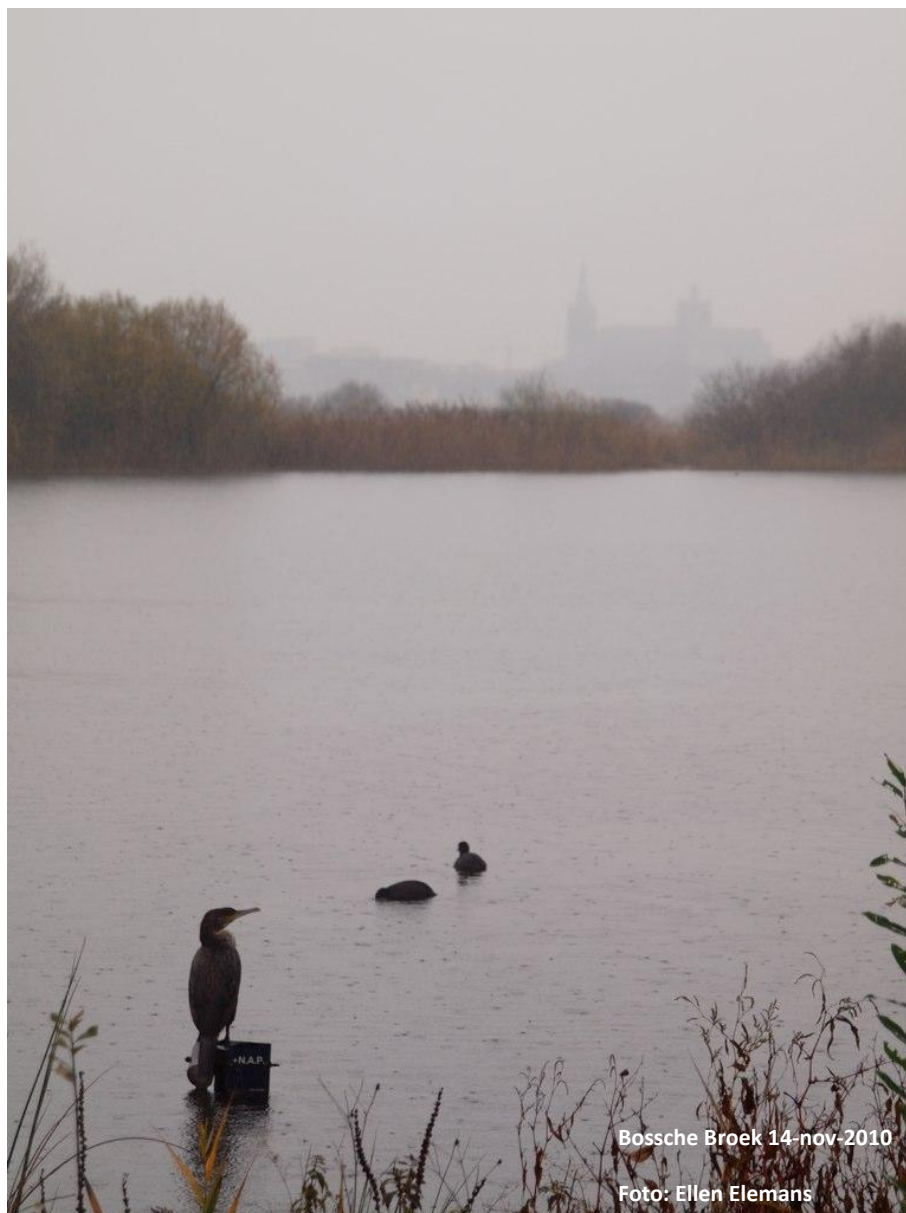


De relatie tussen KRW & WB21 maatregelen in beekdalen en droge voeten benedenstrooms.

Analyse van de effecten van maatregelen in het stroomgebied De Dommel op wateroverlast rond 's-Hertogenbosch.



De relatie tussen KRW & WB21 maatregelen in beekdalen en droge voeten benedenstrooms.

Masterscriptie over:

*Analyse van de effecten van maatregelen
in het stroomgebied De Dommel
op wateroverlast rond 's-Hertogenbosch.*

Door:

Niels Alwin Entzinger

Een eindverslag ter afronding van de Masterstudie
Water Engineering and Management
aan de Universiteit Twente.

Examen comité:	
Voorzitter:	Dr. M.S. Krol
Begeleider UT:	Dr. Ir. P.R. van Oel
Begeleider WSDD:	Ing. M.A.J. van de Wouw

12-08-2011

Copyright ©2011, The University of Twente and Waterschap De Dommel. All rights reserved. No part of this report may be used or reproduced in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system without prior written permission of The University of Twente, Waterschap De Dommel or the author, except in the case of brief quotations embodied in critical articles and reviews.

Samenvatting

Vanuit het beleidstraject Kaderrichtlijn Water (KRW) wordt beekherstel veelvuldig toegepast om een gezondere en natuurlijkere beek te krijgen en vanuit het beleidstraject Waterbeheer 21^e eeuw (WB21) worden retentiegebieden aangelegd om gebieden te beschermen tegen wateroverlast. Dit onderzoek gaat na of de beide maatregelen effect hebben op hoogwater benedenstrooms. Het onderzoek analyseert de effecten van beekherstel en retentie bij een maatgevende meteorologische situatie voor het stroomgebied van De Dommel met behulp van een computermodel waarmee het hydraulisch-hydrologische systeem is geschematiseerd.

De doelstelling van het onderzoek is:

Analyseren of, en in welke mate, beekherstel en het aanleggen van retentiegebieden in een beekdal ten behoeve van de KRW en WB21 een versterkend effect kunnen hebben op wateroverlast benedenstrooms door middel van modellering in het beheergebied van Waterschap De Dommel en analyse van de gevolgen voor 's-Hertogenbosch bij extreem hoogwater.

De situatie bij 's-Hertogenbosch is niet alleen afhankelijk van de aanvoer van De Dommel. De Dommel en de Aa komen samen in 's-Hertogenbosch om samen als de Dieze af te voeren op de Maas. Als bij een hoge Maasstand dit niet meer mogelijk is, moeten beide rivieren over het Drongelens kanaal afvoeren dat een maximumcapaciteit heeft van 100m³/s. Wanneer Aa en Dommel samen meer dan 100m³/s aanvoeren, moet het overschot worden geborgen in de waterlopen en retentiegebieden. Vlak voor 's-Hertogenbosch mondt de Essche Stroom uit in De Dommel. Over het algemeen voert de Aa het snelste haar water af, gevolgd door de Essche Stroom en De Dommel. Door overlap van de afvoerkrommen van deze drie beken en de Maas, kan vertraging en versnelling van de afvoer evenals verlaging van de afvoer grote effecten hebben op de situatie in 's-Hertogenbosch.

Voor de simulatie van het systeem wordt uitgegaan van een maatgevende situatie met een herhalingstijd van ééns in de 150 jaar. Dit is de vastgestelde norm voor hoogwater in en om 's-Hertogenbosch na de hoogwaters van 1995 en 1998. Om deze herhalingstijd te bereiken wordt gesimuleerd met een maasgolf van T=120 en een gebiedsdekkende neerslag op het gebied van De Dommel en de Aa met een herhalingstijd van T=100. De neerslag heeft de opbouw van een gemiddelde extreme neerslaggebeurtenis en is geschaald naar een T=100 situatie. Er wordt vanuit gegaan dat ook het hoogwater in de Maas wordt veroorzaakt door dezelfde bui (in de Ardennen). Het systeem is geschematiseerd met Sobek (1DFLOW, Overland Flow en RR) in combinatie met het Wageningenmodel (landelijke Neerslag-Afvoer) en het Dommel-RWZI model.

De hoofdconclusies zijn dat beekherstel niet leidt tot een noemenswaardige verandering van de situatie in 's-Hertogenbosch en dat retentie, mits juist uitgevoerd wel een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan verlaging van het aankomend debiet benedenstrooms.

Daarnaast wordt geconcludeerd dat retentiegebieden in het bovenstroomse deel van het stroomgebied een groot piekverlagend en een beperkt vertragend effect kunnen hebben op de situatie benedenstrooms. Retentiegebieden kunnen nutteloos of zelfs contraproductief blijken een extremere situatie dan waarop ze gebouwd zijn, en de locatie van het gebied voorheen ook inundeerde. Daarnaast kunnen retentiegebieden die niet direct effectief lijken omdat zij te vroeg of te laat ingezet worden, toch een groot effect hebben indien het moment van retentie samenvalt met de piek van een andere (samenkomende) beek. Afsluitend kan worden geconcludeerd dat de gekozen maatgevende situatie extremer is gebleken dan de T=150 waardoor de waterstanden in 's-Hertogenbosch een vertekend beeld geven van het verschil tussen de gesimuleerde situaties.

Er wordt aanbevolen om retentiegebieden zo in te richten dat zij voor verschillende extreme situaties effectief zijn, en om altijd bij het ontwerp een effectstudie te maken voor de situatie benedenstrooms bij verschillende maatgevende situaties.



Voorwoord

Op 14 november 2010 tijdens het hoogwater, ben ik een kijkje gaan nemen bij Bossche Broek, dit retentiegebied is één van de laatste redmiddelen om 's-Hertogenbosch te beschermen tegen wateroverlast. Op het voorblad staat een prachtige foto van Bossche Broek, met op de achtergrond 's-Hertogenbosch; genomen door Ellen Elemans tijdens mijn bezoek. Bossche Broek is op deze dag niet ingezet, het water op de foto is opkomend grondwater. Er is dus nog voldoende ruimte in het gebied om in geval van nood zo'n 8 miljoen kuub extra water te herbergen, een geruststelling voor vele Bosschenaren.

Voor mij betekend dit rapport een afronding van mijn Master Water Engineering and Management aan de Universiteit Twente; als mede de afronding van mijn afstudeeronderzoek bij Waterschap De Dommel. Graag wil ik mijn afstudeercommissie bedanken in de personen van Maarten Krol en Pieter van Oel van de Universiteit Twente en Mark van de Wouw van Waterschap De Dommel. Daarnaast gaat speciale dank uit naar Jeroen Tempelaars en Frank Weerts van Waterschap De Dommel voor hun uitgebreide hulp bij de vele modeltechnische vragen.

Als laatste dank voor al de anderen die mij in deze periode ondersteund hebben: leidinggevend en collega's bij het waterschap, vrienden, mijn ouders en familie, en in het bijzonder mijn vriendin, die me onvoorwaardelijk heeft gesteund en gestimuleerd in de moeilijke periodes.

Augustus 2011,
Niels Entzinger

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	V
Voorwoord	VI
Inhoudsopgave	VII
Lijst van figuren en tabellen	IX
Lijst van termen.....	XI
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding.....	1
1.2 Doelstelling.....	3
1.3 Focus.....	4
1.4 Vraagstelling	4
1.5 Relaties tot ander onderzoek	5
1.6 Aanpak.....	6
1.6.1 Onderzoekskeuzes.....	6
1.6.2 Het onderzoeksmodel	7
1.6.3 Onderzoeksstrategieën	7
1.6.4 De onderzoeksaanpak	8
1.7 Leeswijzer	9
2 Werkwijze.....	10
2.1 Uitgangspunten	10
2.1.1 Thematische uitgangspunten	10
2.1.2 Uitgangspunten m.b.t. het model	10
2.1.3 Afbakeningen in locatie	10
2.2 Gebiedsgegevens.....	10
2.2.1 Hoogwater rond 's-Hertogenbosch.....	10
2.2.2 Geografie en stroomgebieden	11
2.2.3 Karakteristieken.....	13
2.3 De opzet van de simulaties.....	14
2.4 De modellering	15
2.4.1 Inleiding	15
2.4.2 Beschrijving van de individuele modellen	16
2.4.3 Modellering gebieden buiten beheergebied WSDD	18
2.5 Maatgevende situatie.....	19
2.5.1 Herhalingstijden	19
2.5.2 Neerslag.....	20
2.5.3 Maasgolf	25
2.5.4 Mogelijkheden en beperkingen van de aannames	26

2.6	Beoordelingscriteria	26
2.6.1	Situatiebepaling.....	27
2.6.2	Debietmetingen.....	28
2.6.3	Beoordeling	29
3	Scenario's	30
3.1	Referentiesituatie.....	30
3.1.1	Beschrijving referentiesituatie	30
3.1.2	Modellering referentiesituatie	30
3.1.3	Hypothese referentiesituatie	30
3.2	Beekherstel.....	31
3.2.1	Beschrijving beekherstel	31
3.2.2	Hypothese.....	34
3.3	Retentie	34
3.3.1	Beschrijving retentie.....	34
3.3.2	Hypothese.....	36
4	Resultaten.....	37
4.1	Referentiesituatie	37
4.2	Beekherstel.....	38
4.3	Beekherstel bovenstrooms.....	42
4.4	Beekherstel benedenstrooms	44
4.5	Retentie	45
4.5.1	Retentie in het stroomgebied van de Essche Stroom	46
4.5.2	Retentie in het stroomgebied van De Dommel bovenstrooms Boxtel	49
4.6	Retentie bovenstrooms.....	49
4.7	Retentie benedenstrooms.....	51
4.8	Resultaten in cijfers	52
5	Beschouwing en discussie	53
5.1	Vergelijking met de hypothesen	53
5.2	Discussie	53
6	Conclusies en aanbevelingen	56
6.1	Conclusies.....	56
6.1.1	Hoofdconclusies	56
6.1.2	Algemeen.....	56
6.1.3	Beekherstel.....	56
6.1.4	Retentie	56
6.2	Aanbevelingen.....	58
7	Literatuur.....	61

Lijst van figuren en tabellen

Figuren

Figuur 1-1: Lokatie van het onderzoeksgebied	3
Figuur 1-2: Het onderzoeksmodel	7
Figuur 1-3: Onderzoekscyclus.....	9
Figuur 2-1: De volgorde van aankomst van de hoogwatergolven bij 's-Hertogenbosch.	11
Figuur 2-2: De stroomgebieden.....	12
Figuur 2-3: De belangrijkste waterlopen in het beheergebied van Waterschap De Dommel.	13
Figuur 2-4: Inundatienormen in het beheergebied van WSDD.....	14
Figuur 2-5: Waterlopen in Sobek CF.....	15
Figuur 2-6: Overzicht van de relaties van de modellen.....	16
Figuur 2-7: Schema afleiding hoogwatergolven in de WSA.	21
Figuur 2-8: Bepaling representatieve herhalingstijd van event okt-nov 1998.....	22
Figuur 2-9: Voorbeeld van een afvoergebied met duidelijke knik	23
Figuur 2-10: Vormen van de modelbuien	24
Figuur 2-11: De gebruikte maatgevende neerslag die de T=100 afvoer tot gevolg heeft	25
Figuur 2-12: De Maasgolven met T=120 van RWS.	25
Figuur 2-13: Locatie waterstand en retentie meetpunten.....	27
Figuur 2-14: Het gebied waarin het inundatievolume wordt vastgesteld.	28
Figuur 2-15: Locatie debietmeetpunten.	29
Figuur 3-1: Gerealiseerde beekhersteltrajecten.	30
Figuur 3-2: Gerealiseerde gestuurde retentiegebieden.....	30
Figuur 3-3: De profieldoorsneden van beekherstel	31
Figuur 3-4: Locaties van beekherstel.....	32
Figuur 3-5: Locaties van beekherstel 'natuurlijk'	32
Figuur 3-6: Overzicht van de KRW-typen in het beheergebied van De Dommel	33
Figuur 3-7: Locatie van de waterbergingsgebieden.	35
Figuur 4-1: De aankomst van de pieken bij 's-Hertogenbosch.....	37
Figuur 4-2: De waterstand bij Vughterstuw.	38
Figuur 4-3: De inundatieverschillenkaart bij beekherstel	39
Figuur 4-4: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw bij beekherstel	40
Figuur 4-5: Het veranderde debiet door retentie van De Dommel.....	40
Figuur 4-6: Het verschil in debiet is bij aanvoer en afvoer van de Essche Stroom.	41
Figuur 4-7: Het lokale effect van beekherstel	42
Figuur 4-8: Verandering van het debiet door beekherstel bovenstrooms.	43
Figuur 4-9: Verandering van het debiet door beekherstel bovenstrooms.	43
Figuur 4-10: Verandering van het debiet door beekherstel benedenstrooms.	44
Figuur 4-11: Verandering van het debiet door beekherstel benedenstrooms.	44
Figuur 4-12: De inundatieverschillenkaart bij retentie	45
Figuur 4-13: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw bij retentie.	46
Figuur 4-14: Het veranderde debiet door retentie van De Dommel.....	46
Figuur 4-15: Het debiet na retentiegebied Moergestelsbroek.	47
Figuur 4-16: Verandering van de lokatie van inundatie door retentiegebieden.	48
Figuur 4-17: Voorbeeld van een goed en een niet-goed functionerend retentiegebied.....	48
Figuur 4-18: Water stroomt langs de kades in Diessensbroek.....	48
Figuur 4-19: Water stroomt over de kade bij Valkenswaard Zuidwest.....	49
Figuur 4-20: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw.	50
Figuur 4-21: Debietverandering van De Dommel en de Essche Stroom door retentie bovenstrooms.	50
Figuur 4-22: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw.	51
Figuur 4-23: Het debiet van de Essche Stroom.	52

Tabellen

Tabel 2-1: De uitgevoerde SOBEK-runs.	15
Tabel 2-2: Overzicht waterstandmeetpunten.	27
Tabel 2-3: Overzicht retentiemeetpunten.	27
Tabel 2-4: Overzicht debietmeetpunten.	29
Tabel 3-1: De gebruikte data van geplande trajecten.....	33
Tabel 3-2: Beekherstel parameters op basis van de KRW – typen.....	33
Tabel 3-3: Gepland bergend volume en doel van de retentiegebieden.	35
Tabel 4-1: Verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch door beekherstel	39
Tabel 4-2: Verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch door beekherstel bovenstrooms	42
Tabel 4-3: Verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch door beekherstel benedenstrooms.....	44
Tabel 4-4: Verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch door retentie	45
Tabel 4-5: Verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch door retentie bovenstrooms.	49
Tabel 4-6: Verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch door retentie benedenstrooms.....	51
Tabel 4-7: Resultaten van de simulaties bij 's-Hertogenbosch.	52
Tabel 4-8: Resultaten van de simulaties bij de Essche Stroom en De Dommel bij Boxtel.	52

Lijst van termen

Bandbreedte

De duur, timing en hoogte van de hoogwatergolf/golven.

Beekherstel

Beken natuurlijker aanleggen met een kleinere doorsnede, meer sinuositeit en meer ruimte langs de rivier voor natuur om een hogere oppervlaktewater en grondwaterstand te realiseren alsmede de beek een natuurlijker uiterlijk te geven.

Beheergebied Waterschap De Dommel

Het gebied wat waterschap De Dommel beheert; in dit onderzoek is alleen het Nederlandse gedeelte van het stroomgebied van De Dommel van toepassing.

Confluentie

Het punt waar meerdere waterlopen samenvloeien.

Conserveren

Structurele aanpassingen doen in de hydraulische situatie van het gebied om verdroging tegen te gaan.

Inundatie

Water dat buiten de waterloop op het maaiveld komt.

Kaderrichtlijn Water (KRW)

Op Europees niveau afgesproken regelgeving over waterbeheer op het gebied de van chemische, ecologische en kwantitatieve toestand (gericht op voldoende water) van waterlichamen. Waar in dit onderzoek gesproken wordt over de KRW; beperkt dit tot de ecologische tak van de KRW en enkel tot de hydraulische voorwaarden die geschapen worden om de waterloop in een betere ecologische toestand te kunnen brengen.

Op orde

Voldoen aan de voorschriften, wetten en afspraken.

Piekverhoging

De situatie dat de piek van een afvoergolf in de simulatie met maatregel hoger is dan in de refentiesimulatie.

Piekverlaging

De situatie dat de piek van een afvoergolf in de simulatie met maatregel lager is dan in de refentiesimulatie.

Versnelling

De situatie dat een afvoergolf rond zijn piek in de simulatie met maatregel eerder plaatsvindt dan in de refentiesimulatie.

Vertraging

De situatie dat een afvoergolf rond zijn piek in de simulatie met maatregel later plaatsvindt dan in de refentiesimulatie.

Systeem De Dommel

Ook het 'watersysteem van De Dommel' en het 'stroomgebied van De Dommel'; Het gehele gebied dat afwatert op rivier De Dommel.

Vasthouden

In hoogwatersituaties tijdelijk water opslaan: op het maaiveld of in het grondwater waar het water valt of in een secundaire of tertiaire waterloop om de piekafvoer te verlagen.

Vernatten

Het structureel verhogen van de grondwaterstand.

Waterberging (Retentie)

Het bij hoogwatersituaties tijdelijk opslaan van water in bergingsgebieden.

Gestuurde waterberging

Het bij hoogwatersituaties tijdelijk opslaan van water in bergingsgebieden die specifiek ingericht zijn voor tijdelijke opslag van water.

Ongestuurde waterberging / Natuurlijke waterberging

Water dat tijdelijk in en langs de waterloop wordt geborgen op plaatsen die niet specifiek hiervoor ingericht zijn, maar waar inundatie toegestaan en verwacht is. Zoals bijvoorbeeld (mogelijk) langs natuurlijke beken en in (bepaalde) natuurgebieden.

Wateroverlast

Wateroverlast is een verzamelnaam voor situaties waarin mensen overlast ondervinden als gevolg van te veel water. In dit onderzoek wordt de term beperkt naar situaties waarin mensen overlast ondervinden als gevolg van beken die buiten hun oevers treden.

Waterveiligheid

Waterveiligheid is de veiligheid die geboden wordt door primaire keringen die rivier- en zeewater buiten de dijkingen houden. In dit onderzoek wordt hier geen aandacht aan besteed.

Waterbeheer in de 21^e eeuw (WB21)

WB21 staat in dit onderzoek voor de bescherming tegen wateroverlast veroorzaakt door een hoog oppervlaktewaterpeil.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2003 ondertekenden de Unie van Waterschappen, de Vereniging Nederlandse Gemeenten, het interprovinciaal overleg, de staatssecretaris van verkeer en waterstaat en de Minister-president het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). Het NBW beschrijft hoe de overheden de handen ineen slaan om stapsgewijs gezamenlijk te werken aan een Nederland dat kan leven met water. Hierin staat ondermeer beschreven dat de bovenstaande organisaties werk maken van het uitvoeren van twee belangrijke plannen: De Kaderrichtlijn Water (KRW) en Waterbeleid 21e eeuw (WB21) (Balkenende e.a., 2003). De kaderrichtlijn water is een Europese verplichting die ervoor moet zorgen het water in Europa in goede chemische, ecologische en kwantitatieve toestand is (EU, 2000). Vanuit WB21 dienen de waterschappen het watersysteem in kwantitatief opzicht in orde te hebben in 2015 en op orde te houden met oog op klimaatveranderingen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006). In bijlage 1 staan de beleidskaders uitgebreider beschreven.

KRW

De ecologische doelstellingen stellen de lidstaten onderling vast in zogeheten (internationale) stroomgebiedbeheerplannen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat et al., 2009). Voor verschillende typen wateren gelden verschillende ecologische doelstellingen. In een plas leven bijvoorbeeld andere planten- en diersoorten dan in kustwater. Daarom verschillen de ecologische doelen per watertype (Ministerie van VROM, 2010). In deze stroomgebiedbeheerplannen worden alle milieudoelstellingen voor het grond- en oppervlaktewater en de beschermde gebieden opgenomen. Ook staan de maatregelen erin om deze doelstellingen te bereiken. Hierbij moet men denken aan herstel- en inrichtingsmaatregelen voor oppervlaktewateren, zoals het verwijderen van waterbodems en het hermeanderen van waterlopen, het verminderen van belastende lozingen door RWZI's en rioleringen, het verminderen van emissies uit de landbouw en industrie en andere diffuse bronnen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat et al., 2009). In de Nederlandse geschiedenis zijn ontelbare acties uitgevoerd om het land te draineren en op andere plaatsen te irrigeren. Hierdoor is de ecologische toestand sterk verslechterd. Een groot aantal KRW maatregelen heeft dan ook betrekking op het natuurlijker aanleggen van waterlopen, het vernatten van natuurgebieden en het verwijderen van stuwen. Dit om een natuurlijker en betere omgeving te creëren voor de waterflora en -fauna.

WB21

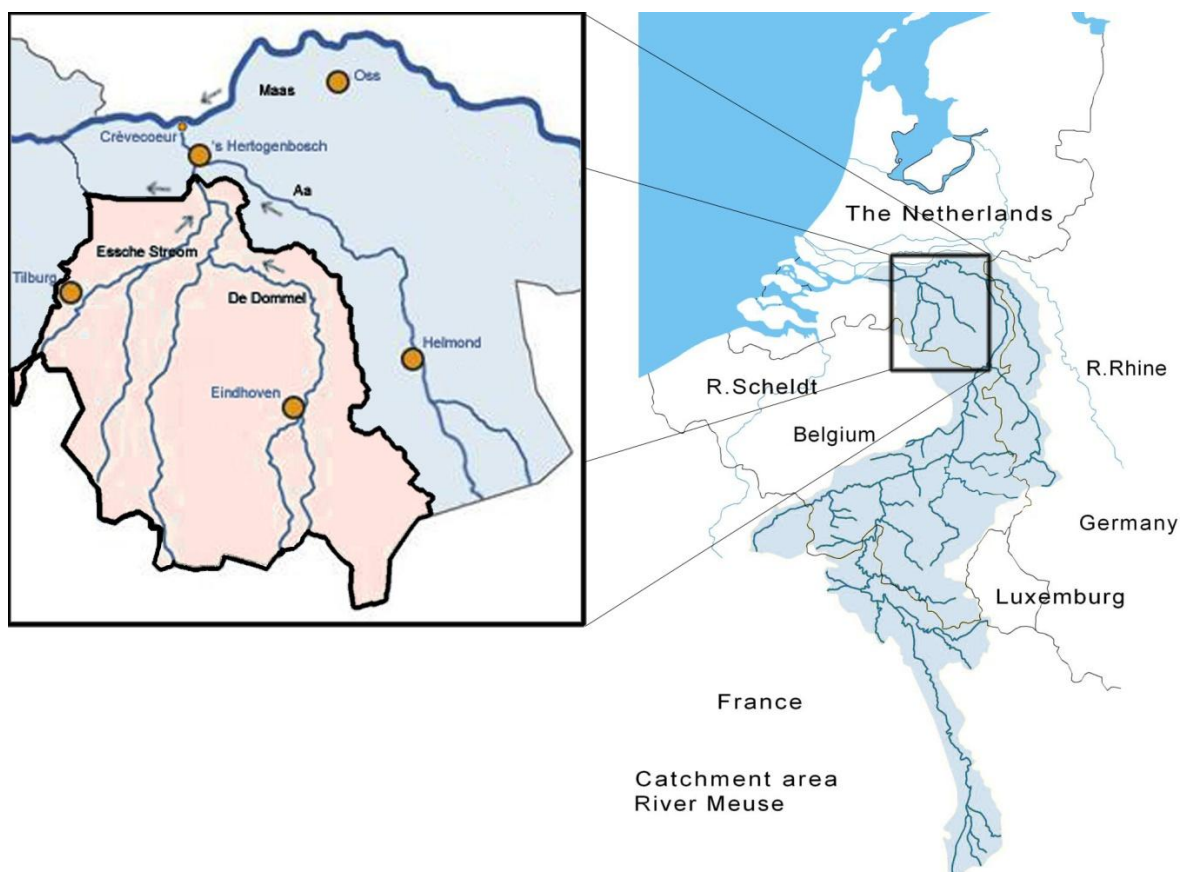
De doelen van WB21 zijn het ontwikkelen van een nieuw waterbeleid om de Nederlandse waterhuishouding op orde te brengen en op orde te houden met oog op klimatologische en geofysische ontwikkelingen. Met het 'op orde brengen' wordt bedoeld dat de waterveiligheid vergroot wordt alsmede dat de kans op wateroverlast verkleind wordt. Dit moet gebeuren door herstel van veerkrachtige watersystemen. Dit kan door water meer ruimte te geven en een betere afstemming van het grondgebruik. Een belangrijk credo van het WB21 is de drietrap vasthouden-bergen-afvoeren die duidt dat het regenwater zoveel mogelijk bovenstrooms wordt gehouden en de problemen zo min mogelijk worden afgewenteld op gebieden benedenstrooms. Naast de aandacht voor een overschot aan water maken de aanpak van watertekorten en de realisatie van het Gewenst Grond- en Oppervlaktewater Regime (GGOR) onderdeel uit van WB21. Een ander belangrijk punt voor het nieuwe waterbeleid is dat burger en politiek meer betrokken raken bij het waterbeheer (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000). Volgens de commissie moet er één samenhangend waterbeleid worden gevoerd voor hoofdsystemen en regionale watersystemen en er mag geen ruimte meer onttrokken worden aan de rivier. Daarnaast moet water een sturend principe worden bij de ruimtelijke inrichting en het grondgebruik in Nederland.

Beleid Waterschap De Dommel (WSDD)

Waterschap De Dommel moet aan beide beleidskaders voldoen, zowel WB21 als de KRW. Waterschap De Dommel heeft haar beleid voor 2010-2015 opgesteld in het Waterbeheerplan 'Krachtig Water' (Waterschap de Dommel, 2010). Hierin komt het beleid uit de KRW, WB21 en andere beleidskaders samen. Er moeten nog veel beektrajecten natuurlijker aangelegd worden en natuurgebieden vernat worden voor de ecologische tak van de KRW en er moeten nog maatregelen genomen worden om de kans op inundatie van stedelijk gebied te verkleinen. In de uitvoering is het ideaal als het mogelijk is met één ingreep zowel de KRW als de WB21 doelen te halen. Waar dit niet mogelijk wordt wil men in ieder geval dat een ingreep geen negatief effect heeft op het andere beleidsveld of dat negatieve gevolgen gecompenseerd worden (STOWA, 2005). Voor de invulling van WB21 en de Kaderrichtlijn water heeft het Waterschap De Dommel een aantal maatregelen gepland en uitgevoerd. Er is voor de KRW beekherstel uitgevoerd en verdroogde natuurgebieden worden vernat. Met betrekking tot WB21 worden lokaal retentiegebieden aangelegd en zijn pilots gestart voor het vasthouden van water (Waterschap de Dommel, 2010) (Kerngroep Water Vasthouden aan de Bron, 2010). Maatregelen die bijdragen aan de beperking van de wateroverlast dragen niet altijd bij aan een betere ecologische toestand en vice versa (STOWA, 2004)(Alterra, 2003) (Vergouwe, Niewold, ten Heggeler, & en Tempelaars, 2007)(Alterra, 2008). Maatregelen die een lokaal waterprobleem oplossen kunnen benedenstrooms de problemen vergroten. Een belangrijk punt in WB21 is daarom dat de waterproblematiek niet mag worden afgewenteld op gebieden benedenstrooms. Het credo -eerst vasthouden, dan bergen en als het niet anders kan, afvoeren- is hierop gebaseerd (Commissie Water beheer 21e eeuw, 2000). Echter, in situaties waar beekdalen samenkomen kan het voorkomen dat juist het vasthouden en bergen van water leidt tot vergroting van de waterproblematiek benedenstrooms. Verwacht wordt dat beekherstel, vasthouden en retentie leiden tot een vertraging van het water wat doorgaans een positieve bijdrage levert aan het verminderen van wateroverlast (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000). Waar beekdalen samenkomen is niet alleen de hoogte van een hoogwatergolf van één van de beken belangrijk maar ook in hoeverre de piek samenvalt met de pieken van de andere beken. Hierdoor kan het mogelijk zijn dat vertraging van een afvoerpiek een versterkend effect heeft op de totale benedenstroomse wateroverlast (Monincx, Termes, & en Tromp, 2006), (Ijpelaar, Groot, & en van de Wouw, De trits van hoogwatergolven Aa, Dommel en Maas bij 's-Hertogenbosch, 2009).

Probleemsituatie hoogwater

In het stroomgebied van de Aa en De Dommel komen veel beken samen. Bij 's-Hertogenbosch monden de Aa en De Dommel (via de Dieze) uit in de Maas (figuur 1). Als de Maas hoogwater heeft, kunnen de Aa en Dommel hun water slecht afvoeren. Als in deze gevallen de Aa en De Dommel zelf ook hoogwater hebben, ontstaat wateroverlast in 's-Hertogenbosch. Het regisseren van de afvoerpieken is daarom in deze gebieden belangrijk. Het is echter nog onduidelijk wat de effecten zijn van de maatregelen bovenstrooms zoals retentie en beekherstel op deze afvoerpieken bij 's-Hertogenbosch in extreme situaties. Wanneer dit inzichtelijk is, kan het beleid worden aangepast om de hoogwaterpieken te regisseren, waarmee de kans op wateroverlast in 's-Hertogenbosch wordt verkleind (Heidemij, 1995). Een uitgebreidere beschrijving van de hoogwatersituatie in 's-Hertogenbosch staat in bijlage 2.



Figuur 1-1: Stroomgebied van de Maas met inzet van de Nederlandse stroomgebieden De Dommel en de Aa. Vrij naar: <http://www.brabantsewaterkaart.nl> en <http://www.riou.be/NL/?l1=11.Ardennen&l2=01.BNVS> (27-01-2011).

Door een verschil in de hydraulische looptijd kwam in maatgevende situaties in het verleden de hoogwatergolf van de Aa komt als eerste aan bij Crèvecoeur gevolgd door de hoogwatergolven van achtereenvolgens de Essche stroom, De Dommel en de Maas (Heidemij, 1996), (inzet Figuur 1-1). Het kan voorkomen dat de hoogwatergolven elkaar overlappen. Veranderingen in de hoogte en de timing van deze afvoerpieken kan hierdoor een verhogend effect hebben op de waterstanden in 's-Hertogenbosch. Zowel klimaat als menselijk handelen zijn van invloed op zulke veranderingen.

In 2012/2013 actualiseert Waterschap De Dommel haar waterbergingsopgave. Daarvoor worden in 2011 de berekeningen gemaakt (Wouw, 2010). Daarvoor wil waterschap De Dommel weten of het huidige beleid (toegespitst op: beekherstel, bovenstrooms water vasthouden, het vernatten van verdroogde natuurgebieden en het aanleggen van retentiegebieden om plaatselijke wateroverlast te pareren) een versterkend effect kan hebben op de wateroverlast benedenstrooms. Waterschap De Dommel is op zoek naar verstandige keuzes om wateroverlast zowel boven- als benedenstrooms te verkleinen alswel de opgaven uit de (ecologische tak van) KRW te verwezenlijken (Wouw, 2010). Dit onderzoek splitst zich toe op de effecten van de twee maatregelen die al in het beheergebied toegepast worden; beekherstel en retentie.

1.2 Doelstelling

Analyseren of, en in welke mate, beekherstel en het aanleggen van retentiegebieden in een beekdal ten behoeve van de KRW en WB21 een versterkend effect kunnen hebben op wateroverlast benedenstrooms door middel van modellering in het beheergebied van Waterschap De Dommel en analyse van de gevolgen voor 's-Hertogenbosch bij extreem hoogwater.

Eindproducten:

- ◇ Een beschrijving van de referentiesituatie (de gemodelleerde huidige situatie d.d. januari 2011);
- ◇ Een beschrijving van de gevolgen van geplande maatregelen als beschreven in 'Krachtig Water' (Waterschap de Dommel, 2010);
- ◇ De gevolgen benedenstrooms per maatregel;
- ◇ Een beschrijving van de gebruikte modellen, aannames en een discussie over gevolgen hiervan voor de resultaten.
- ◇ Aanbevelingen omtrent de toepassing van deze maatregelen om tot minder wateroverlast benedenstrooms te komen.

1.3 Focus

Dit onderzoek richt zich op de effecten van de geplande (Waterschap de Dommel, 2010) retentiegebieden en beekhersteltrajecten in het beheergebied van Waterschap De Dommel in relatie tot de huidige situatie. Mogelijke problemen benedenstrooms treden alleen op in een extreme situatie (T=100 neerslag) met een hoge Maaswaterstand (T=120 golf); vandaar dat alleen een standaard ééns in de 150 jaar situatie met een hoge Maas wordt gemodelleerd. Er wordt gefocust op relatieve verbetering of verslechtering ten opzichte van de referentiesituatie. Daarnaast wordt er geen rekening gehouden met bezwijkende kades of anderszijds falen van het systeem door mens of natuur. Een uitgebreidere beschrijving van de uitgangspunten van het onderzoek staat beschreven in paragraaf 2.1.

1.4 Vraagstelling

Uit voorgaand onderzoek (Heidemij, 1995) is gebleken dat wateroverlast bij 's-Hertogenbosch ontstaat als zowel De Dommel als de Aa alswel de Maas bij Crèvecœur een hoogwatergolf heeft. De hoogwatergolf van de Aa komt als eerst aan, gevolgd door de Essche stroom, De Dommel en de Maas. In het gebied van De Dommel, de Aa en de Essche stroom zijn maatregelen genomen ter verbetering van de bescherming tegen hoogwater en met betrekking tot de KRW. Deze maatregelen leiden naar verwachting tot een verkleining en vertraging van de hoogwaterpiek. Door deze vertragende component kan het zijn dat onbedoeld de maatregelen een negatief effect hebben in geval van extreme situaties rond 's-Hertogenbosch. Voor de discussies omtrent de beleidsevaluatie in 2011 (Wouw, 2010) moet meer zekerheid komen over de gevolgen van maatregelen. Er is op het moment veel onduidelijkheid of bijvoorbeeld retentiegebieden en beekherstel bovenstrooms juist een positieve of een negatieve bijdrage leveren aan de wateroverlast rond 's-Hertogenbosch. Zonder deze informatie is het lastig om binnen de beleidsevaluatie vast te stellen of beekherstel en retentie negatieve gevolgen benedenstrooms hebben en om toekomstig beleid hierop aan te passen. Vandaar het belang om duidelijk te maken wat de gevolgen zijn voor de afvoer en voor de hoogwaterproblematiek voor verschillende hydraulische maatregelen. Voor dit onderzoek zijn de volgende hoofdvragen opgesteld.

Onderzoeksvragen:

HV1. Wat is de maatgevende situatie in en rond 's-Hertogenbosch en hoe kan deze gemodelleerd worden in SOBEK?

HV2. Wat zijn de effecten van retentie en beekherstel; en hoe kunnen deze het beste gemodelleerd worden in SOBEK?

HV3. In welke mate hebben deze maatregelen invloed op de afvoer bij en waterstanden in 's-Hertogenbosch bij de maatgevende situatie, en waar kunnen deze maatregelen (en combinaties) ingezet worden zonder negatieve invloed op de situatie rond 's-Hertogenbosch?

De beschrijving van hoogwatergolven is in termen van:

- ◇ de hoogte van de piek;
- ◇ vertraging of vervroeging van de golf;
- ◇ de duur van de golf.

Dit tezamen wordt ook wel de 'bandbreedte' van de hoogwatergolven genoemd.

1.5 Relaties tot ander onderzoek

Het voorgaand onderzoek valt te onderscheiden in onderzoek naar de gevolgen van samenval van pieken en onderzoek naar de effecten van maatregelen. Over de samenval van hoogwaterpieken zijn twee onderzoeken nader bekeken. Naast het voorgaand onderzoek zijn er twee lopende onderzoeken binnen Waterschap De Dommel die samenhangen met dit onderzoek om het waterbeheer op orde te krijgen.

Voorgaand onderzoek naar samenval van pieken

HKV_lijn in water. Samenhang afvoergolven Aa, Dommel en Maas - benodigde verlaging bij vertraging van de Aa en De Dommel (HKV_lijn in water, 2009).

Een onderzoek naar de verlaging van de hoogwatergolven die nodig is bij vertraging van de golf. De belangrijkste conclusies zijn dat vertraging van de afvoergolf niet altijd tot waterstandverhoging leidt, maar dat een vertraging van 24 uur tot een waterstandverhoging van 21 cm kan leiden in 's-Hertogenbosch en dat de volgorde van de hoogwaterpieken van De Dommel, Aa en Maas kan verschillen per situatie. Dit onderzoek geeft inzicht in de noodzaak om te weten wat de effecten van individuele maatregelen is op de vertraging en verlaging van de hoogwatergolf.

HKV_lijn in water. Onderzoek speelruimte maatregelen stroomgebieden langs de Overijsselsche Vecht (HKV_lijn in water, 2004).

Om wateroverlast te voorkomen moet ervoor gezorgd worden dat in extreme situaties de hoogwatergolven van de Vecht en de aanvoerende waterlopen niet tegelijk samenkomen. Er is een bandbreedte opgesteld voor ieder waterschap welke verlaging van de piek uitgevoerd moet worden bij verschillende vertragingen van een hoogwatergolf die aanvoert op de Vecht. Het is aan de betreffende waterschappen zelf om in te vullen in hoeverre zij vertragen (en dus moeten verlagen) en hoe zij dit invullen.

Lopend onderzoek beleidsmatig relatie

**Waterschap De Dommel: Scenarioberekeningen Hoog Water
Actualisatie Waterberging, Richtlijn overstromingsrisico en keringen**

Huidige en toekomstige overstromingen tot 2050 worden in beeld gebracht met een herhalingstijd van T1 /m T1000 (alleen benedenstrooms). Hiervoor worden diverse scenarioberekeningen uitgevoerd zoals klimaatinvloeden, en inschattingen van de effecten van beekherstel, vasthouden en veranderingen gebiedskarakteristieken (vernatten ed.). Als de berekeningen in 2012 uitgevoerd zijn (Wouw, 2010) wordt een implementatietraject gestart om voor de geselecteerde maatregelen de benodigde ruimte te reserveren in de plannen voor Ruimtelijke Ordening.

Waterschap De Dommel: Watersysteemanalyse

In 2015 dienen de waterschappen het waterbeheer op orde te hebben. Daarvoor moeten nog waterbergingsgebieden aangelegd te worden. Om betrokkenen te informeren over te bergen kubieke meters worden voor het deelstroomgebied De Boven-Dommel en de Beerze berekeningen uitgevoerd. Deze berekeningen vormen de basis voor de inrichting van de waterbergingsgebieden waarvoor nog lokale modellen worden opgesteld.

Samenhang onderzoeken

In het onderzoek naar de speelruimte van de Vecht is voor het eerst onderkend dat het versnellen en vertragen van afvoergolven een versterkend effect kan hebben op de wateroverlast benedenstrooms. Tevens is aangekaart dat maatregelen die getroffen in het stroomgebied effect hebben op de snelheid van de afvoergolf. Daarna is bij Waterschappen De Dommel en Aa en Maas onderkend dat hier een vergelijkend probleem optreedt en onderzocht welke verlaging van een afvoerpiek noodzakelijk is bij een vertraging van deze piek. Dit afstudeeronderzoek is een onderdeel van de laatste stap: "Onderzoeken welke verlagende en vertragende gevolgen maatregelen hebben op de totale situatie van afvoergolven". De uitkomsten van dit afstudeeronderzoek kunnen bijdragen aan een veranderde perceptie van de gevolgen van maatregelen. Dit kan gevolgen hebben voor het realisatieprogramma en het bestaande beleid. Daarnaast is het belangrijk voor de 'Scenarioberekening Hoogwater' om een betere inschatting te kunnen maken van de benodigde hoeveelheid en locatie van te reserveren ruimte voor waterzekerheid.

1.6 Aanpak

1.6.1 Onderzoekskeuzes

Om de kennisvraag te beantwoorden is ervoor gekozen om met het gebiedsdekkend hoogwatermodel van Waterschap De Dommel de gevolgen rond 's-Hertogenbosch van de maatregelen retentie en beekherstel bij een herhalingstijd van eens in de 150 jaar te modelleren.

Keuze van de maatregelen

Er is gekozen voor de KRW maatregel 'beekherstel' en voor de WB21 maatregel 'aanleggen van retentiegebieden'. Er is gekozen voor deze maatregelen aangezien deze maatregelen leidend zijn in het beleid van Waterschap De Dommel voor de komende vijf jaar (Waterschap de Dommel, 2010). Aangezien het effect op hoogwater benedenstrooms wordt onderzocht, zijn alleen onderdelen van deze maatregelen gemodelleerd die hydrologische en/of hydraulische effecten hebben.

Een andere maatregel die in het waterbeheerplan staat is het 'vernatten van verdroogde natuurgebieden' in het kader van de KRW, en er zijn pilots gestart voor 'vasthouden bij de bron' in het kader van WB21. Hoewel zeer interessant, zijn deze maatregelen buiten het onderzoek gehouden aangezien het modelleren van deze maatregelen in het gebiedsdekkend model van WSDD niet mogelijk is en eventueel alleen effecten op de neerslag-afvoerrelaties in te voeren zijn in het stroommodel. Het is wenselijk om eerst met modellen met fysische parameters deze maatregelen lokaal te modelleren en de effecten vast te stellen; in plaats van "verwachtingen" van de effecten in het gebiedsdekkende model op te nemen.

Keuze voor de herhalingstijd

Er is gekozen om een herhalingstijd bij 's-Hertogenbosch te realiseren van eens in de 150 jaar. Deze herhalingstijd wordt beleidsmatig gebruikt als norm voor 's-Hertogenbosch en ook het watersysteem wordt ingericht op deze norm. In deze hydraulische situatie zou net geen wateroverlast rond 's-Hertogenbosch plaats mogen vinden. In deze situatie zijn de gevolgen het grootst indien de maatregelen effect hebben op de hydraulische situatie.

Keuze hydraulisch en hydrologisch model

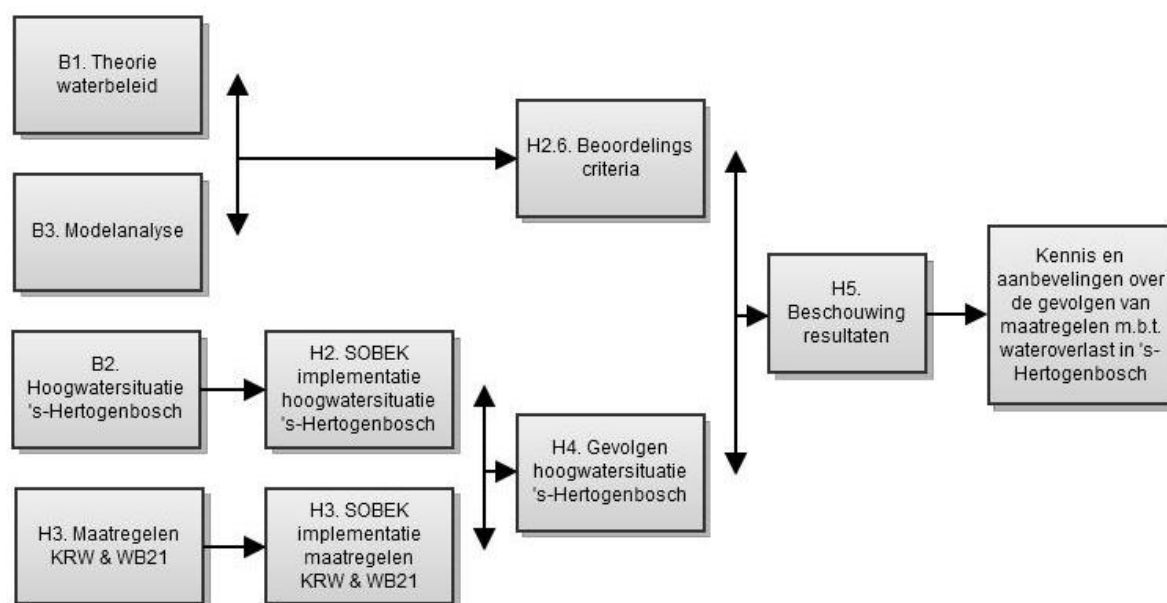
Het Gebiedsdekkend Hoogwatermodel van Waterschap De Dommel (GDHM-DO) (Waterschap de Dommel, 2010) is gebruikt aangezien met dit model het hele systeem van De Dommel en de Aa gemodelleerd is en met afzienbare rekentijden een hoog detailniveau en een relatief hoge accuraatheid bereikt kan worden. Aangezien specifieke mechanismen als meestromende berging en overstromingen essentieel zijn voor de kern van het onderzoek is dit detailniveau vereist. Het is een combinatie van zowel hydrologische als hydraulische modellen die verder beschreven zijn in paragraaf 2.4 en bijlage 3. Het GDHM-DO is leidend in andere beleidsberekeningen van Waterschap

De Dommel. Door hetzelfde model te gebruiken kunnen onverwachte uitkomsten niet toegeschreven worden aan het gebruik van een ander model.

1.6.2 Het onderzoeksmodel

Het doel is om te analyseren of, en in welke mate, ingrepen in een beekdal ten behoeve van de KRW en WB21 een versterkend effect kunnen hebben op wateroverlast benedenstrooms door middel van analyse en modellering van de gevolgen bij extreem hoogwater voor 's-Hertogenbosch. Hiervoor worden de maatregelen gemodelleerd en geanalyseerd aan de hand van beoordelingscriteria met betrekking tot het afwentelen van hoogwaterproblematiek en de voorwaarden, zekerheden en onzekerheden die het modelgebruik met zich meebrengt. De modelberekeningen zijn gebaseerd op de hoogwatersituatie bij 's-Hertogenbosch en de maatregelen die aan de hand van de beleidskaders WB21 en KRW genomen zijn in het beheergebied van Waterschap De Dommel.

Om tot deze kennis te komen is het van belang om de achtergronden van de maatregelen en de hoogwatersituatie rond 's-Hertogenbosch te kennen. De beleidskaders en de oorzaken van hoogwaterproblematiek rond 's-Hertogenbosch zijn onderzocht. Een uitgebreide beschrijving hiervan staat respectievelijk in bijlagen 1 en 2. Er zijn uitgangspunten vastgesteld om het onderwerp te vernauwen tot een hanteerbaar onderzoek. Daarna is nagegaan hoe het model werkt en hoe de situatie het best in het model ingevoerd kan worden. Na het uitvoeren van de simulaties zijn de resultaten geanalyseerd, op waarde geschat om te komen tot conclusies en aanbevelingen.



Figuur 1-2: Het onderzoeksmodel; B staat voor Bijlage, H staat voor Hoofdstuk.

1.6.3 Onderzoeksstrategieën

Theorie waterbeleid

De achtergronden van het probleem zijn onderzocht middels een deskstudy waarbij informatie uit literatuur gebruikt is. Bestaande informatie uit verschillende bronnen is samengevoegd om tot een bondige beschrijving te komen van de achtergronden van het waterbeleid.

Model analyse

In de modelanalyse zijn de modellen en hun interactie beschreven. Aan de hand van het verantwoordingsdocument voor het Gebiedsdekkend Hoogwatermodel De Dommel. is nagegaan waar de modellering de grootste tekortkomingen vertoont als beschrijving van de werkelijkheid en welke onzekerheden in en tekortkomingen in het model met betrekking tot de te maken

berekeningen een belangrijke invloed heeft op de juistheid van de uitkomsten. Daarnaast zijn gedurende het onderzoek opgemerkte onzekerheden en onjuistheden door middel van toepassing van het model en gesprekken met modelleurs en hydrologen geanalyseerd.

Hoogwatersituatie 's-Hertogenbosch

De hydraulische situatie rond 's-Hertogenbosch is beschreven aan de hand van kaarten, rapporten en onderzoeken naar de situatie. De hoogwatersituatie is beschouwd aan de hand van data, eerdere rapporten en modelleringen en beleidsbepalingen. Hieruit zijn ook maatgevende situaties en randvoorwaarden bepaald. Er is een selectie gemaakt uit bestaande informatie en onderbouwingen waarmee de verwachte hoogwatersituatie voor dit onderzoek omschreven is.

Lokale Maatregelen WB21&KRW

De karakteristieken van de in het Waterbeheerplan 'Krachtig Water' (Waterschap de Dommel, 2010) geplande maatregelen zijn beschouwd aan de hand van de theorie over waterstromingen en riviersystemen en aan de hand van eerdere onderzoeken en bevindingen van de uitvoering van dergelijke maatregelen. Hierdoor is overzichtelijk gemaakt wat de maatregelen inhouden, en wat de te verwachten hydrologische effecten zijn.

SOBEK implementatie

De informatie uit het voorgaande onderdeel is vertaald naar SOBEK input. Hierbij wordt gebruik gemaakt van eerdere SOBEK modelleringen, de kennis van modelleurs en eigen inzichten.

Beoordelingscriteria

De beoordelingscriteria zijn bepaald door middel van logische redenering naar aanleiding van te onderzoeken situatie en de kennis van het SOBEKmodel. Met behulp van de kennis van hydrologen en modelleurs is vastgesteld welke informatie waar uit het model gehaald moet worden om de gevolgen van de maatregelen voor 's-Hertogenbosch goed te kunnen bepalen. Hier uit moet blijken of er sprake is van afwenteling en moet rekening gehouden worden met opstuwing. De specifieke beoordelingscriteria zijn beschreven in paragraaf 2.6.

Gevolgen Hoogwatersituatie 's-Hertogenbosch

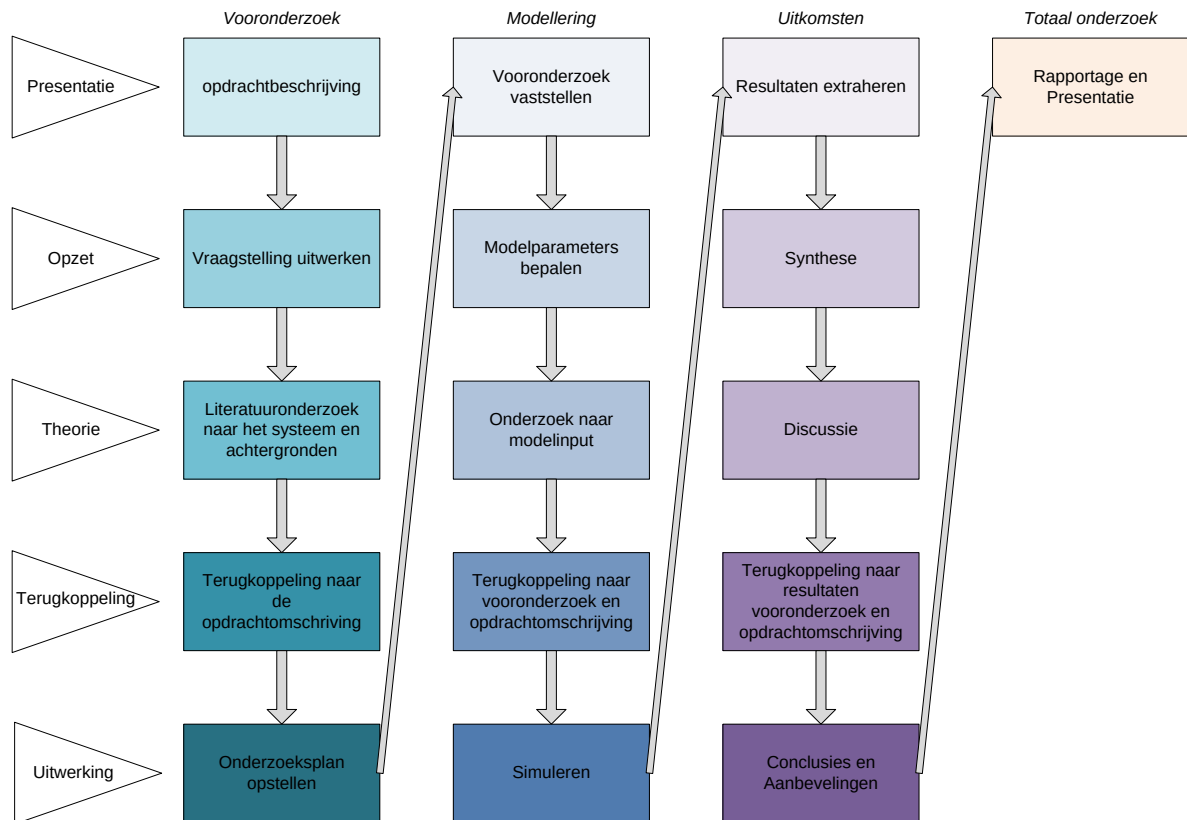
De gevolgen voor de hoogwatersituatie rond 's-Hertogenbosch zijn ontstaan door een simulatierun en verscheidene runs met maatregelen.

Analyse Resultaten

De resultaten zijn op verschillende manieren geanalyseerd. De betrouwbaarheid van de resultaten wordt beschreven aan de hand van de resultaten van de simulaties en de onzekerheden van de modellen. Vergelijkingen van de simulaties onderling en met de hypothesen leiden tot synthese. In de discussie wordt algemeen de waarde van de veronderstellingen besproken aan de hand van theorieën, onzekerheden, ervaringen en opgedane kennis tijdens het proces en ervaring en kennis van buiten.

1.6.4 De onderzoeksaanpak

Het totale onderzoek heeft meerdermalen een cyclus doorlopen van presentatie, opzet, theorie, terugkoppeling en uitwerking. Deze stappen zijn doorlopen achtereenvolgens in het vooronderzoek, de modellering en de uitkomsten. Binnen het vooronderzoek; om te komen tot een definitieve onderzoeksopzet hebben ook meerdere iteraties plaatsgevonden tot het eerste model doorgerekend is.



Figuur 1-3: Onderzoekscyclus.

1.7 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit zeven hoofdstukken en zeven bijlagen. Naast hoofdstuk één beschrijft hoofdstuk twee de werkwijze van het onderzoek, hierin is aandacht voor de uitgangspunten van het onderzoek alsmede de gebiedsbeschrijving, de gekozen simulaties, de methode van modellering en een uitgebreide beschrijving van de maatgevende situatie, om af te sluiten met de een beschrijving van de beoordelingscriteria waarmee de verschillende simulaties vergeleken worden. In de beschrijving van de maatgevende situatie wordt uitgebreid aandacht besteed aan de keuze voor de maatgevende neerslaggebeurtenis. In hoofdstuk drie staan de scenario's beschreven; referentie, retentie en beekherstel. Voor ieder scenario is aangegeven wat het scenario inhoud, hoe het gesimuleerd is en wat de hypothese van de uitkomsten van de simulaties is. Hoofdstuk vier geeft een overzicht van de resultaten van de simulaties. Het vijfde hoofdstuk wordt gevormd door een uitgebreide beschouwing en discussie. Hierin worden de uitkomsten vergeleken met de hypothesen, met ander onderzoek en in de discussie worden de mitsen en maren van het onderzoek besproken. Zodat in hoofdstuk zes sterke conclusies geformuleerd staan. Daarnaast bevat dit hoofdstuk aanbevelingen met betrekking tot de modelinput, de modellering en uiteraard betreffende de ingrepen retentie en beekherstel. Het verslag stuit af in hoofdstuk zeven met een literatuurlijst.

2 Werkwijze

2.1 Uitgangspunten

2.1.1 Thematische uitgangspunten

- ◇ Het onderzoek richt zich op de effecten van KRW en WB21 maatregelen op de hoogwatersituatie benedenstrooms. Synergie tussen, of tegenstrijdige effecten van maatregelen die in het kader van WB21 en de KRW toegepast worden, worden niet direct onderzocht maar enkel in het kader van de hoogwatersituatie benedenstrooms;
- ◇ Alleen wateroverlast veroorzaakt door extreem hoge waterstanden. Een T=100 neerslagsituatie voor de Aa en De Dommel en een T=120 situatie voor de waterstanden in de Maas ter hoogte van 's-Hertogenbosch. Een uitgebreide beschrijving van de gebruikte buien en waterstanden staat in paragraaf (2.5);
- ◇ In de maatgevende situatie wordt geen rekening gehouden met sneeuw en dooi, hoewel dit een grote invloed kan hebben op de afvoer (ervaringen januari 2011).
- ◇ Inundaties bovenstrooms vormen niet de focus van het onderzoek;
- ◇ Alleen overstroming van waterkering, kades en maaiveld door te hoge waterstanden wordt beschouwd (geen andere faalmechanismen of andere vormen van wateroverlast);
- ◇ Er wordt gefocust op kwalitatieve gegevens en orde grootte (het gaat er niet om hoeveel water er precies in het systeem komt maar wat globaal de gevolgen zijn van maatregelen, hoewel hiervoor ordegrande gegevens wel van belang zijn);
- ◇ Alleen de ecologische tak van de KRW wordt beschouwd; niet de chemische;
- ◇ Er wordt uitgegaan van de huidige situatie in het stroomgebied van de Aa, niet van de te verwachten toekomstscenario's (behalve bij scenario 2050).

2.1.2 Uitgangspunten m.b.t. het model

- ◇ Er wordt gebruik gemaakt van het Gebiedsdekkend Hoogwatermodel De Dommel; een combinatie van SOBEK modellen, het Wageningen model en een RWZI model (uitgebreider beschreven in paragraaf 2.4 en bijlage 3);
- ◇ Er wordt gebruik gemaakt van een maatgevende bui van 1/100 jaar en de bestaande modellering van het onderzoeksgebied;
- ◇ Het verwachte Aa debiet en de verwachte Maaswaterstanden worden als input in het systeem gezien. Er wordt rekening gehouden met veranderingen in deze stromen maar het beheergebied van De Dommel wordt gebruikt voor het modelleren van maatregelen.

2.1.3 Afbakeningen in locatie

Alleen aanpassingen in het beheergebied van Waterschap De Dommel wordt beschouwd.

2.2 Gebiedsgegevens

2.2.1 Hoogwater rond 's-Hertogenbosch

Bij 's-Hertogenbosch komt het water van vele beken uit de Brabantse hogere zandgronden bijeen. Deze beken monden uit in de Aa en De Dommel, die het water verder vervoeren naar 's-Hertogenbosch waar het via de Dieze en het Drongelens Kanaal uitmondt in de Maas. Het water van

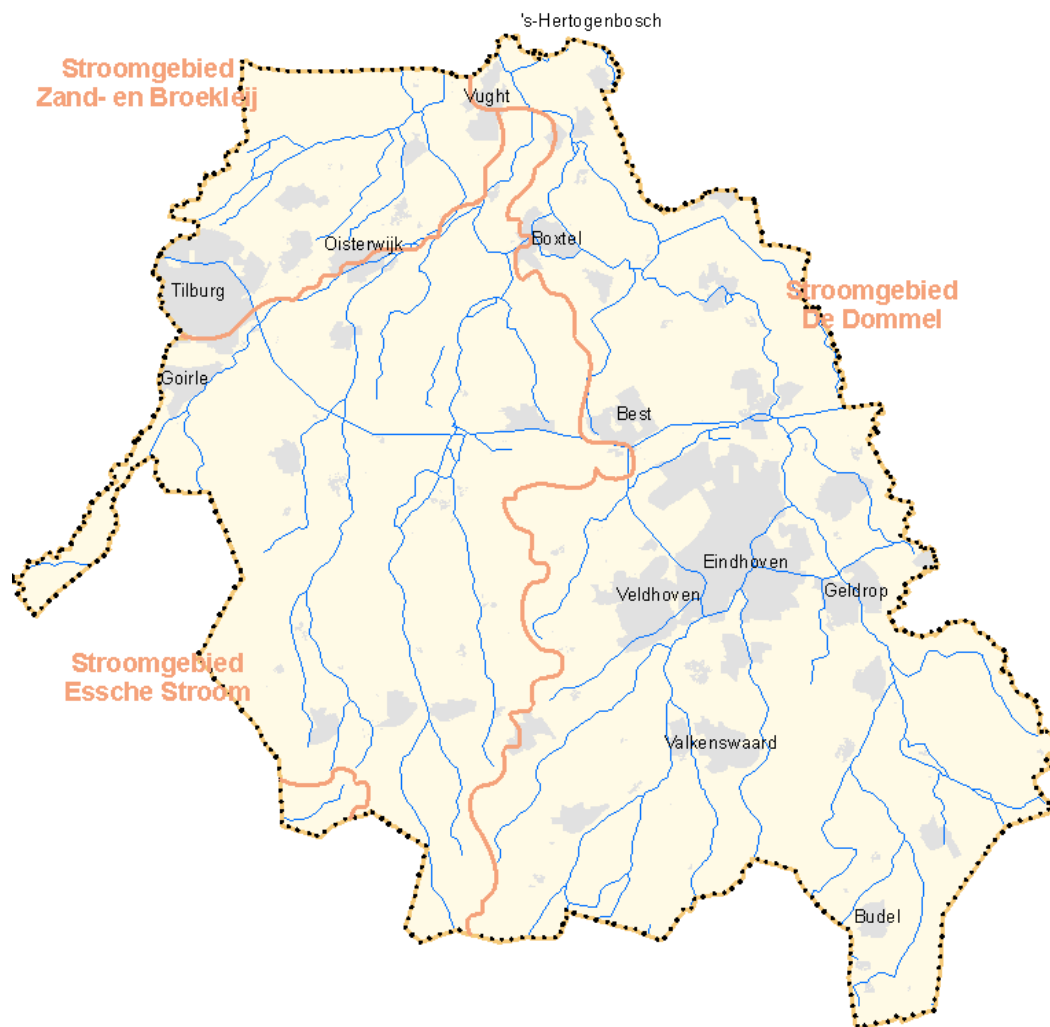
de Dieze wordt onder vrij verval bij Crèvecoeur afgevoerd naar de Maas. Het water van het Drongelens kanaal wordt onder vrij verval bij de Bovenlandse Sluis afgevoerd op de Maas, 15 kilometer stroomafwaarts van Crèvecoeur. De Bovenlandse sluis kan maximaal $100\text{m}^3/\text{s}$ afvoeren (Ijpelaar, 2010). De Essche Stroom mondt vlak voor 's-Hertogenbosch uit in De Dommel en haar afvoerregime is dus ook van invloed op de situatie rond 's-Hertogenbosch. Het watersysteem rond 's-Hertogenbosch is te zien in figuur2-1.



Figuur 2-1: De aankomst van de hoogwatergolven bij 's-Hertogenbosch, met nummers is de volgorde aangegeven. Vrij naar: www.brabantsewaterkaart.nl.

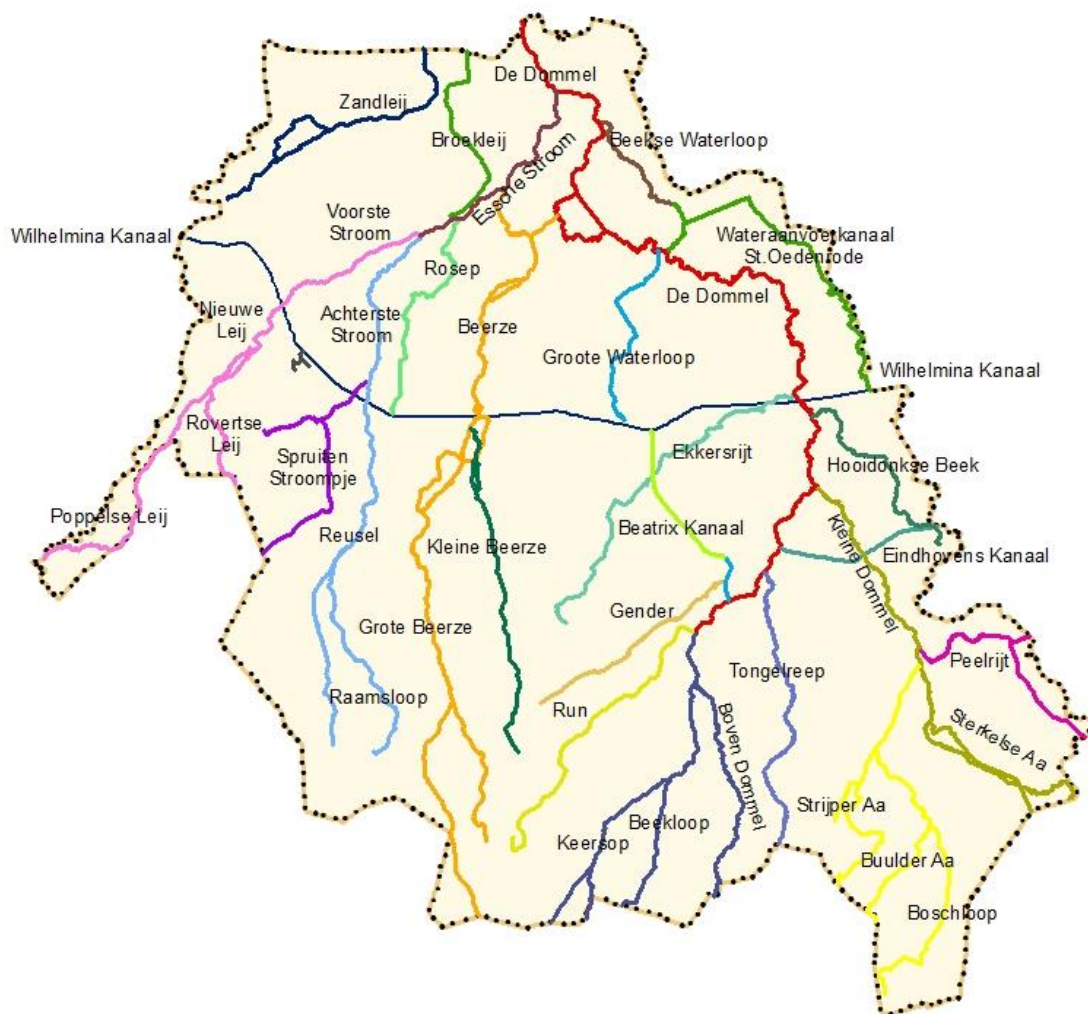
2.2.2 Geografie en stroomgebieden

Het beheergebied van waterschap De Dommel bestaat uit het Nederlandse deel van het stroomgebied van De Dommel, het stroomgebied van de Zandleij en Broekleij en een klein gedeelte dat deel uitmaakt van het stroomgebied van de Schelde. De Zandleij en Broekleij monden uit in het Drongelens Kanaal. Aangezien er in de dit onderzoek niets in de Zandleij en Broekleij aangepast wordt, vormen deze geen focus van het onderzoek. Het stroomgebied van De Dommel kan onderverdeeld worden in het stroomgebied van De Dommel zelf en het stroomgebied van zijn belangrijkste toeleverancier; de Essche Stroom. Het kan hierdoor soms verwarrend zijn of met de term “Dommel” de toevoer van de rivier tot Halder (waar de Essche Stroom in De Dommel stroomt) bedoelt wordt of de gehele rivier tot Vugterstuw (inclusief de Essche Stroom).



Figuur 2-2: De stroomgebieden van de Zand- en Broekleij, Essche Stroom en Dommel, Bron: Arcgiskaarten Waterbeheerplan WSDD.

De Essche Stroom wordt gevoed door de Voorste Stroom, de Achterste Stroom de Rosep en de Beerze. De Dommel wordt gevoed door de Kleine Dommel, Tongelreep, Boven Dommel, Run, en de Gender. Later voegen ook de Hooionkse beek, Ekkersrijt, Groote waterloop, het Wateraanvoerkanaal St. Oedenrode en de Beekse Waterloop zich bij De Dommel. Het Wilhelminakanaal loopt door het beheergebied van Waterschap De Dommel heen; maar heeft alleen connectie met het oppervlaktewatersysteem bij het Beatrixkanaal en enkele enclaves wateren af op het kanaal zoals Beekse Bergen.



Figuur 2-3: De belangrijkste waterlopen in het beheergebied van Waterschap De Dommel.

2.2.3 Karakteristieken

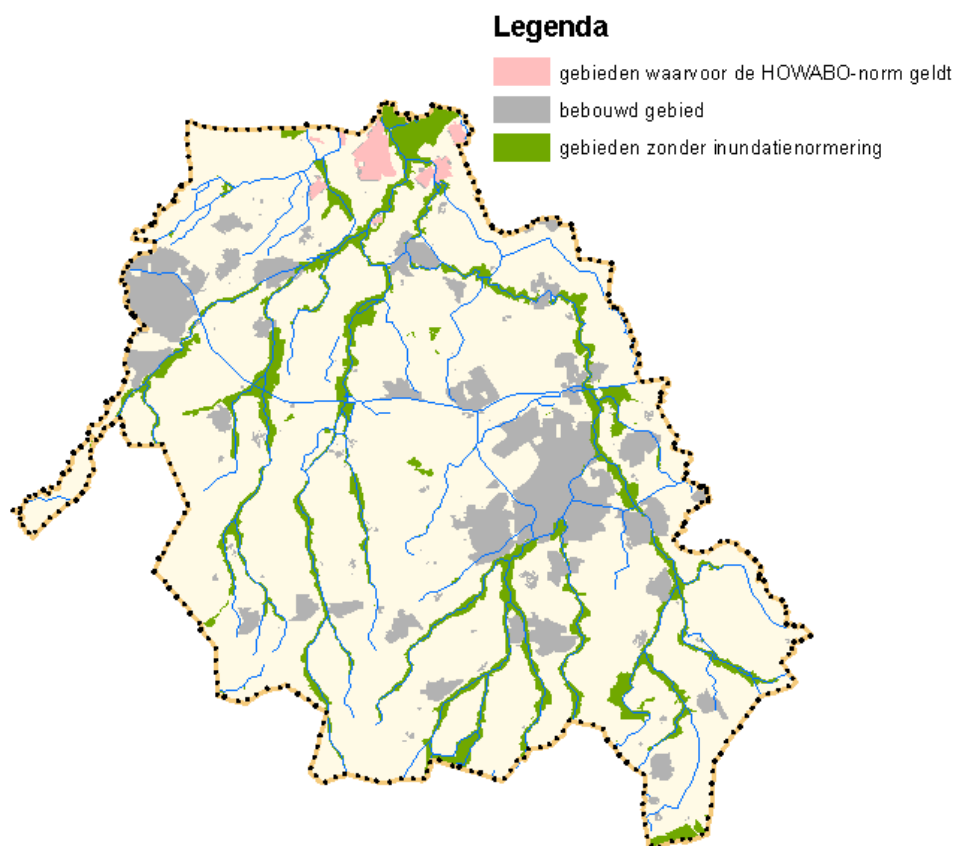
Watersysteem

De Dommel ontspringt in België op het Kempisch plateau en stroomt 35 kilometer door België en daarna 82 kilometer door Brabant. In een T=100 situatie komt er een piek van ongeveer $12\text{m}^3/\text{s}$ via de Bovendommel Nederland binnen en ongeveer $8\text{m}^3/\text{s}$ bij de Tongelreep. Bij Hoogwater komt niet al het water dat in het stroomgebied van De Dommel valt bij 's-Hertogenbosch terecht. Van de Gender, Run, Keersop, Beekloop en Bovendommel mag maximaal $20\text{m}^3/\text{s}$ geloosd worden op het Beatrixkanaal wat het gebied uitgaat naar het westen via het Wilhelminakanaal. In het Beatrixkanaal stroomt ook een kleine hoeveelheid (max. $2\text{m}^3/\text{s}$) lokaal water. Het water van de Beerze wordt bij hoogwater verdeelt over De Dommel en de Essche stroom in een verhouding van 1/3 naar De Dommel en 2/3 naar de Essche Stroom; hierdoor wordt de Beerze gerekend bij het stroomgebied van de Essche Stroom. Bij hoogwater komt de piek van de Essche Stroom doorgaans één dag eerder aan bij de confluentie dan de piek van De Dommel.

Inundatienormen

Het stroomgebied van De Dommel en Essche Stroom bestaat voornamelijk uit beekdalen. De beeksystemen liggen op licht hellende zandgronden met een verval van tussen de 20 en 40 meter waarbij 's-Hertogenbosch op het laagste punt ligt. Het beheergebied van Waterschap De Dommel bestaat voor ongeveer één derde uit landbouw, één derde uit natuur (veelal langs de beken) en één derde uit stedelijk gebied (Waterschap de Dommel, 2010). Doordat in deze beekdalen inundaties van

oudsher natuurlijk met grote regelmaat voorkomen en omdat de kosten om deze inundaties te voorkomen niet in verhouding staan met de baten, geldt in grote gebieden langs de beken geen inundatienorm waaraan voldaan moet worden (Unie van Waterschappen, 2003). Daarnaast zijn deze inundaties gewenst in het kader van de KRW. In bebouwd gebied geldt een inundatienorm van één in de 100 jaar. En in het stedelijk gebied dat onder invloed is van opstuwing door de Maas geldt de HOWABOnorm van één in de 150 jaar (Heidemij, 1995). In het overige gebied gelden de normen voor grasland (1/10 jaar meer dan 5% van het perceel), akkerbouw (1/25 jaar) en glas en hoogwaardige land- en tuinbouw (1/50 jaar) (Unie van Waterschappen, 2003).



Figuur 2-4: Inundatienormen in het beheergebied van WSDD.

2.3 De opzet van de simulaties

Voor het verkrijgen van de benodigde informatie over de gevolgen van maatregelen zijn modelruns gemaakt met een combinatiemodel bestaande uit verschillende modellen (beschreven in paragraaf 2.4). Ten eerste is een referentierun gemaakt worden om te bekijken of de uitkomsten volgens verwachting zijn en om latere runs mee te vergelijken. Deze referentierun bevat de huidige geografische en hydrologische data. In de referentierun zijn geen klimaatscenario's gebruikt aangezien dit in de berekeningen een extra onzekerheid meebrengt. Daarna zijn modelruns gemaakt met de modellering van retentiegebieden. Hiervoor zijn 3 runs gemaakt: één met alleen de retentiegebieden bovenstrooms van het Wilhelminakanaal; één met alleen retentiegebieden benedenstrooms van het Wilhelminakanaal en één met alle geplande retentiegebieden uit het beleidsplan voor tot 2015 'Krachtig Water' (Waterschap de Dommel, 2010). Daarna zijn modelruns gemaakt met de voor 2015 geplande beekhersteltrajecten; wederom enkel bovenstrooms, enkel benedenstrooms en een totaal van alle geplande trajecten.

Door deze tweedeling valt te analyseren of er verschil bestaat in het effect van bovenstroomse en benedenstroomse uitvoering en wat het effect is van het verschil in schaal van de uitvoering van de maatregel. Tabel 2-1 geeft een overzicht.

Aantal runs	Uitleg simulaties
1	Referentie (huidige situatie).
3	Geplande retentie; bovenstrooms, benedenstrooms en totaal.
3	Geplande beekherstel; bovenstrooms, benedenstrooms en totaal.

Tabel 2-1: De uitgevoerde SOBEK-runs.

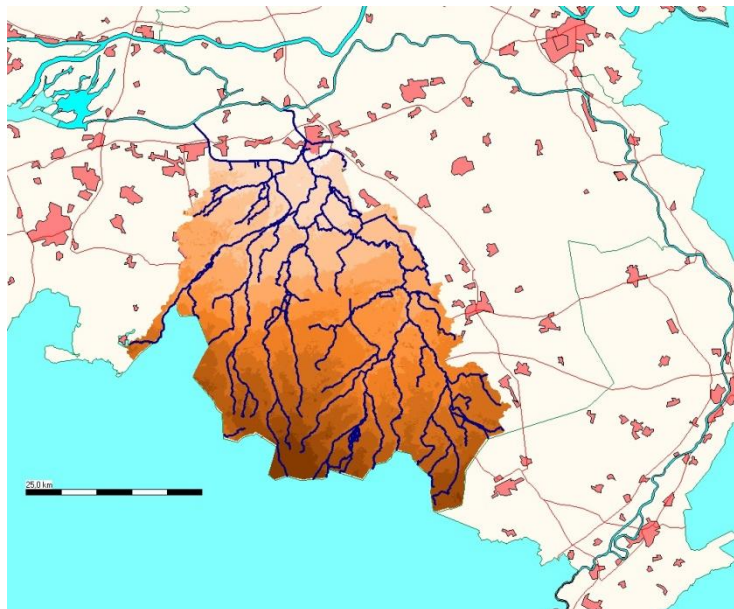
De informatie die uit de SOBEK-runs gehaald moet worden voor verdere analyse zijn:

- ◇ De hoogwatergolven van De Dommel, Essche Stroom, Aa en Drongelens kanaal en de bijbehorende waterstanden in de Maas (ter hoogte van Crèvecoeur en de Bovenlandse sluis);
- ◇ De waterstanden in 's-Hertogenbosch;
- ◇ De overstromingskaarten;
- ◇ De lokale veranderingen om de oorzaken van veranderingen benedenstrooms te kunnen achterhalen.

2.4 De modellering

2.4.1 Inleiding

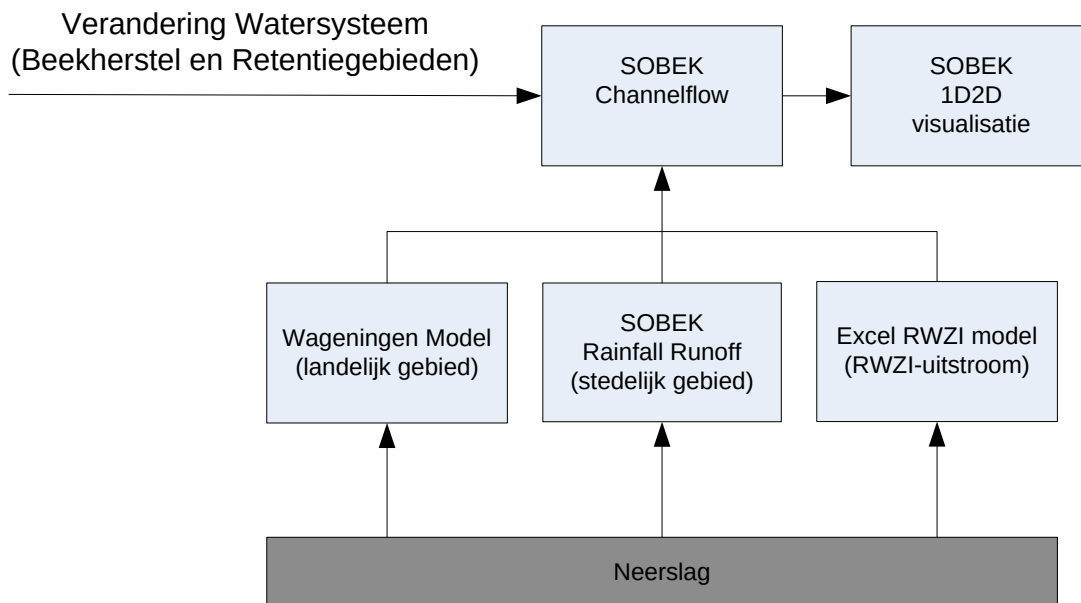
Voor de modellering wordt een combinatie gebruikt van de modellen SOBEK ChannelFlow, Rainfall Runoff, 1d2d (Delft Hydraulics Software, 2011) en het Wageningen Model (Warmerdam, Kole, & en Chormanski, 1996). Daarnaast wordt een Excel model gebruikt om de RWZI overflow te modelleren (Waterschap de Dommel, 2010). De combinatie van deze modellen en de invulling van het watersysteem De Dommel heet: Gebiedsdekkend Hoogwatermodel De Dommel.



Figuur 2-5: Waterlopen in Sobek CF. Het Wilhelminakanaal is alleen gemodelleerd als afvoerpunt van het Beatrixkanaal.

SOBEK channelflow wordt gebruikt voor de modellering van de waterlopen en berekeningen van de waterhoogtes en debieten. SOBEK 1D2D is een visualisatie model waarmee inundaties ook

gemodelleerd worden. Het Wageningenmodel, SOBEK rainfall-runoff en het Excel RWZI model zijn modellen die berekenen hoe neerslag via landelijk gebied (Wageningen model), stedelijk gebied (SOBEK RR) en het rioolstelsel (Excel RWZI) afgevoerd wordt naar waterlopen. Scenario 2050 (Waterschap de Dommel, 2010) is een model dat de klimaatscenario's van het KNMI en de verwachte veranderingen in het stroomgebied De Dommel doorvoert in de andere modellen. In bijlage 3 staat een samenvatting van de gebruikte modellen. Voor de theoretische achtergronden van het Wageningenmodel wordt verwezen naar Warmerdam (1996). Het model is gebouwd voor hoogwateranalyses en is gekalibreerd en gevalideerd op hoogwatersituaties (Waterschap de Dommel, 2010).



Figuur 2-6: Overzicht van de relaties van de modellen.

2.4.2 Beschrijving van de individuele modellen

Het Wageningenmodel (landelijk gebied)

De om acht uur 's ochtends gemeten etmaalneerslag neerslag wordt in het midden van de meetperiode in zes uur op het gebied gemodelleerd (tussen 18:00 en 24:00 de voorgaande dag) hierdoor wordt het inhomogene karakter van buien gemodelleerd. Het model rekent in 6-uurs stappen. De beschrijving van het watersysteem is aan de hand van twee reservoirs; een snel en een langzaam reservoir. Afhankelijk van de voorgeschiedenis (verzadigingsgraad van het systeem) wordt meer of minder water door het snelle reservoir geleid om te simuleren dat het sneller afstroomt als het gebied verzadigd is (Aalders, 2003).

Het Wageningenmodel (Warmerdam, Kole, & en Chormanski, Modelling rainfall-runoff processes in the Hupselse beek research basin. Proceedings Strassbourg Conference on Ecohydrological processes in small basins., 1996) wordt gebruikt omdat het korte rekentijden heeft, automatische kalibratie heeft en omdat het niet lineaire gedrag van waterafvoer doeltreffend gemodelleerd wordt. Dit houdt in dat een natte voorgeschiedenis leidt tot een toenemend versnelde afvoer. Dit biedt voordelen te opzichte van modellen als SOBEK-RR (waarbij getrapt één, twee of drie lineaire afvoerreservoirs actief zijn) of RAM, waarbij een vaste verdeling van afvoerbare neerslag over een snel en een langzaam reservoir wordt toegepast (Velner, 2002). Voordelen boven ruimtelijk verdeelde fysische modellen zoals SIMGRO zijn dat er veel minder parameters (en dus invoer; meetgegevens) nodig zijn waardoor het model sneller te gebruiken is en fysische modellen zijn lastig te kalibreren. Enkele

nadelen van het Wageningenmodel bij toepassing in het stroomgebied van de Issel (Duitsland) zijn (Brauer, 2007):

- ◇ De zomerafvoer weinig reageert op regenval, waar een grote reactie is waargenomen;
- ◇ Sneeuwval en dooi worden niet gemodelleerd met het Wageningenmodel waardoor hoogwaterpieken tijdens dooi niet goed gemodelleerd worden en maatgevende situaties met dooi niet goed gemodelleerd kunnen worden;
- ◇ Niet ruimtelijk verdeelde hydrologische modellen (zoals het Wageningenmodel) leggen relaties tussen hydrologische fluxen in een deelstroomgebied zonder ruimtelijk onderscheid te maken in eigenschappen van een deelstroomgebied waardoor lokaal onnauwkeurigheden optreden;
- ◇ Het model gebruikt geen fysische parameters, welke dus ook niet aangepast kunnen worden;
- ◇ Grondwaterstromingen worden niet gemodelleerd, wat ten koste gaat van de nauwkeurigheid.

In Brauer 2007 staat dat ook de debieten in de winter worden onderschat, echter bij de validatie van het model op het gebied van De Dommel wordt het piekdebiet in natte tijden juist licht overschat. (Waterschap de Dommel, 2010)

De eerste twee nadelen vormen geen bezwaren voor dit onderzoek aangezien de maatgevende situatie (zie paragraaf 2.5) uitgaat van een wintersituatie zonder sneeuw en dooi. Het derde punt is opgelost door het model in zeer veel kleine gebieden op te delen en voor ieder gebied de specifieke eigenschappen om te zetten naar modelparameters. De laatste twee punten leveren hebben geen effect op het verschil tussen de simulaties met beekherstel en retentie versus de referentiesimulatie. Voor vernatten en vasthouden zou dit grote problemen opleveren aangezien de grondwaterstand een belangrijke bijdrage levert aan de effecten van deze maatregelen. Dit betekent dat om het Wageningenmodel te gebruiken voor het simuleren van vernatten en vasthouden de effecten van de maatregelen ingeschat moeten worden en deze effecten op de afvoeren in het model gezet moeten worden in plaats van de (meer gewenste) situatie waarin een verandering in de afvoer wordt gemodelleerd naar aanleiding van een verandering van tijdelijk (vasthouden) of langdurig (vernatten) grondwaterspiegelverhoging.

Het Wageningenmodel is opgezet en wordt in het Waterschap De Dommel gebruikt als voorspellend hoogwatermodel. Rekentijd, modellering van versnelde afvoer en automatische kalibratie is daarom belangrijker geacht dan een nauwkeurige beschrijving van de grondwatersystemen.

SOBEK Rainfall Runoff (stedelijk gebied/overstort)

De stedelijke neerslag/afvoer wordt gemodelleerd met behulp van Sobek RR-paved (Delft Hydraulics Software, 2011). Water dat niet kan worden geborgen in het rioolstelsel en niet overgepompt wordt naar een RWZI, wordt geloosd op het oppervlaktewatersysteem via overstorten. In Sobek RR komt overgepompt water vanuit het rioolstelsel direct bij de RWZI tot afvoer. Aangezien het water dan te snel tot afvoer komt, wordt deze functie niet gebruikt en is er een apart model om het RWZI effluent te modelleren. Naar aanleiding van onderzoek wordt uitgegaan dat 30% van het bebouwd oppervlak gerioleerd gebied is (Nelen en Schuurmans, 2006), dat de Pomp Over Capaciteit 0.7mm/h is en de berging in het riool 4mm. De neerslaginput is gelijk aan die van het Wageningenmodel. SOBEK RR-Paved geeft een goede en snelle modellering van de afvoer van het stedelijk water en is al geïntegreerd met SOBEK Channelflow. Er is daarom geen reden om een andere model hiervoor te gebruiken.

Excel RWZI-model (rioolwater)

Het stedelijk water dat overgepompt wordt naar een RWZI wordt gemodelleerd in het RWZI-effluentmodel (Waterschap de Dommel, 2010). Dit model beschrijft beter dan Sobek RR de variatie in hoeveelheid effluent in de tijd. Op basis van de dagneerslag van de afgelopen vier dagen en fysische eigenschappen van de RWZI en het verzorgingsgebied wordt het effluent bepaald.

SOBEK Channelflow (Het systeem van primaire waterlopen)

Voor de modellering van waterlopen wordt gebruik gemaakt van een Sobek 1D model (Delft Hydraulics Software, 2011); SOBEK is het oppervlaktewatermodel waarvoor gekozen is bij Waterschap De Dommel en er is tot nog toe geen reden om hiervan af te zien. SOBEK CF is een veelgebruikt model waarmee het primaire watersysteem nauwkeurig gemodelleerd kan worden. Alle watergangen, stuwen, duikers en andere kunstwerken zijn hierin gemodelleerd, voorzien van zoveel mogelijk lokale dwarsprofielen met ruwheid en eventueel sturingen van kunstwerken. Het model is qua fysieke schematisatie up-to-date voor 2011. Bij inundatie wordt de koppeling gemaakt met Sobek 1D2D. De afstroomdebieten van het Wageningenmodel worden verdeeld over 2296 locaties op het channelflow model gezet via greenhouse nodes; op basis van de locatie en het oppervlakte van het (deel)gebied. SOBEK CF beschikt over robuust numeriek schema laag- en hoogwater; sub en superkritische stromen efficiënt beschrijft. Nadelen van SOBEK CF zijn dat inundaties, bochtafsnijding bij hoogwater van meanderende beken, meestromende berging en extra ruwheid bij overland-flow minder nauwkeurig gemodelleerd kunnen worden en dat inundaties niet gevisualiseerd kunnen worden. Daarvoor is er een 2D-model aan gekoppeld.

Inundatie (Sobek 2D)

Indien de waterhoogtes in Sobek 1D de kades overstijgen, treedt Sobek 2D (Delft Hydraulics Software, 2011) in werking. In een grid van minimaal 5x5 meter wordt berging, inundatie en stroming over het maaiveld gemodelleerd. Voor het gebiedsdekkende model wordt een resolutie van 100x100 meter gebruikt aangezien de rekentijden enorm toenemen met een verfijning van het grid en gedetailleerde informatie over lokale inundaties niet in de scope van het onderzoek vallen. Het toevoegen van lijnelementen in het 2D grid is ten tijde van de modelleringen nog niet gedaan maar kan in de toekomst bijdragen aan een lokaal meer nauwkeurige modellering. Door de combinatie van SOBEK Channelflow en SOBEK 2D kunnen onder anderen overstromingen, meestromende berging, kortsluitingen van meanders bij hoogwater en het versneld voortplanten van watergolven effectief gemodelleerd worden. Dit is van groot belang voor het modelleren van beekdalen in het algemeen en beekherstel in het bijzonder. Enig nadeel is dat deze nauwkeurige modellering een lange rekentijd vergt.

2.4.3 Modellering gebieden buiten beheergebied WSDD

Aankoppeling Aa

Het stroomgebied van de Aa wordt gemodelleerd met hetzelfde model als De Dommel. Het gebied van de Aa bestaat uit 1 gebied in het Wageningenmodel en de RWZI van Den Bosch. Er wordt uitgegaan van de huidige situatie van de Aa.

Maas

De Maas is op twee punten gemodelleerd; bij Crèvecoeur en bij de Bovenlandse sluis. De Maas is op deze punten gemodelleerd als waterstand

Lokale neerslag 's-Hertogenbosch

De neerslag op het stedelijk gebied en het landelijk gebied en de RWZI van 's-Hertogenbosch zijn gemodelleerd; De hoeveelheid water die hier valt en niet naar de RWZI afgevoerd wordt is minimaal ten opzichte van de enorme hoeveelheden water die de Aa en De Dommel aanvoeren, vandaar dat dit te verwaarlozen is. De uitstroom van de RWZI van 's-Hertogenbosch is wel gemodelleerd.

Belgisch gebied

Een gedeelte van het stroomgebied van De Dommel ligt in België. Deze gebieden zijn gemodelleerd met aparte gebieden in het Wageningenmodel die gekalibreerd zijn met het meetpunt aan de grens. Deze Wageningengebieden leveren een debiet aan het Sobek channelflow model.

Niet gemodelleerde gebieden

Het gebied dat tussen de Maas en het Drongelens kanaal ligt; wordt bij hoogwater droog gehouden doordat water naar de Maas gepompt wordt, ongeacht de spuiomogelijkheden van Bovenlandse Sluis en Crèvecoeur. Hierdoor heeft het geen invloed op het Drongelens kanaal en de waterbalans van het onderzochte gebied.

Andere gebieden die niet gemodelleerd zijn wateren af op het Wilhelmina kanaal, op het Drongelens kanaal, vallen in het stroomgebied van de Schelde of zijn volledig gestuwd. Er wordt vanuit gegaan dat het Wilhelmina kanaal kan afwateren op de Maas ten hoogte van de Biesbosch. Hoewel niet zeker is dat dit altijd kan, gaat het om relatief kleine hoeveelheden water die geen wezenlijke verschillen opleveren bij problemen in 's-Hertogenbosch. De gebieden onbemeten zijn en afwateren op het Drongelens kanaal zijn twee erg kleine gebiedjes en de Drunense Duinen. Hoewel deze onbemeten zijn, wordt ervan uitgegaan dat er nauwelijks afstroming is vanuit dit gebied.

2.5 Maatgevende situatie

De modelopzet gaat in op de keuze van de gebruikte herhalingstijden, de gebruikte neerslag en de gebruikte Maasgolf.

2.5.1 Herhalingstijden

Door onvoldoende meetgegevens en constante aanpassingen in de watersystemen is het onmogelijk een wetenschappelijk correcte uitspraak te doen over situaties met extreem hoge herhalingstijden zonder discutabele aannames. Omdat toch met getallen gewerkt moet worden, zijn in het verleden schattingen, berekeningen en aannames gedaan. Er wordt nu gewerkt met bepaalde normen die hieronder beschreven staan. Onderzoek naar de correctheid van deze gegevens of mogelijkheden tot verbetering van deze aannames maken geen onderdeel uit van deze studie.

In dit onderzoek worden aannames gedaan voor de hoeveelheid neerslag en de afvoer van de Maas om gezamenlijk een situatie te verkrijgen voor inundatie in 's-Hertogenbosch met een herhalingstijd van ééns in de 150 jaar. Voorwaarden hiervoor zijn dat het maaspeil voldoende hoog is dat de spuisluis Crèvecoeur gesloten wordt en dat er in deze periode voldoende neerslag valt in het stroomgebied van de Aa en De Dommel dat niet al het water afgevoerd kan worden en de waterpeilen in 's-Hertogenbosch stijgen tot kadehoogte.

De keuze voor de te gebruiken neerslag en maasgolf in het model is afhankelijk van de te hanteren herhalingstijd. De norm voor wateroverlast in 's-Hertogenbosch is eens in de 150 jaar. Deze is ontstaan naar aanleiding van het hoogwater in 1995 en wordt gehandhaafd in het gebied (Waterschap Aa en Maas, 2009). Uit eerder onderzoek (Heidemij, 1996) is overgenomen dat de kans op samenvallen van De Dommel/Aa en de Maasgolf 0,8 is. Hieruit volgt dat de herhalingstijd van de berekende waterstanden in een scenario met een Maasgolf van 1/120 en Dommel/Aa golf van 1/100 geschat wordt op 1/150 jaar. In deze situatie heeft het effect van maatregelen de meeste impact en van de effecten in deze extreme situatie is weinig bekend. Overlast door extreem hoog water staat centraal in dit onderzoek en specifiek overlast in 's-Hertogenbosch. Vandaar dat deze situatie wordt gebruikt voor modellering.

Hoogwater door één of meerdere buien

Extreme situaties kunnen veroorzaakt worden door één extreme bui die resulteert in hoogwater zowel op de Maas als in het stroomgebied van De Dommel en de Aa, of door twee buien waarbij het hoogwater op de Maas veroorzaakt wordt door een andere neerslaggebeurtenis dan het hoogwaer

in het gebied van De Dommel en Aa. Dit rapport gaat alleen in op hoogwater dat van één bui komt. In deze situatie valt de neerslag in de Ardennen tegelijk met de neerslag in het gebied van De Dommel en de Aa. Het moment waarop de hoogwaterpiek van de Maas bij 's-Hertogenbosch aankomt is gelijk aan de start van de neerslaggebeurtenis plus de looptijd van de haarvaten in de Ardennen tot de Maas bij 's-Hertogenbosch.

2.5.2 Neerslag

De T=100 bui van Waterschap De Dommel

Bij het Waterschap De Dommel werd gebruik gemaakt van een bui met een herhalingstijd van één in de 100 Jaar. Deze bui was de neerslag die van 13 oktober 1998 tot 13 november 1998 viel. Om te komen tot de meest extreme situatie in de afgelopen 100 jaar, zijn de volledige 100-jarige meetreeksen van de Bilt gebruikt. De dagsommen aan neerslag van de Bilt zijn gecorrigeerd met een factor 0.94 aangezien uit vergelijkingen van langjarige gemiddelden is gebleken dat in het beheergebied van De Dommel, en Aa & Maas minder neerslag valt dan in De Bilt (Waterschap de Dommel, 2010). Daarnaast zorgt deze factor ervoor dat de neerslagregistratie op de puntlocatie De Bilt beter representatief is voor de neerslag in de stroomgebieden van De Dommel en Aa.

De potentiële verdampingsregistratie van de Bilt is pas vanaf 1 juli 1957 beschikbaar. Om ook data voor de voorgaande 51 jaar te krijgen is de gemiddelde dagwaarde van de verdamping uit de reeks 1957-2009 toegepast op de voorgaande jaren. De potentiële verdamping in de Bilt is iets lager dan die in Eindhoven, echter de verschillen zijn klein en worden vooral in de zomermaanden gemaakt. Voor de te modelleren periode is de potentiële verdamping erg laag en wijkt de verdamping niet of nauwelijks af van de reeks in Eindhoven en andere meetpunten nabij het stroomgebied van De Dommel (meetreeksen KNMI).

Met deze data is per deelstroomgebied (Wageningenmodel, RWZI effluent en RR-Paved) het neerslag-afstromingsdebiet berekend. Vervolgens is uit deze 100-jaar neerslagafvoer met het programma 'golf.exe' alle perioden dat de afvoer boven een drempelwaarde ($T=0,10$) uitkomt, bestempeld als 'event'. De tool geeft alle events een ID en bepaald de begin- en einddatum, maximale waarde, het volume boven de drempelwaarde en de duur van het event boven de drempelwaarde. Op basis van de weegfactoren 'maximale waarde' en 'volume' (beiden weegfactor 1) zijn de herhalingstijden van de events bepaald. Het event met de hoogste waarde vastgesteld als $T=100$, de op één na hoogste $T=50$, de op twee na hoogste $T=33$ etcetera. Dit zijn dus herhalingstijden op basis van het verleden en niet bepaald aan de hand van verwachtingen voor de toekomst. Het event met de hoogste waarde start op 23 oktober 1998 en eindigt op 11 november 1998. Om dit event met zijn gevolgen goed te modelleren is er ook een inloop en uitloop periode nodig. Vlak voor deze periode was de grond niet droog, daarom wordt er vanaf 13 oktober gesimuleerd om het gebied ook in het model vast te vernatten voordat de grote buien vallen. Er is een uitloop van twee dagen na het event omdat de looptijd van neerslag tot afvoer op de Maas ongeveer twee dagen is. Hierdoor is ook de afloop van bui ook te zien in de modellering.

Bui-analyse

Als onderdeel van dit onderzoek is van deze bui is een analyse gemaakt om te bepalen hoe representatief deze bui is voor een neerslagsituatie die één in de 100 jaar voorkomt, de volledige memo staat in bijlage 4.

Dat een bui de ergste is van de afgelopen 100 jaar wil nog niet zeggen dat deze representatief is voor een $T=100$ situatie. Vanwege het gebrek aan voldoende neerslaggegevens voor een statistische onderbouwing, zijn andere methoden en bronnen gebruikt om te onderbouwen waarom deze bui wel of niet representatief is:

- ◇ Piek en volumebepaling,
- ◇ De analyse in de Watersysteemanalyse (WSA),

- ◇ Het logaritmisches uitzetten van buiparameters,
- ◇ Vergelijking met de KNMI herhalingstijden,
- ◇ Vormbepaling.

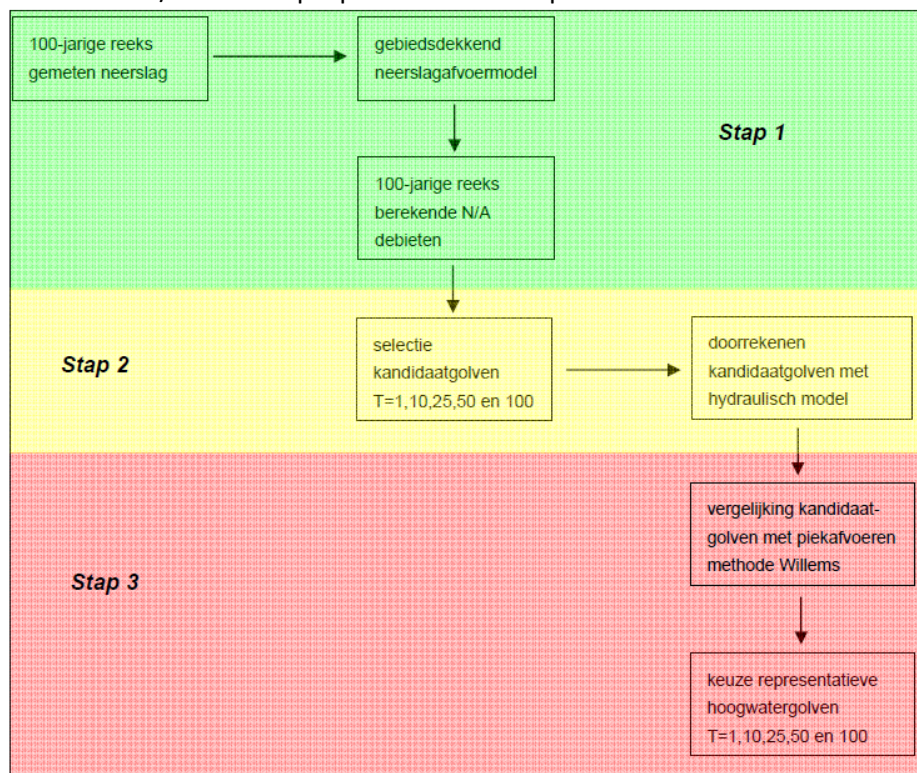
Piek en volumebepaling

Van alle historische buien van het KNMI waarvoor de modelmatige afvoer in het gebied van Waterschap De Dommel een lokaal neerslagafvoer debiet oplevert die groter is dan $T=0,1$ is de piek van de afvoer en het volume van de afvoer bepaald. Voor ieder deelgebied (21 in het stroomgebied van De Dommel; zie modelanalyse bijlage 3) is de verhouding hoogte van de piek van de bui van okt/nov 1998 vergeleken met de hoogte van hoogste piek ooit voor dat gebied uitgezonderd okt/nov 1998 (okt/nov leverde bijna overal de hoogste piek op). Om een totaal te bepalen voor alle gebieden hebben deze verhoudingen een gewicht meegekregen afhankelijk van de hoogte van de piek. Hieruit bleek dat de piek van okt/nov 1998 1,09 maal zo hoog is als de op één na hoogste piek. Op basis van hoogwaterstatistiek (Waterschap de Dommel, 2010) is het aannemelijk dat een $T=100$ bui een 9% hogere piek heeft dan een $T=50$ bui.

Hetzelfde is gedaan voor bepaling van de volumes; hieruit bleek dat het volume van de bui van okt/nov 1998 2,65 maal zo groot is als de bui met het op één na hoogste volume. Het is statistisch niet aannemelijk dat een $T=100$ bui een ruim twee en een half keer zo groot volume heeft als een $T=50$ bui. Ook een wijziging van de minimumlimiet (basisafvoer) van $T=0,1$ naar $T=1$ leidt er niet toe dat de neerslaggebeurtenis van okt/nov 1998 zou worden beschouwd als twee afzonderlijke buien.

De analyse in de Watersysteemanalyse

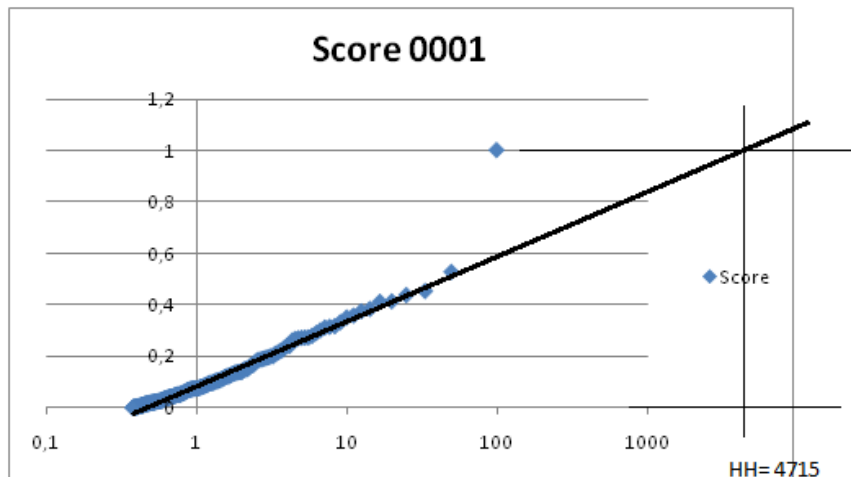
In de watersysteem analyse (WSA) Boven-Dommel (Waterschap de Dommel, 2010) is ook de 100 jarige meetreeks van neerslag van het KNMI in het gebiedsdekkende model van De Dommel omgerekend tot 100 jaar neerslagafvoer debieten. Daarna zijn kandidaat-golven geselecteerd voor $T=1$, $T=10$, $T=25$, $T=50$ en $T=100$. Deze kandidaat-golven zijn doorgerekend met het hydraulische model en de piekafvoeren zijn vergeleken met de piekafvoeren volgens de methode Willems. Hieruit bleek dat okt/nov 1998 qua piekafvoer een representatieve keuze is voor een $T=100$ bui.



Figuur 2-7: Schema afleiding hoogwatergolven in de WSA.

Het logaritmisch uitzetten van buiparameters

Bij het logaritmisch uitzetten van de buiparameters zijn ook op basis van 100 jaar neerslaggegevens de lokale neerslagafvoer debieten bepaald. Per gebied is de piek en het volume bepaald van alle buien met een neerslagafvoer debiet boven $T=0,1$. Volume en piek zijn beiden met een gelijke weegfactor geresulteerd in een score tussen de 0 en 1. Deze scores zijn (nog steeds per gebied) gerangschikt en er is een herhalingstijd aan gekoppeld ($T=100$ voor de hoogste score, $T=50$ voor de op één na hoogste, etc.). De score en de herhalingstijd zijn logaritmisch uitgezet zodat 21 van de volgende figuren ontstaan (zie figuur 2-8).

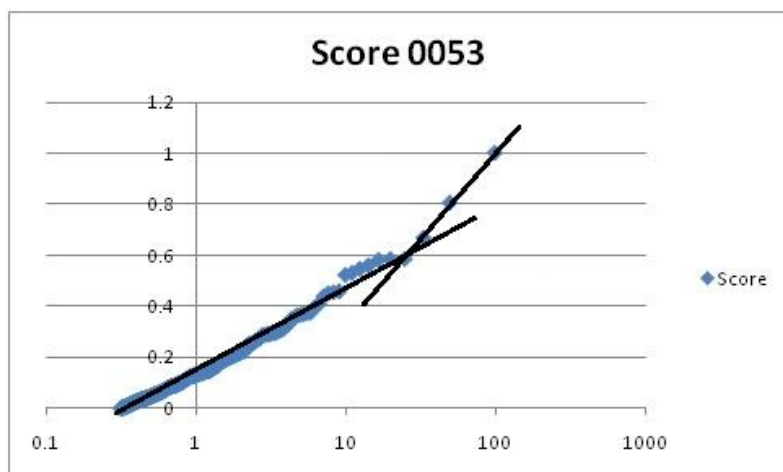


Figuur 2-8: Bepaling representatieve herhalingstijd van event okt-nov 1998.

Uit dit voorbeeld blijkt dat het laatste punt (representeert de bui van okt/nov 1998) niet in lijn ligt met de andere punten. Volgens de exponentiële extreemwaarde verdeling behoren de punten op een rechte lijn te liggen. In dit geval zou dat betekenen dat voor dit gebied de herhalingstijd van de bui okt/nov 1998 uitkomt op ééns in de 4715 jaar via de methode zoals te zien is in figuur 2-8.

Met deze methode is de verwachte herhalingstijden van ieder deelgebied bepaald. Door deze herhalingstijden te vermenigvuldigen met een weegfactor (op basis van het aandeel van het betreffende deelgebied aan de totale piek en volume) en daarna bij elkaar op te tellen is berekend dat voor het hele gebied van De Dommel deze bui een herhalingstijd heeft van ééns in de 1800 jaar met een onzekerheidsveld van tussen de 1150 en 2900 jaar.

Aangezien bij hogere herhalingstijden beken buiten hun oevers treden, kunnen er bij hogere herhalingstijden andere mechanismen in werking treden door bijvoorbeeld inundaties. In een aantal gebieden zijn deze mechanismen zichtbaar als knik in de rechte lijn, zoals te zien is in figuur 2-9. Met deze mechanismen kan rekening gehouden worden door alleen de punten ná de knik te beschouwen.



Figuur 2-9: voorbeeld van een afvoergebied waarin een duidelijke knik te zien is in de logaritmische scores.

Indien in er in de gebieden waar een knik zichtbaar is, hiermee rekening gehouden wordt, komt men met deze methode op een verwachte herhalingstijd uit van ééns in de 680 jaar. Vanwege onzekerheid kan uitgesproken worden dat de bui met deze methode een herhalingstijd heeft van tussen de 425 en 1100 jaar.

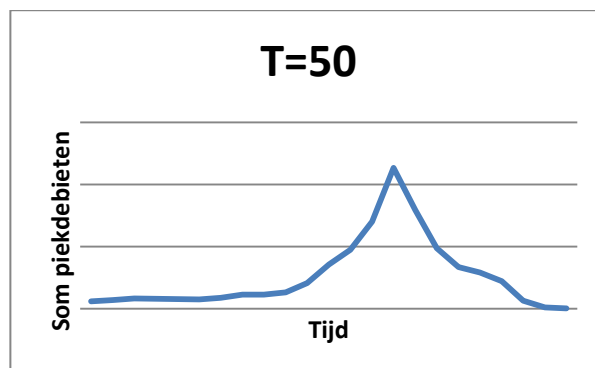
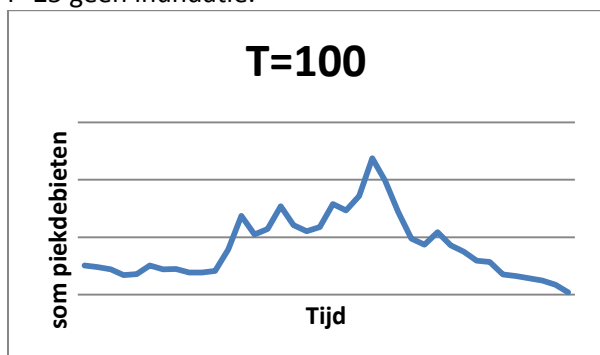
Vergelijking met de KNMI herhalingstijden

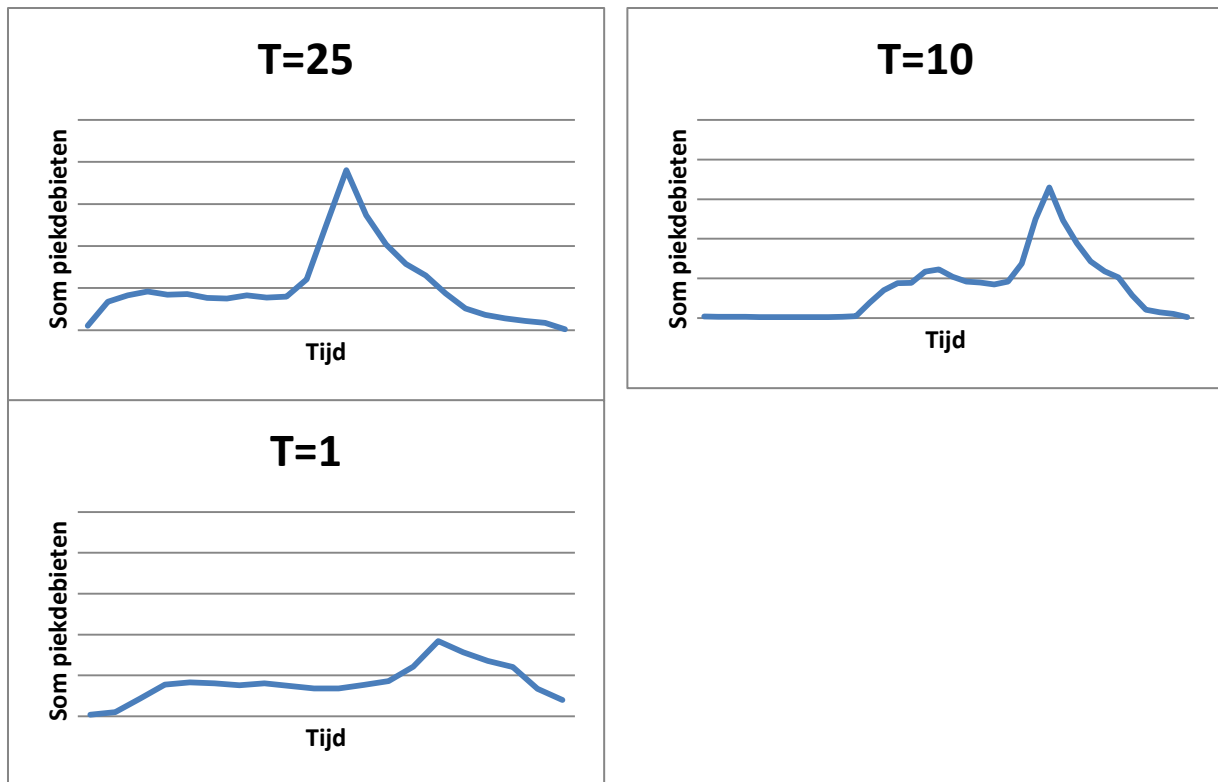
Uit een vergelijking met de standaardbuien van het KNMI blijkt dat de ergste 10 dagen van het event okt-nov 1998 behoorlijk goed overeenkomt met een $T=100$ bui. Echter, de bui van okt-nov 1998 duurde langer dan 10 dagen en tussen de 2 dagen met de meeste neerslag zitten 9 dagen. Indien de trend van KNMI buien wordt doorgetrokken naar buien die langer dan 10 dagen duren; blijkt dat het event van okt-nov 1998 een herhalingstijd heeft van $T=1600$ in 13 dagen; $T=1700$ in 16 dagen; en $T=2300$ in 19 dagen.

Hieruit blijkt dat een korte periode (tot 10 dagen) van de bui wèl representatief is als $T=100$ bui, maar dat door de extreem lange duur en intensiteit van de bui de totale bui niet representatief is als $T=100$ bui.

Vormbepaling

De vormen van de buien die gebruikt zijn voor de verschillende herhalingstijden hebben een erg verschillende vorm. Hierdoor heeft de ene bui wel een natte voorgeschiedenis en een andere niet. Daarnaast is het mogelijk dat door gebruik van deze golven in de modellen de uitkomst is dat voor locaties er wel bij een bui met herhalingstijd van (bijvoorbeeld) $T=10$ wel inundatie is maar bij een $T=25$ geen inundatie.





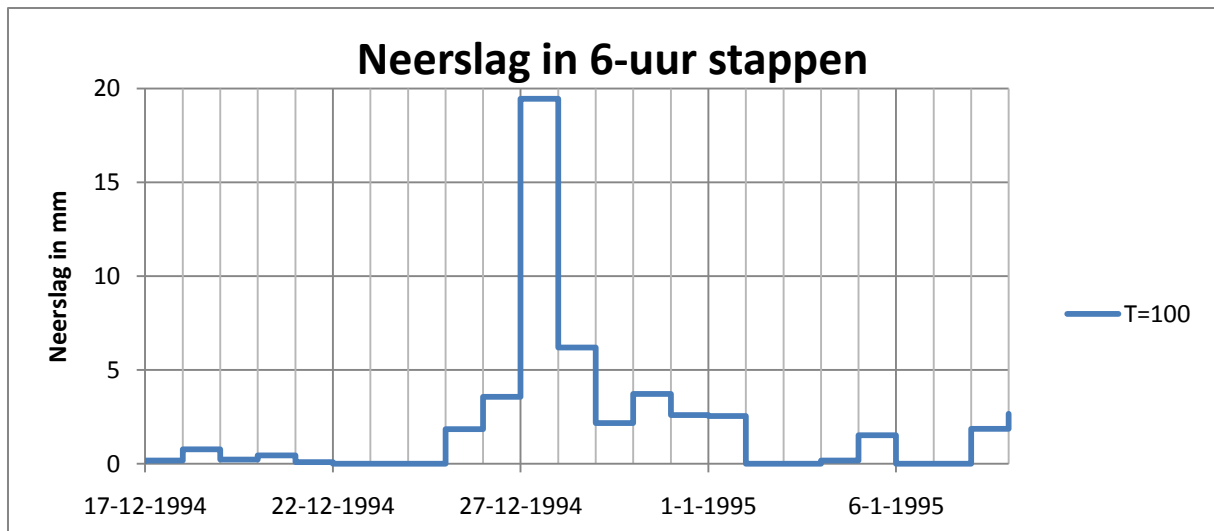
Figuur 2-10: Vormen van de modelbuien (Bron: Databank Waterschap De Dommel, dec 2010).

Conclusie

Een neerslaggebeurtenis behorende bij een herhalingstijd moet representatief zijn in piek, vorm en volume. Uit de analyses blijkt dat als er naar de afvoerpiek wordt gekeken de neerslaggebeurtenis van okt-nov 1998 representatief is als $T=100$ bui. Als het volume en de vorm van de bui niet van belang zijn is dit dus een representatieve $T=100$ bui. In de meeste gevallen klopt dit, aangezien de doorlooptijd van water in het beheergebied van De Dommel ongeveer 3 dagen is. Echter. Als er ook hoge Maaswaterstanden zijn waardoor de spuisluis Crèvecoeur dichtgaat, gaan volume (en dus duur) zeker een belangrijke rol spelen. Uit een aanvullende analyse blijkt dat het op één na ergste event (maart 1998) beter representatief is als $T=100$ alleen dat de piek mogelijk iets te laag is. Daarnaast is het verschil in vorm van de buien met verschillende herhalingstijden een verstorende factor.

Nieuwe $T=100$ Bui

Naar aanleiding van bovenstaande analyses heeft Waterschap De Dommel opdracht gegeven aan adviesbureau HKV_lijn in water om representatieve standaardgolven op te stellen van gelijke vorm voor verschillende herhalingstijden (HKV_lijn in water, 2011). De standaardgolven zijn gekarakteriseerd met een piekafvoer en een golfvorm. De hoogte van de piekafvoer is bepaald op basis van de extreme waarden statistiek van gemeten piekafvoeren. De herhalingstijd van de door te rekenen afvoergolf is gelijk aan de herhalingstijd van de piekafvoer. De golfvorm is voor alle herhalingstijden gelijk en is bepaald door 'middeling' van historische afvoergolven. De golf van december 1994 is de beste representatie van een gemiddelde golfvorm. Door schaling van deze afvoergolf is voor elke gewenste herhalingstijd de afvoergolf bepaald. De schaling van de bui gebeurt alleen in de afvoerrichting en niet in de duur van de bui. Extremere buien duren gemiddeld niet langer dan minder extreme buien (HKV_lijn in water, 2011). Voor de $T=100$ situatie kan de standaardgolf teruggevoerd worden op de volgende bui:

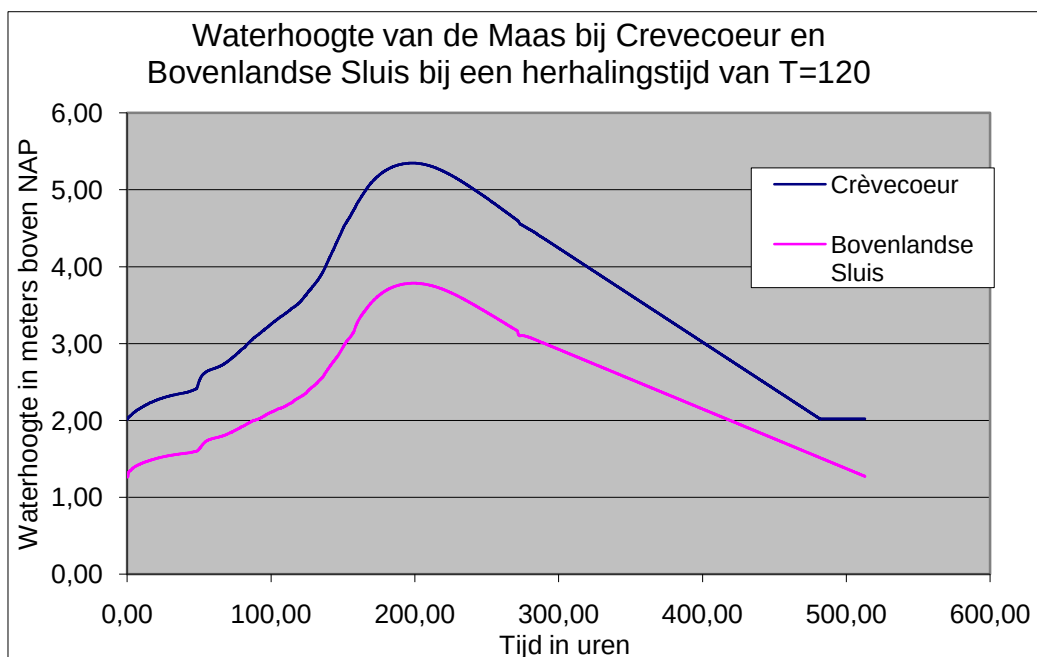


Figuur 2-11: De door HKV opgestelde, en in dit onderzoek gebruikte maatgevende neerslag die de T=100 afvoer tot gevolg heeft (Bron: Database Waterschap De Dommel, feb 2011).

2.5.3 Maasgolf

De maasgolven die worden gebruikt zijn door RWS is aangeleverd en hebben een herhalingstijd van eens in de 120 jaar. De golven zijn opgesteld voor kilometerraai 220 en 235 in de Maas, dit is ter hoogte van Crèvecœur en de Bovenlandse sluis. Deze golven duren rond de 500 uur (21 dagen) en de top ligt voor beiden na ongeveer 198 uur (8,25 dagen).

De maasgolf bij Crèvecœur wordt 103 uur na het begin van de bui ingezet. Het duurt tussen de 88 en 118 uur voordat een neerslagevent in de Ardennen een golf bij Crèvecœur oplevert. Voor de Bovenlandse sluis moet daar nog 4 uur bij opgeteld worden (RWS, 2010). Rekening houdende met de duur van de bui en de golf; betekend dit dat de Maasgolf op 31 oktober 1998 op middernacht wordt ingezet bij Crèvecœur en 4 uur later bij de Bovenlandse Sluis. Er wordt in eerste instantie uitgegaan van een gemiddelde looptijd van de golf. In vervolgonderzoeken kan de Maasgolf eerder of later ingezet worden om de robuustheid van het systeem te testen.



Figuur 2-12: De Maasgolven van T=120 van RWS.

2.5.4 Mogelijkheden en beperkingen van de aannames

Voor de modellering moet een aantal keuzes worden gemaakt. Deze keuzes hebben betrekking op de modellering van een situatie die maatgevend is voor de te onderzoeken situaties. In dit geval; een situatie die eens in de 150 jaar voorkomt in 's-Hertogenbosch met een hoog Maaspeil.

Neerslag

Neerslag kan op veel verschillende manieren gemodelleerd worden. Er kan gekozen worden uit verschillende intensiteiten, vormen van buien en ruimtelijke verdelingen van de neerslag. Er is gekozen voor een neerslag met een piek die overeenkomt met een herhalingsstijd van ééns in de 100 jaar en een gemiddelde vorm die gelijkmatig over het gehele gebied valt. Hoewel buien een zeer wisselende opbouw kunnen hebben en zowel in vorm als in intensiteit lokaal vaak sterk verschilt is het niet gewenst deze verschillen te modelleren aangezien het onderzoek zich niet richt op de mogelijke effecten van verscheidenheid in neerslag. De gekozen methode is een effectieve manier om een gemiddelde, eenvoudige T=100 neerslaggebeurtenis te modelleren. Op basis van de resultaten van een gelijkmatig verdeelde bui kunnen inschattingen gemaakt worden van de gevolgen van ongelijkmatig verdeelde buien. Voordeel is dat ook binnen het Waterschap De Dommel nu deze bui als standaard T=100 neerslagsituatie gebruikt wordt waardoor afwijkingen van verwachtingen of andere simulaties bij het waterschap niet afgedaan kunnen worden vanwege een andere buikeuze.

Maas

De gebruikte Maasgolf is een standaardgolf die opgesteld is door Rijkswaterstaat. Er moet rekening mee gehouden worden dat een lagere, langere golf tot grotere wateroverlast leiden bij 's-Hertogenbosch. De gebruikte golf is de gemiddelde golf met een herhalingsstijd van eens in de 120 jaar. Het moment waarop de Maas in de modellering ingevoerd wordt is gebaseerd op de looptijd van een bui in de Ardennen tot de golf bij 's-Hertogenbosch. Er wordt dus vanuit gegaan dat de bui die zorgt voor de golf in de Maas dezelfde is als die zorgt voor de grote neerslag in het gebied van De Dommel en de Aa. De looptijd van de Maas kan zeer verschillen per hoogwater. Er is gekozen voor de gemiddelde looptijd van historische gebeurtenissen. Als de Maas veel vroeger of veel later komt zullen de gevolgen minder groot zijn. Met een kleine vervroeging kunnen de gevolgen nog groter zijn bij 's-Hertogenbosch omdat dan de afvoerpiek van de Maas dan dichterbij de pieken van De Dommel en de Aa komen.

Klimaat-effect

Er is geen klimatologisch effect ingebracht in de modellering. Volgens het KNMI worden in alle vier de plausibele scenario's de winters gemiddeld natter en nemen ook de extreme neerslaghoeveelheden toe. Dit kan tot gevolg hebben dat in de toekomst zowel de maasgolf als de neerslag op het stroomgebied van De Dommel en de Aa groter kunnen worden bij de respectievelijk T=120 en T=100 situatie.

2.6 Beoordelingscriteria

De beoordelingscriteria zijn bepaald aan de hand van 2 criteria: Veranderingen door maatregelen op de situatie in en rond 's-Hertogenbosch is bepaald en veranderingen door maatregelen in afvoer van de verschillende rivieren (Aa, Dommel, Essche stroom, Drongelens Kanaal).

Een verslechtering in 's-Hertogenbosch is bepaald aan de hand van drie criteria. De waterstanden op drie locaties in de stad zijn bepaald voor de verschillende modelsituaties. Daarnaast is de mate van inzet van de retentiegebieden Bossche Broek noord en Bossche Broek zuid beschouwd als een indicator voor een verbetering of verslechtering van de hoogwater situatie. Als laatste zijn inundatiekaarten geanalyseerd.

Om de oorzaak van mogelijke verslechtingen in de situatie bij 's-Hertogenbosch beter te doorgronden; zijn de debieten van alle grote watergangen rond 's-Hertogenbosch in kaart gebracht. Hierdoor kan onderzocht worden of verslechtingen of verbeteringen in de situatie bij 's-Hertogenbosch gevolg zijn van verandering van de pieken in de aanvoerende rivieren en/of samenvallende van de pieken. Een uitgebreider overzicht van de locaties staat in paragraaf 2.6.2.

2.6.1 Situatiebepaling

De te verwachten mate van verbetering en verslechting van de situatie rond 's-Hertogenbosch is gebaseerd op de waterstanden in 's-Hertogenbosch, de mate van vulling van de retentiegebieden Bossche Broek Noord en Zuid en de overstromingskaarten van de omgeving van 's-Hertogenbosch.

Waterstanden 's-Hertogenbosch

Op drie punten in 's-Hertogenbosch wordt de waterhoogte (hoogte in meter boven NAP) uit het model gehaald. Ook deze waterdiepten dienen ter bepaling of de situatie veranderd. Deze punten zijn gekozen in De Dommel, de Aa en de Dieze. Op W1 t/m W3 worden de maximale waterstanden uitgelezen en bij W4 het gehele waterstandverloop. Dit aangezien de waterstanden niet veel van elkaar zullen verschillen en de waterstand bij Vughterstuw in het gebied leidend is voor het beleid. Punt W1 is het punt met de laagste kade in 's-Hertogenbosch.

NR	Omschrijving meetpunt	Sobek-ID
W1	Dommel 's-Hertogenbosch Centrum	5591
W2	Aa 's-Hertogenbosch centrum	FXCL14061
W3	Dieze 's-Hertogenbosch haven	FXCL14112
W4	Waterstandverloop Vughterstuw	

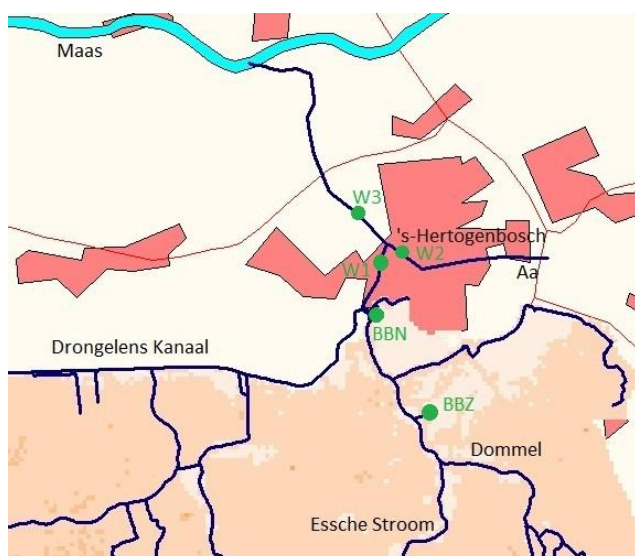
Tabel 2-2: Overzicht waterstandmeetpunten.

Bossche Broek

Bij de inlaat van Bossche Broek Noord en Bossche Broek Zuid wordt informatie uit het model gehaald om te bepalen hoeveel water er bij de verschillende situaties in deze retentiegebieden gelaten wordt. Het debiet wordt uit het model gehaald en het volume aan de hand hiervan bepaald. Een grotere inzet van Bossche Broek wordt beschouwd als een verergering van de situatie.

NR	Omschrijving Meetpunt	Sobek-ID
BBN	Bossche Broek Noord	weir_BBN
BBZ	Bossche Broek Zuid	weir_BBZ

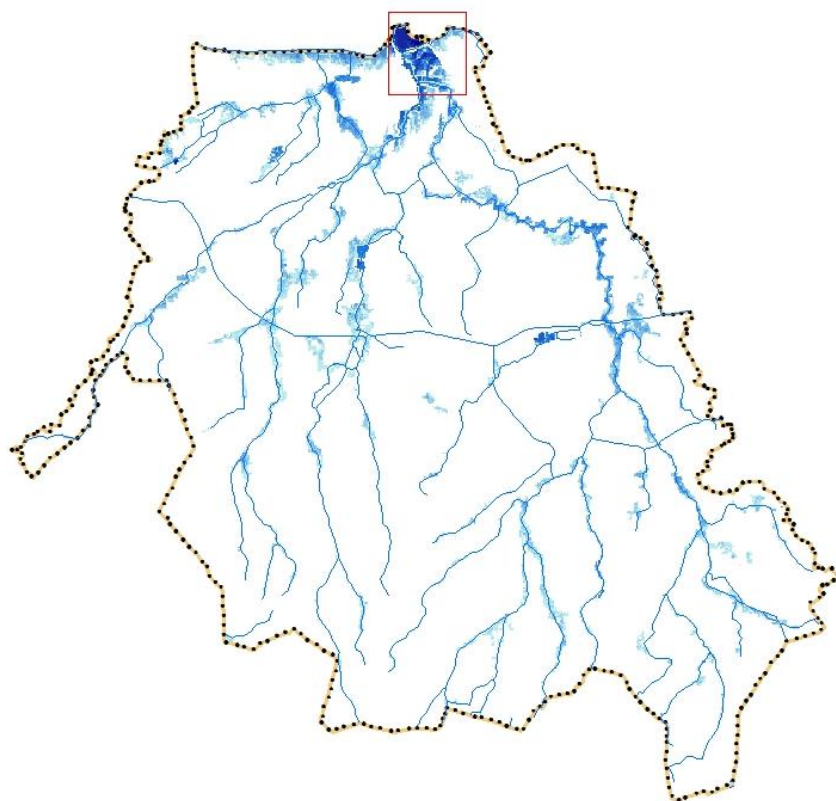
Tabel 2-3: Overzicht retentiemeetpunten.



Figuur 2-13: Locatie waterstand en retentie meetpunten.

Overstromingskaarten

Uit de modelleringen Sobek 2D worden overstromingskaarten beschouwd en vergeleken met de overstromingskaarten van de referentiesituatie. Deze kaarten geven aan welke gebieden onder water komen te staan. Zowel oppervlakte, diepte en locatie zijn van belang om te bepalen of een verergering van de situatie optreedt. Door de vergelijking van de overstromingskaarten zijn over het hele stroomgebied de gevolgen van de maatregelen voor het verschil in mate van inundaties te zien. Bij de verschillende simulaties is vastgesteld hoeveelheid water er in die situaties op het maaiveld verwacht wordt in en rond 's-Hertogenbosch vastgesteld. In figuur 2-14 is aangegeven van welk gebied het volume water op maaiveld vastgesteld is. In dit gebied bevinden zich de retentiegebieden Bossche Broek Noord en Bossche Broek Zuid. Daarnaast staat hier ook water op maaiveld waar dit geen overlast oplevert. De volumes water geven dus niet aan wat de wateropgave is, maar dienen enkel ter indicatie voor vergelijking onderling. Het verschil in de hoeveelheid inundatie in dit gebied is een indicatie voor het effect van de maatregelen.



Figuur 2-14: In het rode kader het gebied waarin het inundatievolume wordt vastgesteld.

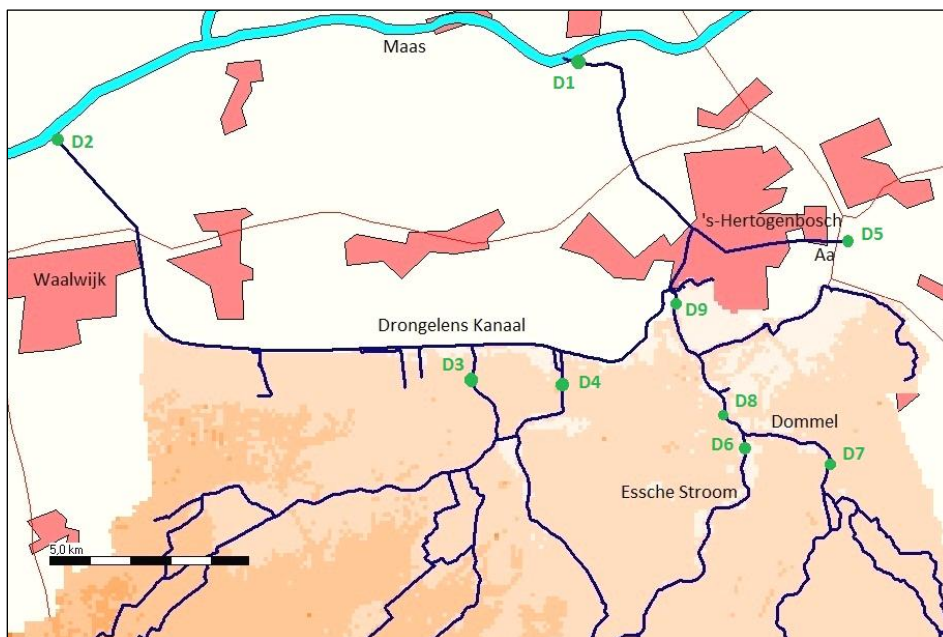
2.6.2 Debietmetingen

Om te zien wat het directe effect is van de maatregelen op de afvoer naar 's-Hertogenbosch en de gevolgen voor de samenvol van stromen; wordt het gemodelleerde debiet bepaald in alle belangrijke in en uitstromen van water rond 's-Hertogenbosch. Hiervoor zijn locaties gebruikt waar geen inundaties plaatsvinden omdat dan waterstromen langs het meetpunt gaan. Voornamelijk van belang zijn D5; het debiet van de Essche Stroom, D7; het debiet van De Dommel en D9 de combinatie van beiden bij Vughterstuw. De andere debietmeetpunten worden alleen verder beschouwd in dit onderzoek indien er onverwachte veranderingen optreden en dienen vooral ter verificatie van de waarnemingen en de vaststelling van oorzaken van het systeemgedrag.

De Dungensesloot en de zijwatergangen naar het Drongelens kanaal worden niet uitgelezen aangezien zij maximaal 1,5 m³/s afvoeren hetgeen geen significante bijdrage levert aan de problematiek rond 's-Hertogenbosch.

NR	Watergang	Omschrijving Meetpunt	Naam Meetpunt	Sobek-ID
D1	De Dieze	De uitstroom van de Dieze op de Maas bij Crèvecoeur.	Sluis Crèvecoeur	weir_Crevec oeur
D2	Het Drongelens Kanaal	De uitstroom van het Drongelens Kanaal op de Maas bij de Bovenlandse Sluis.	Bovenlandse Sluis	weir_Bovenl andscheSluis
D3	De Zandleij	De uitstroom van de Zandleij op het Drongelens Kanaal.	Stuw Cromvoirt	weir_ZL1- 15941_1597
D4	De Broekleij	De uitstroom van de Broekleij op het Drongelens Kanaal.	Lunetten	weir_ZL32- 11353_1620
D5	De Aa	De uitstroom van de Aa ná samenvoeging met de Zuid-Willemsvaart.	Oosterplas	riv_AA_1_99 76_6
D6	De Essche Stroom	De uitstroom van de Essche Stroom in De Dommel.	n.v.t.	riv_ES_1_97 81_115
D7	De Dommel	De Dommel bij Boxtel	n.v.t.	riv_DO_1_9 891_15
D8	De Dommel	De uitstroom van De Dommel ná samenvoeging met de Essche Stroom en vóór Bossche Broek.	't Vaantje	Riv_DO_1_9 919-2_11
D9	De Dommel	De uitstroom van De Dommel na BBZ en voor BBN	Vughterstuw	Do_1_9964_ 33

Tabel 2-4: Overzicht debietmeetpunten.



Figuur 2-15: Locatie debietmeetpunten.

2.6.3 Beoordeling

De meest essentiële punten om een verschil in de situatie rond 's-Hertogenbosch te bepalen zijn de waterstanden in 's-Hertogenbosch, het debiet bij Vughterstuw en de inlaat van Bossche Broek Noord en Zuid. De aanleidingen daarvoor zouden veroorzaakt moeten worden door een veranderingen in het debiet van de Essche Stroom en/of De Dommel bij Boxtel. Om de oorzaak van verandering in De Dommel bij Boxtel en de Essche Stroom te achterhalen zal op verschillende locaties bovenstrooms, zo dicht mogelijk na een ingevoerde maatregel en eventueel na confluenties bij systeemgedrag informatie over debieten uit het model geëxtraheerd worden.

3 Scenario's

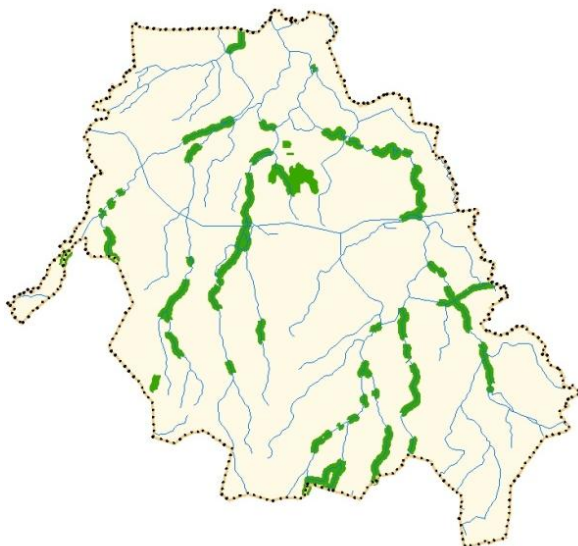
3.1 Referentiesituatie

3.1.1 Beschrijving referentiesituatie

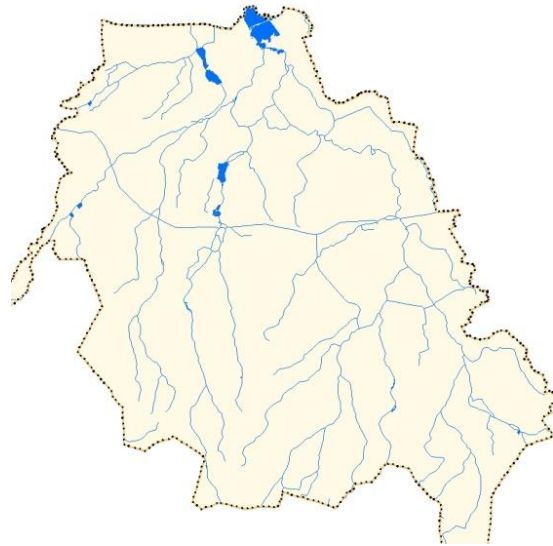
De referentiesituatie is de 0-situatie. Dat wil zeggen de huidige situatie van het systeem. Alle afgeronde projecten die zijn ingemeten zijn ingevoerd in het model. De referentiesituatie dient ter vergelijking van andere modelruns. Naar aanleiding van de resultaten van benedenstroomse retentie; is er besloten een extra referentiesituatie te modelleren met verhoogde kades in de Essche Stroom.

3.1.2 Modellerings referentiesituatie

De referentiesituatie is gemodelleerd met de laatste updates in het systeem van 9 januari 2010. Het gebiedsdekkende model is met de inzichten van toen zo goed mogelijk gemodelleerd. Aan dit model zijn de T=100 bui en de T=120 maasgolf zoals besproken in paragraaf 2.5.2 en 2.5.3 opgelegd. De al aangelegde retentiegebieden en beekhersteltrajecten zijn al ingemeten en staan al in de referentiemodellerings. Deze zijn weergegeven in de figuren 3-1 en 3-2.



Figuur 3-1: Gerealiseerde beekhersteltrajecten. (Bron: ArcGis De Dommel, januari 2011).



Figuur 3-2: Gerealiseerde gestuurde retentiegebieden. (Bron: ArcGis De Dommel, januari 2011).

3.1.3 Hypothese referentiesituatie

De verwachting is dat het systeem op orde is voor de referentiesituatie. Hierbij zullen Bossche Broek noord en zuid ingezet moeten worden. De maximale waterstand blijft in de buurt van de 4,90m boven NAP bij Vughterstuw. Normaal zou Bossche Broek langzaam ingezet worden dus waterstand op 4,90 te hoeden maar in het model wordt Bossche Broek in één keer opengezet waardoor het waterpeil licht kan zakken en later net boven de 4,90 uit kan komen.

Er wordt ook verwacht dat de afvoergolf van de Aa als eerste aankomt bij 's-Hertogenbosch met daarna met iedere keer ongeveer 1 dag ertussen de Essche Stroom, De Dommel en de Maas. Mogelijk geeft de modellering van de referentiesituatie nieuwe inzichten aangezien nog niet eerder met zo een gedetailleerd model een situatie met hoge Maasstanden gebiedsdekkend gesimuleerd is.

3.2 Beekherstel

3.2.1 Beschrijving beekherstel

Beekherstel wordt uitgevoerd om beken meer natuurlijk te maken. Dit om te komen tot een betere aquatische omgeving voor flora, fauna en de mens. Het uitvoeren van beekherstel van een genormaliseerde beek bestaat veelal uit een combinatie van ingrepen, zoals het aanpassen van de dwarsdoorsnede van de beek (veelal verondiepen), verlengen van het beektraject (herstellen van meanders) en het verwijderen van stuwen. Daarnaast zijn er ruim 40 andere maatregelen die vaak toegepast worden bij beekherstel zoals onder anderen: het aanleggen van een asymmetrisch profiel, het aanleggen van vistrappen waar stuwen niet verwijderd worden, natuurvriendelijke oevers aanleggen, stoorobjecten aanbrengen, drainage verwijderen, slibafgraving, verandering aanliggend grondgebruik, aanleg poelen, natuurlijk beheer en de herintroductie van soorten (Alterra, 2009).

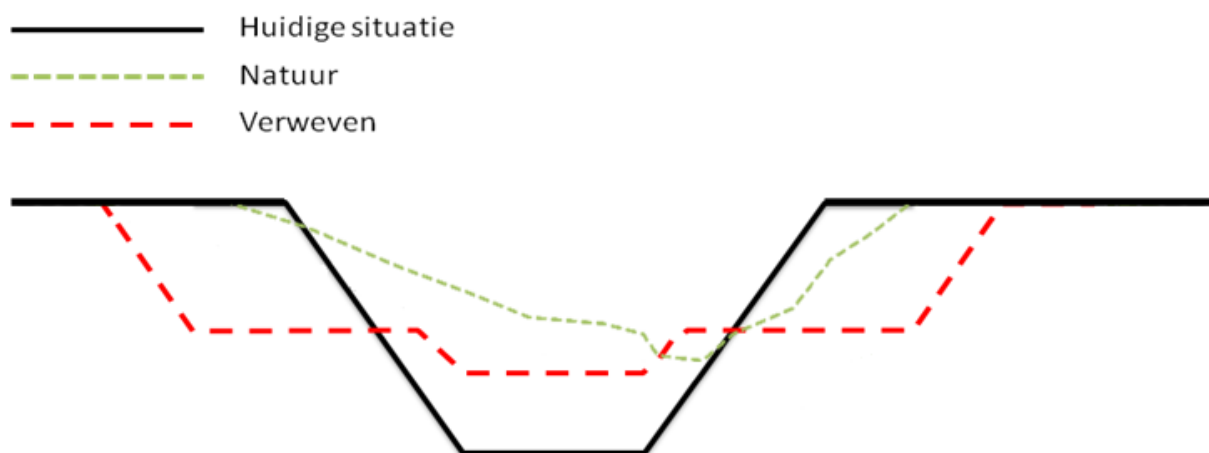
Voor de implementatie van de KRW wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten beekherstel (Waterschap de Dommel, 2010):

- ◇ Beekherstel natuur, met en zonder meandering;
- ◇ Beekherstel verweven, met en zonder meandering.

Beekherstel 'natuur' is de ecologie gerichte versie voor beken met een sterk op natuur gerichte doelstelling, waarbij mensgerichte doelen wel een rol kunnen spelen maar óf een beperkte claim op het systeem leggen óf in de afweging niet de hoogste prioriteit krijgen (Waterschap Aa en Maas, 2009).

Beekherstel 'verweven' heeft een meer half-natuurlijk karakter, waarbij de natuurdoelstellingen zijn afgestemd op mensgerichte activiteiten (voornamelijk landbouw en wonen/werken). Dit is voor beken waarbij beide doelen op een haalbaar niveau verenigbaar zijn, zonder dat één van beide het primaat heeft (Waterschap Aa en Maas, 2009).

In de praktijk hebben beiden een specifieke profielopbouw (natuurlijk profiel en tweefasen profiel) en kennen daarnaast verschillen in afmetingen (dieptes en breedtes van bepaalde zones) en verschillen in sinuositeit. De afmetingen en sinuositeit worden voornamelijk bepaald op basis van doelsoorten en huidige kenmerken van waterloop zoals het debiet (Waterschap de Dommel, 2010), daarnaast moet wateroverlast voorkomen worden.



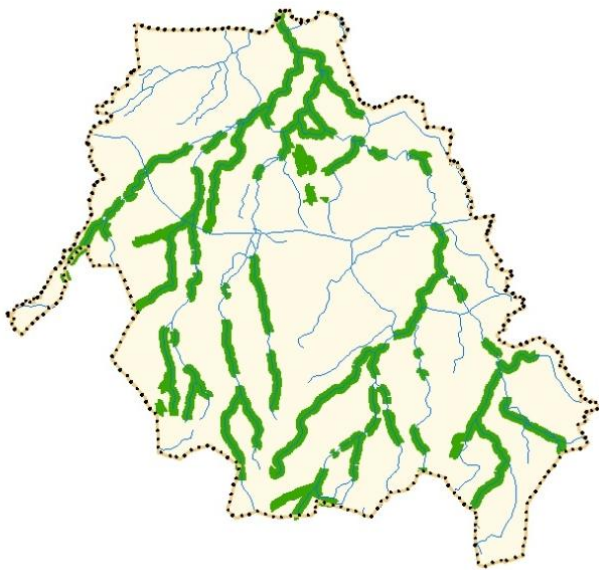
Figuur 3-3: De profieldoorsneden van de huidige situatie, natuurlijk beekherstel en verweven beekherstel.

Beekherstel in SOBEK

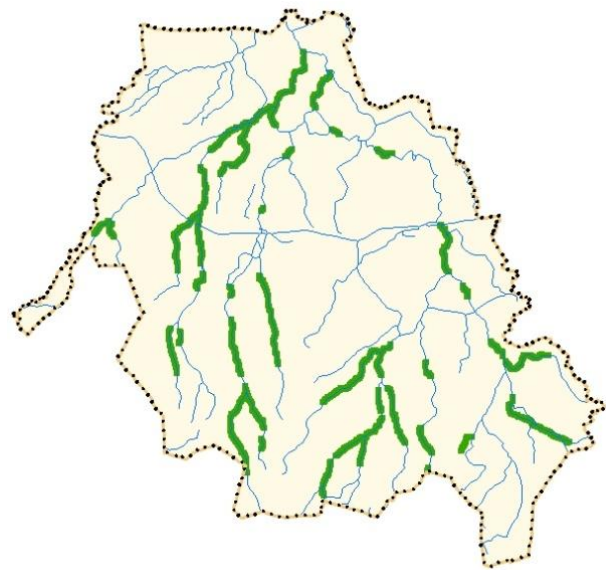
Beekherstel natuurlijk is gemodelleerd in SobekCF door de loop van de beek te veranderen (sinuositeit vergroten), de doorsneden aan te passen en de ruwheid van het bed aan te passen. Ook

de verwijdering van stuwen is gemodelleerd. De exacte invulling van deze aanpassingen is afhankelijk van de betreffende situatie en is zo goed mogelijk ingeschat door in drie stappen: Waar er al plannen zijn voor het project, zijn deze data/verwachtingen gebruikt. Waar dit niet voorhanden is, is er gemodelleerd op basis van boven/benedenstrooms gerealiseerd beekherstel. Als dit ook niet mogelijk is, is er gemodelleerd conform de KRW aannames. Veranderingen in de grondwaterstand door beekherstel worden niet meegenomen in de modellering aangezien de effecten lokaal zijn en niet van significante invloed op de afvoer. Wanneer bij hoog water de beek buiten haar oevers treedt stroomt in het 2D-grid in eerste instantie het water mee langs de beek, en bij nog meer water worden de meanders afgesneden.

Beekherstel verweven is niet aangepast gemodelleerd aangezien de uitgangssituatie is dat er voor de hydraulische situatie bij hoogwater niets veranderd; de nieuwe situatie wordt gedimensioneerd naar dezelfde afvoercapaciteit. Indien er meandering wordt toegepast is dit uiteraard wel gemodelleerd.



Figuur 3-4: Locaties van beekherstel. (Bron: ArcGIS De Dommel, januari 2011).



Figuur 3-5: Locaties van beekherstel 'natuurlijk' (Bron: ArcGIS De Dommel, januari 2011).

Sinuositeit is in het model ingebracht door het reachsegment length te verlengen. Opstuwende effecten van een langere stroombaan worden meegenomen. Energieverliezen door de bochten niet. Voor beekherstel is de ruwheidparameter (Bos en Bijkerk) hetzelfde gehouden als de uitgangssituatie. Dit betekent dat door het verkleinen van het profiel wel degelijk meer invloed is van de (wand)ruwheid. Omdat de exacte ligging van de meanders van beekherstel niet bekend is wordt deze niet expliciet in het Sobek model opgenomen. Bovendien is de exacte ligging niet van belang voor de regionale waterberging, het gaat om het mogelijk vertragende effect van een langer beektraject en de afname van de afvoercapaciteit resulterend in overstromingen. In de dwarsprofielen de waardes voor de parameters, talud, bodembreedte en de diepte van het profiel. Alle stuwen zijn in de trajecten met beekherstel verwijderd. Uitzonderingen zijn watermolens en stuwen die een belangrijke verdeling moeten regelen (Waterschap de Dommel, 2010). Opstuwung door de extra bochten bij meandering wordt niet meegenomen in de simulaties aangezien deze in het algemeen verwaarloosbaar klein zijn (Dienst Landinrichting en Beheer Landbouwgronden, 1996). Beekherstel is ook alleen bovenstrooms (ten noorden van het Wilhelminakanaal) en alleen benedenstrooms (ten zuiden van het Wilhelminakanaal) gemodelleerd.

In onderstaande tabel zijn de gegevens weergegeven van de beekherstel trajecten waarvan al een visie of een inrichtingsplan is opgesteld of die al gerealiseerd zijn maar nog niet opgenomen in de databank.

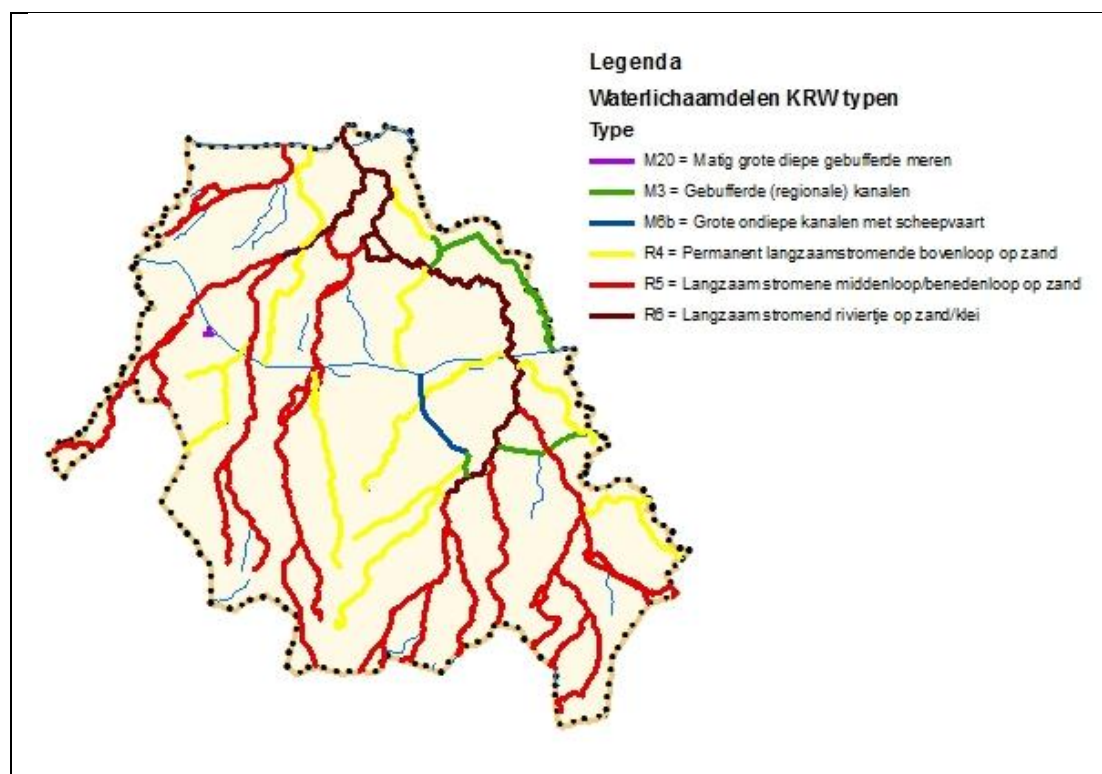
Traject	Dwarsprofiel vorm	Opmerking bronverwijzing	Sinuo-siteit	Bodem Breedte (in m)	Profiel diepte (in m)	Talud helling (1:)
Kleine Beerze	trapezium	Ontwerp/ visie Kleine Beerze	1,5	3	1	1,5
Beerze kampina	trapezium	Benedenstrooms gebied	1,5	3	1	1,5
Rovertsche Leij	trapezium	Aanlegend traject	1,2	2	1,5	1,5
Poppelse Leij	trapezium	Aanlegend traject	1,2	1,5	1,3	1,5
Reusel	trapezium	Visie Reuseldal	1,4	4	0,65	1
Raamsloop	trapezium	Bovenstrooms traject	1,2	3	1	1,5
Reusel de Hilver	trapezium	Ruilv. De Hilver	1,5	6	1	10
Spruitenstroompje	trapezium	Ruilv. De Hilver	1,2	3	1,2	1
Beerze Spoordonk	trapezium	Visie Groote Beerze	1,5	10	1,5	1,5
Tongelreep	trapezium	Inzicht specialisten	3	1,5	1,2	1,5

Tabel 3-1: De gebruikte data van geplande trajecten(Waterschap de Dommel, 2010).

De overige trajecten zijn gemodelleerd op basis van de standaard KRW aannames op basis van het Type waterloop. R4 is permanent langzaam stromende bovenloop op zand; R5 is langzaam stromende middenloop/benedenloop op zand; R6 is langzaam stromend riviertje op klei. In tabel 3-2 staan de KRW-aannames voor de typen beekherstel in het gebied.

Beekherstel parameter	Sinuositeit	Profielbreedte (in m)	Profiel diepte (in m)	Talud helling (1:)
R4 natuur	1,2	3	0,7	1,5
R5 natuur	1,5	10	0,7	1,5
R6 natuur	1,5	25	1,2	1,5

Tabel 3-2: Beekherstel parameters op basis van de KRW – typen (Waterschap De Dommel, 2010).



Figuur 3-6: Overzicht van de KRW-typen in het beheergebied van De Dommel (Bron: ArcGis De Dommel, januari 2011).

3.2.2 Hypothese

Door de ingrepen bij natuurlijk beekherstel neemt de afvoercapaciteit van de beek bij hoogwater af. Een verhoging van de sinuositeit leidt tot een lager verhang (i_b) en een kleiner profiel (verondieping en verbreding) heeft een kleinere natte doorsnede (R) waardoor de stroomsnelheid (u) afneemt ($u = C\sqrt{Ri_b}$). Daarnaast leidt een kleine doorsnede ertoe dat de beek vanaf een lagere afvoer zal inunderen. Een deel van het inunderende water zal buiten het beekprofiel meestromen en meer weerstand ondervinden waardoor de afvoerpiek vertraagd wordt. Naast dit effect speelt ook het bergingseffect mee dat veroorzaakt wordt doordat water tijdelijk wordt geborgen op het maaiveld (Waterschap Aa en Maas, 2010). De onregelmatigheid van het oppervlak speelt hierbij een belangrijke rol. Lokale depressies en onregelmatigheden zorgen ervoor dat een deel van het water dat inundeert niet of vertraagd tot afstroming komt met als gevolg dat de afvoerpiek wordt gereduceerd en/of vertraagd (Waterschap de Dommel, 2006).

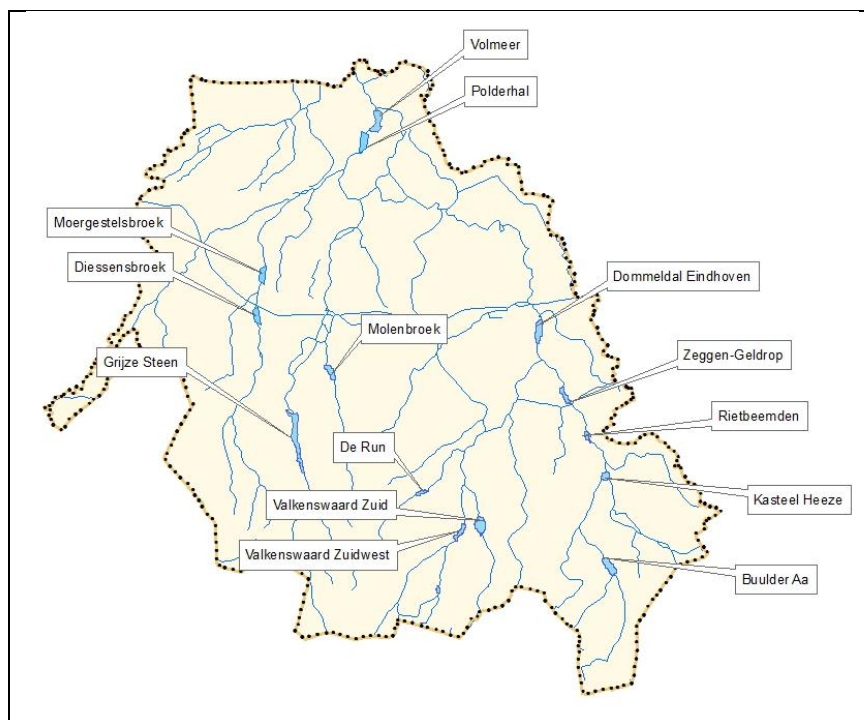
Er is geen onderzoek bekend dat de verandering in snelheid van de afvoerpiek bij extreem hoogwater na beekherstel beschrijft. Hoewel beekherstel over het algemeen vertragend en piekverlagend werkt, bestaat binnen waterschap De Dommel de vraag of bij zeer extreem hoogwater de piek versneld wordt doordat het beekdal al geïnundeerd is voordat de piek komt, en de piek zich versneld kan voortplanten ('surfen') over het gladde (geïnundeerde) oppervlak. SOBEK 2Dflow maakt gebruik van het "conservative 2D advection scheme" waarmee de voortplantingssnelheid van (vloed)golven over oorspronkelijk droge of natte bedding goed te berekenen zijn. Hierdoor zal in de resultaten dus ook piekversnelling te zien zijn indien dit 'surf-effect' zich voordoet.

De hypothesen gaan allen uit van het perspectief van één waterloop. Wordt echter het watersysteem bekeken dan kunnen er geheel andere effecten optreden doordat piekafvoeren ten opzichte van de huidige situatie eerder, later of tegelijkertijd optreden. Het is dan op voorhand niet eenduidig aan te geven of beekherstel tot vertraging of versnelling van piekafvoeren leidt. Bij een verweven, niet meanderende beek zal er in hoogwatersituaties geen verschil zijn met de huidige situatie aangezien de verweven beek wordt gedimensioneerd naar dezelfde capaciteit als de huidige situatie (Waterschap De Dommel, 2010).

3.3 Retentie

3.3.1 Beschrijving retentie

Retentie is het tijdelijk opslaan van water bij neerslagpieken in en naast primaire waterlopen. Retentie is het meest effectief vlak voor het te beschermen gebied. De effectiviteit van retentie is afhankelijk van de locatie van het retentiegebied, het moment van inzetten, het maximaal te bergen volume, en het inlaatdebiet. Bij gestuurde berging is het moment van inzetten te reguleren en daardoor is het vaak effectiever dan niet-gestuurde berging.



Figuur 3-7: Locatie van de waterbergingsgebieden. (Bron: ArcGis De Dommel, januari 2011).

Er zijn 14 gestuurde retentiegebieden gepland, deze zijn aangegeven in figuur 3-7. Bij al deze retentiegebieden behalve Volmeer en Polderhal komt een knijpende constructie in de stroom en een eventuele kade om te voorkomen dat water om het kunstwerk heen stroomt. Bij Polderhal en Volmeer is het retentiegebied een laaggelegen stuk land langs de hoofdstroom dat inundeert doordat water over een vaste drempel in de kade in het inundatiegebied stroomt. Onderstaand een tabel met de verwachte hoeveelheid te bergen volume en het primaire doel van de verschillende retentiegebieden. Van een aantal retentiegebieden is het te bergen volume onbekend. Dit komt doordat ten doel is gesteld om met de beschikbare hoeveelheid land maximale retentie te bereiken. Het volume is hierdoor nooit bepaald.

Retentiegebied	Volume	Doel
Volmeer	300.000	Opheffen negatieve effecten van vertraging door Beekherstel
Polderhal	700.000	Opheffen negatieve effecten van vertraging door Beekherstel
Moergestelsbroek	onbekend	Beschermen Moergestel tegen inundatie
Diessensbroek	onbekend	Beschermen waardevol natuurgebied tegen inundatie
Grijze Steen	onbekend	Beschermen waardevol natuurgebied tegen inundatie
Molenbroek	onbekend	Beschermen waardevol natuurgebied tegen inundatie
De Run	150.000-250.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Eindhoven te beschermen
Valkenswaard Zuidwest	260.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Eindhoven te beschermen
Valkenswaard Zuid	235.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Eindhoven te beschermen
Bulder Aa	200.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Eindhoven te beschermen
Kasteel Heeze & Rietbeemden	900.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Eindhoven te beschermen
Zeggen-Geldrop	100.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Eindhoven te beschermen
Dommeldal Eindhoven	500.000 m ³	Piekdebiet verlagen om Son en Breugel te beschermen

Tabel 3-3: Gepland bergend volume en doel van de retentiegebieden.

Retentie in SOBEK

Retentie is gemodelleerd in de SobekCF schematisatie. Er is uitgegaan van waterbergingsgebieden op basis van de gebiedsvisies en ontwerpen zoals beschreven in Schematisatie gestuurde bergingsgebieden, Waterschap De Dommel dd. 17-12-2010.

Om te onderzoeken of retentie alleen een lokaal effect of is retentie ook gesimuleerd met alleen de retentie gebieden ten zuiden van het Wilhelminakanaal (retentie bovenstrooms) en retentie alleen ten zuiden van het Wilhelminakanaal (retentie benedenstrooms).

3.3.2 Hypothese

De verwachting is dat retentie een groot lokaal piekverlagend effect heeft, en dat naarmate verder wat uitdempt naarmate de afstand tot 's-Hertogenbosch groter is. Vertraging wordt niet verwacht, maar doordat de piek in het debiet wordt vastgehouden kan een nieuwe (aanzienlijk lagere) piek ontstaan op een ander tijdstip.

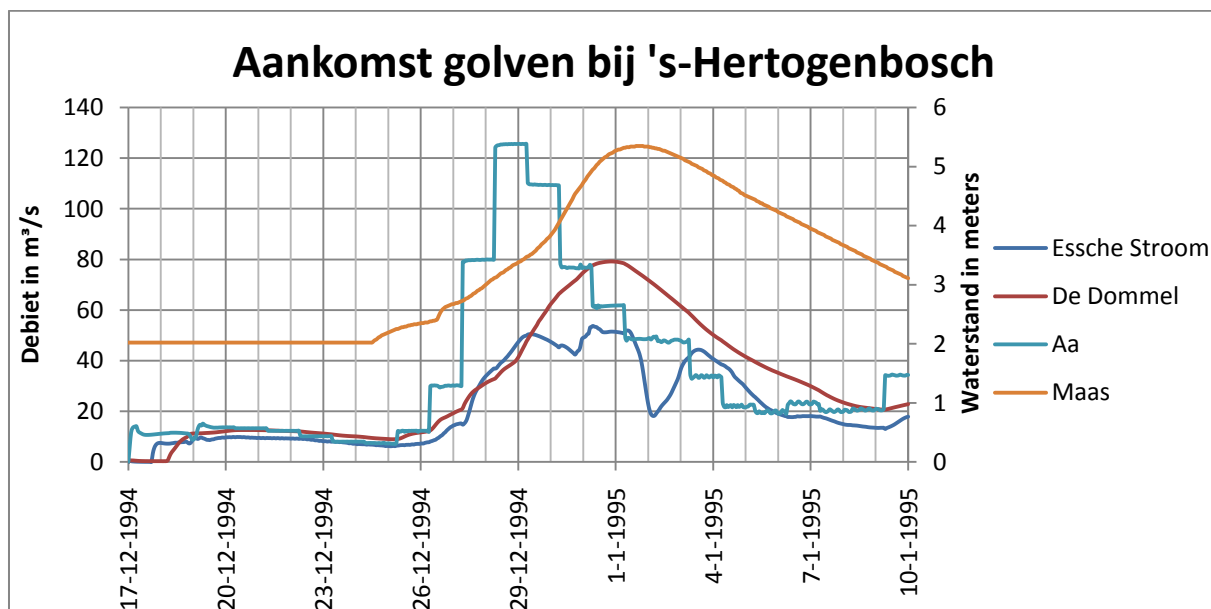
Er wordt verwacht dat de retentie bovenstrooms geen effect meer zal hebben bij 's-Hertogenbosch. Door de piekverlagingen door retentie zullen lokale inundaties verminderen. Doordat de problemen bij 's-Hertogenbosch niet ontstaan door piekdebieten maar door stremming van de afvoer op de Maas wordt verwacht dat alleen retentiegebieden in de directe omgeving van 's-Hertogenbosch effect hebben op de waterstanden in 's-Hertogenbosch.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk staan de belangrijke algemene resultaten beschreven die leiden tot de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek naar de verandering van de situatie rond 's-Hertogenbosch. In de referentiesituatie wordt zeer bondig de situatie beschreven. Bij retentie en beekherstel wordt in de eerste paragraaf beschreven wat het totale effect is van de desbetreffende maatregel op 's-Hertogenbosch. Vanuit deze situatie wordt nagegaan welk deel van de verschillen vanuit De Dommel komt en welk deel vanuit de Essche Stroom. Uiteindelijk wordt tot op de specifieke ingreep nagegaan wat de oorzaak is van de gevonden effecten bij 's-Hertogenbosch. Hierna wordt ingegaan wordt op de effecten van het doorvoeren van de maatregel alleen bovenstrooms en alleen benedenstrooms ingegaan. In bijlage 5 staat een uitgebreide analyse van de vorm van de afvoerkrommen en de oorzaken hiervan. In bijlage 6 staan de inundatiekaarten van alle gesimuleerde situaties.

4.1 Referentiesituatie

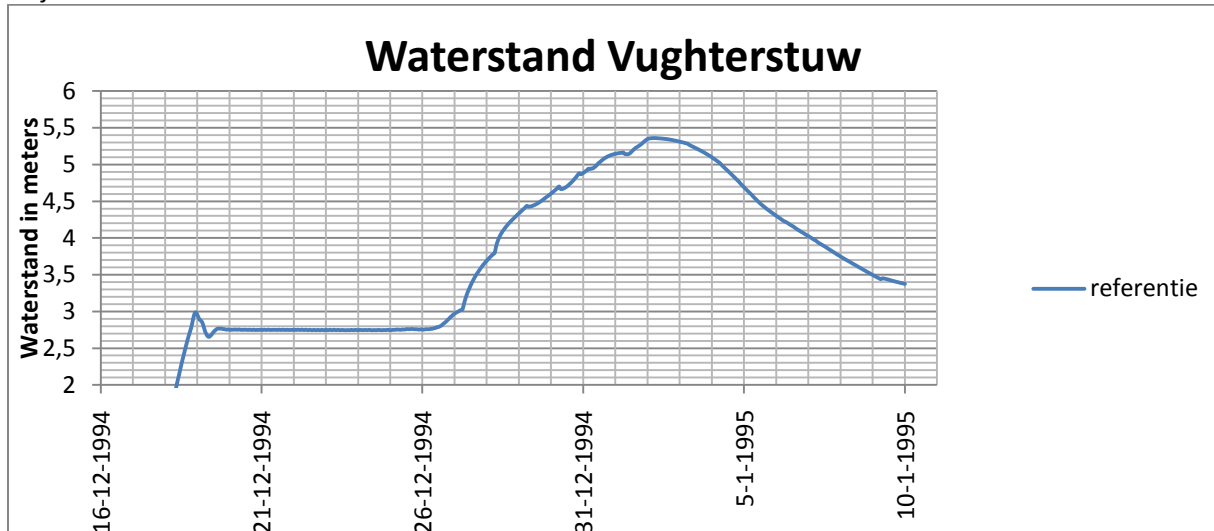
In de referentiesituatie blijkt dat de pieken van de Essche Stroom, Dommel en Maas niet (zoals verwacht) een dag na elkaar liggen, maar nagenoeg tegelijk vallen. Doordat de Aa op het moment van lokale bovenstroomse afvoer op het primaire systeem in het model direct bij Oosterplas op het systeem wordt gezet, komt de Aa in het model eerder dan in de realiteit en is de afvoer hoger dan in de realiteit. De looptijd van de Aa is dus niet in het model meegenomen. Er werd verwacht dat de piek van de Aa als eerste aankomt bij 's-Hertogenbosch, ongeveer 24 uur later de piek van de Essche Stroom en weer 24 uur later de piek van De Dommel. In de modellering komt de piek van de Aa drie dagen voor de piek van De Dommel. De piek van de Essche Stroom komt ongeveer één dag eerder dan de piek van De Dommel, maar de afvoer van de Essche Stroom blijft daarna 28 uur ongeveer even hoog (binnen 95% van de piekafvoer).



Figuur 4-1: De aankomst van de pieken bij 's-Hertogenbosch, met de Maas op de rechter as (waterstand). Voor de verklaring van de onverwachte vormen van het debiet van de Aa en de Essche Stroom wordt verwezen naar bijlage 5.

De waterstanden benedenstrooms zijn het hoogst enkele dagen na de piek in het debiet, de waterstanden zijn het hoogst vlak ná dat Crèvecoeur weer open gaat. De waterstand is niet zozeer afhankelijk van de hoogte van de piek in debiet alswel van de hoeveelheid water die aankomt en niet door het Drongelens kanaal kan worden afgevoerd als Crèvecoeur dichtgaat, dichtzit en tot enkele uren na opening. De waterstanden bovenstrooms zijn zoals verwacht maximaal bij het piekdebiet.

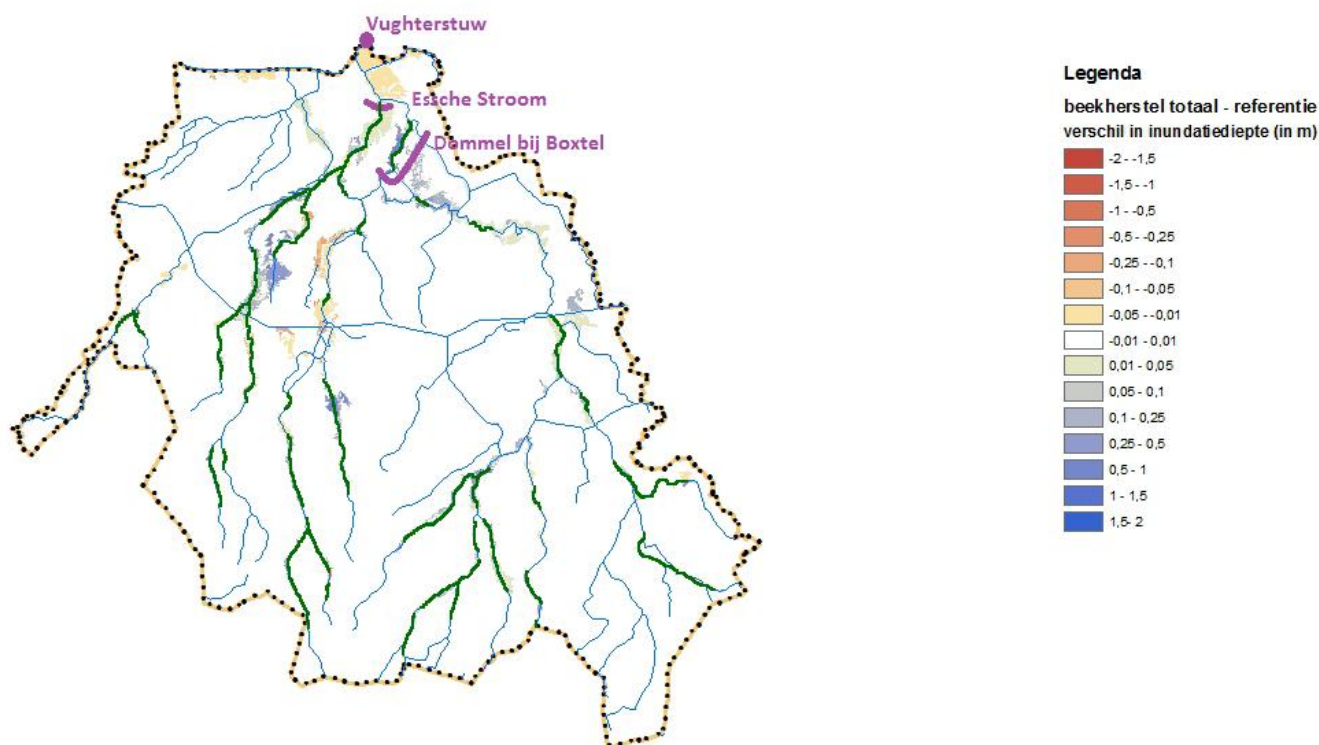
Hoewel Bossche Broek Noord en Zuid beiden volledig ingezet worden, reikt de maximale waterstand bij Vugterstuw tot 5,34 meter boven NAP, dat is veel hoger dan de verwachte maximale waterstand van 4,90 meter. Dit komt onder andere doordat benedenstroomse gebeurtenissen (zoals opstuwing door het sluiten van Crèvecoeur) in het model geen effect kunnen hebben op de afvoer van de Aa; de Aa is niet dynamisch gemodelleerd. Ook worden er geen inundaties in het stroomgebied van de Aa gesimuleerd. Het inundatievolume in en rond 's-Hertogenbosch is 127,2 miljoen m³.



Figuur 4-2: De waterstand bij Vugterstuw.

4.2 Beekherstel

Onderstaande kaart is de verschilkaart in maximum inundatiediepte door beekherstel. Dit is de vergering maximum waterdiepte door de aanleg van retentiegebieden. Blauw betekend dat op de locatie meer water staat in de situatie met retentie, rood betekend dat er minder water staat. Op de kaart is te zien dat beekherstel ertoe leid dat de inundatiediepte op bepaalde plaatsen toeneemt en op andere plaatsen afneemt. Deze kaart functioneert verder ter oriëntatie tijdens het lezen van deze paragraaf.

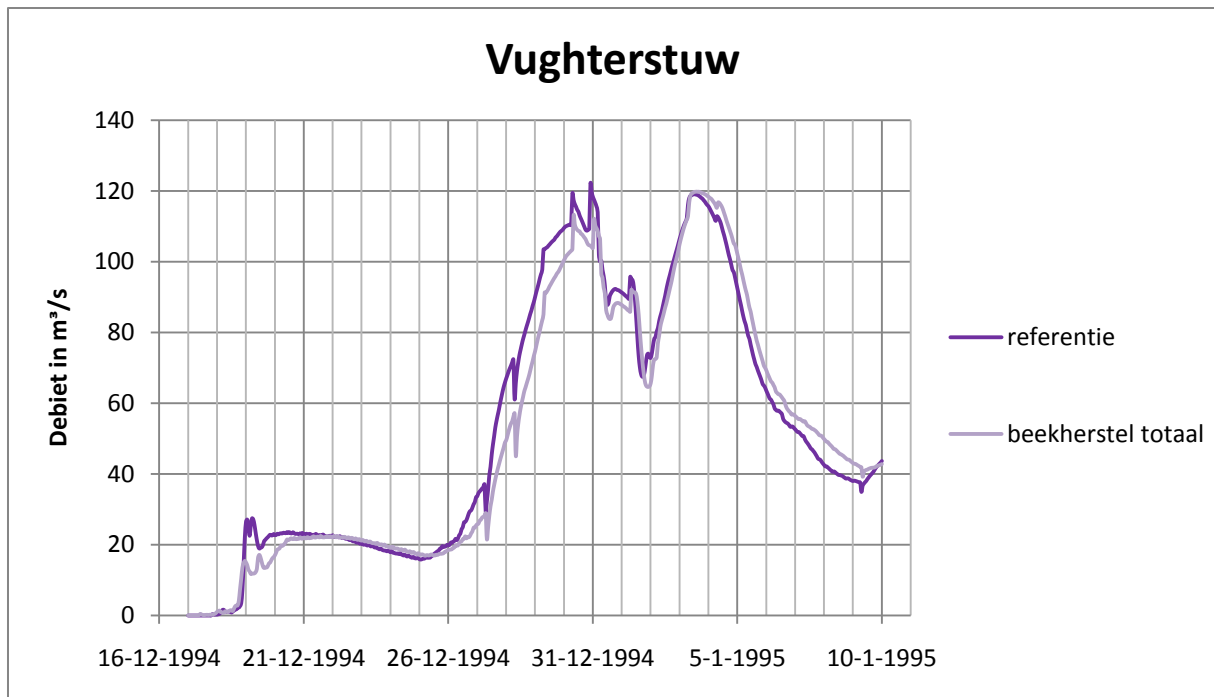


Figuur 4-3: De inundatieverschillenkaart met paars de primaire punten waar de debieten uit het Sobekmodel gehaald zijn, groen de beekhersteltrajecten en van rood naar blauw het verschil in inundatiediepte.

Het realiseren van beekherstel in het gehele beheergebied van WSDD leidt tot een beperkte gesimuleerde waterstandverlaging van gemiddeld 1 cm in 's-Hertogenbosch. In figuur 4-4 is duidelijk te zien dat het aanleggen van de retentiegebieden bij Vugterstuw een duidelijke verlaging van het piekdebiet van ongeveer 10 m³/s, maar ook dat de tweede grote piek nadat Crèvecoeur weer opent groter is. Door enkele onjuistheden in de schematisatie in het stroomgebied van de Essche Stroom, moet echter niet te veel waarde gehecht worden aan de uitkomsten van de Essche Stroom en Vugterstuw. Zoals bij nadere beschouwing in deze paragraaf zal blijken; is het effect van beekherstel miniem.

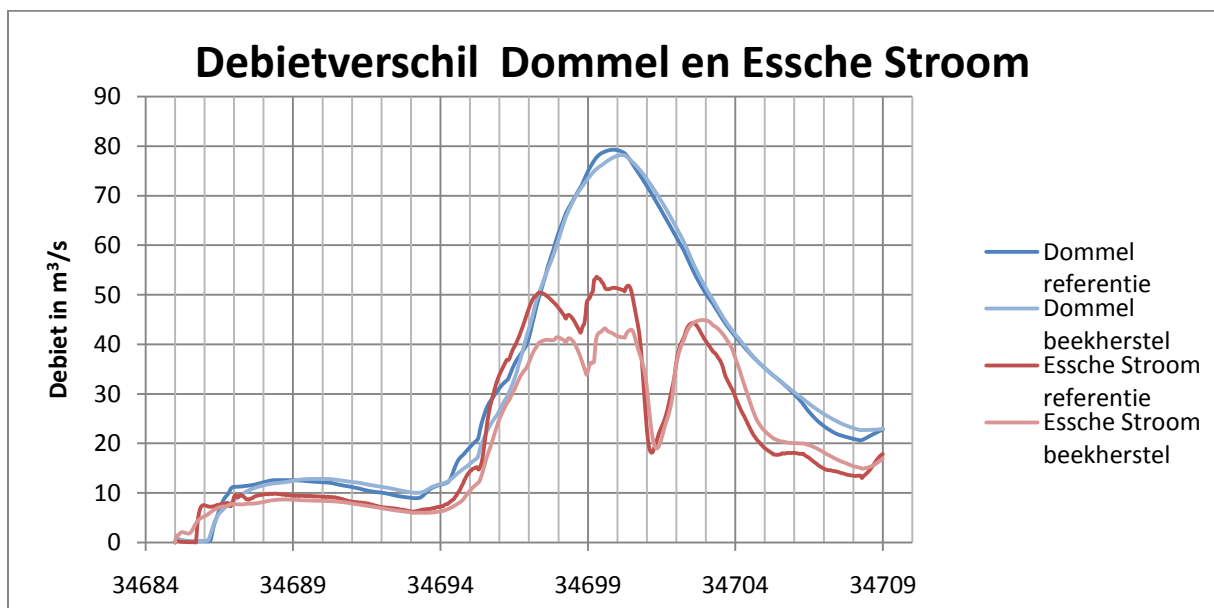
	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand	Inundatievolume
's-Hertogenbosch	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	127,6 miljoen m ³
Essche Stroom	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.
Dommel	1 m ³ /s	0-3 uur		n.v.t.

Tabel 4-1: Overzicht van verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch en de aanvoerende takken Essche Stroom en Dommel (bij Boxtel). De waarden voor de 's-Hertogenbosch en de Essche Stroom zijn niet van toepassing door een onjuiste schematisatie.



Figuur 4-4: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw, met een daling van het debiet tijdens en in de aanloop naar de eerste piek, en een lichte verhoging en vertraging na de tweede piek.

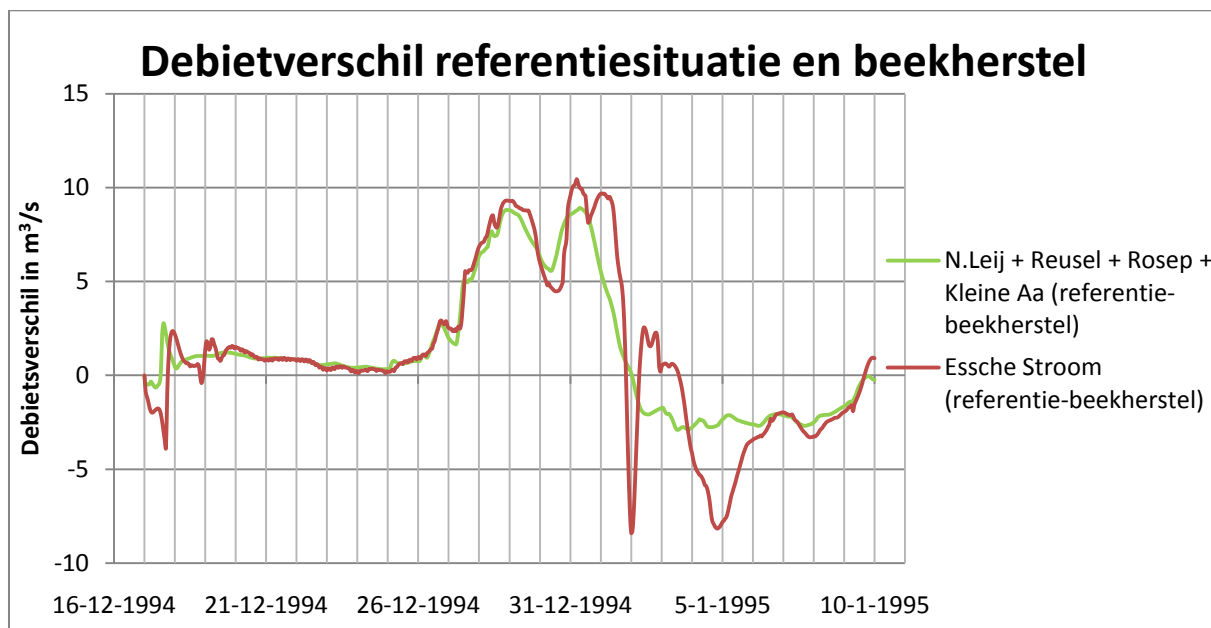
De Dommel bij Vughterstuw wordt gevoed door de Essche Stroom en De Dommel bij Boxtel. In figuur 4-5 is te zien dat de totale verlaging en vertraging bij Vughterstuw nauwelijks veroorzaakt wordt door veranderingen in De Dommel maar vooral door veranderingen in de Essche Stroom.



Figuur 4-5: Het veranderde debiet door retentie van De Dommel (van donker naar lichtblauw) en van de Essche Stroom (van rood naar lichtrood). Het debiet van De Dommel is licht verlaagd en vertraagd, dat van de Essche Stroom is sterk verlaagd en vertraagd.

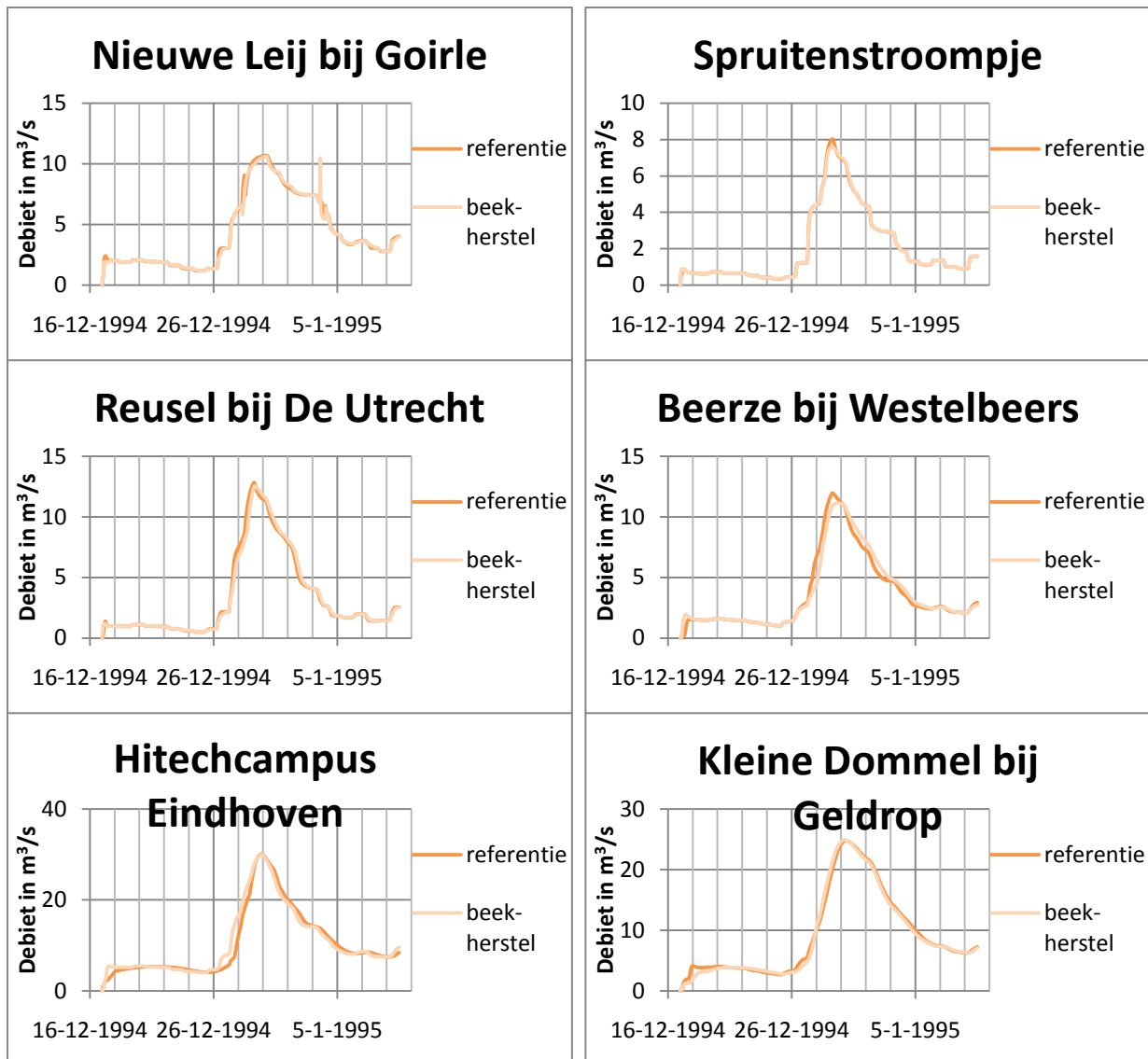
De afvoer van de Essche Stroom neemt met $9 \text{ m}^3/\text{s}$ af tijdens de eerste pieken. Het water wordt vastgehouden tot nadat Crèvecoeur opent. Hierna neemt het debiet toe. Tijdens de eerste pieken is er een vertraging van ongeveer 5 uur. In het stroomgebied van de Essche Stroom liggen veel beekhersteltrajecten en over de hele lengte van oorsprong (Grote Beerze), middenloop (Reusel) en uitmonding (Essche Stroom). Opvallend is dat het overgrote gedeelte van de debietverlaging al vóór de Essche Stroom bewerkstelligd is. In figuur 4-6 is te zien dat het grootste deel van de totale

debietafname door beekherstel al is gerealiseerd voordat het water in de Essche Stroom komt; de grotere verschillen vanaf 31 december komen doordat de sluiting van Crèvecœur wel invloed heeft op de afvoer van de Essche Stroom maar niet op de aanvoer van de Essche Stroom.



Figuur 4-6: Het verschil in debiet is al gemaakt vóór de Essche Stroom.

Op de meeste trajecten is zelfs direct na de ingreep nauwelijks verschil te zien in de afvoer. Het overgrote merendeel van de verschillen in de Essche Stroom door beekherstel zijn terug te voeren tot twee trajecten. In de Kleine Beerze is bij de schematisatie van beekherstel een stuw verkeerd geplaatst ter hoogte van Molenbroek. Dit is een stuw die bij beekherstel in gebruik blijft maar bij het opbouwen van de schematisatie een verkeerde locatie toegewezen heeft gekregen. Het verkeerd plaatsen van de stuw heeft een enorme opstuwing (retentie) teweegbrengt. Na vergelijking van de debieten voor en na stuw en de debieten van de andere aanvoerende beken naar de Essche Stroom, bleek dat deze fout in de schematisatie heeft geleid tot ongeveer de helft van de verschillen bij de uitmonding van de Essche Stroom. De andere helft van het verschil is veroorzaakt op het traject Diessen-Moergestel in de Reusel. Hier is beekherstel in de Reusel gemodelleerd waarbij de taluds een helling hebben van 10:1. Omdat dit talud aanzienlijk flauwer is dan in de referentiesituatie treden hier verschillen op door de schematisatie. Het 2D grid ligt over het waterlopinggrid. Waar de waterhoogte boven de dimensionering van het waterlopinggrid uitstijgt wordt de ruimte dubbel gerekend. Zowel in het waterlopinggrid als in het 2D grid. Op grote delen van het traject wordt de waterstand tussen de anderhalf en twee meter terwijl het profiel tot een hoogte van 0,70 meter tot één meter gaat, hierdoor wordt een virtuele extra berging van ongeveer 60.000 tot 80.000 m³ in het model gebracht. Dit houdt in dat de verschillen ook hier zijn toe te schrijven aan een onjuiste modellering, en niet aan effecten van beekherstel. Op de locaties waar geen onjuiste schematisatie is, blijkt dat beekherstel niet tot nauwelijks effect heeft. In figuur 4-7 is er een aantal gevisualiseerd. Alleen bij de Hitechcampus Eindhoven en Westelbeers is een kleine vertraging zichtbaar. Bij Westelbeers en het Spruitenstroompje een kleine piekafvlakking. Er is geen specifieke reden gevonden waarom op sommige trajecten het debiet licht vertraagt, op andere trajecten piekafvlakking plaatsvindt en op sommige trajecten geen verschil waar te nemen valt. Bij de Hitechcampus in Eindhoven is een geringe versnelling van het debiet waargenomen, dit komt doordat juist voor de Hitechcampus het doorstroomprofiel van de Bovendommel vergroot wordt met ongeveer 10% door beekherstel.



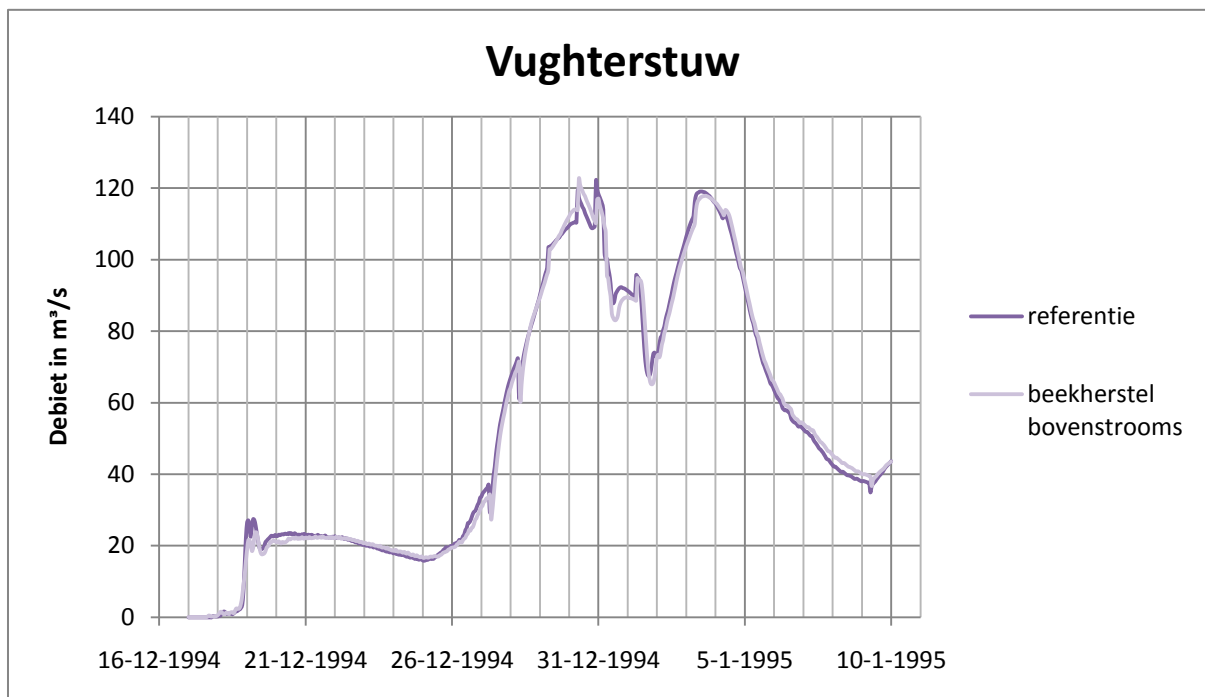
Figuur 4-7: Na de meeste beekhersteltrajecten is nauwelijks verschil te merken met de referentiesituatie.

4.3 Beekherstel bovenstrooms

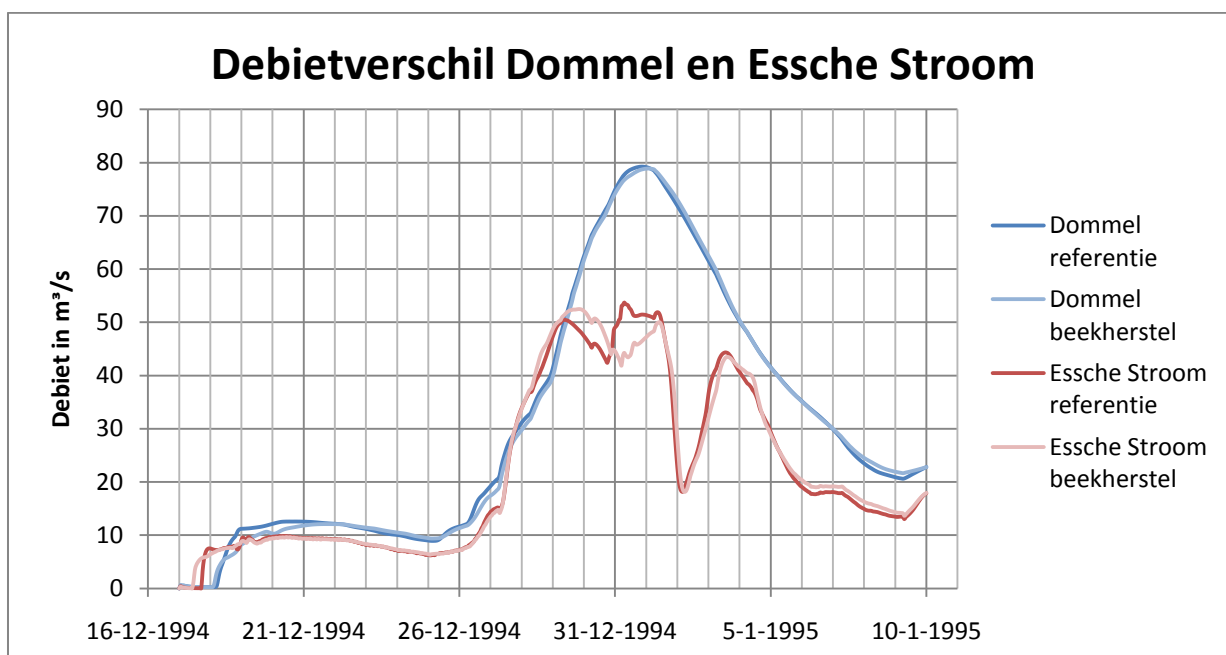
	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand	Inundatievolume
's-Hertogenbosch	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	127,1 miljoen m ³
Essche Stroom	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.
Dommel	1 m ³ /s	0-2 uur		n.v.t.

Tabel 4-2: De waarden voor de 's-Hertogenbosch en de Essche Stroom zijn niet van toepassing door een onjuiste schematisatie.

In figuur 4-8 is te zien dat beekherstel bovenstrooms een verhoging in de eerste piek en verlaging in de volgende pieken bewerkstelligd. In figuur 4-9 is te zien dat de oorzaak hiervan in het stroomgebied van de Essche Stroom ligt. In deze simulatie is wederom in de schematisatie van de Reusel ruimte dubbel gerekend, echter nu over ongeveer de helft van de lengte.



Figuur 4-8: Verandering van het debiet door beekherstel bovenstrooms.



Figuur 4-9: Verandering van het debiet door beekherstel bovenstrooms.

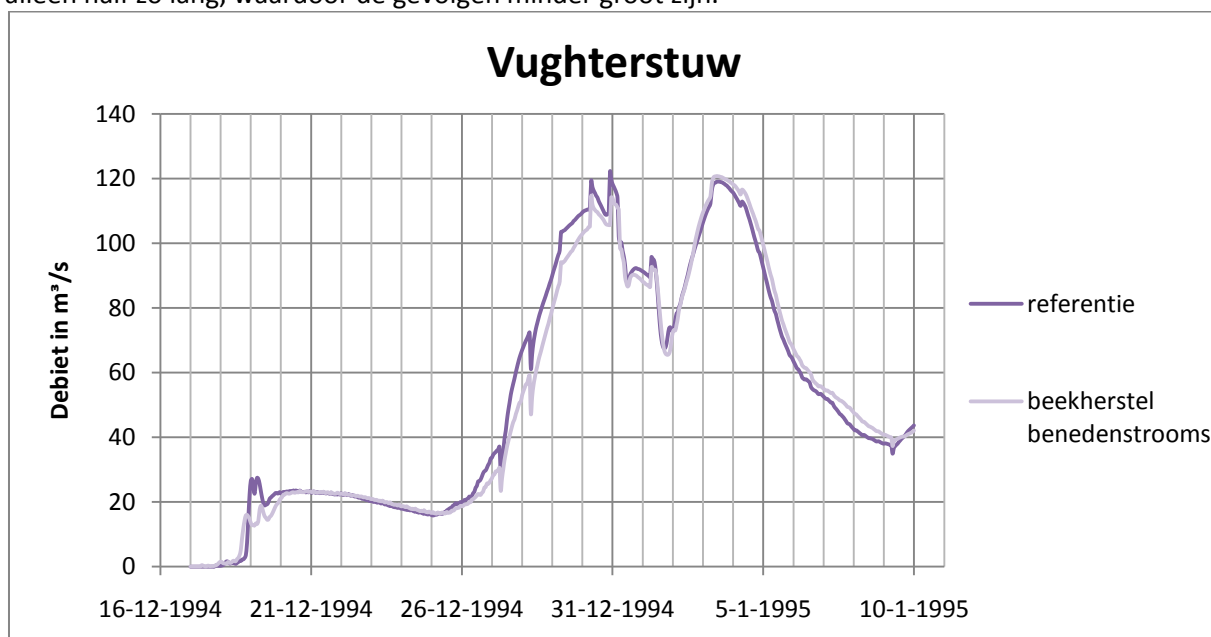
In De Dommel is een vergelijkbare situatie waarneembaar als in de situatie waarin voor het hele gebied beekherstel gesimuleerd is.; dit is een lichte afvlakking aan het begin van de piek (ongeveer 1 m³/s) en een lichte vertraging in de aanloop en nasleep van 0 tot 2 uur. In het gebied van de Essche Stroom levert beekherstel bovenstrooms initieel een toename op van het debiet en later een afname. Dit effect is terug te voeren aan het ontbreken van twee stuwen in het benedenstroomse gedeelte van de Reusel bij de schematisatie van beekherstel benedenstrooms. In de afzonderlijke locaties is vaak geen verschil te zien, maar op sommige locaties een lichte piekafvlakking en/of een lichte vertraging van enkele uren.

4.4 Beekherstel benedenstrooms

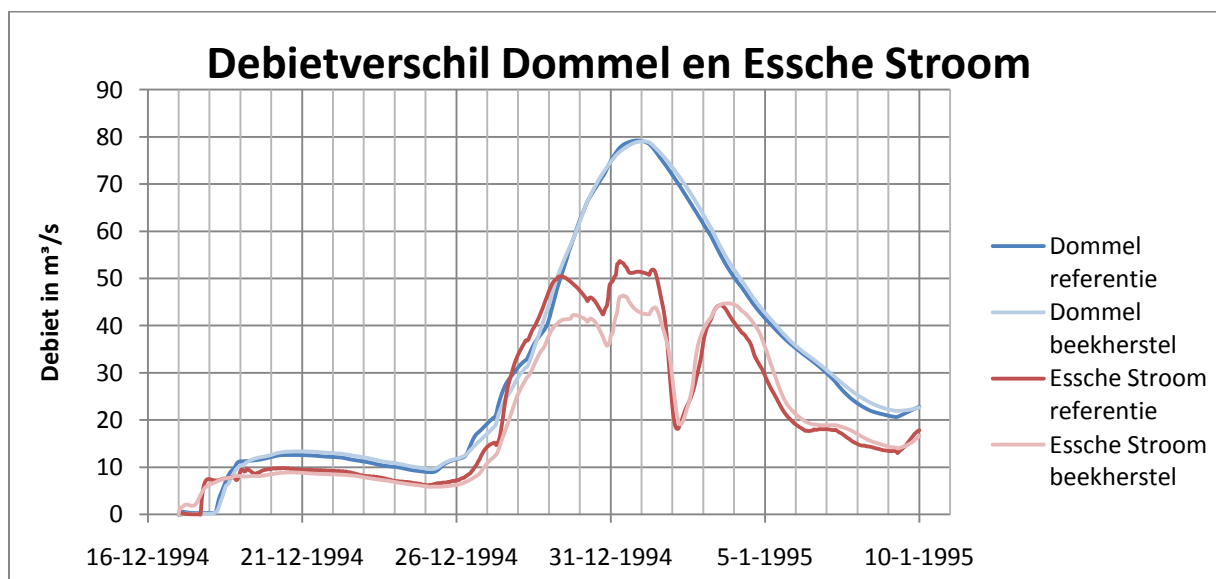
	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand
's-Hertogenbosch	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Essche Stroom	n.v.t.	n.v.t.	
Dommel	0 m ³ /s	0-2 uur	

Tabel 4-3: De waarden voor de 's-Hertogenbosch en de Essche Stroom zijn niet van toepassing door een onjuiste schematisatie.

Bij de simulatie waarbij beekherstel alleen benedenstrooms is toegepast is, zijn de zelfde fouten in de schematisatie als bij volledig beekherstel. Het traject in de Reusel waar dubbele berging plaatsvindt is alleen half zo lang, waardoor de gevolgen minder groot zijn.



Figuur 4-10: Verandering van het debiet door beekherstel benedenstrooms.



Figuur 4-11: Verandering van het debiet door beekherstel benedenstrooms.

4.5 Retentie

Onderstaande kaart is de verschilkaart in maximum inundatiediepte. Dit is de verergering maximum waterdiepte door de aanleg van retentiegebieden. Blauw betekend dat op de locatie meer water staat in de situatie met retentie, rood betekend dat er minder water staat. Op de kaart is goed te zien dat sommige retentiegebieden niet goed werken, aangezien in een retentiegebied de inundatiediepte hoger zou moeten zijn (dus blauwer op de kaart). Dit is niet overal het geval; Volmeer, Polderhal en Zeggen-Geldrop zijn nauwelijks terug te vinden. Het functioneren van de verschillende retentiegebieden wordt nader beschouwd naar aanleiding van de debieten bij 's-Hertogenbosch. Deze kaart functioneert verder ter oriëntatie tijdens het lezen van deze paragraaf.

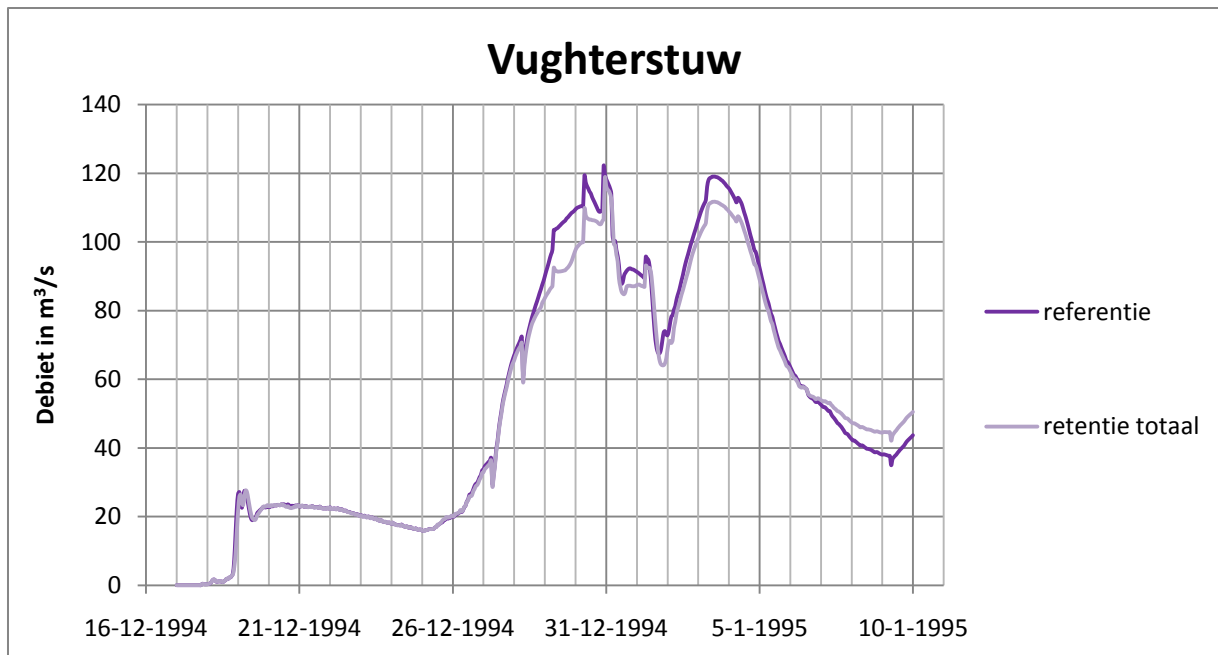


Figuur 4-12: De inundatieverschillenkaart met paars de primaire meetpunten, genummerd de retentiegebieden en van rood naar blauw het verschil in inundatiediepte.

Het aanleggen van retentiegebieden in het gehele beheergebied van WSDD leidt tot een beperkte gesimuleerde waterstandverlaging van gemiddeld 1 cm in 's-Hertogenbosch. In figuur 4-13 is duidelijk te zien dat het aanleggen van de retentiegebieden een duidelijke verlaging van het piekdebiet van ongeveer 10 m³/s bij Vugtherstuw.

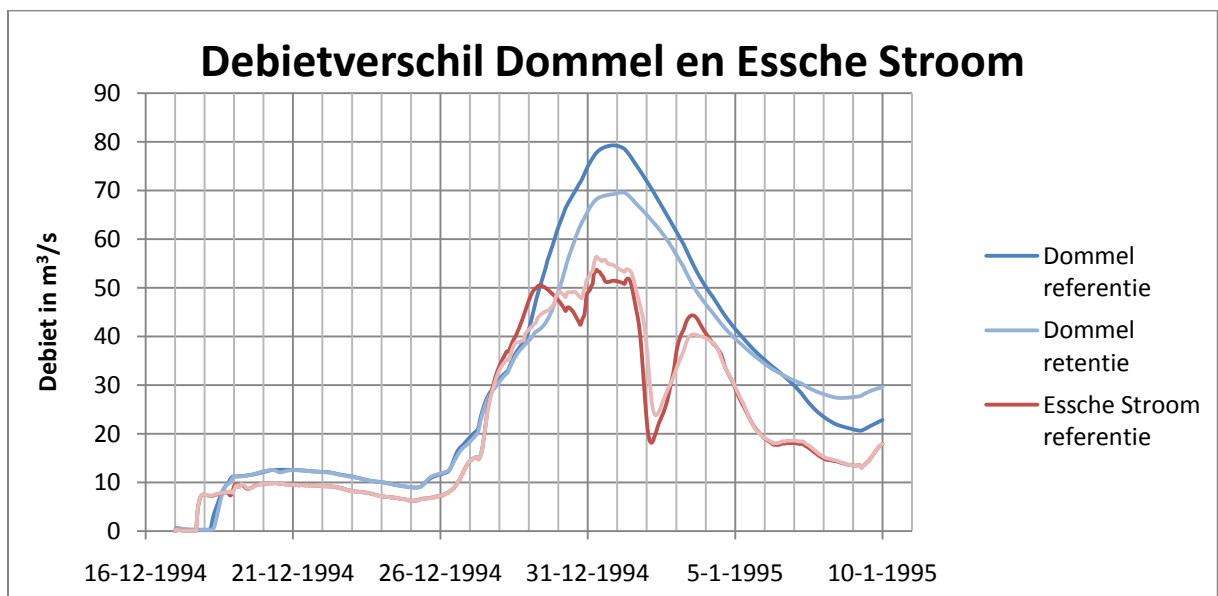
	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand
's-Hertogenbosch	4 m ³ /s	3 uur	1 cm
Essche Stroom	-3 m ³ /s	5 uur	
Dommel	10 m ³ /s	4 uur	

Tabel 4-4: Overzicht van verlaging en vertraging in 's-Hertogenbosch en de aanvoerende takken Essche Stroom en Dommel (bij Boxtel).



Figuur 4-13: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw.

De Dommel bij Vughterstuw wordt gevoed door de Essche Stroom en De Dommel bij Boxtel. In figuur 4-14 is te zien dat de totale verlaging en vertraging bij Vughterstuw veroorzaakt wordt door een verhoging en vertraging in de Essche Stroom en een grotere verlaging en vertraging in De Dommel bij Boxtel.



Figuur 4-14: Het veranderde debiet door retentie van De Dommel (van donker naar lichtblauw) en van de Essche Stroom (van rood naar lichtrood). Het debiet van De Dommel is verlaagd en vertraagd, dat van de Essche Stroom is verhoogd en vertraagd.

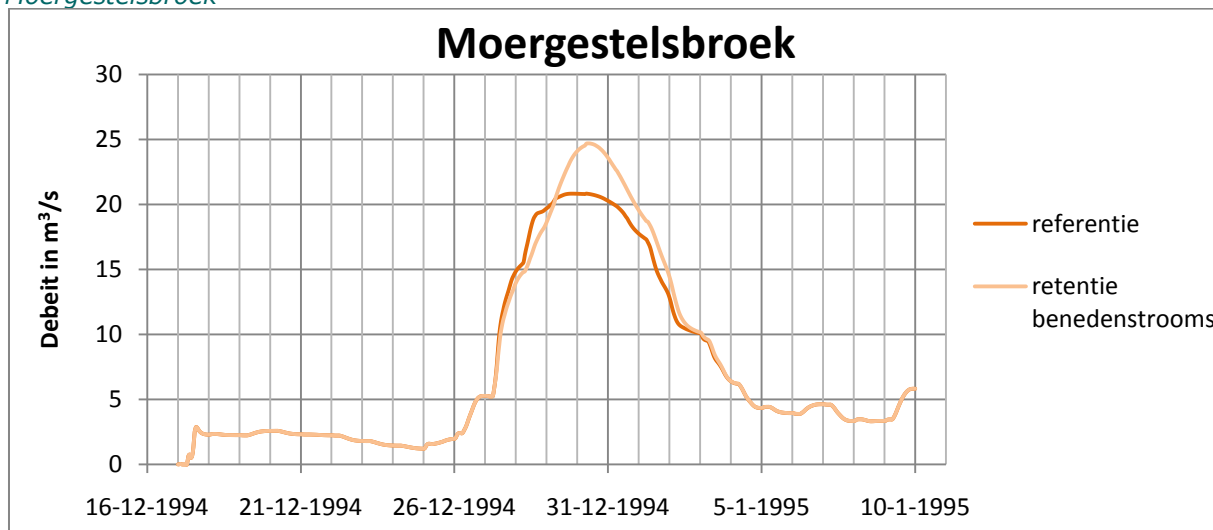
4.5.1 Retentie in het stroomgebied van de Essche Stroom

De afvoer van de Essche Stroom neemt door retentie tussen 28 december en 30 december af, om daarna toe te nemen. Daarnaast heeft retentie geleid tot een lichte vertraging van ongeveer 5 uur. In het stroomgebied van de Essche Stroom liggen zes retentiegebieden. Polderhal en Volmeer liggen bij de uitmonding van de Essche Stroom. Diessensbroek en Moergestelsbroek liggen in de Reusel en Grijsse Steen en Molenbroek achtereenvolgens in de Grote Beerze en Kleine Beerze.

Polderhal en Volmeer

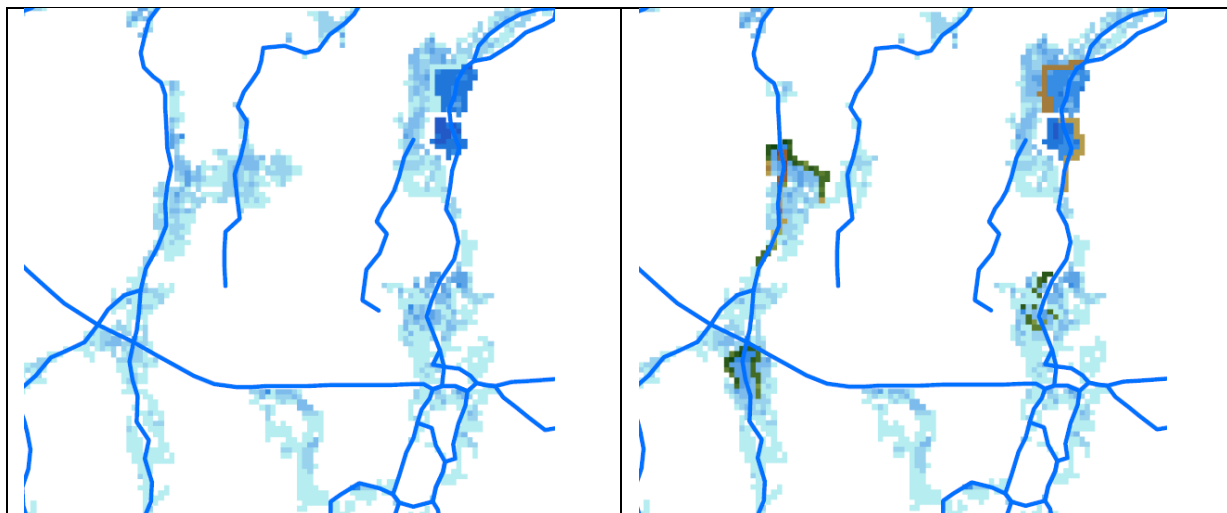
Polderhal en Volmeer zijn samen beschouwd aangezien zij naast elkaar liggen, dezelfde functie hebben en niet hun afzonderlijke bijdrage te meten is uit de modellering. De gebieden langs de Essche Stroom waar Polderhal en Volmeer toe behoren, inunderen in de referentiesituatie doordat de kades overstromen. Door de gecontroleerde inlaat in de situatie met Polderhal en Volmeer als retentiegebieden, blijkt dat de gebieden eerder ingezet worden door een lagere drempel. Hierdoor worden de gebieden al gedeeltelijk vanaf de 28^e tot de 30^e ingezet en worden de gebieden minder gevuld tussen de 30^e en de 31^e (de piek van de Essche Stroom). Het piekdebiet wordt minder effectief afgetopt dan in de referentiesituatie waardoor het piekdebiet toeneemt.

Moergestelsbroek



Figuur 4-15: Het debiet na retentiegebied Moergestelsbroek.

Bij Moergestelsbroek treedt de situatie op dat de aanleg van het retentiegebied een negatief effect heeft op de piek. Dat wil zeggen; de piek wordt met 20% verhoogd ($4\text{m}^3/\text{s}$) en ongeveer 10 uur vertraagd. Moergestelsbroek is aangelegd om Moergestel te beschermen tegen wateroverlast, en dit werkt goed. In de referentiesituatie inundeert een gedeelte van de wijk Oistervort van Moersgestel en een groot gedeelte van dit water blijft staan tot aan het einde van de loop van het model. Door het aangelegde retentiegebied en een verhoging in het landschap inundeert de wijk Oistelvort niet meer. Hierdoor stroomt er meer water door de waterloop in plaats van over het land. Dit leidt tot de verhoging van het debiet en een vertraging van enkele uren tot maximaal 8 uur bij de piek zoals zichtbaar in figuur 4-15.

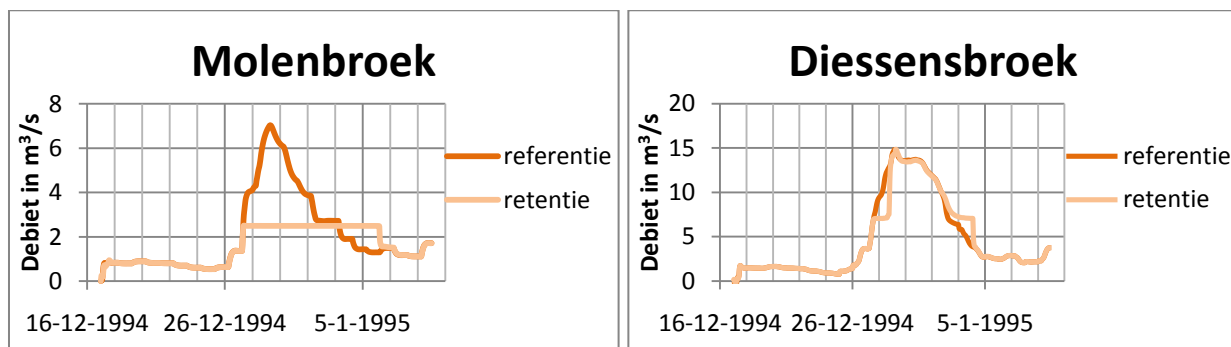


Figuur 4-16: Referentiesituatie (figuur links) en situatie met retentie (figuur rechts). In de rechterfiguur zijn verhogingen (groen) en verlagingen in het maaiveld (bruin) te zien. Hierdoor vinden de inundaties gedeeltelijk op andere locaties plaats zoals bij Moergestelsbroek (linksboven in beide figuren), Diessensbroek (linksonder), Logtse Baan (rechtsboven) en Spoordonk (rechtsonder).

In figuur 4-16 is goed te zien hoe de verhoogde kades bij Moergestelsbroek (linksboven in beide afbeeldingen), Diessensbroek (linksonder in beide afbeeldingen) en op twee nabijgelegen locaties effect hebben op de vorm van de inundaties. De Beerze heeft een licht verhoogde piekafvoer, dit komt door verhogingen in het 2D-grid bij Spoordonk en verlagingen van de kades rond Logtse Baan. Op de inundatiekaart is ook een verlaagde inundatie te zien bij de Logtse Baan, dit komt doordat hier verlaagde kades gemodelleerd zijn waardoor het water meer ruimte en krijgt en minder diep is. De Rosep heeft een licht verlaagde afvoer, dit komt doordat de verhogingen in van het maaiveld rond Moergestelsbroek ervoor zorgen dat minder water van de Reusel in de Rosep kan stromen.

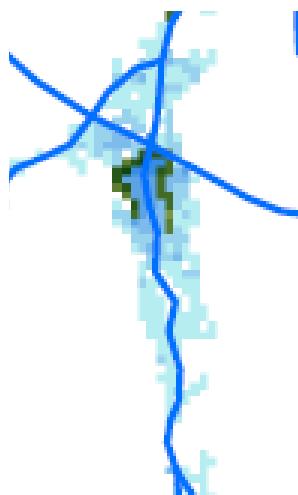
Door de vroeger inzet van Polderhal en Volmeer en het extra debiet van Moergestelsbroek wordt het debiet van de Essche Stroom vroegtijdig verlaagd en op de piek verhoogd. Hoewel bij Moergestelsbroek een vertraging zichtbaar is, is deze na Polderhal en Volmeer niet meer waarneembaar.

Diessensbroek, Grijze Steen en Molenbroek.



Figuur 4-17: Voorbeeld van een retentiegebied dat goed de piek aftopt en een retentiegebieden die niet optimaal de piek aftopt.

Retentiegebied Molenbroek werkt optimaal, Grijs Steen wordt nauwelijks ingezet omdat water langs of over het knijpende kunstwerk stroomt. Ook in Diessensbroek wordt de piek niet effectief afgetopt. Dit komt mede doordat er veel inundatie langs het retentiegebied is en er kortsluiting ontstaat tussen de Reusel (rechts in figuur 4-18) en het Spruitenstroompje (links in figuur 4-18). De waterloop die beide watergangen kruist is het Wilhelminakanaal, hoewel hier op de afbeelding, is deze waterloop in het model niet meegenomen aangezien het Spruitenstroompje en de Reusel met duikers onder het kanaal door geleid worden.



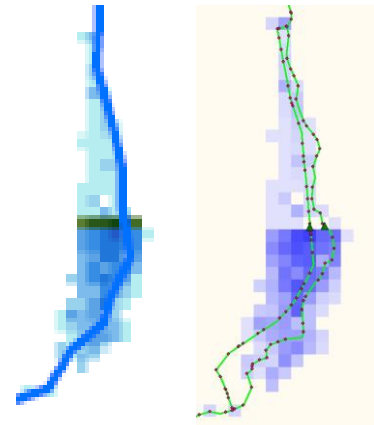
Figuur 4-18: Water stroomt langs de kades in Diessensbroek.

4.5.2 Retentie in het stroomgebied van De Dommel bovenstrooms Boxtel

Bij Boxtel is de piekverlaging door retentie duidelijk zichtbaar (figuur 4-14), de piekverlaging is ongeveer $10\text{ m}^3/\text{s}$. Ook is te zien dat de piek ongeveer 10 uur later komt, dit komt doordat de oorspronkelijke piek aanzienlijk afgetopt is waardoor er een nieuwe piek ontstaat. De stijgende lijnen liggen verder uit elkaar dan de dalende lijnen, dit duid op een vertraging van ongeveer 5 uur. De maximale waterstand is bij Boxtel vier centimeter lager bij retentie en komt drie uur later dan in de referentiesituatie. Door retentie wordt er 4,7 miljoen m^3 geborgen bovenstrooms Boxtel.

De Run, Valkenswaard zuidwest en Valkenswaard zuid

In het stroomgebied van De Dommel werken de retentiegebieden De Run, Valkenswaard Zuid en Valkenswaard Zuidwest parallel samen om de afvoer van de Bovendommel naar De Dommel te verlagen. Retentiegebied de Run functioneert redelijk goed, maar Valkenswaard Zuid en Valkenswaard Zuidwest worden niet effectief ingezet om de piek te verlagen. Vanwege een geringe piekafname en de afvoer van het leeuwendeel van dit debiet over het Beatrixkanaal; is het effect van deze drie gebieden bij de Hightechcampus een piekverlaging van $2\text{ m}^3/\text{s}$. Indien Valkenswaard zuid en zuidwest effectiever ingezet worden (zoals gepland); kan naar verwachting meer afgetopt worden. Bij Valkenswaard zuidwest stroomt het water over de kade. De inundatiediepte op de kade is maximaal 3 centimeter. In een animatie is te zien dat benedenstrooms pas inundaties plaatsvinden nadat het water over de kade is gestroomd.



Figuur 4-19: Links de giskaart (met de kade in het groen), rechts de SOBEK resultaten. Water stroomt over de kade bij Valkenswaard Zuidwest.

Buulder Aa, Kasteel Heeze, Rietbeemden en Zeggen Geldrop

Retentiegebieden Buulder Aa, Kasteel Heeze, Rietbeemden en Zeggen Geldrop staan in serie achter elkaar. Buulder Aa, Kasteel Heeze en Rietbeemden toppen de piek duidelijk af. Toch stroomt er ook bij deze drie retentiegebieden water over (Kasteel Heeze en Rietbeemden) of langs (Buulder Aa) de kade. Retentiegebied Zeggen Geldrop heeft nauwelijks effect; dit komt doordat de voorgaande retentiegebieden het maximumdebiet al hebben teruggebracht tot een hoeveelheid lager dan waar het kunstwerk op knijpt ($20,5\text{ m}^3/\text{s}$).

Alle retentiegebieden in het bovenstrooms gebied van De Dommel (met uitzondering van Dommeldal Eindhoven) leiden tot een piekverlaging bij Soeterbeek (net na de samenvloeiing van De Dommel en de Kleine Dommel) van $14\text{ m}^3/\text{s}$. De voornaamste reden van deze spectaculaire afname is dat de retentiegebieden in de Kleine Dommel (Buulder Aa, Kasteel Heeze en Rietbeemden) het debiet enorm verlagen op het moment dat De Dommel (voornamelijk vanuit de Tongelreep) zijn piek bereikt.

Dommeldal Eindhoven

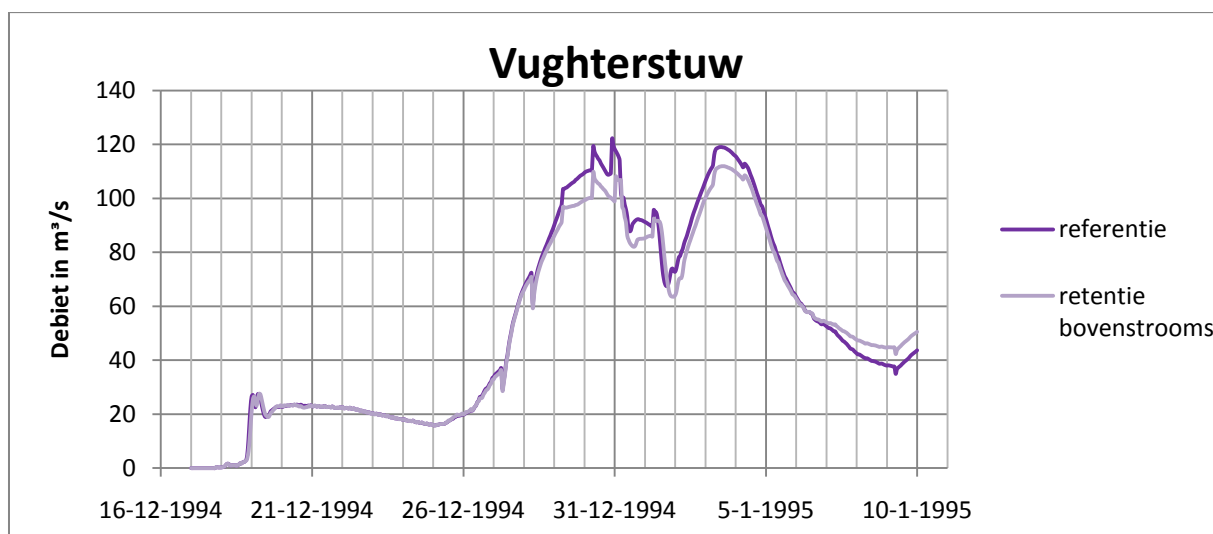
De directe verschillen in afvoer door Dommeldal Eindhoven kunnen met deze modellering niet bepaald worden doordat over de gehele lengte tot Boxtel inundaties plaatsvinden. Op de inundatiekaart (figuur 4-12) is te zien dat in dit retentiegebied in ieder geval extra water wordt opgeslagen.

4.6 Retentie bovenstrooms

	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand
's-Hertogenbosch	$\pm 10\text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 3\text{ uur}$	$\pm 2\text{ cm}$
Essche Stroom	$\pm 1\text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 5\text{ uur}$	
Dommel	$\pm 10\text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 4\text{ uur}$	

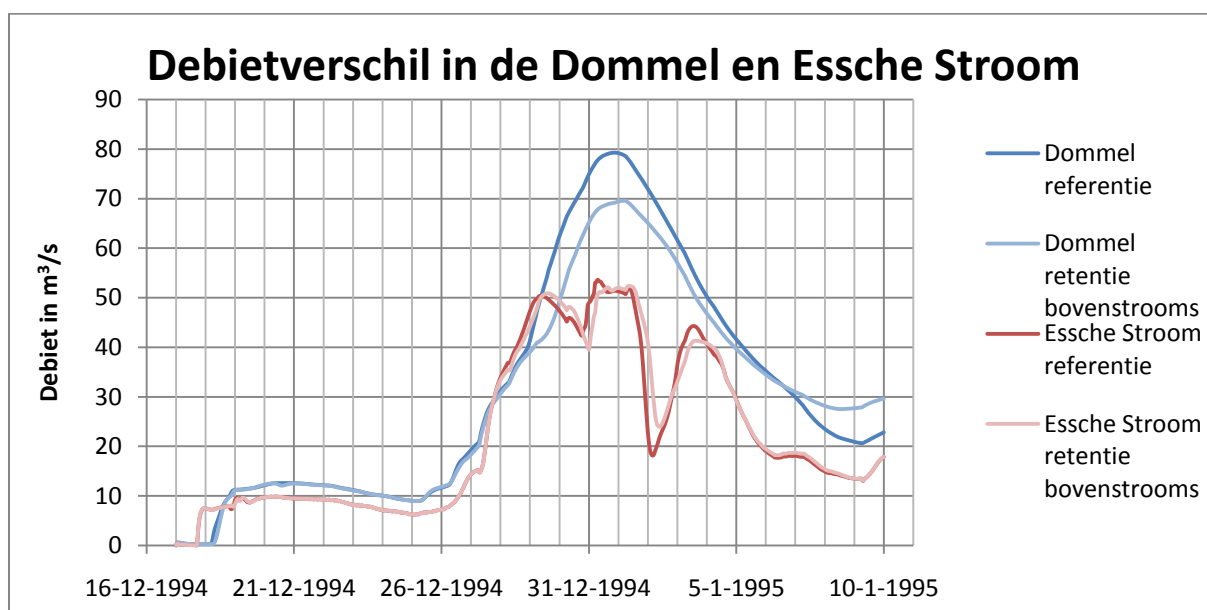
Tabel 4-5: Verlaging en vertraging door retentie bovenstrooms.

Door retentie alleen bovenstrooms toe te passen is duidelijk verlaging en vertraging zichtbaar van het debiet in 's-Hertogenbosch. Bossche Broek Noord en Zuid zijn door de verlaagde waterstand drie uur later ingezet maar in dezelfde opbouw en mate als in de referentiesituatie, maar bergen wel dezelfde hoeveelheid water.



Figuur 4-20: Het debiet van De Dommel bij Vughterstuw.

Het fors verlaagde piekdebiet (met $10\text{ m}^3/\text{s}$) bij Vughterstuw heeft een zeer beperkt effect op de waterstanden in 's-Hertogenbosch. Er wordt een verlaging van de maximum waterstand van enkele centimeters behaald. Één tot twee centimeter in 's-Hertogenbosch centrum.



Figuur 4-21: De verandering van de debieten van De Dommel en de Essche Stroom door retentie bovenstrooms.

In de Essche Stroom is inderdaad duidelijk waar te nemen dat vanaf de 28^e tot de 4^e een vertraging optreedt, de vertraging loopt snel op naar vier tot zes uur (figuur 4-21). Een verlaging van maximaal $1\text{ m}^3/\text{s}$ is ook zichtbaar. Ook is te zien dat de eerste piek licht hoger dan in de referentiesituatie. Dit is alleen te verklaren doordat De Dommel iets lager staat, waardoor de Essche Stroom meer kan afvoeren. Het dal van de 29^e tot de 31^e is dieper en later omdat de inundaties later beginnen maar het aanvoerend debiet even hoog is en zelfs licht hoger vlak voor de 31^e.

Het grote dal in debiet rond de 2^e januari is aanzienlijk minder diep. Dit komt doordat de waterstanden lager zijn door retentie bovenstrooms, waardoor meer berging in het gebied mogelijk

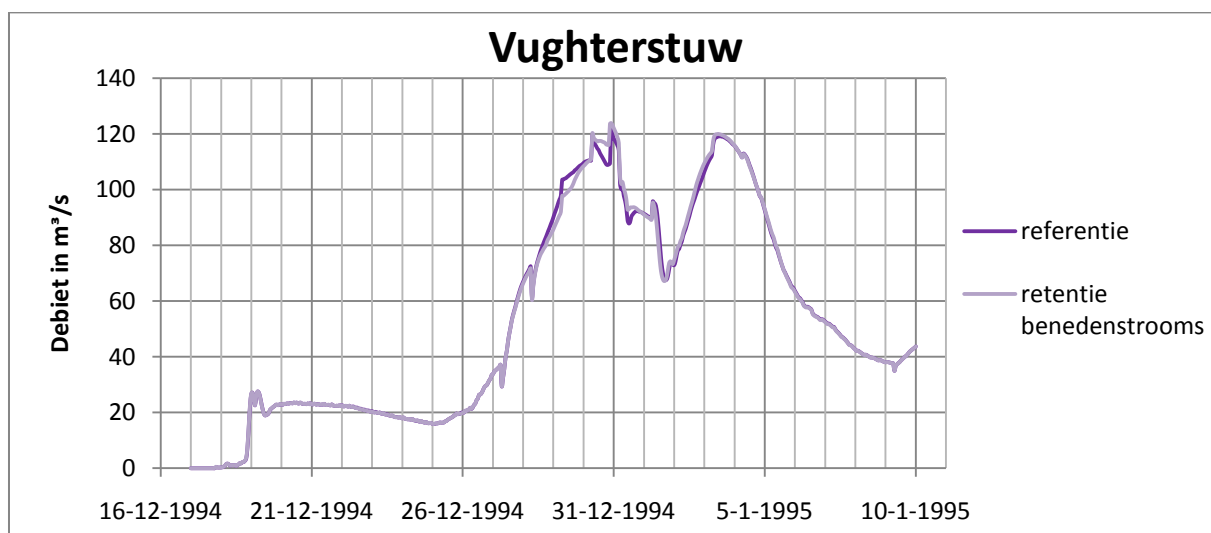
is, wat leidt tot een langzamere afname van het debiet. Door de vertragingen en de langzamere afname, is het debiet minder gekelderd voordat Crèvecœur weer opent. Ook de toename van het debiet na dit dal is lager doordat de waterstanden lager zijn; kan er minder geloosd worden op de Maas bij Crèvecœur. De geringe effecten van retentie bovenstrooms in de Essche Stroom zijn te verklaren doordat alleen Molenbroek effectieve retentie bewerkstelligt, in tegenstelling tot Diessensbroek en Grijsze Steen.

In De Dommel is zijn alle retentiegebieden in het bovenstroomse gebied. Hierdoor gelden de zelfde analyses als voor De Dommel bij retentie in de vorige paragraaf. Opvallend is dat het dichtstbijzijnde geplande retentiegebied (Dommeldal Eindhoven) ongeveer 35 kilometer stroomopwaarts ligt van Boxtel en dat de effecten van deze retentiegebieden dus tot ver benedenstrooms doorwerken (hoewel verminderd van $14\text{ m}^3/\text{s}$ bij Soeterbeek naar $10\text{ m}^3/\text{s}$ bij Boxtel en samen met de $1\text{ m}^3/\text{s}$ vanuit de Essche Stroom alsnog $10\text{ m}^3/\text{s}$ bij Vugterstuw).

4.7 Retentie benedenstrooms

	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand
's-Hertogenbosch	$-2\text{ m}^3/\text{s}$	0 uur	-1 cm
Essche Stroom	$-4\text{ m}^3/\text{s}$	0 uur	
Dommel	$0\text{ m}^3/\text{s}$	0 uur	

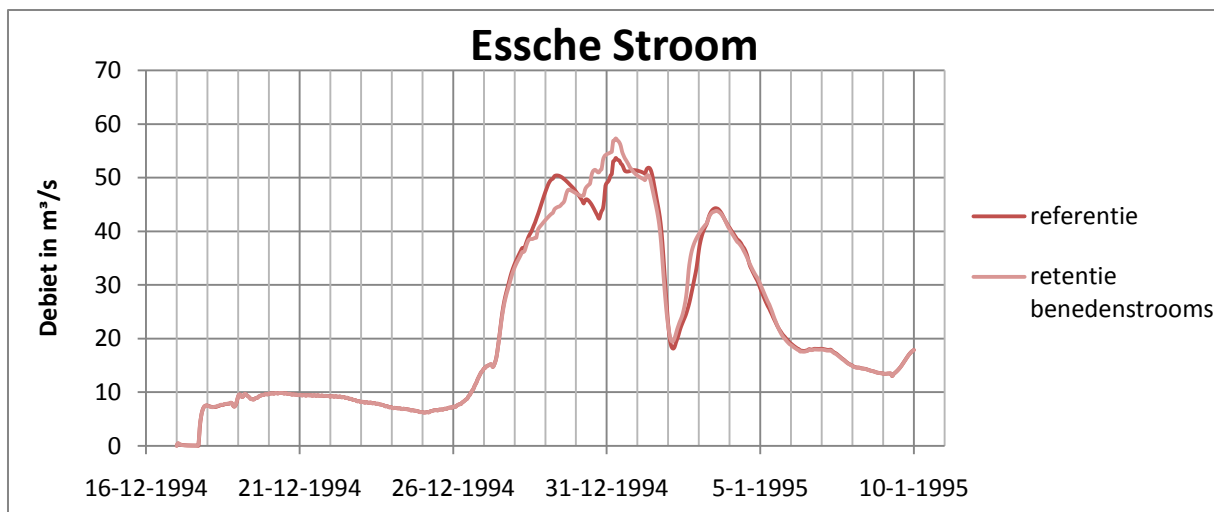
Tabel 4-6: Verlaging en vertraging door retentie benedenstrooms.



Figuur 4-22: Het debiet van De Dommel bij Vugterstuw.

Bij Vugterstuw zijn de effecten van de Essche Stroom zichtbaar, in de aanloop (28^e tot 30^e december) is er een lichte verlaging van de debieten en vanaf de 30^e tot de 1^e een verhoging van het debiet. Bossche Broek Noord en Zuid worden door de verhoogde waterstand 1 uur eerder ingezet dan in de referentiesituatie. Doordat er meer water aangevoerd wordt terwijl Crèvecœur dichtgaat en dichtzit worden de waterstanden bij 's-Hertogenbosch hoger, maar het blijft bij een verschil van 0 tot 2 centimeter.

De volledige verandering door retentie benedenstrooms komt uit het stroomgebied van de Essche Stroom. In De Dommel zijn geen verdere retentiegebieden benedenstrooms het Wilhelminakanaal gepland.



Figuur 4-23: Het debiet van de Essche Stroom.

Door de vroeger inzet van Polderhal en Volmeer en het extra debiet van Moergestelsbroek wordt het debiet van de Essche Stroom vroegtijdig verlaagd en op de piek verhoogd. Hoewel bij Moergestelsbroek een vertraging zichtbaar is, is deze na Polderhal en Volmeer niet meer waarneembaar.

4.8 Resultaten in cijfers

Resultaten bij 's-Hertogenbosch

	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging waterstand	Inundatievolume
Referentie	0	0	0	127,2 miljoen m ³
Beekherstel	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	127,6 miljoen m ³
Beekherstel bovenstr.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	127,1 miljoen m ³
Beekherstel benedenstr.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	127,5 miljoen m ³
Retentie	4 m ³ /s	3 uur	1 cm	125,5 miljoen m ³
Retentie bovenstr.	10 m ³ /s	3 uur	2 cm	124,1 miljoen m ³
Retentie benedenstr.	-2 m ³ /s	0 uur	-1 cm	128,0 miljoen m ³

Tabel 4-7: Resultaten van de simulaties bij 's-Hertogenbosch.

Resultaten bij de Essche Stroom en De Dommel

	Essche Stroom		Dommel bij Boxtel	
	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet	Verlaging piekdebiet	Vertraging debiet
Referentie	0	0	0	0
Beekherstel	n.v.t.	n.v.t.	1 m ³ /s	2 uur
Beekherstel bovenstr.	n.v.t.	n.v.t.	1 m ³ /s	1 uur
Beekherstel benedenstr.	n.v.t.	n.v.t.	0 m ³ /s	1 uur
Retentie	-3 m ³ /s	5 uur	10 m ³ /s	4 uur
Retentie bovenstr.	1 m ³ /s	5 uur	10 m ³ /s	4 uur
Retentie benedenstr.	-4 m ³ /s	0 uur	0 m ³ /s	0 uur

Tabel 4-8: Resultaten van de simulaties bij de Essche Stroom en De Dommel bij Boxtel.

5 Beschouwing en discussie

5.1 Vergelijking met de hypotheses

Referentie

De verwachting was dat het systeem op orde is voor de referentiesituatie. Na simulatie van de referentiesituatie bleek dit niet het geval te zijn. Dit kan betekenen dat de verwachting onterecht was en dat het systeem niet op orde is. Bij nader inzien is beiden het geval. De maatgevende situatie was extremer dan T=100 en het systeem is (nog) niet op orde. In de simulaties stijgen de waterstanden in 's-Hertogenbosch tot 5,34m +NAP, waar een maximum van 4,90m verwacht werd. Het retentiegebied de Vughtse Gement is nog niet gerealiseerd, wat betekend dat het systeem inderdaad nog niet op orde is voor een gebeurtenis met een herhalingsdij van één in de 150 jaar. Naast dat in de werkelijkheid de situatie minder op orde is dan verwacht, speelt ook de schematisering een rol. Als Crèvecœur sluit, komt in de schematisering de volledige opstuwing in het stroomgebied van De Dommel terecht omdat het debiet van de Aa in 's-Hertogenbosch gefixeerd (niet-dynamisch) opgelegd. In de schematisering kunnen dus geen inundaties ontstaan in het stroomgebied van de Aa, en kan het debiet van de Aa niet teruglopen door opstuwing.

Er is een ervaringshypothese dat de afvoergolf van de Aa als eerste aankomt bij 's-Hertogenbosch met daarna met iedere keer ongeveer 1 dag tussen de Essche Stroom, De Dommel en de Maas. Dit is niet uit de simulaties gebleken. In de gesimuleerde referentiesituatie komt de Aa twee dagen eerder aan bij 's-Hertogenbosch dan verwacht. Een oorzaak hiervan is dat de looptijd van de Aa niet meegenomen is in de schematisatie. Met uitzondering van de Aa, is de gesimuleerde aankomst van de pieken bij 's-Hertogenbosch zoals verwacht.

Beekherstel

De verwachtte vertraging en piekverlaging bij beekherstel is niet terug te vinden in de simulaties. Dit terwijl de doorstroomprofielen van de meeste trajecten ongeveer met een factor 2 tot 3 verkleind zijn, en de sinuositeit vergroot. Het 'surf-effect' (versnelde voortplanting van een golfbeweging) is niet als zodanig waargenomen.

Retentie

Zoals verwacht heeft retentie een groot lokaal piekverlagend effect, wat niet verwacht was is dat ook vertraging van de afvoergolf optreedt en dat de effecten van retentie nog ver benedenstrooms te merken zijn. Tegen verwachting in functioneren niet alle retentiegebieden goed.

5.2 Discussie

Correctheid focus, afbakening en uitgangspunten

De focus en afbakening van het onderzoek waren toegesneden op het doel van het onderzoek en dankzij het stellen van deze uitgangspunten is het mogelijk geweest de doelstelling te halen. Door puur te kijken naar veranderingen zijn bepaalde onjuistheden in de modellering van de referentiesituatie niet van groot belang. Dit geldt voornamelijk voor het feit dat de Aa geblokt en te vroeg in het model staat, dat de terugval in debiet door sluiting van Crèvecœur en inundaties in het gebied van de Aa niet voorkomen en de lokale overstromingen langs het Drongelens Kanaal en de Kloosterstraat bij Bossche Broek Zuid. Hierdoor zijn effectief de gevolgen van de maatregelen onderzocht en zijn de conclusies ook toepasbaar op vergelijkbare situaties buiten het beheergebied van Waterschap De Dommel.

Daarnaast zijn er door niet de maatregelen 'vernatting van verdroogde natuurgebieden' en 'vasthouden aan de bron' te onderzoeken meer mogelijkheden voor diepgang in het onderzoek naar de maatgevende situatie en effecten van retentie en beekherstel. Door de focus te leggen bij de

verschillen tussen de maatregelen bovenstrooms en benedenstrooms kunnen meningen dat maatregelen bovenstrooms benedenstrooms geen effect hebben vervangen worden door onderbouwde conclusies. Dit kan leiden tot nieuwe inzichten in de inrichting van het watersysteem. Door de focus hierop te leggen is geen analyse gemaakt om van robuustheid van het systeem bij verschillende buien (zoals van west naar oost overtrekkend of een inhomogeen verdeelde bui). Inzichten in de robuustheid van het systeem zijn ook zeer belangrijk is voor de preventie van hoogwaterproblematiek bij 's-Hertogenbosch. Dit onderzoek heeft onder meer aangetoond dat al dan niet toevallige samenvallende omstandigheden (piek aftopping in de Kleine Dommel tijdens de piek van de Tongelreep) grote gevolgen kan hebben voor de problematiek.

Achteraf was het beter geweest een minder extreme situatie te kiezen. De verwachting was dat het watersysteem een T=150 situatie bij 's-Hertogenbosch aankan. Het doel was om deze T=150 situatie te kiezen omdat hier nèt geen problemen optreden bij 's-Hertogenbosch waardoor veranderingen goed inzichtelijk zijn en ook de ordegrrootte van de veranderingen duidelijk zijn. In referentiesituatie voldoet het gebied niet aan de T=150 eis bij 's-Hertogenbosch. Doordat in de gesimuleerde situatie het watersysteem niet op orde is voor de combinatie van de gekozen Maasafvoer en de gekozen maatgevende bui, is de verandering van de waterstanden geen duidelijke indicator voor de mate van de gevolgen van de maatregelen. De inundatievolumes geven een beter beeld, maar geven alleen de relatieve verschillen weer en de volumes hebben individueel geen betekenis. Het is aannemelijk dat in de werkelijkheid de T=150 eis momenteel ook niet gehaald wordt bij deze maatgevende situatie. Na aanpassingen om het gebied op orde te krijgen (zoals onder anderen de aanleg van een groot retentiegebied in het beheergebied van waterschap Aa en Maas; de Vughtse Gement), kan het zijn dat de magnitude van de effecten van de doorgerekende maatregelen veranderen. Toch is het waardevol geweest om inzichten te krijgen dat de waterstanden bij Vugtherstuw tot ver boven de 4,90 meter kunnen rijzen in het huidige systeem bij een T=150 situatie.

Correctheid modelinput

De meest bepalende invoer van het model zijn de schematisering van het systeem, de input van de neerslag, en van de Maas. Voor robuustheidsanalyses kan de Maas vroeger of later in het model gezet worden. De vorm en hoogte van de afvoergolf wordt niet ter discussie gesteld. Rijkswaterstaat is expert op dit gebied en past de standaardgolven om de paar jaar aan volgens nieuwe data en inzichten.

Er is bewust gekozen om de door HKV ontwikkelde standaardbui met herhalingstijd van T=100 te gebruiken. Van de verschillende mogelijkheden is dit de bui die het best een gemiddelde T=100 bui beschrijft. De neerslag is uniform gebiedsdekkend op de modellen gezet. Het gebruik van een andere aannemelijke T=100 bui zou geen grote gevolgen mogen hebben voor de uitkomst van het onderzoek, aangezien de kwalitatieve gevolgen van maatregelen is onderzocht. Het is op uurbasis op het SOBEK-RR en het RWZI model gezet en op 6-uursbasis op het Wageningenmodel. Door de relatief lange doorlooptijd van water in het landelijk gebied, de mate van detail van de modellering en de vertragingen in het systeem zijn deze tijdstappen klein genoeg voor de modellering van de effecten. Behalve bij het stroomgebied van de Aa zijn enkele honderden meters vanaf de oorsprong van de beken geen 'trappen' meer te zien in de resultaten voor de debieten. De modellering van de Aa moet gevolgen hebben gehad voor de situatie in 's-Hertogenbosch doordat de stroming in de Stadsdommel verschillende keren van richting wisselt waar normalitair een geleidelijker afvoer plaatsvindt. Dit heeft toch geen invloed op de conclusies van het onderzoek aangezien dit bij zowel de runs met maatregelen als met de referentierun optreedt.

De hoofd- en zijwatergangen, kunstwerken en zuiveringen in het beheergebied van De Dommel zijn tot in detail ingevoerd in het SOBEKmodel en het RWZI model. Hoewel gebleken is dat er nog enkele incorrectheden in zaten, hebben deze geen effect op de juistheid van de effecten van de maatregelen en dus op de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

Correctheid modellering

De gebruikte modellen zijn geschikt om het watersysteem en de effecten van de maatregelen retentie en beekherstel goed te modelleren. Bij validatie van het gebiedsdekkend hoogwatermodel bleken

afvoeren een maximale afwijking van 15%, wat erg goed is voor een gebiedsdekkend model (persoonlijk contact M. van de Wouw tijdens een presentatie van prof. P. Willems, Katholieke Universiteit Leuven, 2010). Een gedeelte van deze onnauwkeurigheid kan te wijten zijn aan een verschil in de lokale en temporele verdeling van de neerslag in de werkelijke situatie die niet specifiek zo specifiek gemeten wordt als dat deze in het model wordt ingevoerd. Er kan vanuit worden gegaan dat de resultaten grote gelijkenis vertonen met de werkelijke situatie.

Er kunnen nog verbeteringen aangebracht worden in de schematisatie, maar voor het doel van dit onderzoek voldoet de schematisatie goed. In het specifieke geval bij de schematisatie van beekherstel moest het model opnieuw opgebouwd worden vanuit de brondata, hierbij zijn er twee stuwen in de Reusel niet opgenomen in de schematisatie en is een stuw bij Molenbroek verkeerd geplaatst. Doordat het hier verschillen betreft tussen de retentiesituatie en de maatregel, heeft dit ertoe geleid dat de resultaten benedenstrooms van deze stuwen niet bruikbaar zijn. Aangezien er op andere locaties veel beekhersteltrajecten zijn, is er toch een uitspraak te doen over het effect van deze maatregel.

Correctheid modeloutput

Met deze modellering zijn harde uitspraken te doen over de kwalitatieve gevolgen van de maatregelen bij 's-Hertogenbosch en over kwantitatieve gevolgen bovenstrooms. Er zijn geen harde uitspraken te doen over de kwantitatieve situatie bij 's-Hertogenbosch en de kwantitatieve verandering hierin door maatregelen. Aangezien kwantitatieve verwachtingen niet het doel waren van dit onderzoek is wèl de doelstelling gehaald. Er kunnen harde uitspraken gedaan worden over de gevolgen van maatregelen; over de mate van vertraging en de percentuele verandering van de piekdebieten bij 's-Hertogenbosch. Alle bijzondere uitkomsten uit de simulaties zijn verklaard, en de inundatiekaarten komen op enkele locaties na sterk overeen met de ervaringen en verwachtingen bij een extreme situatie. De locaties waar dit niet het geval was, zijn verklaard door kleine tekortkomingen in de schematisatie. Dit had geen gevolgen voor betrouwbaarheid van de simulaties of de uitkomsten ervan. Er is geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Uit eerder onderzoek blijkt dat vertraging door beekherstel voornamelijk gevoelig is voor de mate en intensiteit van de neerslag (Waterschap de Dommel, 2006).

Door de onjuistheden in de schematisatie in de Reusel en de Beerze is het niet mogelijk om vast te stellen of beekherstel met een correcte schematisatie gevolgen heeft voor 's-Hertogenbosch. Doordat bij Boxtel de gevolgen van beekherstel bovenstrooms waar te nemen is, en de verandering initieel zeer klein zijn, is er geen reden om er vanuit te gaan dat de gevolgen bij Vugherstuw volledig uitgedempt zal zijn. Er kan aangenomen worden dat beekherstel bovenstrooms effect kan hebben op de situatie in 's-Hertogenbosch. Echter dat met de uitgevoerde simulatie de gevolgen zeer gering zullen zijn.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

6.1.1 Hoofdconclusies

- 1 Beekherstel heeft geen noemenswaardig effect op wateroverlast benedenstrooms bij 's-Hertogenbosch bij extreem hoogwater. Veranderingen in de afvoergolf na de beekhersteltrajecten zijn zeer beperkt en zeer lokaal van aard.
- 2 Retentiegebieden leiden wél tot een aanzienlijk verandering van de situatie benedenstrooms bij 's-Hertogenbosch bij extreem hoogwater. Mits juist uitgevoerd kan retentie zowel bovenstrooms als benedenstrooms in het gebied leiden tot een verlaging van het aankomend debiet benedenstrooms, tevens vertraagt retentie de piek met enkele uren.

6.1.2 Algemeen

- 1 Bovenstrooms worden inundaties veroorzaakt door een hoog piekdebiet (in de gemodelleerde situatie tot aan de A2 in de Essche Stroom en tot Gemonde in De Dommel). Verder benedenstrooms in de Essche Stroom en De Dommel worden de ergste inundaties veroorzaakt ruim na de piek, doordat in de gekozen maatgevende situatie spuisluis Crèvecoeur dan sluit en de afvoer op de Maas gestremd is.

6.1.3 Beekherstel

- 1 Beekherstel kan een zeer klein vertragend en piekverlagend effect hebben op het benedenstrooms debiet.
 - ◇ Beekherstel in het stroomgebied van De Dommel bovenstrooms van Boxtel heeft geleid tot een piekverlaging bij Boxtel in de maatgevende situatie van $1\text{m}^3/\text{s}$ (1,4%) en een vertraging van 2 uur in de nasleep van de piek.
 - ◇ Bij een paar individuele beekhersteltrajecten is lokaal een vertraging opgetreden tot twee uur en lokaal een piekafvlakking van minder dan 5% van het piekdebiet bij de maatgevende situatie.
 - ◇ Op andere beekhersteltrajecten duiden de resultaten niet op vertraging van de afvoer of piekafvlakking.
- 2 Het is mogelijk dat beekherstel leidt tot de versnelde afvoer van het debiet.
 - ◇ Als door beekherstel het doorstroomprofiel van de beek wordt vergroot, kan dit leiden tot een versnelde afvoer zoals in de simulatie bij de Hitechcampus in Eindhoven. De afvoerpiek is hier even hoog gebleven.

6.1.4 Retentie

- 1 De effecten van bovenstroomse retentiegebieden op het debiet nemen verder stroomafwaarts licht af maar zijn tot ver benedenstrooms (Vugterstuw) significant.
 - ◇ De geplande retentie bovenstrooms heeft een piekverlagend effect van $14\text{m}^3/\text{s}$ bij Vugterstuw in de gekozen maatgevende situatie.
 - ◇ Door retentie bovenstrooms hoeft er 3.1 miljoen m^3 minder geborgen te worden rond 's-Hertogenbosch.
 - ◇ De effecten nemen onder anderen af doordat retentie bovenstrooms ook leidt tot een vermindering van natuurlijke overstromingen, terwijl deze in de gesimuleerde situatie geen overlast opleveren.

- 2 Retentie bovenstrooms leidt tot een vertraging van de piek.
 - ◇ De geplande retentie bovenstrooms heeft een vertragend effect van de piek in de afvoergolf van 4 uur in De Dommel bij Boxtel.
- 3 Retentiegebieden hebben een marginaal effect op de waterstanden benedenstrooms in de gesimuleerde situatie. Dit komt doordat de maatgevende situatie (neerslaggebeurtenis in combinatie met de Maasgolf) aanzienlijk groter is dan het systeem kan verwerken.
 - ◇ De geplande retentie bovenstrooms leidt tot een maximale waterstand in 's-Hertogenbosch die 1 à 2 centimeter lager is dan in de referentiesituatie.
 - ◇ De geplande retentie benedenstrooms leidt tot een maximale waterstand in 's-Hertogenbosch die 1 à 2 centimeter hoger is dan in de referentiesituatie. Dit komt doordat de retentiegebieden minder goed de afvoerpiek verlagen dan de ongecontroleerde inundatie dat doet in de referentiesituatie (conclusie 6.6 en 7).
- 4 Van de 13 geanalyseerde gebieden, is er één niet ingezet, hebben er vijf geleid tot piekverlaging, zijn er vier ingezet zonder noemenswaardig effect en zijn er drie ingezet die de situatie verergeren ten opzichte van de referentiesituatie.
 - ◇ Zeggen-Geldrop is niet ingezet (conclusie 6)
 - ◇ Molenbroek, de Run, de Bulder Aa, Kasteel Heeze en Rietbeemden hebben geleid tot piekverlaging (conclusie 5).
 - ◇ Grijze Steen, Diessensbroek, Valkenswaard zuid en Valkenswaard zuidwest hebben geen noemenswaardig effect op de afvoer van de beken waarin zij liggen (conclusie 6).
 - ◇ Moergestelsbroek, Volmeer en Polderhal leiden tot een hogere piekafvoer dan in de referentiesituatie (conclusie 6 en 7).
- 5 Retentiegebieden hebben over het algemeen, mits correct aangelegd een piekverlagend effect op het debiet direct stroomafwaarts. De effectiviteit van de correct aangelegde gebieden verschilt aanzienlijk.
 - ◇ Molenbroek heeft 4m³/s (65%) piekverlaging, de Run 1m³/s (25%), Bulder Aa 3m³/s (40%) en Kasteel Heeze&Rietbeemden 10m³/s (80%).
- 6 Veel retentiegebieden bewerkstelligen niet een optimaal piekverlagend effect door een niet passend ontwerp en/of schematisatie voor de gekozen maatgevende situatie:
 - ◇ Een aantal retentiegebieden werkt niet ideaal doordat in extreme situaties water niet voldoende geborgen wordt en kortsluiting ontstaat tussen waterlopen, het water uit een beek stroomt over het land naar een andere beek. Door de aanleg van retentiegebied Diessensbroek stroomt meer water door het Spruitenstroompje. Door de aanleg van Moergestelsbroek stroomt er minder (maar nog steeds) water naar de Rosep en door retentiegebied de Bulder Aa ontstaat bijna kortsluiting naar de Sterkelse Aa.
 - ◇ De kades van retentiegebied Kasteel Heeze zijn niet lang genoeg gedimensioneerd omdat in een T=100 situatie water om de kades; langs de stuw stroomt. Hierdoor wordt onvoldoende water geborgen.
 - ◇ De Run, Bulder Aa, Kasteel Heeze en Rietbeemden worden op tijd ingezet. Omdat er toch water over de kade stroomt betekent dit dat de retentiegebieden te klein gedimensioneerd zijn voor de maatgevende situatie.
 - ◇ Diessensbroek, Valkenswaard Zuid en Zuidwest en Grijze Steen worden te vroeg ingezet en/of kunnen onvoldoende volume herbergen, waardoor de gebieden vol zitten voordat de piek aankomt.
 - ◇ Retentiegebied Zeggen-Geldrop wordt in de gemodelleerde situatie niet ingezet doordat de voorgaande retentiegebieden het debiet voldoende laag hebben weten te houden.

- ◇ De retentiegebieden Volmeer en Polderhal worden te vroeg ingezet doordat de vaste drempel is ontworpen op een minder extreme situatie. Hierdoor wordt het debiet te vroeg verlaagd en zijn de gebieden meer gevuld als de piek arriveert waardoor de afvoerpiek hoger uitvalt dan in de referentiesituatie.
- 7 Door uitzonderlijke lokale omstandigheden kunnen retentiegebieden, die effectief zijn aangelegd om hun primaire doel te bereiken, leiden tot een hoger piekdebet dan het debiet in de referentiesituatie zonder retentiegebied.
- ◇ Een voorbeeld hiervan is retentiegebied Moergestelsbroek, dit retentiegebied leidt tot een (20%) hogere afvoer doordat er minder inundaties plaatsvinden in het dorp. Hierdoor gaat er meer water door de waterloop en is de afvoer van de Reusel hoger. Het retentiegebied bereikt zijn primaire doel (bescherming van Moergestel) maar heeft negatieve bijeffecten voor de situatie benedenstrooms.
- 8 Retentiegebieden die veel water bergen voordat de piek komt of nadat de piek komt, en daardoor lokaal niet optimaal functioneren, kunnen mogelijk verder benedenstrooms wèl optimaal effect bewerkstelligen doordat het moment van bergen samenvalt met de piek van een andere beek.
- ◇ De grote verlaging van het debiet van De Dommel wordt veroorzaakt doordat in de Kleine Dommel veel water wordt geborgen; vooral in de aanloop naar de piek. Dit is op het moment dat de piek van de Tongelreep bij Eindhoven aankomt. Dus hoewel de retentiegebieden in de Kleine Dommel niet voor een optimale piekafvlakking in de Kleine Dommel zorgen, is het resultaat na samenvloeiing met de Tongelreep wel optimaal.
- 9 De effecten van totale retentie zijn niet altijd een harde optelsom van de effecten van retentie bovenstrooms en retentie benedenstrooms. In het invloedsgebied van de Maas kan een combinatie van effecten een vergrotende of verkleinende impact hebben.
- ◇ Zo kan bijvoorbeeld door de lagere Dommel door retentie bovenstrooms, de verhoogde piek door retentie benedenstrooms beter afgevoerd worden.

6.2 Aanbevelingen

Alle aanbevelingen zijn uit het oogpunt van hydraulica met betrekking tot hoog water. Er is geen rekening gehouden met andere uitgangspunten zoals onder anderen kosten, ecologie, waterkwaliteit, laag water en bestuurlijke gevoeligheden.

Aanbevelingen met betrekking tot alle maatregelen met een hydraulisch effect.

Uit de simulaties met retentie blijkt dat om verschillende redenen de situatie bij 's-Hertogenbosch onverwacht kan verslechteren. Bijvoorbeeld door het aanleggen van retentiegebieden om een beek meer ruimte te geven (Polderhal/Volmeer) of om een locatie te beschermen tegen hoogwater (Moergestelsbroek) is het mogelijk dat de beek minder ruimte krijgt dan dat het anders neemt of deze ruimte minder effectief gebruikt wordt. Hierdoor kunnen zelfs maatregelen die in eerste oogopslag een positief effect lijken te hebben toch een negatief effect hebben op de situatie benedenstrooms. Hierdoor wordt aangeraden om alle maatregelen die een hydraulisch effect hebben in een extreme situatie (zowel in de beek als op locaties die overstromen) te toetsen (simuleren) in een extreme situatie om te voorkomen dat er projecten uitgevoerd worden zonder dat er kennis is van de gevolgen benedenstrooms.

Aanbevelingen met betrekking tot de toepassing van beekherstel.

In de simulaties is het effect van beekherstel zowel direct benedenstrooms als verder benedenstrooms minimaal. In specifieke gevallen kan er vertraging, versnelling of piekafvlakking optreden. Het is echter nog onduidelijk wat de vertraging en piekafvlakking veroorzaakt. Als uit een

lokale studie blijkt dat de gevolgen van een beekherstelproject minimaal zijn, hoeft er niet aanvullend rekening gehouden te worden met de situatie in 's-Hertogenbosch in deze maatgevende situatie. Wel wordt er aangeraden om ook voor andere maatgevende situaties en herhalingstijden (zoals een situatie waarbij 's-Hertogenbosch nèt droog blijft) de gevolgen te bepalen om vast te stellen of 's-Hertogenbosch echt geen noemenswaardige gevolgen ondervindt van beekherstel.

Aanbevelingen met betrekking tot het ontwerp en de inzet van retentiegebieden.

Het aanleggen van retentiegebieden wordt gestimuleerd. Naast dat retentiegebieden een lokaal piekverlagend effect kunnen bewerkstelligen, blijven de effecten tot ver benedenstrooms zichtbaar. Wel is voor de bescherming van een gebied het optimaal om zo kort mogelijk voor deze locatie het retentiegebied aangelegd word omdat hier optimaal gestuurd kan worden om de piek te verlagen. Wanneer het retentiegebied ver bovenstrooms ligt kan het zijn dat door samenvall van het debiet van beken piekverlaging in één beek niet leidt tot een optimale piekverlaging van de som van de beken. Bij het ontwerp van retentiegebieden moet goed nagedacht worden in welke situatie het ingezet moet worden of hoe deze het meest effectief ingezet kan worden in verschillende situaties. Een retentiegebied kan een veel kleiner effect hebben als er een andere (extremere) situatie optreedt als waarvoor deze is ontworpen. Bij het modelleren van een retentiegebied voor een bepaalde maatgevende situatie wordt het aangeraden om ook andere (en extremere) situaties te modelleren om na te gaan of dit onverwachte gevolgen oplevert. Voor de retentiegebieden die in deze studie opgenomen zijn, is de eerste stap genomen en wordt aanbevolen om kritisch te kijken naar het functioneren van de gebieden in deze studie ter verbetering van het ontwerp, maar het daar niet bij te laten.

Bij het plannen van retentiegebieden zou gebiedsdekkend met verschillende maatgevende situaties nagegaan moeten worden of het mogelijk is om in alle gevallen meer optimale retentie te bewerkstelligen door retentiegebieden op elkaar af te stemmen. Door samenvall van de pieken van verschillende beken kan het uiteindelijk efficiënter zijn om van één beek niet de piek af te toppen maar eerder of later het retentiegebied in te zetten.

Aanbevelingen met betrekking tot vervolgonderzoek.

Kwantitatief onderzoek naar de situatie rond 's-Hertogenbosch

Aangezien de referentiesimulatie uitwijst dat de waterstand in 's-Hertogenbosch de 4,90m+ NAP ver overstijgt is het van het grootste belang dat de huidige situatie verbeterd geschematiseerd wordt en dat kwantitatief vastgesteld gaat worden wat er moet gebeuren om wateroverlast in 's-Hertogenbosch te voorkomen. Het Waterschap De Dommel is hier reeds mee bezig en heeft al een aantal aanbevelingen ter verbetering van de schematisatie ter harte genomen. Een zeer belangrijk onderdeel van het verbeteren van de schematisatie moet gezocht worden in de samenwerking met Waterschap Aa en Maas. Hier kunnen grote stappen gezet worden ter verbetering van de schematisatie en dus van de resultaten. De eerste stap is om Aa en Maas te vragen om met hun model, met de bui van Waterschap De Dommel de afvoer van de Aa te simuleren (zonder hoge Maas!) en deze afvoer met de juiste timing op het model van Waterschap De Dommel te zetten (met hoge Maas). Hierdoor zullen alsnog geen overstromingen in het beheergebied van Aa en Maas gesimuleerd worden. Daarom is het belangrijk om op den duur de modellen van Waterschap De Dommel en Waterschap Aa en Maas aan elkaar te koppelen. Aangezien beide waterschappen het zelfde systeem gebruiken is dit mogelijk.

Ook is het van groot belang om een gevoeligheidsanalyse van het GDHM-DO te laten maken, momenteel is onduidelijk waar in het model de grootste fouten worden gemaakt. Daardoor kan het zijn dat er relatief veel energie wordt gestoken in verbeteringen die de resultaten nauwelijks verbeteren.

Voor het kwantificeren van de gevolgen bij 's-Hertogenbosch is het verstandig om de maatgevende situatie nog eens onder de loep te nemen. Er wordt aangenomen dat de kans op samenvallen van hoogwater van De Dommel/Aa en de Maas gelijk is aan 0,8. Op basis hiervan wordt een Maas herhalingstijd van $T=120$ gebruikt. Voor hoogwater in De Dommel/Aa wordt $T=100$ gebruikt. Het

onderzoek waar de factor 0,8 vandaan komt maakt ook gebruik van veel lagere waarden van de herhalingstijden van de Aa/Dommel en Maas om tot de 0,8 te komen.

Voor het bepalen van een maatgevende (uniforme) bui wordt aangeraden gebruik te maken van de HKV buien of in ieder geval de analyse in dit onderzoek te beschouwen indien gekozen wordt voor een andere bui. Er wordt afgeraden om historische buien één op één te gebruiken voor beleidsanalyses aangezien iedere bui (in het verleden en in de toekomst) anders is. Daarom kan er beter gezocht worden naar een artificiële gemiddelde bui, en daarnaast een robuustheidsanalyse te maken.

In de modelstudies is nergens nagegaan of retentiegebieden en inundaties op het land in het GDHM-DO een in een realistische periode weer leeglopen. Ruim acht dagen na het openen van Crèvecoeur en zeven dagen na de bui, zijn er in het model nog zeer veel inundaties te zien (dit is het einde van de looptijd van het model). Het is aan te bevelen om na te gaan of het model het leeglopen van inundatiegebieden en retentiegebieden realistisch beschrijft.

Ten slotte is er met betrekking tot de verbetering van de modellering de aanbeveling om het aantal betrouwbare vaste debietmeetpunten uit te bereiden. Zonder ruimtelijk gedetailleerder meetgegevens van enkele decennia, zal het in de toekomst niet mogelijk zijn om de Neerslag-Afstrom in het gebied beter te bepalen en te modelleren. Dus om in de (verre) toekomst dit gedeelte van het model te verbeteren, moet er snel begonnen worden met meten (hierbij is het wel verstandig om op de gevoeligheidsanalyse te wachten).

Robuustheid

Een belangrijke factor van belang in beheergebied van De Dommel is het al dan niet samenvallen van afvoergolven. Daarnaast is in dit onderzoek aangegeven dat in verschillende maatgevende situaties het systeem (en de maatregelen) anders kunnen reageren. Vandaar dat het belangrijk is om in beeld te brengen wat de robuustheid is van het systeem door verschillende situaties te simuleren. Hierbij moet voornamelijk gedacht worden aan scenario's van niet gelijkmatig gebiedsdekkende neerslag (maar overtrekkende buien, of buien met een lokaal verschillend verloop), scenario's met een vroegere en latere Maasgolf en verschillende buivormen en herhalingstijden. Dit zal het inzicht meebrengen wat de bandbreedte is van de afvoergolf van de verschillende beken waarna gekeken kan worden welke situaties dit kan opleveren. Op basis van deze kennis kan pas echt een robuust watersysteem ingericht worden.

Individuele retentiegebied optimalisatiestudies

Het is aan te bevelen om een inventarisatie te doen om te bekijken voor welke van de bestaande en geplande retentiegebieden een optimalisatiestudie gedaan moet worden om te onderzoeken of de retentiegebieden bij verschillende maatgevende situaties effectief zijn en of de effectiviteit verbeterd kan worden, rekening houdend met de bovenstaande aanbevelingen met betrekking tot het ontwerp en de inzet van retentiegebieden.

Gevolgen van vernatten en vasthouden aan de bron

Naast beekherstel en retentie zijn twee andere speerpunten van het waterschap het vernatten van verdroogde natuurgebieden (conserveren) en het vasthouden aan de bron (piekreductie). Van deze maatregelen is nog weinig bekend wat de gevolgen zijn van deze maatregelen op de afvoergolven van de beken, en de situatie in 's-Hertogenbosch. Hiervoor is aan te bevelen om eerst voor een aantal veelvoorkomende landschapstypen meerdere locaties te modelleren met een fysisch grond- en oppervlaktewater model. Indien per landschapstype een typisch gedrag ten gevolge van één van de maatregelen te bepalen is, kan dit gedrag ingevoerd worden in het gebiedsdekkend model.

7 Literatuur

Aalders, P. (2003). *Optimalisatie en vergelijking van het Wageningen en NAM-model voor eht stroomgebied van de Beerze*. Wageningen: Wageningen Universiteit, vakgroep Waterhuishouding.

Aerts, J., Walraven, A., Veraart, J., van 't Klooster, S., Bannink, B., Sprong, T., et al. (2008). *Klimaat en Waterveiligheid in beleid*. AVV.

Alterra. (2003). *Effecten van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoer*.

Alterra. (2009). *Enquete beek(dal) herstelprojecten 2004-2008*. Wageningen: Alterra.

Alterra. (2008). *Waterberging op het landgoed lankheet*.

Arcadis. (2010). *Programma van eisen inlaatwerk groene rivier en verkenning mogelijke technieken*. 's-Hertogenbosch: Waterschap Aa en Maas.

Bakel, P. v., Poelman, A., & Stuyt, L. (2007). *Effectiviteit van water vasthouden in Noord-Brabant: inzicht door modelberekeningen*. Wageningen: Alterra.

Balkenende e.a., J. (2003, Juli). Nationaal bestuursakkoord water. Den Haag: Nederland leeft met water.

Brauer, C. (2007). *The Issel catchment: Water balance study and rainfall-runoff modeling*. Wageningen: Wageningen University.

Commissie Water beheer 21e eeuw. (2000). *Waterbeleid voor de 21e eeuw*.

Delft Hydraulics Software. (2011, Januari 12). Opgeroepen op Januari 12, 2011, van Deltares: <http://delftsoftware.wldelft.nl>

Dienst Landinrichting en Beheer Landbouwgronden, D. (1996). *Handleiding DIWA water Theoretische achtergronden*. Utrecht: Dienst Landinrichting en Beheer Landbouwgronden.

EU. (2000, december 22). RICHTLIJN 2000/60/EG. *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*. Luxemburg.

Heidemij. (1995). *HOWABO Fase 1: Inventarisatie en oplossingsrichtingen*.

Heidemij. (1996). *HOWABO Fase 2: Modelberekeningen en uitwerking maatregelen*.

HKV_lijn in water. (2011). *memoranduk PR1973_10_NT01_Bepaling golven definitief*. HKV_lijn in water.

HKV_lijn in water. (2004). *Onderzoek speelruimte maatregelen stroomgebieden langs de Overijsselsche Vecht*.

HKV_lijn in water. (2009). *Samenhang afvoergolven Aa, Dommel en Maas – benodigde verlaging bij vertraging van de Aa en De Dommel*.

Ijpelaar, R. (2010, Juni 16). Emailcontact Ruben Ijpelaar m.b.t afvoercapaciteit Bovenlandsche Sluis.

Ijpelaar, R., Groot, S., & en van de Wouw, M. (2009). De trits van hoogwatergolven Aa, Dommel en Maas bij 's-Hertogenbosch. *H2O nr.6*, 33-35.

Kerngroep Water Vasthouden aan de Bron. (2010, Februari). Nieuwsbrief Water Vasthouden aan de Bron.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2000, december). Anders omgaan met water, Waterbeleid in de 21e eeuw.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2000, december). Anders omgaan met water, Waterbeleid in de 21e eeuw.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2006). Decemhernota KRW/WB21, beleidsbrief 2005.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat et al. (2009, december 22). Stroomgebiedbeheerplan Maas 2009-2015. Deventer.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RIZA. (2005). *Laterale toestroming Maas en Rijn onder maatgevende omstandigheden. Memo ADV*2005-003(A)*.

Ministerie van VROM. (2010, april 12). KRW. <http://www.vrom.nl/pagina.html?id=21579>.

Monincx, S., Termes, P., & en Tromp, G. (2006). Regie afvoerpieken noodzakelijk om problemen Overijsselse Vecht te voorkomen. *H2O nr.23*, 44-47.

Robinson, M. (1990). *Impact of improved land drainage on river flows*. Wallingford: Institute of Hydrology.

Royal Haskoning. (2010). *Ontwikkeling van het Regionale Waterbergingsmodel Dommel*. Boxtel: Waterschap De Dommel.

RWS. (2010, September 9). Emailcontact Eric Sprokkereef mbt. looptijden van de Maas.

STOWA. (2005). *Inventarisatie synergie Kaderrichtlijn Water en Waterbeleid 21e eeuw*. Utrecht: STOWA.

STOWA. (2004). *Waterberging en natuur*.

Unie van Waterschappen. (2003). *Normering regionale wateroverlast*.

Velner, R. (2002). *Neerslagafvoermodellering van de bemalinggebieden Streukelerzijl en Galgenrak met DU FLOW-RAM en het Wageningenmodel*. Wageningen.

Verdonkschot, P. (2007). *Het brede beekdal als klimaatbestendige buffer in de veranderende leefomgeving*. Wageningen: Alterra.

Vergouwe, N., Niewold, H., ten Heggeler, N., & en Tempelaars, J. (2007). Beekherstel in Brabant, enkele effecten op het afvoerpatroon. *H2O nr.6*, 52-55.

WageningenUR-Alterra-SIMGRO. (2011). Opgeroepen op Januari 12, 2011, van WageningenUR: <http://www.alterra.wur.nl/UK/research/Specialisation+water+and+climate/Integrated+Water+Management/SIMGRO>

Warmerdam, P. (1997). *Neerslagafvoermodellen Colledictaat K150-208*. Wageningen: Vakgroep Waterhuishouding Landbouwuniversiteit Wageningen.

Warmerdam, P., Kole, J., & en Chormanski, J. (1996). *Modelling rainfall-runoff processes in the Hupselse beek research basin. Proceedings Strassbourg Conference on Ecohydrological processes in small basins*. Unesco Paris: Hydrology nr.14,.

Waterschap Aa en Maas. (2010). *Beekherstel Sang & Goorkens*. 's-Hertogenbosch: Waterschap Aa en Maas.

Waterschap Aa en Maas. (2009). *Beleidsnota Beekherstel*. 's-Hertogenbosch.

Waterschap Aa en Maas. (2009). *Waterbeheerplan 2010-2015*.

Waterschap De Dommel. (2010). *Beekherstel en hydrologisch modelleren*. Waterschap De Dommel.

Waterschap De Dommel. (2010). *Krachtig Water. Waterbeheerplan 2010-2015*. Boxtel.

Waterschap De Dommel. (2006). *Modellering lokale effecten van beekherstel op het afvoerpatroon*.

Waterschap De Dommel. (2010). *Ontwikkeling van het Regionale Waterbergingsmodel voor het stroomgebied van De Dommel*. Boxtel: WS De Dommel.

Waterschap De Dommel. (2010). *Watersysteemanalyse gestuurde waterberging Boven-Dommel*. Boxtel: Waterschap De Dommel.

Wouw, M. v. (2010, Juli 12). Persoonlijke communicatie. (N. Entzinger, Interviewer)

Bijlagen:

Bijlage 1: Theorie waterbeleid	1
Bijlage 2: Hoogwater situatie 's-Hertogenbosch	9
Bijlage 3: Modelanalyse	13
Bijlage 4: Buikeuze	17
Bijlage 5: Afvoergolven referentiesituatie	31
Bijlage 6: Inundatiekaarten	35
Bijlage 7: Literatuurstudie.....	39

1 Bijlage 1: Theorie waterbeleid

1.1 KRW en WB21

1.1.1 Inleiding

In 2003 ondertekenden de unie van waterschappen, de vereniging Nederlandse gemeenten, het interprovinciaal overleg, de staatssecretaris van verkeer en waterstaat en de Minister-president het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). Het NBW beschrijft hoe de overheden de handen ineen slaan om stapsgewijs gezamenlijk te werken aan een Nederland dat kan leven met water. Hierin staat ondermeer beschreven dat de bovenstaande organisaties werk maken van het uitvoeren van twee belangrijke plannen. De Kaderrichtlijn Water (KRW) en Waterbeleid 21e eeuw (WB21) (Balkenende J.P., 2003). De kaderrichtlijn water is een Europese verplichting die ervoor moet zorgen dat in 2015 het water in Europa in goede chemische, ecologische en kwantitatieve toestand is (RICHTLIJN 2000/60/EG, 2000). Onder bepaalde omstandigheden kan twee maal zes jaar uitstel gegeven worden tot uiterlijk 2027. Vanuit WB21 dienen de waterschappen het watersysteem in kwantitatief opzicht in orde te hebben in 2015 en op orde te houden met oog op klimaatveranderingen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006).

1.1.2 KRW

De betekenis van de KRW

De Kaderrichtlijn water (KRW) is een Europese richtlijn die gericht is op de verbetering van de kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater. De KRW is sinds december 2000 van kracht en behelst een programma om waterverontreiniging van oppervlaktewater en grondwater internationaal aan te pakken. De lidstaten hebben de verplichting op zich genomen om de kwaliteit van alle Europese wateren in een goede toestand te brengen en te houden. De KRW omvat een aantal al bestaande EU-richtlijnen op het gebied van waterkwaliteit. Nieuw aan de KRW zijn onder anderen de aandacht voor goede ecologische kwaliteit van oppervlaktewateren en de stroomgebiedbenadering.

De belangrijkste uitgangspunten van de KRW zijn:

- De vervuiler betaalt
- De gebruiker betaalt
- Na 2000 geen achteruitgang van de chemische en ecologische toestand van het water
- Resultaatsverplichting in 2015
- Stroomgebiedbenadering

(Ministerie van VROM, 2010)

In 2015 moeten de KRW doelstellingen gehaald zijn, waar dit niet haalbaar is had dit in 2009 aangegeven moeten zijn bij de EU. Er kan maximaal twee maal zes jaar uitstel gevraagd worden. Als er niet voldaan wordt aan de KRW richtlijnen, volgt een hoge boete.

De doelen van de KRW

De Kaderrichtlijn water moet ervoor zorgen dat de kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater in 2015 op orde is. In dat jaar moet het oppervlaktewater voldoen aan normen voor bepaalde chemische stoffen. Worden die normen gehaald, dan spreken we van 'een goede chemische toestand'. Daarnaast moet het oppervlaktewater goed zijn voor een gevarieerde planten- en dierenwereld. Is dat het geval, dan heet dat 'een goede ecologische toestand'. Hieronder valt ook

een groot aantal chemische stoffen. Voor het grondwater gelden aparte normen voor chemische stoffen. Daarnaast moet de grondwatervoorraad stabiel zijn en mogen bijvoorbeeld natuurgebieden niet verdrogen door een te lage grondwaterstand (goede kwantitatieve toestand).

Wat precies bedoeld wordt met een goede chemische toestand voor oppervlaktewater staat in de bestaande Europese richtlijnen (onder anderen de EU-richtlijn Prioritaire Stoffen). De ecologische doelstellingen stellen de lidstaten onderling vast in zogeheten (internationale) stroomgebiedbeheerplannen. Voor verschillende typen wateren gelden verschillende ecologische doelstellingen. In een plas leven bijvoorbeeld andere planten- en diersoorten dan in kustwater. Daarom verschillen de ecologische doelen per watertype. De chemische normen zijn bij ieder water ongeveer hetzelfde, met uitzondering van de nutriënten. Daarvoor geldt weer wel een benadering die per watertype kan verschillen. (Ministerie van VROM, 2010)

De implementatie van de KRW

Ieder waterlichaam dient te voldoen aan de KRW. Aangezien de KRW doelen niet zijn gekwantificeerd maar woordelijk zijn omschreven, zijn maatlatten en een typologie opgesteld om de ecologische toestand van waterlichamen te beoordelen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie statussen van waterlichamen: natuurlijk, sterk veranderd en kunstmatig, daarnaast zijn er 55 typen waterlichamen onderscheiden. Voor al deze typen en statussen zijn verschillende voorwaarden waaraan voldaan moet worden om het predicaat “goede ecologische toestand” te krijgen.

Voor ieder stroomgebiedsdistrict – al dan niet internationaal – is een stroomgebiedbeheerplan opgesteld. Nederland maakt deel uit van vier stroomgebiedsdistricten, namelijk dat van de Eems, Maas, Rijn en Schelde. In deze stroomgebiedbeheerplannen worden alle milieudoelstellingen voor het grond- en oppervlaktewater en de beschermde gebieden opgenomen. Ook staan de maatregelen erin om deze doelstellingen te bereiken. Hierbij moet men denken aan herstel- en inrichtingsmaatregelen voor oppervlaktewateren, zoals het verwijderen van waterbodems en het hermeanderen van waterlopen, het verminderen van belastende lozingen door RWZI's en rioleringen, het verminderen van emissies uit de landbouw en industrie en andere diffuse bronnen. (Ministerie van verkeer en Waterstaat et al., 2009)

De gevolgen van de KRW voor de hydraulische situatie

In de Nederlandse geschiedenis zijn ontelbare acties uitgevoerd om het land te draineren en op andere plaatsen te vernatten. Hierdoor is de ecologische toestand sterk verslechterd. Een groot aantal KRW maatregelen hebben dan ook betrekking op het natuurlijker aanleggen van waterlopen, het vernatten van natuurgebieden en het verwijderen van stuwen. Dit om een natuurlijker en betere omgeving te creëren voor de waterflora en -fauna.

1.1.3 WB21 en het NBW

De betekenis van WB21 en NBW

Na de wateroverlast in de jaren '90 heeft het rijk in 1999 de Commissie Waterbeheer 21e eeuw (WB21) verzocht advies uit te brengen over de waterhuishoudkundige inrichting van Nederland. De commissie stelt vast dat doordat het beleid in de 20 eeuw vooral is gebaseerd op de beheersing van het water, het huidige watersysteem water onvoldoende kan vasthouden en bergen. Een andere oorzaak van de huidige problemen in de water huishouding is te wijten aan is de manier waarop Nederland de afgelopen vijftig jaar is ingericht (ruimtelijke ontwikkelingen) (J. Aerts, 2008).

Daarnaast concludeert de commissie dat er veel mankeert aan het beleid anno 2000. De waterhuishouding is niet op orde en het huidige systeem is niet in staat toekomstige ontwikkelingen op te vangen. Ook ontbreekt het nodige aan betrokkenheid van politiek en burger, sturing en regie en aan het besef van kosten en baten. Men pleit voor een andere aanpak van het waterbeleid, voor

meer ruimte voor water, voor anticipatie de toekomst in relatie tot klimaatveranderingen en bodemdaling, en water zoveel mogelijk in het systeem te houden in plaats van af te voeren. (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000)

Na dit advies van de commissie WB21 zijn het rijk, het Interprovinciaal Overleg (IPO), de Vereniging van Nederlandse Gemeenten (VNG) en de Unie van Waterschappen (UvW) tot de conclusie gekomen dat het tijd was om de problematiek op een omvattende, samenhangende manier aan de orde te stellen en maatregelen voor te bereiden. Dit is vastgesteld in de "Startovereenkomst Waterbeleid 21e eeuw". De essentie van de visie is dat water weer meer ruimte moet krijgen, voordat het die ruimte zelf neemt. Nederland moet weer leren leven met water.

De doelen van WB21

De doelen van WB21 zijn het ontwikkelen van een nieuw waterbeleid om de Nederlandse waterhuishouding op orde te brengen en op orde te houden met oog op klimatologische en geofysische ontwikkelingen. Met het 'op orde brengen' wordt bedoeld dat de waterveiligheid vergroot wordt alsmede dat de kans op wateroverlast verkleind wordt. Dit moet gebeuren door herstel van veerkrachtige watersystemen. Dit kan door water de ruimte te geven en een betere afstemming van het grondgebruik. Een belangrijk credo van het WB21 is de drietrap vasthouden-bergen-afvoeren die duidt dat het regenwater zoveel mogelijk bovenstrooms wordt gehouden en de problemen zo min mogelijk worden afgewenteld op gebieden benedenstrooms. Naast de aandacht voor een overschot aan water maken de aanpak van watertekorten en de realisatie van het Gewenst Grond- en Oppervlaktewater Regime (GGOR) onderdeel uit van WB21. Een ander belangrijk punt voor het nieuwe waterbeleid is dat burger en politiek meer betrokken raken bij het waterbeheer. (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000). Volgens de commissie moet er één samenhangend waterbeleid worden gevoerd voor hoofdsystemen en regionale watersystemen en er mag geen ruimte meer onttrokken worden aan de rivier. Daarnaast moet water een sturend principe worden bij de ruimtelijke inrichting en het grondgebruik in Nederland.

Met betrekking tot de toekomstbestendigheid van het waterbeheer worden toekomstscenario's met betrekking tot klimaatveranderingen, zeespiegelstijging en bodemdaling voor 2050 in beschouwing genomen. Ook recente veranderingen in landbouw, natuur en verstedelijking hebben effecten op het waterbeheer, deze worden ook zo goed als mogelijk meegenomen. (J. Aerts, 2008)

De implementatie van WB21

Ter implementatie van het WB21 is in 2003 is het Nationaal Bestuursakkoord Water ondertekend. Hiermee zeggen Rijk, provincies, gemeenten en waterschappen toe om samen, met een integrale aanpak plannen gaan maken om de problemen met en rond lokale wateroverlast op te lossen. Vervolgens worden deze plannen vertaald in uitvoerbare maatregelen.

Op landelijke schaal is in het kader van de NBW normen een toetsing uitgevoerd naar in hoeverre regionale watersystemen voldoen aan werknormen zoals gedefinieerd in het NBW. Hierbij wordt landgebruik gekoppeld aan wateroverlast. Voor grasland mag er maar eens in de 10 jaar wateroverlast voorkomen. Voor akkerbouw is dit 1/25 jaar, hoogwaardige land- en tuinbouw en glastuinbouw 1/50 jaar en voor bebouwd gebied 1/100 jaar (Unie van Waterschappen, 2003). In 2005 zijn de locaties van de 'blauwe knooppunten' vastgelegd. Dit zijn de belangrijkste uitwisselpunten tussen het hoofd- en het regionale systeem en zijn knelpunten waar op landelijke schaal problemen kunnen ontstaan (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006).

Vanwege de ontwikkelingen van het NBW van planvorming naar uitvoering, nieuwe klimaatscenario's en de KRW is in 2008 het NBW geactualiseerd. Er zijn nieuwe afspraken gemaakt over toepassing van klimaatscenario's, de stedelijke wateropgave en de afstemming tussen water en ruimtelijke ontwikkelingen. Ook is er meer aandacht voor de implementatie van de Kaderrichtlijn Water. Met de

actualisatie van het NBW word meer gericht op aanpak, planning en financiering en zeggen de betrokken partijen nogmaals het belang te onderstrepen van samenwerking voor een duurzaam en klimaatbestendig waterbeheer. (J. Aerts, 2008)

De gevolgen van WB21 voor de hydraulische situatie

WB21 gaat uit van de gewenste reeks ‘vasthouden – bergen – afvoeren’. Binnen deze categorieën zijn de volgende maatregelen te onderscheiden:

Vasthouden	Bergen	Afvoeren
• vergroten (open) wateroppervlak • beek- en kreekherstel • anti-verdroging • waterconservering (langer vasthouden van water in een gebied)	• aanleg en inrichten retentiegebieden voor piekberging	• vergroten aan- en afvoercapaciteit van duikers • vergroten aan- en afvoercapaciteit van gemalen • vergroten afvoercapaciteit van waterlopen (doorstroomprofiel)

Tabel 9: Maatregelen WB21 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006)

De Unie van Waterschappen heeft de term ‘bergen’ als volgt gedefinieerd: *“Van bergen is sprake indien bij wateroverlastsituaties voor het tijdelijk opslaan van water in bergingsgebieden een actieve handeling nodig is om het water in het gebied in en uit te laten.”* (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006)

De effecten van deze hydraulische gevolgen verschillen per situatie en zijn grotendeels afhankelijk van de gebiedsspecifieke factoren en van de mate van neerslag. Hoewel niet een gevolg van WB21, kunnen veranderingen in het klimaat, bodemdaling en het aangepaste landgebruik effect hebben op de hydraulische situatie. Met behulp van Scenario’s voor 2050 worden deze effecten meegenomen in de studies voor waterbeleid.

1.1.4 Synergie en conflicten KRW en WB21

Maatregelen op het gebied van WB21 volgen uit een nationale verplichting en vallen niet onder de Europese verplichting van de Kaderrichtlijn Water. Maatregelen die worden uitgevoerd voor het bereiken van zowel WB21- als KRW -doelen, vallen wel onder de KRW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006).

De meeste waterschappen doorlopen op strategisch niveau de KRW en WB21 apart en brengen deze lijnen samen in de concrete planvorming en uitvoering. Om op strategisch niveau de KRW en WB21 te integreren wordt als risicovol beschouwd voor de voortgang van WB21. Op uitvoeringsniveau wordt het samenbrengen gezien als een doelmatige en efficiënte inzet van geld, ruimte en menskracht om beide beleidskaders uit te voeren (STOWA, 2005).

De doelen van WB21 en de KRW komen bij elkaar. Inrichtingsmaatregelen voor het reduceren van wateroverlast blijken vaak ook effectief bij het bereiken van de ecologische doelen van de KRW. Hoewel er in sommige gevallen conflicterende belangen kunnen zijn, wordt er vooral van uitgegaan dat maatregelen als beek- en kreekherstel en anti verdroging een positief effect hebben op zowel de belangen vanuit WB21 als de KRW (STOWA, 2005). De waterschappen in hoog-Nederland zijn al jaren bezig met beekprojecten als beken ruimte geven, beekherstel en dergelijke. Dit soort maatregelen vallen sinds een paar jaar onder WB21. Meestal verbeteren deze maatregelen de ecologische toestand van de beken, waardoor met veel van de beekprojecten ook al gewerkt aan de

KRW. Bij alle waterschappen is het normaal om waterkwantiteits en waterkwaliteits aspecten integraal mee te nemen in de uitvoeringsfase van projecten (STOWA, 2005).

Andere punten van synergie zijn dat de GGOR en de KRW veel overeenkomstige belangen hebben en zich beiden in dezelfde fase bevinden. Daarnaast is het belang van droge voeten bekend en kan de KRW meeliften op de populariteit van waterveiligheid om draagvlak voor maatregelen te verkrijgen. Gezamenlijk komen WB21 en KRW ook hoger op de maatschappelijke agenda.

Conflicten kunnen optreden waar maatregelen voor WB21 een negatieve impact hebben op het KRW beleid en vica versa, of waar de gevolgen van ingrepen nog onbekend zijn. Dit is een probleem, omdat het risico aanwezig is dat inrichtingsmaatregelen de ecologische toestand van wateren negatief beïnvloeden en zo de aankomende doelstellingen van de KRW moeilijker bereikbaar maken. Het gebrek aan gegevens en kennis ten aanzien van de KRW, met name voor ingreep – effect relaties is een knelpunt voor synergie (STOWA, 2005).

1.2 Hydraulische situatie in beekdalen

1.2.1 Een beekdal

Een beekdal is een lager gelegen gebied waar een beek door het dekzand stroomt. De beekdalen hellen meestal in de richting van de beek en leiden het water vanuit de hoger gelegen zandgronden naar de rivieren. Beekdalen hebben een (voor Nederlandse maatstaven) hoog gradiëntverloop, hierdoor is ook de stroomsnelheid relatief hoog.

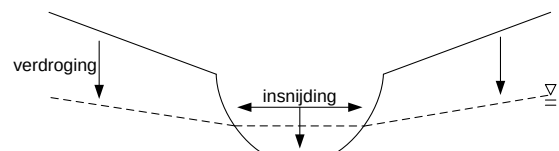
In een natuurlijke situatie stroomt een beek door een gevarieerd landschap van bossen, struiken, gras en moeras. De beken kronkelen en hebben een geleidelijke overgang in het landschap. Soms is het een duidelijke beek, soms lijkt het een doorstroomd moeras. Het stroomgebied heeft buffercapaciteit en kan piekafvoeren opvangen doordat het dal periodiek overstroomt. Ten behoeve van de landbouw zijn veel beken aangepast. De meeste Nederlandse beken zijn nu recht, diep ingesneden en gestuwd. De overgang tussen beek en het omringende land is abrupt. Er zijn weinig planten en dieren in en rond de beek en de beekdalen zijn vaak verdroogd. (Verdonkschot, 2007)



Figuur 24: Een natuurlijke beek; foto en schematisatie



Figuur 25: Een niet-natuurlijk beek; foto en schematisatie

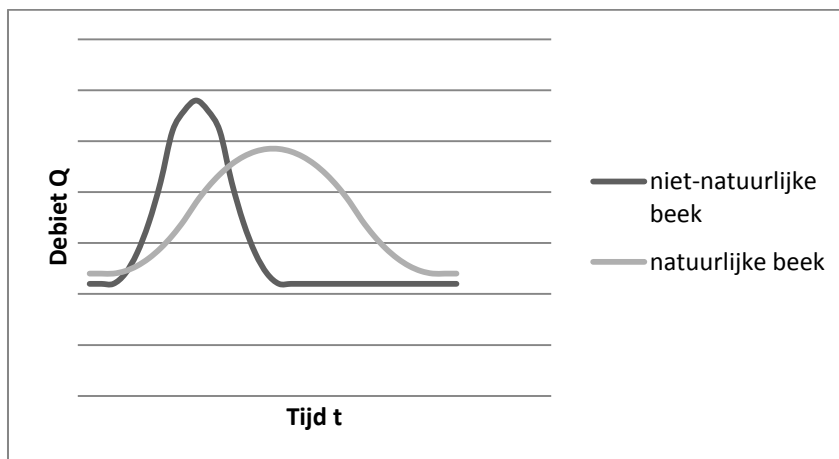


In natuurlijke beekdalen slingert de beek door het beekdal en zijn er veel stremmingen in de beek zoals omgevallen bomen. Hierdoor voert een natuurlijke beek haar water langzaam en gestaag af. In natuurlijke beken komt er regelmatig water op het maaiveld te staan, de beek treedt buiten haar oevers. Vandaar dat men vroeger nabij deze beken er rekening mee hield dat het land langs de beek

met enige regelmaat blank staat. Deze overstromingen veroorzaakten daardoor weinig schade en men was er gewend mee te leven.

Ten behoeve van de landbouw en ander grondgebruik zijn veel meanderende beken recht getrokken, worden obstakels in het water verwijderd en is de doorsnede van de beek vergroot. Daarnaast wordt het aanliggende land gedraineerd. In gevallen waarbij de bodem niet gevoelig is voor verzadiging (normale regenval, goede doorlatendheid van de grond, laag verhang), leidt drainage tot een verhoging van de afvoerpiek doordat water sneller wordt afgevoerd naar de beek. In gevallen waarbij de bodem gevoelig is voor verzadiging (slechte doorlatendheid, extreme neerslag, hoog verhang), leidt drainage vaak tot een verlaging van afvoerpieken doordat er minder directe afvoer over het land plaatsvindt (Robinson, Impact of improved land drainage on river flows, 1990).

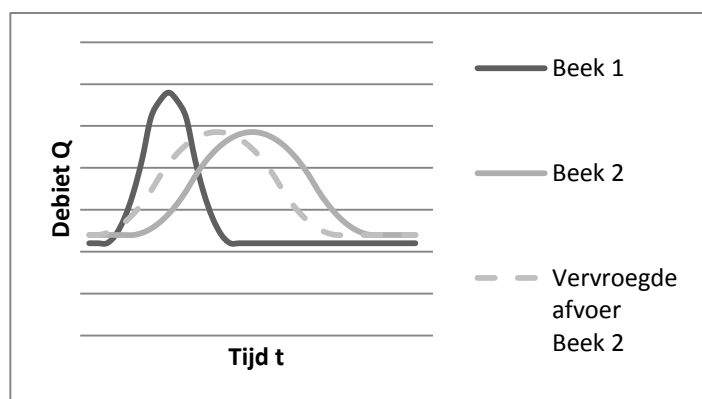
Aangezien veel beken hun natuurlijke buffer zijn kwijtgeraakt en met name vanwege het feit dat tegenwoordig het land langs de beken intensief gebruikt wordt voor landbouw, huisvesting en industrie en tal van andere functies, is er vaker sprake van wateroverlast. Vaak wordt gesteld dat natuurlijke beken een hogere basisafvoer hebben maar een lagere piekafvoer die ook later optreedt en langer duurt. Toch is het onduidelijk of dit in extreme situaties altijd het geval is.



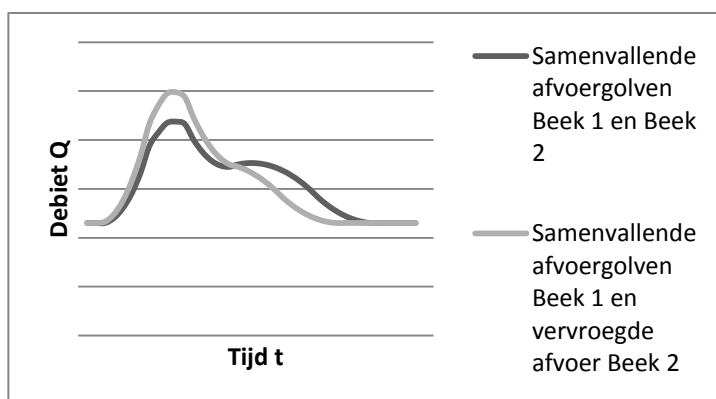
Figuur 26: Het veronderstelde debietverloop van een hoogwatergolf in een natuurlijke en een niet-natuurlijke beek met een afvoergebied dat niet gevoelig is voor verzadiging.

1.2.2 Samenkomst van Hoogwatergolven

Waar beekdalen op elkaar uitkomen of waar meerdere beekdalen samen uitkomen bestaat de kans dat een hoogwatergolf uit beide beekdalen tegelijk komt en tezamen een versterkte hoogwatergolf opleveren. Dit heeft grote gevolgen voor de waterstanden ter plaatse. Het samenvallen van de afvoergolven verschilt per situatie. Het is uiteraard afhankelijk van het betreffende gebied en de spreiding van de bui, maar het is ook afhankelijk van de omvang van de bui. Vergelijkbare buien met verschillende intensiteiten kunnen niet alleen voor een verhoging van een afvoerpiek maar voor een verschuiving (versnelling/vertraging) van een afvoerpiek leiden. Vandaar dat het belangrijk is om voor iedere specifieke situatie de samenvval van de afvoerpieken te modelleren.



Figuur 27: Versnelling van de afvoer van beek 2.



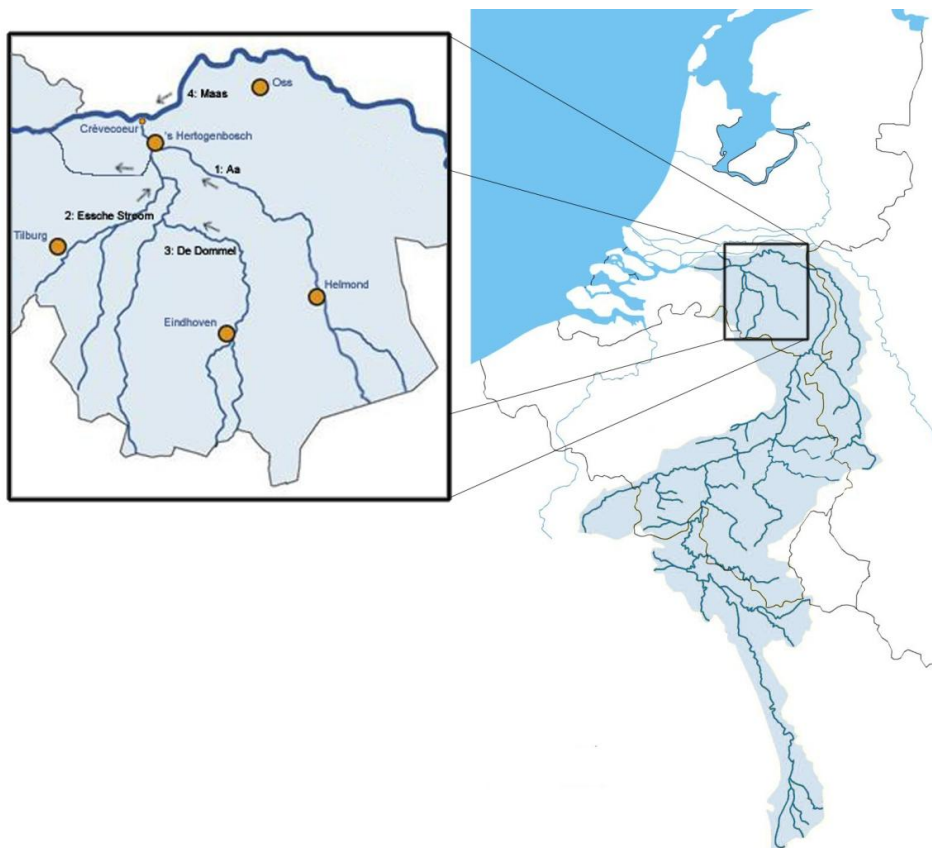
Figuur 28: De verhoogde piek afvoer door versnelling van de afvoer van beek 2.

Om waar beekdalen samenkomen hoogwaterproblematiek te voorkomen of te verminderen is het naast het verkleinen van de afvoer van de individuele beken belangrijk om ook de samenvol te analyseren. Versnelling of vertraging van bepaalde afvoergolven kan een groot effect hebben op de waterstanden. In dit soort situaties is dus voor de waterveiligheid en wateroverlastbeperking niet alleen het WB21 credo 'vasthouden – bergen – afvoeren' belangrijk, maar ook het versnellen of vertragen van hoogwatergolven. Het kan hierdoor voorkomen dat de algemene voorkeursalternatieven -vasthouden en bergen- een negatieve invloed hebben op de situatie benedenstrooms. Het WB21 credo dient dus niet in alle gevallen blind gevolgd te worden om afwenteling van de problemen te voorkomen. Waar mogelijk moet gezocht worden naar oplossingen die zowel aan het WB21 credo voldoen als wel dat deze toch geen negatieve invloed op de situatie benedenstrooms heeft.

2 Bijlage 2: Hoogwater situatie 's-Hertogenbosch

2.1 Systeembeschrijving

Bij 's-Hertogenbosch komt het water van vele beken uit de Brabantse hogere zandgronden bijeen. Deze beken mondden uit in de Aa en de Dommel, die het water verder vervoeren naar 's-Hertogenbosch waar het via de Dieze en het Drongelens Kanaal uitmondt in de Maas. Het water van de Dieze wordt onder vrij verval bij Crèvecoeur afgevoerd naar de Maas. Het water van het Drongelens kanaal wordt onder vrij verval bij de Bovenlandse Sluis afgevoerd op de Maas, 15 kilometer stroomafwaarts van Crèvecoeur. De Essche Stroom mondt vlak voor 's-Hertogenbosch uit in de Dommel en haar afvoerregime is dus ook van invloed op de situatie rondt 's-Hertogenbosch. Het watersysteem rondt 's-Hertogenbosch is te zien in figuur 1.



Figuur 1: Stroomgebied van de Maas met inzet van stroomgebieden de Dommel en de Aa. Met nummers is de volgorde van de aankomst van de hoogwatergolven bij 's-Hertogenbosch aangegeven. Vrij naar: www.brabantsewaterkaart.nl.

Het stroomgebied van de Dommel bedraagt ongeveer 180.000 hectare, Ongeveer één vijfde daarvan ligt in België en een zeer klein deel in Limburg. Het overgrote deel ligt in Noord Brabant. De Dommel is 95 kilometer lang, 10km daarvan ligt in België. De bron ligt op 39m boven NAP en de uitmonding op 4m boven NAP. Één derde van het stroomgebied van de Dommel bestaat uit stedelijk gebied, één derde uit landbouw en één derde uit natuur. Bij Eindhoven mondden de Kleine Dommel en de Tongelreep in de Dommel uit. De Leijen, de Beerze en de Reusel komen uit in de Essche stroom die bij Vught in de Dommel uitmondt. Bij 's-Hertogenbosch takt het Drongelens kanaal af van de Dommel en in het centrum van 's-Hertogenbosch vormen de Dommel en de Aa samen de Dieze die bij Crèvecoeur uitmondt in de Maas. De Dommel en zijn zijtakken hebben een meanderend karakter.

De Aa is 58 kilometer lang en heeft een stroomgebied van 87.000 hectare. De Aa is een gekanaliseerde beek, waar lokaal hermeandering toegepast is. Er wordt aan gewerkt om de beek natuurlijker te maken en meer sinuositeit terug te geven (Waterschap Aa en Maas, 2009). Langs de Aa stroomt de Zuid-Willemsvaart die bevaarbaar is.

Regenwater dat in het bassin van de Aa valt, komt het snelst aan in 's-Hertogenbosch. De Dommel voert gemiddeld één dag later af en de Maas heeft gemiddeld drie dagen na de Dommel hoogwater (Heidemij, 1996). In tabel 1 is duidelijk zichtbaar dat na extreme regenval de Aa en de Dommel een veelvoud van hun gemiddelde debiet kunnen vervoeren. De Dieze kan maximaal $160\text{m}^3/\text{s}$ afvoeren (Heidemij, 1995) en het Drongelens kanaal $100\text{m}^3/\text{s}$ (Arcadis, 2005).

Debeten Aa en Dommel (in m^3/s)		
	Aa	Dommel
Gemiddeld	4.6	14
Maatgevend (gem. eens per jaar)	38	76
Maximaal (gem. 1/100 jaar)	106	140

Tabel 1: Debeten van de Aa en de Dommel (Bron: Dommel; frequentieoverzicht afvoeren 1978-2006 meetpunt P10 en Watersysteemanalyse run11 huidige situatie T100. Aa; (Grontmij, 2003)).

2.2 Wateroverlast in de jaren '90

In 1993 en 1995 was er rond 's-Hertogenbosch wateroverlast. Door langere periodes van hevige regenval konden de Dommel en de Aa niet meer voldoende afwateren op de Maas. In 1995 was het afwateringsprobleem zo groot dat door het falen van een Dommelkade het gebied Bossche Broek en een deel van de rijksweg A2 onder water liep. Dankzij het falen van deze kade is verdere overlast in 's-Hertogenbosch uitgebleven. Naar aanleiding van deze gebeurtenissen zijn er HOWABO (Hoogwaterbescherming 's-Hertogenbosch)-studies gestart die de situatie van 1995 onderzoeken de hoogwaterrisico's van 's-Hertogenbosch in kaart brengen en mogelijkheden onderzoeken tot het terugdringen van de kans op wateroverlast rond 's-Hertogenbosch naar 1/150 jaar. In 1998 was er ook hoogwater op de Aa en Dommel waardoor wateroverlast optrad in de beekdalen, maar doordat de Maas relatief laag stond kon er bij Crèvecoeur afgewaterd worden en ontstonden bij 's-Hertogenbosch geen problemen (Ijpelaar R., 2009).

Door aangelegde kades en de Maaswerken in lijn met het beleid Ruimte voor Rivieren is na 1995 de afvoergolf van de Maas versneld, wat de kans op het samenvallen van de hoogwatergolven van de Maas, de Aa en de Dommel vergroot is en de kans op wateroverlast in en rond 's-Hertogenbosch vergroot (HKV lijn in water, 2005). Om dit tegen te voorkomen zijn er afspraken gemaakt over "Compensatie benedenstroomse effecten van de Maaswerken" (COBEMA). Hierin is afgesproken dat er maatregelen genomen worden in de beheersgebieden van de Aa en de Dommel om de problematiek te verminderen en de kans van 1/150 jaar te

Klopt de kans op hoogwater?

In Heidemij 1996 (Fase 2 HOWABO) is onderzocht dat de kans op samenvallen van de Maasgolf en de hoogwatergolven van Dommel en Aa 0,8 is. Echter, er is hier geanalyseerd op basis van 17 jaar meetgegevens (1980-1996) en de 2 hoogste afvoeren per jaar zijn meegenomen in de berekening. Er wordt aangegeven dat bij hogere afvoeren de kans op samenvallen convergeert naar 1. Aangezien er in de huidige berekeningen uit wordt gegaan van extreme situaties (1/150 jaar), welke niet zijn voorgekomen in de tijd van 1980-1996 en er in dit het onderzoek van Heidemij ook relatief droge jaren meegenomen zijn; lijkt het aannemelijker om uit te gaan van een kans op samenvallen van 1 in plaats van 0,8.

Daarnaast is een 1/150 situatie niet puur afhankelijk van de kans van voorkomen van een maasgolf met een factor erover. De kans op hoogwaterproblemen rondt 's-Hertogenbosch begint bij een combinatie waarbij de Aa en de Dommel meer dan $100\text{m}^3/\text{s}$ water aanvoeren en de sluis bij Crèvecoeur dicht is. De belangrijkste parameters voor het verkrijgen van een kans van 1/150 zijn dus: De gezamenlijke afvoer van Aa & Dommel en de periode (moment en duur) dat de sluis bij Crèvecoeur dicht zit.

realiseren. Naar aanleiding hiervan is Bossche Broek ingericht als retentiegebied en zijn vele andere (kleinere) retentiegebieden aangelegd (HKV lijn in water, 2005).

2.3 Wateroverlast 's-Hertogenbosch

Zelfs bij extreme regenval in de stroomgebied van de Aa en de Dommel treden er geen hoogwaterproblemen op bij 's-Hertogenbosch zolang er bij Crèvecœur en de Bovenlandse sluis gespuid kan worden aangezien de Dieze en het Drongelens kanaal voldoende capaciteit hebben. De problemen met afvoer op de Maas beginnen pas als er meerdere opeenvolgende dagen ernstige regenval is; en er tegelijk hoogwater op de Maas en hoogwater in de Aa, de Dommel en de aanvoerende waterlopen. Wanneer het Maaspeil hoger wordt dan 4.90m boven NAP en stijgt, wordt de sluis bij Crèvecœur gesloten om te voorkomen dat Maaswater 's-Hertogenbosch instroomt (Arcadis, 2005). In dit geval wordt alle afvoer van het Dommel/Aa systeem via het Drongelens kanaal afgevoerd. Afhankelijk van de waterstand in de Maas kan door het Drongelens kanaal maximaal 100 m³/s worden afgevoerd. Het Drongelens kanaal kan blijven afvoeren op de Maas vanwege het grotere verhang (persoonlijke communicatie met Ruben Ijpelaar, 2010). Als de gezamenlijke afvoer van Dommel en Aa groter is dan 100 m³/s, stijgt het waterpeil in 's-Hertogenbosch en wordt er water in de omgeving van 's-Hertogenbosch geborgen, wat kan leiden tot wateroverlast in stedelijk gebied. In het verleden hebben de hierboven beschreven omstandigheden enkele malen tot wateroverlast rondom 's-Hertogenbosch geleid. De norm voor regionale wateroverlast van gemiddeld intensief bebouwd gebied 1/ 500 jaar en van intensief bebouwd gebied 1/1000 jaar is (Unie van Waterschappen, 2003), wordt voor steden toch 1/100 jaar aangehouden. Voor 's-Hertogenbosch hebben de waterschappen, gemeenten, Rijkswaterstaat en de provincie zich tot doel gesteld om deze wateroverlast niet vaker dan 1/150 jaar te laten optreden (Arcadis, 2005). Zolang de waterstand op de Maas niet tot stremming van de afvoer op de Dieze leidt, is rond 's-Hertogenbosch geen wateroverlast te verwachten.

2.4 De Maatgevende situatie bij 's-Hertogenbosch

De maatgevende situatie voor hoogwater in 's-Hertogenbosch is een situatie met een herhalingstijd van eens in de 150 jaar. In voorgaand onderzoek (Arcadis, 2000) is gebruik gemaakt van een maasafvoer van 1/120 jaar en een neerslaggebeurtenis van in het stroomgebied van de Dommel en de Aa van 1/100 jaar. Dit levert een gezamenlijke kans van 1/150 jaar op voor hoogwater in 's-Hertogenbosch. Hoewel de juistheid van deze samengestelde kans discutabel is (zie kader) wordt in dit onderzoek ook gebruik gemaakt van deze kansen aangezien dit de gangbare kansen zijn binnen bestuur, beleid en onderzoeken. Door deze getallen te gebruiken zijn de uitkomsten vergelijkbaar met andere onderzoeken en de bekende norm waardoor het niet op grond van het gebruik van andere gegevens gedevalueerd kan worden.

Wanneer gaat Crèvecœur dicht?

In rapporten is terug te vinden dat bij een Maaspeil van 4,90m de sluis bij Crèvecœur dichtgaat (oa. Arcadis, 2005). Dit is een onjuiste bewering. Hoe het systeem wél werkt:

In normale situaties werkt de sluis bij Crèvecœur automatisch op basis van 4 principes: 1 een streefpeil van +2,20 NAP in de Dieze. 2 langzame afbouw na hoge waterstanden tegen verzakkingen in 's-Hertogenbosch. 3 Handmatige bediening bij een gemiddeld debiet van 140 m³/s over 10 minuten. 4 automatisch sluiten van de sluis indien de waterstand op de Maas minder dan 10cm hoger is dan dat van de Dieze.

Bij een hoogwater situatie komt een crisisteam van Waterschap de Dommel en Waterschap Aa en Maas samen om onder anderen te bespreken wanneer de sluis bij Crèvecœur dichtgaat. Indien er dan geen hoogwater op de Maas is zal de sluis openblijven en als het peil in de Dieze hoger is dan op de Maas (er kan gespuid worden) zal de sluis ook open blijven. Bij de Vugterstuw (Meetpunt P10, Bossche Broek) is een het waterpijl van 4,90 een alarmpunt. Indien er tevens een stijgend Maaspeil is, wordt op dit moment de sluis bij Crèvecœur gesloten en kan er alleen via het Drongelens kanaal gespuid worden. Indien er meer water wordt aangevoerd dan het Drongelens kanaal kan afvoeren, wordt een aantal schotten voor de inlaat van Bossche broek geopend naar gelang het debietoverschot. Afhankelijk van de omstandigheden kan de sluis bij Crèvecœur ook eerder gesloten worden dan bij de 4.90m bij meetpunt P10. Dit meetpunt wordt gebruikt aangezien het meetpunt erg betrouwbaar en nauwkeurig is en het meetpunt tussen 's-Hertogenbosch en Crèvecœur minder. In 's-Hertogenbosch zijn geen meetpunten. Ook speelt mee dat tijdens de hoogwatersituatie in 1995 bij een waterpijl van 4,90 bij dit meetpunt kleine wateroverlast in 's-Hertogenbosch was, maar nog net niet problematisch.

2.5 Verschuiving afvoergolven

De afvoergolven van de Maas de Aa en de Dommel komen samen bij 's-Hertogenbosch. Gemiddeld genomen komt van één bui de afvoerpiek van de Aa als eerste aan, met 24 uur later de piek van de Dommel en weer 48 uur later de piek van de Maas (Heidemij, 1996). Kortweg is er alleen een mogelijkheid tot wateroverlast indien de Aa en de Dommel samen meer dan $100\text{m}^3/\text{s}$ aanvoeren en de sluis bij Crèvecœur gesloten is. In dit geval vult eerst het watersysteem van de Aa en de Dommel zich tot 4,90m boven NAP bij de Vughterstuw, waarna Bossche Broek geopend wordt. Als de waterstanden in het systeem van de Dommel en de Aa dan alsnog stijgen, treed er wateroverlast op. Indien de afvoergolven van de Dommel en de Aa zodanig versneld worden dat de afvoer van de Dommel en de Aa onder de $100\text{m}^3/\text{s}$ duikt voordat de sluis bij Crèvecœur gesloten is treden er geen problemen op. Indien de afvoergolven van de Dommel en de Aa zodanig vertraagd worden dat er een grotere aanvoer van water plaatsvindt op het moment dat de sluis bij Crèvecœur dichtzit, is er een grotere kans dat wateroverlast optreed.

In theorie kan vertragen van een afvoergolf van de Aa, bijvoorbeeld door vasthouden of bergen van water, er voor zorgen dat deze golf meer samen komt te vallen met die van de Dommel en de Maas. Hetzelfde geldt voor de afvoergolf van de Dommel, die in geval van vertraging een grotere kans van samenvallen heeft met die van de Maas (HKV lijn in water, Groot S. en J.Udo, 2008). Hierdoor kan het gebeuren dat door middel van maatregelen die ten behoeve van de KRW en WB21 genomen worden, leiden tot het verergeren van de wateroverlast bij 's-Hertogenbosch; het ongewenste 'afwentelen'. Ook indien in bovenstroomse gebieden aanpassingen worden gedaan waardoor regenwater sneller in de Maas komt of Maaswater sneller bij 's-Hertogenbosch aankomt, is er een grotere kans op hoogwaterproblematiek rondt 's-Hertogenbosch.

2.6 Verwachte veranderingen Dommel, Aa en Maas

In de Aa

Waterschap Aa en Maas is bezig met projecten naar een dynamischer beekdal voor de Aa, dit leidt naar verwachting tot een piekreductie van 5% en een vertraging van 14 uur. Waterschap Aa en Maas neemt de benodigde extra retentie voor zijn rekening om geen nadelige gevolgen bij 's-Hertogenbosch te verkrijgen. Ook compensatie met betrekking tot toekomstige klimaatscenario's worden door Waterschap Aa en Maas genomen. Voor scenario 2050 wordt rekening gehouden met geen extra piekverlaging, maar wel 14 uur piekvertraging door beekherstel, 10% afvoertoeename door klimaatverandering en $1,5 \pm 0,5$ miljoen kuub retentie.

In de Dommel

In het stroomgebied van de Dommel, zal het huidige beleid leiden tot meer lokale retentie, vernatting van verdroogde natuurgebieden en beekherstel. Er zijn nog geen plannen om op grote schaal water bovenstrooms vast te houden (Waterschap de Dommel, 2010). Er wordt verwacht dat deze maatregelen een vertraging van de golf en een verlaging van de piek tot gevolg hebben. Het is nog onduidelijk of deze vertraging en verlaging ook optreden in extreme ($T=100$) situaties en wat de gevolgen daarvan zijn (Kessels, 2010).

In de Maas

In de het stroomgebied van de Maas zijn er op dit moment geen projecten bekend het afvoerregime van de Maas veranderen, anders dan de al lopende projecten waarmee al rekening gehouden wordt. Ingrepen die effect hebben op de afvoer worden beschouwd door de transnationale werkgroep "hoogwater Maas". (Internationale Commissie voor de Bescherming van de Maas, 2001)

3 Bijlage 3: Modelanalyse

Het gebruikte model is het gebiedsdekkend hoogwatermodel van Waterschap de Dommel. Dit is een combinatie van verschillende modellen en dataprocessors. In deze bijlage is de basis van de modellen uitgelegd. Uitgebreide informatie is te vinden in het document “Rapportage Modelontwikkeling Regionale Waterberging” (Waterschap de Dommel, 2010). Daar waar afgeweken wordt van de in dit document beschreven wijze, is dit duidelijk vermeld in het onderzoek.

3.1 Beschrijving Modellen

3.1.1 Neerslag Afvoermodellen

Voor de modellering van het stroomgebied van de Dommel en de Aa wordt gebruik gemaakt van meerdere Neerslagafvoer modellen. Een meet uitgebreide beschrijving, achtergronden en referenties staan in “Rapportage Modelontwikkeling Regionale Waterberging” (Royal Haskoning, 2010).

Landelijk gebied (Wageningen model)

Voor de neerslag/afvoer in het landelijk (onverhard) gebied wordt het Wageningenmodel gebruikt. Het model beschrijft het watersysteem niet-lineair en heeft korte rekentijden. Een nadeel is dat in het model fysieke parameters niet ingevoerd kunnen worden. Het Wageningenmodel deelt het stroomgebied van de Dommel en Aa op in 20 gebieden. Deze gebieden zijn gevormd naar gebieden die afwateren op een nauwkeurig meetpunt. In deze gebieden zijn lokaal de eigenschappen voor afwatering bepaald welke naar oppervlakte gemiddeld zijn voor ieder gebied. Hierdoor is het model lokaal onnauwkeurig maar gebiedsbreed effenen de onnauwkeurigheden elkaar uit.

De om acht uur 's ochtends gemeten etmaalneerslag neerslag wordt in het midden van de meetperiode in zes uur op het gebied gemodelleerd (tussen 18:00 en 24:00 de voorgaande dag) hierdoor wordt de inhomogene karakter van buien gemodelleerd. De beschrijving van het watersysteem is aan de hand van twee reservoirs; een snel en een langzaam reservoir. Afhankelijk van de voorgeschiedenis wordt meer of minder water door het snelle reservoir geleid.

Stedelijk gebied via overstorten (Sobek RR-paved)

De stedelijke neerslag/afvoer wordt gemodelleerd met behulp van Sobek RR-paved. Water dat niet kan worden geborgen in het rioolstelsel en niet overgepompt wordt naar een RWZI, wordt geloosd op het oppervlaktewatersysteem via overstorten. In Sobek RR komt overgepompt water vanuit het rioolstelsel direct bij de RWZI tot afvoer. Aangezien het water dan te snel tot afvoer komt, wordt deze functie niet gebruikt en is er een apart model om het RWZI effluent te modelleren. Naar aanleiding van onderzoek wordt uitgegaan dat 30% van het bebouwd oppervlak gerioleerd gebied is (Nelen en Schuurmans, 2006), dat de Pomp Over Capaciteit 0.7mm/h is en de berging in het riool 4mm. De neerslaginput is gelijk aan die van het Wageningenmodel.

Riool

Het Stedelijk water dat overgepompt wordt naar een RWZI wordt gemodelleerd in het RWZI-effluentmodel. Dit model beschrijft beter dan Sobek RR de variatie in hoeveelheid effluent in de tijd. Op basis van de dagneerslag van de afgelopen vier dagen en fysische eigenschappen van de RWZI en het verzorgingsgebied wordt het effluent bepaald.

3.1.2 Stroommodellen

Waterlopen (Sobek 1D)

Voor de modellering van waterlopen wordt gebruik gemaakt van een Sobek 1D model. Alle watergangen, stuwen, duikers en andere kunstwerken zijn hierin gebouwd. Het model is up-to-date voor 2010. Bij inundatie wordt de koppeling gemaakt met Sobek 1D2D.

Inundatie (Sobek 2D)

Indien de waterhoogtes in Sobek 1D de kades overstijgen, treed Sobek 2D in werking. In een grid van minimaal 5x5 meter wordt berging, inundatie en stroming over het maaiveld gemodelleerd. Voor het gebiedsdekkende model wordt een resolutie van 100x100 meter gebruikt aangezien de rekentijden enorm toenemen met een verfijning van het grid en gedetailleerde informatie over lokale inundaties niet in de scope van het onderzoek vallen.

3.2 Modelleren gebieden buiten beheergebied WSDD

3.2.1 Aankoppeling Aa

Het stroomgebied van de Aa wordt gemodelleerd met hetzelfde model als De Dommel. Het gebied van de Aa bestaat uit 1 gebied in het Wageningenmodel en de RWZI van Den Bosch. Er wordt uitgegaan van de huidige situatie van de Aa, behalve bij scenario 2050.

3.2.2 Maas

De Maas is op twee punten gemodelleerd; bij Crèvecoeur en bij de Bovenlandse sluis. De Maas is op deze punten gemodelleerd als waterstand

3.2.3 RWZI's

De neerslag op het stedelijk gebied en het landelijk gebied en de RWZI van 's-Hertogenbosch zijn gemodelleerd; De hoeveelheid water die hier valt en niet naar de RWZI afgevoerd wordt is minimaal ten opzichte van de enorme hoeveelheden water die de Aa en de Dommel aanvoeren, vandaar dat dit te verwaarlozen is. De uitstroom van de RWZI van 's-Hertogenbosch is wel gemodelleerd.

3.2.4 Belgisch gebied

Een gedeelte van het stroomgebied van de Dommel ligt in België. Deze gebieden zijn gemodelleerd met aparte gebieden in het Wageningenmodel die gekalibreerd zijn met het meetpunt aan de grens. Deze Wageningengebieden leveren een debiet aan het Sobek channelflow model.

3.2.5 Niet gemodelleerde gebieden

Het gebied dat tussen de Maas en het Drongelens kanaal ligt; wordt droog gehouden doordat water naar de Maas gepompt wordt. Hierdoor heeft het geen invloed op het Drongelens kanaal en de waterbalans van het onderzochte gebied.

Andere gebieden die niet gemodelleerd zijn wateren af op het Wilhelmina kanaal, op het Drongelens kanaal, vallen in het stroomgebied van de Schelde of zijn volledig gestuwd. Er wordt vanuit gegaan dat het Wilhelmina kanaal kan afwateren op de Maas ten hoogte van de Biesbosch. Hoewel niet zeker is dat dit altijd kan, gaat het om relatief kleine hoeveelheden water die geen wezenlijke verschillen opleveren bij problemen in 's-Hertogenbosch. De gebieden onbemeten zijn en afwateren op het Drongelens kanaal zijn twee erg kleine gebiedjes en de Drunense Duinen. Hoewel deze onbemeten zijn, wordt ervan uitgegaan dat er nauwelijks afstroming is vanuit dit gebied.

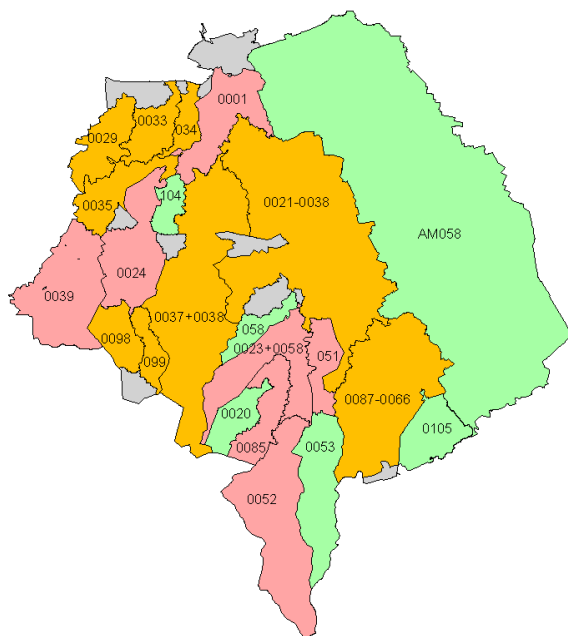
3.3 Validatie

Het gebiedsdekkend hoogwatermodel is gevalideerd op de neerslag in oktober en november 1998 met de neerslag vanuit lokale neerslagstations. Ieder gebied van het Wageningenmodel is apart gevalideerd en de uitkomsten van het totale model zijn gevalideerd. De correctheid van het Wageningenmodel is voornamelijk belangrijk voor de modellering van het vasthouden van water en het vernatten van verdroogde natuurgebieden. Voor beekherstel en retentie is vooral de correctheid van Sobek CF2D model van belang.

Validatie Wageningenmodel 1998

In het Wageningenmodel blijkt in grote delen van het beheersgebied van de Dommel de plausibiliteit van het Wageningenmodel onduidelijk of onvoldoende voor 1998.. Dit betekent dat de gemeten

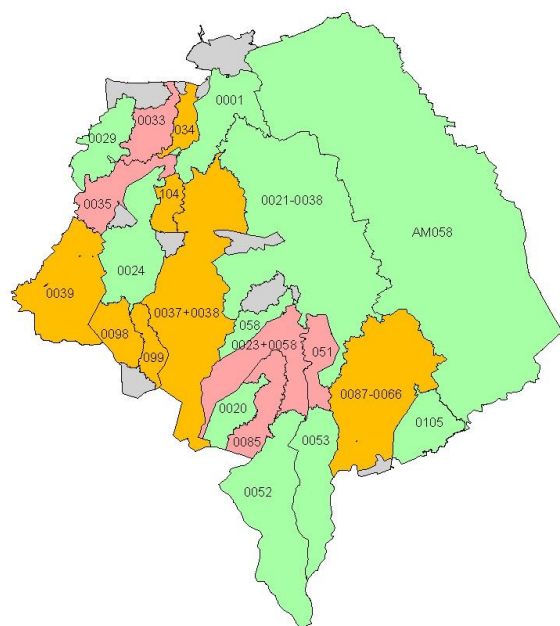
debieten niet goed overeenkomen met de gemodelleerde debieten. Waar de plausibiliteit onduidelijk is ligt dit voornamelijk aan het feit dat tijdens de extreme neerslag sommige metingen niet goed zijn verlopen. Voor andere extreme situaties dan in 1998 blijkt de validatie beter in orde. In het document (Waterschap de Dommel, 2010) staat de uitgebreide validatie van het model. Onderstaande figuur geeft aan voor welke gebieden het Wageningenmodel plausibel (groen), onduidelijk (oranje) of niet plausibel (rood) is.



Figuur 29: plausibiliteit van het Wageningenmodel 1998.

Validatie Gebiedsdekkend hoogwatermodel 1998

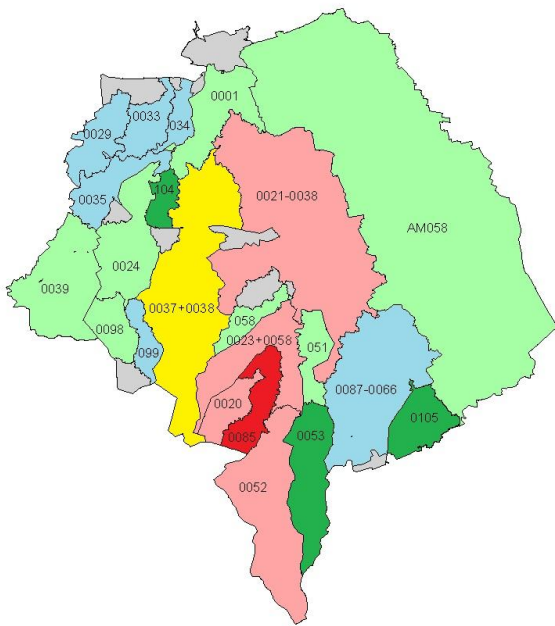
Voor het totale gebiedsdekkend hoogwatermodel is de validatie voldoende geacht indien de afwijking van de pieken minder dan 20% met de gemeten waarden. In de onderstaande figuur is aangegeven waar de afvoeren voldoende kloppen en waar niet.



Figuur 30: Correctheid afvoerdebieten Gebiedsdekkend hoogwatermodel 1998.

Totale validatie

Voor het onderzoek naar de gevolgen van maatregelen is niet zozeer de juiste voorspelling van de hoeveelheid water maar vooral van een juiste voorspelling in de verandering van de hoeveelheden water belangrijk. Vandaar dat niet alleen naar de validatie van de situatie in 1998 maar ook naar de validatie van andere hoogwaterperioden gekeken moet worden. Er zijn vijf perioden gevalideerd voor de Wageningen modellen onderstaande figuur geeft aan welke gebieden zeer goed scoren d.w.z. in elke periode goed, en nergens slecht (donker groen), goed scoren d.w.z. gemiddeld voornamelijk goed (lichtgroen), wisselend scoren d.w.z. in sommige validatieperioden goed en in andere perioden slecht (geel), redelijk slecht scoren d.w.z. vaker slecht dan goed (lichtrood) en zeer slecht scoren d.w.z. (bijna) in alle gevallen slecht scorend (donkerrood). De blauwe gebieden scoren overal of nagenoeg overal "onduidelijk".



Figuur 31: Totale plausibiliteit Wageningenmodel

4 Bijlage 4: Buikeuze

4.1 Samenvatting

Uit verschillende analyses blijkt dat de bui van okt-nov 1998 niet representatief is als een bui met de herhalingstijd $T=100$ indien het volume van de bui een belangrijke factor is. Indien er geloosd kan worden bij Crèvecoeur is het volume van een lange bui nauwelijks van belang aangezien de doorlooptijd van het gebied slechts enkele dagen is. Indien het water in het gebied geborgen moet worden en Crèvecoeur langere tijd dicht zit, kan het zijn dat volume over een langere periode een belangrijke factor wordt. Zowel een snelle algemene analyse als wel een meer uitgebreide analyse naar de verhoudingen van erge buien ten opzichte van elkaar.

Er zijn 4 analyses gedaan.

- Een algemene analyse op basis van de uitkomsten van golf.exe en de neerslaggegevens.
- Een analyse op basis van de uitkomsten van golf.exe met een logaritmisch verband tussen score (piek en volume) en herhalingstijd.
- Een analyse op basis van de uitkomsten van golf.exe met knikpunten in het logaritmische verband tussen score (piek en volume) en herhalingstijd.
- Een analyse waarin de bui vergeleken wordt met de neerslagstatistiek (modelbuien) van het KNMI.

De algemene analyse:

De periode van het event okt-nov 1998 duurt veel langer dan de andere events en bevat daardoor een veel groter volume water (2.64x zoveel als het op één na ergste event) waardoor de score van dit event onevenredig veel hoger is dan dat van andere events.

Analyse logaritmisch verband

Door de score en de herhalingstijd van events uit golf.exe tegen elkaar uit te zetten (met herhalingstijd op logaritmische schaal) blijkt dat het event okt-nov 1998 bijna overal sterk afwijkt van de rechte lijn die de andere events vormen. Naar aanleiding van deze analyse zou het event okt-nov 1998 voor het gebied van de Dommel een herhalingstijd hebben van ongeveer $T=1800$.

Analyse knikpunten in het logaritmisch verband

Het is mogelijk dat bij neerslag met een hoge herhalingstijd, de eigenschappen van de bedding van een waterloop veranderen waardoor er in de voorgaande logaritmische analyse knikpunten zitten in de veronderstelde rechte lijn. Dit effect is bij iets minder dan de helft van de gebieden zichtbaar. Dat het bij de andere gebieden niet zichtbaar is kan aan 2 dingen liggen:

- In deze gebieden is er geen duidelijk verschil in de eigenschappen van de bedding bij hoge afvoeren (waardoor de buien dus op 1 rechte lijn zouden moeten liggen).
- De buien met een intensiteit tussen de ergste bui en de op één na ergste bui (de buien die een knik zichtbaar zouden maken) zijn niet gevallen.

In de analyse is zo goed mogelijk rekening gehouden met knikpunten in de grafieken en is de laatst ingezette trend doorgetrokken. Hieruit blijkt dat het event van okt-nov 1998 een herhalingstijd zou hebben van ongeveer $T=650$.

Analyse vergelijking met KNMI modelbuien

Uit een vergelijking met de standaardbuien van het KNMI blijkt dat de ergste 10 dagen van het event okt-nov 1998 behoorlijk goed overeenkomt met een $T=100$ bui. Echter, de bui van okt-nov 1998 duurde langer dan 10 dagen en tussen de ergste 2 dagen zitten 9 dagen. Indien de trend van KNMI

buien wordt doorgetrokken naar buien die langer dan 10 dagen duren; blijkt dat het event van okt-nov 1998 een herhalingstijd heeft van $T=1600$ in 13 dagen; $T=1700$ is 16 dagen; en $T=2300$ in 19 dagen.

Conclusie en Aanbeveling

Alle analyses wijzen erop dat okt-nov 1998 niet representatief is als een $T=100$ event als het volume van de bui een belangrijke factor wordt. Indien het op één na ergste event (maart 1998) wordt aangemerkt als $T=100$ zien de figuren er een stuk logischer uit en zijn ook de verschillen tussen dit en het event met de volgend hoge herhalingstijd niet zo groot. Op deze nieuwe situatie zijn de analyses ook (maar minder grondig) uitgevoerd en daaruit blijkt dat dit event veel beter in lijn ligt met de andere events. Een laatste analyse die een bijdrage kan leveren aan de geschiktheid van de bui van maart 1998 is door te kijken of het debiet ongeveer 2x zo hoog is als dat van een $T=10$ event.

4.2 Inleiding /leeswijzer

De bui van november 1998 is gekozen als $T=100$ bui omdat dit de bui was die leidt tot de ergste afvoer die in de afgelopen 100 jaar zijn voorgekomen. Om te onderbouwen dat de bui van november 1998 een geschikte bui is om een $T=100$ situatie te modelleren is deze bui nader geanalyseerd. Ten eerste een algemene analyse en vervolgens zijn de uitkomsten van “golf.exe” (score en herhalingstijden) tegen elkaar uit te zetten om inzicht te krijgen in de verhoudingen tussen het event van okt-nov 1998 en de andere events. Als laatste is het neerslagevent vergeleken met de modelbuien van het KNMI.

Paragraaf 1.3 beschrijft hoe de events en scores tot stand komen met golf.exe;

Paragraaf 1.4 bevat de algemene analyse;

Paragraaf 1.5 en 1.6 bevat de analyse van figuren (score van het event vs HH-tijd);

Paragraaf 1.7 vergelijkt de neerslagevents met de KNMI modelbuien;

Paragraaf 1.8 bevat de conclusie, een voorstel en aanbevelingen;

Bijlage 1 geeft een overzicht van alle grafieken inclusief het event okt-nov 1998;

Bijlage 2 geeft een overzicht van alle grafieken waarbij het event okt-nov 1998 weggelaten is.

4.3 Werking golf.exe

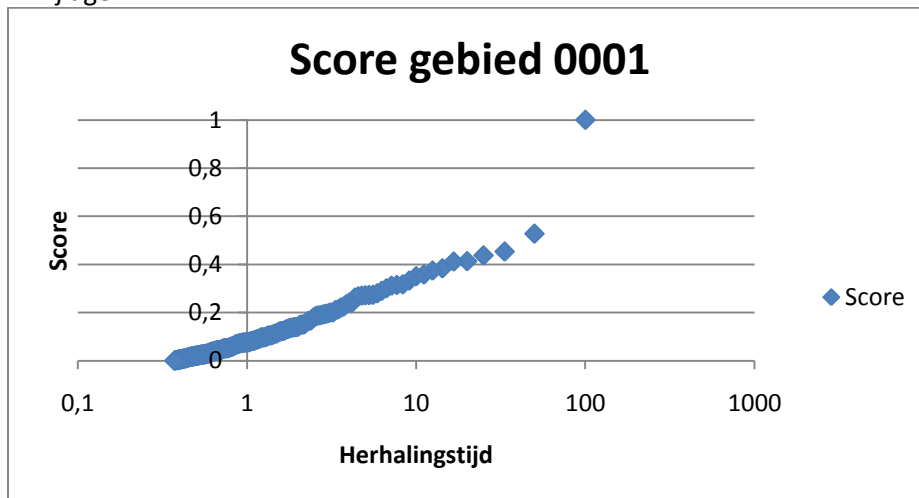
In het Wageningenmodel is de neerslag van 100 jaar de Bilt ingevoerd met een factor 0.94 omdat het in het stroomgebied van Aa en Dommel gemiddeld minder nat is. Deze neerslag leidt tot afvoerdebieten. Deze doorlopende reeks afvoerdebieten wordt in golf.exe in stukken (“events”) gehakt. Waar het debiet meer dan $T=0.1$ is; begint een event en waar het debiet weer minder dan $T=0.1$ is eindigt het event. Op deze manier is voor ieder wageningengebied een serie ‘events’ vastgesteld. Alle zomer-events zijn eruit gefilterd aangezien aangenomen is dat in de zomer alleen convectiebuien vallen die een sterk lokaal (en dus niet gebiedsdekkend) karakter hebben. Op basis van het volume water en de hoogte van de piek (beiden weegfactor 1) is er aan ieder event een score toebedeeld. Op basis van deze scores zijn herhalingstijden vergeven; de hoogste score is $T=100$, de op een na hoogste is $T=50$, de op 2 na hoogste is $T=33.3$ etcetera.

4.4 Algemene Analyse

Uit een algemene analyse blijkt dat het event van okt-nov 1998 veel langer duurt dan ieder ander event en dat voornamelijk het volume water in het event vele malen groter is dan dat van het op één na extreemste event. In het stroomgebied van de Dommel was de piek van okt-nov 1998, 1.09x zo groot als de op een na grootste piek (bijna overall event maart 1998). En het volume was gemiddeld 2.64x zo groot als het event met het op één na grootste volume (meestal event maart 1981).

4.5 Analyse rechte lijn

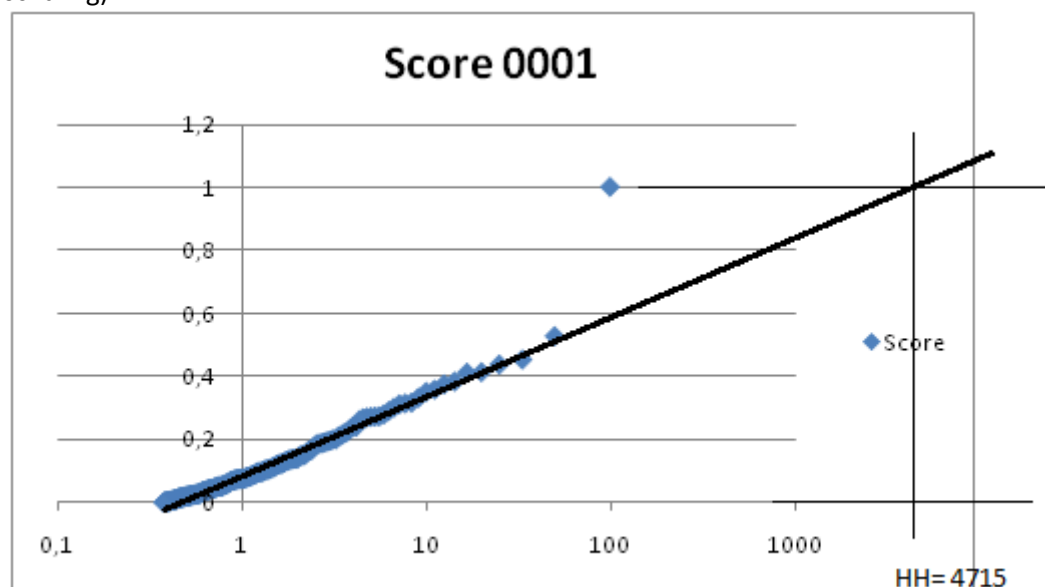
Voor de meeste Wageningenmodel-gebieden ziet de grafiek er ongeveer uit als in onderstaand figuur. In alle gebieden is de stip met score 1 het event van okt-nov 1998. Alle grafieken zijn te vinden in Bijlage 1.



Figuur 32: logaritmische uiteenzetting van score en herhalingstijden.

Uit de bovenstaande grafiek blijkt dat de bui van okt-nov 1998 niet in de lijn van de andere events staat, dit is ook in de grafiek van (bijna) alle andere gebieden zichtbaar.

Voor alle gebieden is deze grafiek gemaakt en een rechte lijn getrokken door de events (exclusief de laatste punt aangezien dit het onderzoeksobject is) en een nieuwe herhalingstijd vastgesteld zoals in figuur 2 (voor de totstandkoming van de herhalingstijden is rekening gehouden met logaritmische schaling).



Figuur 33: bepaling representatieve herhalingstijd van event okt-nov 1998.

Vervolgens is een gemiddelde herhalingstijd berekend voor het hele stroomgebied van de Dommel. Hiervoor is de herhalingstijd van ieder gebiedje vermenigvuldigd met een weefactor. De weefactor is gebaseerd op het volume en de piek van de 20 grootste gebeurtenissen. Hierdoor telt de herhalingstijd van een gebied met een lage afvoer minder mee dan de herhalingstijd van een gebied met een hoge afvoer. Alles bij elkaar is voor het gebied van de Dommel het event van okt-nov 1998

een herhalingstijd bepaald van $T=1800$, onzekerheden en onnauwkeurigheden meegenomen zal de herhalingstijd tussen de $T=1150$ en $T=2900$ liggen. Voor het gebied van de Aa komt de herhalingstijd uit op $T=1700$ met een range van $T=1050$ tot $T=2700$.

	Dommel	Aa
Min HH	1150	1050
Verwachte HH	1800	1700
Max HH	2900	2700

Deze herhalingstijden zijn zeer veel groter dan de $T=100$ waarvoor de bui van november 1998 aangemerkt wordt.

Bijzonderheden*:

Alleen in gebied 0058 was het event van okt-nov 1998 niet het ergste event. Sterker nog; dit event staat hier op de 7e plaats. Hiermee is rekening gehouden in de berekeningen. Het blijkt dat gebiedje 0058 gestuwd is en niet meegenomen dient te worden in de analyse. De neerslag die er valt wordt meegenomen in het gebied 0023+0058. Alleen in gebied 0087-0066 staat het event van maart 1998 niet op de 2e plaats. Hiermee is tijdens de analyse rekening gehouden.

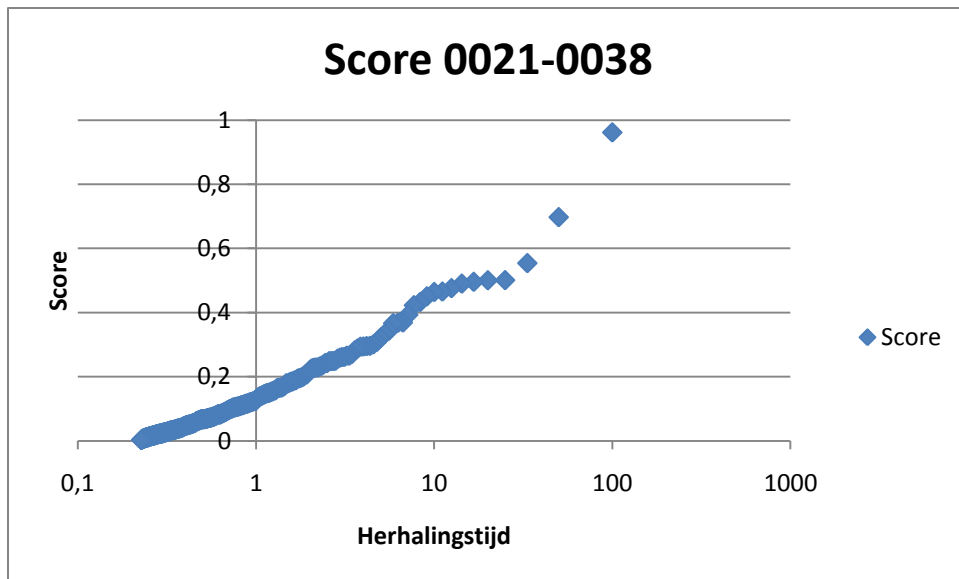
*deze bijzonderheden gelden ook voor de knikpunten analyse.

4.6 Knikpunten analyse

Aan de hand van de vorige analyse kwam Mark van de Wouw met het inzicht dat de punten in de grafiek niet op één rechte lijn hoeven te liggen maar dat er knikken in de lijn kunnen zitten doordat bij hoge debieten de eigenschappen van de bedding veranderen (watergangen treden buiten hun oevers). Dit effect is in de grafieken van sommige gebieden goed te zien zoals in het gebied 0021-0038 in figuur 3. Het feit dat veel andere gebieden niet zulke duidelijke knikpunten laten zien kan aan twee dingen liggen:

- In die gebieden is er geen duidelijk verschil in de eigenschappen van de bedding bij hoge afvoeren (waardoor de buien dus op 1 rechte lijn zouden moeten liggen).
- De buien met een intensiteit tussen de ergste bui en de op één na ergste bui (de buien die een knik zichtbaar zouden maken) zijn niet gevallen.

In het laatste geval betekent dit dat als okt-nov 1998 een $T=100$ bui is geweest dat er dan geen of nauwelijks buien met een herhalingstijd van tussen de $T=10$ en $T=100$ zijn gevallen in de afgelopen 100 jaar. Het is daarom aannemelijker dat niet alle gebieden een knikpunt hebben, of dat de bui van okt-nov 1998 niet een $T=100$ bui is.



Figuur 34: Duidelijk zichtbare knikpunten in de grafiek.

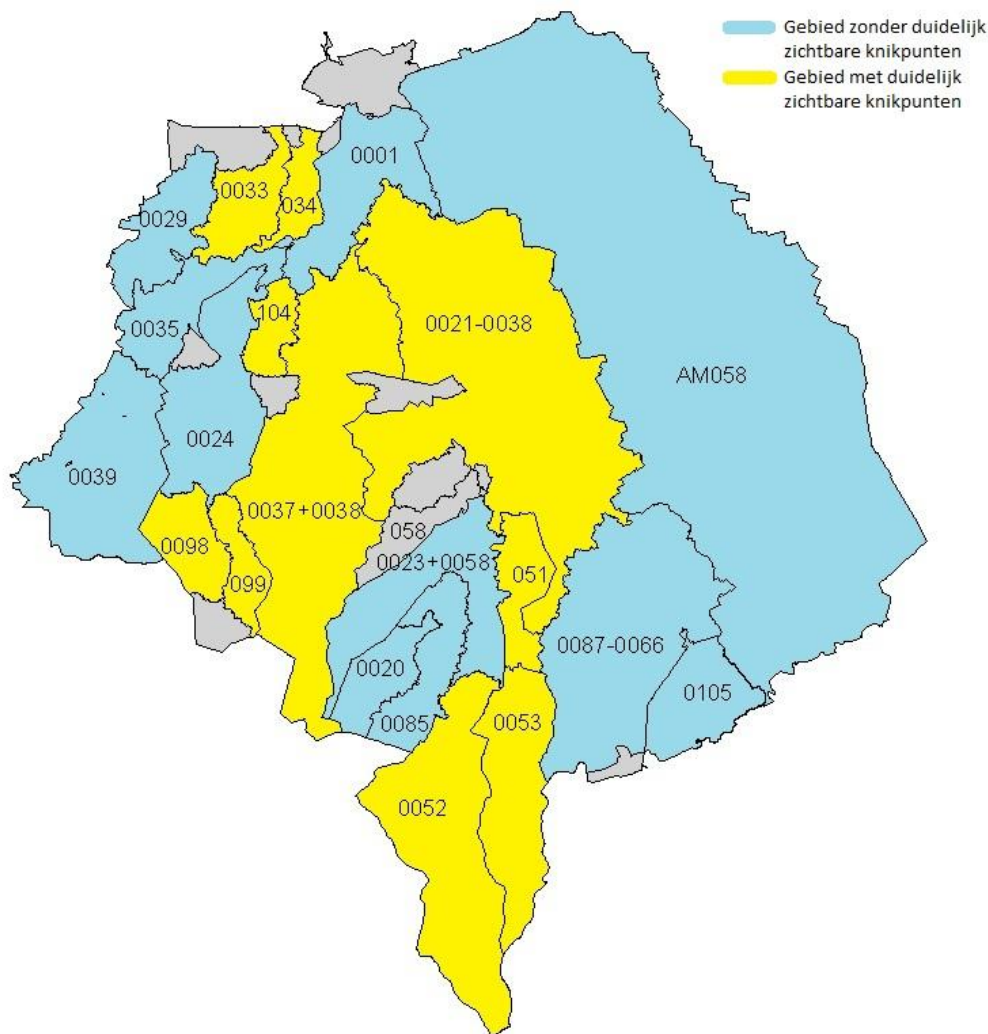
In deze analyse is zo goed mogelijk rekening gehouden met knikpunten in de grafieken. De laatst ingezette trend is doorgetrokken, ook waar dit slechts op 2 of 3 meetpunten is gebaseerd. Met de knikpunten in acht genomen zien de te verwachte herhalingstijden er zo uit:

	Dommel	Aa**
Min HH	425	950
Verwachte HH	680*	1500
Max HH	1100	2500

*voor gebied 0087-0066 is de herhalingstijd van de rechte lijn gebruikt aangezien de mogelijke 'knik' in dit gebied de verkeerde kant op knikt.

** de herhalingstijden voor de Aa zijn veel hoger dan voor de Dommel aangezien het gebied van de Aa uit slechts één Wageningen gebied bestaat en deze geen knik vertoont.

Het zou interessant zijn als iemand kan vertellen of een duidelijk (fysiek) verschil is tussen de gebieden die wel en geen knikpunten laten zien (0001,0020,0023+0058,0024,0029,0039,0085,0087-0066,0105,AM058 laten geen knikpunten zien en 0021-0038,0033,0053,0099,0104 laten wel duidelijk knikpunten zien (overzicht in figuur 4 op de volgende pagina).



Figuur 35: Overzicht van de gebieden waar wel en geen knippunten zichtbaar zijn.

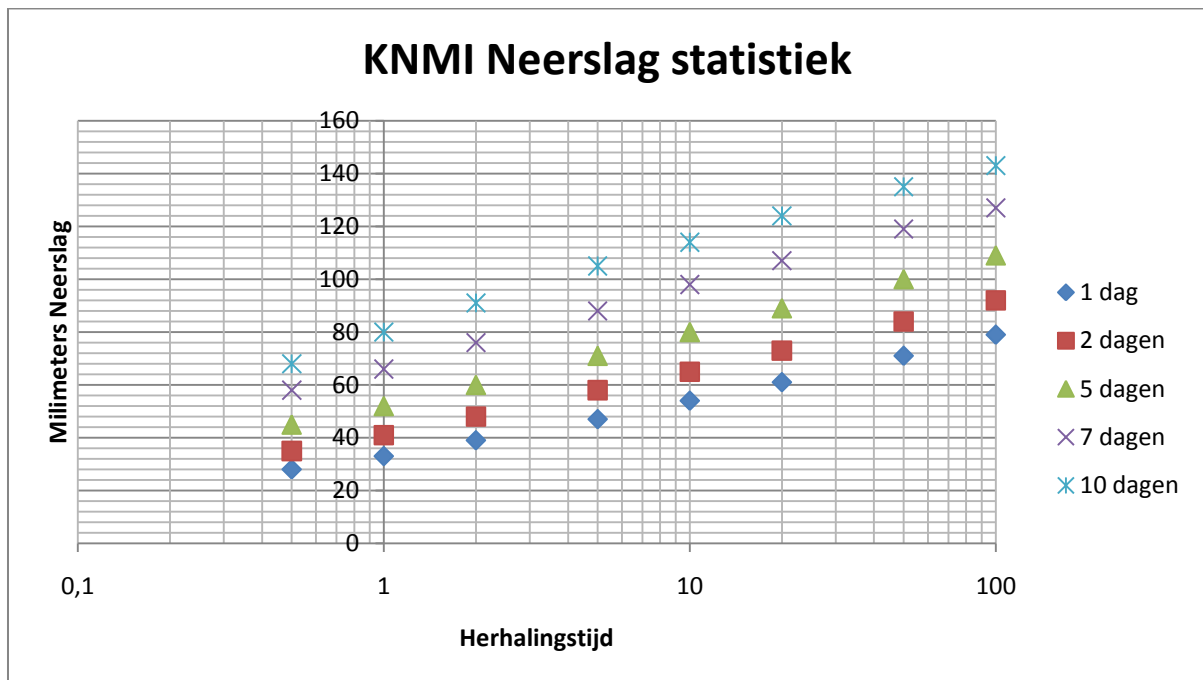
Het event van november 1998 is onevenredig veel erger dan de andere events, dit kan liggen aan de ernst van de bui of aan de keuze voor de minimumlimiet van $T=0.1$ waarbij een event start of stopt. Het is mogelijk dat indien deze minimumlimiet hoger wordt gelegd dat dan dit event opgeknipt wordt in 2 events, echter dit is bij de keuze van een hogere (en toch redelijke) limiet alsnog niet waarschijnlijk aangezien in de gehele periode extreem veel neerslag is gevallen met maximaal 1 dag ertussen met lagere neerslag. Hierdoor lijkt het veilig aan te nemen dat het event van november 1998 een veel grotere herhalingsjijd dan $T=100$ toebehoort en het verhogen van de minimumlimiet geen invloed heeft op de lengte van het event.

4.7 Analyse vergelijking met KNMI modelbuien

De neerslagstatistiek van het KNMI geeft de kans dat op één punt een bui valt. Hiermee zijn dus convectiebuien ook onderdeel van de statistieken. Hierdoor zal een gebiedsdekkende bui een hogere herhalingsjijd hebben dan een bui met dezelfde neerslag op één punt in de KNMI statistieken. Dit kan ook gevolgen hebben voor neerslag die meerdere dagen duurt. In Juni 1998 bijvoorbeeld is er over 7 dagen een hoeveelheid neerslag gevallen die overeenkomt met een herhalingsjijd van $T=100$. Dit betekent dat zomerse convectiebuien ook invloed kunnen hebben op meerdaagse neerslagreeksen.

De neerslagstatistiek van het KNMI geeft de herhalingsjijden voor een hoeveelheid neerslag die in 1,2,4,7 of 10 dagen valt. Er is ook een neerslagstatistiek voor kortere buien, maar deze zijn niet voor

deze analyse van belang. Voor gebied G (waar oa. De Bilt en het stroomgebied van de Aa en de Dommel onder vallen) ziet de KNMI statistieken er zo uit:



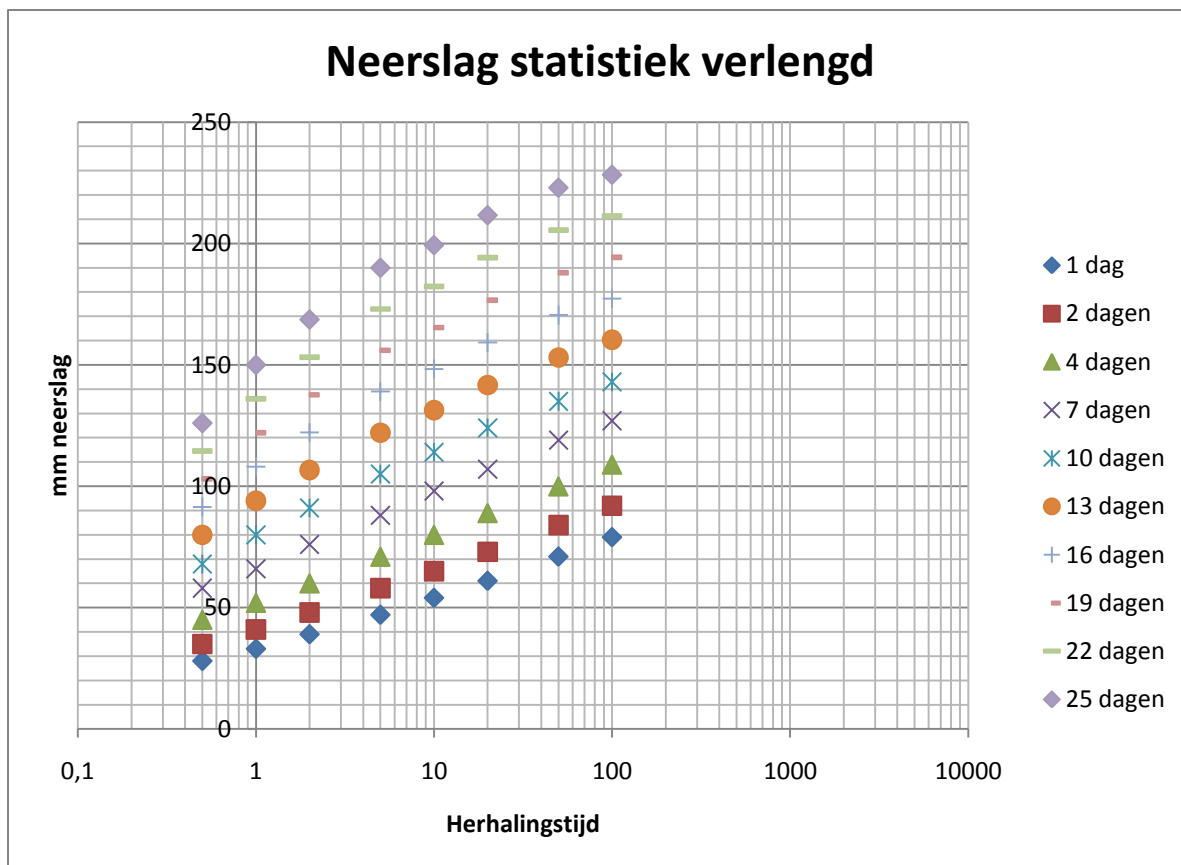
Figuur 36: Neerslagstatistiek van het KNMI (bron: tabel 2, <http://www.knmi.nl/klimatologie/achtergrondinformatie/neerslagstatistiek.pdf>, sept 2010.)

Tijdens het event van okt-nov 1998 viel er:

In één dag	35 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 1.1
In twee dagen	48 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 2
In vijf dagen	81 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 11
In zeven dagen	110 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 30
In tien dagen	147 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 115

Hieruit lijkt het dat de bui van okt-nov 1998 inderdaad ongeveer een T=100 bui is. Echter, de neerslag van okt-nov 1998 duurde veel langer dan 10 dagen, en ironisch genoeg lagen de toppen van neerslag precies 9 dagen uit elkaar. In elf dagen viel er 167mm en in 12 dagen 180 mm.

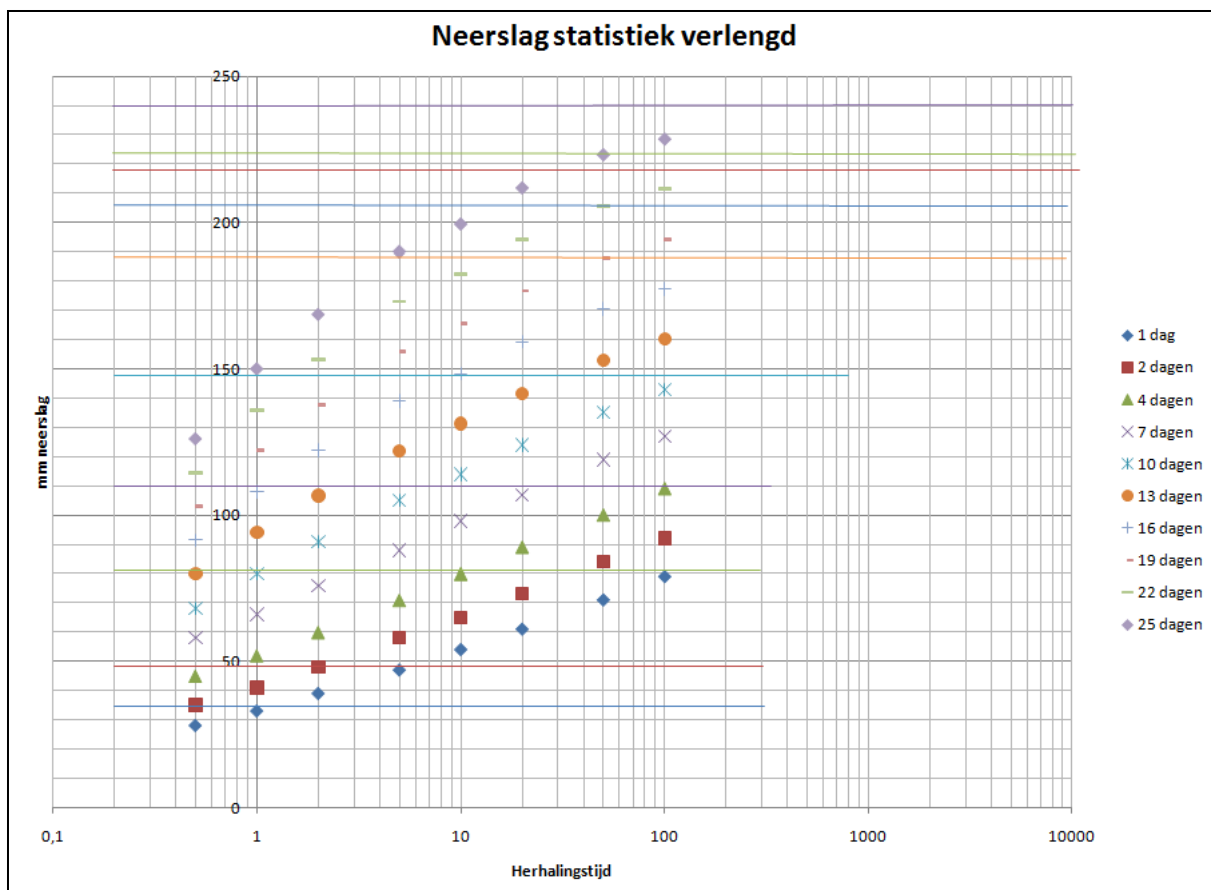
Hoewel het niet wetenschappelijk verantwoord is (aangezien ik niet dezelfde methodes gebruik als het KNMI en het KNMI dus niet aangesproken dient te worden op onderstaande figuur) zijn in onderstaande figuur de punten voor periodes van 13, 16, 19, 22 en 25 dagen opgesteld. De beste fit bleek te ontstaan door de waarden van de laatste 3 herhalingstijden lineair door te trekken. Hierdoor is de volgende figuur verkregen:



Figuur 37: De neerslagstatistiek van het KNMI uitbereid met de trends voor 13,16,19,22 en 25 dagen.

In onderstaand figuur (figuur 6) is als horizontale lijn van verschillende kleuren de gevallen neerslag voor deze perioden weergegeven. Waar deze lijn de trend van zijn kleur raakt is de herhalingstijd van het event. Dit komt neer op ongeveer:

In één dag	35 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 1.1
In twee dagen	48 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 2
In vijf dagen	81 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 11
In zeven dagen	110 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 30
In tien dagen	147 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 115
In 13 dagen	188 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 1600
In 16 dagen	205 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 1700
In 19 dagen	218 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 2300
In 22 dagen	224 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 600
In 25 dagen	240 mm	Wat overeenkomt met een herhalingstijd van	T= 400



Figuur 38: Neerslagstatistiek; door de trends door te trekken tot de horizontale lijn van dezelfde kleur (neerslag okt-nov 1998) wordt de bijpassende herhalingstijd verkregen.

Duidelijk is in ieder geval dat voor 10 dagen de neerslag gelijkend is met een $T=100$ event, maar dat vlak voor en/of na deze 10 dagen nog zoveel neerslag viel dat het event veel extremer ingeschat dient te worden.

4.8 Conclusie, voorstel en vervolgonderzoek

Aangezien het event van okt-nov 1998 een event is geweest met een herhalingstijd veel groter dan $T=100$; is het een logische stap om dit event buiten de herhalingstijd bepalingen te houden. Dit zou betekenen dat het op één na ergste event van de afgelopen 100 jaar de titel $T=100$ krijgt, het op 2 na ergste event $T=50$ etc. De nieuwe $T=100$ wordt dan dus de huidige $T=50$, dit is het event in maart 1998.

Op de hierdoor nieuw verkregen situatie zijn ook (kort) de vier analyses uitgevoerd. In algemene termen sluit dit event veel beter aan bij de andere events. De totale lengte van de bui is relatief kort (4 dagen); de piek is gemiddeld 12% hoger dan het op één na ergste event en het volume is 14% hoger.

Ook is de grafische analyse uitgevoerd om de score tegen de (nieuwe) herhalingstijden uit te zetten. Zowel in de figuren die geen knik laten zien als in de figuren die wel één of meerdere knikken laten zien past de nieuwe score veel beter in de trends van de lijnen van het gebied (Bijlage 2). Hoewel het event van maart 1998 volgens het KNMI slechts een $T=20$ event is; moet er rekening mee gehouden worden dat er convectie buien zijn die volgens het KNMI een grotere herhalingstijd meekrijgen maar slechts lokaal vallen, hierdoor is uitgaande van een gebiedsdekkende bui de herhalingstijd $T=20$ onderschat. Daarnaast hoeft het niet zo te zijn dat een bui met een hogere herhalingstijd ook een erger effect heeft op het stroomgebied van de Dommel en de Aa.

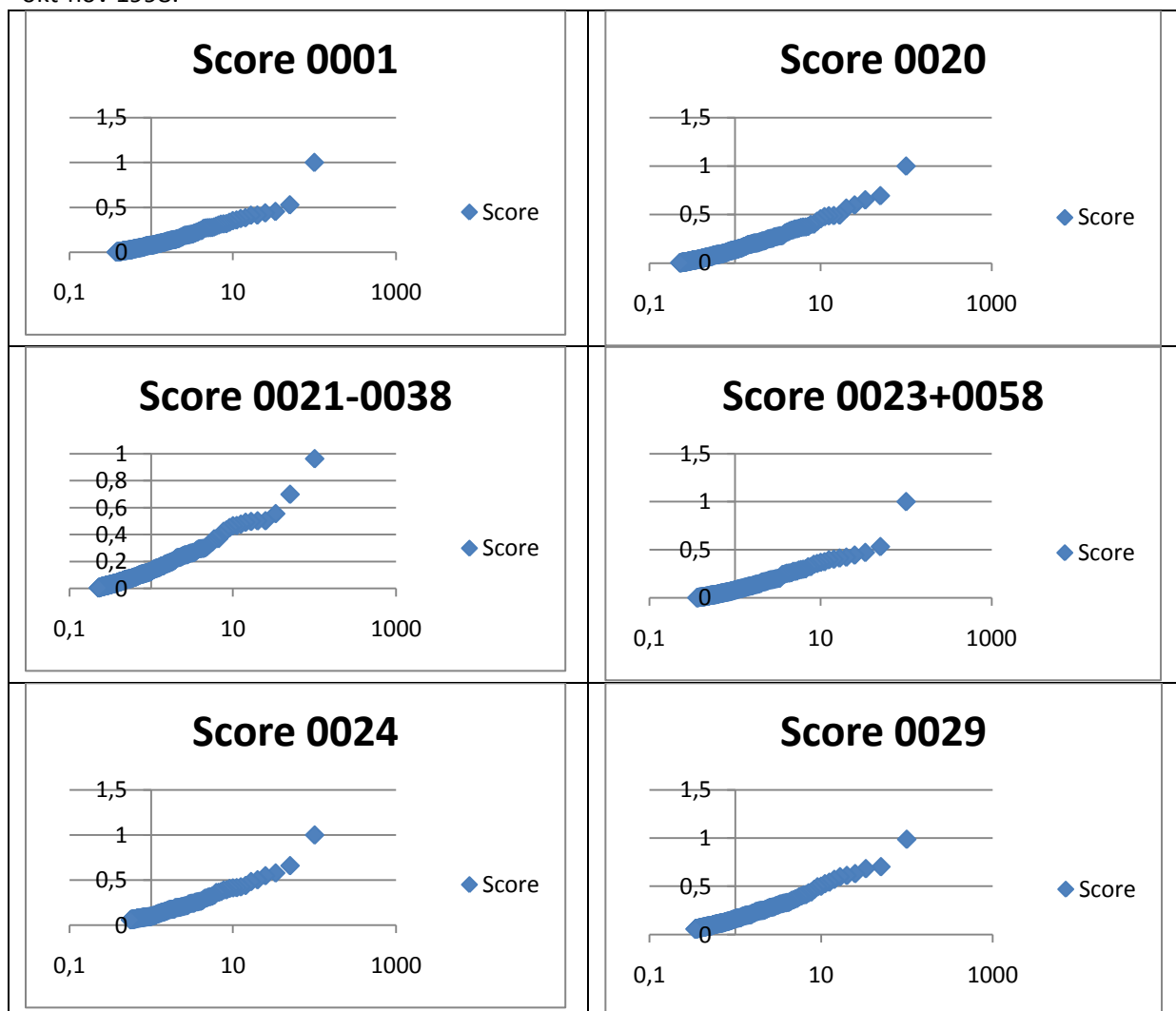
Een analyse die nog niet is uitgevoerd is de analyse naar het maximale debiet. Uit vuistregels blijkt dat een T=10 1.4x het maximum debiet heeft van een T=1 en dat T=100 2x het maximumdebiet heeft van een T=1 situatie.

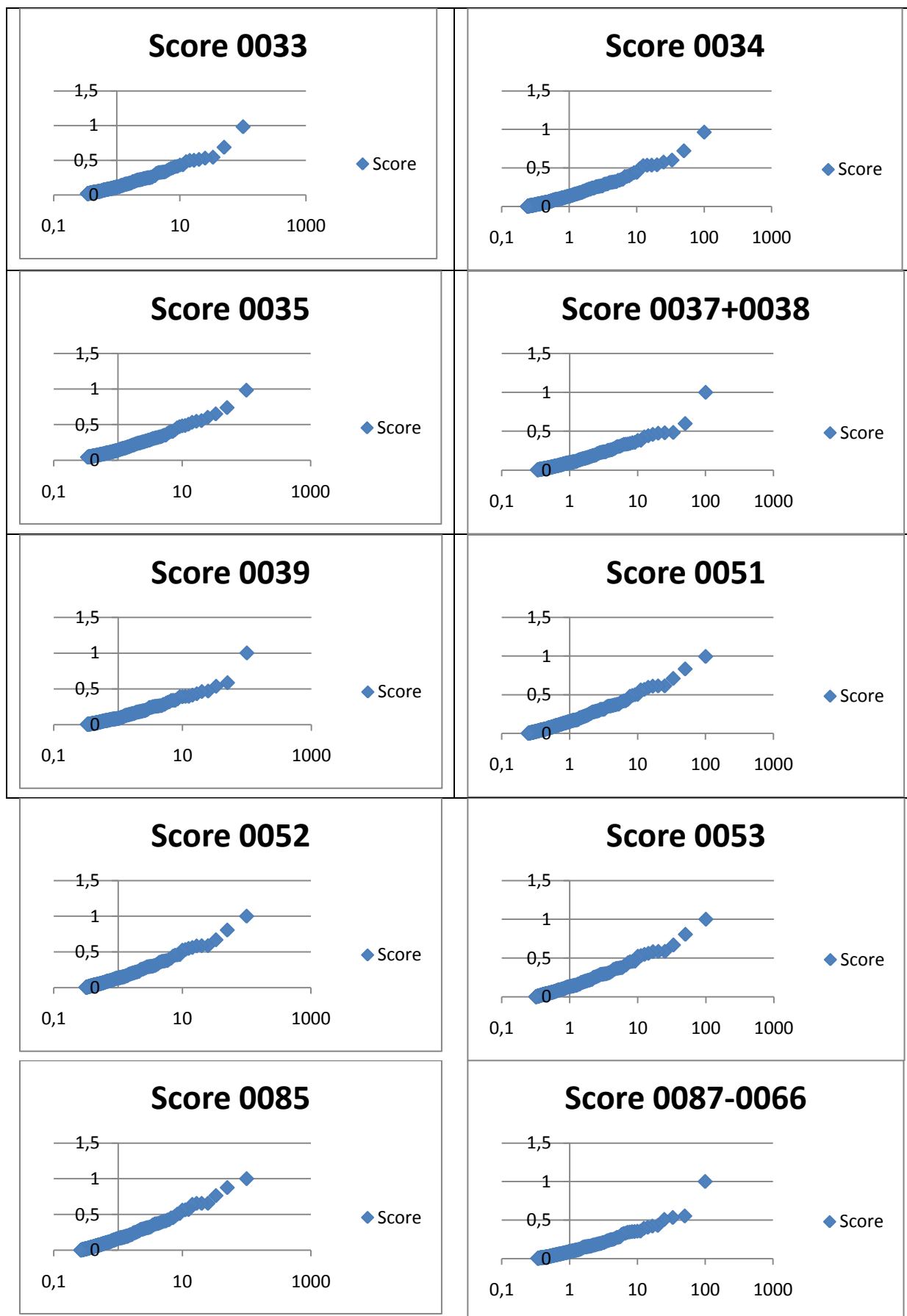
Alle analyses wijzen erop dat okt-nov 1998 niet representatief is als een T=100 event als het volume van de bui een belangrijke factor wordt. Indien het op één na ergste event (maart 1998) wordt aangemerkt als T=100 zien de figuren er een stuk logischer uit en zijn ook de verschillen tussen dit en het event met de volgende hoge herhalingsdij niet zo groot. Op deze nieuwe situatie zijn de analyses ook (maar minder grondig) uitgevoerd en daaruit blijkt dat dit event veel beter in lijn ligt met de andere events. Een laatste analyse die een bijdrage kan leveren aan de geschiktheid van de bui van maart 1998 is door te kijken of het debiet ongeveer 2x zo hoog is als dat van een T=10 event.

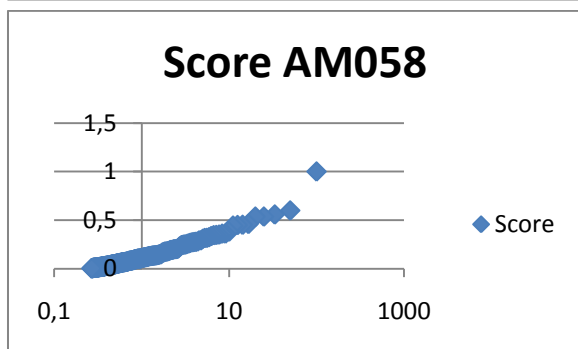
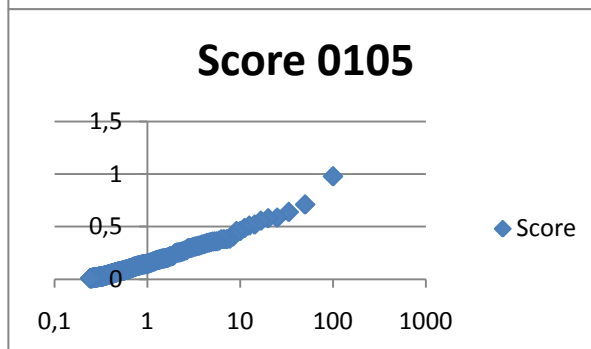
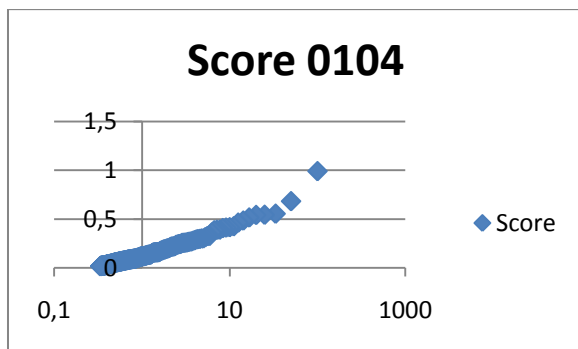
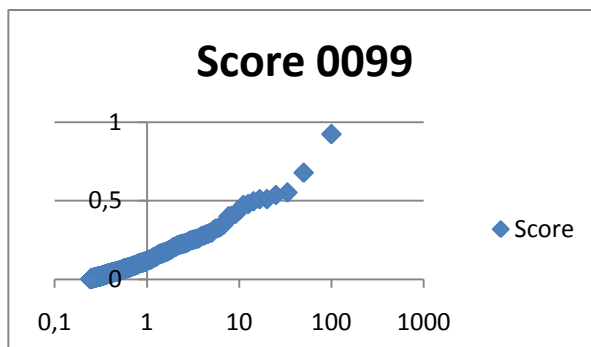
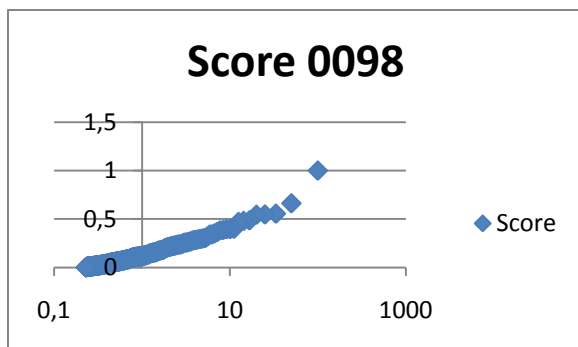
4.9 Grafieken

4.9.1 alle grafieken incl. okt-nov 1998

Noot: in alle grafieken behalve die van 0058 is het punt met score 1 representatief voor de bui van okt-nov 1998.

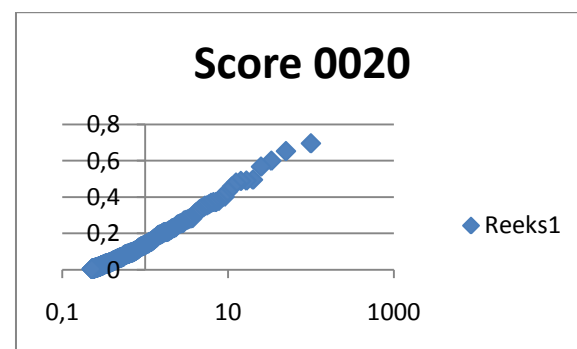
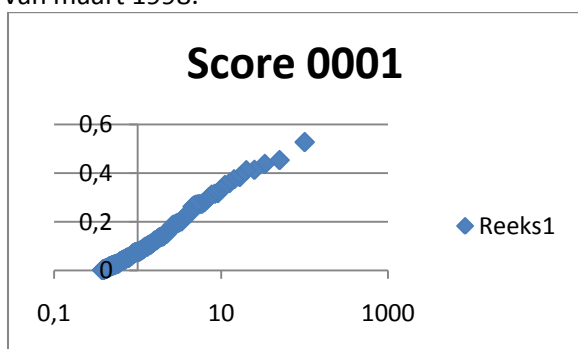


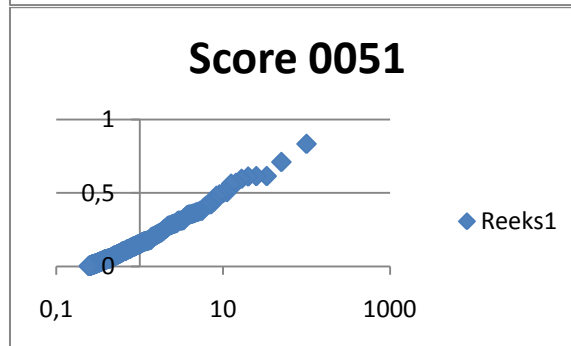
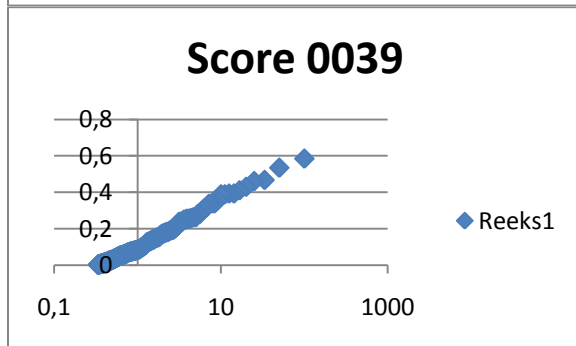
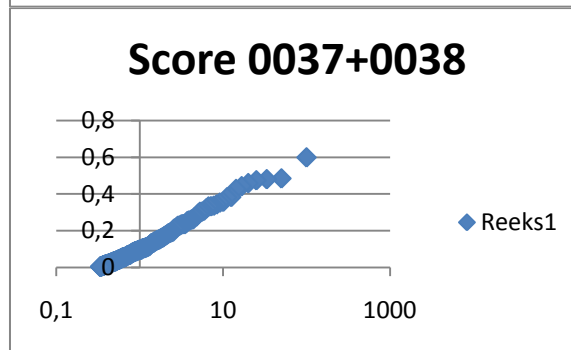
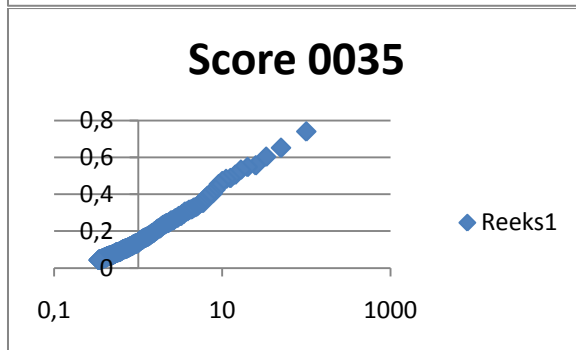
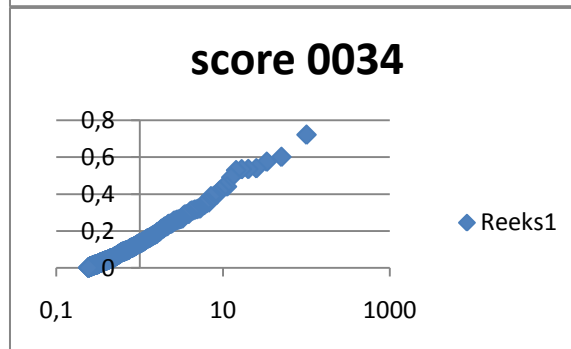
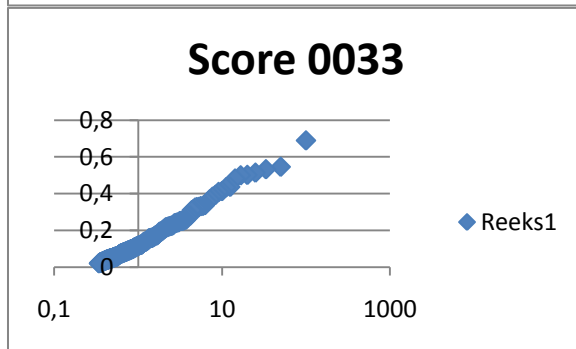
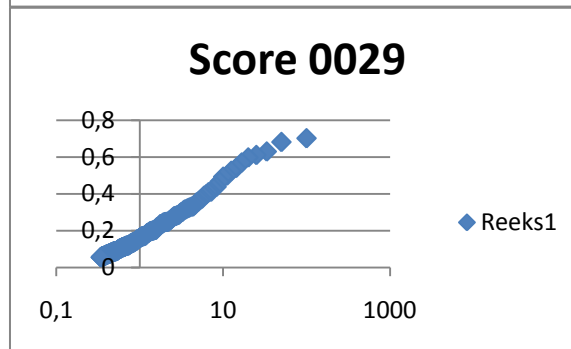
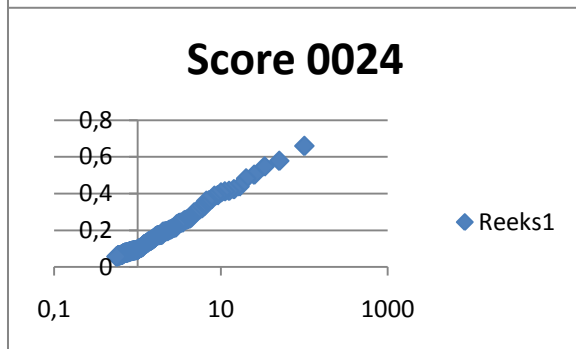
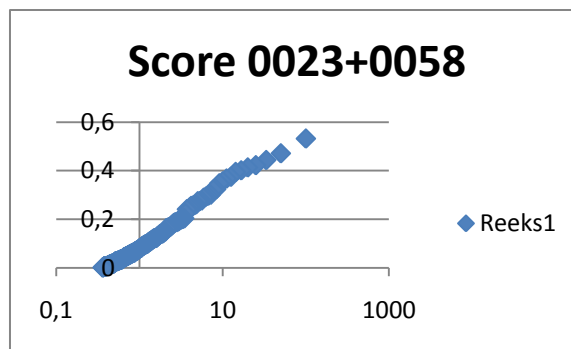
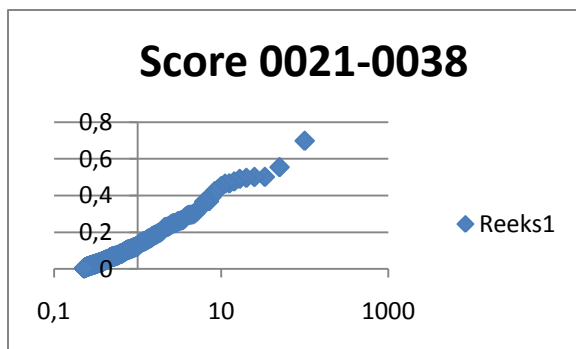


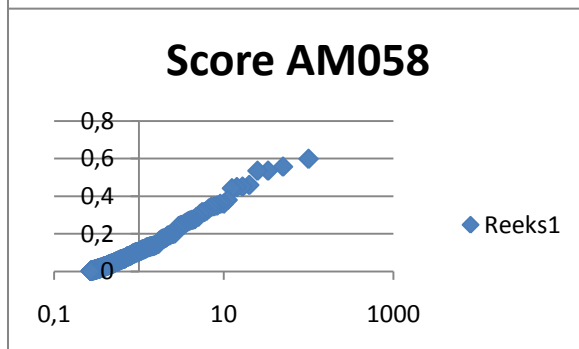
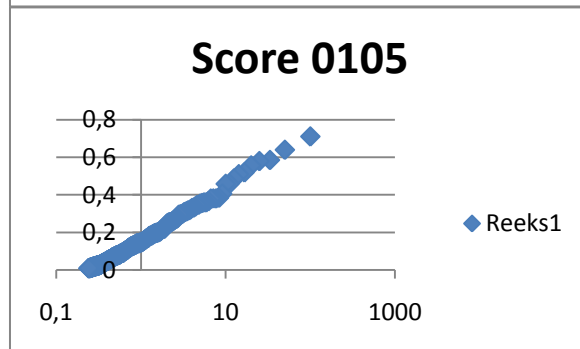
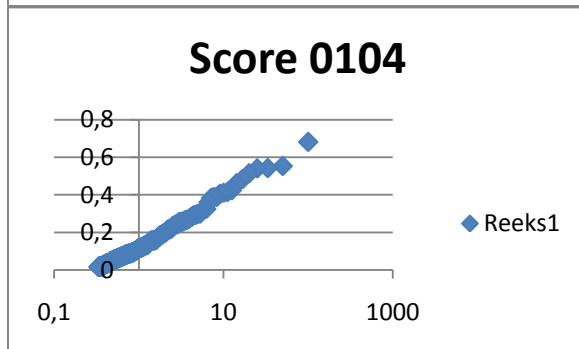
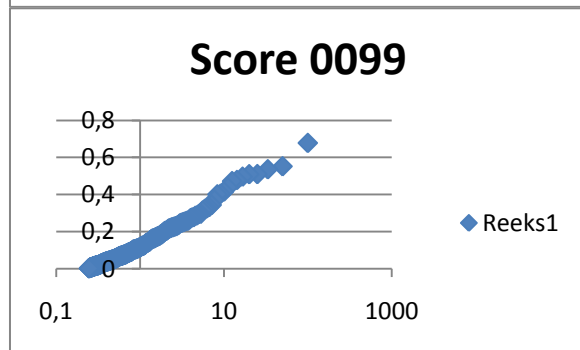
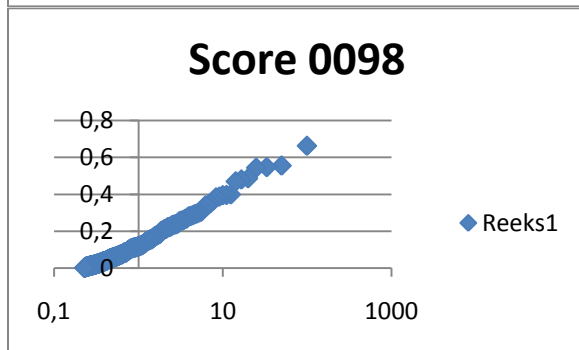
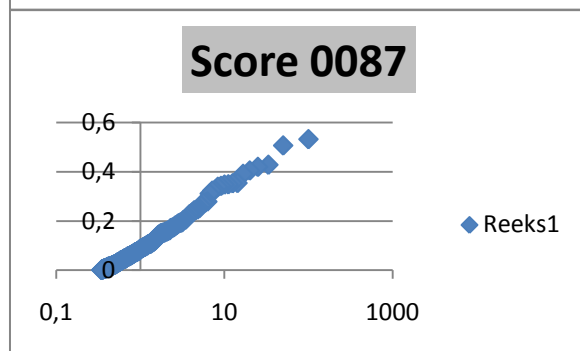
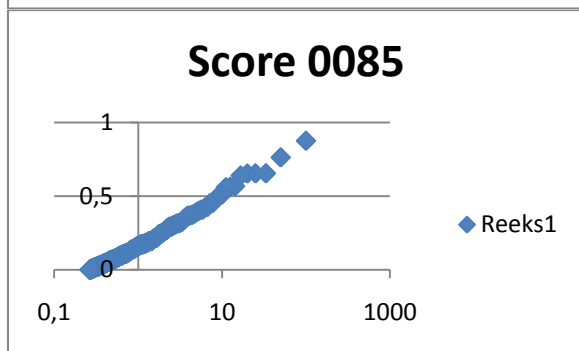
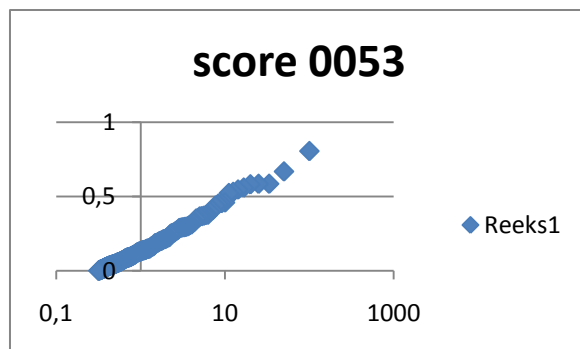
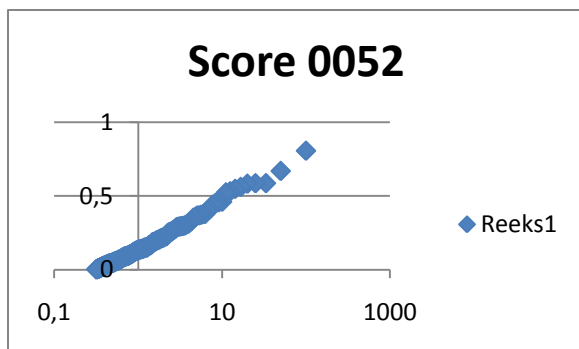


4.9.2 Alle grafieken excl. okt-nov 1998

Noot: in alle grafieken behalve die van 0087-0066 is het punt met score 1 representatief voor de bui van maart 1998.





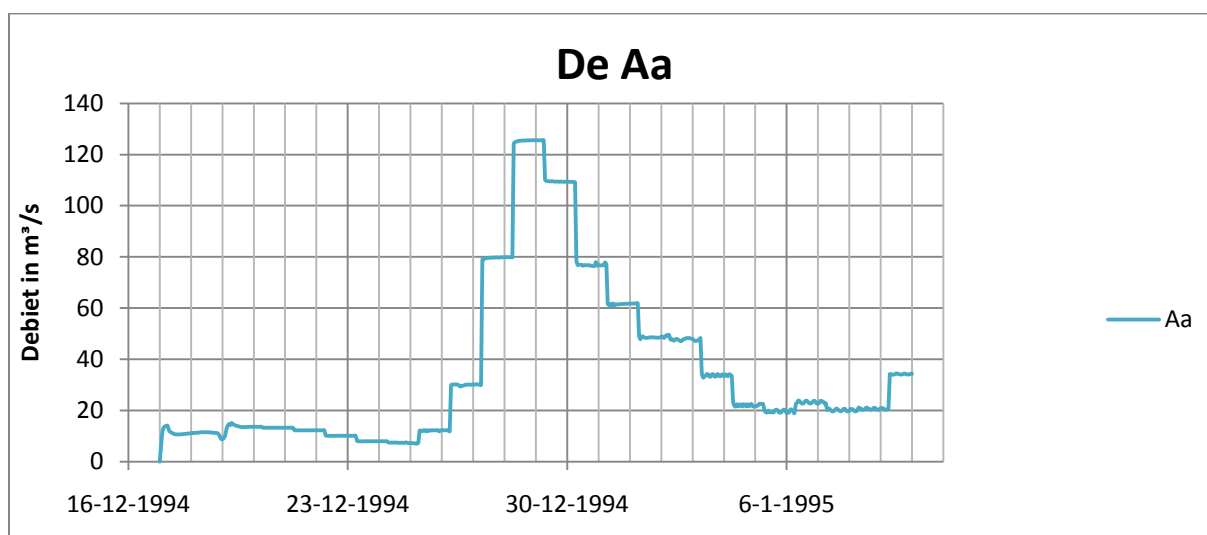


5 Bijlage 5: Afvoergolven referentiesituatie

Een beschrijving van de golven en onregelmatigheden.

De verwachting is dat een golf een vergelijkende vorm heeft als de neerslag, maar later komt, minder extreem is en vloeiender loopt. Naar aanleiding van de ingevoerde bui, zouden de afvoeren een vloeiende, parabolische vorm moeten hebben. Daar waar de afvoeren afwijken van deze vorm, zal er een aanleiding voor zijn. Hieronder worden eerst de redenen beschreven waar de golfvorm eigenaardigheden vertoont.

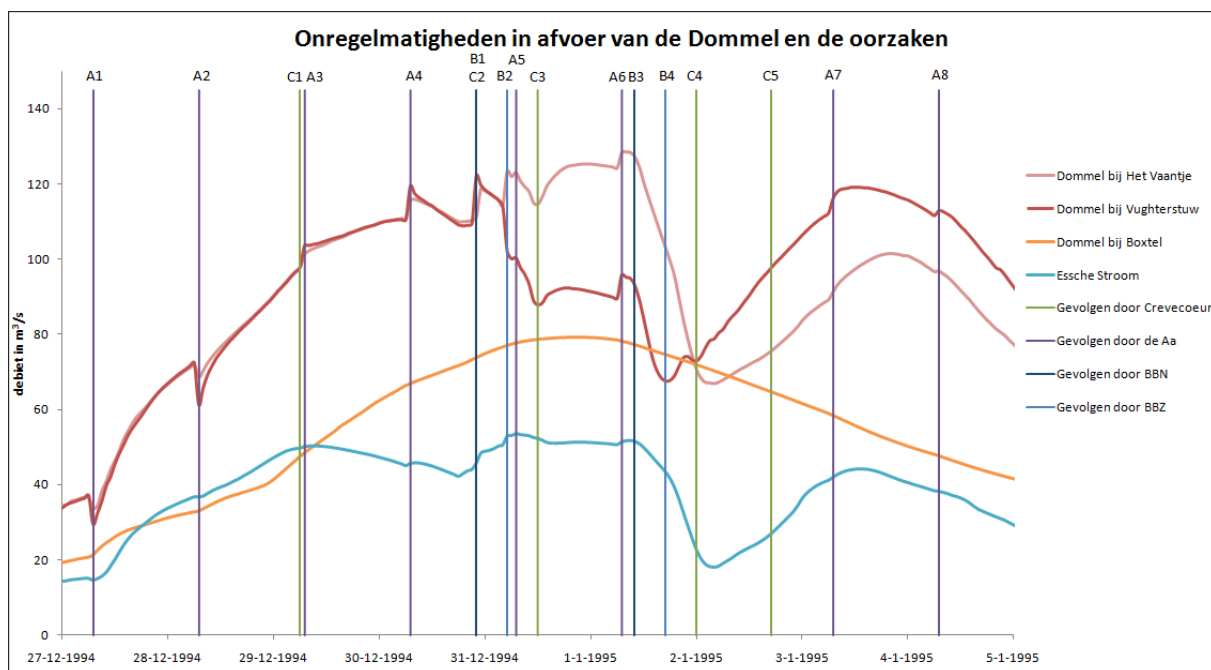
Het gehele gebied van de Aa is gemodelleerd met het Wageningenmodel. Aangezien het Wageningenmodel op dagbasis rekent, zijn de uitkomsten geblokt per dag. Omdat deze debieten relatief groot zijn en vlak bij het systeem van de Dommel op het model worden gezet, heeft deze geblokte vorm een grote impact op de afvoeren in het stroomgebied van de Dommel. De kleine oscillaties aan het einde van de modellering komen doordat teveel debiet lateraal op het systeem wordt gezet.



Figuur 1: Afvoer van de Aa.

In de afvoer van de Dommel bij Vughterstuw, de Dommel bij Het Vaantje en de Essche stroom is er een aantal factoren die ervoor zorgen dat de golf niet een nette paraboolvorm heeft. De geblokte vorm van de Aa, Bossche Broek Noord en Zuid en Crèvecoeur (soms i.c.m. Bovenlandsche Sluis) veroorzaken dit. Hieronder staan de onregelmatigheden uitgelegd.

De meeste veranderingen zijn in deze figuren het sterkst bij Vughterstuw, bij Het Vaantje zijn precies dezelfde schommelingen waarneembaar behalve bij de gevolgen van Bossche Broek Zuid, omdat de inlaat van Bossche Broek zuid tussen Het Vaantje en de Vughterstuw in ligt; zijn de gevolgen tegengesteld. In de Essche Stroom zijn de zichtbare schommelingen nog steeds zichtbaar, zij het iets later en in afgezwakte vorm. Door de lagere afvoeren in de Essche Stroom en een andere schaal blijven de gevolgen groot. Bij de Dommel bij Boxtel zijn de ergste schommelingen nog licht lichtbaar, maar zijn de meeste effecten uitgedempt. Verder zijn er in verschillende figuren tot aan 20 december 1994 onregelmatigheden te zien die veroorzaakt zijn door de initialisatie van het model.



Figuur 2: Onregelmatigheden in de afvoer van de Dommel en Essche Stroom en de oorzaken.

A1	49 m ³ /s toename debiet de Aa
A2	44 m ³ /s toename debiet de Aa
A3	15 m ³ /s afname debiet de Aa
A4	30 m ³ /s afname debiet de Aa
A5	15 m ³ /s afname debiet de Aa
A6	12 m ³ /s afname debiet de Aa
A7	13 m ³ /s afname debiet de Aa
A8	10 m ³ /s afname debiet de Aa
B1	Bossche Broek Noord opent
B2	Bossche Broek Zuid opent
B3	Bossche Broek Noord is vol
B4	Bossche Broek Zuid is vol
C1	Crèvecoeur gaat langzaam dicht
C2	Crèvecoeur loost evenveel als de aanvoer van de Aa
C3	Crèvecoeur is helemaal dicht
C4	Crèvecoeur gaat weer open
C5	Crèvecoeur loost evenveel als de aanvoer van de Aa

A1 en A2

De Aa heeft een grote directe toename van debiet, dit kan niet allemaal direct bij Crèvecoeur afgevoerd worden waardoor er stremming is op de Stadsdommel en deze minder kan afvoeren, waardoor ook bij de Vughterstuw minder afgevoerd kan worden

A3 t/m A8

Door een grote directe afname van het debiet van de Aa, kan er meer water worden afgevoerd door de Stadsdommel en dus bij is er bij Vughterstuw een plotselinge toename in debiet.

B1

Bossche Broek Noord wordt ingezet waardoor er een grote hoeveelheid extra water langs meetpunt Vughterstuw kan.

B2

Bossche Broek zuid gaat open. Dit resulteert in een lagere afvoer bij Vugterstuw omdat het water voordat het bij Vugterstuw aankomt al in Bossche Broek zuid wordt gelaten. Bij Het Vaantje is juist een toename in de afvoer zichtbaar aangezien dit punt bovenstrooms de inlaat van Bossche Broek zuid ligt.

B3

Bossche Broek Noord zit vol en de waterstanden rijzen langzaam verder, waardoor de stroomsnelheid afneemt en tevens het debiet bij Vugterstuw.

B4

Bossche Broek Zuid zit vol, hierdoor wordt het water niet meer vroegtijdig afgetapt en neemt het debiet bij Vugterstuw weer toe totdat een nieuw evenwicht is bereikt. Daarna daalt het debiet weer omdat er te weinig water afgevoerd kan worden en de waterstanden toenemen en de stroomsnelheid afneemt. Bij Het Vaantje neemt het debiet verder af; omdat het bovenstrooms de inlaat van Bossche Broek Zuid ligt gebeurt het tegenovergestelde. De stroomsnelheid en het debiet nemen verder af; de waterstanden rijzen verder.

C1

Crèvecoeur gaat sluiten, de afvoerpiek bij Crèvecoeur is voorbij en vanaf nu wordt er minder water gespuid waardoor er minder aangevoerd kan worden door de Stadsdommel. Vanaf stijgen de debieten bij Vugterstuw dus minder snel (de curve wordt minder stijl).

C2

Crèvecoeur voert evenveel af als de Aa aanvoert, vanaf dit moment stroomt het water in de Stadsdommel dus de andere kant op (richting Vugterstuw). Ook het Drongelens Kanaal zit hier aan haar maximum afvoer. Het debiet bij Vugterstuw zal dus langzaam dalen.

C3

Doordat Crèvecoeur dichtzit, stabiliseert de aanvoer door de Stadsdommel van de Aa. De aanvoer van de Aa en de afvoer van het Drongelens kanaal zijn constant. Omdat Bossche Broek nog steeds versnelt kan vullen; kan er meer afgevoerd worden bij Vugterstuw. De stijging in het debiet bij het Vaantje is groter dan bij Vugterstuw omdat bij het Vaantje zowel het effect van Bossche Broek Noord en Bossche Broek Zuid hier meespeelt.

C4

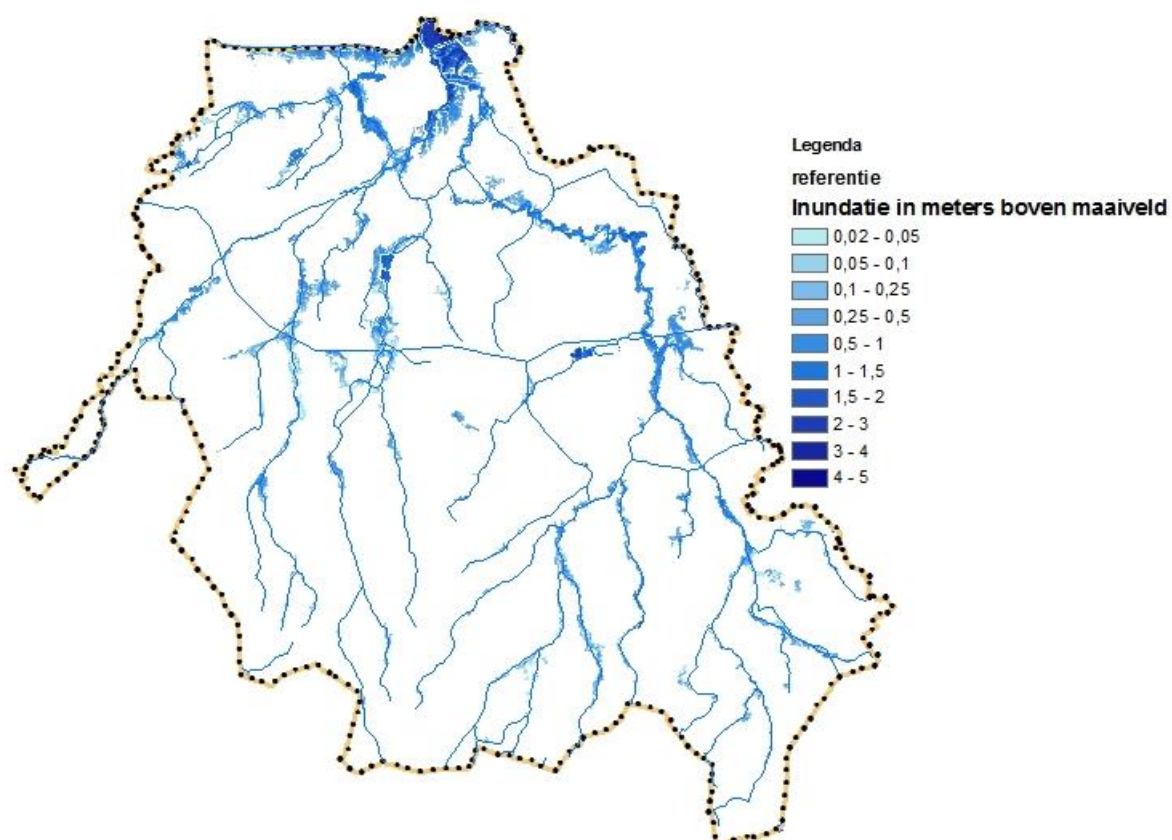
Crèvecoeur gaat weer open, hierdoor wordt er weer water geloosd op de Maas, waardoor er minder water wordt aangevoerd vanaf de Stadsdommel. Daardoor kan de Dommel meer water afvoeren over het Drongelens kanaal en neemt het debiet bij Vugterstuw toe.

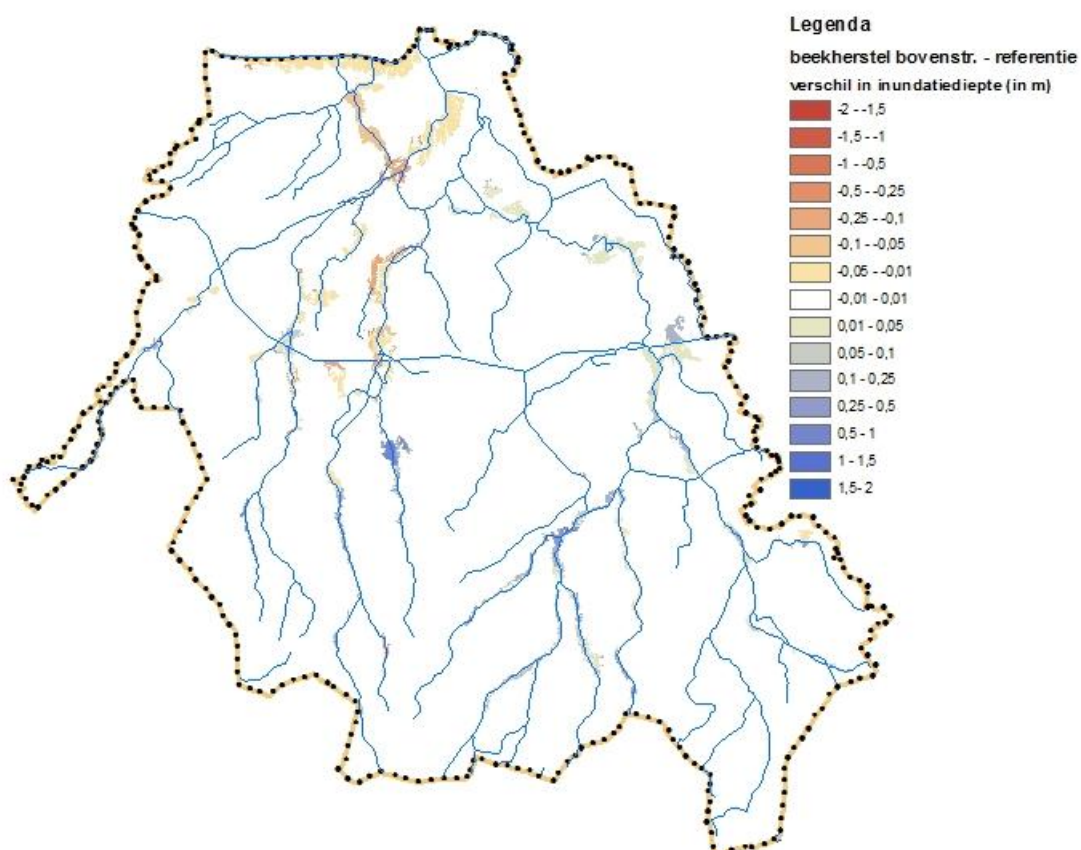
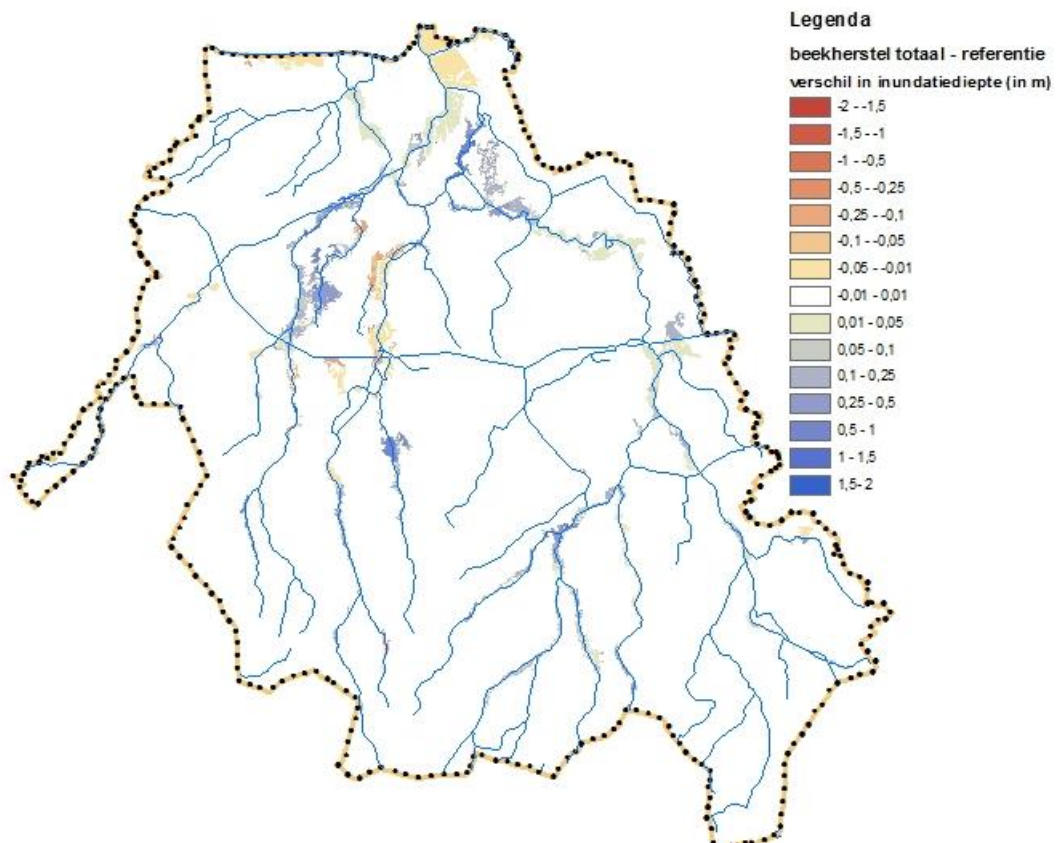
C5

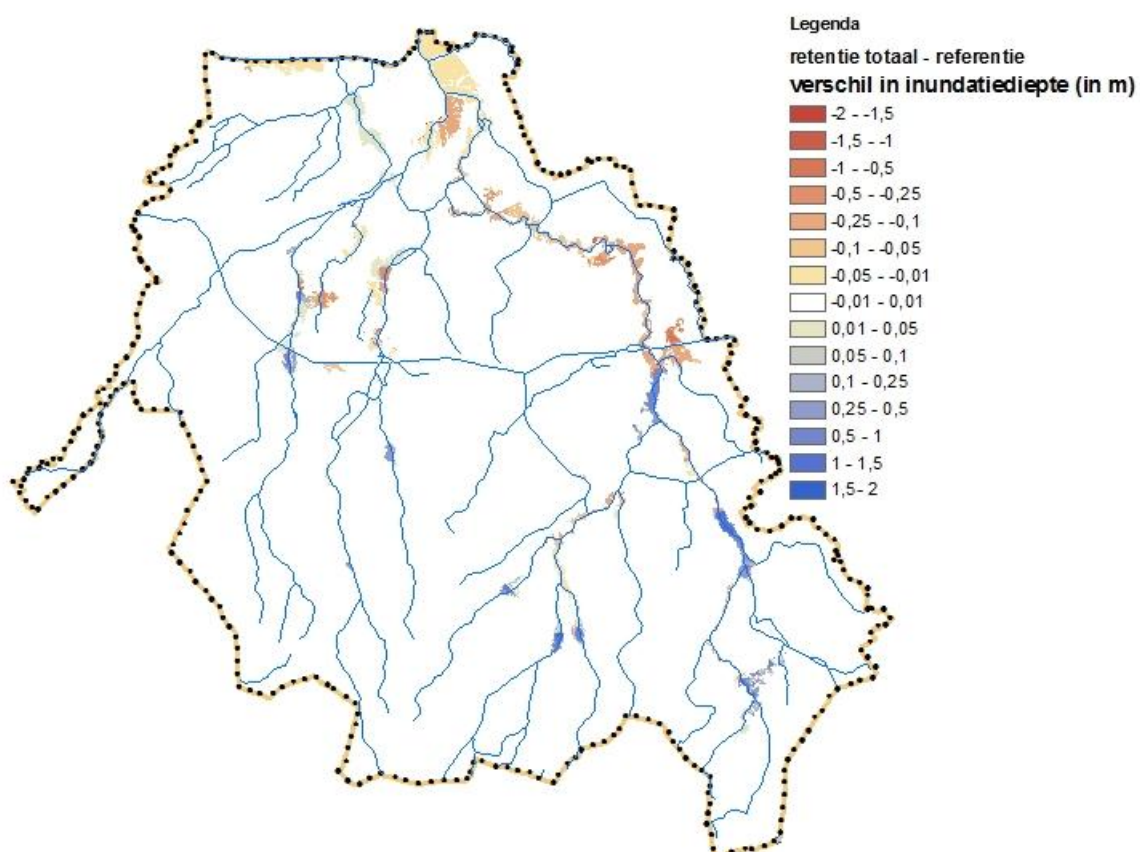
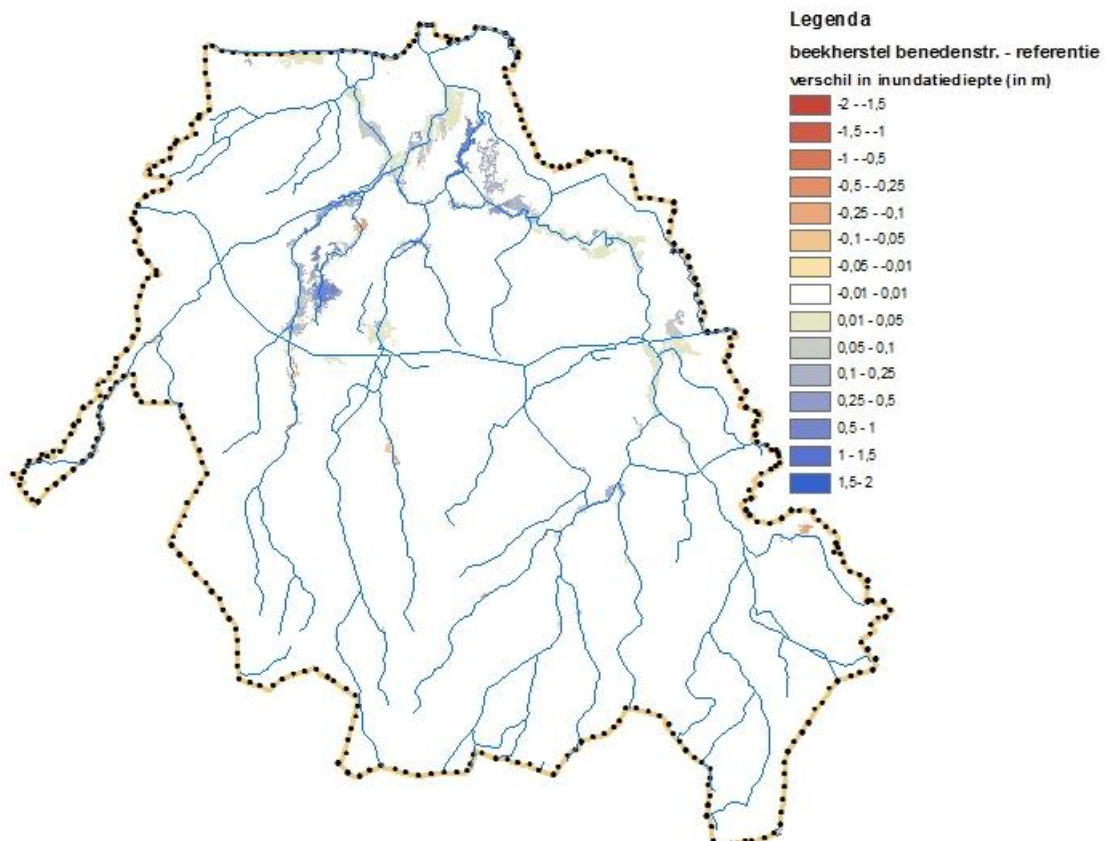
De afvoer van Crèvecoeur is even groot als dat van de Aa, daardoor stroomt het water in de Stadsdommel weer richting Crèvecoeur en neemt het debiet bij Vugterstuw verder toe.

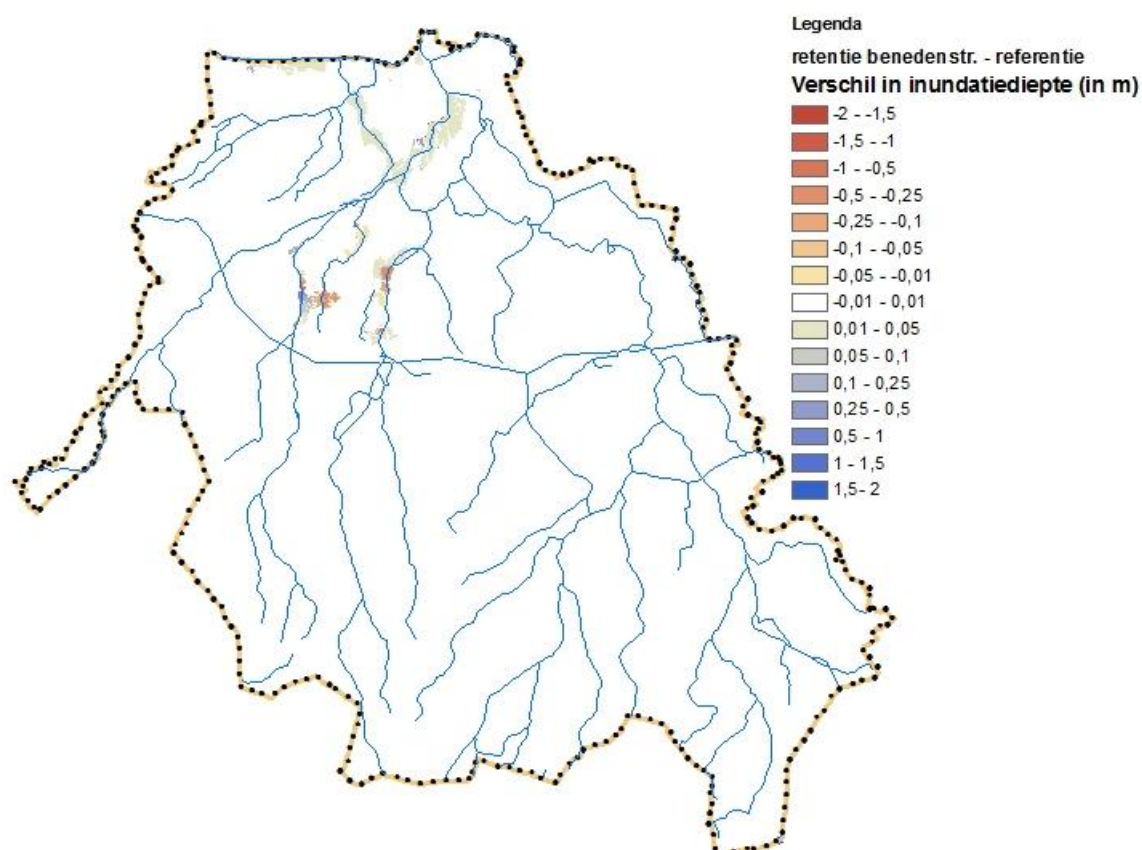
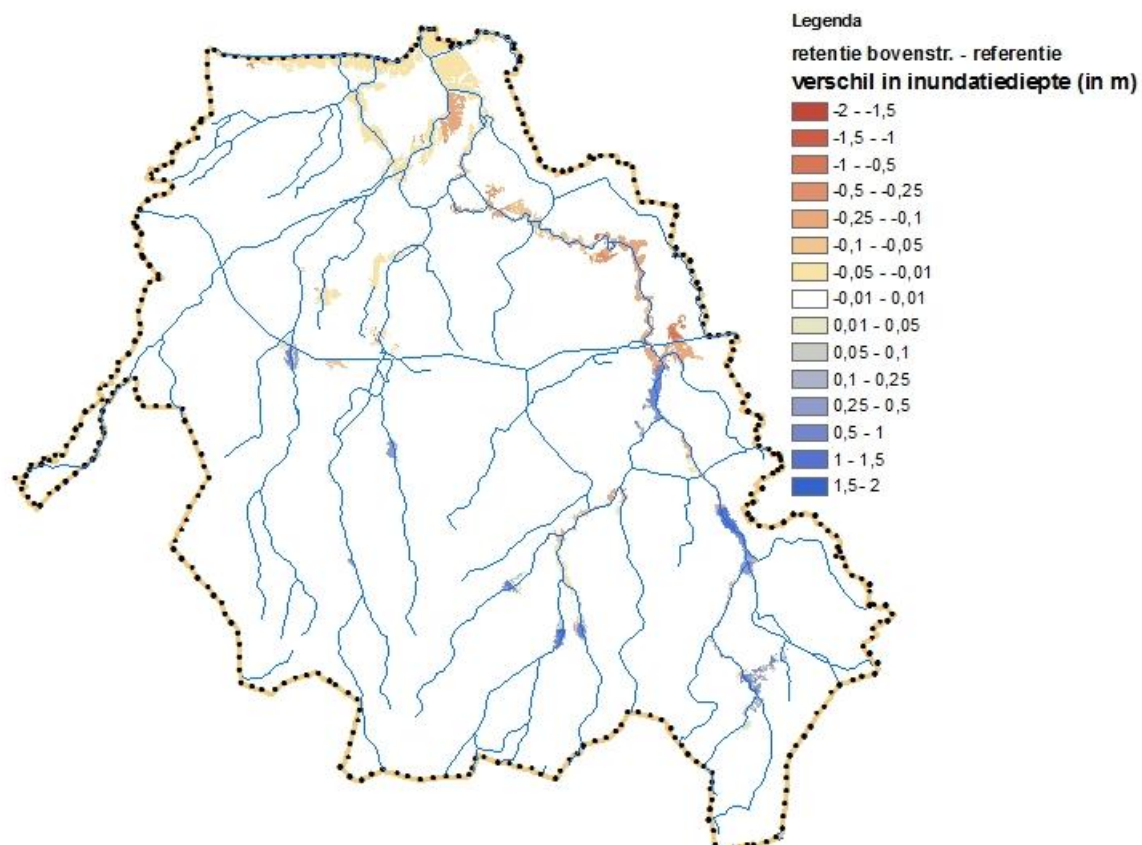
Met deze oorzaken worden alle oneffenheden in de afvoeren van de Dommel en de Essche Stroom beschreven, behalve de inzinking van het debiet van de Essche Stroom tussen de 29^e en de 31^e. Deze inzinking is te wijten aan lokale inundaties in de Essche Stroom tussen de spoorlijn Bortel-Vught en de A2. Vlak voor de 31^e zit dit gebied vol.

6 Bijlage 6: Inundatiekaarten









7 Bijlage 7: Literatuurstudie

7.1 Onderzoek speelruimte maatregelen

HKV_ Lijn in water. (2004). *Onderzoek speelruimte maatregelen stroomgebieden langs de Overijsselsche Vecht.*

7.1.1 Inleiding

De werkgroep Aanpak Wateroverlast Oppervlaktewater wil weten welke 'speelruimte' ieder waterschap in het stroomgebied van de Overijsselsche Vecht heeft voor het uitvoeren van maatregelen in het kader van Waterbeheer 21ste eeuw (WB21).

Het doel van het onderzoek is om per waterschap langs de Vecht aan te geven binnen welke maat de afvoergolf uit een stroomgebied vertraagd of versneld mag worden, al of niet in combinatie met het verhogen of verlagen van de afvoerpiek, zonder dat de waterstanden langs de Vecht de kritieke peilen overschrijden. Ieder waterschap kan op basis van deze 'speelruimte' toetsen of de effecten van maatregelen op de afvoergolf, die vanuit het stroomgebied op de Vecht wordt geloosd, toelaatbaar zijn of dat er sprake is van 'afwenteling'.

7.1.2 Model en gegevens

In het onderzoek is de aandacht gericht op het effect van de verandering van de afvoergolven vanuit de Nederlandse stroomgebieden langs de Vecht op de waterstanden langs de Vecht tijdens hoogwatersituaties. Het gehele Nederlandse deel van het stroomgebied van de Vecht is gemodelleerd met een bestaand SOBEK-River model van de Vecht dat uitgebreid is met enkele waterlopen. Er is gemodelleerd met een herhalingsdij van 1/100 jaar aangezien de effecten van vertraging inzichtelijk gemaakt worden en de data voorhanden was. De golf is veroorzaakt door één neerslag-event.

Er zijn enkele extra berekeningen gemaakt met T=500 jaar en om het effect van klimaatverandering te onderzoeken zijn afvoeren met 18% verhoogd.

De onderzochte veranderingen bestaan uit:

- ◇ het versnellen of vertragen van de afvoergolf; het moment dat de afvoertop bij de Vecht aankomt ligt enkele uren (6 à 12 uur) eerder of later in de tijd,
- ◇ het verhogen of verlagen van de afvoergolftop; de top van de afvoergolf is met enkele procenten verhoogd of verlaagd (10 à 20%) met een gelijkblijvende afvoer. Hierdoor is de piek steiler als de piek hoger is; en minder steil als de piek lager is.

De afvoergolf (bij Emlichheim) vanuit het Duitse stroomgebied blijft onveranderd.

Bij het onderzoek is gebruikgemaakt van het SOBEK-River model van de Overijsselsche Vecht dat in 2001 in opdracht van Rijkswaterstaat/RIZA is gebouwd en afgeregeld.

Er wordt vanuit gegaan dat de pieken in vanuit de stroomgebieden in Nederland 32 uur eerder optreedt dan dat de afvoerpiek Emlichheim (de Nederlands-Duitse grens) passeert.

7.1.3 Resultaten

- ◇ Het versnellen van de afvoergolven in de Nederlandse stroomgebieden langs de Vecht en het Zwarte Water heeft een (gunstig) waterstandsverlagend effect op de maximale waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water.
- ◇ Het verlagen van de afvoertoppen van de afvoergolven in de Nederlandse stroomgebieden langs de Vecht en het Zwarte Water heeft een (gunstig) waterstandsverlagend effect op de maximale waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water.

- ◇ Het vertragen van de afvoergolven in de Nederlandse stroomgebieden langs de Vecht en het Zwarte Water heeft een (ongunstig) waterstandsverhogend effect op de maximale waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water.
- ◇ Het verhogen van de toppen van de afvoergolven vanuit de Nederlandse stroomgebieden langs de Vecht en het Zwarte Water heeft een (ongunstig) waterstandsverhogend effect op de maximale waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water.

Mogelijkheden om de waterstandsverhogingen door vertragen of verhogen te reduceren zijn:

- ◇ De waterstandsverhoging langs de Vecht en het Zwarte Water ten gevolge van het vertragen van een afvoergolf kan worden gecompenseerd door de afvoertop te verlagen.
- ◇ Het verhogen van de top van een afvoergolf resulteert (uiteraard) in een waterstandsverhoging langs de Vecht en het Zwarte Water maar die kan worden gecompenseerd door het versnellen van de afvoergolf.

7.1.4 Speelruimte waterschappen

De speelruimte voor de vier aanliggende waterschappen is bepaald met de resultaten van de berekeningen uitgevoerd met het SOBEK-model van de Vechtdelta. De speelruimte per waterschap is in de onderstaande tabel samengevat.

karakter golven	waterloop ↓	Waterschap							
		Velt en Vecht		Regge en Dinkel		Reest en Wieden		Groot-Salland	
		6 uur	12 uur	6 uur	12 uur	6 uur	12 uur	6 uur	12 uur
verhogen	alle	6	6	6	6	6	6	6	6
verlagen	alle	3	3	3	3	3	3	3	3
vertragen en verlagen	Afwateringskanaal Radewijkerbeek	-20*	-20*						
	Ommerkanaal	-1	-5						
	Mariënborg-V. kan. Regge	-1	-5						
	Gem. Zedemuden			0 -6	0 -7				
	Gem. Streukelerzijl Sallandse Weter'n					-1 -5		-1 -1	-1 -1
verhogen en versnellen	alle	#	#	#	#	#	#	#	#
versnellen	alle	3	3	3	3	3	3	3	3
vertragen	alle	6	6	6	6	6	6	6	6
Uitleg: 3 = Toegestaan, geeft geen waterstandsverhoging op de Vecht (geeft zelfs verlaging). 6 = Niet toegestaan, geeft waterstandsverhoging op de Vecht. 12 uur -7% = Bij 12 uur vertragen van de afvoergolf uit het stroomgebied van dit waterschap treedt geen verhoging van de maximum waterstand langs de Vecht op als tevens de afvoertop van de golf uit het stroomgebied met 7% wordt verlaagd. # = Kan toegestaan zijn maar is niet uitgewerkt aangezien deze strategie niet direct in het logische verlengde ligt van WB21. * = De waterstandsverhoging door vertragen van de afvoergolf vanuit het Afwateringskanaal kan met verlagen van de afvoertop niet geheel worden gecompenseerd.									

Overzicht speelruimte per waterschap, herhalingstijd alle afvoergolven 100 jaar

Overzicht speelruimte per waterschap, herhalingstijd alle afvoergolven 100 jaar

De omstandigheden waarvoor de informatie in de tabel geldt zijn:

- ◇ De speelruimte is gegeven voor vertragen of versnellen van de afvoergolven met 6 uur en 12 uur. Voor andere vertragingstijden (tussen 0 en 6 uur of tussen 6 en 12 uur) kunnen de bijbehorende percentages uit de tabel worden gevonden door lineair te interpoleren.

- ◇ Alle berekeningen zijn uitgevoerd voor afvoergolven met een herhalingstijd van 100 jaar en de top van alle afvoergolven vanuit de Nederlandse stroomgebieden komt in de referentiesituatie 32 uur eerder bij de Vecht aan dan het moment dat de afvoertop op de Duitse Vecht de stad Emlichheim passeert.

Aanvullend is het effect onderzocht dat extremere afvoergolven hebben op de waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water in combinatie met het vertragen van de afvoergolf en het verlagen van de afvoertop. De effecten zijn onderzocht voor;

- ◇ afvoergolven met een herhalingstijd van 500 jaar en
- ◇ afvoergolven met een 18% hogere afvoertop, zoals in de toekomst kan optreden ten gevolge van de verwachte klimaatverandering.

De T=500 situatie is opgebouwd uit een 1/314 situatie bij Emlichheim en verschillende situaties voor de waterlopen in Nederland. Ongeacht het effect van vertragen/versnellen of verhogen/verlagen van de afvoergolven zal duidelijk zijn dat het klimaateffect veel hogere maximum waterstanden (0,2 m tot 0,5 m) oplevert langs de Vecht en het Zwarte Water, in vergelijking met de situatie bij een herhalingstijd van 100 jaar. In het kader van WB21 zullen met het nemen van maatregelen de nadelige gevolgen van deze waterstandsverhoging moeten worden tegengegaan. Het verlagen van de afvoertop is daarvoor één van de mogelijkheden evenals het, minder voor de handliggende, versnellen van de afvoergolven vanuit de stroomgebieden. Het gevolg van het vertragen/versnellen of verhogen/verlagen van de afvoergolven met een herhalingstijd van 500 jaar of de 18% hogere afvoertoppen is een versterkte waterstandsverandering. Bij de waterstandsverandering die voor afvoergolven met een herhalingstijd van 100 jaar optreedt moet in geval van afvoergolven met een herhalingstijd van 500 jaar 0,02 m worden bijgeteld en voor de 18% hogere klimaatgolven zelfs 0,05 m. Worden deze extreme afvoergolven vertraagd dan zal de afvoertop extra moeten worden verlaagd:

- ◇ ten eerste om de waterstandstoename van 0,2 m tot 0,5 m te compenseren,
- ◇ en ten tweede om de extra verhoging van 0,02 m respectievelijk 0,05 m te compenseren.

7.1.5 Conclusies en aanbevelingen

De conclusie van het onderzoek is dat het nemen van maatregelen in het kader van Waterbeheer 21ste eeuw door de waterschappen kan leiden tot verhoogde maximum waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water. Die verhoging kan worden gecompenseerd door aanvullende maatregelen in de stroomgebieden te nemen. Daarmee zijn dan geen maatregelen langs de Vecht en het Zwarte Water nodig zoals het verruimen van het doorstroomprofiel, het verhogen van kades of de inrichting van retentiegebieden.

Dit alles gaat uit van een ongewijzigd klimaat. Alleen langs de Vecht rond Coevorden kan een onveilige situatie ontstaan als in het stroomgebied van waterschap Velt en Vecht maatregelen worden genomen die leiden tot vertraging van de afvoergolven vanuit dat gebied.

Bij het voorbereiden van maatregelen in de verschillende stroomgebieden van de vier waterschappen is het belangrijk om de effecten in een vroegtijdig stadium te verkennen en onderling te overleggen en af te stemmen.

Het onderzoek heeft praktische randvoorwaarden opgeleverd die zijn te gebruiken bij een eerste toetsing van de toelaatbaarheid van effecten als gevolg van bijvoorbeeld maatregelen die de waterschappen in hun stroomgebied nemen in het kader van WB21. Juist het voorkomen van de nadelige gevolgen (afwentelen) van bijvoorbeeld voorziene klimaatverandering is een van de peilers van het beleid. In de toekomst zullen door klimaatveranderingen de afvoergolven hogere toppen hebben. Dit zal zich voor alle afvoergolven in het stroomgebied van de Vecht, ook in het Duitse stroomgebied, voordoen. Dat geeft zonder ingrepen van de beheerders in het gebied verhoogde (maximum) waterstanden langs de Vecht en het Zwarte Water. Met maatregelen langs de Vecht en het Zwarte Water, maar vooral met het nemen van maatregelen in de aanliggende stroomgebieden langs de Vecht kunnen deze waterstandsverhogingen (grotendeels) worden gereduceerd. De

maatregelen zijn uiteraard ook bedoeld om de situatie in het eigen beheersgebied van de waterschappen te verbeteren in het kader van WB21. Bij de overwegingen om te komen tot een goede keuze uit verschillende mogelijke maatregelen of combinaties van maatregelen kan de 'speelruimte' per waterschap een houvast bieden.

7.2 Samenhang afvoergolven Aa, Dommel en Maas

HKV lijn in water, Groot S. en J.Udo. (2008). Samenhang afvoergolven Aa, Dommel en Maas - Benodigde verlaging bij vertraging van de Aa en de Dommel.

7.2.1 Inleiding

In 2005 zijn in het kader van de Toetsing aan de Werknormen NBW berekeningen uitgevoerd die de basis leggen voor het ontwerpen en uitvoeren van maatregelen om wateroverlast in het stroomgebied te verminderen. Uitvoeren van maatregelen zoals waterberging, beekherstel of vasthouden van water hebben worden toegepast om het gebied te laten voldoen aan de normen. Een belangrijke voorwaarde vanuit WB21 is dat de maatregelen niet leiden tot negatieve effecten bij 's-Hertogenbosch. In theorie kan vertragen van een afvoergolf van de Aa, bijvoorbeeld door vasthouden of bergen van water, er voor zorgen dat deze golf meer samen komt te vallen met die van de Dommel en de Maas. Hetzelfde geldt voor de afvoergolf van de Dommel, die in geval van vertraging een grotere kans van samenvallen heeft met die van de Maas.

De doelstelling van het onderzoek is om duidelijk te krijgen welke verlaging van de afvoerpieken van de Aa en de Dommel nodig zijn bij een gegeven vertraging van de afvoerpieken door WB21 maatregelen. Als rekening wordt gehouden dat deze verlaging gereduceerd wordt, hebben WB21 maatregelen die leiden tot een vertraging van de afvoergolven tijdens hoogwaterperioden geen verhoging van de waterstanden in 's-Hertogenbosch tot gevolg. In het onderzoek wordt iedere combinatie van vertraging van de Aa en de Dommel beschouwd van 0, 1, 3, 6, 9, 12 en 24 uur.

Het onderzoek gaat niet in op de effecten van afzonderlijke maatregelen maar biedt inzicht in de mate waarin afvoergolven van de Aa en de Dommel verlaagd moeten worden als deze vertraagd bij 's-Hertogenbosch aankomen, om verhoging van de waterstanden in 's-Hertogenbosch tijdens hoogwaterperioden te voorkomen. 's-Hertogenbosch heeft een beschermingsnorm tegen wateroverlast van 1/150 jaar. Er is uitgegaan van historische hoogwaterperioden om de samenval van hoogwaterpieken te analyseren.

7.2.2 Hoogwaterberekeningen

Om de waterstanden in 's-Hertogenbosch te berekenen, is een uitsnede rond 's-Hertogenbosch uit het Sobek Channel Flow (CF) model voor het Gebiedsdekkend Hoogwater Model gebruikt. Onder andere de werking van de sluis bij Crèvecoeur is aangepast om de werkelijkheid beter te modelleren.

Per hydrologisch jaar is voor de Aa, de Dommel en de Maas de hoogste hoogwaterperiode geselecteerd. Voor de Aa en de Dommel is dit gebaseerd op de gemeten debieten, voor de Maas op de berekende waterstanden. Al deze 38 historische hoogwaterperioden zijn met het model doorgerekend waarmee de 38 referentiesituaties bepaald zijn. Daarna zijn om de gevolgen van vertragen van de afvoergolf van de Aa en de Dommel te verkrijgen alle 38 hoogwaterperioden doorgerekend met een vertraging van 24 uur voor beide rivieren.

Vooraf in de extremere hoogwaterperioden kan een vertraging voor verhoging van de waterstand zorgen. Voor een selectie van hoogwaterperioden is berekend hoeveel de vertraagde afvoer moet verlagen om niet tot hogere waterstanden in 's-Hertogenbosch te leiden. Dit is berekend voor zeven perioden; de vijf hoogwaterperioden die in de referentiesituatie leiden tot de hoogste waterstanden, de periode die leidt tot de laagste waterstand en een 'gemiddelde' hoogwaterperiode. Bij het

bepalen van de benodigde verlaging wordt ervan uitgegaan dat de hoogste waterstanden in de referentiesituatie niet overschreden mogen worden. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat deze zeven perioden representatief zijn voor alle 38 hoogwaterperioden. De benodigde verlaging is getest in stappen van 5 % van de maximale afvoer.

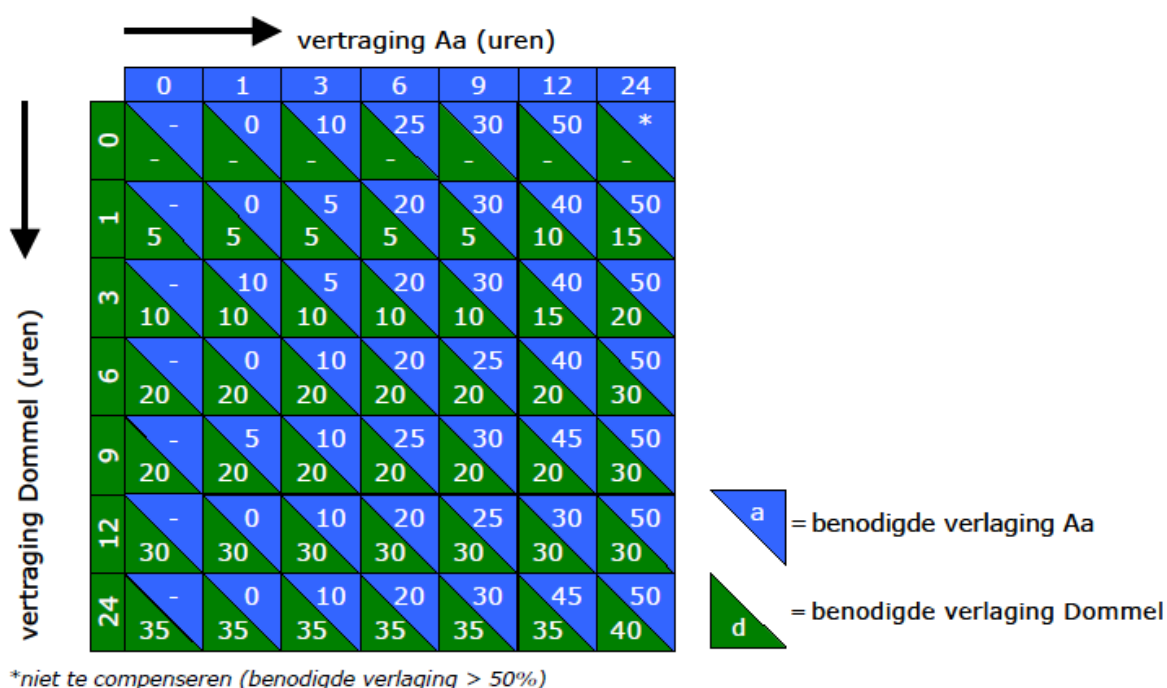
7.2.3 Resultaat

De gevolgen van vertragen van de afvoerpieken van de Aa en de Dommel voor de waterstanden in 's-Hertogenbosch verschillen per hoogwaterperiode, voornamelijk omdat de combinatie van de afvoerpieken sterk verschilt per hoogwatersituatie. De invloed van vertraging van de afvoergolven van de Aa of de Dommel is sterk afhankelijk van de vorm van de afvoergolf en de periode waarin de afvoergolf optreedt in relatie tot de waterstanden op de Maas. Ook de bediening van Spuisluis Crèvecoeur is bepalend voor de waterstanden in 's-Hertogenbosch. Verlaging van de piekafvoer van de vertraagde rivier kan er voor zorgen dat de waterstanden in 's-Hertogenbosch gemiddeld niet toenemen.

Onderstaande tabel geeft de gemiddeld benodigde verlaging bij vertraging van de hoogwatergolf.

benodigde verlaging afvoerpiek [% van piekniveau]							
vertraging [uur]	0	1	3	6	9	12	24
Aa	0	0	4	11	14	20	32
Dommel	0	2	5	12	14	19	23

Naast deze gemiddelde benodigde verlaging is er ook gekeken naar de benodigde maximale vermindering van de afvoer, waarbij de waterstand in 's-Hertogenbosch voor geen van de perioden stijgt. Onderstaande tabel geeft de maximaal benodigde vermindering van de afvoer in procenten van de afvoerpiek, per gegeven vertraging, om de waterstanden in 's-Hertogenbosch in geen van de gevallen te laten stijgen.



Verder wordt het volgende geconcludeerd:

- ◇ In 14 van de 23 beschouwde hoogwaterperioden stijgt de waterstand in 's-Hertogenbosch niet als gevolg van vertragen van de Aa of de Dommel.

- ◇ In twee van de vijf gebeurtenissen die in de referentiesituatie (gebeurtenissen tussen 1979-2004) tot de vijf hoogste waterstanden leiden, neemt de waterstand in 's-Hertogenbosch significant toe (maximaal 21 cm) bij vertragen van de afvoergolven met 24 uur. Dit is minder dan 10% van de beschouwde hoogwaterperioden, maar betekent wel dat bij vertragen van de afvoergolven maatregelen genomen moet worden om verhoging van de waterstanden in 's-Hertogenbosch te voorkomen.
- ◇ Om de waterstanden ook in het ergste geval niet te doen stijgen, kan de benodigde vermindering van de piekafvoer oplopen tot meer dan 50%, hetgeen geen reële afvoervermindering lijkt. Voor zowel de Dommel als de Aa is een vertraging van de afvoergolf met 24 uur in de meest extreme gebeurtenis niet goed op te vangen.
- ◇ De benodigde afvoerverlaging bij vertraging van de Dommel en/of de Aa kan aanzienlijk zijn. Dit maakt een zorgvuldige analyse van de precieze effecten van inrichtingsvarianten van de Dommel en de Aa in het kader van bijvoorbeeld de Wateropgave en beekherstel noodzakelijk.
- ◇ Als afvoerverlaging bereikt wordt door (een) bergingsgebied(en) in te zetten, is het zinvol te onderzoeken op welk moment in de afvoergolf deze berging het beste ingezet kan worden.

7.3 Modellerings lokale effecten van beekherstel op het afvoerpatroon

Waterschap de Dommel. (2006). *Modellerings lokale effecten van beekherstel op het afvoerpatroon*.

7.3.1 Inleiding

In veel plannen van verschillende overheden en waterschappen komt wordt herstel- en inrichtingsbeleid voor beeksystemen genoemd. Maar er is weinig bekend van de echte effecten van beekherstel. Daarmee rijst ook de vraag in hoeverre de beleidsdoelstellingen realistisch zijn en in hoeverre het waterschap op een goede en effectieve manier haar (her)inrichtingsprojecten uitvoert.

In deze studie wordt onderzoek gedaan naar de effecten van Beekherstel door middel van de modellerings van beekherstel in de Tongelreep, Raamsloop en de Reusel. Onder effect op het afvoerpatroon wordt verstaan de reductie van de maximale afvoer (afvoerpiek) en de vertraging van de afvoergolf. Aan de hand van dit onderzoek kunnen meer realistische en gefundeerde (beleids) doelstellingen opgesteld worden en wordt bijgedragen aan een doelgerichte, effectieve inrichting van (toekomstige) beekhersteltrajecten.

7.3.2 Modelbouw

Voor het bepalen van de effecten van de herinrichting van een beektraject op de lokale waterhuishouding wordt gebruik gemaakt van SOBEK-1D2D. Dit is een model om het gedrag van een watersysteem te simuleren, waarbij zich overstromingen over land voordoen. Het effect dat optreedt als gevolg van beekherstel (inundatie, meestromende berging en berging in lokale depressies) kan met behulp van dit model goed in beeld worden gebracht. Om de effecten van beekherstel op het afvoerpatroon voor de drie geselecteerde beektrajecten in beeld te brengen zijn met het modelinstrumentarium modellen gemaakt van de huidige situatie en de situatie na beekherstel (verdieping, versmalling en meandering). Met deze modellen zijn afvoersituaties doorerekend variërend in frequentie van vijf maal per jaar tot eenmaal per honderd jaar. Met behulp van de berekeningsresultaten zijn de effecten van de verschillende afvoersituaties voor de drie beektrajecten in beeld gebracht.

7.3.3 Resultaat

Reusel

Bij het beoordelen van de lokale effecten in de Reusel blijkt dat beekherstel het verwachte effect

oplevert ten aanzien van de reductie en de vertraging van de afvoerpiek. De afvoerpiek wordt als gevolg van het beekherstel gereduceerd met 0,6 tot 1,7% en vertraagd met 1 tot 5 uur. De mate waarin de afvoerpiek wordt gereduceerd is relatief klein en de reductie van de afvoerpiek laat geen verband zien met de grootte van de afvoersituatie. Deze relatief kleine reductie kan verklaard worden door het korte gekozen beekhersteltraject (potentieel bergingsvolume) ten opzichte van het totale stroomgebied (afvoervolume). De vertraging van de afvoerpiek is voornamelijk het gevolg van tijdelijke berging van water op het maaiveld. Voor de Reusel wordt weinig tot geen meestromende berging berekend. Diverse factoren, zoals de stuw ES1-1, de bijdrage van de Voorste Stroom en de locatie waar de Voorste Stroom en de Reusel samenkomen beïnvloeden de resultaten. Door het ontbreken van voldoende gegevens is de exacte bijdrage van genoemde factoren niet te bepalen. Hiervoor zijn aanvullende berekeningen nodig. De keuze voor de Reusel als beektraject voor het bepalen van de lokale effecten van beekherstel op het afvoerpatroon is daarom achteraf bezien niet de beste keuze.

Tongelreep

Voor de Tongelreep blijkt dat het beekherstel eveneens het verwachte effect oplevert ten aanzien van de reductie en de vertraging van de afvoerpiek. De afvoerpiek wordt als gevolg van het beekherstel gereduceerd met 4,2 tot 11,8% en vertraagd met 6 tot 17 uur. De mate waarin de afvoerpiek wordt gereduceerd is relatief groot. Door de grote initiële lengte van het beektraject en vervolgens de toename van de lengte van het beektraject met een factor 1,5 neemt het verhang af en wordt de piek relatief sterk gereduceerd. Het effect ten aanzien van de vertraging van de afvoerpiek is afhankelijk van de afvoersituatie. De vertraging van de afvoerpiek wordt kleiner met het toenemen van de grootte van de afvoerpiek. Dit is te verklaren doordat bij hoge afvoeren het water niet langer door het beekprofiel stroomt maar via het maaiveld tot afvoer komt. Hierdoor ontstaat kortsluiting omdat de af te leggen afstand door het water korter wordt met als gevolg een relatief kleine verandering van de afvoerpiek.

Raamsloop

Ook voor de Raamsloop blijkt dat het beekherstel het verwachte effect oplevert ten aanzien van de reductie en de vertraging van de afvoerpiek. De afvoerpiek wordt als gevolg van het beekherstel gereduceerd met 0,4 tot 13,6% en vertraagd met 8 tot 24 uur. De mate waarin de afvoerpiek wordt gereduceerd is sterk afhankelijk van de afvoersituatie. De reductie neemt toe met de grootte van de afvoersituatie. De vertraging van de afvoerpiek is het gevolg van het langer maken van de beek (kleiner verhang) en tijdelijke berging van water op het maaiveld. Het effect ten aanzien van de vertraging van de afvoerpiek is afhankelijk van de afvoersituatie. De vertraging van de afvoerpiek wordt kleiner met het toenemen van de grootte van de afvoerpiek. De verklaring is hetzelfde als bij de Tongelreep (kortsluiting door afvoer over maaiveld in plaats van via het beekprofiel).

7.3.4 Conclusies

Het beekherstel heeft lokaal een overwegend reducerend en vertragend effect op de afvoergolf. De effecten van het beekherstel voldoen aan de verwachtingen, en leveren een verlaging en vertraging van de afvoerpiek. De effectiviteit van het beekherstel is sterk afhankelijk van het beoordeelde beektraject. De combinatie van ingrepen, het landgebruik en de maaiveldhoogte rondom de beek bepalen voor een groot gedeelte wat het effect op het afvoerpatroon is. De resultaten bieden een goed inzicht in de effecten van beekherstel voor de drie beoordeelde beektrajecten.

Relatie ingrepen en effecten

- ◇ Tussen de toename van de lengte van een beek en de reductie van de afvoerpiek bestaat geen eenduidig verband. Voor de Tongelreep en de Raamsloop kan wel een kwalitatief

(beschrijvend) verband worden gelegd. Voor de Reusel is geen verband te leggen tussen de toename van de lengte van de beek en de piekafvoerreductie.

- ◇ Tussen de toename van de lengte van een beek en de vertraging van de afvoerpiek bestaat eveneens geen eenduidig verband. Voor elke beek afzonderlijk kan wel een kwalitatieve relatie worden gelegd. Voor de Reusel geldt dat bij een toenemende piekafvoer deze piek meer wordt vertraagd. Voor de Tongelreep en de Raamsloop geldt het tegenovergestelde, namelijk dat bij een toenemende piekafvoer de piek steeds minder wordt vertraagd.

Algemeen

- ◇ Door het vergelijken van de resultaten van de berekeningen voor en na beekherstel ontstaat inzicht in de lokale effecten van beekherstel op het afvoerpatroon; over het algemeen blijft de start van de golf gelijk, maar worden de pieken lager en eindigen de golven iets later, de totale afvoer wordt kleiner.
- ◇ Het beekherstel heeft een relatief groot effect op de peilen in de beken. Het beekherstel bestaat onder andere uit het ondieper maken van de beek, met als gevolg een peilstijging. Daarnaast heeft het beekherstel tot gevolg dat de ligging van de beek veranderd. Dit beperkt de mogelijkheid om de peilen voor en na beekherstel objectief te kunnen vergelijken.
- ◇ De effecten van beekherstel zijn sterk afhankelijk van het beoordeelde beektraject. De combinatie van ingrepen, het landgebruik de maaiveldhoogte rondom de beek en de lengte van de beek bepalen in sterke mate wat het effect van het aanpassen van de beek op het afvoerpatroon is.