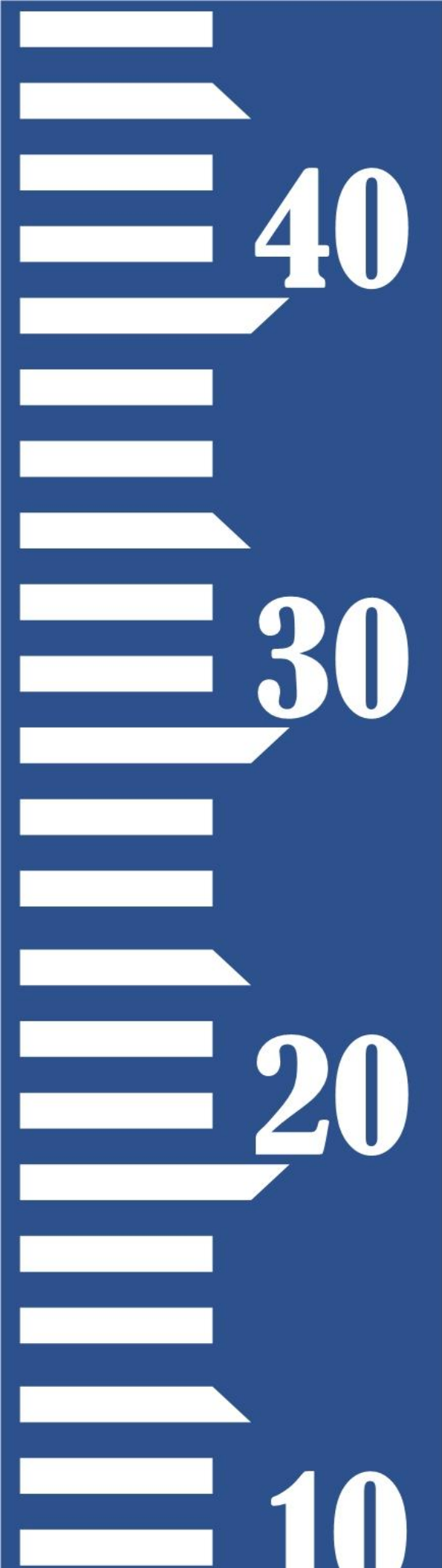




40

Watersysteemanalyse Sallandse Weteringen en Zwolle

Verkennd onderzoek naar mogelijke
waterstandsverlagende maatregelen

30

20

Gert-Ruben van Goor
Afstudeerscriptie Water Engineering & Management
Universiteit Twente – HydroLogic
Augustus 2010

10

UNIVERSITEIT TWENTE.



Colofon

Auteur

G.R.P. van Goor (Gert-Ruben), BSc
Student Water Engineering & Management
Universiteit Twente
g.r.p.vangoor@student.utwente.nl
0031- (0)6 22 11 82 11

Onder begeleiding van

Namens de Universiteit Twente:

Dr. Ir. D.C.M. Augustijn (Denie)
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Opleiding Civiele Techniek
Vakgroep Water Engineering & Management
Horstring W-111
Postbus 217
7500 AE Enschede
Telefoon: 0031- (0)53 489 45 10
d.c.m.augustijn@utwente.nl

Dr. Ir. P.R. van Oel (Pieter)
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Opleiding Civiele Techniek
Vakgroep Water Engineering & Management
Horst Z-129
Postbus 217
7500 AE Enschede
Telefoon: 0031- (0)53 489 39 11
p.r.vanoel@utwente.nl

Namens HydroLogic:

Ir. J. de Graaf (Janneke)
Adviseur Waterbeheer
Hydrologic BV
Stadsring 57
Postbus 2177
3800 CD Amersfoort
Telefoon: 0031- (0)33 475 35 35
janneke.degraaf@hydrologic.nl

Watersysteemanalyse Sallandse Weteringen en Zwolle

Verkenkend onderzoek naar mogelijke waterstandsverlagende maatregelen

Gert-Ruben van Goor
Afstudeerscriptie Water Engineering & Management
Universiteit Twente – Hydrologic bv
Studentnummer: s0099422
Augustus 2010

Voorwoord

“Oh! Daar doet Willem Alexander toch ook iets mee?!”, is een veelgehoorde kreet wanneer ik mensen uitleg wat voor studie ik doe: Water Engineering & Management aan de Universiteit Twente. De mensen die mij vragen naar wat ik doe en vervolgens na het antwoord met bovengenoemde frase reageren, doelen hiermee natuurlijk op onze kroonprins die, zo weten zij, ook iets doet met watermanagement.

Nu moet u niet denken dat ik hier een grote groep mensen (want ja, ik hoor dezelfde verhalen ook van studiegenoten) negatief probeer neer te zetten. Waarschijnlijk komt het meer door ons gebrek om in één à twee zinnen deze mensen uit te leggen wat wij nou precies doen, waar we ons nou precies mee bezig houden. Dit gebrek komt volgens mij niet voort uit een beperkt redeneringsvermogen of het gebrek aan enthousiasme, nee, dat leer je gelukkig nog steeds op een universiteit en met dat enthousiasme zit het ook wel goed. Het is waarschijnlijk te wijten aan de veelzijdigheid van bovengenoemde opleiding, zodat dit simpelweg niet even kort is samen te vatten. Dit maakt de opleiding bijzonder interessant, vooral als je in de breedte bent geïnteresseerd in watergerelateerde onderwerpen, maar tegelijkertijd ook bijzonder lastig te omschrijven.

Dit rapport vormt de eindschrijving van het afstudeeronderzoek ter afronding van de studie Water Engineering & Management aan de Universiteit Twente. Het geeft een goed beeld van de problemen en mogelijke oplossingen waar een civiel ingenieur in de praktijk tegen aan kan lopen.

Ik ben het adviesbureau HydroLogic zeer dankbaar voor het beschikbaar stellen van mijn afstudeerplek. In het bijzonder wil ik mijn begeleider Janneke de Graaf bedanken voor de inhoudelijke begeleiding en de leuke tijd op kantoor. Natuurlijk gaat mijn grote dank ook uit naar Denie Augustijn en Pieter van Oel die, vanuit de vakgroep waterbeheer van de Universiteit Twente, mijn afstuderen hebben begeleid. Dank jullie wel voor de waardevolle ondersteuning.

Verder wil ik mijn vriendin Helen bedanken, zij was het die mij heeft gesteund en gemotiveerd wanneer ik dit even nodig had. Maar vooral dankbaar ben ik voor mijn ouders die dit alles hebben mogelijk gemaakt. Dit werk draag ik op aan mijn moeder, van wie wij dit jaar afscheid hebben moeten nemen. Een zeer moeilijke tijd, waarin ik merkte hoeveel mensen liefdevol om ons heen stonden en nog steeds staan. Ook daarvoor bedankt!

Bunschoten, augustus 2010

Samenvatting (English version included here after)

Aanleiding

De Sallandse Weteringen verzorgen de hoofdafvoer van water uit Salland, een gebied van ongeveer 50.000 ha in het westen van Overijssel. Waar de Soestwetering en Nieuwe Wetering samenkomen, wordt de waterloop het Almeloos kanaal genoemd. Dit kanaal watert via de Zwolse stadsgrachten af op het Zwarte Water dat onder normale omstandigheden in open verbinding staat met het IJsselmeer. Met het gereedkomen van de keersluis bij Zwolle in 2004, is de primaire keerfunctie van de kaden langs de Sallandse Weteringen en de Zwolse grachten komen te vervallen. De kaden zijn in de huidige situatie door de provincie Overijssel aangewezen en genormeerd als regionale keringen. De kaden dienen een waterstand te kunnen keren met een terugkeertijd van 200 jaar (herhalingsfrequentie 1/200 jaar). In 2005 zijn door de Provincie (voorlopige) maatgevende hoogwaterstanden vastgesteld.

Uit een verkennende toetsing van het waterschap Groot Salland (WGS, 2008a) en modelonderzoek, uitgevoerd door Versteeg *et al.* (2008), blijkt dat de kaden langs de Weteringen en stadsgrachten onvoldoende op hoogte zijn om de maatgevende hoogwaterstanden te kunnen keren. Maatregelen zijn nodig zodat de maatgevende hoogwaterstanden veilig gekeerd kunnen worden.

Het doel van dit onderzoek is inzicht verkrijgen in de werking van het watersysteem van de Sallandse Weteringen en Zwolse stadsgrachten onder maatgevende condities en in de effectiviteit van verschillende maatregelen met betrekking tot de vastgestelde veiligheidsnorm.

Systeem- en probleemanalyse

Met behulp van een gekalibreerd 1D hydraulisch Sobek-model van de Weteringen, stadsgrachten en een deel van het Zwarte Water is de werking van het systeem onder maatgevende condities beschreven en is de effectiviteit van maatregelen onderzocht. Als referentiejaar van het model is 2015 genomen waardoor autonome ontwikkelingen in het stroomgebied, tot dat jaar, zijn meegenomen.

In dit onderzoek zijn op basis van het model nieuwe maatgevende hoogwaterstanden afgeleid. Deze hebben een verkennend karakter en zijn gebaseerd op de meest recente hydraulische randvoorwaarden. Verder is er bij de bepaling van de waterstanden geen rekening gehouden met een beperking in de afvoer van de Weteringen. De uitgevoerde toetsing laat zien dat in de huidige situatie de kaden langs de stadsgrachten van Zwolle, het Almeloos kanaal en de Sallandse Weteringen op verschillende locaties niet in staat zijn om de maatgevende hoogwaterstanden te kunnen keren. De uitgevoerde inventarisatie laat zien dat ongeveer 9,3 kilometer aan kaden onvoldoende op hoogte zijn. Tabel 0.1 geeft een overzicht van de opbouw van dit getal. Wanneer voor de stadsgrachten een maximaal toelaatbare waterstand van 1,80 m +NAP wordt aangehouden wordt dit niveau overal langs de grachten overschreden.

Tabel 0.1: Overzicht lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte per waterloop.

	Zwolle	Almeloos kanaal	Nieuwe Wetering	Soestwetering	Totaal
Lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte [m]	3.500	750	1.000	4.000	9.250

Op basis van tijdreeksen van waterstanden op verschillende locaties in het systeem is afgeleid dat de waterstanden in Zwolle voornamelijk worden gedomineerd door het waterstandsverloop op de benedenrand (Vechtmonding). De waterstanden in Zwolle zijn beperkt gevoelig voor de afvoer van de Sallandse Weteringen. Verder bovenstrooms van Zwolle neemt de invloed van de benedenwaterstand af en wordt de bijdrage van de afvoer vanuit het achterland op de hoogwaterstanden groter. Dit kenmerk van het systeem bleek van grote invloed te zijn op de effectiviteit van mogelijke maatregelen. Daarnaast is gebleken dat het Almeloos kanaal een hydraulisch knelpunt vormt binnen het systeem. De beperkte afmetingen van dit kanaal zorgen er voor dat lokaal en verder bovenstrooms de waterstanden fors worden opgestuwd.

Maatregelanalyse

Om het aantal kaden wat niet voldoet zoveel mogelijk terug te brengen zijn verschillende maatregelen opgesteld die tot doel hebben om de hoogwaterstanden op het systeem te verlagen. Expliciet betreft het hier waterstandsverlagende maatregelen; hierdoor vallen niet-structurele/bestuurlijke maatregelen als ook dijkophoging buiten het bereik van dit onderzoek. De volgende maatregelen zijn geselecteerd en meegenomen in de analyse:

1. verlagen en/of vertragen van de piekafvoer op de Vecht;
2. het inzetten van de keersluis bij Zwolle als peilscheiding;
3. bypass om Zwolle;
4. profielverruiming van het Almeloos kanaal;
5. vasthouden van water in het stroomgebied van de Weteringen.

De effectiviteit van de maatregelen in het verlagen van de hoogwaterstanden op het systeem is beoordeeld door het opstellen van een zogenaamde effectiviteitsindicator. Op basis van het verschil tussen de lokale maximale hoogwaterstand en de kruinhoogte van een bepaalde kadesectie is voor zowel het deelsysteem Zwolle/stadsgrachten als voor de Weteringen een dergelijke indicator opgesteld.

De uitgevoerde effectiviteitsbeoordeling ondersteunt een belangrijk kenmerk van het systeem, namelijk dat de afvoer van de Weteringen beperkt van invloed is op het waterstandsverloop in Zwolle. Bovenstrooms op de Weteringen wordt deze invloed groter met het Almeloos kanaal als transitiegebied tussen dominantie van de waterstand op de benedenrand en de afvoer op de Weteringen. Om in Zwolle en langs de Sallandse Weteringen de hoogwaterstanden veilig te kunnen keren, is het nodig om de waterstanden op de Vechtmonding substantieel te verlagen (ca. 50cm) of in te zetten op een combinatie van maatregelen beneden- en bovenstrooms van Zwolle. Het reduceren van de piekafvoer op de Weteringen of een daling (tot ca. 50cm) van het waterstandsverloop op de Vechtmonding alleen blijkt niet voldoende.

Om deze reden is in dit onderzoek ook een analyse uitgevoerd naar de effectiviteit van verschillende combinatiemaatregelen. Tabel 0.2 geeft een overzicht van deze combinatiemaatregelen.

Tabel 0.2: Combinatiemaatregelen.

Naam combinatiemaatregel	Maatregel benedenstrooms	Maatregel(en) bovenstrooms
C1: Compartimentering Zwolle	Inzetten keersluis Zwolle	a) Keringen in Weteringen b) Complete maalstop
C2: Keren en afvoeren	Inzetten keersluis Zwolle	Water vasthouden in het stroomgebied inclusief gemaal bij keersluis
C3 : Verlagen Vechtpiek in combinatie met bovenstroomse maatregelen	Verlagen Vechtpiek	a) Profielverruiming Almeloos kanaal b) Water vasthouden in het stroomgebied

Op dezelfde wijze als voor de individuele maatregelen is de effectiviteit van de combinatiemaatregelen beoordeeld door het toepassen van de effectiviteitsindicator.

Uit de analyse naar de gecombineerde maatregelen blijkt dat alle combinatiemaatregelen kansen bieden in het verlagen van de hoogwaterstanden zodat de keringen langs de stadsgrachten en de Weteringen deze veilig kunnen keren. In het geval van een volledige compartimentering van Zwolle (combinatiemaatregel C1) zal men echter moeten toestaan dat het achterland (frequenter) overstroomt ten behoeve van een lagere overstromingskans in Zwolle. Vanwege de incidentele zeer lage kadehoogten langs het Almeloos kanaal is het aan te bevelen om op deze locaties dijkophoging toe te passen. Aangehouden is dat maatregelen bovenstrooms en benedenstrooms van Zwolle nodig (en in staat) zijn om de hoogwaterstanden op het systeem, onder maatgevende condities, effectief te verlagen.

Summary

Background

The Soestwetering and Nieuwe Wetering are streams that drain the catchment area of Salland, an area of approximately 50.000 ha in the west of the province of Overijssel, in the Netherlands. That is why they are also called the 'Sallandse Weteringen' (streams of Salland). From the point where the two streams meet the stream is called the 'Almeloos kanaal' (canal of Almelo). Flowing through the canals of Zwolle the 'Almeloos kanaal' discharges into the Zwarte Water river and ultimately into lake IJssel. With the completion of the flood defence barrier just downstream of Zwolle the design conditions of dikes along the canals and the Sallandse Weteringen changed. The design water levels lowered, and the status of the dikes could be changed from primary flood defences into so called regional (or secondary) flood defences. The provincial government of Overijssel officially classified the dikes as being regional flood defences and set a safety norm which states that the dike must be able to hold back water levels with return period of 200 years (frequency 1/200 years).

A test by the regional water board in 2008 (WGS, 2008a) and a model study, dating from the same year (Versteeg *et al.*, 2008), showed that at several locations the dikes along the Sallandse Weteringen and canals were not sufficiently high enough to safely turn the design water levels. Measures are necessary to reduce the chance of flooding.

This study aims to understand the working of the Sallandse Weteringen and de canals during design conditions and analyse the effectiveness of different measures in relation to the safety norm set.

Problem definition and systems analysis

Using a 1-dimensional hydraulic Sobek model of the Weteringen, canals and a part of the Zwarte Water river some characteristics of the regional water system and the effectiveness of different measures, aimed to reduce the design water levels, are analysed. The baseline of the model is the year 2015, autonomous developments until 2015 are therefore incorporated in the model.

In this research new design water levels are determined using the hydraulic model. These (unofficial) design water levels are based on the latest hydraulic boundary conditions and insights. A possible physical limitation in the discharge of the Weteringen is not accounted for. Comparing the design water levels with the height of the dikes along the Weteringen and canals shows that in the current situation a large number of dike sections are too low. The analysis shows that approximately 9.3 kilometres of dikes are not at the required height. Table 0.3 gives an overview of the build-up of this number.

Table 0.3: Overview of length of dikes with insufficient height.

	Zwolle	Almeloos kanaal	Nieuwe Wetering	Soestwetering	Total
Length of dikes with insufficient height [m]	3,500	750	1,000	4,000	9,250

When a maximum allowable water level of 1,80 m +NAP is used for the city canals of Zwolle it can be concluded that all along the canals this level is exceeded by the design water levels.

Time series of water levels at different point along the Weteringen and canals shows that the water levels in the city of Zwolle are predominately influenced by the downstream water levels (at the mouth of the Vecht river). The water levels in Zwolle are only slightly influenced by the discharge coming from the upstream Weteringen. Upstream of Zwolle the influence of the water levels on the downstream boundary gradually decreases, here the discharge of the Weteringen becomes ever more dominant. This systems characteristic is very important in the effectiveness of possible measures. Furthermore it has been proved

that the Almeloos kanaal forms a bottleneck within the water system. De limited dimensions of the canal cause the water levels to rise significantly, locally as well as further upstream.

Analysis of possible measures

Different measures have been drawn up in order to lower the design water levels and thus reducing the number of dike sections that are too low. The measures analysed in this study have the explicit aim to reduce the water levels; non-structural measures as well as dike reinforcing measures therefore lie beyond the scope of this research. The following measures are analysed:

1. lowering and delaying the peak discharge on the Vecht river;
2. changing the opening and closing algorithms of the flood defence barrier in Zwolle;
3. bypass the Weteringen around Zwolle;
4. widening and/or deepening of the Almeloos kanaal;
5. retaining water in the catchment area.

The effectiveness of these different measures is judged by the application of a so called effectiveness-indicator. Based on the relative difference between local design water levels and dike heights a indicator has been set up for both the canals in Zwolle and the Weteringen (including Almeloos kanaal).

The indicator scores support a distinct characteristic of the water system as described above, namely that the water levels in Zwolle are dominated by the water levels occurring downstream and that they are only slightly influenced by the discharge on the Weteringen. Further upstream the influence of this discharge on the water levels becomes greater. In order to comply with the safety norm (dikes should hold back water with a return period of 200 years) it is necessary to substantially reduce the water levels at the mouth of the Vecht river (downstream boundary condition in model) with as much as 50 cm. Alternatively a combination of measures can be implemented. Just reducing the peak discharge on the Weteringen or a relatively minor lowering of the downstream water levels (up to 50 cm) is not sufficient.

For this reason the set of measures, as shown above, are combined and analysed. Table 0.4 shows the different combinations made.

Table 0.4: Combination of measures.

Combination name	Measure downstream	Measure(s) upstream
C1: Compartmentalisation of Zwolle	Incorporating flood defence barrier in the city of Zwolle	a) Additional barriers in Weteringen b) Complete elimination of discharge
C2: Barrier and discharge	Incorporating flood defence barrier in the city of Zwolle	Retaining water in the catchment area & pumping station at barrier
C3 : Reducing peak discharge on Vecht river in combination with upstream measures.	Reducing peak discharge in Vecht river (lowering downstream water levels)	a) Widening/deepening Almeloos kanaal b) Retaining water in catchment area

In the same way as was done for the individual measures, the effectiveness of these combinations is analysed using the effectiveness-indicator. From this analysis it shows that all the combined measures have the potential to reduce the design water levels in such a way that virtually all dikes can hold back the water safely. In the case of the compartmentalisation-measures (C1 in table 0.4) it should be allowed for that upstream of Zwolle land will be (more frequently) flooded. Due to the fact that along the Almeloos kanaal some dikes are extremely low it can be considered that at these places dike heightening is an effective measure. In this study it has been shown that a combination of measures, upstream and downstream, of Zwolle, is necessary and able to effectively reduce the design water levels.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	i
Samenvatting.....	ii
Summary.....	iv
Lijst van figuren en tabellen	ix
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doelstelling	3
1.3 Werkwijze	4
1.4 Randvoorwaarden en uitgangspunten	5
1.5 Leeswijzer	6
2 Sallandse Weteringen en stadsgrachten Zwolle.....	7
2.1 Gebiedsbeschrijving.....	7
2.1.1 Historie.....	7
2.1.2 Stroomgebied van de Sallandse Weteringen	8
2.1.3 Keringen: Ramspol en keersluis Zwolle.....	10
2.1.4 Maatgevende condities.....	10
2.2 Modellerings.....	11
2.2.1 Neerslag-afvoer model.....	11
2.2.2 Het Stromingsmodel	12
2.3 Hoogwateranalyse op basis van modellering	13
2.3.1 Piekafvoeren en waterstandsverloop	13
2.3.2 Bijdrage afvoer Weteringen aan hoogwaterstanden in Zwolle	15
3 Probleemanalyse	16
3.1 Normering Sallandse Weteringen en stadsgrachten Zwolle.....	16
3.2 Hoogwaterstanden	16
3.3 Toetsing	17
4 Maatregelselectie	20
4.1 Workshop: opstellen van de maatregelen.....	20
4.2 Screening	21
4.3 Analyse individuele maatregelen.....	22
4.3.1 Effectiviteitsindicator	22
4.3.2 Verlagen/vertragen Vechtpiek (A1)	24
4.3.3 Wijzigen sluiting- en openingsalgoritme keersluis Zwolle (A2).....	25
4.3.4 Bypass Zwolle (B1)	26
4.3.5 Profielverruiming Almeloos kanaal (B2).....	28
4.3.6 Vasthouden van water in het achterland (B3)	30
4.4 Deelconclusie individuele maatregelen	32
5 Analyse combinatiemaatregelen	34
5.1 Compartimentering Zwolle (C1)	34
5.1.1 Zwolle afsluiten door middel van keringen.....	35
5.1.2 Keersluis in combinatie met complete maalstop	36
5.2 Keren en afvoeren (C2)	37
5.3 Verlagen Vechtpiek in combinatie met bovenstroomse maatregelen (C3).....	38
5.3.1 Lagere benedenrand en profielverruiming Almeloos kanaal.....	38
5.3.2 Lagere benedenrand en vasthouden water bovenstrooms.....	39

5.4 Deelconclusie combinatiemaatregelen	39
6 Discussie	42
7 Conclusies en aanbevelingen.....	44
7.1 Conclusies	44
7.2 Aanbevelingen	45
Referenties	48
Bijlagen	50

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

Figuur 1.1	Afvoersysteem van de Sallandse Weteringen. Direct benedenstrooms van de stadsgrachten ligt de keersluis die de vroegere dijkkring 53 aanzienlijk verkort heeft.
Figuur 1.2	Hoogwatersituatie tijdens de extreem natte periode in het najaar van 1998. Links hoogwater op de Weteringen (uit Grontmij Projectbureau DAR, 2001) en rechts de stadsgrachten van Zwolle tijdens het hoogwater van 1998 (uit WGS, 2005).
Figuur 1.3	Het onderzoeksmodel.
Figuur 2.1	Verandering van de afwatering van Salland (bewerkt uit Grontmij Projectbureau DAR Zwolle, 1997).
Figuur 2.2	Bord in het gebied rond landgoed Den Alerdinck die de locatie van de oude zeedijk aangeeft. (foto: auteur, 22 september 2009)
Figuur 2.3	Stroomgebied van de Sallandse Weteringen. (bewerkt uit Versteeg <i>et al.</i> , 2008)
Figuur 2.4	Fotocollage Sallandse Weteringen met Langeslag, stuw Wijhe en Gerenvonder. (foto's: auteur, 22 september 2009)
Figuur 2.5	Neerslag-afvoer model van het stroomgebied van de Sallandse Weteringen.
Figuur 2.6	Stromingsmodel van de Sallandse Weteringen met daarin opgenomen een schematisatie van de waterlopen en kunstwerken.
Figuur 2.7	Totale afvoerloop van de Sallandse Weteringen zoals gemodelleerd in het stromingsmodel.
Figuur 2.8	Waterstandverloop op de benedenstroomse rand, de Vechtmonding. Piek (1,87m +NAP) en golfvorm zijn afgeleid uit HR2006.
Figuur 2.9	Tijdreeksen van waterstanden op de waterlopen.
Figuur 3.1	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden op de Zwolse stadsgrachten en Sallandse Weteringen bij een herhalingsfrequentie van 1/200 jaar.
Figuur 3.2	Lengteprofiel van waterstanden op de Zwolse stadsgrachten, Almeloos kanaal, de Soestwetering en de Nieuwe wetering (frequentie 1/200 jaar) en de laagste kadehoogten per kadevak.
Figuur 3.3	Het verschil tussen de laagste kadehoogten per kadevak en de optredende hoogwaterstanden (frequentie 1/200 jaar, inclusief waakhogte).
Figuur 3.4	Vergelijking hoogwaterstanden en kadehoogten aan weerszijden van de waterlopen.
Figuur 4.1	Schematisch overzicht voorgestelde maatregelen.
Figuur 4.2	Voorbeeld bij de effectiviteitsindicator.
Figuur 4.3	Lengteprofiel hoogwaterstanden bij gesloten keersluis (sluitpeil 1,70m +NAP) met en zonder overloop.
Figuur 4.4	Overzicht waternoodsystematiek.
Figuur 5.1	Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij verschillende compartimenteringsvarianten.
Figuur 5.2	Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij gesloten kering Zwolle (sluitpeil 1,70m +NAP) en complete maalstop.
Figuur 5.3	Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij gesloten keersluis (sluitpeil 1,70m +NAP) beperkte afvoer Weteringen (56m ³ /s) en gemaal bij keersluis met verschillen pompcapaciteiten.
Figuur 5.4	Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij een lagere Vechtwaterstand en verschillende profielverruiming van het Almeloos kanaal.
Figuur 5.5	Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij een verlaagde Vechtwaterstand en afvoer op de Weteringen van 56m ³ /s en 68m ³ /s.
Figuur B1.1	Neerslagsom periode hoogwater 1998.
Figuur B3.1	Terugkeertijden van waterstanden zoals bepaald met HYDRA-VIJ, invloed van wind en Vechtafvoer op de waterstanden op het Zwarte Water. (uit Versteeg <i>et al.</i> (2008))
Figuur B5.1	Resultaten kalibratie neerslag-afvoer model.
Figuur B7.1	Locatie met de lage kadehoogte (1,63m +NAP) langs het Almeloos kanaal.
Figuur B7.2	Coupure in de zuidelijke kade langs het Almeloos kanaal met daarvoor de houten schutbalken.
Figuur B7.3	Oude en nieuwe kade langs het Wipstrikpark.
Figuur B10.1	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij verschillende verlagingen van de waterstand op de Vechtmonding.
Figuur B10.2	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij het vertragen/versnellen van de afvoerpiek op de Vecht.
Figuur B10.3	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij twee bypass-varianten op de Vecht.
Figuur B10.4	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij een gemaal nabij Gerenvonder met verschillende pompcapaciteiten.
Figuur B10.5	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij een verbreding van het Almeloos kanaal.

Figuur B10.6	Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij een verdieping van het Almeloos kanaal.
Figuur B10.7	Lengteprofiel van waterstanden bij verschillende piekafvoeren op de Sallandse Weteringen.
Figuur B11.1	Terugkeertijden van afvoeren op de Vecht ter hoogte van Dalfsen (bewerkt uit Geerse, 2006).
Figuur B11.2	Correlatie tussen Vecht- en IJsselafoeren (bewerkt uit Geerse, 2006).
Figuur B11.3	Terugkeertijden van afvoeren op de IJssel bij Olst (bewerkt uit Geerse, 2006).
Figuur B12.1	Tijdreeksen van waterstanden op het Almeloos kanaal (locatie Gerenvonder).
Figuur B13.1	Lengteprofiel van hoogwaterstanden in het geval van gesloten keersluis bij Zwolle en geringe afvoer op de Weteringen.
Figuur B14.1	Hoogtekaart van Zwolle in drie klassen (rood/donker is lager gelegen dan 1,80m +NAP).
Figuur B15.1	Waterstandsverloop Vechtmonding 1877-1958.

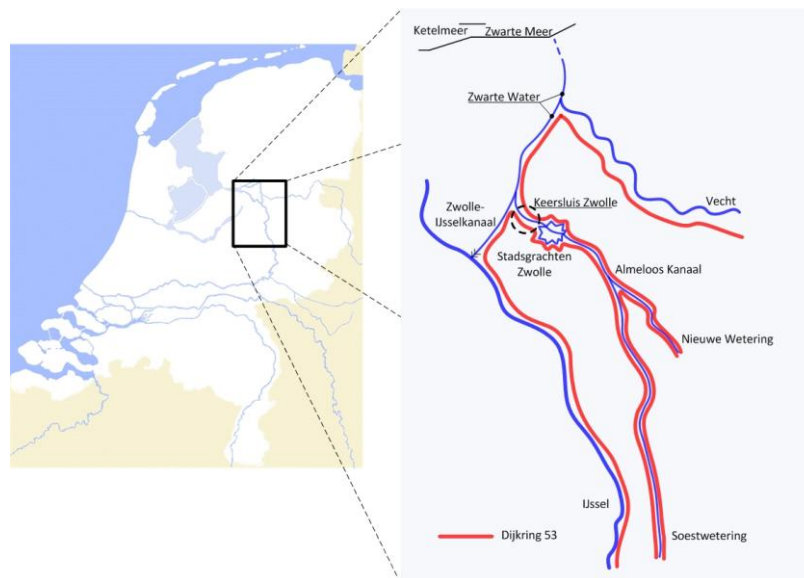
Lijst van tabellen

Tabel 0.1	Overzicht lengte aan kaden met onvoldoende kruinhoogte (samenvatting).
Tabel 0.2	Overzicht combinatiemaatregelen (samenvatting).
Tabel 0.3	Overview of length of dikes with insufficient height (English summary).
Tabel 0.4	Combination of measures (English summary).
Tabel 3.1	Overzicht lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte per waterloop.
Tabel 4.1	Schaalverdeling van de effectiviteitsindicator. Het nulpunt is gerelateerd aan de huidige situatie.
Tabel 4.2	Hoogwaterstanden voor geselecteerde locaties bij het verlagen van de afvoerpiek op de Vecht.
Tabel 4.3	Hoogwaterstanden voor geselecteerde locaties bij het vertragen/versnellen van de afvoerpiek op de Vecht.
Tabel 4.4	Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij twee bypass-varianten op de Vecht.
Tabel 4.5	Hoogwaterstanden voor geselecteerde locaties bij verschillende pompcapaciteiten van eenemaal nabij Gerenvonder.
Tabel 4.6	Hoogwaterstanden voor geselecteerde locaties bij een verbreding van het Almeloos kanaal.
Tabel 4.7	Hoogwaterstanden voor geselecteerde locaties bij een verdieping van het Almeloos kanaal.
Tabel 4.8	Hoogwaterstanden voor geselecteerde locaties bij verschillende afvoeren op de Sallandse Weteringen.
Tabel 4.9	Overzicht score op de effectiviteitsindicator van de verschillende individuele maatregelen.
Tabel 5.1	Voorgestelde combinatiemaatregelen.
Tabel 5.2	Overzicht score op de effectiviteitsindicator van de verschillende combinatiemaatregelen.
Tabel 7.1	Overzicht lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte per waterloop.
Tabel B2.1	Maatgevende hoogwaterstanden Vechtmonding en Weteringen bij combinaties van wind, afvoeren en IJsselmeerpeil.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De Sallandse Weteringen verzorgen de hoofdafvoer van water uit Salland, een gebied van ongeveer 50.000 ha in het westen van Overijssel. Waar de Weteringen samenkomen, wordt de waterloop het Almeloos kanaal genoemd. Dit kanaal watert via de Zwolse stadsgrachten af op het Zwarte Water. Na samenvloeiing met de Vecht voert het Zwarte Water uiteindelijk af op het Zwarte Meer. Dit meer staat via het Ketelmeer in verbinding met het IJsselmeer. In figuur 1.1 is dit stelsel van waterlopen schematisch weergegeven. Tot 2004 maakten de kaden langs de Weteringen en grachten onderdeel uit van dijkkring 53, deze dijkkring moest het gebied van Salland beschermen tegen hoog buitenwater. Doordat zij officieel onderdeel waren van deze dijkkring hadden de kaden langs de Weteringen en stadsgrachten een primaire keerfunctie. Dit wil zeggen dat zij dezelfde veiligheid tegen overstromen moesten bieden als de dijken langs de grote rivieren zoals de Rijn en IJssel. In 2004 is de primaire keerfunctie van de kaden langs de Sallandse Weteringen en Zwolse grachten komen te vervallen. Zij zijn, door een wijziging in de Wet op de Waterkering, aangemerkt als regionale keringen (zie Staatsblad, 2004). Reden hiervoor vormde het besluit tot verkorting van dijkkring 53 door het realiseren van een keersluis in Zwolle. Deze keersluis is in 2004 operationeel geworden en dient om Zwolle en het achterland te beschermen tegen hoge waterstanden op het Zwarte Water. Aanzet voor deze keuze vormde de realisatie van de balgstuwkering Ramspol in 2002. Dit had tot gevolg dat ongeveer 115 kilometer dijk in het gebied achter de balgstuw, tussen Zwartsluis en Wijhe, slechts beperkt verbetering behoeft. De kering bij Ramspol heeft tot primair doel om bij een zware storm vanuit het noordwesten de instroming van water uit het Ketelmeer naar het Zwarte Meer te voorkomen. Deze instroming wordt veroorzaakt door opstuwing van het water op het IJsselmeer en Ketelmeer richting noordwest Overijssel. Sluiting van de Ramspol kering onder deze omstandigheden leidt daardoor tot lagere waterstanden op het Zwarte Meer, het Zwarte Water, de Overijsselse Vecht, in de grachten van Zwolle en de Sallandse Weteringen. Parallel aan de voorbereidingen van de balgstuw liep het project Dijkverbetering Achter Ramspol (DAR). Dit zogenaamde DAR-project had tot doel om de waterkeringen achter de balgstuw op orde te krijgen conform de Wet op de Waterkering uit 1996. Voor Zwolle en het achterland vormde het besluit tot verkorting van dijkkring 53, door het realiseren van de keersluis in Zwolle, de laatste schakel van het omvangrijke DAR-project.



Figuur 1.1: Afvoersysteem van de Sallandse Weteringen. Direct benedenstrooms van de stadsgrachten ligt de keersluis die de vroegere dijkkring 53 aanzienlijk heeft ingekort.

Voor regionale keringen geldt dat de Provincie verantwoordelijk is voor het normeren van de keringen. Het waterschap Groot Salland (WGS) is als waterkeringbeheerder verantwoordelijk voor de aanleg en het beheer en onderhoud van de regionale keringen in haar beheergebied. In 2005 heeft de Provincie Overijssel de normering voor de Sallandse Weteringen vastgesteld en hierbij voorlopige maatgevende hoogwaterstanden bepaald (Tienstra, 2005). Op basis van deze gegevens heeft het waterschap een verkennende veiligheidsbeoordeling uitgevoerd waaruit blijkt dat een deel de kaden langs de Sallandse Weteringen en de stadsgrachten van Zwolle niet op orde zijn. De uitgevoerde inventarisatie laat zien dat bij ongeveer 9,9 km aan kade de kruinhoogte te laag is om de maatgevende hoogwaterstanden te kunnen keren (WGS, 2008a). Dit komt neer op ongeveer 25% van de kaden langs de Sallandse Weteringen en de stadsgrachten. Ook recent uitgevoerd modelonderzoek, in opdracht van Waterschap Groot Salland, waarin een voorverkenning is uitgevoerd naar de hoogwaterstanden op de Weteringen en grachten laat zien dat de kaden niet op hoogte zijn om de gesimuleerde hoogwaterstanden te kunnen keren (zie Versteeg *et al.*, 2008).

Dat hoogwaters een serieuze dreiging kunnen vormen voor Zwolle en het achterland werd duidelijk in het najaar van 1998. Dit najaar kende enkele perioden met zeer hoge neerslag hoeveelheden met een sterke ruimtelijke variatie, zoals te zien is in bijlage B1. Dit leidde lokaal tot veel wateroverlast in het regionale watersysteem, zo ook in Salland. Het water stond dermate hoog dat bovenstrooms van Zwolle een graafmachine gereed stond om hier de kade door te breken om Zwolle te beschermen. Hoewel dit achteraf niet nodig bleek, kon men spreken van een dreigende situatie (zie figuur 1.2). Tijdens de hoogwaterperiode van 1998 is als hoogste waterstand in Zwolle een peil genoteerd van 1,53m +NAP. De hoogwaterstanden leidden in Zwolle nauwelijks tot overlast terwijl de situatie op de Weteringen als meer risicovol werd beschouwd (Grontmij Projectbureau DAR, 2001). Naast hoge waterstanden op de Weteringen en stadsgrachten kon in de vlakke benedenstroomse gebieden het water niet snel genoeg worden afgevoerd, met als resultaat ondergelopen polders. Water stroomde van de hoger gelegen gebieden, in het oosten en westen van het stroomgebied, over land naar de lager gelegen benedenstroomse gebieden ten zuiden van Zwolle. Hierbij vielen de grenzen van de deelstroomgebieden weg. De schade aan boeren- en tuindersbedrijven in de provincie Overijssel werd geraamd op circa 180 miljoen gulden (ANP, 1998). Er wordt geschat dat de situatie zoals die zich voordeed in 1998 een 1/80 tot 1/100 jaar situatie betrof (vraaggesprek H. Tienstra (provincie Overijssel) en C. Griffioen (WGS)).



Figuur 1.2: Hoogwatersituatie tijdens de extreem natte periode in het najaar van 1998. Links hoogwater op de Weteringen (uit Grontmij Projectbureau DAR, 2001) en rechts de stadsgrachten van Zwolle tijdens het hoogwater van 1998 (uit WGS, 2005).

De verkennende veiligheidsbeoordeling van het Waterschap (WGS, 2008a) en de daarop volgende modelstudie (Versteeg *et al.*, 2008), geven aan dat de kaden langs de Sallandse Weteringen en Zwolse grachten onder maatgevende omstandigheden niet voldoen. Deze studies wijzen erop dat in de huidige situatie de kadehoogten onvoldoende op hoogte zijn om de optredende hoogwaterstanden te kunnen keren. Er wordt niet voldaan aan de vastgestelde veiligheidsnorm en het is aannemelijk dat met het veranderende klimaat en neerslagpatronen, met meer neerslag in de winter, dit probleem in de toekomst zal verergeren (zie KNMI, 2006).

1.2 Doelstelling

Een probleem kan gedefinieerd worden als het verschil tussen een huidige situatie en de gewenste situatie. Verschillende studies wijzen uit dat in de huidige situatie de kaden langs de Weteringen en de stadsgrachten van Zwolle niet voldoen aan de vastgestelde veiligheidsnorm tegen overstromen. Op meerdere locaties is de kruinhoogte niet toereikend om de hoogwaterstanden¹ veilig te kunnen keren. De doelstelling verwoordt hoe dit onderzoek zal bijdragen aan het oplossen dan wel verkleinen van de kloof tussen de huidige en de gewenste situatie. De gewenste situatie is hierin gedefinieerd als de situatie waarin de hoogwaterstanden in Zwolle en verder bovenstrooms op de Weteringen veilig kunnen worden gekeerd. De doelstelling van dit onderzoek luidt als volgt:

Het doel van dit onderzoek is inzicht verkrijgen in de werking van het watersysteem van de Sallandse Weteringen en Zwolse stadsgrachten onder maatgevende condities en in de effectiviteit van verschillende maatregelen met betrekking tot de vastgestelde veiligheidsnorm.

Deze tweeledige doelstelling geeft aan dat het binnen dit onderzoek belangrijk wordt geacht om allereerst een verdiepend inzicht te verkrijgen in de werking van het watersysteem voordat mogelijk te nemen maatregelen worden opgesteld en geanalyseerd. Door inzicht te verschaffen in de werking van het systeem komen mogelijke knelpunten en/of factoren aan het licht die een bepalend aandeel kunnen vormen binnen de hoogwaterproblematiek. Adequate kennis van het systeem is dan ook een vereiste om zinvolle maatregelen op te stellen en te analyseren. De volgende onderzoeksvragen zijn opgesteld om het proces tot het volbrengen van de doelstelling te stroomlijnen.

Onderzoeksvraag 1:

In welke mate en op welke locaties, voldoen de kaden langs de Weteringen en stadsgrachten niet aan de vastgestelde veiligheidsnorm?

Onderzoeksvraag 2:

Welke factoren/knelpunten dragen bij aan hoge waterstanden op de Weteringen en stadsgrachten?

Onderzoeksvraag 3:

Welke (innovatieve) waterstandsverlagende maatregelen kunnen mogelijk worden ingezet om het probleem te mitigeren dan wel weg te nemen?

Onderzoeksvraag 4:

Hoe effectief zijn deze maatregelen in het verlagen van de hoogwaterstanden op de Weteringen en stadsgrachten?

Onderzoeksvraag 5:

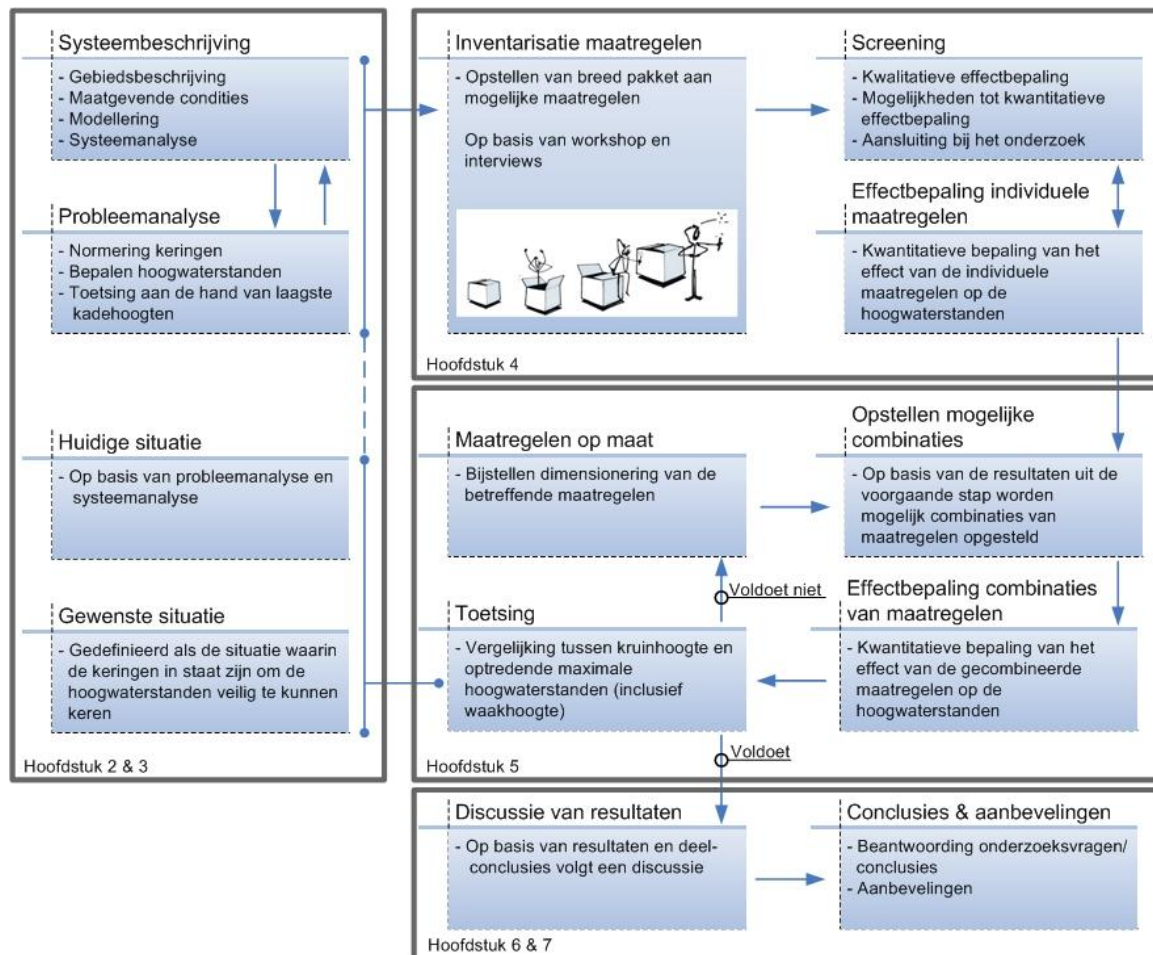
In welke combinaties zijn de eerder genoemde maatregelen effectief in het reduceren van de hoogwaterstanden?

In de volgende paragraaf wordt uiteengezet op welke wijze dit onderzoek bijdraagt tot het beantwoorden van bovenstaande vragen.

¹ Wanneer in dit rapport over (maximale) hoogwaterstanden wordt gesproken, worden de maatgevende hoogwaterstanden bedoeld. De term maatgevende hoogwaterstanden wordt vermeden omdat deze, ten tijde van dit schrijven, nog niet officieel zijn vastgesteld.

1.3 Werkwijze

Het onderzoek is opgebouwd uit verschillende stappen, zoals weergegeven in het onderzoeksmodel (zie figuur 1.3). Uitvoering van deze stappen draagt bij aan het beantwoorden van de onderzoeksvragen en daarmee aan het behalen van de doelstelling van dit onderzoek.



Figuur 1.3: Het onderzoeksmodel.

De probleem- en systeemanalyse kenmerken het begin van het onderzoek. Deze analyses dragen bij aan een duidelijke en kwantificerende probleembeschrijving, beeldvorming van het onderzoeksgebied alsook inzicht in de werking van het systeem. In de probleemanalyse zijn de hoogwaterstanden, behorende bij de vastgestelde veiligheidsnorm, bepaald en vergeleken met de plaatselijke kadehoogte. Hierdoor wordt ruimtelijk inzicht verkregen in waar de kaden niet voldoende op hoogte zijn en in welke mate.

De probleemanalyse vormt de basis voor het inventariseren van mogelijke maatregelen. Deze inventarisatie is grotendeels gebaseerd op een workshop waarbij de inbreng van verschillende partijen draagvlak heeft gevormd bij het opstellen van de maatregelen. In deze workshop is het 'out-of-the-box'-denken leidend geweest wat resulteerde in een open en verkennende discussie. Er is dan ook in de breedte gezocht naar mogelijke maatregelen waarbij maatregelen die niet meteen voor de hand liggen (vanwege bestuurlijke, technische of financiële beperkingen) niet direct zijn afgeschreven. Een selectie van maatregelen is verkregen middels deze door een eerste zeef te halen. De maaswijdte van deze zeef is bepaald door de volgende criteria: een kwalitatieve beoordeling van het verwachte effect op het verlagen

van de hoogwaterstanden en de mogelijkheid tot een kwantitatieve effectbepaling. Maatregelen waarvan het effect op het vergoten van de overstromingsveiligheid nihil of zelfs negatief wordt verondersteld of waarbij het effect kwantitatief niet te beoordelen is, zijn afgevalen. Het derde criterium, aansluiting bij het onderzoek, vormt de sluitpost van de screening. Het toetst de maatregelen aan de beschikbaarheid van kennis/informatie, de wenselijkheid tot analyse van de maatregel in relatie tot het doel van het onderzoek en of de effectiviteit van een dergelijke maatregel al is onderzocht voor de Weteringen en stadsgrachten. Een negatieve score op één van deze criteria is voldoende om een maatregel niet mee te nemen in de nadere analyse. Deze eerste screening perkt het aantal mogelijke maatregelen in waardoor geconvergeerd wordt naar een set maatregelen. Deze worden vervolgens op hun effectiviteit beoordeeld en vergeleken.

In navolging op de screening is de effectiviteit van de geselecteerde individuele maatregelen op het verlagen van de hoogwaterstanden kwantitatief bepaald. De invloed van een bepaalde maatregel op de hoogwaterstanden is onderzocht door de afmetingen dan wel de capaciteit van de maatregelen te variëren. Zodoende kan een vergelijking worden gemaakt tussen de situatie waarin de maatregel is geïmplementeerd en de gewenste situatie, in deze context geformuleerd als de situatie waarin de kruinhoogten van de keringen hoog genoeg zijn om de optredende hoogwaterstanden veilig te kunnen keren. Door deze vergelijking te maken voor de verschillende variaties kan de mate van effectiviteit van een maatregel kwantitatief worden bepaald. De mate van effectiviteit wordt inzichtelijk gemaakt door het toepassen van een zogenaamde effectiviteitsindicator. Op basis van deze indicator wordt de vraag beantwoord wat de grootte van het effect is en wanneer de gewenste situatie zou worden bereikt. De effectbepaling heeft plaatsgevonden door de maatregelen direct of indirect te modelleren in een 1D hydraulisch Sobek-model van de Sallandse Weteringen, stadsgrachten en een deel van het Zwarte Water.

Het effect op het verlagen van de hoogwaterstanden van de individuele maatregelen vormt de basis voor het opstellen van mogelijke combinaties van maatregelen. Het effect van de ene maatregel kan versterkt worden door de ander, maar ook kan het blijken dat het nemen van slechts één maatregel ontoereikend is om te voldoen aan de veiligheidsnorm. In de meeste gevallen is ook binnen de opgestelde combinaties gevarieerd in de mate waarin de individuele maatregelen zijn toegepast.

Het onderzoek richt zich op het analyseren van het probleem, het opstellen en selecteren van maatregelen en het analyseren van het effect van deze maatregelen op de hoogwaterstanden. Dit resulteert in een overzicht van mogelijke maatregelen en de effectiviteit die zij bieden in het reduceren van de hoogwaterstanden op de stadsgrachten van Zwolle en de Sallandse Weteringen. De kwantitatieve effectbepaling maakt het mogelijk om de maatregelen onderling te vergelijken op de effectiviteit die zij bieden.

1.4 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Het onderzoek kent de volgende randvoorwaarden en uitgangspunten. Deze zijn bedoeld om het onderzoek af te bakenen en daarmee een duidelijk beeld te schetsen van het bereik van dit onderzoek.

- Bij de analyse van mogelijke maatregelen ligt de focus op technische/structurele maatregelen die in potentie de hoogwaterstanden kunnen verlagen. Hierdoor vallen niet-structurele/bestuurlijke maatregelen alsook dijkophoging buiten het bereik van dit onderzoek.
- Als basisjaar voor de studie is gekozen voor het jaar 2015, de korte termijn. Autonome ontwikkelingen in het stroomgebied (inclusief klimaatsverandering) zijn dan ook tot 2015 meegenomen in de analyse. Hieronder vallen ook de zogenaamde waternoodmaatregelen² van het waterschap Groot Salland.

² Maatregelen die volgen uit de waternoodsystematiek. De maatregelen die in het kader van deze systematiek worden genomen hebben tot doel om de watergangen in het achterland van de Weteringen zodanig te dimensioneren zodat de gewenste grondwaterstanden in de beheerssituatie kunnen worden gerealiseerd. Hiertoe worden de watergangen veelal ondieper en kleiner gemaakt, wat ook van invloed is op de afvoer. Een meer gedetailleerde beschrijving volgt in paragraaf 4.3.6.

- Bij het bepalen van de hoogwaterstanden is gebruik gemaakt van het 1D hydraulische Sobek-model van de Sallandse Weteringen, stadsgrachten en een deel van het Zwarte Water. Dit model is beschikbaar gesteld door waterschap Groot Salland en voor deze studie geconverteerd naar Sobek-rural (v.2.12). Randvoorwaarden, uitgangspunten en kanttekeningen bij de modellering van het gebied worden nader besproken in hoofdstuk 2.
- Toetsing van de kaden vindt in dit rapport plaats door de kruinhoogte van de kaden te vergelijken met de hoogwaterstanden inclusies waakhoogte. Andere faalmechanismen zoals stabiliteitsverlies zijn niet meegenomen in de analyse.
- Het onderzoek sluit aan bij de, door de Provincie Overijssel, vastgestelde veiligheidsnorm voor de kaden langs de Weteringen en Zwolse stadsgrachten. Deze veiligheidsnorm schrijft voor dat de keringen een waterstand moeten kunnen keren die met een gemiddelde herhalingsstijd van eens in de 200 jaar optreedt (frequentie 1/200 jaar).

1.5 Leeswijzer

De structuur van dit rapport volgt op hoofdlijnen de verschillende stappen uit het onderzoeksmodel zoals behandeld in paragraaf 1.3. Het eerstvolgende hoofdstuk begint met een gebiedsbeschrijving van de Sallandse Weteringen, de stadsgrachten van Zwolle en in bredere context het gehele stroomgebied. Naast een algemene beschrijving van het gebied zal in diepte worden ingegaan op de maatgevende condities en de modellering van het systeem in Sobek. Op basis hiervan wordt de piekafvoer op de Weteringen en de invloed van de benedenwaterstand op de hoogwaterstanden besproken. In hoofdstuk 3 worden de kaden langs de Weteringen en grachten van Zwolle getoetst aan de berekende (maximale) hoogwaterstanden. Hiertoe zijn op basis van de vastgestelde overschrijdingsnorm hoogwaterstanden bepaald. Hoofdstuk 3 geeft inzicht in de problematiek door informatie te verschaffen over waar en in welke mate de kaden langs de Weteringen, het Almeloos kanaal en de stadsgrachten onvoldoende op hoogte zijn om de hoogwaterstanden te kunnen keren. Dit als input voor het opstellen van mogelijk te nemen individuele maatregelen. Het opstellen, screenen en de analyse van de effectiviteit van deze individuele maatregelen wordt behandeld in hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 5 zijn enkele individuele maatregelen gecombineerd doorgerekend. Ook hier is de effectiviteit van de maatregelen in het verlagen van de maatgevende hoogwaterstanden onderzocht. De discussie van de resultaten, zoals gepresenteerd in de voorgaande hoofdstukken, is te vinden in hoofdstuk 6. Mede op basis van de discussie worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek gepresenteerd.

2 Sallandse Weteringen en stadsgrachten Zwolle

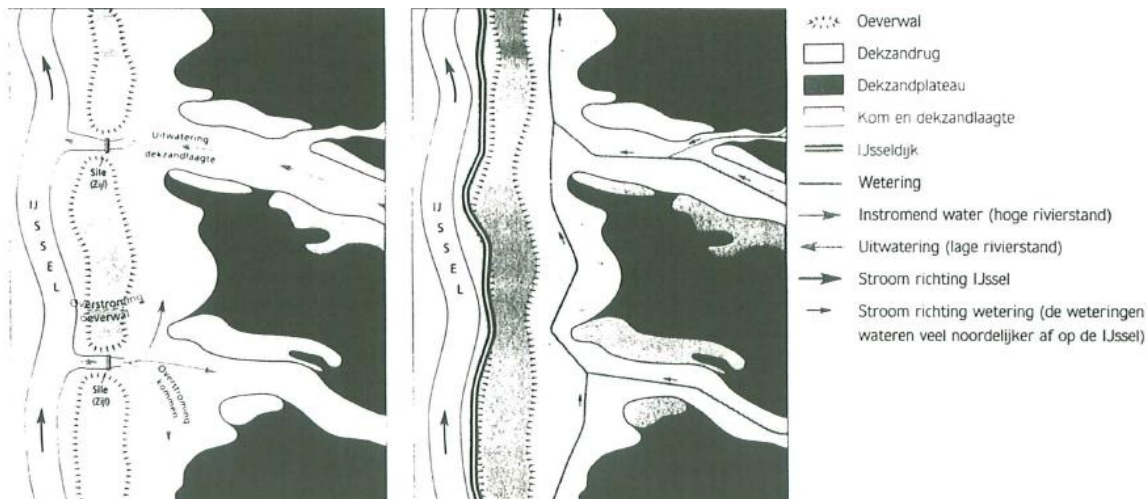
2.1 Gebiedsbeschrijving

Deze paragraaf geeft een beschrijving van het stroomgebied van de Sallandse Weteringen en de Zwolse grachten. Eerst zal kort worden ingegaan op de historie van het gebied voordat het huidige systeem wordt beschreven.

2.1.1 Historie³

Wie op een topografische kaart van Salland kijkt, ziet een groot aantal rechte Weteringen die hoofdzakelijk van zuid naar noord door het landschap lopen. Zij liggen meestal in natuurlijk lager gelegen delen van het gebied. De Sallandse Weteringen waren van oorsprong beken die water direct afvoerden op de IJssel (zie figuur 2.1). De afvoer van het water vond vroeger waarschijnlijk diffuus plaats door relatief brede, zwak hellende moerassige laagten, waardoor het water langzaam wegstroomde. In de Romeinse tijd nam de afvoer van de IJssel toe omdat bosgebieden bovenstrooms werden ontgonnen en veranderden in open cultuurland. Hierdoor trad de IJssel veel vaker buiten haar oevers en liet, vooral in de laaggelegen gebieden, een dikke laag slib achter. Net achter de oeverwallen vormde dit aanslibben een pakket klei van ongeveer een meter dik; verder landinwaarts neemt de dikte van deze laag af.

De natuurlijke afwatering van het dekzandgebied van Salland naar de IJssel toe werd door de groei van het kleipakket steeds lastiger. In de middeleeuwen werd door de bewoners van Salland gezocht naar een oplossing voor dit probleem, dit vonden zij in het graven van een stelsel van Weteringen (zie ook figuur 2.1). Aan het eind van de 14^e eeuw werden verschillende veengebieden in Salland ontgonnen. Er werden slootjes gegraven om de gebieden af te wateren en het land geschikt te maken voor landbouwactiviteiten. Dit had uiteindelijk inklinking van de bodem tot gevolg waardoor het waterbergende vermogen afnam en een nog snellere afvoer van water nodig bleek. Ook had alle bewoonde en gecultiveerde grond baat bij een goede afwatering. Daarom werd begin 14^e eeuw een begin gemaakt met verbetering van die watergangen die als hoofdafwatering dienst konden doen. Door verschillende afwateringsproblemen moesten er echter nieuwe waterlopen gegraven worden, meestal met een kaarsrecht verloop en in een zuid-noordelijke richting. Zodoende ontstond de Soestwetering en de Nieuwe Wetering. Vrijwel het gehele achterland van de Sallandse IJsseldijk was opgenomen in dit afwateringssysteem. De Weteringen werden ten zuiden van Zwolle gebundeld en waterden vervolgens via de Oude Aa af.



Figuur 2.1: Verandering van de afwatering van Salland (bewerkt uit Grontmij Projectbureau DAR Zwolle, 1997).

³ Informatie in deze paragraaf is grotendeels ontleend aan Grontmij Projectbureau DAR (1997)

Aanvankelijk was de bedijking van de Weteringen niet gericht op beveiliging van de lage weidegronden tegen hoog water. Kaden en dijken dienden om het ingestroomde IJsselwater in de winter te geleiden en wel zo, dat vruchtbaar slib in laaggelegen gebieden werd afgezet ter bemesting. Tussen november en maart stonden de laaggelegen landerijen normaal gesproken blank. Maar ook water dat vanuit de voormalige Zuiderzee richting Salland werd opgestuwd werd tijdelijk geborgen in de laaggelegen gebieden van Salland. Dit resulteerde in een relatief lagere waterstand in Zwolle (0,5 tot 1 meter) vergeleken met bijvoorbeeld de stad Genemuiden, verder benedenstrooms van het Zwarte Water (Kolkman, 2005). Enkele welgestelde landeigenaren beschermden hun land door het lokaal aanleggen van kleine zeedijkjes. Sommige van deze dijkjes zijn nog in het landschap te vinden, zie figuur 2.2.



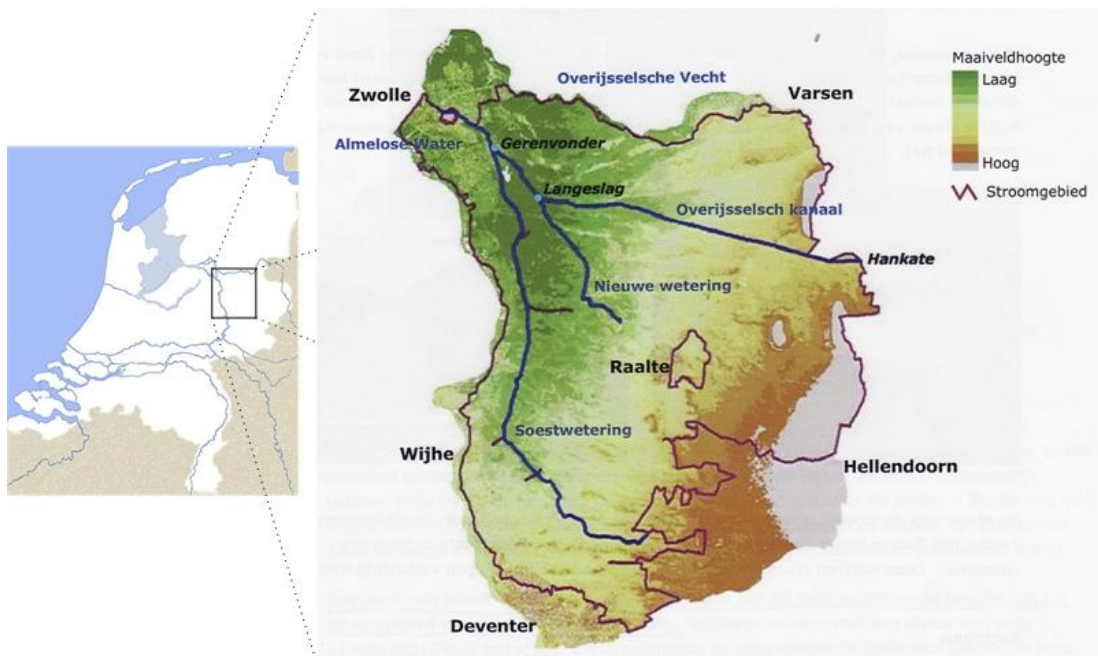
Figuur 2.2: Bord in het gebied rond landgoed Den Alerdinck dat de locatie van de oude zeedijk aangeeft.
(foto: auteur, 22 september 2009)

2.1.2 Stroomgebied van de Sallandse Weteringen

Het stroomgebied van de Sallandse Weteringen ligt in zijn geheel binnen de provincie Overijssel en heeft een oppervlak van circa 50.000 ha. Het stroomgebied is weergegeven in figuur 2.3 waar ter illustratie ook het maaiveldhoogteverloop is weergegeven. Vergelijkt men de hoogteligging van de binnenstad van Zwolle met de directe omgeving, dan is te zien dat deze hoger ligt. De binnenstad ligt in buitendijksgebied. Om de binnenstad van Zwolle heen en richting het zuiden en oosten zijn de maaiveldhoogten lager. Door deze relatief lage ligging zijn er langs de Weteringen dan ook kaden aangelegd om deze gebieden tegen overstromingen te beschermen.

De grenzen van het stroomgebied worden globaal gevormd door:

- de Overijsselse Vecht aan de noordzijde van Zwolle tot aan Varsen;
- de Lemelerberg en Archemerberg aan de oostzijde;
- de lijn Deventer – Raalte – Hellendoorn aan de zuidzijde en
- de IJssel tussen Zwolle, Wijhe en Deventer aan de westzijde.



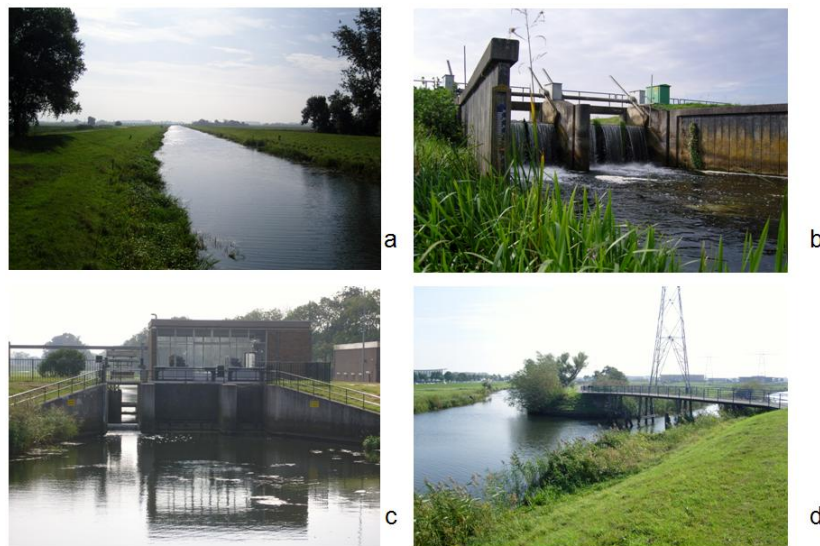
Figuur 2.3: Stroomgebied van de Sallandse Weteringen. (bewerkt uit Versteeg *et al.*, 2008)

De belangrijkste waterlopen in het stroomgebied van de Sallandse Weteringen zijn de Soestwetering, het Overijssels kanaal, de Nieuwe Wetering en het Almeloos kanaal (in figuur 2.3 aangegeven als het Almeloze Water). De Soestwetering en de Nieuwe Wetering verzorgen de hoofdafwatering van West-Salland.

De Soestwetering (zie figuur 2.4a) ligt in het westelijk deel van het stroomgebied. De meest bovenstroomse locatie waarvan afvoergegevens bekend zijn, is stuw 3A bij Wijhe (stroomgebied 11.000 ha, zie figuur 2.4b). Tussen deze stuw en het Almeloos kanaal lozen stuw Rietberg (stroomgebied 6.900 ha), pontgemaal Zandwetering (stroomgebied 900 ha), pontgemaal Oude Wetering (stroomgebied 1.900 ha), gemaal Bremmelstraat (stroomgebied 500 ha) en gemaal Lierder- en Molenbroek (stroomgebied 1.500 ha) hun overtollig water op de Soestwetering. Op het benedenstroomse deel van de Soestwetering lozen gemaal Markvoort (stroomgebied 1.500 ha) en gemaal Sekdoorn (stroomgebied 400 ha) hun overtollig water. In totaal heeft het stroomgebied van de Soestwetering een oppervlak van ongeveer 24.600 ha.

Het Overijssels kanaal (stroomgebied 14.000 ha) ligt in het noordoostelijk deel van het stroomgebied. Het begint bij stuw Hankate en stroomt in westelijke richting tot aan de stuw bij gemaal Langeslag, waar de waterloop loost op het bovenstroomse deel van de Nieuwe wetering. Waar het Overijssels kanaal aansluit op de Nieuwe wetering is ook gemaal Langeslag te vinden (stroomgebied 2.700 ha, zie figuur 2.4c). Naast dit gemaal bevindt zich een afvoergoot. Wanneer door hoge waterstanden op de Nieuwe wetering vrij afvoeren door deze goot richting Zwolle niet meer mogelijk is, treden de pompen van gemaal Langeslag in werking. Verder benedenstrooms slaat gemaal Linterzijl (stroomgebied 4.000 ha) water uit op de Nieuwe wetering. In totaal is het stroomgebied van de Nieuwe wetering ongeveer 20.700 ha groot.

In Gerenvonder, aan de zuidrand van Zwolle, komen de Nieuwe Wetering en de Soestwetering samen, de resulterende waterloop wordt vanaf hier het Almeloos kanaal genoemd (zie figuur 2.4d). Deze naam komt voort uit het verleden, toen er nog direct scheepsverkeer mogelijk was tussen Zwolle en Almelo over het Overijssels kanaal. Dit is niet meer mogelijk sinds de sluizen bij gemaal Langeslag zijn vervangen door een vaste stuw. Het Almeloos kanaal en de stadsgrachten van Zwolle worden belast met de afvoer van gemaal Herfte (stroomgebied 3.200 ha) en de afvoer van Zwolle (50 ha).



Figuur 2.4: De Soestwetering (a) is een lange rechte wetering. Nabij Wijhe is een stuw te vinden (b) tot aan waar vroeger de primaire kering liep. In de Nieuwe wetering wordt dit punt gemarkeerd door gemaal Langeslag (c). In Gerenvonder komen beide Weteringen samen en vormen zij het Almeloos kanaal (d). (foto's: auteur, 22 september 2009)

De afvoer van de Sallandse Weteringen stroomt via het Almeloos kanaal, de stadsgrachten van Zwolle, het Zwarte Water en na samenvloeiing met de Overijsselse Vecht richting het IJsselmeer. Deze wateren staan onder normale omstandigheden in open verbinding met elkaar.

2.1.3 Keringen: Ramspol en keersluis Zwolle

Voor het beschreven systeem zijn een tweetal keringen van belang. Zoals in §1.1 vermeld betreft het hier de balgstuwkering Ramspol en de keersluis bij Zwolle.

De Ramspolkering houdt bij noordwester storm het water tegen dat vanuit het IJsselmeer opgestuwd wordt richting het Zwarte Water, Zwolle en de Weteringen. Het sluitpeil van de balgstuw Ramspol is vastgesteld op 0,50 m +NAP. Wanneer deze waterstand is bereikt en het water van het Ketelmeer richting Zwarte Meer stroomt, vindt afsluiting van het Zwarte Meer plaats door de balgstuw te vullen met water en lucht (De Balgstuw, z.d.). Realisatie van de Ramspolkering hield een verlaging in van de maatgevende hoogwaterstanden achter de kering en gaf de aanzet tot de realisatie van de keersluis bij Zwolle.

De keersluis bij Zwolle dient op zijn beurt Zwolle en het achterland te beschermen tegen extreem hoge waterstanden op het Zwarte Water, met een terugkeertijd van 1/1250 jaar. De maatgevende waterstand die bij deze overschrijdingskans hoort, is volgens de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006) gelijk aan 2,13m +NAP. De keersluis in Zwolle zal deze waterstand dus moeten kunnen keren om Zwolle te beschermen tegen extreem hoog water op het Zwarte Water. De keersluis sluit wanneer de waterstand ter plaatse het peil van 1 m +NAP overschrijdt. Uit de door Rijkswaterstaat bepaalde HR2006 blijkt dat een waterstand van 1 m +NAP bij de kering in Zwolle eens per jaar tot eens per twee jaar wordt bereikt. Dit wil echter niet zeggen dat de kering met dezelfde frequentie zal sluiten omdat als tweede voorwaarde geldt dat de stroomrichting van het Zwarte Water naar Zwolle moet zijn, oftewel een tegennatuurlijke stroomrichting. Dit heeft tot gevolg dat de kering in de praktijk minder vaak dan eens per jaar tot eens in de twee jaar zal worden gesloten. Wat de frequentie van sluiting en duur van sluiting zal zijn is niet bekend en kan ook niet uit waarnemingen worden afgeleid. De kering is immers pas in 2006 operationeel geworden en hoefde nog nooit gesloten te worden. (Versteeg *et al.*, 2008)

2.1.4 Maatgevende condities

In 1996 is in opdracht van Rijkswaterstaat/RIZA verkennend onderzoek gedaan naar de maatgevende hoogwaterstanden voor de keringen langs de Sallandse Weteringen en de stadsgrachten. Klopstra & Vermeer (1996) concludeerden in dit onderzoek dat door de realisatie van de Ramspolkering de waterstanden op de Weteringen, in Zwolle en op het Zwarte Water tot aan de Vechtmonding maatgevend zijn onder condities van hoge afvoeren op de Vecht en de Weteringen. In bijlage B2 zijn de resultaten weergegeven voor een aantal combinaties van wind, IJsselmeerpeil en afvoer van zowel de Weteringen en de Vecht op de maatgevende hoogwaterstanden op de Vechtmonding en de Weteringen.

Recent is door Versteeg *et al.* (2008) geconcludeerd dat waterstanden in Zwolle met een terugkeertijd van eens per 100 jaar en meer voor het overgrote deel worden bepaald door een hoge afvoer op de Vecht. In dat onderzoek wordt ook gesteld dat door de kering bij Ramspol stormcondities niet langer zorgen voor extreem hoge waterstanden. Stormcondities kunnen nog wel leiden tot hoge waterstanden in Zwolle, echter is de kans op een dergelijke gebeurtenis zeer klein en heeft daardoor een verwaarloosbare bijdrage aan hoge waterstanden in Zwolle met een terugkeertijd van 50 jaar of meer (zie bijlage B3 voor onderbouwing op basis van HR2006).

Uit bovengenoemde onderzoeken kan worden geconcludeerd dat voor hoge waterstanden op de stadsgrachten van Zwolle en de Sallandse Weteringen de hoge afvoeren op de Vecht en de Weteringen maatgevend zijn. Een hoge Vechtafvoer treedt vrijwel gelijktijdig op met hoge afvoeren op de Weteringen. Een extreme afvoer op de Vecht ontstaat alleen door het samenvallen van piekafvoeren op de zijrivieren (Burgdorffer, 1993). Vanwege het relatief kleine stroomgebied van de Benedenvecht (lees: de provincie Overijssel en een deel van de provincie Drenthe) en het feit dat de afvoeren neerslag-gerelateerd zijn, wordt een correlatie tussen een hoge Vechtafvoer en hoge afvoeren op de Weteringen verondersteld (Burgdorffer, 1993; Van der Schrier, 2003; Versteeg *et al.*, 2008). Ook tijdens de hoogwaterperiode in het najaar van 1998 viel de afvoerpiek van de Sallandse Weteringen samen met die van de Vecht nabij stuw Vechterweerd, bovenstrooms van Zwolle op de Vecht (Van der Schrier, 2003).

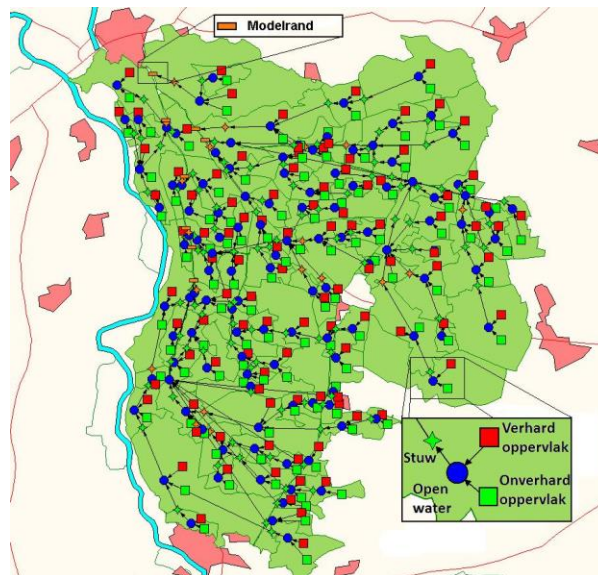
Hoge afvoeren op de Sallandse Weteringen zorgen er voor dat de stroomrichting richting het Zwarte Water positief blijft en dus niet zal omkeren. Dit betekent ook dat onder de maatgevende situatie in Zwolle de keersluis niet zal sluiten. Deze kering kent immers naast het sluitpeil van 1m +NAP een tweede voorwaarde en dat is de omkering van de stroomrichting, van het Zwarte Water richting Zwolle. Ook in het geval van een kadedoorbraak langs de Sallandse Weteringen wordt verondersteld dat er water richting het Zwarte Water blijft stromen en de keersluis dus niet zal sluiten (Grontmij Projectbureau DAR, 2001; p.55). De keersluis zou enkel nut hebben in het geval dat een zware noordwester storm het water ver tot op de Weteringen opstuwt en dat daarbij de stromingsrichting negatief zou worden. Sluiting van de kering zal in dit geval pas effectief blijken bij situaties met een zeer kleine kans van voorkomen (zie ook bijlage B3).

2.2 Modellerings

Bij het bepalen van de hoogwaterstanden en de uiteindelijke analyse naar mogelijke maatregelen, is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een 1D hydraulisch stromingsmodel van de Weteringen, stadsgrachten en een deel van het Zwarte Water. Het model is beschikbaar gesteld door waterschap Groot Salland. Deze paragraaf geeft een beschrijving van hoe de maatgevende situatie/condities zijn vertaald naar een representatieve modelomgeving. De randvoorwaarden of modelranden van het stromingsmodel zijn bepaald op basis van gesimuleerde afvoeren uit een 0D neerslag-afvoer model. In paragraaf 2.2.1 zal dan ook eerst dit neerslag-afvoer model worden besproken voordat het hydraulische stromingsmodel in §2.2.2 aan bod komt. Beide modellen zijn beschikbaar gesteld door waterschap Groot Salland. Het neerslag-afvoer model is in Sobek-rural geschematiseerd en het stromingsmodel in Sobek-river. Voor dit onderzoek is het gekalibreerde stromingsmodel geconverteerd naar een Sobek-rural omgeving (zie bijlage B4 voor een algemene beschrijving van deze Sobek-applicatie). De gebruikte versie is 2.12.

2.2.1 Neerslag-afvoer model

Het neerslag-afvoer model is gebruikt om, op basis van een bepaalde neerslaggebeurtenis, de afvoer uit het stroomgebied van de Weteringen te bepalen. Een dergelijk model is nodig omdat er onvoldoende meetwaarden voor handen zijn om de afvoergolven op de Weteringen direct af te leiden. Door Versteeg *et al.* (2008) is in Sobek-rural een neerslag-afvoer model opgezet om de afvoergolf van de Sallandse Weteringen te bepalen. Dit model is weergegeven in figuur 2.5.



Figuur 2.5: Neerslag-afvoer model van het stroomgebied van de Sallandse Weteringen.

Bovenstaande figuur laat zien dat het stroomgebied van de Sallandse Weteringen is opgedeeld in diverse modelgebieden, 105 in totaal. Deze gebieden zijn opgedeeld op basis van de volgende kenmerken:

- afwateringsstructuren (deelstroomgebieden);
- drooglegging;
- bodemsoort;
- kwel/wegzijging;
- grondgebruik en
- gebieden waar waternoodmaatregelen worden genomen.

Aan de hand van het landgebruik en de topografie is elk modelgebied opgedeeld in verhard oppervlak, onverhard oppervlak en open water. Via een stuw of gemaal watert elk gebied af op een benedenstrooms gebied of modelrand. Aan elk gebied zijn karakteristieken toegekend die nodig zijn voor de modellering. Dit zijn onder andere: oppervlak, gemiddelde maaiveldhoogte, landgebruik, drainagekarakteristieken, kwel/wegzijging, bodemtype, riolering, bergingscapaciteit op het maaiveld en het streefpeil.

Door een twintigtal extreme neerslaggebeurtenissen van de afgelopen 100 jaar aan het model op te leggen, zijn afvoeren op de modelranden bepaald. Door op deze afvoeren een extreme waardenverdeling toe te passen zijn de piekafvoeren bepaald bij een herhalingsjijd van eens per 200 jaar, conform de veiligheidsnorm. Voor een volledige beschrijving van de statistiek van de piekafvoeren en de gehanteerde werkwijze voor het vaststellen van de golfvormen, wordt verwezen naar Versteeg *et al.* (2008).

Het neerslag-afvoer model is door Versteeg *et al.* (2008) gekalibreerd op en rond de piekafvoer van 23 januari 2007. Hierbij is de totale afvoer (alle modelranden samen) vergeleken met de gemeten afvoer bij de keersluis in Zwolle. Een meer gedetailleerde beschrijving van het kalibratieproces is gegeven in bijlage B5.

2.2.2 Het Stromingsmodel

De afvoeren op de modelranden, zoals afgeleid met behulp van het neerslag-afvoer model en behorende bij een 1/200 jaar situatie, zijn opgelegd aan het 1D stromingsmodel. Het stromingsmodel is de hydraulische component van de twee modellen en kan worden gebruikt om de hoogwaterstanden op de Weteringen en stadsgrachten te bepalen. Voor dit onderzoek is het beschikbare model in Sobek-river geconverteerd naar Sobek-rural. Het geconverteerde stromingsmodel is weergegeven in figuur 2.6.



Figuur 2.6: Stromingsmodel van de Sallandse Weteringen met daarin opgenomen een schematisatie van de waterlopen en kunstwerken.

Het hydraulische model kent in feite drie belangrijke modelranden (randvoorwaarden) die bepalend zijn voor de maatgevende situatie in het systeem, dit zijn:

- De twee bovenstroomse randvoorwaarden, de eerste bij de stuw 3A, nabij Wijhe, en de tweede op locatie Langeslag.

De afvoeren die op deze randen zijn bepaald, vormen samen het overgrote deel van de totale afvoer vanuit Salland. Een gebied van ongeveer 11.000 ha watert af via stuw 3A op de Soestwetering en via het Overijssels kanaal watert een gebied van ongeveer 14.000 ha af op de Nieuwe wetering bij Langeslag. De totale afvoer van de Weteringen zoals bepaald met de extreme waardenanalyse op basis van de resultaten uit het neerslag-afvoer model, zijn terugvertaald naar iedere individuele afvoerpost. Dit is gedaan door van de totale afvoer de pompcapaciteit van de verschillende gemalen in mindering te brengen en de resterende afvoer, op basis van stroomgebiedoppervlak, evenredig te verdelen over beide afvoerposten.

- De benedenstroomse randvoorwaarde wordt gevormd door de waterstand op het Zwarte Water ter plaatse van de Vechtmonding.

Bij de beschrijving van de maatgevende condities voor hoogwaterstanden in het systeem is opgemerkt dat hoge afvoeren op de Vecht vrijwel gelijktijdig optreden met hoge afvoeren op de Weteringen. Bij het modelleren van deze situatie is aangenomen dat de correlatie volledig is, oftewel dat bij een 1/200 jaar afvoer op de Sallandse Weteringen ook een 1/200 jaar afvoer op de Vecht optreedt. Dit is een conservatieve aanname. Er wordt een faseverschil tussen de afvoerpieken gehanteerd van 32 uur, naar Termes & Versteeg (2004). Dit faseverschil is in lijn met Burgdorffer (1993) waar een faseverschil van ongeveer 36 uur wordt genoemd. Dit faseverschil wordt veroorzaakt door verschillen in looptijd en het oppervlak van de stroomgebieden, waarbij de afvoerpiek op de Sallandse Weteringen voorloopt op die van de Vecht. De piek en golfvorm van het waterstandsverloop op de Vechtmonding is afgeleid uit de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (Geerse, 2006).

Het afvoer- en waterstandsverloop op deze randvoorwaarden zullen in paragraaf 2.3.1 worden gepresenteerd. De overige modelranden in het stromingsmodel genereren geen afvoer en dragen daarom ook niet bij aan hoogwaterstanden op de Weteringen en stadsgrachten.

Het gepresenteerde model is geschikt bevonden voor het doel van het onderzoek. Het sluit aan bij de recent opgestelde Hydraulische Randvoorwaarden uit 2006 en ontwikkelingen in het stroomgebied zelf, tot 2015, zijn meegenomen. Zo is de keersluis in Zwolle en het bergingsgebied Sekdoorn, als verbreding van de dwarsprofielen ter plaatse, opgenomen in het model. Daarnaast zijn, door aanpassingen in het neerslag-afvoer model, de tot 2015 geplande maatregelen in het kader van waterlood opgenomen.

2.3 Hoogwateranalyse op basis van modellering

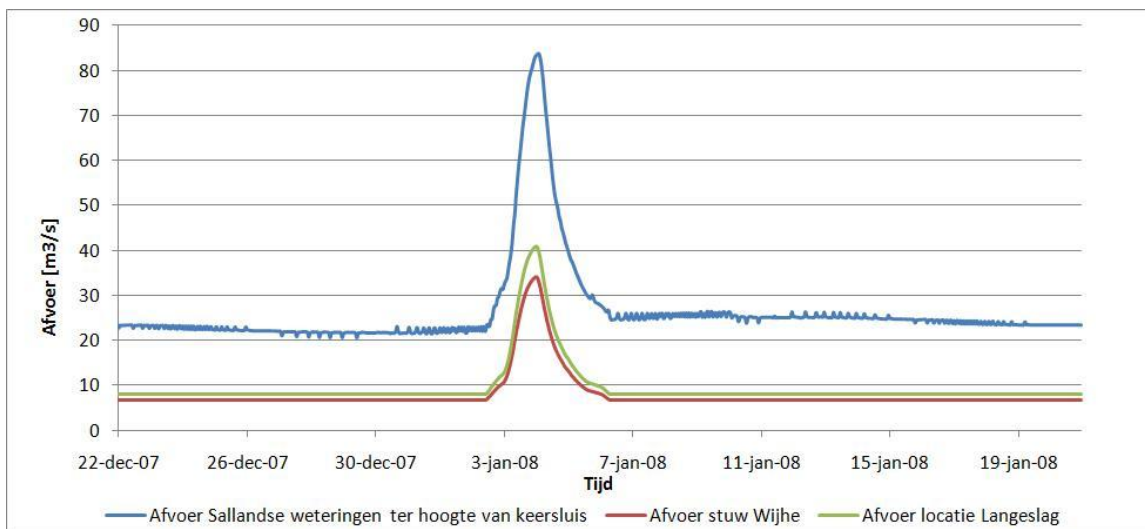
De (piek)afvoeren en hun golfvorm zoals opgelegd aan de bovenstroomse modelranden worden in deze paragraaf gepresenteerd, alsook het waterstandsverloop op de benedenrand (Vechtmonding). Het tweede deel behandelt de analyse van de invloed van de afvoer van de Weteringen op de hoogwaterstanden in Zwolle.

2.3.1 Piekafvoeren en waterstandsverloop

De afvoergolven op de twee bovenstroomse locaties van de Sallandse Weteringen zijn te karakteriseren met een piekafvoer en een bepaalde golfvorm, deze zijn weergegeven in figuur 2.7. Opgeteld wordt er een afvoer van ongeveer $75 \text{ m}^3/\text{s}$ gegenereerd, waarbij de afvoer van het Overijssels kanaal de grootste

bijdrage levert. Wordt bij deze afvoer de benedenstroomse laterale instromen (gemalen) opgeteld, dan is de totale piekafvoer van de Sallandse Weteringen gelijk aan circa 84 m³/s.⁴

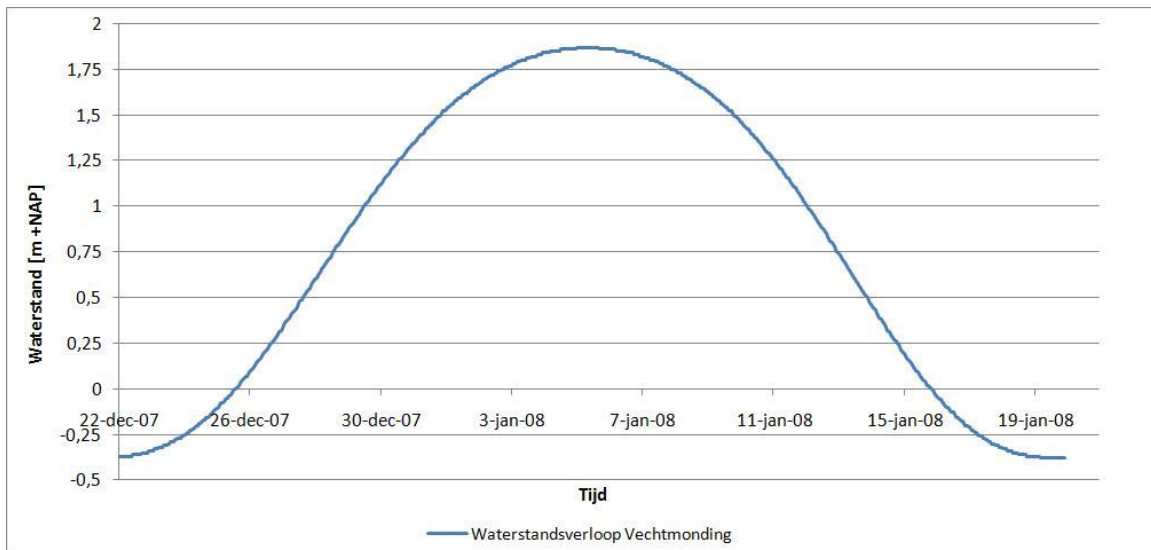
Bij het bepalen van het afvoerverloop op de Weteringen is geen rekening gehouden met een beperking in de maximale afvoer. In eerder onderzoek uitgevoerd door het waterschap Groot Salland, is de maximale afvoercapaciteit van de Weteringen bepaald op 68 m³/s (WGS, 1998). Hierbij werd gesteld dat de geringe afmetingen van de watergangen bovenstrooms van Wijhe en Langeslag, en beperkingen in de afvoer van de kunstwerken (gemalen e.d.) een fysieke beperking opleggen aan de maximale afvoer. Eerdere schattingen van de maximale afvoer lagen hoger (zie Burgdorffer (1993), die de maximale afvoer op 99 m³/s bepaalde), maar zijn naar beneden bijgesteld naar aanleiding van het hoogwater van oktober 1998. Tijdens deze hoogwaterperiode zijn er door het waterschap Groot Salland debietmetingen uitgevoerd voor de Weteringen. In de Nieuwe Wetering werd een afvoer van 17,3 m³/s gemeten, in de Soestwetering 26,6 m³/s en na samenvloeiing van beide Weteringen bij gemaal de Herfte 45,2 m³/s (Grontmij Projectbureau DAR, 2001). In het gebied stond water op het maaiveld en was extra pompcapaciteit geïnstalleerd om de wateroverlast te beperken. In bijlage B6 wordt deze mogelijke beperking van de afvoer van de Weteringen ter discussie gesteld en wordt onderbouwd waarom er in dit onderzoek geen rekening mee is gehouden.



Figuur 2.7: Totale afvoerverloop van de Sallandse Weteringen zoals gemodelleerd in het stromingsmodel. De optredende afvoer wordt in grote mate bepaald door de twee bovenstroomse modelranden: stuw Wijhe en locatie Langeslag. Deze zijn op hun beurt zeer bepalend voor de afvoer op respectievelijk de Soestwetering en de Nieuwe Wetering.

Naast de afvoer van de Weteringen speelt de benedenrand een belangrijke rol bij de bepaling van de hoogwaterstanden. De maximale benedenstroomse waterstand bij de Vechtmonding met een frequentie van voorkomen gelijk aan 1/200 jaar is bekend uit HR2006 en bedraagt 1,87 m +NAP. De golfvorm is bepaald op basis van de afvoergolf op de Vecht zoals bepaald in Geerse (2006). In figuur 2.8 is het waterstandsverloop op de Vechtmonding weergegeven, zoals gemodelleerd in het stromingsmodel. De afvoergolf en dus ook het waterstandsverloop op de Vecht kent een veel langere duur dan de afvoergolven op de Sallandse Weteringen.

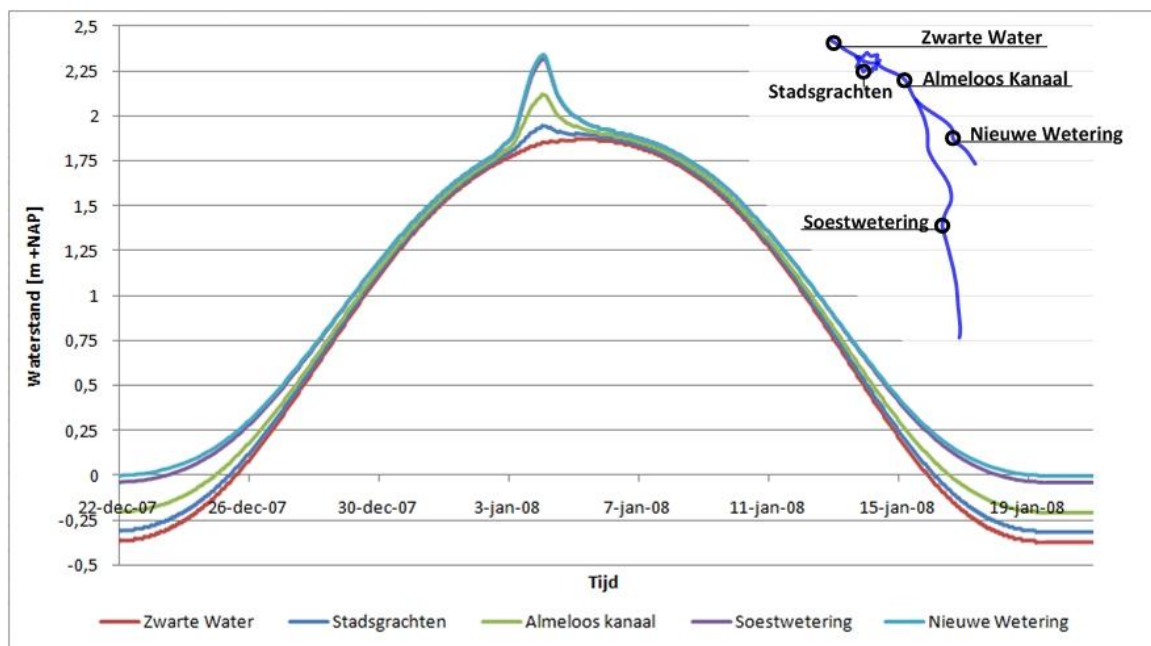
⁴ De rekentijdstap van het model bedraagt 1 uur, waardoor de piekafvoer de maximale afvoer representeert die gedurende 1 uur optreedt.



Figuur 2.8: Waterstandsverloop op de benedenstroomse rand, de Vechtmonding. Piek (1,87m +NAP) en golfvorm zijn afgeleid uit de HR2006.

2.3.2 Bijdrage afvoer Weteringen aan hoogwaterstanden in Zwolle

Figuur 2.9 geeft tijdreeksen van de berekende waterstanden weer voor verschillende locaties in het stromingsmodel, bij een terugkeertijd van 200 jaar. Uit de figuur is af te leiden dat de afvoer van de Weteringen een beperkte bijdrage heeft aan de hoogwaterstanden in Zwolle. De waterstanden in Zwolle worden vooral bepaald door de benedenstroomse waterstand (langdurige golf). Verder bovenstrooms van Zwolle langs het Almeloos kanaal, de Soestwetering en de Nieuwe wetering wordt de bijdrage van de afvoer van de Sallandse Weteringen op de hoogwaterstanden groter (de kleinere golf op de langdurige golf). De locaties op de Soestwetering en Nieuwe Wetering liggen respectievelijk 6 en 3 km bovenstrooms van Gerenvonder, de locatie op het Almeloos kanaal ligt op circa 1,5 km bovenstrooms van waar de stadsgrachten van Zwolle beginnen. De locatie op het Zwarte Water ligt 500 m benedenstrooms van de keersluis in Zwolle.



Figuur 2.9: Tijdreeksen van waterstanden op de verschillende waterlopen.

3 Probleemanalyse

3.1 Normering Sallandse Weteringen en stadsgrachten Zwolle

Zoals in de aanleiding (§1.1) beschreven, vallen de kaden langs de Sallandse Weteringen en de stadsgrachten van Zwolle door de aanleg van de keersluis in Zwolle niet langer onder de primaire keringen. Na het verkorten van dijkkring 53 door middel van de keersluis (zie figuur 1.1) zijn de keringen langs de grachten en Sallandse Weteringen als regionaal aangemerkt. Op deze kaden zijn nu dan ook de normen van toepassing die gelden voor regionale keringen. Provinciale Staten van Overijssel heeft in het rapport 'Normering regionale waterkeringen' (Tienstra, 2005) de veiligheidsnormen van de regionale keringen in haar gebied vastgesteld. De keringen langs de Sallandse Weteringen en de Zwolse grachten dienen een maatgevende waterstand te kunnen keren die met een gemiddelde overschrijdingskans van één maal in de 200 jaar optreedt (frequentie van 1/200 jaar). Voor wateroverlast in Zwolle voldoet men hierbij aan de minimale norm van 1/100 jaar zoals vastgesteld in het Nationaal Bestuursakkoord Water voor stedelijk gebied (zie NBW, 2003).

Bij de keuze voor de veiligheidsnorm door de Provincie is geen gebruik gemaakt van de landelijk opgestelde systematiek, de IPO-richtlijn, waarbij de norm afhankelijk wordt gesteld aan de gevolgschade. Volgens deze systematiek zouden waterkeringen die een dicht bebouwd, laag gelegen gebied beschermen een hogere veiligheidsklasse (en hogere norm) krijgen toegewezen dan waterkeringen die een hoger gelegen landelijk gebied beschermen (IPO, 1999). Reden om af te wijken van deze systematiek is omdat naast inundatiediepte en het aantal woningen en gebouwen de Provincie Overijssel er voor heeft gekozen om emoties een belangrijke rol te laten spelen bij het bepalen van de veiligheidsnormen. Normering volgens de IPO-richtlijn zou resulteren in een lagere normering voor de regionale keringen in Overijssel en dus een verhoogde kans op overstromingen. De inundaties die hierbij voorkomen kunnen zo (emotioneel) bedreigend zijn dat er voor is gekozen om de IPO-richtlijn los te laten. Daarnaast wordt aangevoerd dat in Overijssel naast boezemkaden (waarvoor de IPO-richtlijn oorspronkelijk is opgesteld) ook veel andere typen waterkeringen voorkomen, waardoor wordt verondersteld dat de systematiek uit de IPO-richtlijn niet volledig toepasbaar is.

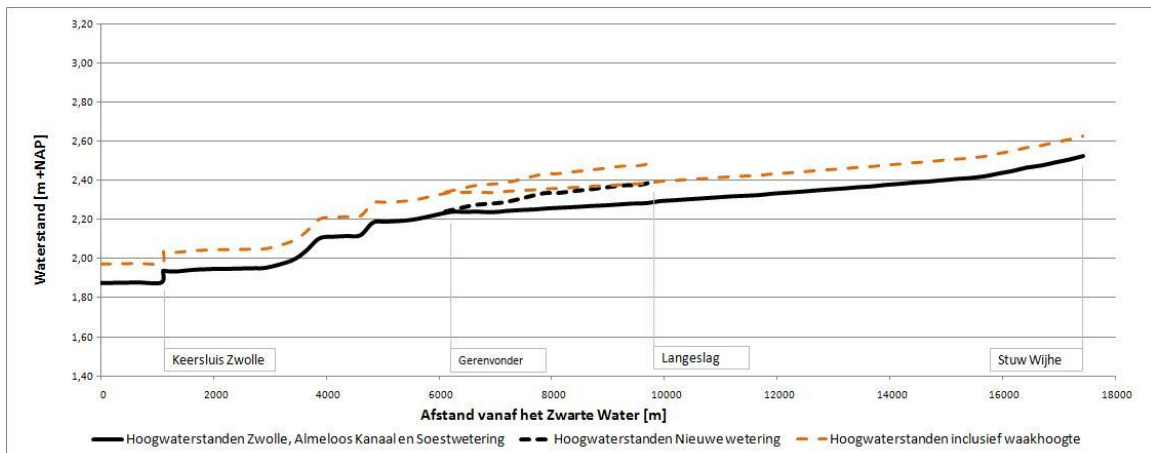
3.2 Hoogwaterstanden

Tijdens het uitvoeren van dit onderzoek vindt er in opdracht van de Provincie Overijssel, een modelstudie plaats waarbij het aannemelijk is dat de maatgevende hoogwaterstanden (MHW's) voor het regionale watersysteem officieel worden vastgelegd. Daarbij wordt als basis hetzelfde hydraulische model gebruikt als in dit onderzoek. De door de Provincie Overijssel voorlopig opgestelde maatgevende hoogwaterstanden (zie Tienstra, 2005) worden niet meegenomen in de analyse. Reden voor deze keuze is dat de hoogwaterstanden indirect zijn bepaald door tussen modelresultaten van gedateerde studies te interpoleren.

Omdat de maatgevende hoogwaterstanden voor het systeem van de Zwolse grachten en Sallandse Weteringen nog niet officieel zijn vastgelegd, zijn deze afgeleid met het hiervoor beschreven stromingsmodel. Met dit model zijn in deze studie nieuwe voorlopige (onofficiële) hoogwaterstanden voor het systeem bepaald bij een herhalingsfrequentie van 1/200 jaar, conform de overschrijdingsnorm.

De hoogwaterstanden met een herhalingsfrequentie van 1/200 jaar zijn weergegeven in figuur 3.1. De keersluis in Zwolle, op een afstand van 1200 meter vanaf het Zwarte Water, zorgt voor een opstuwing van ongeveer 7cm. Doordat de keersluis een hydraulisch knelpunt is, zorgt deze voor hogere waterstanden in Zwolle dan de situatie zonder keersluis. In de uitgevoerde berekeningen is de keersluis geen enkele maal gesloten, omdat de stromingsrichting positief blijft. Op ongeveer 3200 meter vanaf het Zwarte Water begint het Almeloos kanaal. Wat opvalt is het relatief grote verhang van de hoogwaterlijn op dit kanaal,

wat na samenvloeiing van de Nieuwe Wetering en Soestwetering afwatert op de Zwolse grachten. Ook is in figuur 3.1 de hoogwaterlijn opgenomen waarbij rekening is gehouden met een waakhogte van 0,10 meter (onderbroken bovenste lijn). Hierbij wordt aangesloten bij IPO (1999) waar een minimale waakhogte van 0,10 meter voor boezemkaden wordt voorgesteld⁵.



Figuur 3.1: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden op de Zwolse stadsgrachten en Sallandse Weteringen bij een herhalingsfrequentie van 1/200 jaar.

De reden dat de hoogwaterstanden uit figuur 3.1 niet worden overgenomen als de officiële MHW's heeft grotendeels te maken met een lopende discussie wat betreft de maximale afvoercapaciteit van de Weteringen (zie ook §2.3.1). De maximale hoogwaterstanden uit figuur 3.1 vormen een goed startpunt vormen voor een watersysteemanalyse, daarom is besloten deze als uitgangspunt te nemen voor dit onderzoek.

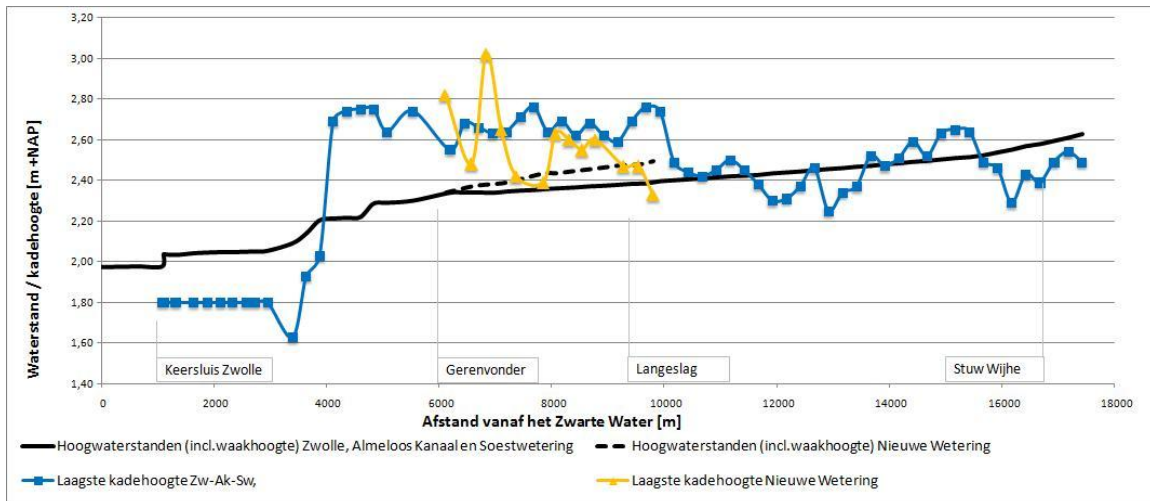
3.3 Toetsing

Nu de normering en de daarbij behorende (voorlopige) maatgevende hoogwaterstanden bekend zijn, kan toetsing aan de huidige situatie plaatsvinden. Deze toetsing houdt een vergelijking in van de hoogwaterstanden (inclusief waakhogte) met de laagste kadehoogten per dijkvak. Immers, een belangrijk faalmechanisme van een kade is de situatie waarin een bepaalde waterstand de kadehoogte overschrijdt en zodoende het land overstroomt.

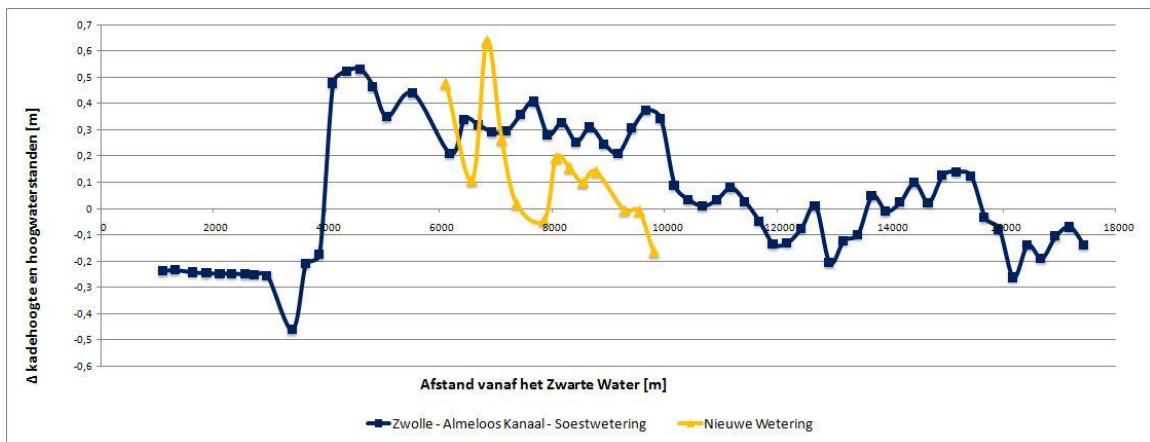
Figuur 3.2 geeft de vergelijking weer tussen de hoogwaterstanden en de laagste kadehoogten voor de Zwolse grachten en de Weteringen. Per kadevak zijn de laagste kadehoogten opgenomen en ter illustratie met elkaar verbonden. Omdat niet voor alle kaden in Zwolle de hoogtes bekend zijn, is er voor gekozen om in dit stedelijke gebied een maximaal toelaatbare waterstand van 1,80 m +NAP te hanteren. Dit waterniveau volgt uit opgave van de gemeente Zwolle (zie Versteeg *et al.*, 2008).

Het relatieve verschil tussen de hoogwaterstanden inclusief waakhogte en de laagste kadehoogte per dijkvak is in figuur 3.3 verduidelijkt. Ook hier zijn de verschillende punten ter illustratie met elkaar verbonden door een lijn. Een positieve waarde geeft aan dat er een bepaalde overhoogte aanwezig is, op die locaties zijn de kaden voldoende op hoogte. Een negatieve waarde daarentegen, geeft aan dat de betreffende kadesecties onvoldoende op hoogte zijn.

⁵ Hiermee wordt, na overleg met de Provincie Overijssel (H. Tienstra), afgeweken van het besluit van de Gedeputeerde Staten van Overijssel van 4 april 2006 die een minimale kruinhoogtemarge van 0,30 meter voorschrijft. Voor deze regionale waterlopen, waar bovendien geen scheepvaart op plaatsvindt, wordt een dergelijke marge voor golfploop en opwaaiing niet reëel geacht.



Figuur 3.2: Lengteprofiel van waterstanden op de Zwolse stadsgrachten (Zw), Almeloos kanaal (Ak), de Soestwetering (Sw) en de Nieuwe Wetering (frequentie 1/200 jaar) en de laagste kadehoogten per kadevak.



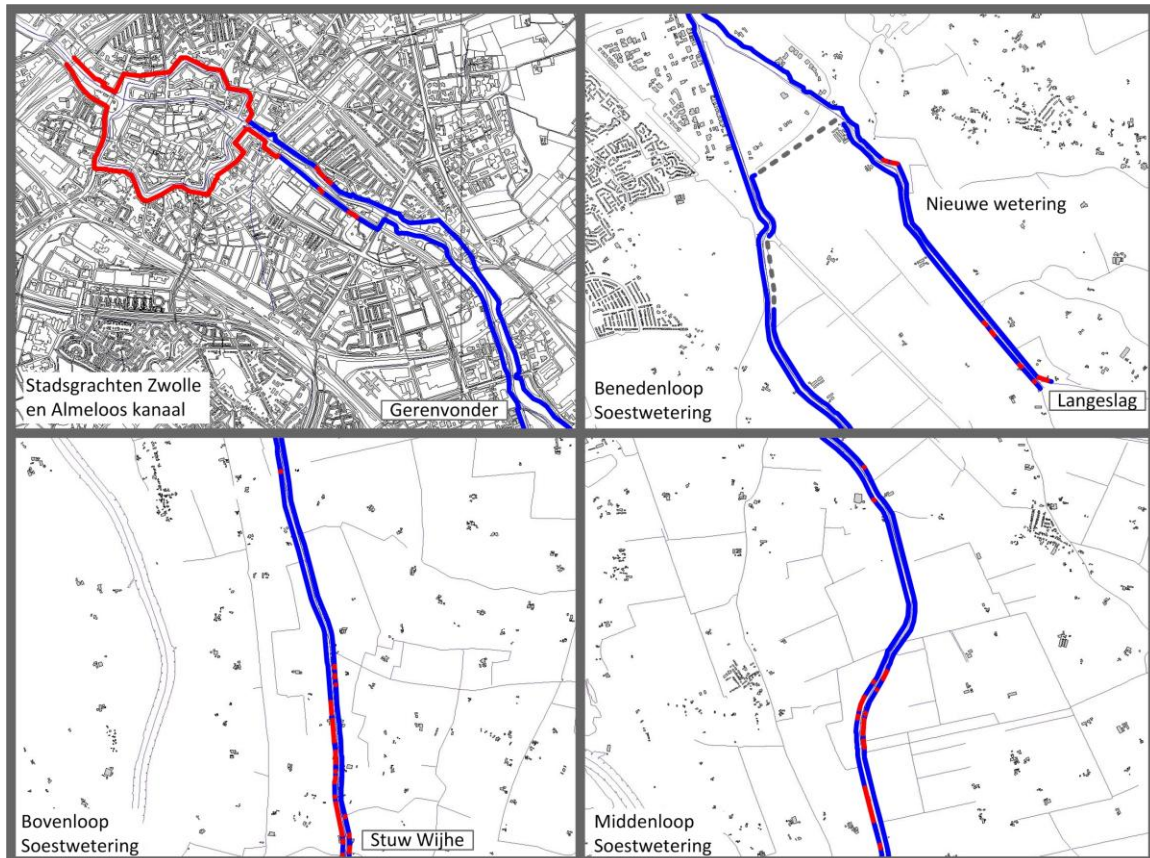
Figuur 3.3: Het verschil tussen de laagste kadehoogten per kadevak en de optredende hoogwaterstanden (frequentie 1/200 jaar, inclusief waakhogte).

Uit beide figuren hierboven komt duidelijk naar voren dat de kadehoogten op meerdere locaties langs de waterlopen niet in staat zijn de hoogwaterstanden te kunnen keren. Wanneer in Zwolle een maximale toelaatbare waterstand van 1,80 m +NAP wordt aangehouden, blijkt dat over de gehele lengte van de stadsgrachten de hoogwaterstanden dit niveau overschrijden. Ook langs het benedenstroomse deel van het Almeloos kanaal blijken meerdere kadevakken onvoldoende op hoogte te zijn. Het Almeloos kanaal kent hier een aantal kadevakken waarvan de kadehoogte beduidend lager zijn dan op de overige locaties (laagste 1,63m +NAP)⁶; de overige kadevakken liggen relatief hoog. De berekeningen laten zien dat langs de Nieuwe Wetering, op ongeveer 1,5 kilometer bovenstrooms van Gerenvonder, en geheel bovenstrooms van de wetering de kaden onvoldoende op hoogte zijn. In het geval van de Soestwetering komen, vanaf ongeveer 5 kilometer bovenstrooms van Gerenvonder, grote aaneengesloten kadevakken voor die niet in staat zijn de hoogwaterstanden te kunnen keren. Het benedenstroomse deel van de Soestwetering, tussen 6 en 10 kilometer vanaf het Zwarte Water, kent daarentegen kadehoogten die aanzienlijk hoger liggen. De laagste kadehoogte daar geeft bovenop de waakhogte van 0,10 meter, een overhoogte van minimaal 0,20 meter.

⁶ In bijlage B7 is een foto opgenomen van deze locatie en andere locaties waar sommige kadesecties volgens het kadehoogtebestand van waterschap Groot Salland een onjuiste/te lage kadehoogte hebben meegekregen.

De lijn in figuur 3.3 laat een grillig verloop zien, maar het is duidelijk dat op meerdere locaties de kaden niet voldoende op hoogte zijn om een waterstand, met een herhalingsfrequentie van 1/200 jaar, te kunnen keren. Maatregelen zijn nodig om de veiligheid tegen overstromen in het gebied, conform de norm, te kunnen waarborgen.

Figuur 3.4 geeft de vergelijking weer tussen de hoogwaterstanden (inclusief waakhoogte) en de kadehoogten aan weerszijden van de waterlopen. Het figuur geeft een ruimtelijk overzicht van de problematiek en maakt het mogelijk een inventarisatie te maken van de totale lengte aan kaden die onvoldoende op hoogte zijn. Tabel 3.1 geeft een overzicht weer van de geschatte totale lengte van kaden die onvoldoende op hoogte zijn, gedifferentieerd per waterloop.



Figuur 3.4: Vergelijking hoogwaterstanden en kadehoogten aan weerszijden van de waterlopen. Twee secties van kaden zijn met een stippellijn aangegeven, dit betreft de Sekdoornse dijk en een gedeelte van de kade waar recent het bergingsgebied Sekdoorn is aangelegd. Op beide locaties ontbreekt informatie over de kadehoogte.

Tabel 3.1: Overzicht lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte per waterloop.

	Zwolle	Almeloos kanaal	Nieuwe Wetering	Soestwetering	Totaal
Lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte [m]	3.500	750	1.000	4.000	9.250

Door in het hydraulische model op de locaties waar de kadehoogte ontoereikend is (rood aangegeven in figuur 3.4) stuwen te modelleren, is een indicatie te geven van de hoeveelheid water die onder maatgevende condities over de kaden stroomt. De klephoogten van deze stuwen zijn zo gekozen dat zij gelijk zijn aan de gemiddelde laagste kadehoogten op de betreffende locatie. Sommatie van het debiet over deze stuwen geeft aan dat circa 1.700.000 m³ water over de keringen stroomt en in het achterland geborgen wordt. Omdat niet voor alle kades in Zwolle de hoogtes bekend zijn, is hierbij aangenomen dat de kaden langs de stadsgrachten in Zwolle niet overstromen.

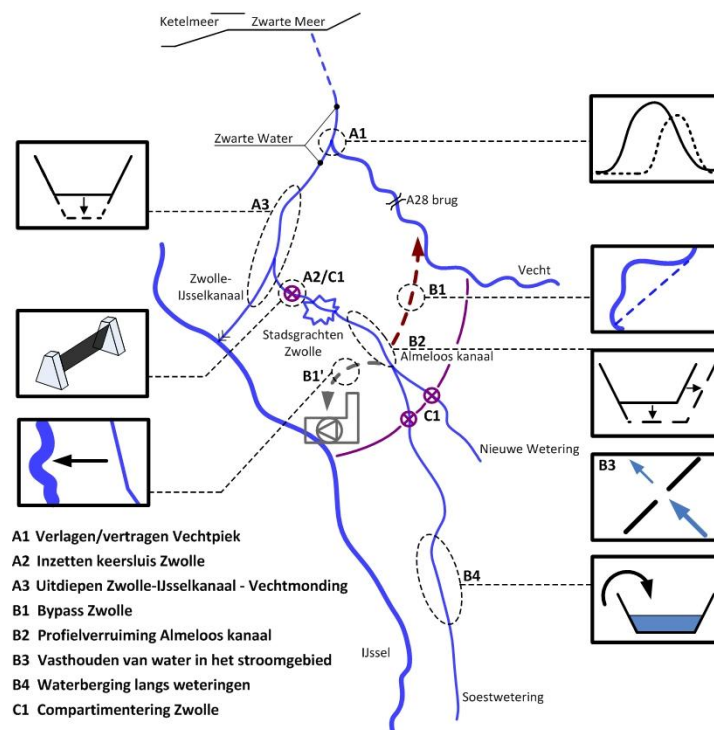
4 Maatregelselectie

In de voorgaande hoofdstukken zijn het watersysteem, de vertaling hiervan naar een modelomgeving en het probleem beschreven. De verkennende analyse laat zien dat in de huidige situatie de kadehoogten langs de Sallandse Weteringen en de Zwolse grachten op meerdere locaties niet voldoende op hoogte zijn om de hoogwaterstanden te kunnen keren. Het is duidelijk dat maatregelen nodig zijn om te voldoen aan de vastgestelde veiligheidsnorm.

Dit hoofdstuk behandelt in hoofdlijnen het proces van ideeën tot nadere concretisering bij het opstellen, selecteren en analyseren van mogelijke maatregelen. Bij de selectie van de maatregelen zijn een kwalitatieve effectbepaling, de mogelijkheid tot (kwantitatieve) analyse en een breder onderzoeksoordeel leidend geweest.

4.1 Workshop: opstellen van de maatregelen

Door middel van een workshop, gehouden op 21 oktober 2009 in het provinciehuis van Overijssel, is met verschillende gebiedsexperts in de breedte gezocht naar mogelijke waterstandverlagende maatregelen voor de Sallandse Weteringen en de stadsgrachten van Zwolle. In bijlage B8 is een verslag opgenomen van deze workshop en het aanvullende bezoek aan waterschap Groot Salland. Deze bijlage geeft een overzicht van de deelnemers en een samenvatting van de belangrijkste (discussie)punten van beide bijeenkomsten. Tijdens de workshop zijn door de deelnemers verschillende maatregelen voorgesteld. De maatregelen zijn zeer divers en grijpen in op verschillende punten binnen het systeem. Figuur 4.1 geeft een schematisch overzicht van de voorgestelde maatregelen.



Figuur 4.1: Schematisch overzicht voorgestelde maatregelen.

Bij de zogenaamde A-maatregelen ligt de focus op het verlagen van de waterstand in Zwolle terwijl deze focus bij de B-maatregelen op de Weteringen ligt. Deze tweedeling is gebaseerd op hetgeen gepresenteerd is in §2.3.2, waarin aangetoond is dat de afvoer van de Sallandse Weteringen een beperkte invloed heeft op de hoogwaterstanden in Zwolle. De hoogwaterstanden in Zwolle worden gedomineerd door de waterstand op de benedenrand (Vechtmonding). Bovenstrooms van Zwolle langs het Almeloos

kanaal, de Soestwetering en de Nieuwe Wetering wordt de bijdrage van de afvoer van de Sallandse Weteringen op de hoogwaterstanden groter. Maatregel C1: compartimentering van Zwolle is voorgedragen als combinatiemaatregel met een duidelijke focus op beide deelsystemen. Deze en andere combinatiemaatregelen worden in hoofdstuk 5 behandeld. Nadrukkelijk wordt het ophogen van dijken niet meegenomen, zoals besproken in §1.4.

4.2 Screening

Een screening van de maatregelen dient er toe om de voorgestelde maatregelen door een eerste zeef te halen en zo het aantal oplossingsrichtingen te beperken en aan te scherpen. De 'maaswijdte' van deze zeef wordt bepaald door de volgende set van criteria:

- *Kwalitatieve effectbepaling*
Tijdens de workshop zijn de voorgestelde maatregelen op een kwalitatieve wijze beoordeeld op de effectiviteit die bieden in het verlagen van de hoogwaterstanden. Wanneer het effect van een maatregel gering of zelfs negatief wordt verondersteld, resulteert dit in de eliminatie van de betreffende maatregel uit de lijst van voorgestelde maatregelen.
- *Mogelijkheid tot (kwantitatieve) analyse*
Door dit criterium toe te passen wordt de mogelijkheid getoetst of de effectiviteit van een maatregel op een kwantitatieve manier is te beoordelen. Deze beoordeling geeft meer inzicht in de effectiviteit van een maatregel en maakt een vergelijking tussen alternatieve maatregelen inzichtelijker.
- *Aansluiting bij het onderzoek*
Maatregelen worden hierbij beoordeeld op de volgende drie punten:
 - beschikbare kennis/informatie met betrekking tot de maatregelen;
 - wenselijkheid tot analyse van de maatregel in relatie tot de doelstelling van het onderzoek;
 - eerder onderzoek; waarin de effectiviteit van een maatregel voor dit systeem al onderzocht.

Omdat het hier een screening betreft is enkel gescoord door een voldoende (V) of onvoldoende (O) toe te kennen. Wanneer een maatregel onvoldoende scoort op één of meer van de opgestelde criteria zal deze niet worden meegenomen in de nadere analyse. Een beknopt overzicht van deze screening is te vinden in bijlage B9.

Uit het overzicht in de bijlage volgt dat de volgende maatregelen niet worden meegenomen in de nadere analyse:

Uitdiepen Zwolle-IJsselkanaal en het Zwarte Water op het traject Zwolle-Vechtmonding (A3)

Discussie tijdens de workshop leerde dat deze maatregel niet bijdraagt aan het reduceren van de waterstanden op het regionale systeem. Het Zwolle-IJsselkanaal voert in principe geen water af en uitdieping zal dan ook niet bijdragen aan een verlaging van de waterstand op de Vechtmonding. Hetzelfde geldt voor het traject Zwolle-Vechtmonding, als zijrivier van de Vecht zal uitdieping niet of nauwelijks effect sorteren.

Waterberging langs de Sallandse Weteringen (B4)

Onderzoek naar de effectiviteit van deze maatregel in het verlagen van de hoogwaterstanden op de Sallandse Weteringen en in Zwolle, is uitgevoerd door Versteeg *et al.* (2008). Voor verschillende inrichtingsvarianten is uit deze studie gebleken dat het inzetten van bergingsgebieden langs de Soestwetering zeer effectief is om de waterstanden op de Weteringen te reduceren (+/- 20 cm). In Zwolle is het effect echter gering (+/- 4 cm). Hoewel het Waterschap het uitgangspunt hanteert om geen grootschalige bergingsgebieden in te zetten (zie WGS, 2008b. p.44), kan dit standpunt het heroverwegen waard zijn. Naast de dimensionering van een dergelijk bergingsgebied is een goede timing van het inzetten van essentieel belang. Niet te vroeg, anders zit het gebied al vol als de piekafvoer passeert, maar ook niet te laat, want dan wordt deze piek juist gemist.

4.3 Analyse individuele maatregelen

Deze paragraaf biedt een nadere analyse van de geselecteerde maatregelen. Vergelijking van de maatregelen op basis van de effectiviteit die zij bieden, is inzichtelijk gemaakt door naast de verandering in hoogwaterstanden, gebruik te maken van een zogenaamde effectiviteitsindicator. Deze indicator geeft op een overzichtelijke wijze weer hoe effectief een bepaalde maatregel is in het verlagen van de hoogwaterstanden. Deze effectbepaling geeft een opstap naar het opstellen van mogelijke combinaties van maatregelen die kunnen worden ingezet om de hoogwaterstanden te reduceren.

4.3.1 Effectiviteitsindicator

De effectiviteitsindicator toetst de laagste kadehoogte per kadesectie aan de gesimuleerde hoogwaterstanden. In het systeem is een tweedeling aangebracht waarbij er een indicator voor de Zwolse stadsgrachten is opgesteld en een indicator voor het Almeloos kanaal en de Weteringen samen. De manier waarop beide indicatoren zijn opgesteld is identiek, alleen geven zij informatie over een ander deel van het systeem.

De hydraulische effectbepaling per maatregel is uitgevoerd met het hydraulische Sobek-model, waarin de maatregelen zijn geschematiseerd. Op verschillende locaties op de waterlopen worden met behulp van het model de maximale waterstanden onder maatgevende condities bepaald (circa iedere 250m). Na de waakhoogte er bij op te tellen, wordt deze vergeleken met de laagste kadehoogte die zich op die locatie voordoet. Zodoende kan de marge worden bepaald, welke gedefinieerd is als:

$$Marge = h_{kadehoogte} - (h_{maximale\ waterstand} + h_{waakhoogte}) \quad (vergelijking\ 1)$$

Een negatieve waarde duidt erop dat de laagste kadehoogte niet in staat is de maximale waterstand op die locatie te kunnen keren; bij een positieve waarde is dit wel het geval. Zoals in hoofdstuk 3 aangetoond zijn op meerdere locaties langs de stadsgrachten en de Weteringen verschillende kadesecties onvoldoende op hoogte om de hoogwaterstanden te kunnen keren. Op deze locaties zijn de marges dan ook negatief (zie ook figuur 3.3 op pagina 18).

Een manier om een indicatie te kunnen geven van de effectiviteit die een maatregel biedt, is door de negatieve marges per maatregel te sommeren en te vergelijken met de sommatie van de negatieve marges in de huidige situatie.

$$\Sigma \text{ Negatieve marges} \quad (vergelijking\ 2)$$

In de huidige situatie is de som van de negatieve marges in Zwolle gelijk aan -2,21 m en op het Almeloos kanaal en de Weteringen -2,89 m. Deze waarden vertegenwoordigen een indicatorscore van '0'; wanneer een maatregel deze score krijgt toegekend is de situatie in principe onveranderd. De negatieve marges bij elkaar opgeteld zijn dan gelijk aan die in de huidige situatie. De maximum score van de indicator bedraagt 1,00 en houdt in dat op iedere locatie de laagste kadehoogte in staat is de hoogwaterstanden te kunnen keren ($\Sigma \text{negatieve marges} = 0$). De minimum score is vastgesteld op -1,00 en geeft een verdubbeling van de som van de negatieve marges aan ten opzichte van de huidige situatie, een verslechtering van de situatie. Door middel van lineaire interpolatie zijn tussenliggende scores af te leiden. Tabel 4.1 geeft een schaalverdeling van de indicator, de stapgrootte van de indicator bedraagt 0,01.

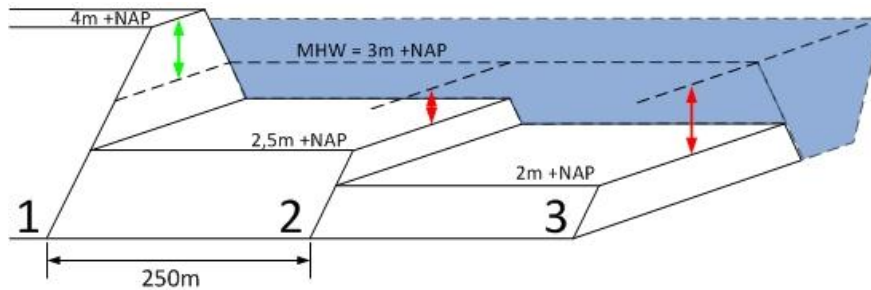
Tabel 4.1: Schaalverdeling van de effectiviteitsindicator. Het nulpunt is gerelateerd aan de huidige situatie.

					Huidig				
Σ (neg.marge) Zwolle:	-4,42	...	-3,31	...	-2,21	...	-1,10	...	0,00
Σ (neg.marge) Almeloos kanaal & weteringen:	-5,78	...	-4,34	...	-2,89	...	-1,45	...	0,00
Score indicator:	-1,00	...	-0,50	...	0,00	...	0,50	...	1,00

De effectiviteitsindicator kan gezien worden als een reductiefactor waarmee de som van de negatieve marges ten opzichte van de huidige situatie is afgenomen. In het volgende voorbeeld wordt de toepassing van de effectiviteitsindicator verduidelijkt.

Voorbeeld:

Met behulp van het hydraulische Sobek-model is de maximale waterstand (MHW), inclusief waakhogte, bepaald op 3 m +NAP. In dit voorbeeld worden drie kadesecties in beschouwing genomen. Figuur 4.2 geeft de voorbeeldsituatie schematisch weer.



Figuur 4.2: Voorbeeld bij de effectiviteitsindicator. Kadesecties 1, 2 en 3 hebben de laagste kadehoogte van de betreffende sectie meegekregen.

Kadesecties 1, 2 en 3 hebben de volgende marges (volgens vergelijking 1):

Kadesectie 1:	$4\text{ m} + \text{NAP} - 3\text{ m} + \text{NAP} = 1\text{ m}$	(groene pijl in fig.4.2)
Kadesectie 2:	$2,5\text{ m} + \text{NAP} - 3\text{ m} + \text{NAP} = -0,5\text{ m}$	(rode pijl links in fig.4.2)
Kadesectie 3:	$2\text{ m} + \text{NAP} - 3\text{ m} + \text{NAP} = -1\text{ m}$	(rode pijl rechts in fig.4.2)

De berekende marges geven aan wat er op basis van figuur 4.2 al gesteld kon worden: kadesectie 2 en 3 zijn onvoldoende op hoogte om de maximale waterstand (inclusief waakhogte) te kunnen keren. De som van de negatieve marges is gelijk aan (volgens vergelijking 2):

$$-0,5\text{ m} + -1\text{ m} = -1,5\text{ m}$$

Overeenkomstig de situatie zoals hiervoor beschreven voor Zwolle en de Weteringen kan deze som van de negatieve marges in de huidige situatie gekoppeld worden aan een '0'-score op de effectiviteitsindicator.

Wanneer de som van de negatieve marges gelijk is aan nul voldoen alle kadesecties en wordt de maximale score van 1,00 gehaald. Wanneer de som van de negatieve marges verdubbelt ten opzichte van de huidige situatie ($2 \times -1,5\text{ m} = -3\text{ m}$), wordt de minimum score van -1,00 behaald. Ook hier kunnen alle tussenliggende scores op basis van lineaire interpolatie worden afgeleid.

Stel dat door het nemen van een bepaalde maatregel de MHW, inclusief waakhogte, uit het voorbeeld daalt met 0,5 m tot 2,5 m +NAP. Alleen kadesectie 3 voldoet in dit geval niet en heeft een negatieve marge van -0,5 m ($2\text{ m} + \text{NAP} - 2,5\text{ m} + \text{NAP}$). Omdat alleen kadesectie 3 niet voldoet, is dit ook gelijk aan de som van alle negatieve marges. De effectiviteitsindicator, na het nemen van de maatregel, zal in dit geval een positieve score geven omdat de situatie (de mate waarin de keringen de hoogwaterstanden kunnen keren) is verbeterd. Op basis van lineaire interpolatie wordt een indicatorscore van $0,67^7$ verkregen.

Bovenstaande werkwijze houdt in dat de gepresenteerde effectiviteitsindicator een onderscheidt kan maken tussen situaties waarbij tenminste één of meerdere kadesecties niet voldoende op hoogte zijn om de maximale hoogwaterstand, inclusief waakhogte, te kunnen keren. Wanneer dit wel het geval is wordt telkens de maximale score (1,00) toegekend. Dit in lijn met het doel van het onderzoek waarin wordt onderzocht welke maatregelen, in welke mate kunnen worden ingezet om tenminste te voldoen aan de

⁷ Effectiviteitsindicator als reductiefactor waarmee de som van de negatieve marges ten opzicht van de huidige situatie is afgenomen: $0,67 \times -1,5\text{ m} = -1\text{ m}$. Een negatieve afname, oftewel een toename van 1m ($-1,5\text{ m} + 1\text{ m} = -0,5\text{ m}$).

veiligheidsnorm. In het voorbeeld betekent dit dat een maatregel die de maximale hoogwaterstand (incl. waakhoogte) verlaagd tot 2 m +NAP (alle kadesections voldoende op hoogte) dezelfde indicatorscore krijgt toebedeeld als een maatregel die een verlaging tot 1 m +NAP tot gevolg heeft, namelijk de maximale score van 1,00. Een onderscheid tussen deze maatregelen zou gemaakt kunnen worden door in deze gevallen een analyse uit te voeren van de som van de positieve marges. Dit is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

4.3.2 Verlagen/vertragen Vechtpiek (A1)

De waterstand op de Vecht/Zwarte Water bepaalt in grote mate de hoogwaterstanden in Zwolle en in mindere mate die op de Weteringen. Hoge Vechtafvoeren zijn sterk gecorreleerd aan hoge afvoeren op de Weteringen, verondersteld is dat de hoogwatergolf op de Vecht 32 uur achterloopt op afvoergolf vanuit Salland. Door in het hydraulische model het waterstandsverloop op de Vechtmonding te manipuleren, kan het effect van het verlagen dan wel vertragen van de afvoergolf op de Vecht worden gesimuleerd⁸. Hierbij wordt niet naar de praktische uitvoering van de maatregel gekeken maar naar het beoogde effect. Door het waterstandsverloop op de Vechtmonding te variëren, wordt inzicht verkregen in het effect van de benedenstroomse waterstand op de hoogwaterstanden in Zwolle en de Sallandse Weteringen.

Tabel 4.2 geeft voor een aantal locaties het effect op de maximale hoogwaterstanden weer bij het verlagen van de afvoergolf op de Vechtmonding. Het verlagen van de afvoergolf en daarmee ook de waterstanden op de Vecht is zeer effectief te noemen in het reduceren van de hoogwaterstanden in Zwolle. Tot een verlaging van circa 50 cm op de Vechtmonding dalen de hoogwaterstanden in Zwolle met gelijke trend mee. Bij verdere verlaging levert de afvoer vanuit de Weteringen een steeds grotere bijdrage aan de hoogwaterstanden in Zwolle en zal het verder verlagen van de waterstand op de Vecht minder effectief zijn. Bij alle varianten geldt dat verder bovenstrooms van Zwolle de bijdrage van de afvoer vanuit het achterland van steeds grotere invloed is op de hoogwaterstanden. Hiermee wordt het effect van het verlagen van de benedenrand verder bovenstrooms steeds geringer. Bij iedere variant is de waterstandsval op de Weteringen kleiner dan die in Zwolle. Het geringe verhang in de hoogwaterlijn op de stadsgrachten en het relatief lage maximaal toelaatbaar peil van 1,80 m +NAP zorgen ervoor dat de effectiviteitsindicator op een scherpe grens zal omslaan naar de score 1,00. Dit omslagpunt wordt gevonden bij een maximale waterstand op de Vechtmonding van 1,61 m +NAP⁹.

Tabel 4.2: Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij het verlagen van de afvoerpiek op de Vecht en afgeleide indicatorscore per maatregel.

de Vecht en afgeleide indicator score per maatregel.									
Locatie	Verlaging op de Vechtmonding								
	huidig	-0,12 m	Δ	-0,20 m	Δ	-0,37 m	Δ	-0,50 m	Δ
Begin Zwarte Water	1,97	1,85	-0,12	1,77	-0,20	1,60	-0,37	1,48	-0,49
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	1,92	-0,12	1,84	-0,20	1,67	-0,37	1,56	-0,48
Gerenvonder	2,29	2,20	-0,09	2,13	-0,16	2,03	-0,26	1,92	-0,37
Langeslag	2,49	2,42	-0,07	2,36	-0,13	2,26	-0,23	2,20	-0,29
Wijhe	2,63	2,56	-0,07	2,51	-0,12	2,43	-0,20	2,38	-0,25
indicator Zwolle	-	0,47		0,85		1,00		1,00	
indicator Weteringen	-	0,51		0,80		0,95		1,00	

⁸ Vertragen van de afvoerpiek zal in de praktijk samengaan met een verlaging van de piekafvoer, dit gecombineerde effect is omwille van het overzicht niet meegenomen. Ook is aangenomen dat de vorm van de afvoergolf niet verandert.

⁹ Rekening houdend met een waakhoogte van 0,10m en opstuwend effect van de keersluis in Zwolle van 0,07m.

1,80m +NAP (maximaal toelaatbaar peil) – 0,10m (waakhoogte) – 0,09m (opstuwung keersluis en verhang hoogwaterlijn) = 1,61m +NAP. Dit is een daling van 0,26m ten opzichte van de huidige maatgevende waterstand op de Vechtmonding van 1,87m +NAP.

Het effect van het vertragen van de afvoergolf op de Vecht is weergegeven in tabel 4.3. Uit de resultaten blijkt dat een vertraging van de afvoergolf op de Vecht, bij iedere variant, de hoogwaterstanden in Zwolle met 5 cm doet dalen. De optredende waterstanden daar blijven gedomineerd worden door het waterstandsverloop op de Vecht, met slechts een beperkte bijdrage van de afvoer vanuit de Weteringen (+2 cm). De grootste daling van de waterstand laat zich zien op het Almeloos kanaal (7 tot 13 cm, bij een vertraging van respectievelijk 24 en 36 uur), wat te duiden is als het transitiegebied tussen dominantie van de Vechtwaterstand en de afvoer uit Salland op de waterstanden. Verder bovenstrooms, op de Weteringen, blijkt de maatregel voor grote vertragingstijden minder effectief (9 cm daling bij een vertraging van 36 uur) in vergelijking met de daling van de hoogwaterstanden op het Almeloos kanaal. Ook dit is te verklaren door het feit dat verder bovenstrooms op de Weteringen de waterstanden voor het grootste deel worden bepaald door de afvoer vanuit het achterland.

Het versnellen van de afvoerpiek op de Vecht met 24 uur resulteert in hogere waterstanden op de verschillende locaties. De afvoerpiek op de Vecht en de Weteringen vallen nu, met een faseverschil van 8 uur, meer samen en zorgen ervoor dat vooral in Zwolle de waterstanden stijgen. De invloed van de afvoer op de hoogwaterstanden wordt hier groter, al is de stijging gering (3 cm).

Tabel 4.3: Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij het vertragen/versnellen van de afvoerpiek op de Vecht en afgeleide indicatorscore per maatregel.

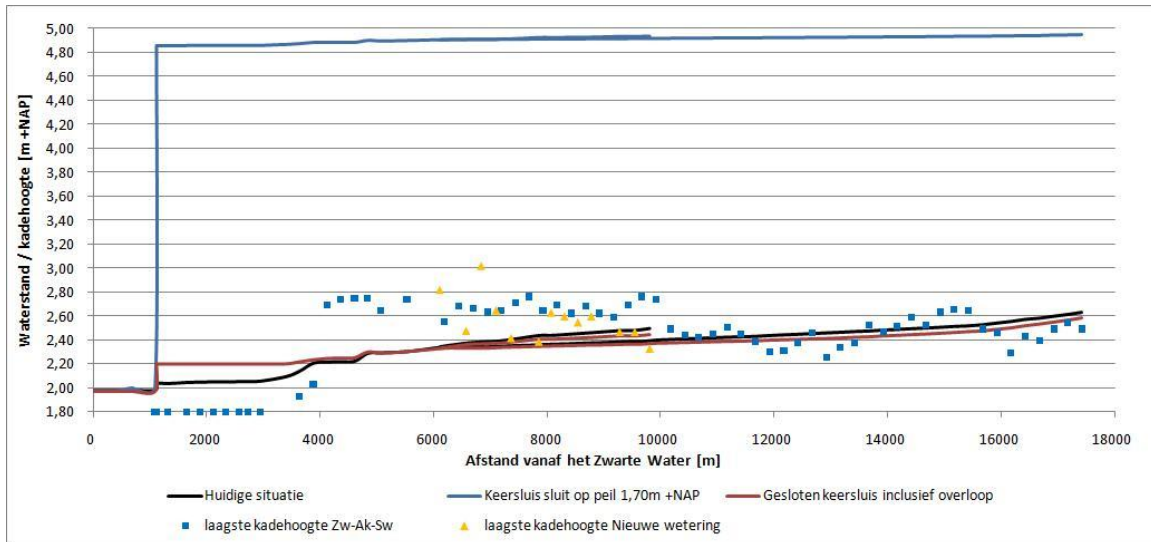
Locatie	Vertragen afvoergolf Vecht						Versnellen		
	huidig	12 uur	Δ	24 uur	Δ	36 uur	Δ	-24 uur	Δ
Begin Zwarte Water	1,97	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00	1,98	0,01
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	1,99	-0,05	1,99	-0,05	1,99	-0,05	2,07	0,03
Gerenvonder	2,29	2,25	-0,04	2,22	-0,07	2,16	-0,13	2,31	0,02
Langeslag	2,49	2,46	-0,03	2,43	-0,06	2,40	-0,09	2,51	0,02
Wijhe	2,63	2,59	-0,04	2,57	-0,06	2,54	-0,09	2,64	0,01
indicator Zwolle	-	0,18		0,22		0,22		-0,12	
indicator Weteringen	-	0,26		0,44		0,60		-0,15	

In bijlage B10 zijn voor bovengenoemde varianten het complete lengteprofiel van de hoogwaterstanden opgenomen waarbij ook een vergelijking met de laagste kadehoogte is gegeven.

4.3.3 Wijzigen sluiting- en openingsalgoritme keersluis Zwolle (A2)

Uitgaande van het huidige systeem kan de keersluis in Zwolle worden ingezet om de hoogwaterstanden op het Zwarte Water te keren. Door de keersluis in te zetten als peilscheiding kunnen hoge waterstanden op de Vecht en het Zwarte Water buiten Zwolle worden gehouden.

De kering sluit wanneer de waterstand op het Zwarte Water een kritieke waarde heeft bereikt en blijft gesloten zolang deze waarde wordt overschreden. Deze kritieke waarde is gekozen op 1,70 m +NAP. Rekening houdend met een waakhoogte van 0,10m is deze waarde gelijk aan het maximaal toelaatbaar peil in Zwolle van 1,80 m +NAP. Afvoeren van de Sallandse Weteringen worden achter de keersluis (aan Zwolse zijde) geborgen en veroorzaken, bij gesloten keersluis en zonder nadere maatregelen, een waterstandsverhoging in Zwolle. Door de beperkte omvang van de boezem zullen hier de waterstanden snel stijgen en alsnog over de kaden lopen. Deze maatregel is daarom alleen effectief in combinatie met een maatregel bovenstrooms van Zwolle die de afvoer vanuit Salland effectief afvangt. Dit wordt treffend weergegeven in figuur 4.3 waarbij de waterstanden achter de gesloten keersluis de kadehoogten fors overschrijden. Hierbij wordt door de gesloten keersluis het water tot circa 4,80 m +NAP opgestuwd.



Figuur 4.3: Lengteprofiel hoogwaterstanden bij gesloten keersluis (sluitpeil 1,70m +NAP) met en zonder overloop.

Ook geeft het figuur de hoogwaterstanden weer wanneer rekening wordt gehouden met het overstromen van lage kaden. Ook hierbij is aangenomen dat langs de stadsgrachten geen overstromingen plaatsvinden. Op dezelfde manier als beschreven in §3.3 is een indicatie te geven van de hoeveelheid water die over de kaden stroomt. De keersluis zal bij een sluitpeil van 1,70 m +NAP op het Zwarte Water ongeveer 6,5 dagen gesloten zijn (zie figuur 2.8). Uit de analyse volgt dat binnen deze tijd circa 20.000.000 m³ water over de kaden zal stromen, dit is ruim 42% van de afvoer over de stuwen Wijhe en Langeslag. Het overgrote deel hiervan vindt benedenstrooms van het Almeloos kanaal zijn weg over de lage kades. De totale hoeveelheid water zal in werkelijkheid lager zijn omdat hier geen rekening is gehouden met mogelijke stremming van het overstromende water. Stremming en terugvloeïing van het water na de afvoerpiek zal vrijwel zeker plaatsvinden in Zwolle, waar direct naast de kaden hogere gronden liggen.

4.3.4 Bypass Zwolle (B1)

Bij maatregel B1, in figuur 4.1, is voorgesteld om de afvoer van de Sallandse Weteringen (deels) om Zwolle te leiden door middel van een bypass. Vereenvoudigd kan een bypass worden gezien als een zijdelingse onttrekking van een deel van het debiet waardoor benedenstrooms en in mindere mate ook bovenstrooms de waterstanden zullen dalen. In totaal heeft onderzoek plaatsgevonden naar een drietal varianten waarbij in eerste instantie is onderzocht of vrij afvoeren op de Vecht een realistische optie is. Bij de overige twee varianten wordt afgevoerd op de IJssel, door middel van een gemaal (variant 2) en is onderzocht of onder vrij verval afvoeren mogelijk is door gebruik te maken van het Zwolle-IJssel kanaal (zie figuur 4.1) als bypass (variant 3).

De effectiviteit van een mogelijke bypass die aansluiting vindt op de Vecht is in grote mate afhankelijk van de optredende waterstanden op deze rivier in relatie met hoogwaterstanden op de Weteringen. Onderzoek naar de effectiviteit van een dergelijke bypass is uitgevoerd door in het hydraulische model het Almeloos kanaal, ter hoogte van Gerenvonder, via een kanaal te verbinden met de Vecht, bovenstrooms van de A28-brug bij Zwolle (zie figuur 4.1). De waterstanden op deze locatie zijn afgeleid door het waterstandsverloop op de Vechtmonding te nemen en hier 80 cm¹⁰ bij op te tellen. Dit nieuwe waterstandsverloop is gebruikt als randvoorwaarde op de betreffende locatie. Het verschil van 80cm is over een afstand van 7 kilometer, vanaf de monding van de Vecht, een relatief groot verschil en kan verklaard worden door het verhang van de rivier zelf en het opstuwende effect van onder andere de brug

¹⁰ Op basis van het Sobek-river model van de Overijsselse Vecht, zoals beschreven in Van Vuren *et al.* (2009). Voor de 1/200 jaar situatie is hiermee het verschil in waterstanden tussen de Vechtmonding en de bovenstroomse locatie bepaald, deze bedraagt 80cm.

nabij Zwolle. Tabel 4.4 laat voor de geselecteerde locaties het effect op de hoogwaterstanden zien. Bij wijze van vergelijking is ook een case opgenomen waarbij de waterstand bovenstrooms van de brug identiek is aan die op de Vechtmonding.

Tabel 4.4: Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij twee bypass-varianten op de Vecht en afgeleide indicatorscores voor beide varianten.

Locatie	Bypass Zwolle-Vecht				
	huidig	Bovenstrooms van de A28-brug		Locatie Vechtmonding	
		+0,80cm	Δ		Δ
Begin Zwarte Water	1,97	2,00	0,03	1,97	0,00
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	2,15	0,11	1,99	-0,05
Gerenvonder	2,29	2,59	0,30	2,03	-0,26
Langeslag	2,49	2,78	0,29	2,25	-0,24
Wijhe	2,63	2,88	0,25	2,42	-0,21
indicator Zwolle	-	-0,50		0,24	
indicator Weteringen	-	<-1		0,84	

De waterstand benedenstrooms van de A28-brug, nabij Zwolle is dermate hoger in vergelijking met de waterstand op de Vechtmonding dat een bypass op deze locatie niet effectief is en er zelfs voor zorgt dat de hoogwaterstanden in Zwolle en verder bovenstrooms fors toenemen. Door het hogere peil op deze locatie van de Vecht stromen grote hoeveelheden water het systeem binnen. Hierdoor nemen de hoogwaterstanden in Zwolle en op de Weteringen toe waardoor de effectiviteitsindicator dan ook negatief uitslaat. Wordt een waterstandsverloop aangenomen die identiek is aan die op de Vechtmonding (vergelijkbaar met de bypass laten aansluiten op de Vechtmonding) dan is er een positief effect te vernemen. In die situatie dalen de waterstanden op het Almeloos kanaal en in mindere mate verder bovenstrooms aanzienlijk (+/- 25 cm), wat zich vertaalt in relatief hoge indicatorscores. Beide varianten laten een relatief klein effect op de stadsgrachten zien. Dit omdat het probleem daar niet zozeer hydraulisch is (veroorzaakt door een grote afvoer), maar gedomineerd wordt door de benedenstroomse waterstand. Doordat men met het aansluiten van de bypass op de Vechtmonding een lang kanaal dient aan te leggen, dat voor het overgrote deel dwars door het stedelijk gebied van Zwolle loopt, is deze maatregel weliswaar zeer effectief, maar niet realistisch te noemen.

Verder zijn de mogelijkheden onderzocht om (een deel van) de afvoer van de Weteringen om te leiden naar de IJssel. Hiervoor is ten eerste gekeken naar de effectiviteit die eenemaal met grote capaciteit biedt in het wegpompen van water uit de Weteringen. Daarnaast is onderzocht of het mogelijk is om tijdens hoogwatersituaties op de Vecht en Weteringen onder vrij verval via het Zwolle-IJssel kanaal en de Spooldersluis af te voeren op de IJssel. Hetemaal is eveneens in het model gemodelleerd ter hoogte van Gerenvonder langs het Almeloos kanaal. Voor verschillende pompcapaciteiten is de effectiviteit van een dergelijke maatregel bepaald. Tabel 4.5 ondersteunt de redenering die logischerwijs gemaakt kan worden: een grotere pompcapaciteit levert een grotere waterstandsval op. Bij de grootste pompcapaciteit (90 m³/s) kan de gehele piekafvoer van de Weteringen weggepompt worden en volgen de hoogwaterstanden benedenstrooms van Gerenvonder de maximale waterstand op de Vechtmonding (1,97 m +NAP, inclusief waakhoogte). Doordat de waterstanden nabij Gerenvonder dalen, zet dit effect zich bovenstrooms op de Weteringen door vanwege de verhanglijnen die zo ontstaan.

De uitkomsten laten zien dat het elimineren van de piekafvoer op de Weteringen alleen niet voldoende is. In Zwolle wordt een maximale indicatorscore van 0,30 behaald en op de Weteringen zelf een score van 0,87. Dit houdt in dat op beide "deelsystemen" niet alle kaden in staat zijn de maximale hoogwaterstanden (incl. waakhoogte) te kunnen keren.

Tabel 4.5 Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij verschillende pompcapaciteiten van een gemaal nabij Gerenvonder en afgeleide indicatorscore per maatregel.

Locatie	Bypass Zwolle-IJssel (afvoeren d.m.v. gemaal)									
	huidig	90 m ³ /s	Δ	60 m ³ /s	Δ	40 m ³ /s	Δ	20m ³ /s	Δ	
Begin Zwarte Water	1,97	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00	
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	1,97	-0,07	1,97	-0,07	1,98	-0,06	2,01	-0,03	
Gerenvonder	2,29	1,97	-0,32	1,98	-0,31	2,04	-0,25	2,13	-0,16	
Langeslag	2,49	2,16	-0,33	2,20	-0,29	2,26	-0,23	2,33	-0,16	
Wijhe	2,63	2,35	-0,28	2,37	-0,26	2,42	-0,21	2,49	-0,14	
indicator Zwolle	-	0,30		0,30		0,25		0,13		
indicator Weteringen	-	0,87		0,87		0,83		0,72		

Uit de tabel blijkt verder dat het inzetten van een gemaal met een pompcapaciteit van 90 m³/s nauwelijks effectiever blijkt in het verlagen van de hoogwaterstanden dan een gemaal met een pompcapaciteit van 60 m³/s. Verklaring hiervoor kan worden gevonden in het feit dat beide gemalen pas aan gaan wanneer de piekafvoer op de Weteringen passeert (afvoer > 25 m³/s, zie figuur 2.7). De gemalen zijn zo ingeregeld dat het debiet wat wordt weggepompt gelijk is aan de afvoer op de Weteringen tot aan de maximale pompcapaciteit. Hierdoor kan in het geval van een pompcapaciteit van 90 m³/s de gehele piekafvoer worden weggepompt en zal in het geval van een lagere pompcapaciteit van 60 m³/s de piekafvoer afnemen tot ongeveer 24 m³/s (84 m³/s – 60 m³/s). Deze afvoer is slechts iets kleiner dan de afvoer op de Weteringen voordat de gemalen in werking worden gezet.

In bijlage B10 zijn voor bovengenoemde varianten het complete lengteprofiel van de hoogwaterstanden opgenomen waarbij ook een vergelijking met de laagste kadehoogte is gegeven.

Na analyse van de optredende waterstanden op de IJssel in relatie met hoogwater op de Vecht (zie bijlage B11) kan geconcludeerd worden dat vrij afvoeren op de IJssel, zoals voorgesteld in de laatste variant, niet haalbaar blijkt. De waterstanden op de IJssel zijn, zeker tijdens hoge Vechtafvoeren, hoger dan die op de Vechtmonding/Zwarte Water. Door deze hogere benedenrand zal water vanuit de IJssel richting Zwolle stromen en zullen de waterstanden in Zwolle en op de Weteringen hierdoor toenemen. Dit is vergelijkbaar met de case waarbij aansluiting wordt gevonden op de Vecht bovenstrooms van de A28-brug.

4.3.5 Profielverruiming Almeloos kanaal (B2)

De hoogwaterstanden, zoals weergegeven in §3.2, laten een relatief groot verhang zien op het Almeloos kanaal. De beperkte dimensionering van het kanaal ligt hieraan ten grondslag. Tijdens de workshop is aangegeven dat bij het toewijzen van het Almeloos kanaal als centrale afvoer de geringe afmetingen van het kanaal al als problematisch werden aangemerkt. Destijds is besloten om vanwege de hoge kosten de kwestie op een zijspoor te zetten. Verruiming van het Almeloos kanaal zorgt voor een groter doorstromend oppervlak en draagt daardoor bij aan het verlagen van de waterstanden. Hierdoor zullen niet alleen lokaal maar ook bovenstrooms de waterstanden dalen. Hoewel zowel verbreding als verdieping van het kanaal worden meegenomen in de analyse lijkt een verdieping van het kanaal meer voor de hand te liggen. Dit omdat het Almeloos kanaal door het stedelijke gebied van Zwolle stroomt en daardoor de beschikbare ruimte aan weerszijden van de waterloop beperkt is.

Tabel 4.6 en 4.7 geven de resultaten weer na modellering van respectievelijk verbreding en verdieping van het Almeloos kanaal in het stromingsmodel.

Tabel 4.6: Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij een verbreding van het Almeloos kanaal en afgeleide indicatorscores per maatregel.

Locatie	Verbreden van het Almeloos kanaal								
	huidig	2m	Δ	5m	Δ	10m	Δ	20m	Δ
Begin Zwarte Water	1,97	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	2,04	0,00	2,04	0,00	2,04	0,00	2,04	0,00
Gerenvonder	2,29	2,26	-0,03	2,21	-0,08	2,18	-0,11	2,15	-0,14
Langeslag	2,49	2,45	-0,04	2,41	-0,08	2,38	-0,11	2,35	-0,14
Wijhe	2,63	2,59	-0,04	2,55	-0,08	2,53	-0,10	2,50	-0,13
indicator Zwolle	-	0,00		0,00		0,00		0,00	
indicator Weteringen	-	0,26		0,47		0,57		0,67	

Tabel 4.7: Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhoogte) voor geselecteerde locaties bij een verdieping van het Almeloos kanaal en afgeleide indicatorscores per maatregel.

Locatie	Verdiepen van het Almeloos kanaal								
	huidig	1m	Δ	2m	Δ	3m	Δ	5m	Δ
Begin Zwarte Water	1,97	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	2,04	0,00	2,04	0,00	2,04	0,00	2,04	0,00
Gerenvonder	2,29	2,19	-0,10	2,15	-0,14	2,13	-0,16	2,11	-0,18
Langeslag	2,49	2,39	-0,10	2,35	-0,14	2,33	-0,16	2,32	-0,17
Wijhe	2,63	2,54	-0,09	2,50	-0,13	2,49	-0,14	2,48	-0,15
indicator Zwolle	-	0,00		0,00		0,00		0,00	
indicator Weteringen	-	0,53		0,66		0,70		0,72	

Beide tabellen laten zien dat door profielverruiming van het Almeloos kanaal de hoogwaterstanden op de Zwolse grachten niet dalen. Dit omdat het debiet van de Weteringen en het waterstandsverloop op de benedenrand onveranderd blijven. Verder valt op te merken dat de waterstandsval die zich op het Almeloos kanaal laat zien, zich in dezelfde mate voordoet op de Weteringen. Bij een relatief grote verdieping of verbreding van het Almeloos kanaal zal deze daling op de Weteringen relatief minder zijn, omdat het kanaal dan geen knelpunt meer vormt voor de afvoer van de Weteringen (dit is vooral merkbaar in de cases waarin het kanaal 3 en 5 meter is verdiept).

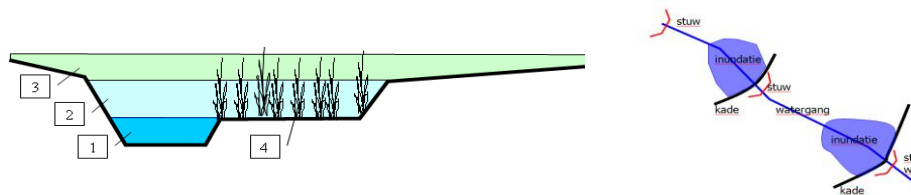
Het debiet door een geul is te benaderen met de formule van Chézy: $Q = C \cdot B \cdot h^{3/2} \cdot i^{1/2}$ en waterstand $H = h + z_b$. Een lager bodemniveau z_b levert, met dezelfde waterdiepte h behorend bij het debiet Q (en breedte B , ruwheid C en verhang i), een lagere waterstand op. De waterstand is ook uit te drukken als $H = z_b + [Q/(C \cdot B \cdot i^{1/2})]^{2/3}$ waaruit volgt dat een verlaging van de bodem van de geul dezelfde verlaging van de waterstand oplevert, aangezien de overige variabelen constant blijven. De gepresenteerde daling van de hoogwaterstanden uit tabel 4.7 volgen echter niet de verlaging waarmee de bodem is verdiept. Dit kan verklaard worden door het feit dat weliswaar de afvoer vanuit de Weteringen met iedere verlaging een steeds kleinere bijdrage levert aan de hoogwaterstanden op het Almeloos kanaal, maar dat de benedenrand een dominantere rol gaat spelen. Dit wordt in bijlage B12 geïllustreerd aan de hand van het waterstandsverloop op de locatie Gerenvonder voor enkele verdiepingsvarianten. De verschuiving naar een situatie waarin de hoogwaterstanden worden gedomineerd door de benedenrand geldt ook voor het verbreden van het Almeloos kanaal. De waterstandsval is geringer dan men volgens de relatie tussen waterstand en breedte van de geul, naar Chézy ($h \sim B^{-2/3}$), zou verwachten.

De resultaten gepresenteerd in tabel 4.6 en 4.7 laten zien dat verdieping van het Almeloos kanaal relatief gezien effectiever is in het verlagen van de hoogwaterstanden dan het verbreden van het kanaal. Zo wordt met een verbreding van 2m een indicatorscore van 0,26 behaald voor de Weteringen, terwijl een verdieping met 2m een score oplevert van 0,66. Dit kan eenvoudig verklaard worden door bovenstaande relaties tussen waterstand, bodemligging en breedte. Maar ook door het feit dat door het Almeloos kanaal te verdiepen er een relatief groter doorstromend oppervlak wordt gecreëerd dan in het geval van verbreding. Het kanaal is in de huidige situatie immers breder dan dat het diep is.

In bijlage B10 zijn voor bovengenoemde varianten het complete lengteprofiel van de hoogwaterstanden opgenomen waarbij ook een vergelijking met de laagste kadehoogte is gegeven.

4.3.6 Vasthouden van water in het achterland (B3)

Het vasthouden van water in het achterland volgt het beleid van waterschap Groot Salland. In extreme situaties is dit beleid er op gericht om verspreid in het stroomgebied water op het maaiveld te bergen. Uitgangspunt hierbij is dat elk deelstroomgebiedje het te veel aan water tijdelijk moet verwerken en het niet mag afwentelen naar benedenstrooms (lager) gelegen gebieden. Om dit te bewerkstelligen kan gedacht worden aan maatregelen als het knijpen van duikers, het verhogen van dammen en het incidenteel aanleggen van lage kades. (WGS, 2006) Daarnaast vormt de zogenaamde waternoodsystematiek een onderdeel van het waterschapsbeleid (zie figuur 4.4). De maatregelen die in het kader van deze systematiek worden genomen, hebben tot doel om de watergangen in het achterland van de Weteringen zodanig te dimensioneren dat de gewenste grondwaterstanden in de beheerssituatie kunnen worden gerealiseerd. Hiertoe worden de watergangen veelal ondieper en breder gemaakt¹¹. Neveneffect hiervan is dat de afvoercapaciteit van de watergang kleiner wordt, waardoor er vaker wateroverlast op zou treden. Dit wordt ondervangen door een deel van de watergang in te richten als berging, zodoende wordt geprobeerd te voldoen aan de NBW-werknormen voor wateroverlast (zie NBW, 2003). In het landelijk gebied komt dit grotendeels overeen met een norm ter bescherming van wateroverlast van 1/10 jaar. Mogelijke natuurontwikkeling in de watergang draagt bij aan de doelstellingen vanuit de Europese KRW (zie EU WFD, 2000). De planning is om in 2050 het gehele zandgebied binnen het stroomgebied van de Sallandse Weteringen volgens de principes van waternood in te richten. Dit komt neer op circa 31.800 ha (WGS, 1998 p.5).



Figuur 4.4: : Links: de waternoodsystematiek: (1) verontdieping van de watergang om de afvoercapaciteit te verlagen (anti-verdroging), (2) extra berging om te voldoen aan de NBW-normen, (3) in extreme situaties wordt het water op het maaiveld geborgen, (4) ecologische functie vanuit het KRW. Rechts: schets van het waterschap met daarin water op het land geborgen en vastgehouden. (Presentatie Waterschap Groot Salland, 7 januari 2009. Universiteit Twente)

Waterschap Groot Salland verwacht dat na het nemen van de waternoodmaatregelen de afvoer uit het zandgebied grofweg zal worden beperkt tot maximaal 0,8 l/s/ha. Dit in vergelijking met een maatgevende afvoer (frequentie van optreden 1/1 jaar) van 1,1 l/s/ha die het zandgebied nu genereert (WGS, 1998 p.5). Op basis van deze informatie en het areaal zandgrond kan op relatief eenvoudige wijze worden geschat wat het effect van de waternoodmaatregelen op de piekafvoer van de Weteringen is. Deze piekafvoer zal afnemen door de beperking van de afvoercapaciteit van de watergangen in het gebied van Salland. Door deze verwachte daling van de afvoerpiek te vertalen naar de bovenstroomse randvoorwaarden in het stromingsmodel kan de effectiviteit van de deze maatregelen worden onderzocht.

¹¹ Voor een gedetailleerde beschrijving van de waternoodsystematiek en twee voorbeeldcases (voor 'hoog' en 'laag' Nederland) zie STOWA (2004).

De piekafvoer van de Weteringen met een overschrijdingsfrequentie van 1/200 jaar bedraagt circa 84 m³/s (zie §2.3.1). Het stroomgebied van de Weteringen bedraagt circa 50.000 ha waardoor de piekafvoer op de Weteringen overeenkomt met een afvoer van 1,68 l/s/ha uit het achterland. Door de implementatie van de waternoodmaatregelen wordt verwacht dat vanuit het zandgebied de maximale afvoer zal worden beperkt tot 0,8 l/s/ha. Het zandgebied (31.800 ha) beslaat 63,6% van het stroomgebied. Op basis van deze informatie kan een inschatting worden gemaakt van de maatgevende afvoer op de Weteringen wanneer de waternoodmaatregelen volledig geïmplementeerd zijn:

$$0,636 \cdot 0,8 \text{ l/s/ha} + (1-0,636) \cdot 1,68 \text{ l/s/ha} = 1,12 \text{ l/s/ha}$$

$$1,12 \text{ l/s/ha} \cdot 50.000 \text{ ha} = 56.000 \text{ l/s}$$

$$56.000 \text{ l/s} = 56 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dit zou betekenen dat de piekafvoer van 84 m³/s met een derde zou worden verlaagd naar 56 m³/s. Het effect van deze reductie in piekafvoer op de hoogwaterstanden is weergegeven in tabel 4.8. Daarnaast is ook onderzocht wat het effect is van een piekafvoer van 68 m³/s, gelijk aan het in eerdere studies gehanteerde fysieke maximum van de afvoer op de Weteringen (zie §2.3.1) en een case waarin de afvoer volledig is geëlimineerd.

Tabel 4.8: Hoogwaterstanden (m +NAP, inclusief waakhogte) voor geselecteerde locaties bij verschillende afvoeren op de Sallandse Weteringen en afgeleide indicatorscores.

Locatie	Afvoer Sallandse Weteringen						
	huidig	68 m ³ /s	Δ	56 m ³ /s	Δ	0 m ³ /s	Δ
Begin Zwarte Water	1,97	1,97	0,00	1,97	0,00	1,97	0,00
Zwolle (locatie keersluis)	2,04	2,01	-0,03	2,00	-0,04	1,97	-0,07
Gerenvonder	2,29	2,19	-0,10	2,13	-0,16	1,97	-0,32
Langeslag	2,49	2,34	-0,15	2,25	-0,24	1,97	-0,52
Wijhe	2,63	2,44	-0,19	2,34	-0,29	1,97	-0,66
indicator Zwolle	-	0,11		0,16		0,30	
indicator Weteringen	-	0,71		0,80		0,87	

Uit tabel 4.8 volgt dat een beperking van de afvoer van de Weteringen een groot waterstandsverlagend effect heeft op de Weteringen en een beperkt effect op de waterstanden in de stadsgrachten van Zwolle. Dit kan verklaard worden door hetgeen gepresenteerd in §2.3.2, waarbij is aangetoond dat de afvoer uit het stroomgebied een grotere bijdrage levert aan de hoogwaterstanden op de Weteringen dan in Zwolle. Bij een piekafvoer van 56 m³/s ligt de hoogwaterlijn op de Weteringen precies onder de laagste kadehoogten, op het Almeloos kanaal echter zijn nog twee locaties waar de maximale hoogwaterstanden hoger zijn dan de laagste kadehoogten. In bijlage B10 worden de verschillende hoogwaterlijnen in relatie tot de laagste kadehoogten weergegeven. Het effect op het Almeloos kanaal is overigens geringer dan op de Weteringen, dit doordat ook met een gereduceerde piekafvoer het kanaal een hydraulisch knelpunt blijft vormen waarbij de waterstanden worden opgestuwd.

Wanneer de afvoer volledig wordt geëlimineerd, volgen de hoogwaterstanden in Zwolle alsook op het Almeloos kanaal en de Weteringen het waterstandsverloop op de Vechtmonding, met een maximale waterstand van 1,97 m +NAP (1,87m +NAP + 0,10 m waakhogte). In dit geval domineert het benedenstroomse waterstandsverloop op de Vecht de hoogwaterstanden volledig en is aangetoond dat tot ver bovenstrooms (stuw Wijhe) de benedenrand van invloed is op de waterstanden.

4.4 Deelconclusie individuele maatregelen

De scherpe tweedeling die is gemaakt bij het opstellen van de maatregelen, enerzijds met de focus op Zwolle en anderzijds op de Weteringen, komt duidelijk terug in de gepresenteerde resultaten. De analyse naar de effectiviteit van de individuele maatregelen bevestigt dat maatregelen die bovenstrooms van Zwolle worden genomen vooral effect hebben op de waterstanden langs de Weteringen. Door deze bovenstroomse maatregelen kunnen de waterstanden in Zwolle tot maximaal 7 cm dalen, dit is gelijk aan het opstuwende effect veroorzaakt door de keersluis bij Zwolle (zie tabel 4.8). Benedenstroomse maatregelen (lees: manipulatie van het waterstandsverloop op de Vechtmonding) zijn daarentegen juist effectief in het verlagen van de waterstanden op de stadsgrachten in Zwolle.

In tabel 4.9 is een samenvattend overzicht opgenomen van de verschillende individuele maatregelen en de scores op de effectiviteitsindicator. Hierbij was de score "0" gedefinieerd als een situatie waarbij geen verandering is ten opzichte van de huidige situatie. Bij een score tussen "0" en "1,00" scoort de maatregel positief, een score van "1,00" houdt in dat alle kaden in staat zijn de maximale hoogwaterstanden (incl. waakhoogte) te kunnen keren. Een negatieve score, tussen "0" en "-1,00" houdt in dat de situatie is verslechterd, waarbij een score van "-1,00" een verdubbeling van de som van de negatieve marges ten opzichte van de huidige situatie inhoudt. Zie paragraaf 4.3.1 voor een uitgebreide behandeling van de effectiviteitsindicator.

Tabel 4.9: Overzicht score op de effectiviteitsindicator van de verschillende individuele maatregelen.

Maatregel	Indicatorscore Zwolle	Indicatorscore Weteringen
A1 verlagen/vertragen benedenrand		
12 cm verlagen (max. Vecht = 1,75 m +NAP)	0,47	0,51
20 cm verlagen (max. Vecht = 1,67 m +NAP)	0,85	0,80
37 cm verlagen (max. Vecht = 1,50 m +NAP)	1,00	0,95
50 cm verlagen (max. Vecht = 1,37 m +NAP)	1,00	1,00
12 uur vertragen Vechtpiek	0,18	0,26
24 uur vertragen Vechtpiek	0,22	0,44
36 uur vertragen Vechtpiek	0,22	0,60
24 uur versnellen Vechtpiek	-0,12	-0,15
A2 inzetten keersluis Zwolle		
sluiten bij 1,70 m +NAP op Zwarte Water	<-1,00	<-1,00
B1 Bypass Zwolle-IJssel		
gemaal Gerenvonder 90 m ³ /s	0,30	0,87
gemaal Gerenvonder 60 m ³ /s	0,30	0,87
gemaal Gerenvonder 40 m ³ /s	0,25	0,83
gemaal Gerenvonder 20 m ³ /s	0,13	0,72
vrij afvoeren via Spoolderlsuis	-	-
B1 Bypass Zwolle-Vecht		
Gerenvonder - bovenstrooms A-28 brug nabij Zwolle	-0,50	<-1
Gerenvonder - locatie Vechtmonding	0,24	0,84

Vervolg tabel 4.9 op volgende bladzijde

(vervolg tabel 4.9)			
B2 Profielverruiming Almeloos kanaal			
2 meter verbreden	0,00	0,26	
5 meter verbreden	0,00	0,47	
10 meter verbreden	0,00	0,57	
20 meter verbreden	0,00	0,67	
1 meter verdiepen	0,00	0,53	
2 meter verdiepen	0,00	0,66	
3 meter verdiepen	0,00	0,70	
5 meter verdiepen	0,00	0,72	
B3 Vasthouden van water in het achterland			
piekafvoer Weteringen: 68 m ³ /s	0,11	0,71	
piekafvoer Weteringen: 56 m ³ /s	0,16	0,80	
piekafvoer Weteringen: 0 m ³ /s	0,30	0,87	

Op basis van de resultaten van de individuele maatregelen kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het verlagen van de piekafvoer op de Vecht is zeer effectief in het verlagen van de hoogwaterstanden op de stadsgrachten en de Weteringen. Wanneer tijdens maatgevende condities de waterstanden op de Vechtmonding 50 cm dalen zijn alle kaden in staat de maximale hoogwaterstanden (incl. waakhogte) te kunnen keren (indicatorscore: 1,00).
- Het vertragen van de Vechtpiek is beperkt effectief voor Zwolle. Dit is toe te schrijven aan het feit dat het waterstandsverloop op de Vechtmonding niet verandert. Doordat de pieken op de Vecht en de Weteringen verder uit elkaar liggen, vindt er tijdens de Vechtpiek minder opstuwing plaats bij de keersluis in Zwolle.
- Het sluiten van de keersluis bij Zwolle is alleen effectief wanneer de afvoer op de Weteringen volledig wordt afgevangen. Bij een gesloten keersluis zal de afvoer van de Weteringen achter de keersluis worden geborgen waardoor de hoogwaterstanden daar fors zullen toenemen.
- Een mogelijke bypass van de Weteringen waarbij vrij wordt afgevoerd op de IJssel of Vecht is alleen effectief wanneer tijdens hoogwater de waterstanden op deze rivieren lager zijn dan die op de Weteringen. Het reduceren van de afvoer van de Weteringen door het inzetten van een gemaal is effectief te noemen. Dit vereist dan wel een gemaal met een grote pompcapaciteit. De effectiviteit van deze maatregel is beperkt effectief in Zwolle (maximale indicatorscore: 0,30).
- Profielverruiming van het Almeloos kanaal heeft geen enkele invloed op de hoogwaterstanden in Zwolle. Verdiepen van het kanaal ligt, vanwege beperkte ruimte aan weerszijden van het kanaal, meer voor de hand en is relatief gezien effectiever in het verlagen van de hoogwaterstanden op de Weteringen dan verbreding van het kanaal.
- Het geschatte effect van de zogenaamde waternoodmaatregelen (piekafvoer Weteringen 56m³/s) is groot (indicatorscore voor de Weteringen: 0,80). Eliminatie van de afvoer op de Weteringen houdt in dat de Vechtwaterstand volledig de waterstanden in het systeem domineert. Ook dan zijn niet alle kaden in staat de maximale hoogwaterstanden (incl. waakhogte) te kunnen keren.
- Het Almeloos kanaal kent enkele kadesecties met zeer lage kruinhoogte. Het vereist dan ook een zeer grote inspanning om met waterstandsverlagende maatregelen ook hier te voldoen aan de norm. Kadeophoging op deze locaties lijkt zinvoller.

Om in Zwolle en langs de Sallandse Weteringen de hoogwaterstanden veilig te kunnen keren, blijkt het nodig om de waterstanden op de Vechtmonding substantieel te verlagen (ca. 50 cm) of in te zetten op een combinatie van maatregelen benedenstrooms en bovenstrooms van Zwolle.

5 Analyse combinatiemaatregelen

Bij het opstellen van de combinatiemaatregelen is de tweedeling in het systeem naar Zwolle en de Sallandse Weteringen leidend geweest. Op basis van de resultaten uit het voorgaande hoofdstuk zijn mogelijke combinaties opgesteld zoals weergegeven in tabel 5.1. Deze laten, ten opzichte van Zwolle, een combinatie zien van benedenstroomse en bovenstroomse maatregelen waarmee de hoogwaterstanden op zowel de stadsgrachten van Zwolle alsook op het Almeloos kanaal en de Weteringen gereduceerd kunnen worden. Combinatiemaatregel C1 en C3 hebben beide twee varianten waardoor er in totaal 5 verschillende combinatiemaatregelen zijn onderzocht.

Tabel 5.1: Voorgestelde combinatiemaatregelen.

Naam combinatiemaatregel	Maatregel benedenstrooms	Maatregel bovenstrooms
C1: Compartimentering Zwolle	Inzetten keersluis Zwolle	a) Keringen in Weteringen b) Complete maalstop
C2: Keren en afvoeren	Inzetten keersluis Zwolle	Water vasthouden in het stroomgebied inclusief gemaal bij keersluis
C3 : Verlagen Vechtpiek in combinatie met bovenstroomse maatregelen	Verlagen Vechtpiek	a) Profielverruiming Almeloos kanaal b) Water vasthouden in het stroomgebied

De motivatie achter de keuze om bovenstaande maatregelen te combineren alsook de analyse naar de effectiviteit van deze combinaties is in de volgende paragrafen gegeven. Voor de meeste combinaties geldt dat ook binnen het pakket van maatregelen talrijke combinaties mogelijk zijn, die soms in een andere samenstelling hetzelfde effect opleveren. Dit hoofdstuk is bedoeld om inzicht te geven in het samenspel tussen de individuele maatregelen en het effect hiervan op de hoogwaterstanden. Het doel hiervan is een verdiepend inzicht te verkrijgen in de werking van het systeem en hoe verschillende maatregelcombinaties hierop ingrijpen. Een samenvattend overzicht van de scores van de verschillende combinatiemaatregelen op de effectiviteitsindicator wordt gegeven in §5.4.

5.1 Compartimentering Zwolle (C1)

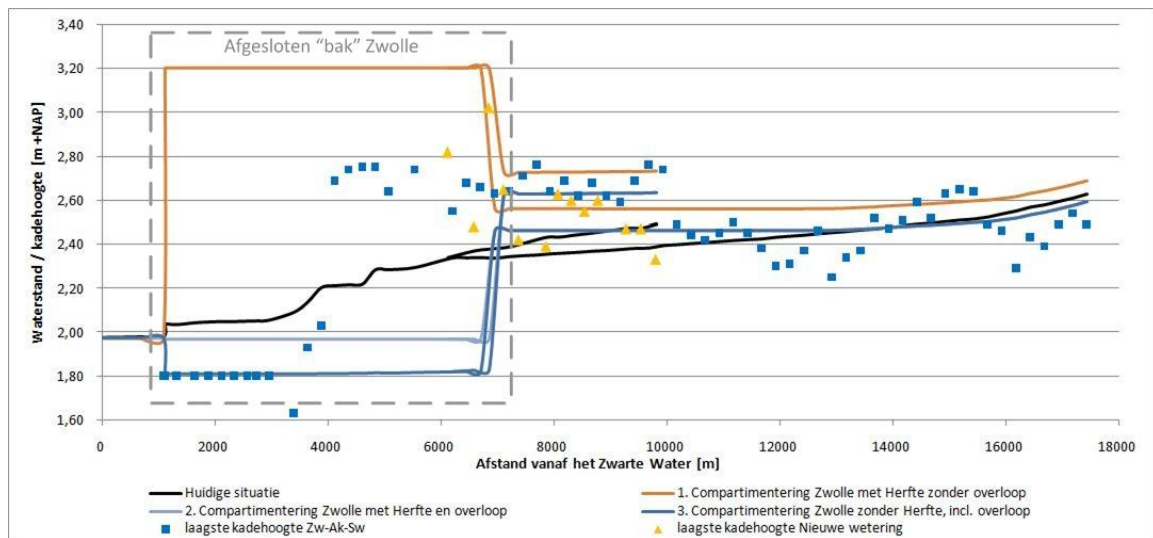
Deze eerste combinatie van maatregelen is veelvuldig in gesprekken met deelnemers van de workshop genoemd. Ook hier wordt de keersluis in Zwolle ingezet als peilscheiding om de hoogwaterstanden op het Zwarte Water te keren en deze zodoende buiten Zwolle te houden. Zoals in §4.3.3 gesteld, is het sluiten van de keersluis alleen effectief wanneer voor de duur van de sluiting de afvoer vanuit de Weteringen volledig wordt afgevangen. De afvoer op de Weteringen zal bij een gesloten kering de 0 m³/s moeten naderen om er voor te zorgen dat achter de keersluis de kaden niet overstromen. Door de vorm van de hoogwatergolf op de Vecht zal de kering enkele dagen gesloten zijn (sluitpeil 1,70m +NAP, +/- 6,5 dagen voor een 1/200 jaar hoogwatergolf). Dit houdt in dat zelfs bij zeer lage afvoeren op de Weteringen, de boezem achter de gesloten keersluis zich snel vult waarbij de kaden langs de stadsgrachten en het Almeloos kanaal zullen overstromen. In bijlage B13 is dit gedemonstreerd door in twee situaties met gesloten kering en lage afvoer op de Weteringen (3 en 15 m³/s) de maximale hoogwaterstanden achter de keersluis te bepalen. Om in het geval van een gesloten keersluis Zwolle te kunnen beschermen tegen hoogwater zijn twee varianten opgesteld waarbij voorkomen wordt dat de afvoer vanuit Salland door Zwolle zal stromen.

De eerste variant omvat naast de keersluis benedenstrooms van Zwolle, twee additionele keringen bovenstrooms van Zwolle in zowel de Nieuwe Weteringen als de Soestwetering. Deze keringen zijn in het hydraulische model ter hoogte van de Sekdoornse dijk, ten zuiden van bedrijventerrein de Marslanden, gemodelleerd. De fictieve keringen sluiten tegelijkertijd met de keersluis benedenstrooms. Door Zwolle tijdens hoogwater zowel boven- als benedenstrooms af te sluiten door middel van keringen kan in de stad één peil worden gehandhaafd tijdens extreme situaties. Bij de tweede variant wordt een complete maalstop afgekondigd en worden de stuw bij Langeslag en Wijhe volledig opgetrokken wanneer de keersluis benedenstrooms van Zwolle sluit.

5.1.1 Zwolle afsluiten door middel van keringen

Sluiting van de keringen benedenstrooms en bovenstrooms zal plaatsvinden wanneer de waterstand op het Zwarte Water de 1,70m +NAP overschrijdt. Rekening houdend met een waakhogte van 0,10m zouden de waterstanden in Zwolle het maximaal toelaatbare peil van 1,80m +NAP hiermee niet moeten overschrijden. Door zowel een keersluis benedenstrooms en bovenstrooms van Zwolle in te zetten zal de afvoer van de Weteringen volledig worden gestremd. Een deel van deze afvoer zal in de Weteringen zelf worden geborgen, maar het overgrote deel zal het achterland doen overstromen. Om te voorkomen dat het water over het maaiveld naar het lager gelegen Zwolle stroomt, dienen nadere structurele compartimenteringsmaatregelen getroffen te worden. Hierbij kan men denken aan dwarskaden en andersoortige keermiddelen langs de zuid- en noordoostzijde van de stad.

Figuur 5.1¹² geeft de hoogwaterstanden weer voor een drietal cases waarin beneden- en bovenstrooms van Zwolle de keringen sluiten bij een waterstand van 1,70m +NAP op het Zwarte Water.



Figuur 5.1: Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij verschillende compartimenteringsvarianten.

De eerste case laat zien dat wanneer de keringen gesloten zijn, de hoogwaterstanden op de stadsgrachten en het Almeloos kanaal flink toenemen. In deze case vindt geen overloop plaats. De reden waarom de waterstanden toenemen is omdat gemaal De Herfte water blijft afvoeren op het Almeloos kanaal. Om een vast peil in Zwolle te kunnen handhaven blijkt het noodzakelijk om een maalstop voor dit gemaal af te kondigen of met een ander gemaal bij de keersluis er voor te zorgen dat het beperkte debiet van De Herfte kan worden weggepompt (capaciteit 1,3 m³/s). Het effect van het overstromen van de kaden langs de grachten en het Almeloos kanaal is in de tweede case wel meegenomen, ook hier is gemaal De Herfte actief. Te zien is dat de maximale waterstanden in Zwolle en het Almeloos kanaal lager zijn dan in de eerste case en, wanneer geen rekening wordt gehouden met de waakhogte, gelijk zijn aan de gemiddelde laagste kadehoogte zoals in het stromingsmodel gemodelleerd (1,87m +NAP).

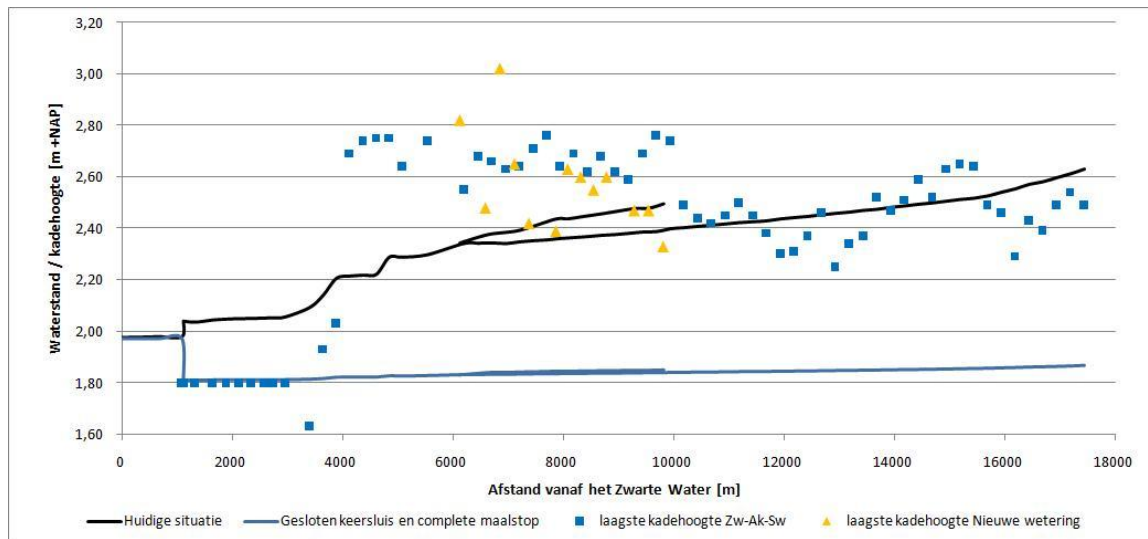
Het volledig afsluiten van Zwolle met keringen beneden- en bovenstrooms blijkt enkel effectief mits ook de afvoer van het gemaal De Herfte volledig wordt afgevangen. De derde case in figuur 5.1 geeft aan dat wanneer de afvoer door Zwolle volledig stopt, de hoogwaterstanden inclusief waakhogte precies gelijk zijn aan de maximaal toelaatbare waterstand van 1,80m +NAP.

¹² De figuur laat zien dat op het Almeloos kanaal één rekenpunt een hogere waterstand kent dan het rekenpunt daar direct bovenstrooms van (op +/- 4800 m; case: huidige situatie). Dit effect is typisch voor lokale profielversmallingen waarbij het water versnelt en vervolgens vertraagt. De energie blijft over korte afstand ongeveer behouden (klein verlies door wrijving) zodat de kinetische energie (snelheidshogte) weer wordt omgezet in potentiële energie (waterstandsstijging).

Bij case 2 en 3 is het overstroomen van de keringen langs de Weteringen meegenomen bij de bepaling van de waterstanden. Hierdoor zijn de hoogwaterlijnen op de Nieuwe wetering en de Soestwetering voor deze cases dan ook gelijk. Dat de hoogwaterlijnen hoger liggen dan vele van de laagste kadehoogten kan verklaard worden door het gegeven dat is gewerkt met een gemiddelde laagste kadehoogte per sectie. Op dezelfde wijze als beschreven in §3.3 is berekend dat circa 19.500.000 m³ water over de kaden langs de Weteringen zal stromen en in het achterland wordt geborgen. Dit is vergelijkbaar met de situatie waarin alleen benedenstrooms de keersluis sluit bij een peil van 1,70m +NAP.

5.1.2 Keersluis in combinatie met complete maalstop

Door bovenstrooms van Zwolle keersluizen in te zetten zullen de waterstanden op de Weteringen de kadehoogten overschrijden en zal zodoende het achterland vanuit de Weteringen overstroomen. Men zou er ook voor kunnen kiezen om een complete maalstop af te kondigen wanneer de kering benedenstrooms van Zwolle sluit. Dit maakt de twee keringen bovenstrooms overbodig, er zal immers geen afvoer van de Weteringen door Zwolle stromen. Het achterland raakt alsnog overstroomd, maar dit keer niet vanuit de Weteringen. Figuur 5.2 geeft een lengteprofiel van de waterstanden weer wanneer de keersluis in Zwolle sluit bij een waterstand van 1,70m +NAP op het Zwarte Water en op dat moment een complete maalstop wordt afgekondigd. Hierbij is aangenomen dat, door het volledig optrekken van de stuwen bij Wijhe en Langeslag, het debiet ook daar gelijk is aan 0 m³/s.



Figuur 5.2: Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij gesloten kering Zwolle (sluitpeil 1,70m +NAP) en complete maalstop (geen afvoer op de Weteringen).

In Zwolle blijven de hoogwaterstanden onder het maximaal toelaatbare peil van 1,80m +NAP. Op de Weteringen zijn de hoogwaterstanden slechts maximaal 5cm hoger en zijn de kaden volledig in staat om deze veilig te kunnen keren.

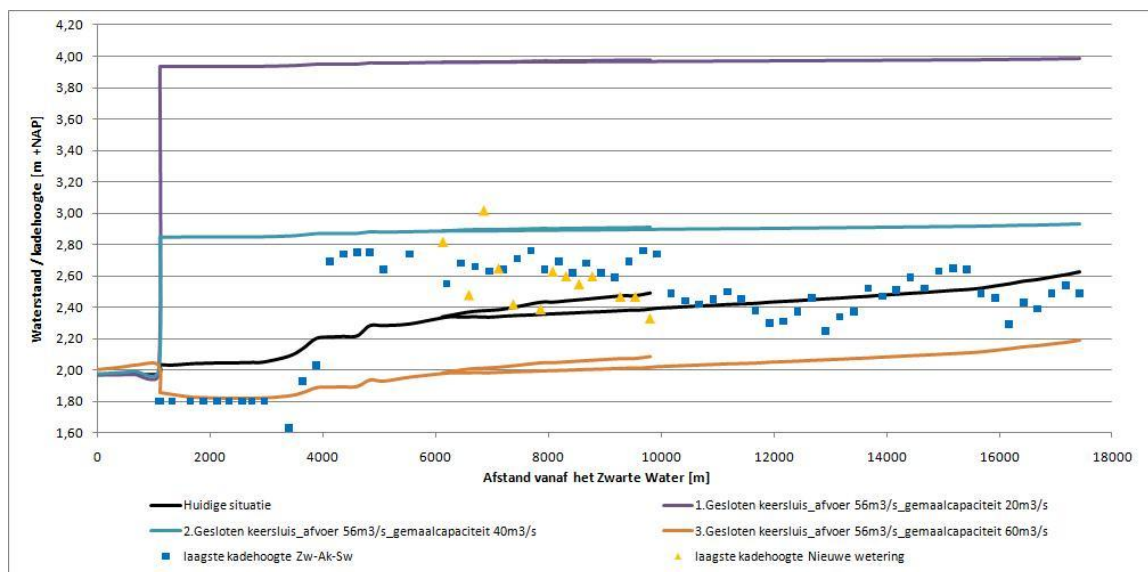
In de hierboven beschreven case zal het achterland uiteindelijk vaker onder water staan dan 1/200 jaar, de veiligheidsnorm van toepassing op de regionale keringen. Een waterstand van 1,70m +NAP op het Zwarte Water komt volgens figuur B3.1 uit bijlage B3 ongeveer eens per 50 jaar voor. Dit houdt in dat met dezelfde terugkeertijd een complete maalstop afgekondigd wordt waardoor het achterland met dezelfde herhalingsfrequentie zal overstroomen. Omdat het hier niet het overstroomen van een regionale kering betreft is de NBW-normering ter bescherming van wateroverlast van toepassing. Deze ligt voor het gebied van Salland lager dan de veiligheidsnorm zoals die van toepassing is op de regionale keringen en schrijft voor dat 1/10 jaar water op het maaiveld mag staan (zie ook §4.3.6). Vanuit het oogpunt van wateroverlast wordt voldaan aan de NBW-normering. Compartimenteringsmaatregelen bij Zwolle zouden in dat geval moeten verhinderen dat het water via het land alsnog de stad bereikt.

5.2 Keren en afvoeren (C2)

Het sluiten van de keersluis in Zwolle is alleen effectief in combinatie met een maatregel bovenstrooms die de afvoer van de Weteringen naar Zwolle zodanig reduceert dat de waterstanden achter de keersluis veilig gekeerd kunnen worden. Waar de compartimentering van Zwolle (§5.1) als uitgangspunt heeft om de afvoer volledig buiten Zwolle of de Weteringen te houden is hier onderzocht of een gemaal bij de keersluis mogelijkheden biedt. Een gemaal zou (een deel van) de afvoer vanuit de Weteringen om de keersluis kunnen pompen waardoor geen volledige stremming van de afvoer plaatsvindt.

Eerder onderzoek naar de mogelijkheid om alleen een gemaal in combinatie met de keersluis in te zetten laat zien dat de pompcapaciteit van het gemaal in dat geval ongeveer gelijk moet zijn aan het maximale debiet van de Weteringen (Klopstra *et al.*, 1999). Maar ook de resultaten gepresenteerd in §4.3.4 (bypass IJssel met gemaal) laten zien dat de invloed van de afvoer op de hoogwaterstanden alleen is te elimineren met een gemaal waarvan de pompcapaciteit gelijk is aan de piekafvoer op de Weteringen. Dit betekent dat een pompcapaciteit nodig zal zijn van circa 84 m³/s. Ten tijde van het DAR-project (zie inleiding, §1.1) is het inzetten van alleen een gemaal met een grote capaciteit, vooral uit kosten oogpunt, niet kansrijk geacht. Men ging destijds uit van een maximaal debiet van de Weteringen van 68 m³/s, de geraamde kosten voor een gemaal met een dergelijke capaciteit bedroeg omgerekend minimaal 30 miljoen euro (Grontmij Projectbureau DAR, 1998).

Door een gemaal bij de keersluis te combineren met het vasthouden van water in het achterland kan de benodigde pompcapaciteit van het gemaal worden gereduceerd. Dit kan aanzienlijk schelen in de investeringskosten waarmee het implementeren van de maatregel aantrekkelijker wordt. Als uitgangspunt voor deze combinatie is aangenomen dat door het vasthouden van water in het achterland de piekafvoer van de Weteringen is gereduceerd tot 56 m³/s. Dit in overeenstemming met het verwachte effect op de afvoer van de Weteringen wanneer alle waternoodmaatregelen zijn geïmplementeerd (zie §4.3.6). Een waterstand van 1,70m +NAP op het Zwarte Water is wederom als kritiek peil gekozen waarop de keersluis van Zwolle sluit. Achtereenvolgens is het effect op de hoogwaterstanden onderzocht wanneer een gemaal bij de keersluis wordt geselecteerd met een pompcapaciteit van 20, 40 en 60 m³/s. Figuur 5.3 laat de resulterende hoogwaterlijnen in relatie tot de laagste kadehoogten zien voor deze varianten.



Figuur 5.3: Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij gesloten keersluis (sluitpeil 1,70M +NAP) beperkte afvoer Weteringen (56m³/s) en gemaal bij keersluis met verschillen pompcapaciteiten.

De resultaten laten zien dat ook hier de pompcapaciteit van het gemaal bij de keersluis in ieder geval gelijk of groter zal moeten zijn dan de afvoer op de Weteringen (zie variant 3 in figuur 5.3). Zonder dat de afvoer op de Weteringen volledig kan worden weggepompt is het sluiten van de keersluis in Zwolle, om hoge Vechtwaterstanden buiten te houden, een maatregel die het overstromingsrisico achter de keersluis enkel vergroot.

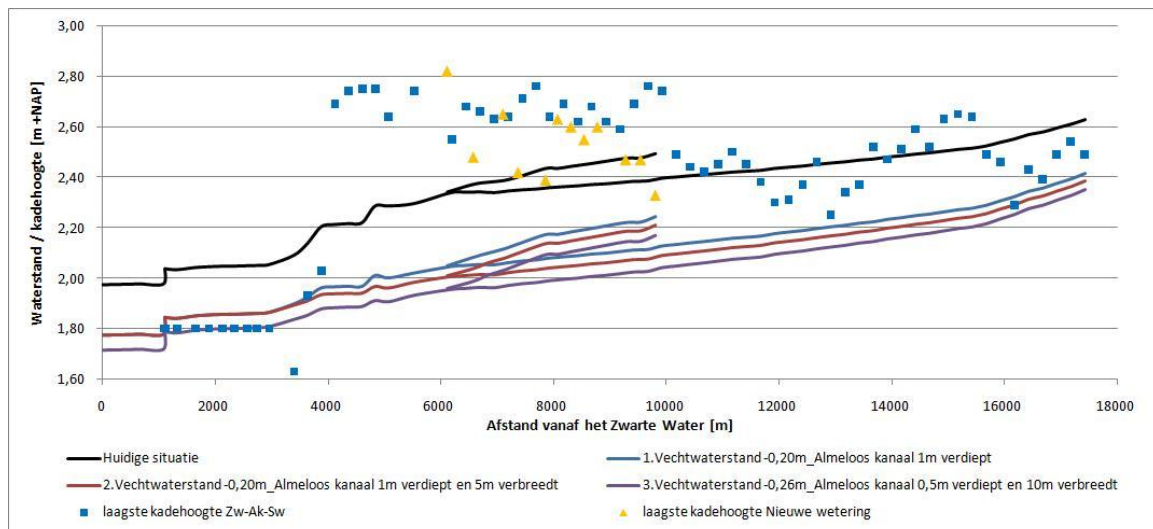
5.3 Verlagen Vechtpiek in combinatie met bovenstroomse maatregelen (C3)

In de analyse naar de individuele maatregelen is gebleken dat een verlaging van de waterstand op de Vechtmonding, tot ongeveer 50cm, eenzelfde daling van de waterstanden in Zwolle oplevert. Hoewel in mindere mate, dalen ook verder bovenstrooms op de Weteringen de waterstanden aanzienlijk. Door het verlagen van de piekafvoer op de Vecht vindt, anders dan met gesloten keersluis, geen stremming van de afvoer vanuit Salland plaats. In totaal zijn twee maatregelcombinaties geanalyseerd waarbij een verlaging van de waterstand op de Vechtmonding is gecombineerd met een maatregel bovenstrooms. Deze maatregelen bovenstrooms zijn het verruimen van het Almeloos kanaal en het implementeren van de waternoodmaatregelen waarbij minder water tot afstroming komt op de Weteringen.

5.3.1 Lagere benedenrand en profielverruiming Almeloos kanaal

In §4.3.5 is aangetoond dat het Almeloos kanaal in de huidige situatie een hydraulisch knelpunt vormt, een flessenhals, waardoor het water tot ver bovenstrooms op de Weteringen wordt opgestuwd. Het vergroten van het doorstromend oppervlak van het kanaal blijkt een effectieve maatregel te zijn waarmee de hoogwaterstanden op de Weteringen gereduceerd kunnen worden. Het verdiepen of verbreden van het Almeloos kanaal heeft geen effect op het waterstandsverloop in Zwolle. Benedenstroomse maatregelen, die een verlaging van de waterstand op de Vecht inhouden zullen nodig zijn om ook op de stadsgrachten de hoogwaterstanden te laten dalen. Deze benedenstroomse maatregelen resulteren ook in lagere waterstanden verder bovenstrooms van de stadsgrachten waardoor de benodigde profielverruiming van het Almeloos kanaal kleiner zal zijn dan gepresenteerd in §4.3.5.

Figuur 5.4 laat een lengteprofiel van de hoogwaterstanden zien voor enkele cases waarbij zowel de waterstand op de Vechtmonding is verlaagd en het Almeloos kanaal is verruimd.



Figuur 5.4: Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij een lagere Vechtwaterstand en verschillende profielverruiming van het Almeloos kanaal.

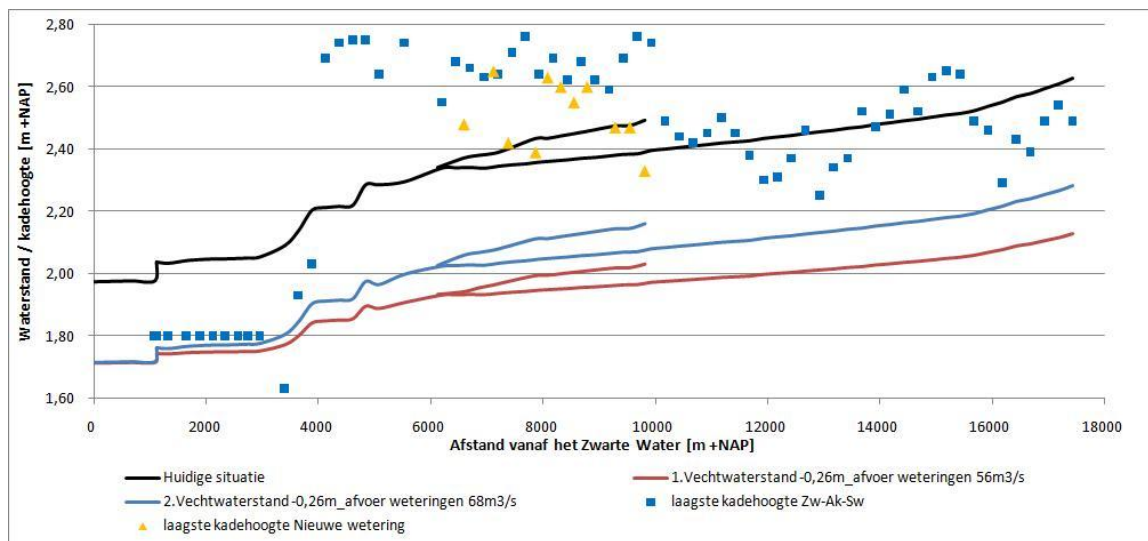
Uit figuur 5.4 is duidelijk op te maken dat een profielverruiming van het kanaal geen invloed heeft op de benedenstroomse waterstanden (vergelijk variant 1 en 2). Ook hier is een verlaging van 0,26m op de Vechtmonding nodig om in Zwolle te voldoen aan het kritieke peil van 1,80m +NAP (zie §4.3.2). In

combinatie met een verbreding of verdieping op het Almeloos kanaal kunnen ook bovenstrooms de hoogwaterstanden veilig gekeerd worden. In combinatie met de voorgestelde daling van de waterstand op de Vechtmonding ligt een verdieping van 0,5 tot 1m, vanwege ruimtegebrek aan weerszijden van het kanaal, het meest voor de hand.

5.3.2 Lagere benedenrand en vasthouden water bovenstrooms

Uit §4.3.6 is gebleken dat een afname van de piekafvoer vanuit Salland het meest effectief is bovenstrooms op de Weteringen en dat de invloed op de hoogwaterstanden verder benedenstrooms afneemt. In Zwolle is de waterstandsdeling het minst en kunnen de waterstanden, door de afvoer volledig te elimineren, tot maximaal 7 cm dalen. Met enkel het verlagen van de piekafvoer op de Weteringen zullen de maximale hoogwaterstanden in Zwolle het kritieke peil van 1,80 m +NAP blijven overschrijden. De waterstanden op de Vechtmonding zullen moeten dalen om ook in Zwolle de hoogwaterstanden veilig te kunnen keren.

Figuur 5.5 geeft de hoogwaterlijn weer wanneer de waternoodmaatregelen volledig worden geïmplementeerd (piekafvoer Weteringen tot 56 m³/s) en de piekwaterstand op de Vechtmonding wordt gereduceerd met 26cm. In Zwolle zijn in dit geval de hoogwaterstanden (inclusief waakhogte) gelijk aan 1,75 m +NAP, 5cm onder het kritieke peil. Dit zou inhouden dat met een piekafvoer op de Weteringen van 56 m³/s, een waterstandsdeling van 21 cm op de Vechtmonding voldoende is om in Zwolle de hoogwaterstanden te kunnen keren. Op de Soestwetering ligt de hoogwaterlijn minimaal 21 cm onder de laagste kadehoogte. Ook wanneer de waterstandsdeling op de Vecht wordt gecombineerd met een piekreductie op de Weteringen naar 68 m³/s, zijn de kaden langs de Weteringen en het overgrote deel van het Almeloos kanaal in staat om de hoogwaterstanden te keren. In dit geval liggen de hoogwaterstanden 3 cm onder het maximaal toelaatbare waterpeil van 1,80 m +NAP en ligt de hoogwaterlijn minimaal 7 cm onder de laagste kadehoogte op de Soestwetering.



Figuur 5.5: Lengteprofiel van hoogwaterstanden bij een verlaagde Vechtwaterstand (-0,26m) en een piekafvoer op de Weteringen van 56m³/s en 68m³/s.

5.4 Deelconclusie combinatiemaatregelen

Gelijk aan de individuele maatregelen zijn ook voor de combinatiemaatregelen scores op de effectiviteitsindicator afgeleid. Voor uitleg over de effectiviteitsindicator wordt verwezen naar §4.3.1. Tabel 5.2 geeft een samenvattend overzicht van de verschillende combinatiemaatregelen en de score op de indicator.

Tabel 5.2 : Overzicht score op de effectiviteitsindicator van de verschillende combinatiemaatregelen

Combinatiemaatregel	Indicatorscore Zwolle	Indicatorscore Weteringen
C1: Compartimentering Zwolle		
<i>C1a: Zwolle afsluiten door middel van keringen</i>		
Sluitpeil keringen 1,70m +NAP, met gemaal Herfte, zonder overloop	<-1,00	<-1,00
Sluitpeil keringen 1,70m +NAP, met gemaal Herfte, met overloop	_*	_*
Sluitpeil keringen 1,70m +NAP, zonder gemaal Herfte, met overloop	1,00	_*
<i>C1b: Keersluis Zwolle in combinatie met complete maalstop</i>		
Sluitpeil kering 1,70m +NAP, randvoorwaarden +gemalen 0m ³ /s	1,00	0,94
C2: Keren en afvoer		
Sluitpeil kering 1,70m +NAP, afvoer 56m ³ /s, gemaalcapaciteit 20m ³ /s	<-1,00	<-1,00
Sluitpeil kering 1,70m +NAP, afvoer 56m ³ /s, gemaalcapaciteit 40m ³ /s	<-1,00	<-1,00
Sluitpeil kering 1,70m +NAP, afvoer 56m ³ /s, gemaalcapaciteit 60m ³ /s	0,88**	0,93
C3: Verlagen Vechtpiek in combinatie met bovenstroomse maatregelen		
<i>C3a: Lagere benedenrand en profielverruiming Almeloos kanaal (Ak)</i>		
Vechtwaterstand -0,20m, Ak 1m verdiept	0,78	0,90
Vechtwaterstand -0,20m, Ak 1m verdiept en 5m verbreedt	0,78	0,91
Vechtwaterstand -0,26m, Ak 0,5m verdiept en 10m verbreedt	1,00	0,93
<i>C3b: Lagere benedenrand en vasthouden water bovenstrooms</i>		
Vechtwaterstand -0,26m, afvoer Weteringen 56m ³ /s	1,00	0,95
Vechtwaterstand -0,26m, afvoer Weteringen 68m ³ /s	1,00	0,94

* geen indicatorscore doordat kaden overstroomden (bij de simulaties is rekening gehouden met overloop)

** door in het stromingsmodel de 'controller' van het gemaal aan te passen/te optimaliseren is een score van 1,00 te behalen. Het aan en uit schakelen van het gemaal is nu gekoppeld aan een waterstand van respectievelijk 1,70m +NAP en 1,65m +NAP op de stadsgrachten. Door bijvoorbeeld deze laatste waarde te verlagen kan voorkomen worden dat de waterstanden op de stadsgrachten alsnog de 1,70m +NAP (+0,10m waakhogte = maximaal toelaatbaar peil 1,80m +NAP) overschrijden.

De maximale indicatorscore op de Weteringen bedraagt 0,95. De maximumscore van 1,00 wordt niet gehaald omdat langs het Almeloos kanaal lokaal zeer lage kadehoogten aanwezig zijn. In dit geval wordt bij een indicatorscore $\geq 0,90$ op de Weteringen verondersteld dat hier de kaden in staat zijn de maximale hoogwaterstanden (incl. waakhogte) te kunnen keren. Op basis van de resultaten uit de voorgaande paragrafen en de indicatorscores kan het volgende worden geconcludeerd:

- Door het inzetten van keersluizen benedenstrooms en bovenstrooms van Zwolle is het mogelijk om tijdens maatgevende condities de waterstanden in de stad te beperken tot het maximaal toelaatbaar peil van 1,80m +NAP. Gemaal De Herfte zal moeten worden uitgeschakeld en men zou moeten toestaan dat de kans op overstroomen in het achterland groter wordt.
- Dit laatste geldt onverminderd voor het sluiten van de keersluis in Zwolle in combinatie met een complete maalstop. Het achterland zal hierbij overstroomen en zonder nadere maatregelen kan het water via het land het lager gelegen Zwolle alsnog doen overstroomen.
- De resultaten laten zien dat de pompcapaciteit van een gemaal bij de keersluis in ieder geval gelijk of groter zal moeten zijn dan de afvoer op de Weteringen. Zonder dat de afvoer op de Weteringen volledig kan worden weggepompt is het sluiten van de keersluis in Zwolle, om hoge Vechtwaterstanden buiten te houden, een maatregel die het overstromingsrisico achter de keersluis enkel vergroot.

- Een verlaging van 0,26m op de Vechtmonding blijkt nodig om in Zwolle te voldoen aan de norm. De waterstand op de Vechtmonding zal in dat geval maximaal 1,61 m +NAP moeten bedragen (1,87 m +NAP – 0,26 m).
- Wordt een dergelijke verlaging van de Vechtwaterstanden (benedenwaterstand) gecombineerd met een profielverruiming van het Almeloos kanaal of het reduceren van de piekafvoer vanuit het achterland, dan kunnen ook verder bovenstrooms, op de Weteringen de hoogwaterstanden veilig worden gekeerd (zie C3a en C3b uit tabel 5.2).
- Een reductie in de afvoer op de Weteringen heeft een beperkt verlagend effect op de waterstanden in Zwolle (0,03 m bij 68 m³/s, zie §5.3.2). Dit houdt echter ook in dat de benedenwaterstand in dat geval niet 0,26m maar 0,23m hoeft te dalen. In Zwolle kan bij een volledige eliminatie van de afvoer van de Weteringen een maximale waterstandsdeling van 7cm worden behaald, dit is gelijk aan het opstuwende effect van de keersluis. De range waarmee de benedenrand verlaagd dient te worden, om in Zwolle te voldoen aan het peil van 1,80 m +NAP, is hiermee gelijk aan 0,19 m tot 0,26 m.
- Ook bij de combinatiemaatregelen geldt dat een grote inspanning vereist is om met alleen waterstandsverlagende maatregelen te voldoen aan de norm. Waar langs het Almeloos kanaal zeer lage kadehoogten zijn kan dijkophoging een effectieve(re) maatregel blijken.

Meerdere combinatiemaatregelen bieden kansen in het verlagen van de hoogwaterstanden zodat de keringen langs de stadsgrachten en de Weteringen deze veilig kunnen keren. Aangetoond is dat maatregelen bovenstrooms en benedenstrooms van Zwolle nodig (en in staat) zijn om de hoogwaterstanden op het systeem, onder maatgevende condities, effectief te verlagen.

6 Discussie

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste discussiepunten met betrekking tot de gepresenteerde resultaten besproken. De volgende aspecten worden hier behandeld:

- de maatgevende condities;
- modellering van het systeem, en
- de belangrijkste uitgangspunten bij de maatregelanalyse.

Deze drie aspecten liggen ten grondslag aan de verkregen resultaten in dit onderzoek. Het is dan ook goed om na te gaan wat de onzekerheden zijn in relatie tot deze drie punten en wat de invloed van deze onzekerheden zijn op de resultaten.

Maatgevende condities

Het waterstandsverloop op de stadsgrachten en de Weteringen wordt bepaald door het waterstandsverloop op de benedenrand (Vechtmonding) en de afvoer vanuit het stroomgebied van de Sallandse Weteringen.

Bij het bepalen van het waterstandsverloop onder maatgevende condities is geen rekening gehouden met een fysieke beperking van de afvoer op de Weteringen. In de huidige situatie kan een beperking van de afvoer plaatsvinden doordat bovenstrooms van Wijhe en Langeslag de kaden bij respectievelijk Boxbergen en langs het Overijssels kanaal overstromen. In die situatie zal niet alle afvoer tot afstroming komen op de Weteringen waardoor de maximale hoogwaterstanden, zoals gepresenteerd in dit onderzoek, lager zullen zijn. In Zwolle is het effect van een beperking in de afvoer echter beperkt. Een beperking van de piekafvoer op de Weteringen tot bijvoorbeeld het eerder aangenomen maximum van $68 \text{ m}^3/\text{s}$ resulteert op de stadsgrachten in een daling van de maximale hoogwaterstand van 3cm. Op de Weteringen is het effect groter, tot 19cm ter hoogte van de stuw bij Wijhe (zie tabel 4.8, p.31). Het hanteren van een beperkte afvoer op de Weteringen zal daarom vooral van invloed zijn op het toetsen van de kaden verder bovenstrooms op de Weteringen. Het vasthouden aan een fysieke beperking van de afvoer op de Weteringen houdt expliciet in dat bovenstrooms van Wijhe en Langeslag geen verbeterwerken zouden mogen plaatsvinden. Dit zou bestuurlijk moeten worden vastgelegd, wat zeer gevoelig zou kunnen liggen.

De tweede bepalende factor voor hoogwaterstanden op het regionale watersysteem is het waterstandsverloop op de Vechtmonding. Bij de beschrijving van de maatgevende condities voor hoogwaterstanden in het systeem is opgemerkt dat hoge afvoeren op de Vecht vrijwel gelijktijdig plaatsvinden met hoge afvoeren op de Weteringen. In het hydraulische model is aangenomen dat de correlatie volledig is, oftewel dat bij een 1/200 jaar afvoer op de Sallandse Weteringen ook een 1/200 afvoer op de Vecht optreedt. Ook dit is een conservatieve aanname. Hoewel het stroomgebied van de Sallandse Weteringen in principe een deelstroomgebied is van de Vecht kan een volledige correlatie niet zonder meer gesteld worden. De afvoeren op de Vecht worden bepaald door een veelzijdigheid aan toevoeren gelegen in een veel groter stroomgebied. Verder is het waterstandsverloop op de Vechtmonding overgenomen uit de HR2006. Hierbij is uitgegaan van een gesloten keersluis bij Zwolle en dus geen afvoer van de Weteringen. Onder maatgevende condities zal de keersluis echter niet sluiten omdat de afvoerrichting door de keersluis niet omdraait. De Weteringen voeren dus wel af richting de Vecht en dit zal dan ook een waterstandsverhogend effect op de Vechtmonding hebben. Voor 1/1250 jaar situaties op de benedenloop van de Vecht en een beperkte afvoer op de Weteringen ($68 \text{ m}^3/\text{s}$) is dit effect volgens Van Vuren *et al.* (2009) 0,09 m ter hoogte van de Vechtmonding. Bij een lagere Vechtwaterstand (behorende bij een 1/200 jaar situatie) zal dit waterstandsverhogend effect groter zijn omdat de afvoer van de Weteringen dan een relatief grotere bijdrage levert.

Modellering

In dit onderzoek is bij de analyse van het huidige systeem en de maatregelen gebruik gemaakt van een 1D hydraulisch model van de Weteringen en stadsgrachten. Een neerslag-afvoer model is gebruikt om de

afvoeren op de modelranden van het hydraulische model te bepalen. Bij de kalibratie van het gebruikte neerslag-afvoer model (zie bijlage B5) is te zien dat het model het moment van optreden van piekafvoeren juist weergeeft, maar dat de afvoeren zelf worden overschat. Rond 23 januari 2007 genereert het model een afvoer van circa $59\text{m}^3/\text{s}$ terwijl de gemeten piekafvoer rond de $48\text{m}^3/\text{s}$ ligt. Een overschatting van circa 23%. Een niet optimale toekenning van neerslagstations aan de modelgebieden en een wijziging in de afvoerrichting vanuit deze gebieden liggen hier mogelijk aan ten grondslag (zie Versteeg *et al.*, 2008).

Kalibratie van het hydraulische model heeft plaatsgevonden aan de hand van afvoer- en waterstandsmetingen tijdens het hoogwater van 1998. De gemeten afvoer is opgelegd aan het model. De berekende waterstanden vielen echter lager uit in vergelijking met het gemeten waterstandsverloop. Om dit te corrigeren zijn in het model een vijftal bruggen opgenomen waarbij het verval over de bruggen zo is bepaald dat de berekende waterstanden bij Langeslag en Wijhe zo goed mogelijk de gemeten waterstanden tijdens het hoogwater van 1998 benaderen. De bruggen in het model leveren zodoende een hogere opstuwing dan in werkelijkheid het geval zou zijn (zie ook Versteeg & Groot, 2010). Om deze reden kan het berekende verhang op het Almeloos kanaal minder blijken dan in dit onderzoek gepresenteerd.

Op basis van de modellering kan gesteld worden dat bij het bepalen van de hoogwaterstanden in Zwolle en op de Weteringen een overschatting heeft plaatsgevonden. Hierdoor vertegenwoordigen de gepresenteerde hoogwaterstanden een conservatieve waarde.

Uitgangspunten maatregelanalyse

Belangrijk aandachtspunt bij de maatregelanalyse is het verwachte effect van de zogenaamde waternoodmaatregelen die in het stroomgebied van de Weteringen worden genomen. Het waterschap schat dat de afvoer uit de gebieden waar deze maatregelen worden genomen, beperkt wordt tot $0,8\text{ l/s/ha}$. Dit betreft een grove schatting waarbij voor elk 'waternoodgebied' dezelfde beperking in de afvoer wordt verondersteld. Onzekerheden in de afvoer uit de gebieden vertalen zich direct door in een onzekerheid van de afvoer op de Weteringen. Dit mede doordat de waternoodgebieden een groot deel van het stroomgebied van de Sallandse Weteringen beslaan (ca. 64%).

In dit onderzoek is een maximaal toelaatbare waterstand in Zwolle van $1,80\text{ m} + \text{NAP}$ gehanteerd. Dit niveau volgt uit een opgave van de gemeente Zwolle. In de figuur van bijlage B14 is echter te zien dat langs de stadsgrachten, achter de kaden, de meeste gronden hoger liggen dan het niveau van $1,80\text{ m} + \text{NAP}$. Daarnaast zullen de gebieden die wel lager liggen dan $1,80\text{ m} + \text{NAP}$ niet overstromen als zij niet aaneengesloten voorkomen en direct verbonden zijn met de grachten. Uit de figuur in de bijlage is te zien dat grote aaneengesloten delen van Zwolle (met name de binnenstad) hoger gelegen zijn dan $2,20\text{ m} + \text{NAP}$. Dit kan historisch verklaard worden door het feit dat de binnenstad van Zwolle gebouwd is op het regime van de Vecht. De waterstanden op de Vechtmonding kenden voor het gereedkomen van de afsluitdijk een grotere variatie met hogere maxima. Zo werd in een periode van 55 jaar, tussen 1877 en 1932, een waterstand van $2\text{ m} + \text{NAP}$ op de Vechtmonding maar liefst 16 keer overschreden (zie bijlage B15). Dit in vergelijking met de huidige maatgevende waterstand van $1,87\text{ m} + \text{NAP}$ (terugkeertijd 200 jaar). Grootschalige overstromingen en schade zijn in Zwolle dan ook niet te verwachten bij een waterstand lager dan $2,20\text{ m} + \text{NAP}$.

7 Conclusies en aanbevelingen

Uit een verkennende toetsing van het waterschap Groot Salland (WGS, 2008) en modelonderzoek, uitgevoerd door Versteeg *et al.* (2008), blijkt dat meerdere kaden langs de Weteringen en stadsgrachten onvoldoende op hoogte zijn om de maatgevende hoogwaterstanden te kunnen keren. In het voorliggende onderzoek is onderzocht welke factoren bepalend zijn bij het tot stand komen van hoogwaterstanden op het systeem onder maatgevende condities en wat de individuele invloed is van deze factoren. Dit is gedaan door verschillende modelberekeningen uit te voeren in een 1D hydraulisch Sobek model van de Weteringen en stadsgrachten. Met dit model is ook onderzocht wat het effect van verschillende maatregelen is op de hoogwaterstanden onder maatgevende condities. Vervolgens is een effectiviteitsindicator opgezet om de maatregelen eenvoudig en kwantitatief te kunnen beoordelen op de effectiviteit die zij bieden.

Aan de hand van de in dit onderzoek gepresenteerde analyses, resultaten en discussie zijn in dit laatste hoofdstuk de conclusies afgeleid. Deze conclusies vormen samen het antwoord op de onderzoeksvragen die zijn opgesteld in §1.2. Beantwoording van deze onderzoeksvragen draagt bij aan het behalen van de onderzoeksdoelstelling, die als volgt luidt:

Het doel van dit onderzoek is inzicht verkrijgen in de werking van het watersysteem van de Sallandse Weteringen en Zwolse stadsgrachten onder maatgevende condities en in de effectiviteit van verschillende maatregelen met betrekking tot de opgestelde veiligheidsnorm.

In de volgende paragraaf zijn de conclusies van dit onderzoek opgenomen. Dit hoofdstuk sluit af met een overzicht van aanbevelingen.

7.1 Conclusies

Onderzoeksvraag 1: In welke mate en op welke locaties, voldoen de kaden langs de Weteringen en stadsgrachten niet aan de vastgestelde veiligheidsnorm?

De verkennende toetsing op keerhoogte laat zien dat meerdere kaden langs de stadsgrachten van Zwolle, het Almeloos kanaal en de Sallandse Weteringen niet voldoende op hoogte zijn. Op verschillende locaties zijn de kaden niet in staat de maatgevende hoogwaterstanden (inclusief waakhoogte) te kunnen keren. Wanneer in Zwolle een maximaal toelaatbaar peil van 1,80 m +NAP wordt aangehouden blijkt dat over de gehele lengte van de stadsgrachten dit niveau wordt overschreden. Langs het Almeloos kanaal en de Weteringen zijn, verspreid langs de waterlopen, verschillende aaneengesloten kadesecties die te laag zijn. De uitgevoerde inventarisatie laat zien dat in totaal ongeveer 9,3 kilometer aan kaden onvoldoende op hoogte zijn. Tabel 7.1 geeft een overzicht van de opbouw van dit getal.

Tabel 7.1: Overzicht lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte per waterloop

	Zwolle	Almeloos kanaal	Nieuwe Wetering	Soestwetering	Totaal
Lengte kaden met onvoldoende kruinhoogte [m]	3.500	750	1.000	4.000	9.250

Onderzoeksvraag 2: Welke factoren/knelpunten dragen bij aan hoge waterstanden op de Weteringen en stadsgrachten?

Twee factoren zijn bepalend voor het waterstandsverloop op de Weteringen en stadsgrachten, dit zijn het waterstandsverloop, benedenstrooms op de Vechtmonding en de afvoer op de Weteringen. Uit de systeemanalyse is gebleken dat onder maatgevende condities de waterstanden in Zwolle beperkt gevoelig zijn voor de afvoer op de Weteringen. Door de afvoer van de Weteringen volledig te elimineren is een maximale waterstandsval van 7 cm in Zwolle te bereiken, dit is gelijk aan het opstuwend effect van de keersluis in Zwolle. De waterstanden in de stadsgrachten worden gedomineerd door de waterstand die benedenstrooms optreedt. Verder bovenstrooms op het Almeloos kanaal en de Weteringen wordt de invloed van de afvoer op de Weteringen groter.

Verder is gebleken dat het Almeloos kanaal een hydraulisch knelpunt vormt binnen het systeem. De beperkte afmetingen van dit kanaal zorgen er voor dat lokaal en bovenstrooms de waterstanden worden opgestuwd.

Onderzoeksvraag 3&4: Welke (innovatieve) waterstandsverlagende maatregelen kunnen mogelijk worden ingezet om het probleem te mitigeren dan wel weg te nemen en hoe effectief zijn zij in het verlagen van de hoogwaterstanden op de Weteringen en stadsgrachten?

De in deze studie onderzochte maatregelen zijn onder te verdelen in twee klassen:

1. maatregelen benedenstrooms van Zwolle, hebben tot doel de waterstanden op de Vechtmonding te verlagen danwel buiten Zwolle te houden door ze te keren;
2. maatregelen bovenstrooms van Zwolle, hebben het reduceren van de piekafvoer op de Weteringen tot doel of het verminderen van het opstuwend effect van het Almeloos kanaal.

Om een vergelijking te maken tussen de maatregelen is een effectiviteitsindicator gebruikt. De voorgestelde indicator helpt om de effectiviteit van een maatregel op een relatief eenvoudige manier kwantitatief te kunnen beoordelen. De uitgevoerde effectiviteitsbeoordeling ondersteunt een belangrijk kenmerk van het systeem, namelijk dat de afvoer van de Weteringen beperkt van invloed is op het waterstandsverloop in Zwolle. Om in Zwolle en langs de Sallandse Weteringen de hoogwaterstanden veilig te kunnen keren, is het nodig om de waterstanden op de Vechtmonding substantieel te verlagen (ca. 50 cm) of in te zetten op een combinatie van maatregelen benedenstrooms en bovenstrooms van Zwolle. Het reduceren van de piekafvoer op de Weteringen of een daling (tot circa 50cm) van het waterstandsverloop op de Vechtmonding alleen blijkt niet voldoende.

Onderzoeksvraag 5: In welke combinaties zijn de eerder genoemde maatregelen effectief in het reduceren van de hoogwaterstanden?

Uit de analyse naar de gecombineerde maatregelen blijkt dat alle combinatiemaatregelen kansen bieden in het verlagen van de hoogwaterstanden zodat de keringen langs de stadsgrachten en de Weteringen deze veilig kunnen keren. In het geval van een volledige compartimentering van Zwolle (combinatiemaatregel C1) zal men moeten toestaan dat het achterland (frequenter) overstroomt zodat de overstromingskans in Zwolle afneemt. Vanwege de incidentele zeer lage kadehoogten langs het Almeloos kanaal is het aan te bevelen om op deze locaties dijkophoging toe te passen. Aangetoond is dat maatregelen bovenstrooms en benedenstrooms van Zwolle nodig (en in staat) zijn om de hoogwaterstanden op het systeem, onder maatgevende condities, effectief te verlagen.

7.2 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan met het oog op het bepalen van de maatgevende condities, de modellering van het systeem en de te nemen vervolgstappen voor de verschillende betrokken partijen.

Bepalen maatgevende condities

Het waterstandsverloop op de Weteringen en in Zwolle wordt bepaald door de waterstand op de Vechtmonding/Zwarte Water en de afvoer op de Weteringen. Ook de correlatie tussen deze twee factoren is daarbij van invloed.

1) Aanbevolen wordt om rekening te houden met de afvoer van de Sallandse Weteringen bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden op de Vechtmonding.

Bij het bepalen van de waterstand op de Vechtmonding is geen rekening gehouden met de afvoer vanuit het stroomgebied van de Sallandse Weteringen. Om een juiste benedenwaterstand op te stellen wordt aanbevolen de afvoer van de Weteringen wel in rekening te brengen. Bij het opstellen van de volgende Hydraulische Randvoorwaarden door het Rijk (2011), zou dit meegenomen kunnen worden. Ook zal

onderzocht moeten worden wat het effect is van een verhoging van het IJsselmeerpeil uit het advies van de Deltacommissie (Commissie Veerman, zie Deltacommissie, 2008) op de maatgevende hoogwaterstanden op de stadsgrachten en Weteringen. Een verhoogd IJsselmeerpeil zal voor hogere maatgevende waterstanden zorgen in Zwolle en dus ook verder bovenstrooms. Het effect van een peilverhoging van 1,5 m op het IJsselmeer zorgt er in 1/1250 jaar situaties voor dat de waterstanden in Zwolle 0,60 cm stijgen (Van Vuren *et al.*, 2009).

2) Het wordt sterk aanbevolen om bij de bepaling van de (officiële) maatgevende hoogwaterstanden geen rekening te houden met een mogelijke beperking in de piekafvoer van de Weteringen.

Wanneer geen rekening wordt gehouden met een beperkte afvoer van de Weteringen zullen de waterstanden op de Vechtmonding, stadsgrachten en Weteringen hoger zijn. Enerzijds zal een grotere afvoer de waterstanden op de benedenrand en daarmee ook op de stadsgrachten en Weteringen meer doen verhogen. Anderzijds zullen, ongeacht de gekozen benedenrand, de maximale hoogwaterstanden op de Weteringen en in mindere mate in Zwolle toenemen bij een hogere afvoer. Aanbevolen wordt om geen rekening te houden met een fysiek beperkte afvoer omdat dit onder andere inhoudt dat bovenstrooms van de Nieuwe Wetering en Soestwetering geen verbeterwerken mogen plaatsvinden die bovenstroomse overstromingen, bij Boxbergen en langs het Overijssels kanaal, tegengaan (zie ook §2.3.1). Geen rekening houden met een fysiek beperkte afvoer kan worden gezien als een 'no-regret maatregel'.

3) Onderzoek dient uitgevoerd te worden naar de correlatie tussen hoge afvoeren op de Vecht en hoge afvoeren op de Weteringen.

De correlatie tussen hoge waterstanden op de Vecht/het Zwarte Water en de afvoer op de Sallandse Weteringen is in dit onderzoek volledig verondersteld, waarbij een 1/200 jaar afvoer op de Weteringen gepaard gaat met een 1/200 jaar afvoer op de Vecht. Een correlatieanalyse dient uitgevoerd te worden om meer inzicht te krijgen in het samenspel tussen Vecht en Weteringen. Dit zou bijvoorbeeld gedaan kunnen worden op basis van afvoerreeksen. Hiermee is ook een basis te leggen voor een probabilistische analyse waarmee de hoogwaterstanden op de stadsgrachten en Weteringen bepaald kunnen worden.

Modellering van het systeem

4) Aanbevolen wordt om zowel het neerslag-afvoer model en het hydraulisch model opnieuw te kalibreren. Daarbij verdient het parallel doorrekenen van beide modellen de voorkeur.

Het neerslag-afvoer model en het hydraulische model zouden opnieuw gekalibreerd moeten worden om een zo nauwkeurig mogelijk beeld te krijgen van de situatie tijdens hoogwatersituaties. Beide modellen zijn in serie doorgerekend, de afvoer uit het stroomgebied is allereerst bepaald en vervolgens als randvoorwaarde opgelegd aan het stromingsmodel. Voor een meer nauwkeurige modellering zou het doorrekenen van het neerslag-afvoer model parallel met het stromingsmodel de voorkeur verdienen. Hierdoor vindt er per rekentijdstap een directe koppeling plaats tussen beide modellen. Dit omdat op de modelranden, van beide modellen, zich er in werkelijkheid processen afspelen welke van invloed zijn op de gegenereerde afvoer (stremming bijvoorbeeld). Omdat het een hellend gebied betreft dat in de regel snel afvoert zal het effect van deze wisselwerking niet al te groot zijn.

Vervolgstappen

5) Aanbevolen wordt om het effect van de waternoodmaatregelen, tijdens extreme neerslaggebeurtenissen te onderzoeken (monitoren) om zo te komen tot een kwantificering van het effect.

Op basis van informatie van waterschap Groot Salland zouden de geplande waternoodmaatregelen theoretisch een piekreductie op de Weteringen kunnen opleveren tot $56\text{m}^3/\text{s}$. Hierbij is aangenomen dat de maximale afvoer uit de zogenaamde waternoodgebieden wordt beperkt tot $0,8\text{l/s/ha}$. Hierbij mist een kwantitatieve onderbouwing, zo zijn er bijvoorbeeld geen monitoringsgegevens beschikbaar die deze aanname ondersteunen. Omdat de maatregelen in potentie de afvoer op de Weteringen fors kunnen

verlagen, ligt het voor de hand eerst dit effect te onderzoeken en te kwantificeren voordat besloten wordt andere (afvoer reducerende) maatregelen in te zetten.

6) Onderzoek naar de overstromingsschade in Zwolle bij verschillende waterstanden.

Zoals eerder vermeld is het onzeker wat het kritieke peil in Zwolle is waarbij zich een significant overstromingsrisico voordoet. Achter de kaden langs de stadsgrachten zijn veelal hogere gronden aanwezig. Het wordt dan ook sterk aanbevolen om het maximaal toelaatbare peil in Zwolle vast te stellen op basis van een onderzoek naar de potentiële overstromingsschade die optreedt bij verschillende waterstanden op de stadsgrachten. Op die manier kan vervolgens een kosten- batenanalyse worden uitgevoerd naar mogelijke maatregelen.

7) De provincie Overijssel wordt aanbevolen de gekozen uitgangspunten voor de vaststelling van de maatgevende hoogwaterstanden (MHW's) voor de Sallandse Weteringen en Zwolse stadsgrachten te herzien.

De voorlopig opgestelde MHW's (2005) zijn gebaseerd op gedateerde studies (Ramspolkering en keersluis in Zwolle nog niet operationeel) en zijn tot stand gekomen door te interpoleren tussen waterstanden behorende bij verschillende herhalingsfrequenties.

Tijdens dit schrijven zijn, op basis van een aangepast model zoals in dit onderzoek gebruikt, nieuwe MHW's vastgesteld (Groot & Versteeg, 2010). Hierbij zijn nieuwe metingen van de dwarsprofielen van de waterlopen opgenomen in het model en is het verval bij de bruggen realistisch ingebracht. In de betreffende studie is het model uitgebreid zodat ook (een gedeelte van) de waterlopen bovenstrooms van Wijhe en Langeslag zijn meegenomen. Door verschillende afvoeren aan het model op te leggen is hierbij onderzocht bij welke afvoer (bepaald bij de keersluis in Zwolle) de kaden langs deze bovenstroomse waterlopen overstromen. Dit bleek bij $72,8 \text{ m}^3/\text{s}$ te zijn. Ongeveer $5 \text{ m}^3/\text{s}$ meer dan het eerder aangenomen maximum van $68 \text{ m}^3/\text{s}$ en circa $11 \text{ m}^3/\text{s}$ minder dan de piekafvoer op de Weteringen zoals gebruikt in dit onderzoek. De maximale hoogwaterstanden bepaald in Groot & Versteeg (2010) zijn dan ook lager dan bepaald in deze studie. Het verschil op de stadsgrachten is minimaal (3 cm), omdat is gewerkt met dezelfde benedenrand (waterstandsverloop op de Vechtmonding). De maatgevende hoogwaterstanden op de Weteringen en het Almeloos kanaal zijn, met een afvoer van $72,8 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddeld 11 cm lager dan bepaald in dit onderzoek. In lijn met de aanbeveling om geen rekening te houden met een beperking in de afvoer op de Weteringen (nummer 2) wordt ook hier geadviseerd dit uitgangspunt te herzien.

Tevens verdient het de aanbeveling om de mogelijkheid tot een gedifferentieerde normering te onderzoeken. Een mogelijke overstroming van de kaden bovenstrooms op de Weteringen zal tot minder schade leiden dan een overstroming in het stedelijk gebied van Zwolle. Een lagere norm resulteert in een lager toetspeil waardoor het aantal kadesecties wat nu niet voldoet kan worden teruggebracht. Op basis van een analyse naar gevolgschade door overstromingen kan de provincie Overijssel verschillende beschermingsniveaus per watersysteem kiezen.

8) Aanbevolen wordt om een multicriteria-analyse uit te voeren voor het komen tot een rangschikking van de alternatieve maatregelen.

Naast het waterstandsverlagend effect van de maatregelen spelen ook andere criteria een belangrijke rol bij een mogelijke keuze voor een bepaalde maatregel. Een volgende stap zou zijn om de verschillende maatregelen te scoren op criteria zoals kosten, draagvlak, robuustheid en duurzaamheid. In deze fase zouden dan ook maatregelen kunnen worden meegenomen die in dit onderzoek niet zijn behandeld, zoals dijkophoging en het inzetten van grootschalige berging langs de Weteringen. Mede op basis van het voorgestelde onderzoek naar de gevolgschade van een mogelijke overstroming in Zwolle, zou bijvoorbeeld dijkophoging van de kleine 6 kilometer aan te lage kaden langs het Almeloos kanaal en de Weteringen een kosteneffectieve maatregel kunnen blijken.

Referenties

- ANP. (1998, 5 november). Schade wateroverlast geraamd op 650 miljoen [elektronische versie]. *Trouw*.
- Burgdorffer, M. (1993). Berekening van de extreme hoogwaterstanden voor de Overijsselse Vecht en het Zwarte Water. Rijkswaterstaat/RIZA Notanummer 93.005
- Chbab, E.H. (1995). Frequentieanalyse Vechtafvoer te Vechterweerd. Rijkswaterstaat/RIZA, IJlstad. Werkdocument 95.131X.
- De Balgstuw*. (z.d.). Verkregen op 13 augustus, 2009, van:
http://www.wgs.nl/veilige_dijken/de_balgstuw
- Deltacommissie. (2008). Samen werken met water. Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie 2008. Adviesrapport.
- European Water Framework Directive (EU WFD). (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy.
- Geerse, C.P.M. (2006). Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta. Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. RIZA-werkdocument 2006.036x. RIZA IJlstad, januari 2006.
- Grontmij Projectbureau DAR Zwolle. (1997). Startnotitie Zwolle (DAR2). Zwolle, waterschap Groot Salland
- Grontmij Projectbureau DAR. (1998). Dijkverbetering Achter Ramspol. Sallandse Weteringen – Zwolle. Waterhuishouding en retentie, Annex 1: Bescherming tegen hoogwater, inperking oplossingsrichtingen rapportage Tussenfase. Waterschap Groot Salland.
- Grontmij Projectbureau DAR. (2001). Dijkverbetering Achter Ramspol. Projectnota/MER (DAR1-2). Zwolle, waterschap Groot Salland.
- Groot, S., Versteeg, R. (2010). Maatgevende hoogwaterstanden Sallandse Weteringen. HKV_lijn in water.
- IPO. (1999). IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden. IPO, 1999
- Klopstra, D., Vermeer, K. (1996). Maatgevende waterstanden Zwolle en omstreken. HKV_lijn in water.
- Klopstra, D., Meijer, D.G., Termes, A.P.P. (1999). Berekening waterstanden Sallandse Weteringen. HKV_lijn in water.
- KNMI. (2006). Klimaat in de 21^e eeuw, 4 scenario's voor Nederland. De Bilt.
- Kolkman, M.J. (2005). Controversies in water management. Frames and mental models. Enschede, The Netherlands.
- Monincx, S., Termes, P., Tromp, G. (2006). Regie afvoerpieken noodzakelijk om problemen op Overijsselse Vecht te voorkomen. H2O(23), p.44-47
- NBW. (2003). Het Nationaal Bestuursakkoord Water. Te raadplegen via:
<http://www.helpdeskwater.nl/wetgeving-beleid/nationaal/?ActItnlIdt=1280>

- Staatsblad van het Koninkrijk der Nederland. (2004). Nummer 234: Besluit van 23 april 2004 tot wijziging van de Wet op de waterkering in verband met de verkorting van dijkkring 53 door de bouw van een keersluis bij Zwolle, alsmede in verband met de verbinding van dijkkring 7 met dijkkring 10 door de ingebruikname van de Keersluis bij Ramspol.
- STOWA. (2004). Praktijktoeepassing van het Waternoodinstrumentarium. Waternood deelrapport. Utrecht.
- Termes, A.P.P., Versteeg, R. (2004). Onderzoek speelruimte maatregelen – stroomgebieden langs de Overijsselsche Vecht. HKV_lijn in water.
- Tienstra, H. (2005). Normering Regionale Waterkeringen; vaststelling veiligheidsnormen regionale waterkeringen, eindrapport versie 4.A. Provincie Overijssel, januari 2005
- Van der Schrier, D.M. (2003). Wet op de waterkering in opspraak. Gegoochel met de wet in Overijssel. *Tijdschrift voor omgevingsrecht*, 3 (4), p.135-138.
- Van Vuren, S., Geerse, C., Roelevink, A., Termes, P., Versteeg, R., Van der Schee, G., Overkamp, B. (2009). Ruimte voor de Overijsselse Vecht. Ontwikkeling hydraulisch model en blokkendoor ten behoeve van verkenning rivierruiming. Arcadis & HKV_lijn in water.
- Versteeg, R., Groot, S., Klopstra, D. (2008). Verkenning retentiemogelijkheden Soestwetering en Lierder- en Molenbroek. HKV_lijn in water.
- Versteeg, R., Groot, S. (2010). Maatgevende hoogwaterstanden Sallandse Weteringen. HKV_lijn in water.
- Waterschap Groot Salland. (1998). Werking afvoeren van de Sallandse Weteringen, concept. Waterschap Groot Salland, maart 1998.
- Waterschap Groot Salland. (2005). Toetsing NBW normering WGS. Toelichting bij enquête. Afdeling hydrologie en ruimtelijke ontwikkeling, augustus 2005.
- Waterschap Groot Salland. (2006). Beleidsnota “van de (water)nood een deugd”. 27 september 2006.
- Waterschap Groot Salland. (2008a). Verslag regionale keringen. Verkennende veiligheidsbeoordeling regionale keringen. Concept maart 2008.
- Waterschap Groot Salland. (2008b). Ontwerp Waterbeheerplan 2010-2015. Versie 18 december 2008.

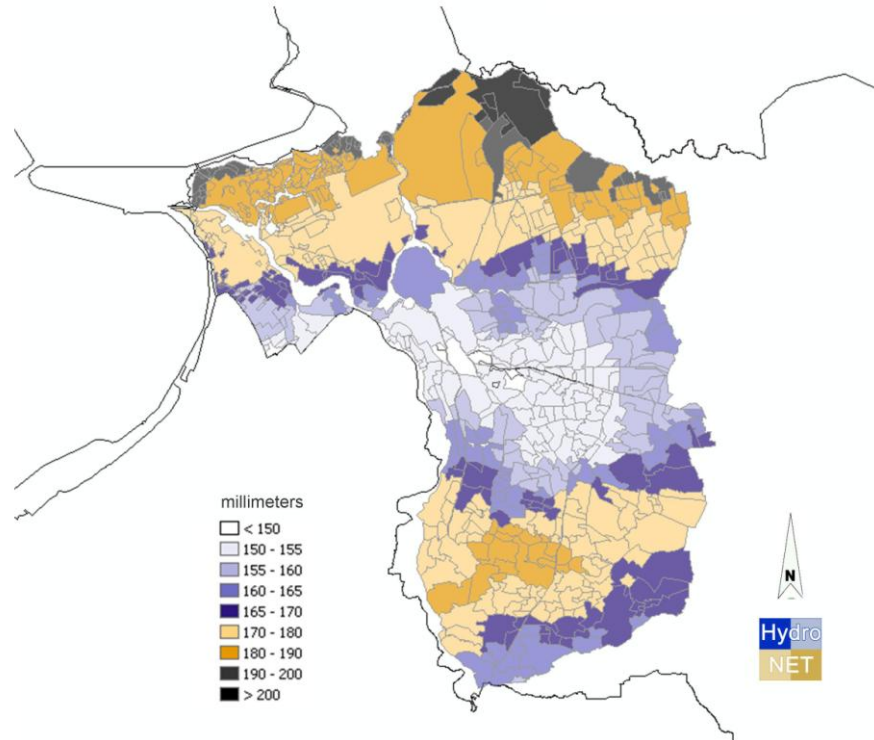
Bijlagen

Inhoudsopgave bijlagen

B1 Neerslagsom hoogwater 1998	p.51
B2 Resultaten MHW's uit Klopstra & Vermeer (1996)	p.52
B3 Onderbouwing maatgevende condities uit Versteeg <i>et al.</i> (2008)	p.53
B4 Beschrijving Sobek-applicatie	p.54
B5 Kalibratie van het neerslag-afvoer model	p.55
B6 Fysiek maximum afvoer Sallandse Weteringen	p.56
B7 Lage kadehoogten langs het Almeloos kanaal	p.57
B8 Verslag workshop en bezoek waterschap Groot Salland	p.59
B9 Screening individuele maatregelen	p.62
B10 Lengteprofielen hoogwaterstanden	p.64
B11 Analyse correlatie Vecht en IJssel	p.68
B12 Waterstandsverloop Almeloos kanaal bij verdieping	p.70
B13 Gesloten keersluis in combinatie met beperkte afvoer op de Weteringen	p.71
B14 Hoogtekaart Zwolle	p.72
B15 Waterstandsverloop Vechtmonding 1877-1958	p.73

B1 Neerslagsom hoogwater 1998

Figuur B1.1 geeft de sommatie van de neerslag weer in het beheergebied van waterschap Groot Salland voor de periode van 23 oktober tot en met 5 november 1998. Hierin is te zien dat de hevige neerslag die toen viel een sterke ruimtelijke variatie kende.



Figuur B1.1: Neerslagsom periode hoogwater 1998

B2 Resultaten MHW's uit Klopstra & Vermeer (1996)

De resultaten voor een aantal combinaties van wind, afvoer van de Sallandse Weteringen, Vechtafvoer en IJsselmeerpeil op de maatgevende hoogwaterstanden bij de Vechtmonding en op de Weteringen zijn weergegeven in tabel B2.1.

Tabel B2.1: Maatgevende hoogwaterstanden Vechtmonding en Weteringen bij combinaties van wind, afvoeren en IJsselmeerpeil. 1/1 jaar Vechtafvoer = 40 m³/s; 1/1250 jaar Vechtafvoer = 470m³/s; 1/1250 jaar west-noordwesten wind = voorflank 9 uur, piek op 32 m/s en achterflank 6 uur; gemiddelde afvoer Weteringen = 6m³/s; 1/100 jaar afvoer Weteringen = 68 m³/s.

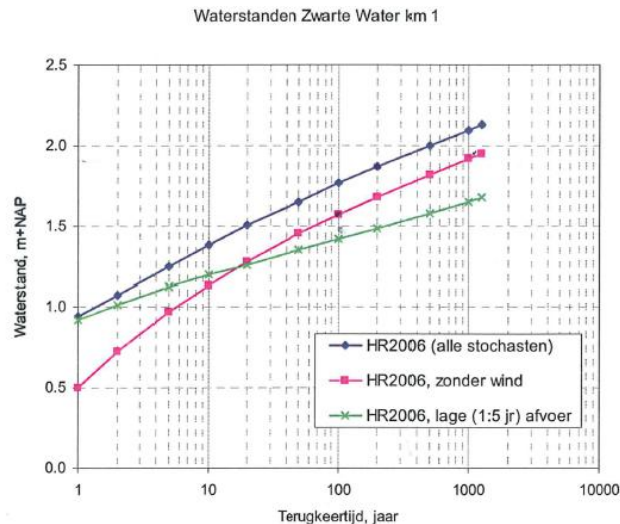
Randvoorwaarden					Resultaat waterstand	
Vechtafvoer	Wind	Ramspol	IJsselmeerpeil	Afvoer Weteringen	Vechtmonding	Soestwetering-Nieuwe Wetering (Gerenvonder)
1/1250 jaar	-	open	NAP -0,40 m	1/100	NAP +1,74 m	NAP +2,10 m
1/1 jaar	1/1250	dicht	NAP -0,40 m	gemiddeld	NAP +0,87 m	NAP +0,96 m
1/1 jaar	1/1250	dicht	NAP +0,28 m	gemiddeld	NAP +1,14 m	NAP +1,38 m
1/1250 jaar	-	open	NAP -0,40 m	gemiddeld	NAP +1,50 m	NAP +1,50 m
1/1250 jaar	-	open	NAP +0,28 m	gemiddeld	NAP +1,57 m	NAP +1,58 m

Uit de tabel kan het volgende worden geconcludeerd (zie ook Versteeg *et al.*, 2008):

- De waterstand bij de Vechtmonding en Gerenvonder is hoger bij windstil weer en maatgevende afvoeren op de Vecht dan bij stormsituaties en normale afvoeren op de Vecht. Het verschil bedraagt ter plaatse van de Vechtmonding 0,63 m bij een aanvangspeil op het IJsselmeer van 0,40 m -NAP (streefpeil); bij een verhoogd IJsselmeerpeil van 0,28 m +NAP is het verschil 0,43 m. Door sluiting van de Ramspolkering zijn niet de stormsituaties, maar de situaties met hoge afvoer op de Vecht en Sallandse Weteringen maatgevend.
- Het effect van een met 0,68 m verhoogd IJsselmeerpeil op de waterstand bij de Vechtmonding is 0,07 m in de situatie zonder wind en maatgevende Vechtafvoer en 0,27m bij stormcondities.
- Het effect van de maatgevende afvoer van de Sallandse Weteringen bij windstil weer en streefpeil op het IJsselmeer is 0,24 m op de waterstand bij de Vechtmond.

B3 Onderbouwing maatgevende condities uit Versteeg *et al.* (2008)

In Versteeg *et al.* (2008) is een analyse uitgevoerd naar de invloed van stormcondities (wind) en Vechtafvoeren op de waterstanden op het Zwarte Water. Deze analyse is gebaseerd op het probabilistische HYDRA-VIJ model waarmee de waterstandstatistiek in de IJssel-Vechtdelta is bepaald op basis van duizenden Waqua berekeningen met alle mogelijke combinaties van wind, IJsselmeerpeil en IJssel- en Vechtafvoeren. Deze waterstandstatistiek is gebruikt voor de HR2006 en is daarmee de officiële waterstandstatistiek. In figuur B3.1 zijn de resultaten van HYDRA-VIJ opgenomen (blauwe lijn), evenals de individuele bijdrage van afvoer (roze lijn) en wind (groene lijn) aan de waterstanden.



Figuur B3.1: Terugkeertijden van waterstanden zoals bepaald met HYDRA-VIJ, invloed van wind en Vechtafvoer op de waterstanden op het Zwarte Water. (uit Versteeg *et al.* (2008))

Op basis van de uitkomsten van HYDRA-VIJ is in Versteeg *et al.* (2008) het volgende gesteld:

- Bij terugkeertijden van eens per jaar tot eens per 20 jaar is de wind dominant voor de bereikte waterstanden. De groene lijn ligt immers boven (of links) van de roze lijn.

Dit betekent dat het sluitpeil van de keersluis bij Zwolle vooral wordt gehaald in situaties waarbij stormcondities een rol. De terugkeertijd is circa eens per 1 tot 2 jaar. Hoge waterstanden rondom Zwolle (+/- 1,65 m +NAP) worden bij stormcondities (groene lijn) pas bereikt bij een grote terugkeertijd van ongeveer 1250 jaar. Sluiting van de kering reduceert de schade in geval van stormcondities pas bij situaties met een zeer kleine kans van voorkomen.

- Bij situaties die minder vaak voorkomen dan eens per 20 jaar wordt de afvoer de belangrijkste factor. Het verschil tussen de invloed van afvoer ten opzichte van stormcondities (roze ten opzichte van de groene lijn) wordt groter naarmate de waterstanden hoger worden.

Dit betekent dat de bijdrage van de Vechtafvoer in de kans op maatgevende (1/200 jaar) waterstanden het grootst is. Hoge waterstanden worden in dit geval bepaald door hoge afvoeren op de Vecht.

B4 Beschrijving Sobek-applicatie

Sobek is vernoemd naar een krokodilgod uit de Egyptische mythologie. Krokodillen werden in die tijd voorspellende gaven toegekend omdat zij hun eieren net boven de hoogwaterlijn legden van een opkomende vloedgolf op de Nijl.

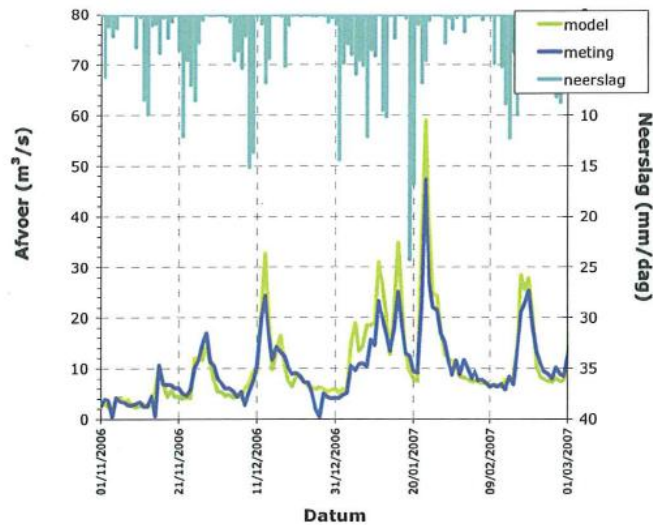
Binnen Sobek zijn een aantal modules beschikbaar, de keuze voor een bepaalde module of combinaties van modules hangt af van het doel van de modelleersessie. In dit onderzoek zijn een tweetal modules gebruikt, namelijk de Sobek-Rural 1DFLOW module en de RR (Rainfall-Runoff) module.

De Sobek-Rural 1DFLOW module is een geavanceerde module die zijn toepassing vindt in de simulatie van 1-dimensionale stromingen binnen irrigatiesystemen en afvoersystemen. Deze module vormt de hydraulische component binnen het model. Een juiste schematisatie van het watersysteem en hydraulische kenmerken is nodig om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen. Waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden zijn de belangrijkste output van het stromingsmodel.

De RR module binnen Sobek wordt gebruikt om verschillende neerslag-afvoer processen te beschrijven. Deze module vormt de hydrologische component binnen het model. Door aan de module een bepaalde neerslag op te leggen wordt op basis van een karakterisering van het stroomgebied (grondgebruik, bodemsoort, drooglegging, etc.) op de modelranden een zekere afvoer gesimuleerd. Deze module kan parallel of in serie gekoppeld worden aan het hydraulische model. Door de beide modules parallel aan elkaar door te rekenen kunnen de effecten van processen, die zich plaatsvinden op de modelranden van beide modules, worden meegenomen. Zo kan bijvoorbeeld een hoge waterstand zoals gemodelleerd in het hydraulische model een remmende werking hebben op de gegenereerde afvoer vanuit het neerslag-afvoer model.

B5 Kalibratie van het neerslag-afvoer model

Kalibratie van een model is nodig zodat de schematisatie (model is immers een schematisatie van een systeem) de werkelijkheid zo nauwkeurig en betrouwbaar mogelijk weergeeft. Het neerslag-afvoer model van de Sallandse Weteringen en de Zwolse grachten is gekalibreerd door de totale afvoer (alle modelranden samen) te vergelijken met de gemeten afvoer bij de keersluis in Zwolle. Van de keersluis zijn dagwaarden van de afvoer beschikbaar van september 2005 tot en met begin november 2007. De hoogste afvoer in deze periode werd gemeten op 23 januari 2007; het model is gekalibreerd op en rond deze piek (figuur B5.1), door steeds de hele periode vanaf oktober 2005 door te rekenen. Het model is gekalibreerd door de interne modelparameters voor de drainagefactoren aan te passen.



Figuur B5.1: Resultaten kalibratie neerslag-afvoer model.

Het model genereert vanaf 27 december tot en met de hoogwaterperiode meer afvoer dan er is gemeten. De waterbalans van de in- en uitvoer van het model geeft een groter overschot dan de afvoermeting weergeeft. Dit verschil wordt eind 2006 al opgebouwd en zorgt voor hogere afvoer in 2007. Een verklaring hiervoor kan zijn dat er te veel neerslag aan het model wordt opgelegd, bijvoorbeeld door een niet optimale toekenning van de stations aan de modelgebieden (bij het bepalen van de neerslag-afvoer relaties). Een andere verklaring, gegeven door Versteeg *et al.* (2008), is dat gedurende die periode in een deel van het gebied de afvoerrichting is gewijzigd, zodanig dat het betreffende gebied in de periode niet heeft afgevoerd richting Zwolle. Dit lijkt niet erg voor de hand te liggen en de oorzaak moet waarschijnlijk worden gezocht in het feit dat de initiële grondwaterstand een sterk bepalende invloed heeft op de respons van het model op een neerslaggebeurtenis.

De kalibratie van het model, op de piekafvoer in het voorjaar van 2007, geeft een overschatting weer van de daadwerkelijk opgetreden piekafvoeren. Het gekalibreerde model zal gebruikt worden in dit onderzoek waardoor de berekende hoogwaterstanden een conservatieve waarde vertegenwoordigen.

B6 Maximale afvoercapaciteit Sallandse Weteringen

De Sallandse Weteringen zijn relatief lange, rechte gekanaliseerde en bekade waterlopen. Tussen 1960 en 1970 hebben ze hun huidige vorm gekregen. In deze periode zijn aanpassingen uitgevoerd om de doorvoer van water te verbeteren en de wateroverlast in het gebied langs de Weteringen te beperken. De kaden langs de Weteringen zijn grotendeels aangelegd met materiaal dat vrij kwam bij vergroting van de Weteringen. Bij de aanleg van de kaden zijn geen eisen gesteld vanuit het oogpunt van een primaire kering. (Grontmij Projectbureau DAR, 2001)

De watergangen zijn ontworpen op een maatgevende afvoer met een frequentie van één maal per jaar, dit is een peil dat gemiddeld één à twee dagen per jaar wordt bereikt of overschreden. Deze afvoer is gebaseerd op een adequate ontwatering van de landbouw en bedraagt in Zwolle circa $49 \text{ m}^3/\text{s}$. Van deze afvoer is ongeveer de helft afkomstig van bemalen gebieden, terwijl de andere helft afkomstig is uit hogere gebieden die onder vrij verval op de Weteringen afvoeren. Bij het ontwerp van de Weteringen is een adequate ontwatering van de landbouwgronden leidend geweest en niet de maatgevende hoogwatercondities.

In eerder onderzoek, uitgevoerd door het Waterschap Groot Salland, is de maximale afvoercapaciteit van de Sallandse Weteringen richting Zwolle vastgesteld op $68 \text{ m}^3/\text{s}$ (WGS, 1998). Dit maximum voor de afvoer vanuit het stroomgebied is het gevolg van het overstromen van de kaden langs de waterlopen bovenstrooms van Wijhe en Langeslag, en beperkingen in de afvoer van de kunstwerken (gemalen e.d.).

Doordat bij de vaststelling van een maximale afvoercapaciteit voor de Weteringen grote kanttekeningen kunnen worden geplaatst, is besloten om in dit onderzoek als uitgangspunt geen rekening te houden met een beperking in de maximale afvoer van de Sallandse Weteringen. Er wordt vanuit gegaan dat hoge afvoeren volledig tot afstroming kunnen komen en wel met de volgende onderbouwing:

- Een maximale afvoer van de Sallandse Weteringen van $68 \text{ m}^3/\text{s}$ is, gezien de grootte van het stroomgebied van circa 50.000 ha, erg laag. Dit komt overeen met een afvoer van circa 11 mm/dag. Dat is een afvoer die in de meeste stroomgebieden in Nederland gemiddeld eens per jaar voorkomt.
- Mogelijk is de lage gemeten afvoer bij de Herfte (zie hoofdstuk 2.3.1) veroorzaakt door een snel stijgende benedenstroomse waterstand in die specifieke stormsituatie, gelijktijdig met een afvoergolf op de Weteringen. Een relatief hoge benedenstroomse waterstand is aannemelijk omdat de keringen bij Ramspol en Zwolle nog niet operationeel waren. Mogelijk is de maximale afvoer van de Weteringen onder andere omstandigheden, zoals bij lagere benedenstroomse randvoorwaarden, hoger. (Versteeg *et al.*, 2008)
- Aansluitend op dit laatste punt is door de Provincie Overijssel, in een persoonlijk vraaggesprek, aangegeven dat de hoogst gemeten afvoer bij het gemaal de Herfte is bepaald op basis van slechts enkele metingen. Hierbij is het aannemelijk dat de daadwerkelijke maximale afvoer niet is meegenomen in de analyse.
- De maximale afvoercapaciteit van de Weteringen wordt in grote mate bepaald door de geringe afmetingen van de waterlopen/kaden bovenstrooms van Wijhe en Langeslag. Tijdens perioden van hoogwater veroorzaakt dit op deze locaties overstromingen waardoor in feite minder water via de Weteringen richting Zwolle wordt afgevoerd. Het hanteren van een maximale afvoer van de Weteringen impliceert dan ook indirect het in stand houden van deze bovenstroomse overstromingen. Op bestuurlijk niveau zou afgesproken moeten worden dat er geen verbeteringswerken mogen plaatsvinden aan de bovenstroomse kades, dit wordt door de Provincie als zeer lastig omschreven.

B7 Lage kadeploogten langs het Almeloos kanaal

Figuur B7.1 toont de locatie langs het Almeloos kanaal waar de laagste kadeploogte te vinden is van 1,63 m +NAP. Deze locatie bevindt zich benedenstrooms van het Almeloos kanaal ter hoogte van de Buserstraat in Zwolle. Volgens het kadeploogtebestand van waterschap Groot Salland lopen de kadeploogten bovenstrooms geleidelijk op tot zij aansluiten bij de hoogte van de overige kaden langs het kanaal.



Figuur B7.1: Locatie met de lage kadeploogte (1,63m +NAP) langs het Almeloos kanaal.

Ook op drie andere locaties langs het Almeloos kanaal bleek volgens het kadeploogtebestand van het waterschap de kadeploogte wel erg laag te zijn. Volgens dit bestand bedroegen de kadeploogten hier ongeveer 1,60 m +NAP. In vergelijking met de overige kadeploogte langs het Almeloos kanaal vielen deze lage waarden op door de uitschieters in lage kadeploogten. Onderzoek naar deze locaties leerde dat de zeer lage kadeploogte niet juist en te laag zijn.

De eerste locatie betrof een coupure in de kade langs het Almeloos kanaal (zie figuur B7.2). De kadeploogte die was meegegeven aan deze locatie was de hoogte van de kering in geval dat de coupure open stond, de drempelhoogte. Bij dreigend hoogwater wordt er van uitgegaan dat de coupure gesloten wordt door de houten balken in de sleuven te plaatsen. In dat geval kan bovenop de drempelhoogte van 1,58 m +NAP een hoogte van 1,40 m er bij op worden geteld. De kadeploogte is dan gelijk aan 1,98 m +NAP. Deze waarde is dan ook meegenomen in de selectie van laagste kadeploogten op de betreffende locatie ten westen van de Zuidbroeklaan in Zwolle.



Figuur B7.2: Coupure in de zuidelijke kade langs het Almeloos kanaal met daarvoor de houten schutbalken.

In het geval van de overige twee locaties betrof het kaden die geen onderdeel meer uitmaken van de regionale keringen langs het Almeloos kanaal. Door de aanleg van een nieuwbouwwijk op het Wipstrikkamp is een nieuwe kade aangelegd die de waterstanden op het Almeloos kanaal moet keren. De

oude gegevens geven de hoogte weer van twee verbindingswegen (aangelegd door de oude kade) die de nieuwbouwwijk met het wegennet van Zwolle verbinden (zie figuur B7.3). De kadehoogte van de nieuw aangelegde kade langs het Wipstrikkanaal en het Almeloos kanaal ligt op 2,75 m +NAP.



Figuur B7.3: Links de oude kade van het Wipstrikkanaal met toegangsweg. Rechts nieuwbouwwijk Wipstrikkanaal inclusief nieuw aangelegde kade.

B8 Verslag workshop & bezoek waterschap Groot Salland

In het kader van het afstudeeronderzoek naar de hoogwaterveiligheid van de Sallandse Weteringen en de Zwolse stadsgrachten is er op 21 oktober 2009 een workshop georganiseerd met als doel het opstellen van waterstandverlagende maatregelen. Deze workshop is gehouden in het provinciehuis van Overijssel waarbij de volgende personen aanwezig waren:

- *Henk Tienstra*, beleidsmedewerker water en bodem bij de Provincie Overijssel met als aandachtsgebied waterkeringen en hoogwaterveiligheid.
- *Dirk van der Schrier*, gepensioneerd beleidsmedewerker bij de Provincie Overijssel. Betrokken bij de inspraakprocedures van het DAR-project en schrijft op persoonlijke titel diverse kritische artikelen over het Nederlandse waterbeheer.
- *Rien Kolkman*, als universitair docent aan de Universiteit Twente waren de Weteringen en de keersluis in Zwolle onderwerp van zijn dissertatie. Hierdoor ook veel meegekregen in de bewegingen rond de besluitvorming.
- *Janneke de Graaf*, als projectleider waterbeheer bij adviesbureau HydroLogic in Amersfoort begeleidt zij het afstudeeronderzoek.
- *Pieter van Oel*, begeleidt het afstudeeronderzoek vanuit de Universiteit Twente als dagelijkse begeleider.
- *Gert-Ruben van Goor*, student Water Engineering & Management aan de Universiteit Twente, de afstudeerder.

Naast deze workshop heeft er overleg met het Waterschap Groot Salland plaatsgevonden op 27 oktober 2009 in het waterschapshuis in Zwolle, waarbij onder andere de resultaten van de workshop zijn besproken. Hierbij aanwezig waren:

- *Chris Griffioen*, hoofd sector waterbeleid bij het Waterschap Groot Salland. Hij heeft onder andere de waterNOOD systematiek opgesteld in lijn met het WB21 beleid.
- *Gerben Tromp*, hydroloog bij het Waterschap Groot Salland, is betrokken bij de modellering van het gebied en het opstellen van de officiële maatgevende hoogwaterstanden.
- *Barry Ros*, beleidsadviseur waterkeringen bij het waterschap. De keringen langs de Weteringen en de stadsgrachten vallen onder het werkgebied van Ros.

In de volgende paragrafen volgt een puntsgewijze samenvatting van beide samenkomsten waar de belangrijkste punten worden besproken. Deze punten zijn geordend volgens de thema's: het probleem, het watersysteem en modellering.

Het probleem

- *Er hebben geen verbeteringswerken plaatsgevonden aan de kaden*
Verbaasd werd er gereageerd toen werd medegedeeld dat sinds de jaren '60-'70 toen de kaden langs de Weteringen en stadsgrachten hun huidige vorm kregen, maar ook na uitvoering van het DAR-project, er geen verbeteringswerken aan de kaden hebben plaatsgevonden. Ook na de bouw van de keersluis is er geen verdere actie ondernomen (enkel lokaal wat maatregelen om de stabiliteit te verbeteren).
- *Normering 1/200 jaar*
Normering met overschrijdingsfrequentie van 1/200 jaar wordt breed gedragen. Gedifferentieerd normeren voor de kaden langs de Weteringen (op basis van risico's, cq gevolgschade) is volgens de Provincie onlogisch: het is één doorgaande kering met daarop één normering.
- *Lage kadehoogten Almeloos kanaal onzeker*
Laagste kadehoogte langs Almeloos Kanaal vertoont lokaal zeer lage waarden (+/- 1,60 m+NAP): wordt uitgezocht met Waterschap Groot Salland. Na mailcorrespondentie met de heer Bruins Slot, beleidsmedewerker waterkeringen van het waterschap, blijkt dat de kaden op deze locaties inderdaad zeer laag zijn.
- *Voorverkenning laat zien dat de kade niet voldoende op hoogte zijn*

Voorverkenning van de hoogwaterstanden laat zien dat de kaden op meerdere locaties niet voldoende op hoogte zijn om de waterstanden te kunnen keren.

- *Extreme situaties: kans op overstromen vanuit Weteringen + water op land*

Al snel wordt duidelijk dat in extreme neerslagsituaties het probleem in een tweetal componenten is onder te verdelen: waterveiligheid in Zwolle en langs de Weteringen, en wateroverlast in het achterland Salland. Door hevige neerslag staat er bovenstrooms van de Weteringen water op het land, dit water vindt zijn weg naar het laagste punt, omgeving Zwolle (in de woorden van een deelnemer: "het water wat van de berg komt rollen richting Zwolle").

De situatie zoals die zich voordeed in 1998 geeft deze tweezijdige problematiek goed weer. Bovenstrooms van Zwolle stond een graafmachine gereed om hier de kade door te breken om Zwolle droog te houden, dit bleek achteraf niet nodig, en in de vlakke benedenstroomse gebieden kon het water niet snel genoeg worden afgevoerd met als resultaat ondergelopen polders. Het plaatje van de Soeslo polder illustreerde dit op een treffende wijze, hierbij werd opgemerkt dat door het water, wat van hoger gelegen gebieden naar lager gelegen gebieden stroomt, de grenzen van de deelstroomgebieden in het gebied wegvielen.

Achtergrond: voor het beschermingsniveau tegen wateroverlast in het beheergebied van Groot Salland wordt verwezen naar de website van het waterschap: http://www.wgs.nl/ruimte_voor_water/onderzoek. De hier gepresenteerde normeringskaart, die dit najaar (2009) door de Provincie Overijssel formeel wordt vastgelegd, laat zien dat voor vrijwel het gehele landelijke gebied een minimaal beschermingsniveau tegen wateroverlast geldt van 1/10 jaar. Voor stedelijk gebied is het beschermingsniveau vastgelegd op 1/100 jaar, conform de NBW.

Het watersysteem

- *Maatgevend: hoge (maatgevende) afvoer op de Vecht en Sallandse Weteringen*

Waterstanden in Zwolle met een terugkeertijd van eens per 100 jaar en meer worden voor het overgrote deel bepaald door een hoge afvoer op de Vecht. Stormcondities kunnen nog wel leiden tot hoge waterstanden in Zwolle, echter is de kans op een dergelijke gebeurtenis zeer klein. Waterstanden op de stadsgrachten en Weteringen zijn maatgevend onder condities van hoge (maatgevende) afvoeren op de Vecht en de Weteringen.

- *Afvoer Sallandse Weteringen heeft een beperkte invloed op de hoogwaterstanden in Zwolle*

De afvoer van de Weteringen heeft een beperkte bijdrage aan de hoogwaterstanden in Zwolle. Bovenstrooms van Zwolle langs het Almeloos Kanaal, de Soestwetering en de Nieuwe Wetering wordt deze bijdrage groter. De benedenrand, oftewel de waterstand op de Vechtmonding, is dominant voor de optredende waterstanden in Zwolle. Op basis van deze bevindingen is gesteld dat als men de hoogwaterstanden in Zwolle wil verlagen, er maatregelen genomen zullen moeten worden die de waterstand op de benedenrand verlagen. In Zwolle wordt een maximaal toelaatbare waterstand van 1,80 m +NAP aangehouden.

- *Modelranden*

Het gebruikte model genereert een totale afvoer uit het stroomgebied van de Weteringen van circa 84 m³/s. De maximale waterstand op de benedenrand van het model (Vechtmonding) bedraagt 1,87 m +NAP (1/200 jaar situatie), conform HR2006.

Modellering

- *Maatgevende hoogwaterstanden dienen nog officieel vastgelegd te worden*

De hoogwaterstanden, zoals gepresenteerd in de tussenrapportage, zijn gebaseerd op het huidige Sobek-model van het watersysteem. Het waterschap wil benadrukken dat deze hoogwaterstanden niet de officiële maatgevende hoogwaterstanden zijn. Deze worden nader bepaald op basis van enkele aanpassingen op het huidige model. Het betreft hier aanpassingen in de hydraulische component waarbij sommige profielen en bruggen beter in het model worden gebracht. Daarnaast wordt de neerslag-afvoercomponent niet verbeterd, maar wordt gerekend met stationaire afvoeren.

- *Gemaal Ankersmit en deelstroomgebieden dragen niet bij aan afvoer Sallandse Weteringen (aannname)*
Gemaal Ankersmit (cap. +/- 7 m³/s) en de gebieden die via dit gemaal afwateren op de IJssel zijn niet meegenomen in het neerslag-afvoer model. Gemaal Ankersmit en de bijbehorende deelstroomgebieden mogen in extreme situaties niet afwateren richting Zwolle (afpraak/ beleid wgs, na 1998 leermoment). Door dit te stellen dragen zij niet bij aan de afvoer op de Sallandse Weteringen.
- *Model gebruikt het jaar 2015 als referentiejaar*
Het zichtjaar van het model is 2015, dit houdt praktisch in dat 20-25% van de waternoodmaatregelen van waterschap Groot Salland zijn opgenomen in de modellering van het stroomgebied.

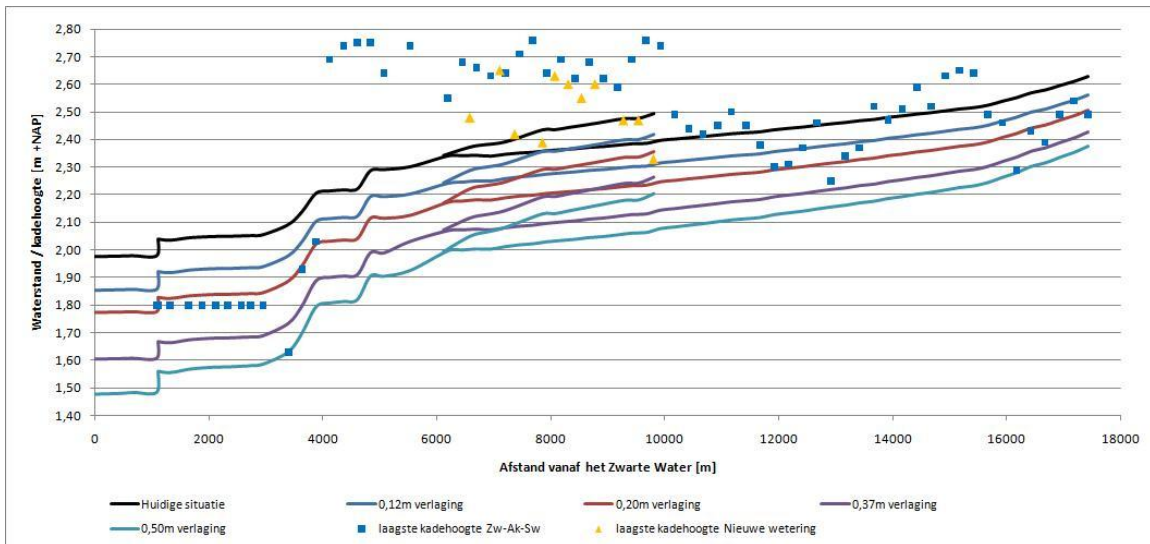
B9 Screening individuele maatregelen

Voorstel maatregelen deelsysteem Zwolle (A-nummers) en deelsysteem Sallandse Weteringen (B-nummers)	1. Kwalitatieve effectbepaling	2. Mogelijkheid tot (kwantitatieve) analyse	3. Aansluiting bij het onderzoek	resultaat eerste screening
A1 Verlagen/vertragen van de Vechtpiek (benedenrand systeem)	V	V	V	1. Maatregelen in het stroomgebied van de Vecht die de waterstand op de Vechtmonding verlagen en/of de piekafvoer van de Vecht vertragen dragen bij aan het verlagen van de hoogwaterstanden op de stadsgrachten en de Weteringen. 2. Door in het hydraulische model de waterstand op de benedenrand te variëren is inzicht te verkrijgen in de invloed van de waterstand op de Vechtmonding op de hoogwaterstanden in Zwolle en op de Weteringen. 3. Dit onderzoek richt zich op het effect van de Vechtwaterstand op de hoogwaterstanden in Zwolle en verder bovenstrooms. Op basis van eerder onderzoek zijn mogelijke maatregelen voorgedragen die de waterstand op de Vechtmonding positief kunnen beïnvloeden.
A2 Inzetten keersluis Zwolle	V	V	V	1. Gebruik makend van het huidige systeem kan de keersluis worden ingezet om de hoge waterstanden op het Zwarte Water te keren. Effectief mits in combinatie met maatregel die de afvoer van de Weteringen 'afvangt'. 2. Door het sluitings- en openingsalgoritme te manipuleren in het hydraulische model. 3. Sluit aan bij de doelstelling van het onderzoek waarmee ook mogelijkheden binnen het huidige systeem onderzocht worden.
A3 Uitdiepen Zwolle- IJsselkanaal - Vechtmonding	O	-	-	1. Geen effect op hoogwaterstanden in het regionale watersysteem. Het Zwolle-IJsselkanaal voert geen water af en uitdieping zal dan ook niet bijdragen aan een verlaging van de waterstand op de Vechtmonding. Hetzelfde geldt voor het traject Zwolle-Vechtmonding, als zijrivier van de Vecht zal uitdieping niet of nauwelijks effect sorteren.
B1 Bypass Zwolle	V	V	V	1. Door (een gedeelte van) de afvoer om te leiden zal het debiet stroomafwaarts afnemen en daarmee ook de hoogwaterstanden. In totaal zijn drie varianten onderzocht. Twee varianten waarbij de mogelijkheid tot vrij afvoeren op de Vecht en IJssel is onderzocht en de laatste waarmee door gebruik te maken van een gemaal wordt uitgeslagen op de IJssel. 2. De mogelijkheid tot vrij afvoeren hangt af van de optredende waterstanden op de rivieren waarop aansluiting wordt gevonden. Op basis van HR2006 zijn inschattingen gemaakt van deze waterstanden. Met deze informatie is aan te geven of vrij afvoeren kansrijk is, dit zal worden gestaafd

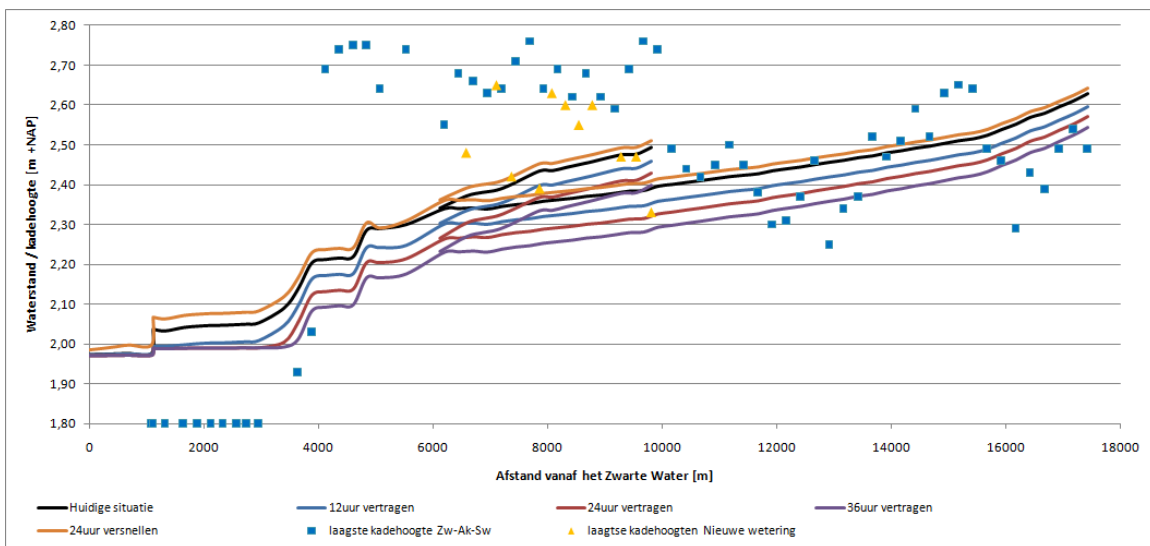
B1 (vervolg)				door modelberekeningen.
Bypass Zwolle				3. Een mogelijke bypass voor Zwolle is een innovatieve maatregel te noemen die past binnen de doelstelling van dit onderzoek. Eerder onderzoek naar een dergelijke maatregel heeft tot nu toe niet plaatsgevonden. Nauwkeurigheid van de analyse zal afhangen van de beschikbare informatie over optredende waterstanden op de IJssel en Vecht rivieren.
B2				1. Lokaal en verder bovenstrooms kan deze maatregel zeer nuttig blijken om de hoogwaterstanden te reduceren. In het huidige systeem is het Almeloos kanaal een knelpunt waardoor de waterstanden worden opgestuwd.
Profielverruiming Almeloos kanaal	V	V	V	2. Met behulp van het hydraulische model kan de dimensionering van het kanaal gevarieerd worden. 3. Dat het Almeloos kanaal een knelpunt vormt binnen het systeem wordt onderkend (zie verslaglegging workshop). Onderzoek naar de effectiviteit van profielverruiming van het kanaal is nog niet eerder uitgevoerd en past ook goed binnen de doelstelling van dit onderzoek waarbij knelpunten worden geïdentificeerd en geanalyseerd.
B3				1. Volgt het beleid van waterschap Groot Salland. Water (langer) vasthouden in het achterland reduceert de afvoer op de Weteringen en daarmee de hoogwaterstanden. Daarnaast is het beleid er op gericht om het te veel aan water lokaal op het maaiveld te bergen.
Vasthouden van water bovenstrooms in het stroomgebied	V	V	V	2. De piekafvoer op de Weteringen zal afnemen. Het effect van deze maatregelen op de hoogwaterstanden kan gesimuleerd worden in het hydraulische model.
B4				3. Effectiviteit van deze maatregel is onderzocht in Versteeg <i>et al.</i> (2008). Hierin is gebleken dat het inzetten van bergingsgebieden langs de Soestwetering zeer effectief is om de waterstanden op de Weteringen te reduceren (+/- 20 cm); in Zwolle is het effect geringer (+/- 4 cm).
Waterberging langs Weteringen	-	-	O	

B10 Lengteprofielen hoogwaterstanden

B10.1 Verlagen/vertragen Vechtpiek

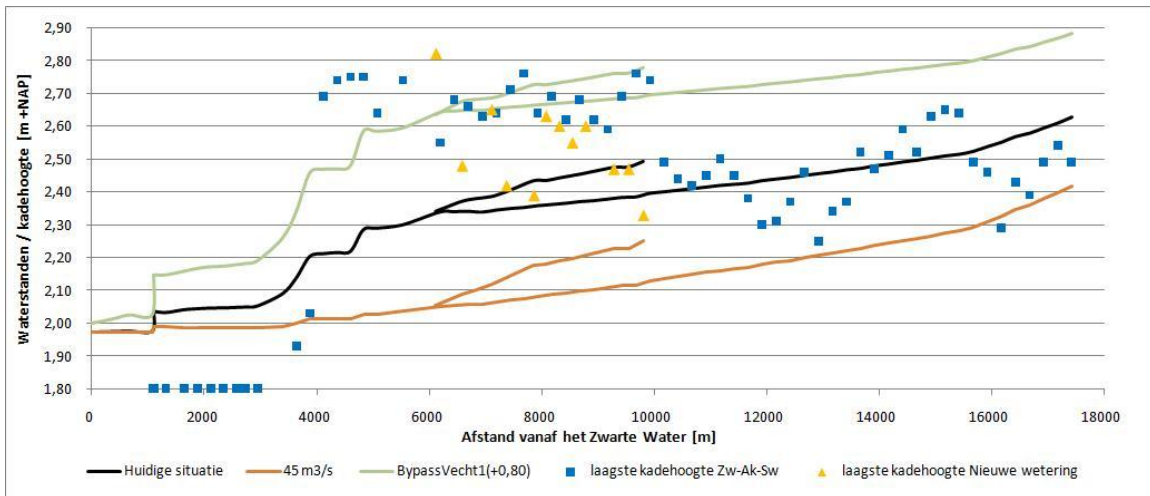


Figuur B10.1: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij verschillende verlagingen van de waterstand op de Vechtmonding.

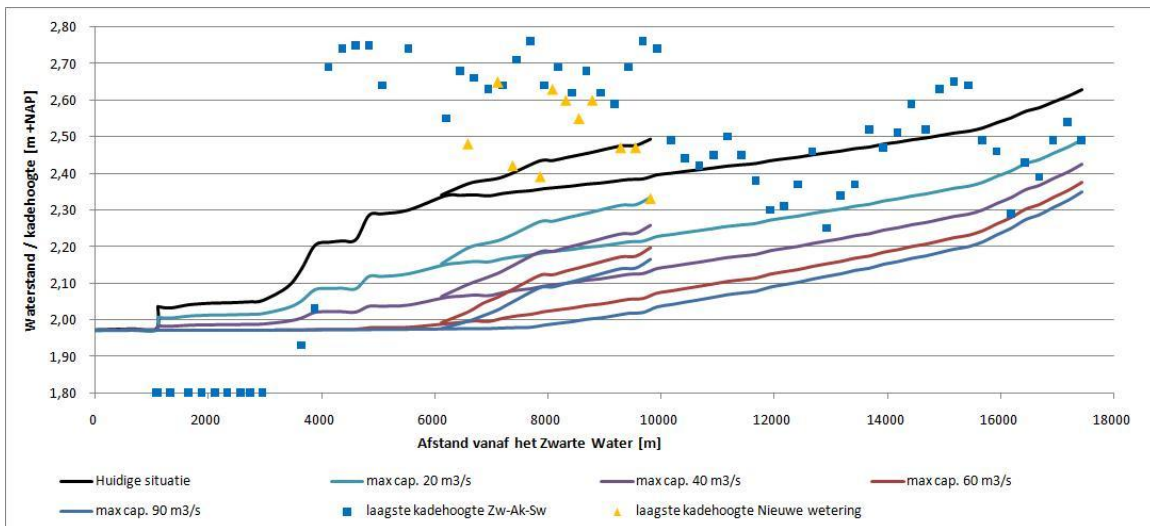


Figuur B10.2: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij het vertragen/versnellen van de afvoerpiek op de Vecht.

B10.2 Bypass Zwolle

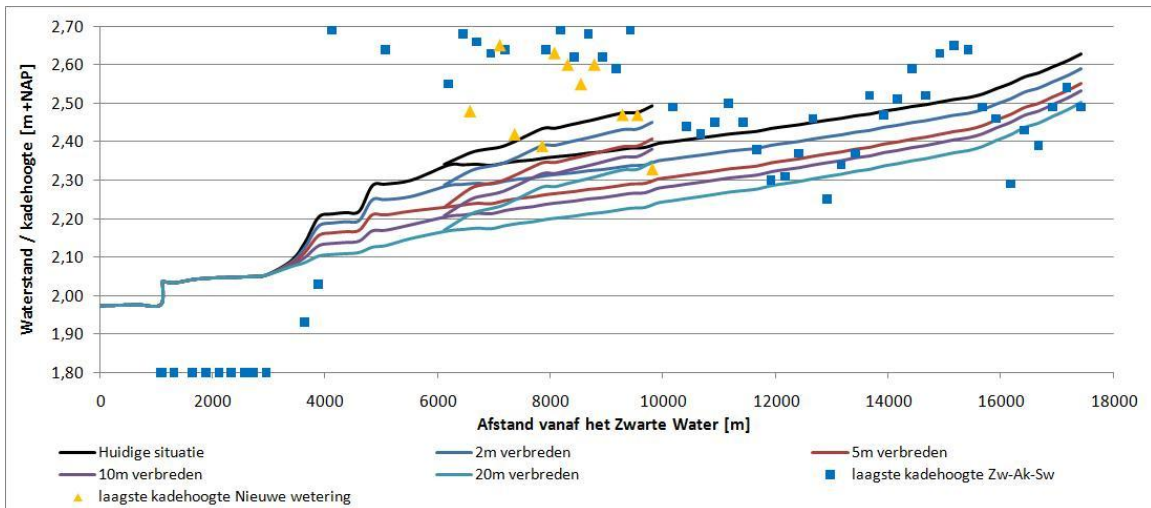


Figuur B10.3: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij twee bypass-varianten op de Vecht.

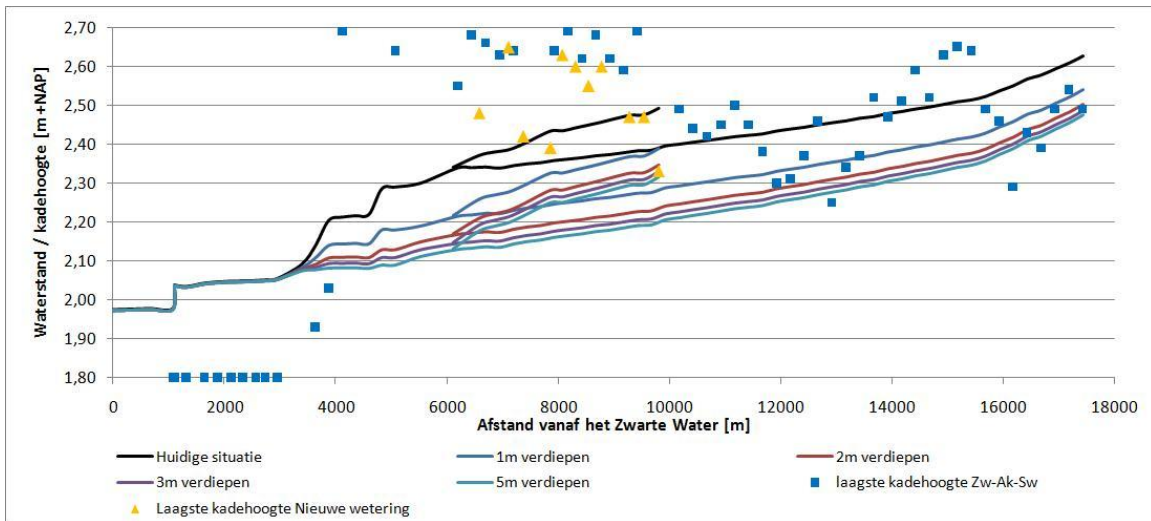


Figuur B10.4: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij een gemaal nabij Gerenvonder met verschillende pompcapaciteiten.

B10.3 Profielverruiming Almeloos kanaal

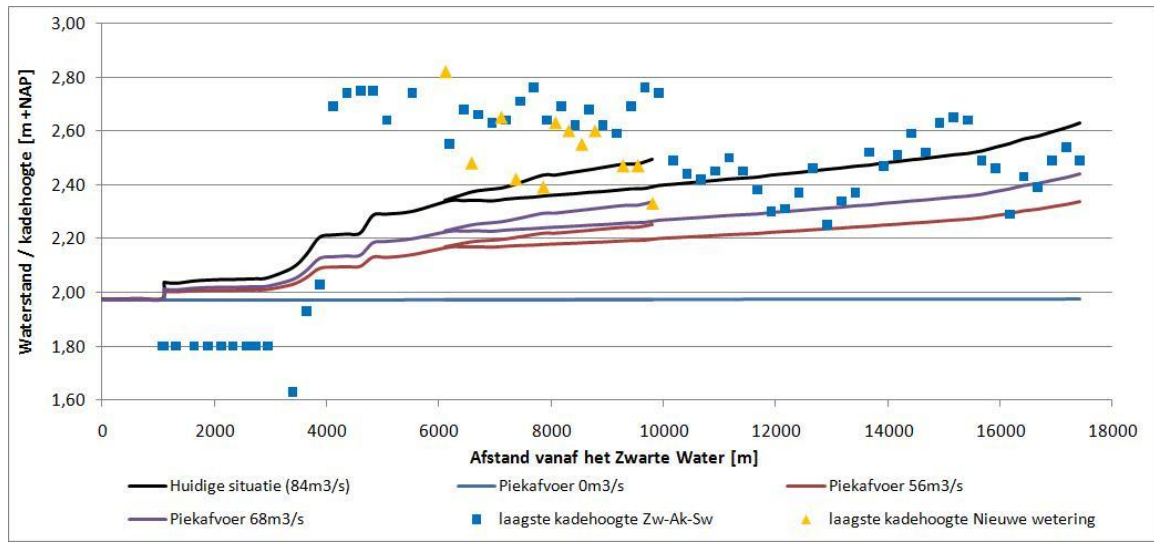


Figuur B10.5: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij een verbreding van het Almeloos kanaal.



Figuur B10.6: Lengteprofiel van de hoogwaterstanden bij een verdieping van het Almeloos kanaal.

B10.4 Vasthouden van water in het achterland (piekreductie afvoer)

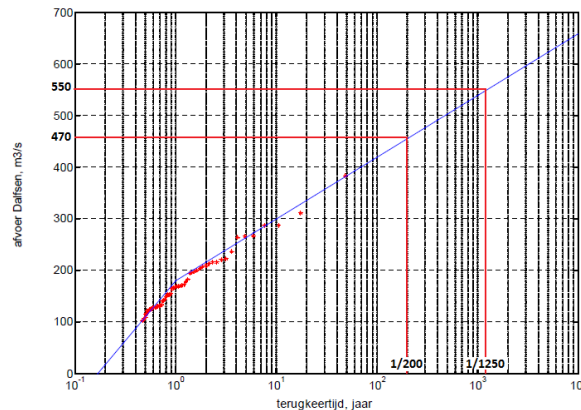


Figuur B10.7: Lengteprofiel van waterstanden bij verschillende piekafvoeren op de Sallandse Weteringen.

B11 Analyse correlatie tussen Vecht en IJssel

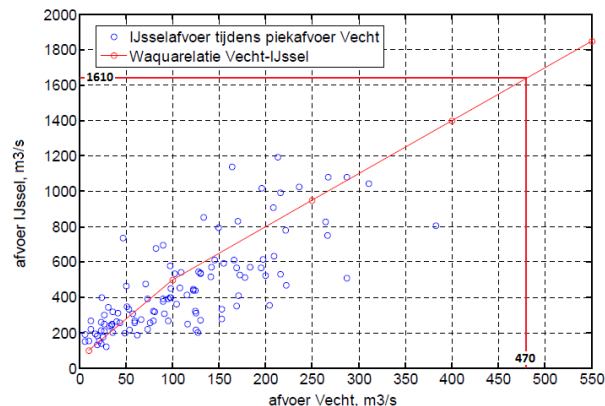
Onderzocht is of het mogelijk zou zijn om onder vrij verval af te voeren op de IJssel via het Zwolle-IJssel kanaal en de Spooldersluis. Voorwaarde hiervoor is dat de waterstanden op de IJssel lager zijn dan die op de Vecht ten tijde van hoogwaterperiodes op deze laatste rivier. Alleen dan is vrij afvoeren op de IJssel een zinvolle, effectieve maatregel te noemen waarbij de hoogwaterstanden ook in Zwolle en op de Weteringen zullen dalen.

Op basis van de HR2006 van de Vecht- en IJsseldelta (Geerse, 2006) is de correlatie tussen de Vecht en de IJssel onderzocht. Figuur B11.1 laat zien dat een 1/200 jaar situatie op de Vecht gepaard gaat met een afvoer bij Dalfsen van circa 470 m³/s. In het verleden gold deze afvoer nog als de maatgevende afvoer voor de Vecht (1/1250 jaar situatie) zoals vastgesteld door Chbab (1995). In de HR2006 is gerekend met een nieuwe maatgevende afvoer, behorende bij een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 jaar, van 550 m³/s.



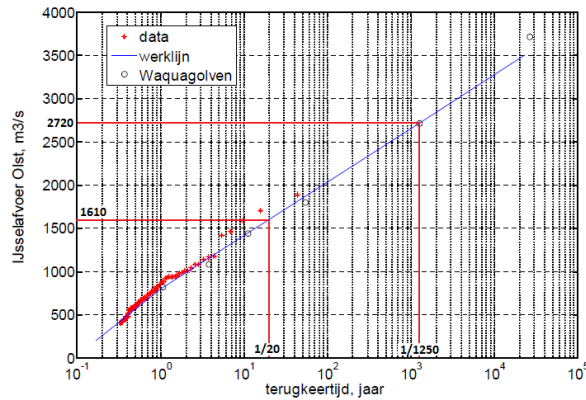
Figuur B11.1: Terugkeertijden van afvoeren op de Vecht ter hoogte van Dalfsen (bewerkt uit Geerse, 2006).

De afvoer van 470 m³/s op de Vecht is naar Geerse (2006) gecorreleerd aan een IJsselafvoer van circa 1610 m³/s (zie figuur B11.2). Nu dient de vraag beantwoord te worden of de maximale waterstand op de IJssel behorende bij deze afvoer lager is dan de maximale waterstand op de Vecht, die met een overschrijdingsfrequentie van 1/200 jaar is vastgesteld op 1,87 m +NAP (zie §2.3.1). In deze analyse zal er van uit worden gegaan dat er geen faseverschil plaatsvindt tussen beide afvoergolven en dat zodoende beide maxima tegelijkertijd optreden. Door het grotere stroomgebied van de IJssel zal in de praktijk de afvoergolf op deze rivier achterlopen op die van de Vecht. Hierdoor zou de maximale waterstand op de Vecht vergeleken kunnen worden met een lagere waterstand op de IJssel dan de maximale waterstand tijdens de betreffende afvoergolf. Hier wordt dan ook de meest ongunstigste situatie behandeld waarbij beide afvoergolven zonder faseverschil optreden.



Figuur B11.2: Correlatie tussen Vecht- en IJsselafvoeren (bewerkt uit Geerse, 2006).

In figuur B11.3, die de relatie tussen afvoer en terugkeertijd voor Olst weergeeft, is te zien dat een afvoer van 1610 m³/s op de IJssel zich ongeveer eens in de 20 jaar voordoet. De waterstanden op de IJssel, ter hoogte van de Spooldersluis, behorende bij een terugkeertijd van 1250 en 2000 jaar zijn bekend uit de HR2006 en bedragen respectievelijk 4,6 en 4,7 m +NAP. Op basis van deze gegevens is een inschatting te maken van de waterstand die bij een 1/20 jaar situatie (1610 m³/s) hoort, dit is gedaan door via de eenvoudige Chézy een relatie af te leiden tussen afvoer en waterstand.



Figuur B11.3: Terugkeertijden van afvoeren op de IJssel bij Olst (bewerkt uit Geerse, 2006).

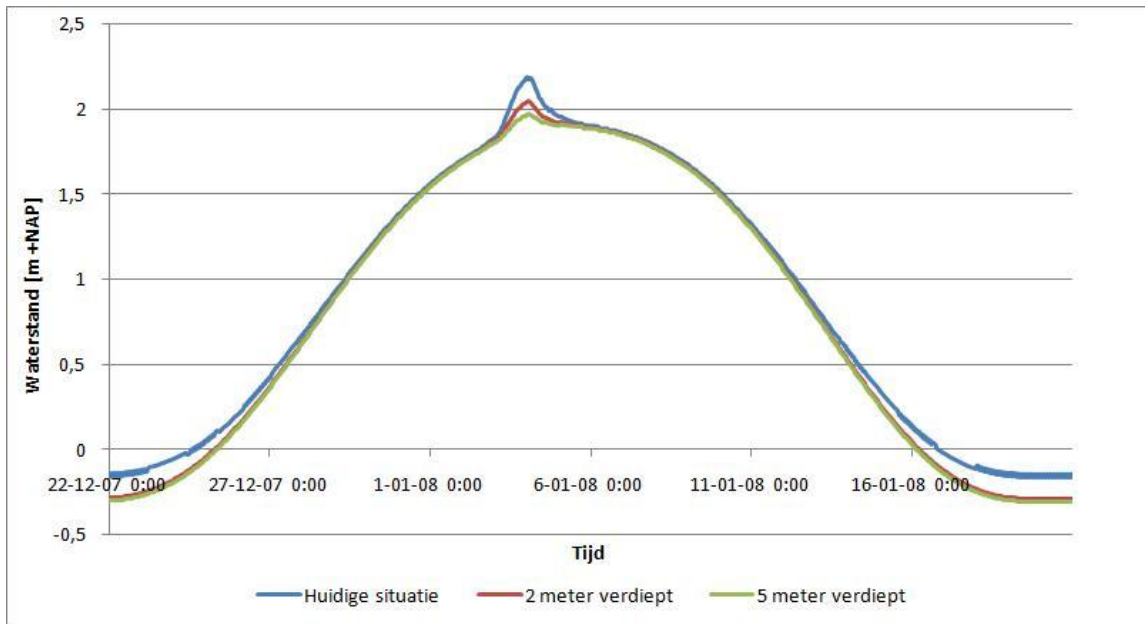
De afvoer door een geul is te benaderen met $Q = C \cdot B \cdot h^{3/2} \cdot i^{1/2}$ en waterstand $H = h + z_b$. Wanneer de ruwheid (C), breedte (B), verhang (i) en bodemniveau (z_b) niet veranderen volgt dat de waterstand zich met een factor $h \sim Q^{2/3}$ verhoudt tot de afvoer. Vergelijken we de afvoeren van de 1/20 jaar situatie (1610 m³/s) met de 1/1250 jaar situatie (2720 m³/s) dan verschilt dit een factor:

$$1610 / 2720 = 0,59$$

De afvoer neemt met 41% af waardoor de waterstand met 30% afneemt ($[1 - 0,59^{2/3}] \cdot 100\%$). Op deze wijze is de maximale waterstand, behorende bij een overschrijdingsfrequentie van 1/20 jaar, bepaald op 3,2m +NAP (0,70 · 4,6m +NAP). De maximale waterstand tijdens de beschouwde situatie op de IJssel ligt circa 1,33m boven de maximale waterstand op de Vechtmonding waardoor, op basis van deze analyse, geconcludeerd mag worden dat onder vrij verval afvoeren op de IJssel, via de het Zwolle-IJssel kanaal en de Spooldersluis, niet mogelijk blijkt.

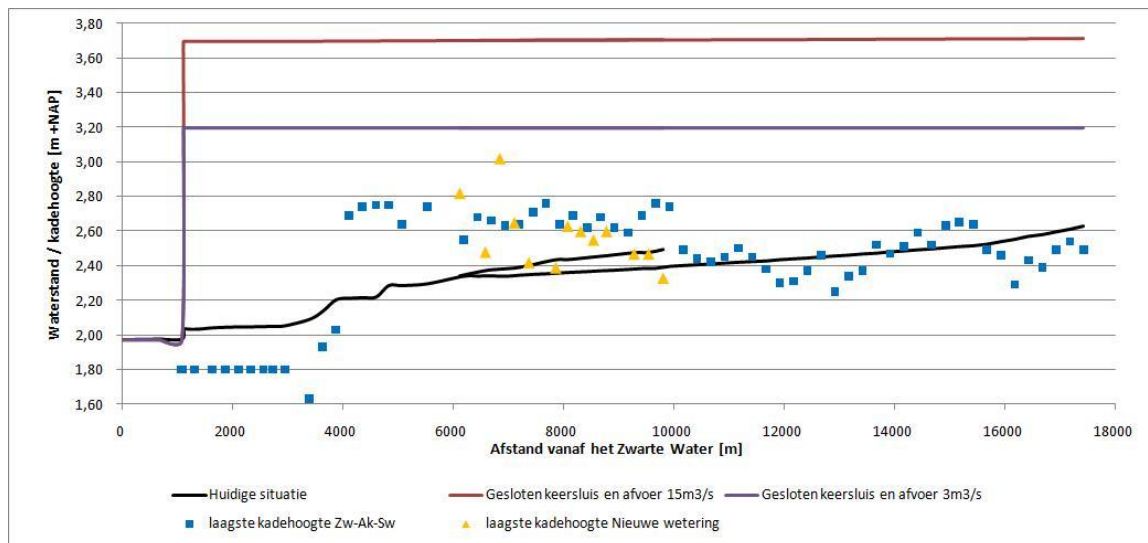
Dat, in ieder geval tijdens gemiddelde omstandigheden, de waterstanden op de IJssel hoger zijn dan die op de Vecht en het Zwarte Water is daarnaast ook af te leiden aan de sluisdeuren van de Spooldersluis. Deze staan in een V-vorm richting de IJssel zodat de deuren door de waterdruk dicht worden gehouden.

B12 Waterstandsverloop Almeloos kanaal bij verdieping



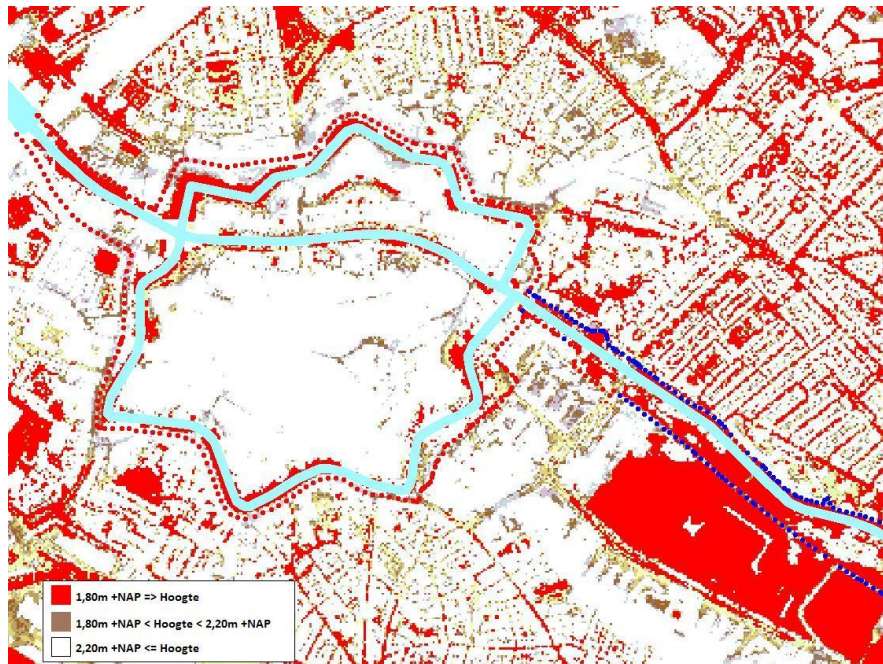
Figuur B12.1: Tijdreeksen van waterstanden op het Almeloos kanaal (locatie Gerenvonder).

B13 Gesloten keersluis in combinatie met beperkte afvoer op de Weteringen



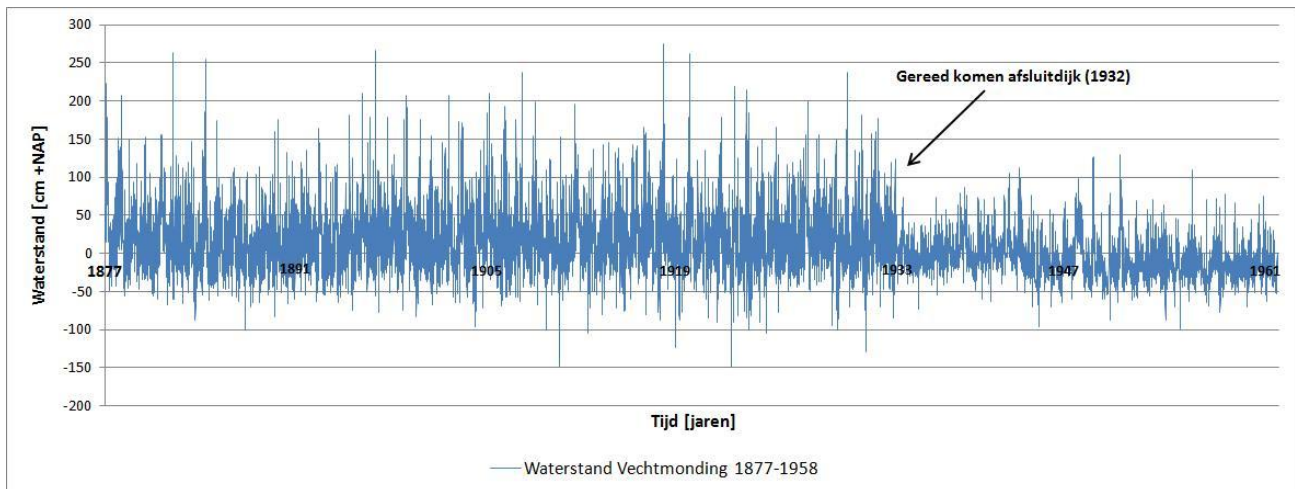
Figuur B13.1: Lengteprofiel van hoogwaterstanden in het geval van gesloten keersluis bij Zwolle en geringe afvoer op de Weteringen.

B14 Hoogtekaart Zwolle



Figuur B14.1: Hoogtekaart van Zwolle in drie klassen (rood/donker is lager gelegen dan 1,80m +NAP).

B15 Waterstandsverloop Vechtmonding 1877-1958



Figuur 15.1: Waterstandsverloop op de Vechtmonding tussen 1877 en 1958. Het effect van het gereedkomen van de afsluitdijk is duidelijk herkenbaar (gemiddeld lagere waterstanden en minder variatie vanaf 1932)

