neerslagpatroon, de neerslaghoeveelheid en de initiële grondwaterstand hoeven dus niet apart bepaald te worden, omdat deze impliciet in de neerslagreeks aanwezig zijn of door het model berekend worden.

Om overschrijdingskansen van extreme waterstanden te bepalen, moeten de waterstanden die met het model verkregen zijn statistisch bewerkt worden. Als de maatgevende waterstanden bepaald zijn, kan het watersysteem getoetst worden aan de normering. De methode is hieronder schematisch weergegeven (Figuur 3.6).



Figuur 3.6: methode 'statistiek achteraf'

3.2.2 Toepassing statistiek op waterstanden

Met de methode 'statistiek achteraf' wordt met een watersysteem een reeks van waterstanden berekend.

Deze reeks moet met behulp van extreme waarde statistiek bewerkt worden tot een cumulatieve verdelingsfunctie. Deze functie beschrijft hoe vaak een bepaalde waterstand wordt overschreden.

Om overschrijdingskansen van extreme waterstanden te schatten, kunnen de hoogste waarden in de reeks van de berekende waterstanden worden gebruikt. Door statistici is hier veel onderzoek naar gedaan. Er is een grote hoeveelheid literatuur beschikbaar over dit onderwerp. Hieruit blijkt dat er twee methoden zijn die gewoonlijk gebruikt worden bij studies naar extreme waarden. Deze zijn de 'Peaks Over Threshold'-methode (POT-methode) en de methode van de periodieke maxima.

Bij de '*Peaks Over Threshold*'-methode worden de maximale waarden van de reeks van de berekende waterstanden geselecteerd die een bepaalde grens- of drempelwaarde overschrijden. Op deze manier is het mogelijk om meer gegevens in de analyse te betrekken dan bij een serie jaarmaxima. Met deze methode moeten echter een aantal keuzes gemaakt worden door de gebruiker, zoals de drempelwaarde en de minimale afstand tussen de extreme waarden. Deze keuzes kunnen een grote impact hebben op de uiteindelijke resultaten [Palutikof, 2002].

Bij de *methode van de periodieke maxima* reduceert men de reeks van de berekende waterstanden tot maximale waarden die voorkomen in vooraf gekozen tijdsintervallen van gelijke lengte, meestal een jaar. In dit geval wordt gesproken van een serie jaarmaxima. Deze methode in combinatie met de Generalized Extreme Value (GEV) verdeling wordt in studies naar extremen (in klimaat, afvoeren etc.) het meest gebruikt.

In dit onderzoek is de methode van de periodieke maxima toegepast op de reeks van berekende waterstanden.

Type verdeling

Om de verdeling van de geselecteerde waterstanden op een goede wijze weer te geven moet een verdelingsfunctie worden gekozen. De klassieke extreme waarde theorie zegt dat voor een voldoende lange reeks van onafhankelijk en homogeen verdeelde random variabelen, een groot aantal maxima uit gelijke periodes, nadert naar een verdeling uit een familie van drie basisverdelingen. Deze drie verdelingen zijn gecombineerd tot een verdeling die bekend staat als de Generalized Extreme Value (GEV) verdeling [Palutikof, 2002]. Deze verdeling heeft de volgende cumulatieve verdelingsfunctie:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + \gamma \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\gamma} \right) \right] \quad \gamma \neq 0, \quad (1)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \quad \gamma = 0, \quad (2)$$

Waarin:

μ = locatie parameter

σ = schaal parameter

γ = vorm parameter

De vormparameter γ bepaald het type van de extreme waarde verdeling. De meest gebruikte verdeling bij statistiek van extreme neerslaggebeurtenissen is de Generalized Extreme Value verdeling type I (Gumbel verdeling), toegepast op een set van jaarlijkse maxima. Voor dit type geldt: $\gamma = 0$ en heeft dus twee parameters. Type II en III hebben nog een extra parameter, de vormparameter γ . Bij type II is deze negatief en bij type III is deze positief. In dit onderzoek zijn de berekende waterstanden gefit met de GEV verdeling type I en type III, zodat duidelijk wordt wat de verschillen zijn tussen de twee verdelingen.

Parameterschatting

Voor de schatting van de paramaters van de GEV verdeling zijn diverse methode beschikbaar. In dit onderzoek zijn deze parameters geschat met de Maximum Likelihood methode. De wetenschappelijke discussie of andere methoden voor de parameterschatting wellicht beter zijn, is voor dit onderzoek niet relevant. De Maximum Likelihood methode wordt in de praktijk van het waterbeheer het meest gebruikt. Bovendien heeft eerder onderzoek [Katz, 2002; Palutikof, 2002] aangetoond dat dit een geschikte methode is voor extreme waarde statistiek als er een voldoende grote dataset ($n > 30$) beschikbaar is. Dat is in dit onderzoek het geval aangezien er gewerkt is met een neerslagreeks van 97 jaar.

In dit onderzoek is voor het afleiden van extreme waterstanden uitgegaan van de GEV verdeling type I en type III, toegepast op een set van 97 jaarlijkse maxima.

3.2.3 Werkwijze

De werkwijze van methode 'statistiek achteraf' zoals die hierboven is beschreven kan als volgt samengevat worden.

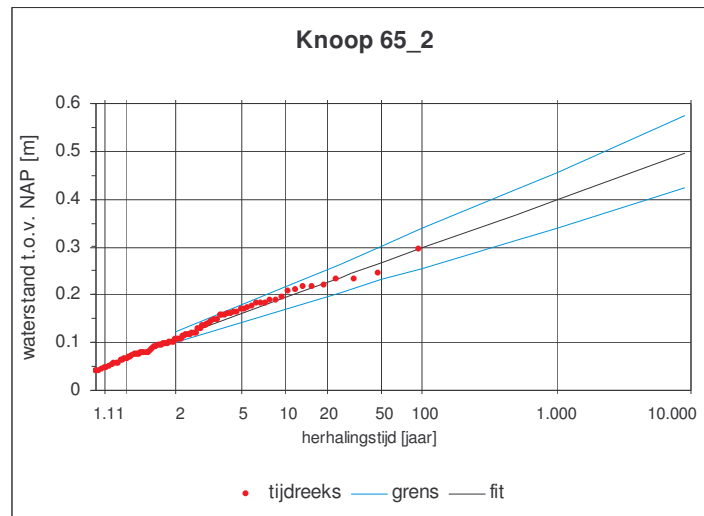
1. Een tijdreeks van neerslagdata van 1906-2002 gemeten door het KNMI in De Bilt wordt ingevoerd in een watersysteemmodel.
2. Met het model wordt een reeks waterstanden berekend.
3. Voor elk jaar wordt de maximale waterstand bepaald. Er worden zo dus 97 jaarmaxima verkregen.
4. De jaarmaxima worden gesorteerd van groot naar klein, waarbij elke data een volgnummer krijgt: $m = 1$ voor de grootste, $m = 2$ voor de een na grootste etc.
5. Voor elke waterstand wordt de herhalingstijd geschat met behulp van de formule:

$$T = \frac{N + 1}{m}$$
 , waarbij N gelijk is aan het aantal jaar waarover de neerslagreeks zich uitstrekt.
6. De data worden geplot in waterstand-herhalingstijdgrafieken met een Gumbel verdeling. Op de x-as wordt de kans uitgezet en op de y-as de waterstand.
7. Door de puntenwolk wordt een lijn met een bepaalde kansverdeling gefit (zie Figuur 3.7).

3.2.4 Betrouwbaarheid

De resultaten zijn niet voor de hele waterstandreeks nauwkeurig. Voornamelijk de hoogste waterstanden zijn onnauwkeurig. De hoogste waterstand die ten gevolge van een extreme neerslag gebeurtenis optreedt, krijgt een herhalingstijd die gelijk is aan de lengte van de beschikbare neerslagreeks van bijna 100 jaar. Het is echter goed mogelijk dat deze gebeurtenis een keer in 75 of slechts een keer in de 250 jaar voorkomt.

Een betrouwbaarheidsinterval is echter vrij eenvoudig te bepalen. Dit gebeurt door een groot aantal bootstrap datasets te trekken uit de oorspronkelijke dataset. Een voorbeeld hiervan is te vinden in de onderstaande figuur (Figuur 3.7). De statistische achtergrond van deze methode wordt hier verder niet besproken.



Figuur 3.7: Waterstand-herhalingsstijfgrafiek met betrouwbaarheidsinterval

3.3 Modelleren

Beide methoden maken gebruik van hetzelfde model van een watersysteem om waterstanden te bepalen. Het is echter belangrijk de beperkingen van een model te onderkennen. Een model is slechts een schematisatie van de werkelijkheid. Dat betekent dat de waterstanden die met het model berekend worden, nooit helmaal overeenkomen met de waterstanden die in werkelijkheid optreden bij een gelijke belasting. Een model kan de werkelijkheid nooit helemaal exact beschrijven en zal dus een zekere mate van onnauwkeurigheid en onbetrouwbaarheid in zich hebben.

Beide beschreven methoden gebruiken echter hetzelfde model en hebben dus te maken met dezelfde beperkingen die het gebruik van een model met zich meebrengt. Waardoor zij een vergelijking van beide methoden niet in de weg staat.

Verder maken beide methoden gebruik van dezelfde gemeten neerslagreeks. In beide methoden wordt gebruik gemaakt van statistische bewerking van de gegevens om uitspraken te doen over de overschrijdingskans in perioden van meer dan 100 jaar.

4 Resultaten casestudies

In het voorgaande hoofdstuk is een theoretische beschrijving gegeven van de twee methoden om herhalingstijden van extreme waterstanden te bepalen. De twee methoden zijn toegepast op twee casestudies: de Oranjepolder en de Heiligenbergerbeek. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze casestudies gegeven. Per casestudie wordt eerst een beschrijving gegeven van het gebied. Vervolgens worden de resultaten van de methode 'statistiek vooraf' gegeven. Hierbij zijn voornamelijk de invloed van de neerslagduur en de invloed van de relatie tussen de grondwaterstand en de neerslag op de resultaten onderzocht. Daarna is voor de methode 'statistiek achteraf' - de invloed van het toepassen van de statistiek onderzocht. De casestudies worden afgesloten met een toetsing aan de werknormering voor regionale wateroverlast.



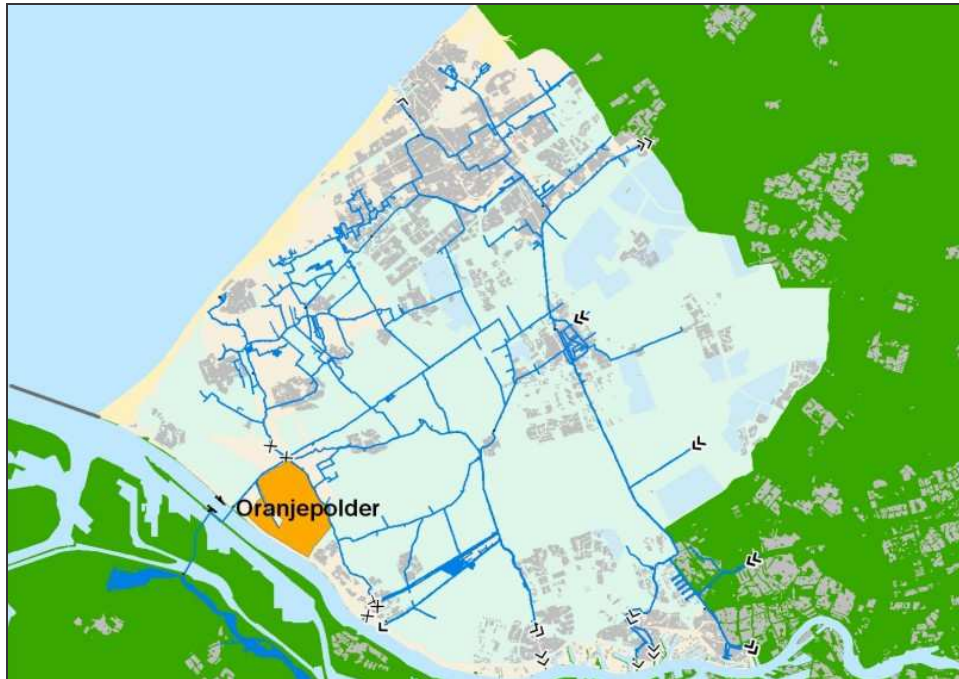
Figuur 4.1 Locatie van de casestudies Oranjepolder en de Heiligenbergerbeek

4.1 Oranjepolder

4.1.1 Gebiedsbeschrijving

De Oranjepolder is een polder van circa 700 ha in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Delfland. De polder is gelegen in het zuidwesten van Delfland en grens in het zuiden aan de Nieuwe Waterweg (Zie Figuur 4.2). Het gebied behoort tot één van de snelst reagerende gebieden van Nederland, doordat bijna de helft van de

polder is ingericht als glastuinbouw gebied. Verder bevindt zich in de polder de plaats Maasdijk, dat ongeveer 5% van het totale oppervlak beslaat. Dit betekent dat een groot deel van de polder uit verhard oppervlak bestaat, waardoor de gevallen neerslag snel tot afstroming komt. Dit geldt voornamelijk voor de peilvakken 1 en 2. (zie Tabel 4.1).



Figuur 4.2 Oranjepolder in het gebied van het Hoogheemraadschap van Delfland

In het zuidoosten van het gebied bevindt zich een grote plas, de Oranjeplas deze heeft een oppervlakte van circa 30 hectare. Deze plas staat los van het watersysteem van de Oranjepolder. Het overige deel van de polder bestaat uit agrarisch gebied. Dit is vooral het zuidelijke gedeelte van de polder.

In de praktijk is er soms berging beschikbaar in de regenbassins, die door de tuinders gebruikt worden om regenwater in op te slaan voor de watervoorziening van de gewassen die in de kassen gekweekt worden. De berging is echter vaak niet beschikbaar, omdat de tuinders de bassins zoveel mogelijk maximaal gevuld laten.



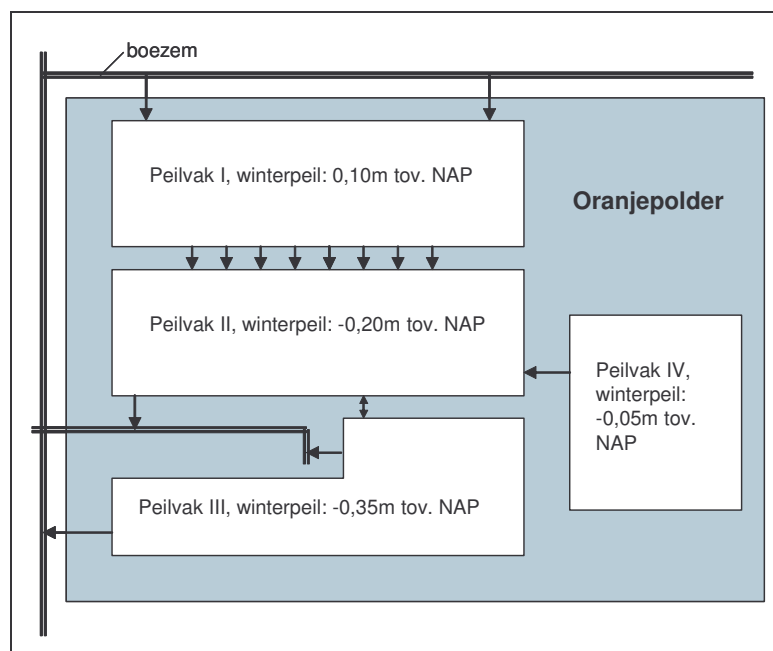
Figuur 4.3: In het waterbassin is soms berging beschikbaar

(bron: Nederland leeft met water 2004)

Tabel 4.1: Oppervlakten per peilvak

peilvak	verhard		Kassen		onverhard		open water		totaal
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
1	24	8	184	61	91	30	3,2	1,1	301
2	3	2	131	71	48	26	1,5	0,8	184
3	0	0	2	1	154	98	1,5	1,0	157
4	12	20	0	0	46	78	1,6	2,6	60
Totaal	39	6	316	45	340	48	7,9	1,1	702

De Oranjepolder kent weinig hoogteverschillen en ligt volledig boven NAP. Het gebied is verdeeld in vier peilvakken; aangezien de polder volledig boven boezempeil ligt, watert de polder onder vrij verval af via drie stuwen. Eén stuw ligt in peilvak II en de andere twee stuwen liggen in peilvak III. Hiervan is een stuw een regelbare stuw. Peilvak I watert via een zevental vaste stuwen af op peilvak II. In peilvak I bevinden zich twee inlaatkunstwerken, waarmee water vanuit de boezem ingelaten kan worden in droge periodes. Peilvak IV is een klein peilvak van circa 60 hectare en watert via een vaste stuw af op peilvak II. Dit peilvak was vroeger een aparte polder en heet Steendijkspolder (zie Figuur 4.4).

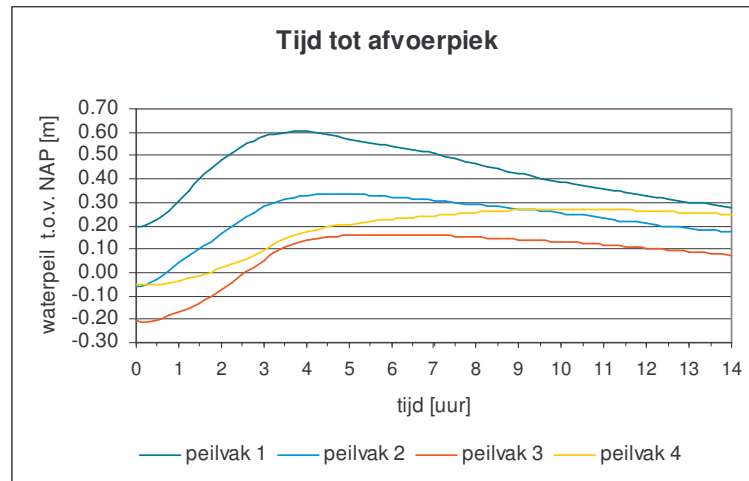


Figuur 4.4: Peilvakken Oranjepolder

4.1.2 Statistiek vooraf

Neerslagvolume

De Oranjepolder bestaat uit vier peilvakken met verschillend grondgebruik, die in serie aan elkaar zijn gekoppeld. Hierdoor hebben de verschillende peilvakken een eigen kritieke buiduur (Zie hoofdstuk 2). Om het verschil in reactietijd in beeld te brengen is een bui van 8 mm in één uur doorgerekend. Uit Figuur 4.5 blijkt dat de 4 peilvakken in de Oranjepolder behoorlijk verschillend reageren op deze bui. De tijd die nodig is om het maximum van de afvoerpiek te bereiken varieert van 3,5 uur in peilvak 1 tot ongeveer 12 uur in peilvak 4.

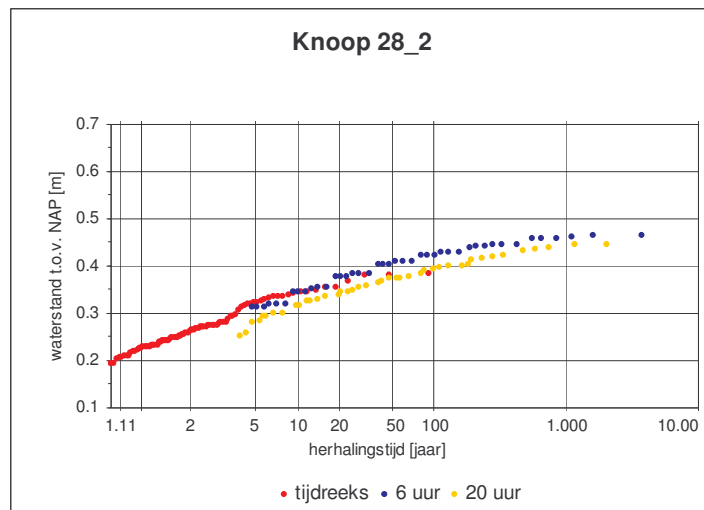


Figuur 4.5: Tijd tot afvoerpiek per peilvak

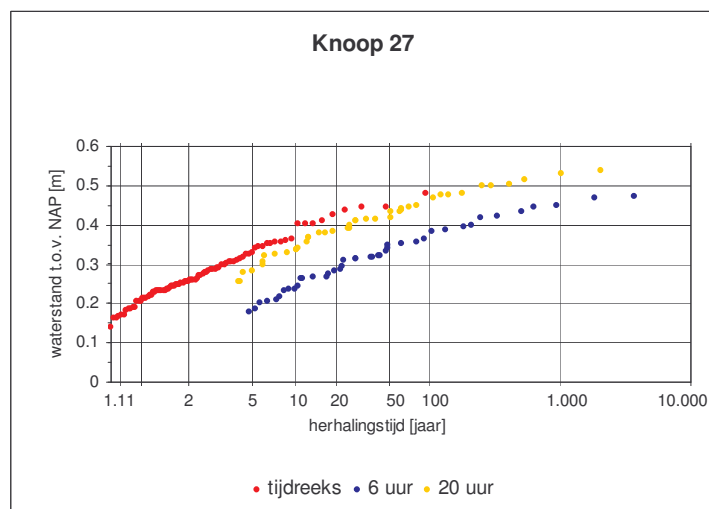
Om met de verschillende looptijden rekening te houden zijn er berekeningen gemaakt met neerslagduren van 6, 10, 14 en 20 uur. In de twee peilvakken met veel glastuinbouw blijken 6-urige gebeurtenissen maatgevend zijn, terwijl in de peilvakken met veel onverhard gebied 14-urige en 20-urige gebeurtenissen maatgevend blijken te zijn (zie Tabel 4.2). Voor de methode statistiek vooraf is het dus nodig om verschillende neerslagduren door te rekenen.

Tabel 4.2: Maatgevende neerslagduren per peilvak

Peilvak	Grondgebruik	Maatgevende neerslagduur
1	Glastuinbouw	6 uur
2	Glastuinbouw	6 uur
3	Akkerbouw	14 uur
4	Akkerbouw	20 uur



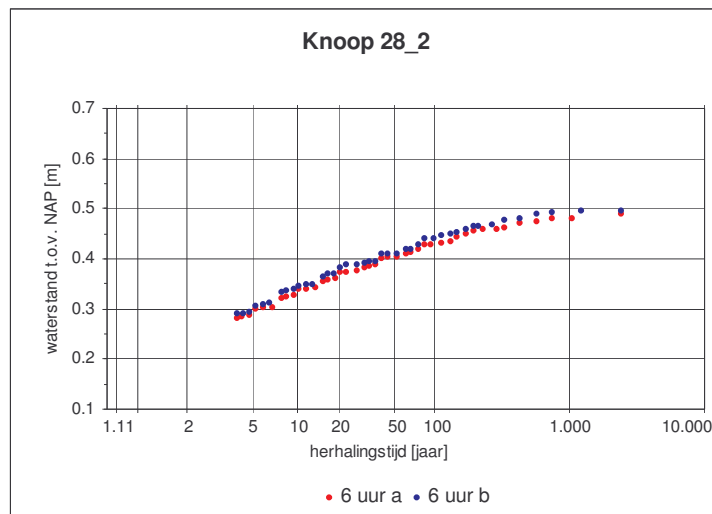
Figuur 4.6: Resultaten methode 'statistiek vooraf' voor peilvak 2



Figuur 4.7: Resultaten methode 'statistiek vooraf' voor peilvak 4

Neerslagpatroon

In eerste instantie zijn voor de stochast 'neerslagpatroon' twee kunstmatige neerslagpatronen samengesteld (zie Bijlage D). Om inzicht te krijgen in de invloed van het neerslagpatroon op de berekende waterstanden zijn in plaats van twee kunstmatige neerslagpatronen twee historisch neerslagpatronen gekozen. De resultaten van beide berekeningen zijn in onderstaande grafiek weergegeven voor peilvak 2 van de Oranjepolder (Zie Figuur 4.8). De lijn '6 uur b' geeft de resultaten met kunstmatige neerslagpatronen en lijn '6 uur a' geeft de resultaten met historische neerslagpatronen. Het verschil blijkt minimaal te zijn.



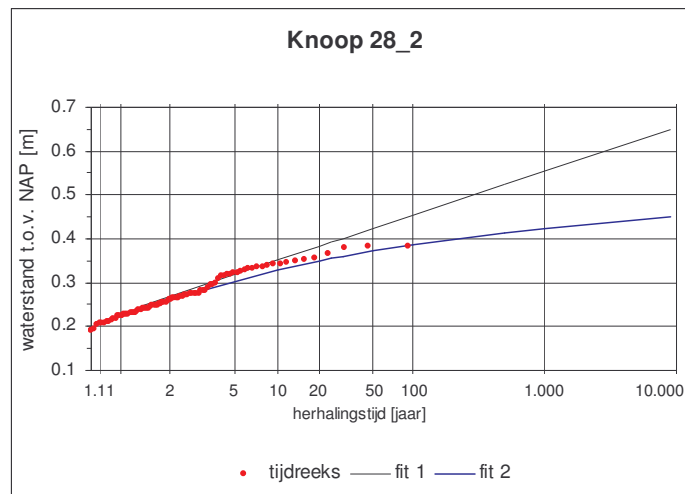
Figuur 4.8: Invloed neerslagpatroon

Initiële grondwaterstand

De correlatie tussen de grondwaterstand en de neerslag heeft op de resultaten in de Oranjepolder nauwelijks invloed. Dit wordt veroorzaakt doordat de Oranjepolder grotendeels uit verhard gebied bestaat, waardoor de grondwaterstand de waterstand in sloten en kanalen überhaupt nauwelijks beïnvloedt. Door het grote percentage verharde oppervlak reageert de polder zeer snel en wordt de afvoer in het watersysteem voor veruit het grootste deel veroorzaakt door oppervlakteafstroming van de neerslag.

4.1.3 Statistiek achteraf

Het doorrekenen van de neerslagreeks van 1906-2002 resulteert in een reeks van 97 jaar waterstanden. Deze reeks waterstanden zijn verwerkt tot een waterstand-herhalingstijdgrafiek, in overeenstemming met de methodiek zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Figuur 4.9 laat voor een punt in peilvak 2 van de Oranjepolder (knoop 28_2) een waterstand-herhalingstijdgrafiek zien.



Figuur 4.9: Waterstand-herhalingstijdgrafiek met de methode 'statistiek achteraf'

De waterstanden zijn hierin op twee manieren gefit:

- Fit 1 laat de resultaten zien als de GEV verdeling type I Gumbel gebruikt wordt
- Fit 2 laat de resultaten zien als de GEV verdeling type III Weibull gebruikt wordt.

Duidelijk is te zien dat de resultaten bij de verschillende manieren van fitten sterk uiteenlopen. Dit geldt voornamelijk voor grote herhalingstijden.

4.1.4 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten getoetst aan de normering voor regionale wateroverlast.

Tabel 4.3: Resultaten toetsing Oranjepolder (waterstanden in m +NAP)

Peilvak	Niveau maaiveld	Statistiek vooraf			Statistiek achteraf		
		T (jaar)	peil	Resultaat	T (jaar)	peil	Resultaat
1	0.71	50	0.60	Voldoet	50	0.55	Voldoet
2	0.22	50	0.40	Faalt	50	0.40	Faalt
3	0.52	25	0.20	Voldoet	25	0.25	Voldoet
4	0.86	25	0.40	Voldoet	25	0.45	Voldoet

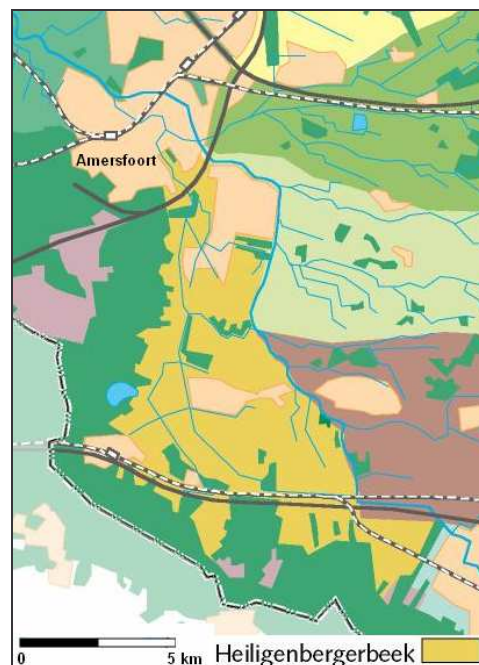
De tabel laat zien dat er tussen de methode 'statistiek vooraf' en de methode 'statistiek achteraf' weinig verschillen zitten. Deze verschillen vallen binnen de onnauwkeurigheid van de statistische methoden. De maatgevende waterstanden verschillen met slechts enkele centimeters van elkaar. De uiteindelijke beoordeling is bij beide methoden gelijk.

4.2 Heiligenbergerbeek

4.2.1 Gebiedsbeschrijving

De Heiligenbergerbeek ligt in het beheersgebied van het waterschap Vallei & Eem en is gelegen in de Gelderse Vallei. Het beheersgebied van Waterschap Vallei & Eem ligt tussen de Utrechtse Heuvelrug in het westen en de Veluwe in het oosten. De Nederrijn vormt de zuidgrens en aan de noordkant houdt het waterschap bij de randmeren op. De rivier de Eem en het Valleikanaal zijn de belangrijkste aders in het gebied van Waterschap Vallei & Eem.

Binnen het stroomgebied van de Heiligenbergerbeek liggen de gemeenten Maarn, Maarsbergen, Woudenberg en Leusden (zie Figuur 4.10). De oppervlakte van het stroomgebied is ongeveer 7.300 hectare. Het watersysteem van de Heiligenbergerbeek - gelegen tussen het Valleikanaal en de Utrechtse Heuvelrug - omvat behalve de Heiligenbergerbeek zelf, de Woudenbergse Griff en de Heigraaf. Het landschap varieert van een relatief open weidelandschap rondom Woudenberg tot de meer besloten landschappen op de flanken van de Heuvelrug en de natte gebieden ten zuiden van Leusden.



Figuur 4.10: Stroomgebied Heiligenbergerbeek [Bron: WVE, 2001]

Door het hoogteverschil tussen de Heuvelrug en de lagere delen komt voornamelijk langs de Heiligenbergerbeek kwel voor. Het is een smal en langgerekt stroomgebied met in noord-zuid richting weinig verhang en in oost-west richting juist veel. Aan het begin van de Woudenbergse Grift kan water worden ingelaten (Schele Duiker) om enige doorspoeling te bewerkstelligen in de stadsgrachten van Amersfoort, 17 kilometer stroomafwaarts. Deze inlaat en de kwel vanuit de heuvelrug zorgen ervoor dat het gebied nauwelijks afvoerloze periodes kent [WVE, 2003a].

Door het stroomgebied loopt de natte ecologische verbindingzone Heiligenbergerbeek-Woudenbergse Grift. Het overtollige water wordt grotendeels via de Woudenbergse Grift afgevoerd naar het Valleikanaal. Het Valleikanaal, de Woudenbergse Grift en de Heiligenbergerbeek zijn volledig gestuwd. In de belangrijkste waterlopen in het vrij afstromende deel van het gebied heeft het waterschap streefpeilen vastgesteld.

4.2.2 *Statistiek vooraf*

Neerslagvolume

De waterstanden in de Heiligenbergerbeek zijn berekend met neerslagduren van 6, 10 en 16 uur. In het hele watersysteem blijken neerslagduren van 10 uur maatgevende waterstanden op te leveren. De waterstand-herhalingstijdgrafieken zijn in bijlage F voor 4 punten in het systeem weergegeven.

Neerslagpatroon

Voor de stochast 'neerslagpatroon' zijn twee kunstmatige neerslagpatronen samengesteld waarmee de berekening zijn uitgevoerd (zie Bijlage D).

Initiële grondwaterstand

Voor het bepalen van de initiële grondwaterstand is 10 jaar (de periode 1937-1947) van de volledige neerslagreeks doorgerekend. Van al deze waterstanden kan voor elk punt in het watersysteem een kansverdeling worden gemaakt. De grondwaterstand is verdeeld in drie klassen een natte een middel en een droge toestand. Voor elke klasse is een dag in de 10-jarige reeks opgezocht met grondwatercondities die gelijk zijn aan elke klasse (droog, middel en nat). Van de grondwatercondities van deze dag is met behulp van het model een restart-file gemaakt. Deze file bestaat in feite uit de grondwatercondities van de klasse.

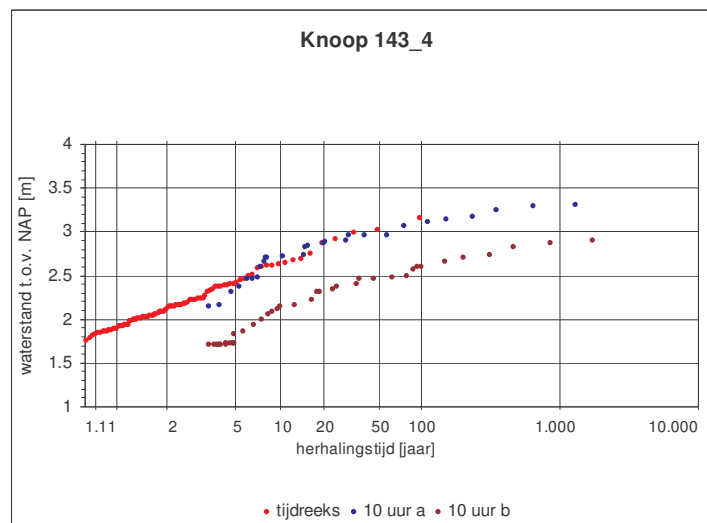
Wanneer echter naar de grondwaterstanden op de dag voor extreme neerslag wordt gekeken, blijkt dat de grondwaterstanden die optreden vlak voor extreme neerslag vaak in de natte categorie vallen (zie bijlage B). De invloed van de afhankelijkheid van de grondwaterstand en de neerslag op de resulterende waterstanden komen bij de casestudie van de Heiligenbergerbeek duidelijker naar voren dan bij de Oranjepolder.

4.2.3 Statistiek achteraf

Voor statistiek achteraf is de hele neerslag- en verdampingreeks van de Bilt van 1906-2002 doorgerekend. Het resultaat van de berekeningen is voor elk punt uit de Heiligenbergerbeek een reeks met per dag de op die dag maximaal opgetreden waterstand. Per locatie bestaat het resultaat dan uit een reeks met meer dan 35.000 waterstanden. Voor elk punt kan een waterstand-herhalingstijd grafiek worden opgesteld in overeenstemming met de in paragraaf 3.2 beschreven methodiek.

4.2.4 Resultaten

In Figuur 4.11 is de waterstand-herhalingstijdgrafiek gegeven van knoop 143_4.



Figuur 4.11: Waterstand-herhalingstijdgrafieken van knoop 143_4

In deze grafiek zijn de resultaten van statistiek vooraf en achteraf opgenomen. De rode tijdreeks-lijn zijn de resultaten van de methode 'statistiek achteraf'. De donkerrode lijn. (10 uur b) geeft de resultaten weer als de initiële grondwaterstanden worden afgeleid uit alle grondwaterstanden die berekend zijn met het doorrekenen van een 10-jarige neerslagreeks (1937-1947). Dit betekent dat er een even grote kans is op een hoge

grondwaterstand, als op een middelhoge grondwaterstand en als op een lage grondwaterstand.

De blauwe lijn (10 uur a) geeft de resultaten weer als met afhankelijkheid rekening wordt gehouden. De kans op hoge grondwaterstanden is bij deze berekening veel hoger. De toetsingsresultaten zijn voor vier punten van de Heiligenbergerbeek weergegeven in Tabel 4.4. De norm waaraan getoetst wordt is de norm voor grasland ($T = 10$ jaar).

Tabel 4.4: Toetsingsresultaten voor $T=10$ jaar voor vier punten in de Heiligenbergerbeek (waarden in m +NAP)

	knoop	43_16	75_12	143_4	220_9
Niveau maaiveld		5.30	3.40	2.45	1.95
Peil statistiek vooraf met afhankelijkheid		4.60	3.50	2.70	2.20
Oordeel		Voldoet	Faalt	Faalt	Faalt
Peil statistiek vooraf zonder afhankelijkheid		4.30	3.35	2.15	1.90
Oordeel		Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
Peil statistiek achteraf		4.45	3.30	2.50	2.05
Oordeel		Voldoet	Voldoet	Faalt	Faalt



Figuur 4.12 De Heiligenbergerbeek en de onderzochte locaties

Uit de resultaten blijkt dat het wel of niet in rekening brengen van de afhankelijkheid tussen neerslag en grondwaterstand leidt tot een verschillende beoordeling. Dit werd al voorspeld in paragraaf 3.1.5.

4.3 *Discussie*

Op basis van de twee casestudies waarop de beide methoden zijn toegepast kunnen de twee methodes vergeleken worden.

Het eerste wat opvalt bij het uitvoeren van de twee methodes is dat de methode 'statistiek achteraf' veel eenvoudiger is uit te voeren dan de methode 'statistiek vooraf'. Bij de methode 'statistiek achteraf' staat de invoer voor het watersysteemmodel vast. Dit is namelijk de historische neerslagreeks van 1906-2002.

De methode statistiek 'vooraf' maakt ook gebruik van deze reeks, maar gebruikt deze niet als invoer voor het model. Bij de methode 'statistiek vooraf' dient de historische neerslagreeks als basis voor het creëren van ontwerpsituaties. Met behulp van statistiek worden een aantal stochasten gedefinieerd en gecombineerd tot gebeurtenissen. Bij het definiëren van de stochasten kunnen fouten worden gemaakt. Dit gebeurt als:

1. niet de juiste neerslagduur wordt gekozen. De waterstanden worden onderschat als de waterstanden met een andere neerslagduur dan de maatgevende neerslagduur worden berekend.
2. er geen rekening wordt gehouden met de cross-correlatie tussen neerslag en grondwaterstand.

Tevens worden bij de methode 'statistiek vooraf' onnauwkeurigheden geïntroduceerd die niet aanwezig zijn bij de methode 'statistiek achteraf'. Deze worden veroorzaakt bij het definiëren van de stochasten en het discretiseren van de kansdichtheidsfuncties van deze stochasten. Bij het bepalen van de stochast 'initiële grondwaterstand' wordt de grondwaterstand verdeeld in enkele categorieën terwijl er in werkelijkheid oneindig veel initiële grondwaterstanden zijn. Bij de stochast 'neerslaghoeveelheid' worden ook onnauwkeurigheden geïntroduceerd door het opdelen in categorieën. De hoeveelheid gekozen categorieën bij beide stochasten is subjectief. De keuze van de neerslagpatronen en de toegekende kans van voorkomen is eveneens subjectief, omdat elke bui in feite een ander neerslagpatroon heeft.

Doordat de methode 'statistiek achteraf' als invoer een historische neerslagreeks gebruikt, worden de relaties tussen neerslag en grondwaterstand door het model zelf berekend. Hierdoor is deze methode inzichtelijker en makkelijker uit te leggen dan de methode 'statistiek vooraf'.

Bij vergelijking van de twee methoden valt verder op dat de berekende waterstanden bij de methode 'statistiek achteraf' de berekende waterstanden een maximale herhalingsstijg

van circa 100 jaar hebben. Bij de methode 'statistiek vooraf' zijn de herhalingstijden veel groter. Deze gaan tot wel 10.000 jaar of zelfs nog meer. Dit impliceert dat met de methode 'statistiek achteraf' geen rekening wordt gehouden met processen in het watersysteem die mogelijk zullen optreden bij gebeurtenissen die tot extremere waterstanden leiden dan de berekende gebeurtenissen. Door naast de complete neerslagreeks nog enkele zeer extreme gebeurtenissen door te rekenen worden deze processen wel in beeld gebracht.

Deze processen worden wel berekend met de methode 'statistiek vooraf', maar het effect hiervan wordt teniet gedaan door de onnauwkeurigheid in de herhalingstijden. De methode 'statistiek achteraf' bepaalt waterstanden met grotere herhalingstijden door de berekende waterstanden te extrapoleren. De waterstanden die op deze wijze bepaald worden zijn onzeker voor grote herhalingstijden.

Voor het toetsten van regionale watersystemen zijn deze waterstanden met een zeer grote herhalingstijd echter niet van belang. De herhalingstijden in de normering gaan tot maximaal 100 jaar.

4.4 Samenvatting van de kenmerken van beide methoden

De kenmerken van beide methoden worden hieronder puntsgewijs op een samengevat.

Kenmerken methode 'statistiek vooraf':

- Het is noodzakelijk het om het watersysteem met meerdere neerslagduren door te rekenen om te bepalen welke neerslagduur leidt tot maatgevende waterstanden.
- De correlatie tussen de stochasten neerslag en grondwaterstand wordt verwaarloosd, terwijl die correlatie er wel is. De gevolgen van het verwaarlozen bij positieve correlatie is dat de situatie veiliger voorgesteld wordt dan dat deze in werkelijkheid is.
- Keuze in de discretisatie van de stochast 'neerslagpatroon' en de toegekende kans van voorkomen is subjectief.
- De methode is lastig uit te leggen.
- Waterstanden met zeer grote herhalingstijden worden berekend. Hierdoor wordt het gedrag van extremere gebeurtenissen dan die tot nu toe voorgekomen zijn meegenomen.
- Andere stochasten zoals maalstops en het falen van gemalen kunnen als ze kunnen worden meegemodelleerd als stochast worden toegevoegd.

Kenmerken methode 'statistiek achteraf':

- De methode maakt gebruik van een bestaande, historische neerslagreeks.
- De methode heeft een heldere werkwijze en is daardoor gemakkelijk reproduceerbaar en gemakkelijk uit te leggen.

- Om waterstanden bij zeer grote herhalings tijden te bepalen is een extrapolatie nodig van de berekende waterstanden. Veranderend systeemgedrag bij zeer extreme gebeurtenissen kan hierdoor onopgemerkt blijven, tenzij enkele zeer extreme ontwerpgebeurtenissen worden doorgerekend.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In dit onderzoek is onderzocht wat de methoden statistiek vooraf (stochasten) en statistiek achteraf (tijdreeksen) precies inhouden. Van de waterschappen wordt verwacht dat zij hun systemen eind 2005 getoetst hebben aan de normering. Om dit te kunnen doen moet een keuze voor een bepaalde methode worden gemaakt. Om een verantwoorde keus te maken is het nodig te weten wat de methoden precies inhouden en in hoeverre de resultaten van beide methoden overeenstemmen.

Op basis van het onderzoek worden de volgende conclusies getrokken:

- De methode statistiek vooraf is gecompliceerder en bevat meer aannamen dan de methode statistiek achteraf.
- De rekentijden en benodigde modellen van beide methoden zijn vergelijkbaar.
- Omdat een neerslag en verdampingsreeks van 100 jaar beschikbaar is, is de methode statistiek achteraf goed bruikbaar voor de toetsing aan de NBW werknormen.
- Voor de methode 'statistiek vooraf' moet rekening worden gehouden met de correlatie tussen het neerslagvolume en de grondwaterstand, maar deze is niet bekend. Als deze correlatie wordt verwaarloosd, dan wordt de kans op wateroverlast onderschat. De resultaten van de beide methoden komen hierdoor niet meer met elkaar overeen.
- Voor het toetsen van regionale watersystemen aan de NBW normering blijkt de methode 'statistiek achteraf' het meest eenvoudig toe te passen. In deze methode wordt de correlaties impliciet meegenomen doordat gerekend wordt met langjarige neerslag- en verdampingsreeksen en de bijbehorende grondwaterstanden worden berekend.
- Het gebruik van 'statistiek vooraf' is aantrekkelijk voor studies waarin extreme herhalingstijden een rol spelen (orde 1:1000 tot 10.000 jaar). Hierbij kan worden gedacht aan het effect van maalstops of extreme wind en buitenwaterstanden. Voor deze situaties is een combinatie van beide methoden goed mogelijk, mits de correlaties goed worden ingeschat.

5.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan.

- Het is verstandig om vooraf een keuze te maken voor een methode en ze niet door elkaar te gebruiken, omdat de methoden afwijkende resultaten kunnen opleveren.
- De methode 'statistiek achteraf' is eenduidig en eenvoudig te gebruiken en wordt door veel watershappen toegepast.
- Om met de methode 'statistiek vooraf' goede resultaten te behalen, wordt aanbevolen om de correlatie tussen de stochasten in rekening te brengen en niet te verwaarlozen. Daarnaast wordt aanbevolen om de watersystemen door te rekenen met een neerslagduur die gelijk is aan de kritieke buiduur. Deze kritieke buiduur is per watersysteem verschillend. Voor een uitgebreide analyse dient het watersysteem met verschillende neerslagduren doorgerekend te worden.
- Om bij toepassing van de methode 'statistiek achteraf' inzicht te krijgen in het systeemgedrag bij zeer extreme gebeurtenissen met een herhalingstijd groter dan 100 jaar, wordt aanbevolen om enkele zeer extreme ontwerpgebeurtenissen door te rekenen met een herhalingstijd van orde 1:1000 jaar. Deze gebeurtenissen hebben een onzekere herhalingstijd en dienen alleen om inzicht te krijgen op welke wijze het watersysteem zich gedraagt in geval van een zeer extreme gebeurtenis.

6 Literatuur

- Akker, C. van den, Boomgaard, M.E. (1996); *Hydrologie, handleiding bij het college HE3010*
- Berlemont J., Vaes, G. (2003); *Waarom overstromen rioleringen?*, in: Water Januari 2003
- Bouta, H.D.; Afstudeerverslag (2003). *Operationeel waterkwaliteitsbeheer in het stroomgebied van de Heiligenbergerbeek en het centrum van Amersfoort*
- Brouwer, R (2000); *Waterbeheersing, Dictaat behorende bij het derdejaars college Waterbeheersing*
- Coldwell, R. (2002); *Extreme Value Theory and Applications to Flood Probability Calculations*
- Elliot, William J., Ward, Andrew D. (1995); *Environmental hydrology*
- Goldstein, J.; Mirza, M.; Etkin, D.; and Milton, J. (2003); *Hydrologic assessment: application of extreme value theory for climate extreme scenarios construction*. 83rd Annual Meeting of the American Meteorological Society. 9-13 February 2003, Long Beach, California
- Graaff, de B.; Versteeg, R. (2000); *Wateroverlast, zo goed als zeker*, in: H₂O no.21, 2000 p28-30
- Hoes, ir. O.A.C. (2003); *Statistiek vóóraf of achteraf? Een vergelijkend onderzoek naar de analysemethoden voor het bepalen van overschrijdingskansen van waterstanden*.
- Hoes, ir. O.A.C. Hoes; Strijker, J. (2004); *Extreme neerslaghoeveelheden voor ontwerp buien*, in: H₂O no.7, 2004.
- HKV (2003); *Stochasten HDSR, ten behoeve van de studie wateropgave*; project 677.10.
- HKV (2001); *Afvoer en berging van water in Fryslân, Achtergrondrapport 2: Stochasten*; project 416.20.
- IBO (2004); *Interdepartementaal Beleidsonderzoek Bekostiging Waterbeheer*; Den Haag 2004.
- Katz, R.W.; Parlange, M.B.; Naveau, P. (2002); *Statistics of extremes in hydrology*, in: *Advances in Water Resources* 25 (2002) p1287-1304.
- Kuipers, F., Kok, M., en Vermeulen, C.J.M. (2000); *Modelling of extreme precipitation events in risk analysis of water systems*.
- Kuipers, F. (1999); *Overschrijdingskansen van waterstanden in poldergebieden. Modelleren van neerslag in de stochastenmethode*. Afstudeerverslag UT Twente; rapport Ro032.10.
- Nelen & Schuurmans Consultants (2003); *Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier, Deelrapport 1A: berekeningsprocedure*

- Palutikof, J.P.; Holt, T.; Lister, D.H. (2002); *Methods to calculate extremes in climate change studies.*
- Smit, H. (2003); *Afstudeerrapport. Beoordeling van afwateringstelsels in poldergebieden;* Delft
- Vaes, G. (1999); *The influence of Rainfall and model simplification on combined sewer system design Chapter 2: IDF-relationships and design storms*
- Will Critchley , Klaus Siegert (1991); *A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*
- Waterschap Vallei & Eem (2001), *Kansen, keuzen en coalities; Watervisie voor Waterschap Vallei & Eem*
- Waterschap Vallei & Eem (2003a), *Jaarverslag oppervlaktewater 2002*
- Waterschap Vallei & Eem (2003b), *Ontwerp-Waterbeheersplan Waterschap Vallei & Eem 2004-2007 (Water in Beweging)*

Bijlagen

A.	Voorbeeld methode 'statistiek achteraf'	48
B.	Kansverdeling neerslaghoeveelheid.....	52
C.	Kansverdeling initiële grondwaterstand	54
D.	Neerslagpatronen.....	55
E.	Waterstand-herhalingstijdgrafieken Oranjepolder	56
F.	Waterstand-herhalingstijdgrafieken Heiligenbergerbeek.....	58

A. Voorbeeld methode 'statistiek achteraf'

1. Kiezen van stochasten en een kansverdeling aan elke stochast toekennen

Tabel 6.1: 3 stochasten met hun kansverdeling

Neerslaghoeveelheid		Neerslagpatroon		Initiële grondwaterstand	
N [mm]	T [1/jr]		kans		kans
35	7	patroon 1	0,50	droog	0,33
40	13	patroon 2	0,50	middel	0,33
45	26			nat	0,33
50	51				
55	99				
60	192				
65	370				

2. Het genereren van gebeurtenissen en

3. voor elke gebeurtenis de frequentie van voorkomen bepalen.

Elke gebeurtenis is opgebouwd uit een combinatie van de bovenstaande 3 stochasten. De frequentie waarmee elke gebeurtenis voorkomt bestaat uit het product van de frequentie waarmee een bepaalde neerslaghoeveelheid voorkomt, de kans op een bepaald neerslagpatroon en de kans op een bepaalde initiële grondwaterstand. Dit resulteert in een serie van $7 \times 2 \times 3 = 42$ gebeurtenissen. Deze staan met hun frequentie in de onderstaande tabel.

Tabel 6.2: Gebeurtenissen en hun frequentie

gebeurtenis	hoeveelheid [mm]	patroon	in. gws	frequentie
1	35	1	droog	1/40
2	40	1	droog	1/78
3	45	1	droog	1/155
4	50	1	droog	1/306
5	55	1	droog	1/600
6	60	1	droog	1/1165
7	65	1	droog	1/2240
8	35	2	droog	1/40
9	40	2	droog	1/78
10	45	2	droog	1/155
11	50	2	droog	1/306
12	55	2	droog	1/600
13	60	2	droog	1/1165

14	65	2	droog	1/2240
15	35	1	middel	1/40
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
39	50	2	nat	1/306
40	55	2	nat	1/600
41	60	2	nat	1/1165
42	65	2	nat	1/2240

4. Voor elke gebeurtenis maximale waterstand berekenen met behulp van een watersysteemmodel.

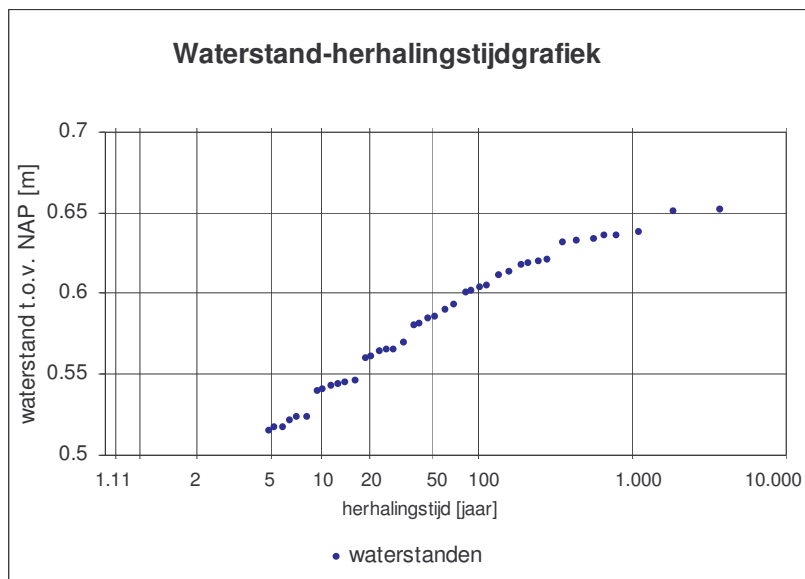
Voor elke gebeurtenis wordt met behulp van een model van het watersysteem een maximale waterstand berekend in een aantal punten in het systeem. In Tabel A.3.a zijn fictieve waterstanden weergegeven in één punt van een watersysteem.

5. Kansverdeling voor extreme waterstanden bepalen

De frequentie waarmee een berekende waterstand voorkomt is gelijk aan de frequentie van de gebeurtenis waarvan deze waterstand het gevolg is. Om tot een waterstand-herhalingstijdgrafiek te komen worden de waterstanden gesorteerd van groot naar klein. De overschrijdingsfrequentie van een bepaalde waterstand wordt verkregen door alle frequenties van de hogere waterstanden op te tellen bij de frequentie van deze waterstand (zie onderstaande tabel).

Tabel 6.3: Berekende waterstanden met hun frequenties

a.			b.		
Gebeurtenis	berekende max. waterstand [m +NAP]	Frequentie	Max. waterstand gesorteerd	Frequentie	Overschrijdings- frequentie
1	0.49315	1/40	0.68148	1/2240	1/2240
2	0.52567	1/78	0.66948	1/2240	1/1120
3	0.55318	1/155	0.65879	1/1165	1/571
4	0.57409	1/306	0.65630	1/2240	1/455
5	0.59833	1/600	0.65630	1/2240	1/378
6	0.62042	1/1165	0.64307	1/1165	1/286
7	0.64259	1/2240	0.64259	1/2240	1/253
8	0.52019	1/40	0.64259	1/2240	1/228
9	0.54901	1/78	0.63832	1/1165	1/190
10	0.57243	1/155	0.63832	1/1165	1/164
11	0.59606	1/306	0.63529	1/600	1/129
12	0.61868	1/600	0.62042	1/1165	1/116
13	0.63832	1/1165	0.62042	1/1165	1/105
14	0.65630	1/2240	0.61940	1/600	1/90
15	0.49315	1/40	0.61868	1/600	1/78
16	0.52567	1/78	0.61868	1/600	1/69
17	0.55318	1/155	0.61125	1/306	1/56
18	0.57409	1/306	0.59833	1/600	1/51
19	0.59833	1/600	0.59833	1/600	1/47
20	0.62042	1/1165	0.59606	1/306	1/41
21	0.64259	1/2240	0.59606	1/306	1/36
22	0.52019	1/40	0.58955	1/306	1/32
23	0.54901	1/78	0.58313	1/155	1/27
24	0.57243	1/155	0.57409	1/306	1/25
25	0.59606	1/306	0.57409	1/306	1/23
26	0.61868	1/600	0.57243	1/155	1/20
27	0.63832	1/1165	0.57243	1/155	1/18
28	0.65630	1/2240	0.56520	1/155	1/16
29	0.49864	1/40	0.55539	1/78	1/13
30	0.53318	1/78	0.55318	1/155	1/12
31	0.56520	1/155	0.55318	1/155	1/11
32	0.58955	1/306	0.54901	1/78	1/10
33	0.61940	1/600	0.54901	1/78	1/9
34	0.64307	1/1165	0.53318	1/78	1/8
35	0.66948	1/2240	0.52567	1/78	1/7
36	0.52328	1/40	0.52567	1/78	1/7
37	0.55539	1/78	0.52328	1/40	1/6
38	0.58313	1/155	0.52019	1/40	1/5
39	0.61125	1/306	0.52019	1/40	1/4
40	0.63529	1/600	0.49864	1/40	1/4
41	0.65879	1/1165	0.49315	1/40	1/4
42	0.68148	1/2240	0.49315	1/40	1/3



Figuur 6.1: Waterstand-herhalingstijdgrafiek

6. Watersysteem toetsen aan de normering

Ten slotte kan het watersysteem getoetst worden aan de normering. Uit de waterstand-herhalingstijdgrafiek kan bij de desbetreffende herhalingstijd (afhankelijk van het grondgebruiktype) de waterstand worden afgelezen. Ligt het maaiveld onder beneden dit peil dan faalt het systeem.

B. Kansverdeling neerslaghoeveelheid

Bij de methode 'statistiek vooraf' wordt gebruik gemaakt van de stochast neerslag hoeveelheid. Voor verschillende neerslagduren kan uit de neerslagreeks van 1906-2002 afgeleid worden met welke herhalingstijd een bepaalde hoeveelheid neerslag voorkomt. Recentelijk is de methode om deze neerslaghoeveelheden te bepalen beschreven in het artikel: '*Extreme neerslaghoeveelheden voor ontwerp buien*' door O.A.C. Hoes en J. Strijker (in *H₂O*, no.7, 2004). Hierin zijn de extreme neerslaghoeveelheden met hun overschrijdingsfrequentie bepaald voor duren van 2 uur tot 10 dagen.

Voor de stochast 'neerslaghoeveelheid' is een frequentieverdeling nodig. De beschikbare overschrijdingsfrequenties moeten dus omgezet worden in frequenties.

De neerslaghoeveelheid wordt opgedeeld in een aantal classes. De frequentie waarmee de waarden binnen een klasse voorkomen, is het verschil van de overschrijdingsfrequenties van de laagste en de hoogste neerslaghoeveelheid van deze klasse. De stochast 'neerslaghoeveelheid' bestaat uit de gemiddelden van deze classes. Aan de hand van een voorbeeld wordt dit duidelijk gemaakt.

Er wordt gekozen om gebeurtenissen van 6 uur samen te stellen, waarbij de neerslaghoeveelheid verdeeld wordt in 6 classes (zie Tabel 6.4).

Tabel 6.4: Voorbeeld stochast 'neerslaghoeveelheid'

klasse	gemiddelde	frequentie
10-15 mm	12,5 mm	o.freq.(10mm)- o.freq.(15mm)*
15-20 mm	17,5 mm	o.freq.(15mm)- o.freq.(20mm)
20-25 mm	20,5 mm	o.freq.(20mm)- o.freq.(25mm)
25-30 mm	27,5 mm	o.freq.(25mm)- o.freq.(30mm)
30-35 mm	32,5 mm	o.freq.(30mm)- o.freq.(35mm)
35-40 mm	37,5 mm	o.freq.(35mm)- o.freq.(40mm)

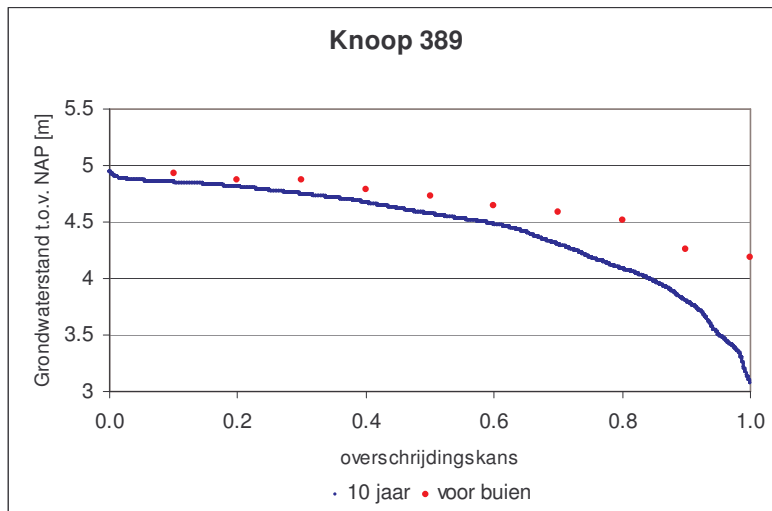
* overschrijdingsfrequentie

In dit onderzoek zijn de volgende kansverdelingen voor het neerslagvolume gebruikt:

6 uur		10 uur	
N [mm]	P	N [mm]	P
35	0.102	35	0.127
40	0.054	40	0.064
45	0.027	45	0.032
50	0.014	50	0.016
55	0.007	55	0.009
60	0.003	60	0.005
65	0.002	65	0.003

14 uur		20 uur	
N [mm]	P	N [mm]	P
40	0.133	45	0.126
45	0.073	51	0.061
50	0.039	57	0.030
55	0.021	63	0.015
60	0.012	69	0.008
65	0.007	75	0.004
70	0.004	81	0.002

C. Kansverdeling initiële grondwaterstand



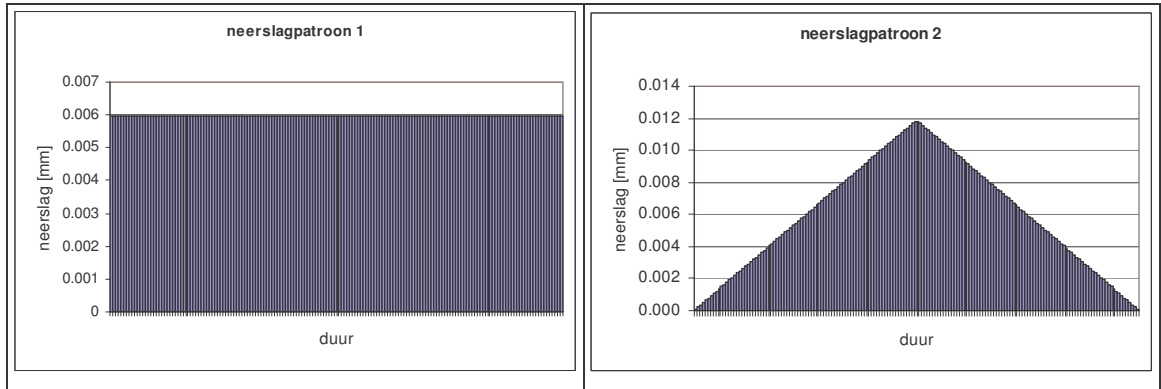
Figuur 6.2: Grondwaterstand-overschrijdingskansgrafiek

Voor de bepaling van de initiële grondwaterstand is een neerslagreeks van 10 jaar doorgerekend met het watersysteemmodel. De berekende grondwaterstanden zijn gesorteerd van groot naar klein en zijn geplot in een grondwaterstand-overschrijdingskansgrafiek (zie Figuur 6.2). Vervolgens zijn de grondwaterstand verdeeld in drie categorieën: droog, middel en nat. De categorie nat bestaat uit de 33% hoogste grondwaterstanden, de categorie uit de 33% laagste grondwaterstanden en de categorie middel uit de overige 33% grondwaterstanden. Van elke categorie is het gemiddelde genomen. Hieruit volgen drie initiële grondwaterstanden met een kans van voorkomen.

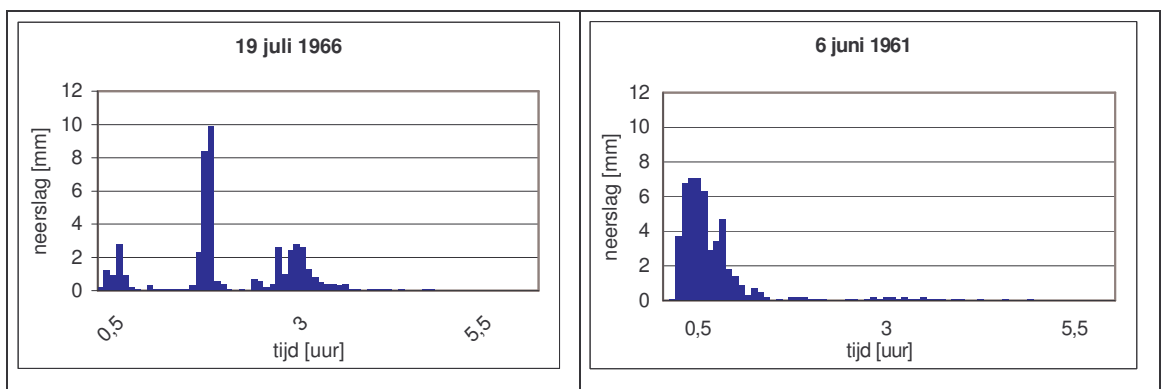
Om de afhankelijkheid tussen grondwaterstand en neerslag mee te nemen. Is gekeken welke grondwaterstand voorkwam bij de tien meest extreme situaties van 10 uur uit de 10-jarige reeks. Dit zijn de tien rode punten in bovenstaande grafiek (Figuur 6.2). Deze grondwaterstanden worden opgedeeld in twee categorieën. Het gemiddelde van elke categorie is een initiële grondwaterstand, beide met een kans van voorkomen van 50%. Deze nieuwe initiële grondwaterstanden zijn hoger dan de oorspronkelijke initiële grondwaterstanden. Dit komt doordat voor extreme buien lage grondwaterstanden niet of bijna niet voorkomen.

D. Neerslagpatronen

In de onderstaande figuren staan de in dit onderzoek gebruikte neerslagpatronen.



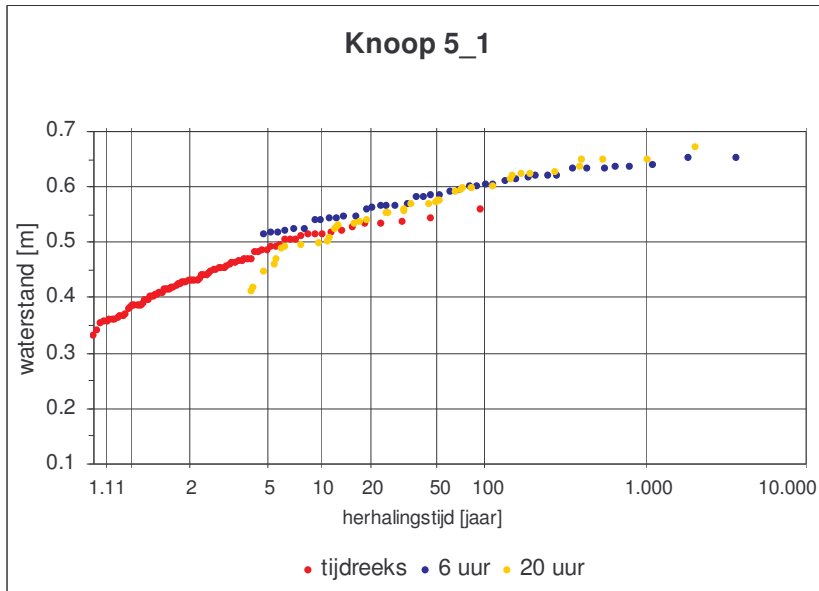
Figuur 6.3: 2 kunstmatige neerslag patronen



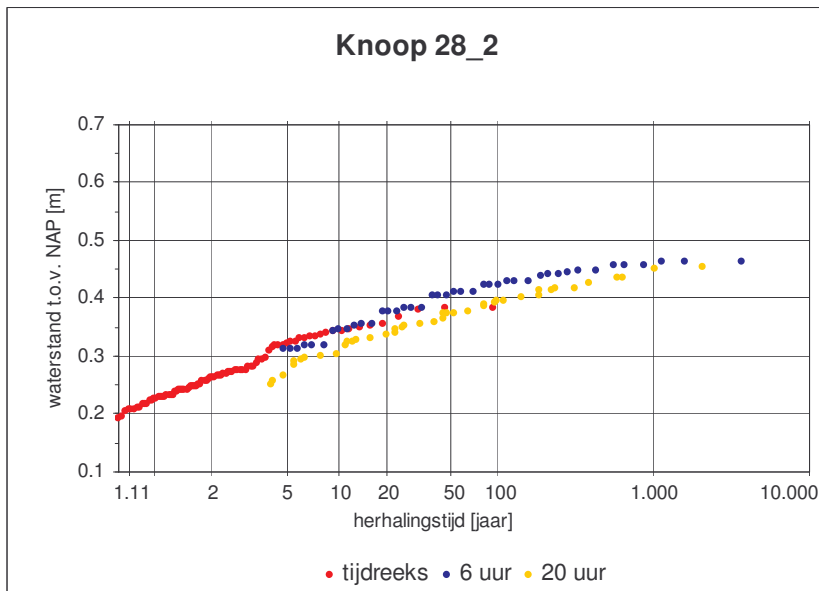
Figuur 6.4: 2 historische neerslagpatronen

E. Waterstand-herhalingstijdgrafieken Oranjepolder

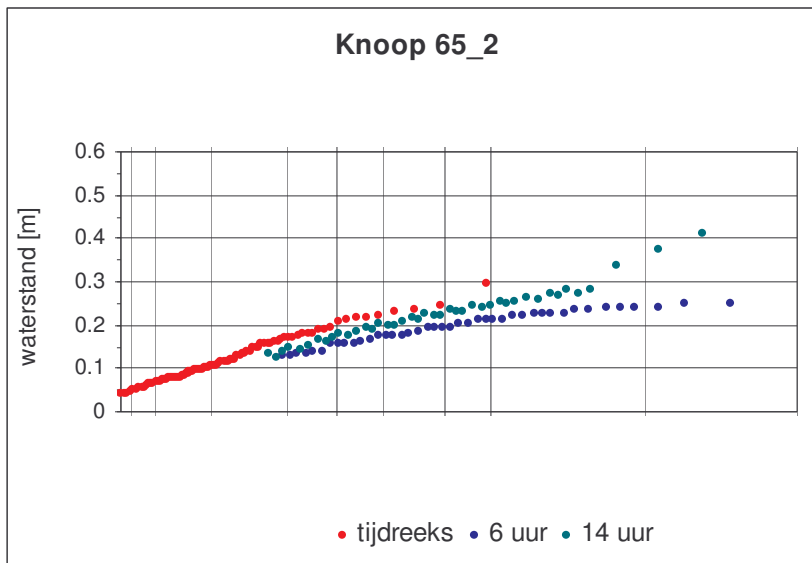
De Waterstand-herhalingstijdgrafiek voor de 4 peilvakken zijn hieronder weergegeven in 4 figuren.



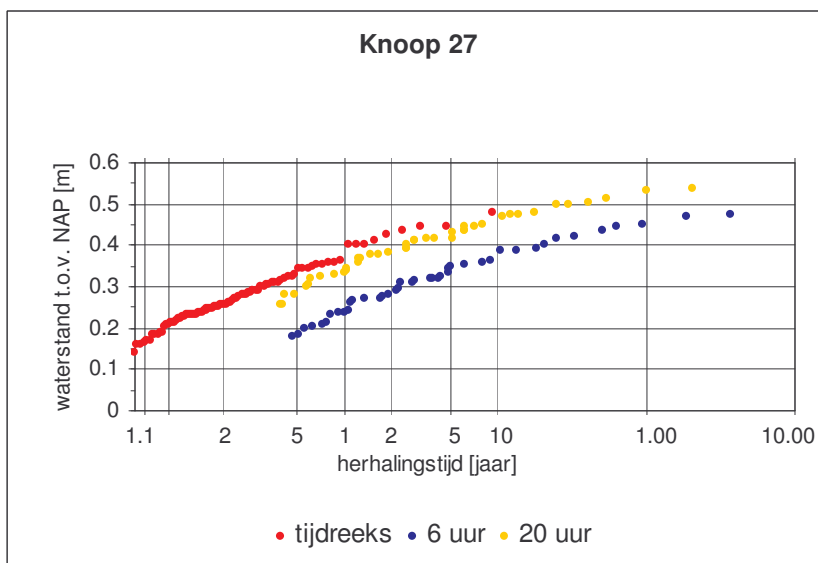
Figuur 6.5: Waterstand-herhalingstijdgrafiek peilvak 1



Figuur 6.6: Waterstand-herhalingstijdgrafiek peilvak 2

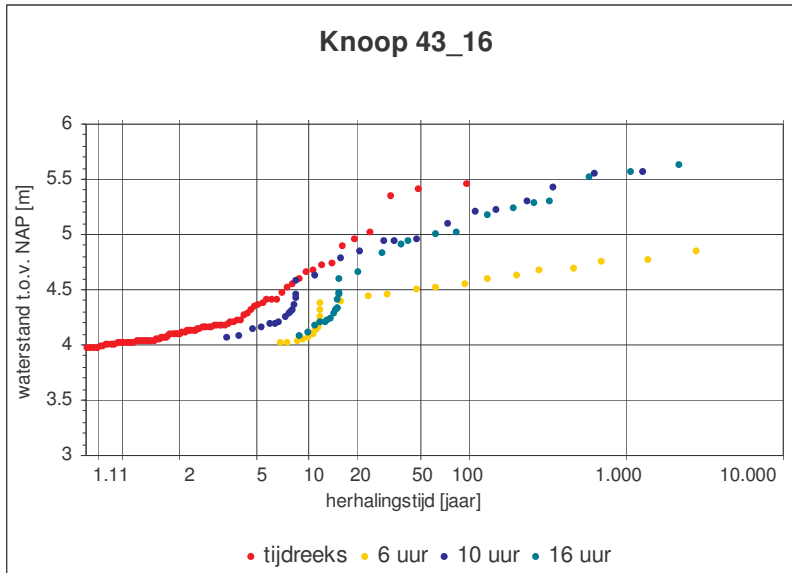


Figuur 6.7: Waterstand-herhalingstijdgrafiek peilvak 3

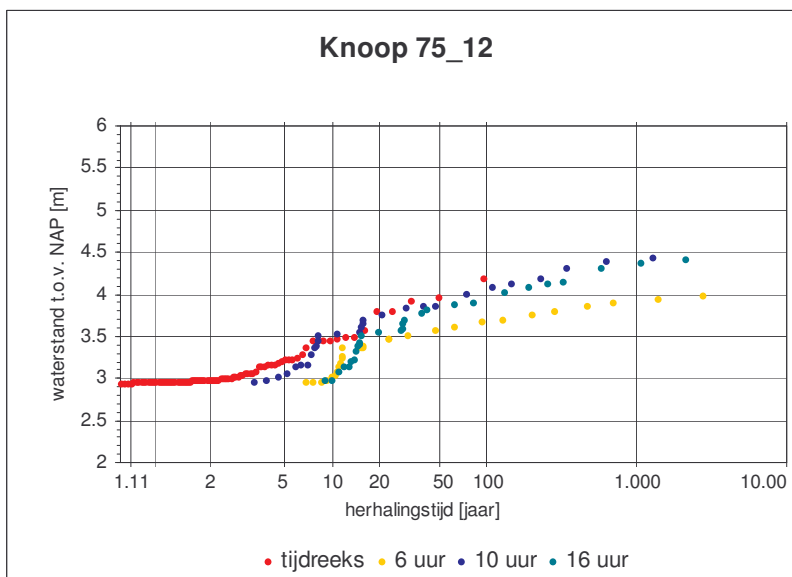


Figuur 6.8: Waterstand-herhalingstijdgrafiek peilvak 4

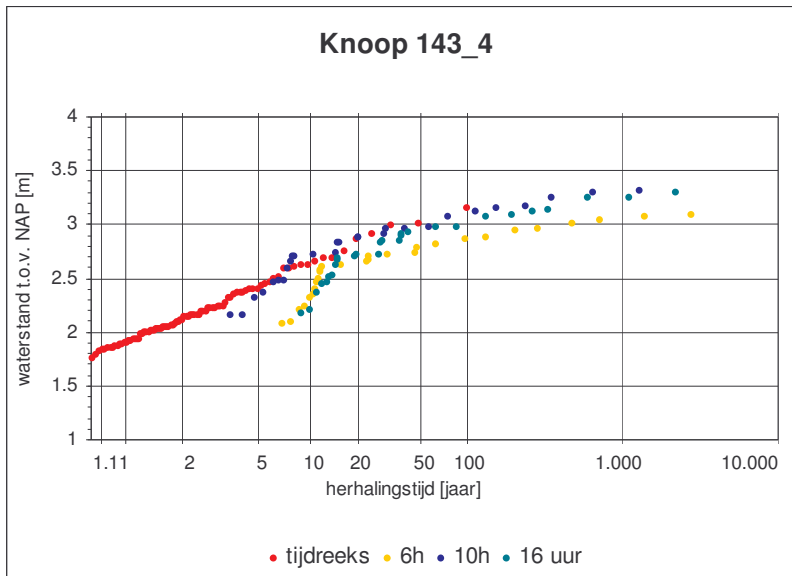
F. Waterstand-herhalingstijdgrafieken Heiligenbergerbeek



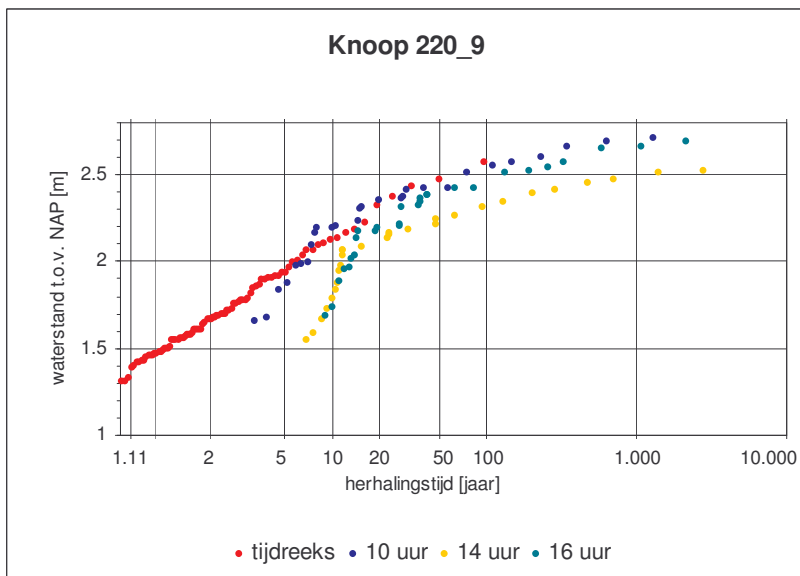
Figuur 6.9: Waterstand-herhalingstijdgrafiek knoop 43_16



Figuur 6.10: Waterstand-herhalingstijdgrafiek knoop 75_12



Figuur 6.11: Waterstand-herhalingstijdgrafiek knoop 143_4



Figuur 6.12: Waterstand-herhalingstijdgrafiek knoop 220_9