



Maaien of niet?



***Effect van de
Flora- en Fauna wet
op het peilbeheer***

Wilgert Veldman



Waterschap Veluwe



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

Projectgegevens

Titel: Maaien of niet?
Subtitel: Effect van de Flora- en Faunawet op het peilbeheer

Universiteit Twente

Dr. ir. D. C. M. Augustijn (afstudeerdocent)

053 – 489 4510
d.c.m.augustijn@ctw.utwente.nl



Drs. F. Huthoff (dagelijks begeleider)

053 – 489 4705
f.huthoff@ctw.utwente.nl

Universiteit Twente
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Afdeling Waterbeheer
Drienerlolaan 5, gebouw Horst
Postbus 217
7500 AE Enschede

Waterschap Veluwe

Dr. M. Visser (dagelijks begeleider)

055 – 527 29 11
visser.m@veluwe.nl

Waterschap Veluwe
Steenbokstraat 10
Postbus 4142
7320 AC Apeldoorn



Student

W. G. Veldman

038 – 453 43 28 / 06 – 18 369 581
w.g.veldman@student.utwente.nl
veldman.wg@veluwe.nl

Van Hille Gaerthé straat 17
8023 CA Zwolle

Voorwoord

Dit rapport beschrijft het afstudeeronderzoek dat ik heb uitgevoerd voor de studie Civiele Techniek bij de afdeling Waterbeheer aan de Universiteit Twente. Na eerst vier jaar Civiele Techniek gestudeerd te hebben aan de HTS te Zwolle en twee jaar Civiele Techniek aan de Universiteit Twente, markeert dit rapport het einde van zes jaar studeren. Hoewel ik hiermee het leerproces aan een onderwijsinstelling beëindig, hoop ik en verwacht ik niet dat ik nu alles weet. Ik heb een mooie basis gelegd in mijn opleiding, maar het echte leerwerk gaat nu beginnen: werken.

Zonder hulp van mijn afstudeercommissie had dit rapport niet kunnen worden tot wat het nu is. Daarom wil ik Marijke Visser van Waterschap Veluwe, Freek Huthoff van de Universiteit Twente en Denie Augustijn, eveneens van de Universiteit Twente, hartelijk bedanken voor het uitstekende begeleidingswerk. Marijke: Ik stond altijd versteld hoeveel tijd je vrij wilde en kon maken als ik weer vragen of opmerkingen had. Je was altijd meedenkend en hebt me interessante inzichten gegeven. Freek: Met name de mailwisseling die we op een gegeven moment hadden betreffende je ruwheidvergelijking vond ik erg interessant en leerzaam. Mooi moment vond ik dat je een mailtje terugstuurde met de tekst: "Hoi Wilgert, Je hebt gelijk! Grösse Freek". Denie: In 2004 na de Mastervoorlichting heb ik je gesproken over de mogelijkheden van de opleiding. Mede dankzij die voorlichting heb ik gekozen voor de Universiteit Twente. Toevallig werd je mijn afstudeerdocent en evenals bij de vakken die je aan mij hebt gedoceerd, was je ook bij mijn afstuderen zeer betrokken en enthousiast. Met name het grondig nalezen van stukken die ik had geschreven en het leveren van opbouwende kritiek hierop zijn dit afstudeerwerk zeker ten goede gekomen.

Verder wil ik de werknemers bij Waterschap Veluwe bedanken voor de gezellige en uitstekende werksfeer gedurende mijn afstuderen. In het bijzonder wil ik daarbij landmeter Wim Ebbink noemen, die gezorgd heeft dat Sobek net even wat sneller op mijn pc werd geïnstalleerd dan bij afdeling I&O eerst de bedoeling was. Modelleur Ans Elfrink, waarmee ik met name in het laatste deel van mijn afstuderen een kamer deelde: je hebt me wat liefde voor de flora bijgebracht. De Smeerwortel is inderdaad een bijzondere plant.

Apeldoorn, augustus 2006

Wilgert Veldman

Samenvatting

In 2002 is in Nederland de Flora- en Faunawet aangenomen. Deze wet heeft als doel de Flora en Fauna in Nederland te beschermen en heeft direct betrekking op de waterschappen in Nederland. In de Flora- en Faunawet worden namelijk restricties gelegd op het tijdstip waarop watergangen onderhouden mogen worden. Voor het maaien van de berm en schonen van de watergang, verder te noemen als maaien van de watergang, stelt de Flora- en Faunawet dat dit niet meer mag gebeuren voor 15 juli. Slechts onder strikte voorwaarden mag afgeweken worden van deze bepaling. Juist in het groeiseizoen van de vegetatie mogen de watergangen niet worden gemaaid. Het probleem dat hierbij optreedt is dat de watergangen dan dichtgroeien met vegetatie. Onduidelijk is of deze vegetatiegroei in de watergangen problemen oplevert ten tijde van natte omstandigheden. Vegetatie zorgt namelijk voor een verhoogde ruwheid in de watergang en bij een toenemende ruwheid, zal ook de waterstand stijgen in een watergang. Het is echter niet bekend hoe sterk deze waterstandstijging is en of dit tot wateroverlast zal leiden. De centrale vraag van dit onderzoek is dan ook of Waterschap Veluwe de watergangen moet maaien of niet voor 15 juli, om wateroverlast te voorkomen.

Het beheersgebied van Waterschap Veluwe bestaat voor een deel uit hellende, vrij afwaterende beken en sprengen en een deel uit watergangen in lager gelegen poldergebied. Problemen omtrent de Flora- en Faunawet worden met name in de lager gelegen poldergebieden verwacht. Op deze gebieden concentreert zich het onderzoek. Het riviertje de Fliert wordt daarbij als onderzoeksgebied genomen, aangezien daar gelijktijdig met dit onderzoek een begroeiingsproef wordt gehouden.

De berekeningen voor dit onderzoek worden gedaan met een ruwheidvergelijking voor de vegetatie. In die vergelijking wordt de vegetatie in de watergangen op een bepaalde manier beschreven. Daarmee wordt de waterstand berekend. Om te bepalen wat de meest ideale ruwheidvergelijking is, zijn acht verschillende methoden met elkaar vergeleken: de traditionele methoden van Chézy en Manning, de methode van White-Colebrook, van De Bos en Bijkerk, Griffioen en Pitlo, Rijkswaterstaat, Huthoff en als achtste methode, de methode van Baptist. Voor verschillende vegetatiestadia in een standaard watergang, zoals die veelvuldig voorkomen in het beheersgebied van Waterschap Veluwe, zijn met deze acht vergelijkingen berekeningen gedaan. De methoden van Baptist en De Bos en Bijkerk komen bij deze berekeningen bijzonder goed met elkaar overeen. De methode van Baptist is een betrouwbare methode, aangezien deze gebaseerd is op 177 stroomgoot experimenten uit 10 onafhankelijk studies en 990 datasets. Bij lage waterstanden geeft de methode van Baptist een hogere ruwheid dan de meeste andere methoden en bij hoge waterstanden een lagere ruwheid dan de meeste overige methoden. De methode van De Bos en Bijkerk geeft dezelfde resultaten als de methode van Baptist. Aangezien de methode van De Bos en Bijkerk standaard is opgenomen in het modelinstrumentarium Sobek Rural, wordt gekozen voor de methode van De Bos en Bijkerk. Immers, met Sobek Rural worden de berekeningen voor dit onderzoek uitgevoerd.

Om te bepalen hoe gevoelig een laag gelegen poldergebied is voor vegetatiegroei in watergangen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Deze gevoeligheidsanalyse omvat vijf verschillende ruwheidsscenario's, oplopend van een gladde naar een begroeide watergang, en 6 verschillende neerslagsituaties: buien van 8 dagen met een statistische herhalingsperiode van 1, 10, 25 en 100 jaar, een 2 mm

per dag bui en een werkelijk gevallen bui in 2005 in het Gelderse plaatsje Eerbeek. Combinatie van de ruwheidscenario's en buitypen levert dertig verschillende scenario's op. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat het laaggelegen poldergebied voornamelijk gevoelig is voor piekbuien. Wanneer de ruwheid gelijktijdig wordt verhoogd bij een piekbui die eens in de 10 jaar voorkomt en de bui die gevallen is in Eerbeek in 2005, stijgt de waterstand ten opzicht van het goed onderhouden scenario bij de piekbui beduidend meer.

Volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water moeten de watergangen in gebieden met grasland worden gedimensioneerd op een bui die eens in de 10 jaar voorkomt. Met dit buitype wordt daarom gezocht naar oplossingen om de waterstand op hetzelfde niveau te krijgen als het niveau wanneer de watergangen goed onderhouden worden. Op basis van de huidige maaifrequentie is bepaald welke ruwheid de Fliert werkelijk zal hebben als besloten wordt de watergangen niet te maaien voor 15 juli. Dit ruwheidscenario is in combinatie met de piekbui die eens in de 10 jaar voorkomt doorgerekend. Het verschil tussen de waterstand van dit scenario en de waterstand die de Fliert heeft wanneer de watergangen goed onderhouden worden, is de taakstelling die gehaald moet worden. De dichtgegroeide watergangen hebben een waterstandstijging van gemiddeld 20 cm tot gevolg.

In eerste instantie was vanuit de gevoeligheidsanalyse het idee geopperd om de duikers in de Fliert te verbreden. Het verbreden van de duikers heeft echter amper effect. Zelfs het verwijderen van deze duikers leidt niet tot waterstanddaling, maar op sommige locaties zelfs tot een waterstandstijging. Dit wordt veroorzaakt doordat de duikers zelf van beton zijn en een lage ruwheid hebben dan de dichtgegroeide watergangen. Worden deze duikers weggehaald, dan komt een veel ruwere watergang daarvoor in de plaats waardoor de waterstand stijgt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het van belang is dat de duikers goed onderhouden worden.

Vervolgens is geprobeerd om de taakstelling te halen door de Fliert te verbreden. De waterstand in de Fliert zal zakken naar het gewenste niveau als deze wordt verbreed variërend van 0,75 m in het bovenstrooms gedeelte van de Fliert, tot lokaal 4,0 m. Deze verbredingen kunnen worden ingericht als natuurvriendelijke oevers. Eventuele andere oplossingsrichtingen moeten in het kader van het Waterbeleid voor de 21^e eeuw staan. Dit is een advies van de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw die een drietrapsstrategie hanteert voor het omgaan met waterproblematiek. Deze drietrapsstrategie houdt in dat in eerste instantie overtollig water moet worden vastgehouden, vervolgens moet worden geborgen en als deze twee te weinig opleveren, afgevoerd moet worden. Een mogelijkheid van bergen is het creëren van retentiegebieden langs de Fliert, die in tijden van veel water gecontroleerd onder water kunnen worden gezet. Ook het realiseren van natuurvriendelijke oevers door de Fliert te verbreden is een vorm van berging.

Aan het einde van dit onderzoek kan dus geconcludeerd worden dat wanneer de Flora- en Faunawet nageleefd wordt en de watergangen niet gemaaid worden, maatregelen genomen moeten worden om wateroverlast te voorkomen en te voldoen aan de norm die gesteld is in het Nationaal Bestuursakkoord Water.

Inhoudsopgave

Projectgegevens	ii
Voorwoord	iii
Samenvatting	iv
Symbolenlijst	viii
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemstelling	3
1.3 Onderzoeksdoel	4
1.4 Leeswijzer	4
2 Gebiedsbeschrijving	5
2.1 Beheersgebied Waterschap Veluwe	5
2.2 Onderzoeksgebied	7
2.2.1 De Fliert	7
2.2.2 Begroeiingproef	7
2.2.3 Kunstwerken in de Fliert	8
2.2.4 Bussloo	9
3 Ruwheidvergelijking	10
3.1 Modelleren van vegetatieruwheid	10
3.2 Bestaande methoden	11
3.2.1 Standaard ruwheidvergelijkingen	11
3.2.2 Ruwheidvergelijkingen voor vegetatie	12
3.3 Ruwheidsbeschrijvingen in Sobek Rural	15
3.4 Te gebruiken methode	16
3.4.1 Vergelijking	17
3.4.2 Keuze	22
4 Gevoeligheidsanalyse	23
4.1 Sobek Rural	23
4.1.1 Rainfall-runoff	23
4.1.2 Channel Flow	24
4.2 De Fliert in Sobek	24
4.2.1 Initiële Situatie	25
4.2.2 Randvoorwaarden	25
4.2.3 Gemalen en Stuwen	26
4.3 Neerslagsscenario's	27
4.3.1 Statistische Bui	27
4.3.2 Constante Bui	28
4.3.3 Werkelijke Bui	29
4.4 Ruwheidscenario's	30
4.5 Cases	30
4.6 Modelresultaten	30
4.6.1 Maximale Waterstanden	31
4.6.2 Waterstand in Tijd	34
4.6.3 Debiet in Tijd	36

4.6.4	Hysteresis.....	37
4.7	Analyse & Conclusie	38
5	Oplossingsrichtingen	42
5.1	Basisscenario	42
5.2	Taakstelling	43
5.3	Duikers.....	44
5.3.1	Duikers vergroten	44
5.3.2	Duikers verwijderen.....	45
5.4	Watersgangen verbreden	46
5.4.1	Uniform verbreden.....	46
5.4.2	Finetuning.....	48
5.5	Overige mogelijkheden	52
6	Conclusies & Aanbevelingen.....	54
6.1	Conclusies	54
6.2	Aanbevelingen	55
7	Literatuurlijst	57
Bijlage I: Maximale waterstanden		59
Bijlage II: Waterstand in tijd		62
Bijlage III: Debiet in tijd.....		71
Bijlage IV: Duikers		80
Bijlage V: Verbreding Fliert		81
Bijlage VI: Buien		84

Symbolenlijst

Symbol	Beschrijving	Eenheid
A	Natte oppervlak van dwarsdoorsnede profiel	[m ²]
A ₁	Natte oppervlak onbegroeide gedeelte	[m ²]
A ₂	Natte oppervlak begroeide gedeelte	[m ²]
A _{f1}	Natte oppervlak subsectie 1	[m ²]
A _{f2}	Natte oppervlak subsectie 2	[m ²]
B	Breedte watergang op de bodem	[m]
C	Chézy weerstandcoëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
C _b	Chézy weerstandcoëfficiënt van de bodem	[m ^{1/2} /s]
C _d	Weerstandcoëfficiënt (eng: drag coefficient)	[-]
C _v	Chézy weerstandcoëfficiënt van toplaag vegetatie	[m ^{1/2} /s]
D	Stengel diameter vegetatie	[m]
g	Zwaartekrachtversnelling; 9,81 m/s ²	[m/s ²]
γ	Weerstandcoëfficiënt in De Bos en Bijkerk vergelijking	[1/s]
h	Waterdiepte	[m]
i	Waterspiegelverhang	[-]
i ₁	Waterspiegelverhang onbegroeide gedeelte	[-]
i ₂	Waterspiegelverhang begroeide gedeelte	[-]
k	Vegetatiehoogte	[m]
κ	Von Karmann constante; 0,41	[-]
k _M	Manning weerstandcoëfficiënt	[m ^{1/3} /s]
k _{M1}	Manning weerstandcoëfficiënt onbegroeide gedeelte	[m ^{1/3} /s]
k _n	Nikuradse zandruwheid	[m]
k _s	Strickler weerstandcoëfficiënt	[m ^{1/3} /s]
k _{sz}	Strickler zandruwheid	[m]
k _v	Ruwheidhoogte voor ruwheid toplaag vegetatie	[m]
m	Dichtheid vegetatie	[1/m ²]
O	Natte omtrek van dwarsdoorsnede profiel	[m]
O ₁	Natte omtrek onbegroeide gedeelte	[m]
R	Hydraulische straal, $R = A/O$	[m]
R ₁	Hydraulische straal onbegroeide gedeelte, $R_1 = A_1/O_1$	[m]
s	Afstand tussen vegetatie onderling	[m]
v	Stroomsnelheid in langsrichting van watergang	[m/s]
V _O	Percentage onbegroeide dwarsdoorsnede watergang	[%]
W	Weerstandswaarde vegetatie	[m/s]
x	Aantal uren dat neerslag duurt	[uren]
y	Percentage gevallen neerslag na x aantal uren	[%]

1

Inleiding

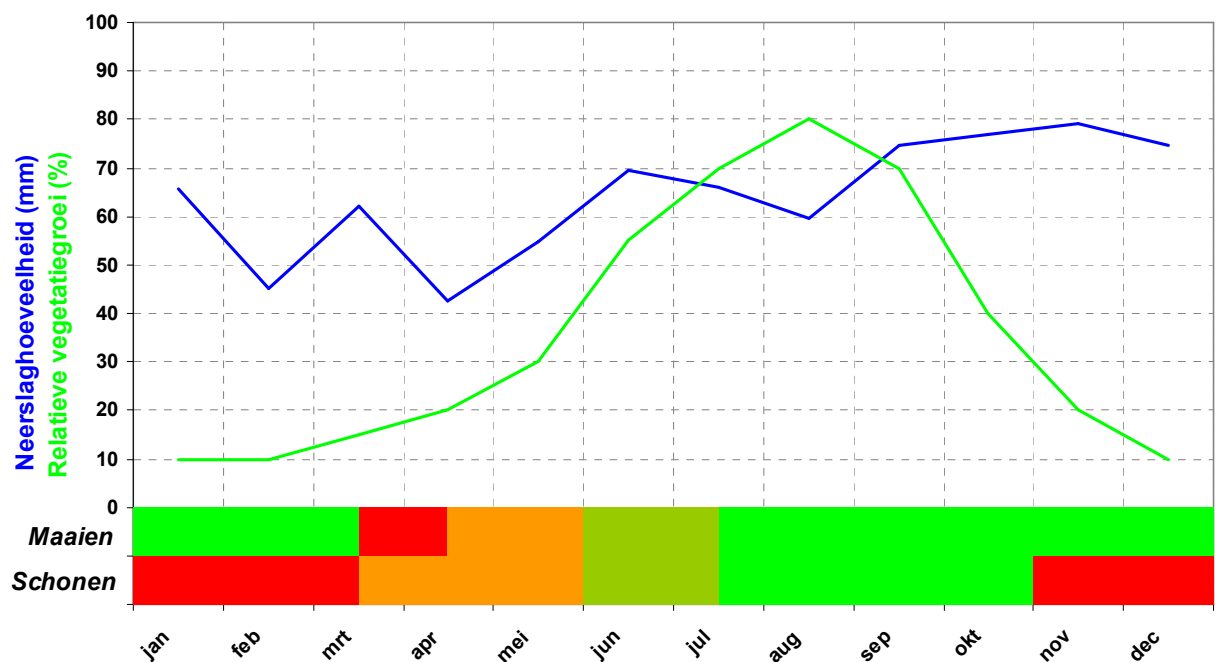
1.1 *Aanleiding*

De laatste decennia is in Nederland en Europa het besef steeds groter geworden dat natuur een schaars goed is. Stond voorheen de natuur in dienst van de mens, zo staat tegenwoordig steeds meer de mens in dienst van de natuur. Natuur moet beschermd worden tegen de activiteiten van de mens, is de alom heersende opvatting. Om vorm te geven aan de natuurbescherming, wordt op Europees niveau beleid uitgestippeld: het Europese natuurbeschermingsbeleid. In Nederland moet dit Europese natuurbeschermingsbeleid worden geïmplementeerd. Hiertoe is in april 2002 de Flora- en Faunawet van kracht geworden [1]. Deze wet ziet toe op de instandhouding van plant- en diersoorten in Nederland. In deze Flora- en Faunawet is natuurvriendelijk werken uitgangspunt. Samen met de Natuurbeschermingswet is de Flora- en Faunawet de Nederlandse invulling van het Europese natuurbeschermingsbeleid. De Natuurbeschermingswet ziet toe op de bescherming van natuurgebieden, terwijl de Flora- en Faunawet toeziet op een duurzame instandhouding van plant- en diersoorten in Nederland.

Naast een aantal verbodsbepalingen beschrijft de Flora- en Faunawet ook voorwaarden waaronder bepaalde handelingen verricht mogen worden. Deze voorwaarden worden strenger naarmate de activiteiten ingrijpender worden voor de desbetreffende omgeving en de aanwezige planten- en diersoorten meer bedreigd worden in hun voortbestaan. Sommige activiteiten zijn echter weer vrijgesteld wanneer wordt gewerkt volgens een door de Minister van Landbouw, Natuur en Visserij goedgekeurde gedragscode.

Eén van de handelingen die volgens de Flora- en Faunawet nog onder strikte voorwaarden mag worden uitgevoerd, is het maaien van bermen en schonen van de watergangen. Deze twee activiteiten samen wordt ook wel het maaien van watergangen genoemd. In maart 2005 heeft de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, STOWA, een werkdocument opgesteld voor de verschillende waterschappen in Nederland ten aanzien van de Flora- en Faunawet [2]. Dit werkdocument is een uitwerking van de Flora- en Faunawet tot een handzaam document met praktische bepalingen en richtlijnen. Hierin is een gedragscode uiteengezet hoe onder andere omgegaan moet worden met het maaien van 'kruidachtige vegetaties op bermen, dijken en schouwpaden' en het 'schonen van waterlopen en oevers'. De gedragscode stelt met betrekking tot maaiwerkzaamheden op bermen, dijken en schouwpaden dat deze in principe alleen uitgevoerd mogen worden ná 15 juli of vóór 15 maart. In de periode van 15 maart tot 15 juli vindt namelijk grotendeels de voortplanting plaats van vogels, amfibieën en reptielen en zetten de meeste planten zaad. Voor het schonen van watergangen stelt de gedragscode dat dit in principe alleen uitgevoerd mag worden in de periode van 15 juli tot 1 november met voorkeur voor de maanden september en oktober. Deze periode valt tussen de voortplanting en winterrust van vissen en amfibieën. Daarnaast hebben in deze periode vrijwel alle water- en oeverplanten zaad gezet.

Eventueel mogen vanaf 1 juni de bermen en watergangen respectievelijk worden gemaaid of geschoond, mits bepaalde plantensoorten worden gespaard en broedende vogels worden ontweken tijdens de maai- en schoonwerkzaamheden. In de periode van 15 april tot 1 juni mogen alleen maai- en schoonwerkzaamheden rond en in watergangen worden ondernomen wanneer dit strikt noodzakelijk is. Hierbij kan gedacht worden aan een buitensporige plantengroei waardoor het schouwpad naast een watergang niet meer voldoende begaanbaar is, wat consequenties heeft voor de bereikbaarheid van de watergang. Het schonen van watergangen mag in deze periode alleen plaatsvinden wanneer dit voor de doorstroming strikt noodzakelijk is. Het is echter ook mogelijk dat het maaien van bermen, dijken en schouwpaden pas na 15 augustus mag plaatsvinden. Dit komt voor wanneer wordt vermoed dat Kwartelkoningen, dit is een bepaalde vogelsoort, broeden in de desbetreffende berm. In figuur 1 zijn de data weergegeven waarop activiteiten wel of niet uitgevoerd mogen worden inclusief de vegetatiegroei en neerslaghoeveelheid gedurende het jaar. In figuur 1.1 is te zien dat juist in de periode waarin de sloten niet gemaaid mogen worden, de vegetatie sterk groeit [4]. De neerslaghoeveelheid is ook weergegeven in dit figuur [3]. Uit figuur 1.1 kan opgemaakt worden dat de watergangen niet gemaaid worden, juist wanneer dat wel noodzakelijk is voor de doorstroming.



Figuur 1.1: Grafiek met tijdsblokken waarop het maaien en schonen van watergangen toegestaan wordt, groene blokken, verboden is, rode blokken, toegestaan is onder bepaalde voorwaarden, lichtgroen, en alleen toegestaan is onder een zeer beperkt aantal strenge voorwaarden, oranje. De blauwe curve geeft de mate van intensiteit van neerslag weer per maand gemiddeld over Nederland tussen 1971 en 2000. De groene curve geeft de vegetatiegroei weer door het jaar heen in percentages begroeiing van de watergang. [3] [4]

1.2 *Probleemstelling*

Waterschap Veluwe heeft als primaire taak te zorgen voor een gedegen waterbeheer. Eén van de taken die daarbij hoort is verantwoord peilbeheer. Het beheersgebied van Waterschap Veluwe bestaat voor een deel uit hellende vrij afwaterende beken en voor een deel uit watergangen in laaggelegen poldergebieden.

Om ervoor te zorgen dat de laaggelegen poldergebieden in het beheersgebied van Waterschap Veluwe niet inunderen wanneer sprake is van regenval, is het van belang dat de watergangen het regenwater afvoeren naar de gemalen die het overtollige water het

gebied uitpompen. Hiervoor is echter wel voldoende doorstroming en transportcapaciteit van de watergangen nodig. Voornamelijk de watergangen die gelegen zijn in de laaggelegen poldergebieden groeien in de loop van het jaar dicht met water- en oeverplanten. Deze water- en oeverplanten zorgen voor een steeds grotere ruwheid en obstructie in de watergangen naarmate de planten groeien. Door deze obstructie en verruwing in de watergangen stijgt de waterstand. Door het maaien (hiermee wordt het maaien van de berm en schouwpaden als ook het schonen van de watergang bedoeld) van deze water- en oeverplanten, wordt een goede doorstroming en capaciteit door en van de watergangen gewaarborgd. Hierdoor kan het gewenste waterpeil door het jaar heen worden gehandhaafd. Juist in het groeiseizoen van de planten in de watergang worden de watergangen gemaaid. In deze periode is namelijk de invloed van de vegetatie in de watergangen op de waterstand het grootst, zie figuur 1.1. Met de komst van de Flora- en Faunawet worden echter beperkingen opgelegd aan het tijdstip van onderhoud aan de watergangen. Juist in het groeiseizoen van de planten, van half maart tot half juli, mogen de watergangen niet worden gemaaid. Dit heeft mogelijk nadelige gevolgen voor het peilbeheer van Waterschap Veluwe, doordat de waterstand mogelijk zal stijgen door de toenemende ruwheid en obstructie in de watergangen veroorzaakt door de water- en oeverplanten.

Bij Waterschap Veluwe is momenteel niet duidelijk wat de consequenties zijn wanneer de Flora- en Faunawet wordt nageleefd. Vanuit het veld, onder andere van de peilbeheerders, heerst de mening dat wanneer de planten in het groeiseizoen niet worden gemaaid in de watergangen de waterstanden onherroepelijk zullen stijgen tot onaanvaardbare hoogtes en wateroverlast zal optreden. Hier is echter nog geen onderzoek naar gedaan. Het grootste probleem dat hierbij een rol speelt, is dat niet exact bekend is wat de invloed is van de vegetatiegroei op de waterstand in de watergangen in de laag gelegen poldergebieden. In het algemeen, bijvoorbeeld bij rivieren, kan gesteld worden dat een grotere vegetatieruwheid zal leiden tot een hogere waterstand. De vraag is



Figuur 1.2: Maaien van een watergang. Voor deze smalspoortrekker, die de berm van de watergang maait, gaat nog een smalspoortrekker uit voorzien van klepelmaaier en maaibalk om het schouwpad waar deze trekkers op rijden te maaien.

echter of dit ook geldt voor de vaak langzaam stromende sloten en kanalen in de laag gelegen poldergebieden in het beheersgebied van het Waterschap Veluwe. De vraag vanuit Waterschap Veluwe is dan ook of de naleving van de Flora- en Faunawet problemen oplevert ten aanzien van het huidige peilbeheer in de laag gelegen poldergebieden en zo ja, hoe groot deze problemen zijn en hoe vervolgens deze problemen opgelost kunnen worden. Zodoende kan Waterschap Veluwe zorgdragen voor zijn primaire taak als waterbeheerder.

1.3 *Onderzoeksdoel*

Naar aanleiding van de probleemstelling kan de doelstelling van het afstudeeronderzoek worden opgesteld. Het hoofddoel van dit afstudeeronderzoek is bepalen of het verantwoord is vanuit het oogpunt van waterkwaliteit om de watergangen in de laaggelegen poldergebieden niet te maaien. De vraag die hierbij centraal staat is tevens de titel van dit onderzoeksrapport: 'Maaien, of niet?'

Kwantitatief moet het effect worden bepaald op het peilbeheer van het laten groeien van de vegetatie in de watergangen van de laaggelegen poldergebieden. Hiertoe wordt met behulp van Sobek een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin het effect van verschillende neerslagsscenario's en ruwheidscenario's op het peilbeheer onderzocht wordt. Deze gevoeligheidsanalyse zal uitgevoerd worden met behulp van een bestaand Sobek model van een deelstroomgebied binnen het beheersgebied van Waterschap Veluwe. Wanneer blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat het niet maaien van de watergangen in de laaggelegen poldergebieden wateroverlast veroorzaakt, worden mogelijke oplossingen aangedragen, zodat de Flora- en Faunawet zonder problemen door Waterschap Veluwe nageleefd kan worden. Deze oplossingen zullen voor het gebied waarin ook de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd bepaald worden en zullen mede bepaald worden op basis van de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse.

Om tot het doel te komen van dit afstudeeronderzoek zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld. De onderzoeksvragen zijn de volgende:

1. Wat zijn de kenmerken van het te onderzoeken gebied?
2. Hoe moet de vegetatieruwheid in Sobek gemodelleerd worden?
3. Wat kan geconcludeerd worden uit de gevoeligheidsanalyse?
4. Welke oplossingen zijn mogelijk, wanneer problemen optreden met het naleven van de Flora- en Faunawet?

1.4 *Leeswijzer*

De hoofdstukindeling van dit rapport is gekoppeld aan de vier onderzoeksvragen. In hoofdstuk 1 wordt het onderzoek ingeleid, waarbij de aanleiding, probleemstelling en doel uiteengezet worden. Het gebied waarop dit onderzoek zich concentreert wordt beschreven in hoofdstuk 2, zodat een duidelijk beeld ontstaat van de situering van het onderzoek. In hoofdstuk 3 wordt bepaald welke ruwheidvergelijking het beste gebruikt kan worden bij de Sobek berekeningen die uitgevoerd worden voor de gevoeligheidsanalyse. Deze gevoeligheidsanalyse komt in hoofdstuk 4 aan bod. In hoofdstuk 5 worden oplossingen aangedragen om de eventuele negatieve gevolgen bij naleving van de Flora- en Faunawet te compenseren. Ten slotte worden in hoofdstuk 6 de conclusies getrokken van dit onderzoek en aanbevelingen gedaan.

2

Gebiedsbeschrijving

2.1 *Beheersgebied Waterschap Veluwe*

Het beheersgebied van Waterschap Veluwe bestaat voor een deel uit hellende vrij afwaterende beken en sprengen en voor een deel uit deels vrij afwaterende watergangen in laaggelegen poldergebieden. In totaal bestrijkt het beheersgebied een oppervlakte van ongeveer 136.000 ha en wonen er ruim 415.000 mensen. Het gebied wordt aan de oostzijde begrensd door de rivier de IJssel en aan de noordwestzijde door de Veluwe randmeren: Veluwemeer, Drontermeer, Wolderwijd en het Nuldermauw. De noordgrens loopt ongeveer van Hattem tot Elburg en de zuidgrens loopt ongeveer van Eerbeek tot Putten, zie figuur 2.1. Waterschap Veluwe kent een aantal verdelingen van het gebied. Zo is voor het onderhoud van de watergangen het beheersgebied verdeeld in 3 rayons: noord, zuid en west. Op grond van het watersysteem is het gebied verdeeld in verschillende deelstroomgebieden.



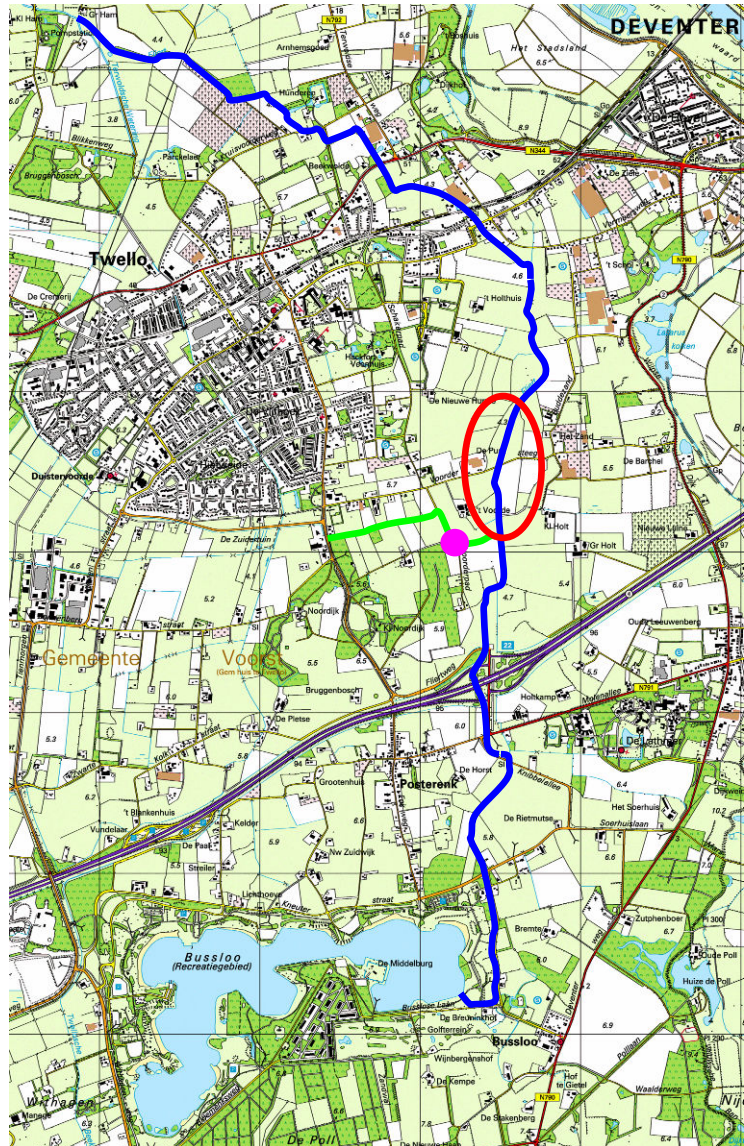
Figuur 2.1: Beheersgebied van Waterschap Veluwe.

Belangrijke watergangen rond het beheersgebied zijn de IJssel en randmeren aan de westgrens van het gebied. De IJssel heeft een sterke invloed op het watersysteem van het aanliggende poldergebied in het oosten van het beheersgebied. Bij een hoge waterstand van de IJssel komt veel kwelwater vanuit de IJssel dit gebied in. Dit wordt ook wel dijkse kwel genoemd. Dit effect is met name erg sterk wanneer de waterstand van de IJssel weer zakt. De IJssel is echter niet de enige bron voor kwel. Vanuit het hooggelegen Veluwemassief komt ook kwelwater het poldergebied ingestroomd.

Belangrijke watergangen in het beheersgebied zijn onder andere het Apeldoorns kanaal en de weteringen gelegen in Noorderlijke IJsselvallei zoals de Grote Wetering, Nieuwe Wetering en de Terwoldse Wetering. Het Apeldoorns Kanaal is oorspronkelijk bedoeld voor de scheepvaart vanaf de IJssel naar Apeldoorn. Tegenwoordig is het Apeldoorns kanaal niet meer bevaarbaar, aangezien de sluizen

oud en vervallen zijn. Het Apeldoorns kanaal begint vanaf de IJssel bij Dieren, stroomt naar Apeldoorn en mondt uit ter hoogte van Hattem in de IJssel. De Weteringen in de Noorderlijke IJsselvallei hebben als functie het overtollige water uit het poldergebied te transporteren naar het gemaal Veluwe dat dit water op de IJssel afwatert.

Waterschap Veluwe maakt onderscheid in A-, B-, of C-wateren. A-wateren zijn voor het waterschap het belangrijkste. Deze watergangen worden door Waterschap Veluwe zelf onderhouden. B-watergangen zijn minder belangrijk dan de A-watergangen. Waterschap Veluwe onderhoudt deze watergangen niet, de aanliggende eigenaren zijn verantwoordelijk voor het onderhoud van deze B-watergangen. Voorheen was 1 november de jaarlijkse schouwdatum. In verband met de Flora en Fauna wet is deze datum verplaatst naar 1 augustus. Tijdens de schouw controleert het waterschap of de B-watergangen door de aanliggende eigenaren goed zijn onderhouden. Ook voor de C-watergangen geldt dat de aanliggende landeigenaren verantwoordelijk zijn voor het onderhoud. Het waterschap treedt echter alleen op tegen wanbeheer wanneer klachten daartoe aanleiding geven.



Figuur 2.2: Situering van de Fliert (dikke blauwe lijn).

Het afstudeeronderzoek spitst zich toe op de A-watergangen in de laaggelegen poldergebieden. Het gehele poldergebied van het beheersgebied van Waterschap Veluwe is echter te groot om studie naar te doen. Om het rekenwerk met Sobek beheersbaar te houden, is daarom gekozen om een klein deel van het poldergebied te nemen als onderzoeksgebied: de Fliert, zie figuur 2.2.

2.2 *Onderzoeksgebied*

Het onderzoek zal zich richten op het deelstroomgebied de Fliert, dat gelegen is in het hoofdstroomgebied Noordelijke IJsselvallei. Dit deelstroomgebied ligt in het oosten aan de rand van het beheersgebied van Waterschap Veluwe, zie figuur 2.2. De locatie van Twello in het totale beheersgebied is terug te vinden in figuur 2.1.

2.2.1 **De Fliert**

De Fliert, de donkerblauwe lijn in figuur 2.2, begint bij Bussloo en stroomt in noordelijke richting de snelweg A1 onderdoor, stroomt oostelijk langs Twello en mondt na ruim 9,5 km uit in de Terwoldse Wetering die op zijn beurt uitmondt in het Toevoerkanaal. Vanuit het Toevoerkanaal wordt het overtollige water de IJssel ingepompt middels gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz in Terwolde. De Fliert is een klein riviertje. Gemiddeld genomen heeft de Fliert een bodembreedte van 1 a 2 m en een taludhelling van ongeveer 1:1, zie figuur 2.3. Het gebied dat afwatert op de Fliert heeft een grootte van 1830 ha. Dat is inclusief het gebied dat afwatert op recreatieplas Bussloo. Het overgrote deel van deze 1830 ha bestaat uit grasland met een aantal percelen akkerbouw. Slechts een klein gedeelte stedelijk gebied watert af op de Fliert. In het zuidelijk gedeelte van het deelstroomgebied en rondom Twello bestaat de grond voornamelijk uit kalkloze zandgronden. Dat betekent dat de zandgrond aldaar minder dan 0,5% kalk bevat [5]. In het midden van het deelstroomgebied en aan het einde van de Fliert bestaat de grond voornamelijk uit kleigronden.

De reden dat gekozen is voor de Fliert als onderzoeksgebied, is in eerste instantie omdat dit riviertje slechts wordt gevoed door recreatieplas Bussloo en door de afvoer van regenwater vanaf de aanliggende percelen. De Fliert is als het ware een op zichzelf staand deelstroomgebiedje. In de tweede plaats is gekozen voor de Fliert omdat gelijktijdig met het afstudeeronderzoek een begroeiingproef wordt gedaan in de Fliert. Met deze begroeiingproef wil het waterschap inzicht krijgen hoe de vegetatie zich in en rondom een watergang ontwikkelt tot 15 juli en wat het effect daarvan is op de waterstand. De begroeiingproef wordt ondernomen naar aanleiding van de Flora- en Faunawet en loopt gelijktijdig met dit afstudeeronderzoek. Zodoende kunnen mogelijk in een later stadium de resultaten van dit afstudeeronderzoek worden vergeleken met de resultaten uit de begroeiingproef.



Figuur 2.3: De Fliert.

2.2.2 **Begroeiingproef**

De rode cirkel in figuur 2.2 geeft de locatie van de begroeiingproef aan. Bij de begroeiingproef wordt een gedeelte van de Fliert regulier onderhouden en een gedeelte niet. In het niet regulier onderhouden gedeelte van de begroeiingproef wordt de situatie nagebootst zoals deze ontstaat bij naleving van de Flora- en Faunawet. Hierdoor kan de vegetatie vrij groeien gedurende het gehele

groei seizoen. Beide gedeeltes worden elke drie weken geïnventreerd op het voorkomen van vegetatie en de verscheidenheid daarvan gedurende de periode van 1 april tot 17 augustus. Hierdoor krijgt het waterschap een beeld van de situatie die ontstaat bij naleving van de Flora- en Faunawet en wat het verschil is in vergelijking met de situatie waarin de Fliert regulier wordt onderhouden. In dezelfde periode wanneer de Fliert wordt geïnventreerd, zal het debiet en de waterstand door en in de beide gedeeltes van de Fliert worden gemeten. De metingen zullen met intervallen gedaan worden. Elk kwartier wordt de waterstand op twee locaties gemeten. Met behulp van één van de gemeten waterstanden kan het debiet worden bepaald door de Fliert. Deze locatie van de begroeiingproef is gekozen, vanwege het aanwezig zijn van gemaal Voorderpad, zie paarse stip in figuur 2.2. Wanneer door de vegetatie bij de begroeiingproef de waterstand te hoog wordt, pompt dit gemaal het overtollige water weg.

2.2.3 Kunstwerken in de Fliert

Gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz in Terwolde staat weliswaar niet in de Fliert, maar is wel van groot belang voor de Fliert. Het gemaal zorgt voor de afwatering van het overtollige water vanuit het Toevoerkanaal (waar de Fliert direct op afwatert) op de IJssel. Gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz in Terwolde is een frequentiegestuurd gemaal. Dat betekent dat wanneer het gemaal water begint uit te pompen, het gemaal niet direct op volle capaciteit pompt, maar de capaciteit opbouwt naarmate de waterstand stijgt bovenstrooms van het gemaal. Het gemaal heeft drie frequentiegestuurde pompen met een totale capaciteit van 14,17 m³/s. het aanslagpeil van het gemaal is 2,98 m +NAP en een afslagpeil van 2,80 m + NAP. Als de waterstand van de IJssel het toelaat, wordt het overtollige water onder vrij verval geloosd op de IJssel.



Figuur 2.4: Gemaal Voorderpad.

Net ten zuiden van het dorp Twello ligt gemaal Voorderpad, zie paarse stip in figuur 2.2 en de foto in figuur 2.4. Het gemaal Voorderpad heeft van oorsprong een andere functie dan overtollig water wegpompen uit de Fliert. In 1995 is gemaal Voorderpad gebouwd om relatief schoon water vanuit de Fliert de Twellose beek in te pompen. De Twellose beek is namelijk een beek waarop een aantal riooloverstorten uitkomen. Door deze riooloverstorten is de kwaliteit van de Twellose beek op sommige momenten slecht. Door periodiek relatief schoon water vanuit de Fliert de Twellose beek in te pompen, wordt geprobeerd de waterkwaliteit van de Twellose beek te verbeteren. Sinds ongeveer drie jaar heeft het gemaal Voorderpad daarnaast nog



Figuur 2.5: Schuifstuw in Fliert bij Bussloo.

een functie gekregen. Ter hoogte van het gemaal is sindsdien in de Fliert een meetgoot geplaatst. Deze meetgoot meet het debiet dat door de Fliert stroomt. Wanneer een debiet van 0,55 m³/s of meer door de meetgoot stroomt, zal het gemaal aangaan. Hiermee wordt voorkomen dat benedenstrooms van de meetgoot wateroverlast optreedt. De eerder genoemde begroeiingproef wordt direct benedenstrooms van deze meetgoot uitgevoerd. De reden hiervoor is dat als de vegetatie in de Fliert ter plaatse van de begroeiingproef het water teveel opstuwt het overtollige water op de Twellose beek kan worden gepompt via gemaal Voorderpad. Net als gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz is gemaal Voorderpad een frequentiegestuurd gemaal met een maximum capaciteit van 0,63 m³/s. Het gemaal heeft een aanslagpeil van 3,40 m +NAP en een afslagpeil van 3,30 m +NAP.

In het deelstroomgebied de Fliert zijn vier stuwen gelegen. De meest bovenstrooms gelegen stuw is gesitueerd op het punt waar recreatieplas Bussloo de Fliert voedt, zie figuur 2.5. Deze stuw bestaat uit een schuif die automatisch dichtgedraaid kan worden wanneer teveel water door de Fliert wordt afgevoerd. De overige drie stuwen zijn gelegen benedenstrooms van gemaal Voorderpad in een zijwatergang, een andere een paar honderd meter bovenstrooms van gemaal Voorderpad en de vierde in een klein naar de Fliert stromend watergangetje. Hieruit blijkt dat de Fliert amper sturing heeft door stuwen en bijna onder vrij verval kan afwateren op de Terwoldse Wetering en het Toevoerkanaal.

2.2.4 Bussloo

Recreatieplas Bussloo is een belangrijke voedingsbron voor de Fliert. Bussloo wordt gevoed door kwel; zowel vanuit de IJssel, voornamelijk bij een dalende waterstand na een hoogwater, maar ook vanuit het hoger gelegen gebied van de Veluwe. Vanuit Bussloo mag maximaal 0,15 m³/s de Fliert in stromen. Deze maximale afvoer wordt beheerst door de schuifstuw aan het begin van de Fliert, zie figuur 2.5. Stroomt meer water de Fliert in, zal de schuif automatisch –gedeeltelijk– worden gesloten. De stand van deze schuif wordt bepaald aan de hand van een meetgoot die een paar meter benedenstrooms van de schuifstuw geplaatst is, zie figuur 2.6. Deze meetgoot meet de waterstand en door middel van een aan de meetgoot gekoppelde Q-h relatie wordt het debiet bepaald door de Fliert.



Figuur 2.6: Debietmeter in Fliert bij Bussloo.

3

Ruwheidvergelijking

3.1 *Modelleren van vegetatieruwheid*

Voordat bepaald wordt hoe de vegetatie het beste gemodelleerd kan worden in Sobek, worden eerst een aantal bestaande modellen met elkaar vergeleken, zodat een juiste afweging gemaakt kan worden over de te kiezen methode.

De hoeveelheid en grootte van vegetatie in een watergang is tijdsafhankelijk. Naarmate het voorjaar vordert, zal de hoeveelheid vegetatie en de grootte van de vegetatie sterk toenemen in en om de watergang, zie figuur 3.1. Om deze reden is het aan te bevelen om de hoeveelheid vegetatie en de daarmee samenhangende wand- en bodemruwheid tijdsafhankelijk te modelleren.

Aangezien de vegetatie in een watergang niet bestaat uit starre elementen, maar uit buigzame, flexibele planten, zal bij een toename van de stroomsnelheid door de watergang de vorm van de vegetatie veranderen. Door de stroming van het water over en door de vegetatie, kan de vegetatie zodanig vervormen, dat de vegetatie gestroomlijnd wordt met de waterstroming. Hierdoor ondervindt het stromende water minder weerstand in de watergang [24], waardoor de wand- en bodemruwheid af zal nemen. In een ideale ruwheidbeschrijving, zal dit effect ook meegenomen moeten worden.

Verder is het handig de ruwheidbeschrijving van een watergang te baseren op meetbare parameters die de vegetatie karakteriseren. Te denken valt hierbij aan de vegetatiehoogte, stengeldiameter, flexibiliteit en of de vegetatie glad is of juist ruw. Op deze manier kan de vegetatieruwheid in een watergang op een objectieve manier beschreven worden.



Figuur 3.1: Ontwikkeling van de vegetatie in de Fliert direct benedenstrooms van de debietmeter nabij gemaal Voorderpad. Foto's genomen op 13 april, 18 april, 18 mei, 7 juni en 30 juni 2006.

3.2 *Bestaande methoden*

Door de jaren heen is een groot aantal verschillende methoden ontwikkeld om de ruwheid van bodem en wanden van watergangen te bepalen. De eerste vergelijkingen die opgesteld zijn, zijn vooral gericht op het beschrijven van stroming door een leiding zonder vegetatie [8] [10]. De laatste jaren is echter veel onderzoek gedaan naar een betere beschrijving van stroming door een watergang waarin vegetatie voorkomt [6]. Hierna wordt een aantal methoden besproken. Voor een meer uitgebreide beschrijving van de hier gepresenteerde vergelijkingen wordt verwezen naar de literatuurstudie die vooraf gegaan is aan dit afstudeerproject [7].

3.2.1 **Standaard ruwheidvergelijkingen**

Chézy

Al in 1775 stelde de Fransman Antoine Chézy een vergelijking op, waarin de wand- en bodemruwheid wordt gevat in de coëfficiënt C [8]. Met behulp van deze Chézy coëfficiënt kan de stroomsnelheid v in een watergang worden bepaald, zie vergelijking (3.1).

$$v = C\sqrt{Ri} \quad (3.1)$$

De Chézy coëfficiënt is eigenlijk een 'gladheidsparameter': hoe hoger de Chézy coëfficiënt, hoe gladder de wanden en bodem. Een regelmatig gebruikte waarde voor de Chézy coëfficiënt voor gladde watergangen is $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ [9]. In de vergelijking van Chézy is R de hydraulische straal, zie vergelijking (3.2) en i het verhang van de waterspiegel.

$$R = \frac{\text{Natte oppervlak}}{\text{Natte omtrek}} = \frac{A}{O} \quad (3.2)$$

Manning

In 1889 is een vergelijking opgesteld door de Ier Robert Manning [10], die sterk overeenkomt met de vergelijking van Chézy. Deze vergelijking is iets anders van vorm dan de vergelijking van Chézy en drukt de wand- en bodemruwheid uit in de Manning coëfficiënt, k_M , waarmee de stroomsnelheid in een watergang kan worden bepaald, zie vergelijking (3.3).

$$v = k_M R^{2/3} \sqrt{i} \quad (3.3)$$

Een waarde voor de Manning coëfficiënt, voor gladde watergangen is $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ [25]. Zowel de Chézy vergelijking als de Manning vergelijking is in eerste instantie opgesteld met de bedoeling om de stroming te beschrijven in watergangen en buizen waar de wanden en bodem bestaan uit beton, metaal, zand of steen.

White - Colebrook

Om de Chézy coëfficiënt beter uit te kunnen drukken in wand- en bodem eigenschappen, is in 1939 de vergelijking van White-Colebrook ontwikkeld [11], zie vergelijking (3.4). Deze vergelijking is geldig wanneer sprake is van hydraulisch ruwe wanden. In het geval van een watergang met natuurlijke wanden en bodem, dat wil zeggen zand, steen of andere natuurlijke materialen, is hier vrijwel altijd sprake van.

$$C = 18 \log \frac{12R}{k_n} \quad (3.4)$$

Voor de waarde van de Nikuradse zandruwheid, k_n , wordt vaak de representatieve korrel diameter gebruikt van het wand- en bodemmateriaal van de watergang. De vergelijking van White-Colebrook is ook in eerste instantie ontwikkeld om bodemmateriaal als beton, zand en steen uit te drukken in een Chézy coëfficiënt. Tegenwoordig wordt de vergelijking ook wel gebruikt om de ruwheid van vegetatie uit te drukken in de Chézy coëfficiënt. Vuistregel daarbij is, dat voor de Nikuradse zandruwheid de hoogte van de vegetatie wordt gebruikt. Daarbij is de vraag echter of de vergelijking dan niet buiten zijn toepassingsgebied wordt gebruikt.

3.2.2 Ruwheidvergelijkingen voor vegetatie

De Bos en Bijkerk

In 1963 hebben De Bos en Bijkerk op basis van een theoretische afleiding een nomogram ontwikkeld, dat is een grafische weergave in tabelvorm, waarmee dimensies van waterlopen bepaald kunnen worden [12]. Dit nomogram was voornamelijk bedoeld om snel een indruk te kunnen geven van kostenbepalende factoren als de omvang van het grondverzet en het landverlies bij het aanleggen van watergangen. Hiertoe stelden zij een relatie op tussen de Manning coëfficiënt en de waterdiepte, zie vergelijking (3.5).

$$k_M = \gamma h^{1/3} \quad (3.5)$$

De Bos en Bijkerk bevelen voor de winter een waarde voor γ aan van $33,79 \text{ s}^{-1}$ en voor de zomer een waarde van $22,53 \text{ s}^{-1}$. In de ontwerp praktijk wordt voor de waarde van γ ook wel de anders gebruikte Manning coëfficiënt genomen. Dit heeft tot gevolg dat bij een waterdiepte van 1 m de methode van De Bos en Bijkerk gelijk is aan de vergelijking van Manning.

Griffioen en Pitlo

Begin jaren '90 van de vorige eeuw ontwikkelden Griffioen en Pitlo een vergelijking om de stroomsnelheid te beschrijven in een watergang met veel vegetatiegroei [13], zie vergelijking (3.6).

$$v = k_{M1} R_1^{2/3} \sqrt{i_1} + W i_2 \quad (3.6)$$

Het subscript 1 in deze vergelijking staat voor het onbegroeide gedeelte van de watergang en het subscript 2 voor het begroeide gedeelte. Griffioen en Pitlo zien

vegetatie in een watergang als een doorlatend medium met een bepaalde weerstandswaarde W . Deze weerstandswaarde is nodig om de stroomsnelheid te bepalen in het begroeide gedeelte van de watergang. Voor het onbegroeide gedeelte van de watergang wordt de vergelijking van Manning gebruikt. De methode van Griffioen en Pitlo bepaalt afzonderlijk de stroomsnelheid door het begroeide en onbegroeide deel van de watergang en telt deze vervolgens bij elkaar op om de totale stroomsnelheid door de watergang te bepalen.

Griffioen en Pitlo hebben veel veldonderzoek verricht in Twente en Salland (in Overijssel, Nederland) en de uitkomsten van dit veldonderzoek vergeleken met verwachte waarden van de Manning coëfficiënt op basis van vergelijking (3.6), waarin de weerstandswaarde W wordt meegenomen. De relatie die ze daarbij vonden is vergelijking (3.7). Deze vergelijking is echter alleen toepasbaar voor een Manning coëfficiënt tussen de 1,5 en 33 m^{1/3}/s. Dit is geen grote beperking, aangezien vrijwel geen watergang ruwer of gladder is dan deze grenzen.

$$k_M = \frac{1}{3} V_O \quad (3.7)$$

Om vergelijking (3.7) toe te kunnen passen, zal altijd een goede inschatting gemaakt moeten worden van het percentage van de dwarsdoorsnede van de watergang dat onbegroeid is, V_O . V_O is het openwater percentage van de totale watergang. Griffioen en Pitlo gebruiken alleen een weinig inzichtelijke vegetatieafhankelijke weerstandswaarde in vergelijking (3.6), en daarmee impliciet in vergelijking (3.7). De methode is niet gebaseerd op vegetatiekarakteristieken als vegetatiehoogte en stengeldiameter. De volgende drie vergelijkingen gebruiken deze karakteristieken wel.

Rijkswaterstaat

In november 2003 publiceerde Rijkswaterstaat het handboek 'Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden' [14]. In het handboek zet Rijkswaterstaat een aantal vergelijkingen uiteen waarmee de Chézy coëfficiënt bepaald kan worden aan de hand van vegetatieafhankelijke parameters. Het handboek definieert dertig structuurtypen. Per structuurtype is het verloop van de Chézy coëfficiënt opgenomen bij een veranderende waterdiepte. Rijkswaterstaat maakt onderscheidt tussen doorstroomde vegetatie, waarbij de waterdiepte kleiner is dan de vegetatiehoogte, vergelijking (3.8) en overstroomde vegetatie, waarbij de waterdiepte groter is dan de vegetatiehoogte, vergelijking (3.9).

$$\text{Als } h < k \quad v = \sqrt{\frac{1}{\frac{h C_d m D}{2g} + \frac{1}{C_b^2}}} \sqrt{Ri} \quad (3.8)$$

$$\text{Als } h > k \quad v = \frac{\left\{ k \sqrt{\frac{2g}{C_d m D}} + (h - k) \left[\sqrt{\frac{2g}{C_d m D}} + C_v \sqrt{h - k} \right] \right\}}{h \sqrt{h}} \sqrt{Ri} \quad (3.9)$$

In vergelijkingen (3.8) en (3.9) is h de waterdiepte, C_b de Chézy coëfficiënt van de bodem, C_d de weerstandscoefficiënt, C_v de Chézy coëfficiënt van de toplaag van de vegetatie bepaald met behulp van vergelijking (3.10) en (3.11), m het gemiddelde aantal planten per m², D de gemiddelde stengeldiameter, k de vegetatiehoogte en g de zwaartekrachtversnelling.

$$C_v = 18 \log \frac{12(h-k)}{k_v} \quad (3.10)$$

$$k_v = 1.6k^{0.7} \quad (3.11)$$

Vergelijkingen (3.8) en (3.9) zijn simplificaties van de vergelijkingen in het handboek. Bij vergelijkingen (3.8) en (3.9) is namelijk aangenomen dat er geen sprake is van ondergroei en dat vegetatie homogeen aanwezig is. Deze aanname is gerechtvaardigd omdat van ondergroei in poldersloten niet of nauwelijks sprake is. Deze methode is voornamelijk ontwikkeld om toegepast te worden bij stromingsberekeningen voor uiterwaarden van de grote rivieren.

Huthoff

Een recente methode is ontwikkeld door Huthoff in 2005 [15]. Het doel van Huthoff is niet om de vegetatie in een watergang uit te drukken in een bestaande ruwheidcoëfficiënt als de Chézy of Manning coëfficiënt, maar om de stroomsnelheid van het water onder invloed van vegetatie in een watergang te beschrijven. Evenals het handboek van Rijkswaterstaat, maakt ook Huthoff onderscheid tussen doorstroomde en overstroomde vegetatie, zie de vergelijkingen (3.12) en (3.13).

$$\text{Als } h < k \quad v = \sqrt{\frac{2gi}{C_d m D}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{32kC_d m D} \left(\frac{k_s}{k}\right)^{1/3}}} \quad (3.12)$$

$$\text{Als } h > k \quad v = \sqrt{\frac{2gi}{C_d m D}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{32kC_d m D} \left(\frac{k_s}{k}\right)^{1/3}}} \left[\sqrt{\frac{k}{h}} + \frac{h-k}{h} \left(\frac{h-k}{\min(s,k)} \right)^{2/3} \right] \quad (3.13)$$

In de vergelijkingen (3.12) en (3.13) is k_s de Strickler coëfficiënt en s de afstand tussen de planten in de watergang, gedefinieerd als $s = m^{-1/2}$.

De vergelijkingen van Huthoff zijn net als de vergelijkingen van Rijkswaterstaat in eerste instantie ontwikkeld voor uiterwaarden van de grote rivieren. Ze zijn opgesteld aan de hand van stroomgoot experimenten waarbij een bepaald debiet over, zowel in vorm als spreiding, homogene staafjes stroomt. Hierdoor is te verwachten dat de vergelijkingen van Huthoff ook geldig zijn voor poldersloten.

De tweede term van vergelijking (3.12) is te benaderen door 1. Deze term beschrijft de bodemweerstand. De term van vergelijking (3.8) waarbij de bodemweerstand wordt meegenomen kan verwaarloosd worden en daarom worden weggelaten uit de vergelijking. Wanneer vervolgens wordt aangenomen dat de breedte van de watergang vele malen groter is dan de waterdiepte, kan de hydraulische straal R geschreven worden als h . In vergelijking (3.8) valt dan de waterdiepte h tegen elkaar weg. Zodoende is vergelijking (3.8) gelijk aan vergelijking (3.12). Aangezien de breedte van watergangen in de polder niet vele malen breder is dan de waterdiepte, geldt dit voor de poldersloten.

Baptist

Baptist publiceerde in 2005 een methode om vegetatie in een watergang uit te drukken in een Chézy coëfficiënt [16], die ontwikkeld is met behulp van genetisch programmeren. Bij het proces van genetisch programmeren zijn 990 door een

ééndimensionaal, dieptegemiddeld model gegenereerde datasets gebruikt en 177 stroomgoot experimenten van 10 onafhankelijke studies. Voor meer uitleg betreffende het proces dat gebruikt wordt bij genetisch programmeren, wordt verwezen naar de literatuurstudie voorafgaand aan dit onderzoek [7] en het artikel waarin Baptist zijn vergelijking uiteenzet [16]. De vergelijking die hieruit voortkwam, vergelijking (3.14), blijkt bijzonder goed met de datasets en experimenten overeen te komen [16] [17]. Deze datasets en experimenten representeren een breed scala aan vegetatiesoorten en waterdiepten. Met behulp van de vergelijking van Chézy, vergelijking (3.1), is deze te schrijven als functie van de stroomsnelheid, zie vergelijking (3.14).

$$v = \left[\sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{2g} C_d m D k}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{k}\right) \right] \sqrt{Ri} \quad (3.14)$$

De uitkomst van het genetisch programmeren, vergelijking (3.14), vertoont een sterke overeenkomst met de vergelijking opgesteld door Kouwen [16]. De eerste term in vergelijking (3.12) was echter nog onbekend bij Kouwen. In de vergelijking van Kouwen is dit gedeelte gevat in de coëfficiënt C_1 . Baptist geeft aan deze coëfficiënt een meer gedetailleerde invulling.

Baptist heeft vervolgens zijn eigen methode vergeleken met andere, analytisch bepaalde ruwheidvergelijkingen die de wand- en bodemruwheid beschrijven van vegetatie in een watergang [17]. Uit deze vergelijking met andere methoden bleek dat de methode van Baptist het best overeen kwam met de 177 stroomgoot experimenten en 990 modelberekeningen. Dit maakt de methode van Baptist een betrouwbare methode die de wand- en bodemruwheid en daarmee het debiet nauwkeurig voorspelt van een watergang waarin zich weinig of extreem veel vegetatie bevindt.

3.3 *Ruwheidbeschrijvingen in Sobek Rural*

In Sobek Rural bestaat een aantal mogelijkheden om de wand- en bodemruwheid van een watergang te modelleren. Alle methoden worden door Sobek echter omgeschreven naar een Chézy coëfficiënt, waar Sobek vervolgens de berekeningen mee uitvoert.

De eerste mogelijkheid in Sobek is om een vaste Chézy coëfficiënt op te geven voor het gehele dwarsprofiel van de watergang. Door gebruik te maken van een zogenaamd Y-Z profiel kan de watergang over de breedte ingedeeld worden in gedeeltes met een verschillende Chézy coëfficiënt. Sobek rekent deze verschillende Chézy coëfficiënten weer om naar één representatieve Chézy coëfficiënt voor de gehele breedte, dit is nodig omdat Sobek een 1D modelinstrumentarium is. Deze omrekening naar één representatieve waarde wordt gedaan door Sobek op basis van de hydraulische straal en het natte oppervlak van elke afzonderlijke subsectie met een andere Chézy coëfficiënt [18], zie vergelijking (3.15). Ook bij de overige ruwheidvergelijkingen in Sobek is het mogelijk om de ruwheid over de breedte van de watergang te laten variëren.

$$C = \sqrt{\frac{C_1 A_{f1} \sqrt{R_1} + C_2 A_{f2} \sqrt{R_2} + \dots}{A^2 R}} \quad (3.15)$$

In vergelijking (3.15) zijn C_1 en C_2 de Chézy coëfficiënten van de verschillende subsecties, A_{f1} en A_{f2} het natte oppervlak van de subsecties en R_1 en R_2 de hydraulische straal van de subsecties. A en R zijn respectievelijk het natte oppervlak en de hydraulische straal van het totale profiel.

Een tweede mogelijkheid in Sobek is gebruik te maken van een vaste Manning coëfficiënt. Deze Manning coëfficiënt wordt omgerekend naar een Chézy coëfficiënt volgens vergelijking (3.16).

$$C = k_M R^{1/6} \quad (3.16)$$

Een methode die sterk lijkt op de methode van Manning, is de methode van Strickler. Strickler heeft twee manieren ontwikkeld om de Chézy coëfficiënt te bepalen. Beide zijn in Sobek toepasbaar. De eerste methode, zie vergelijking (3.17), is door gebruik te maken van de Strickler zandruwheid, k_{sz} , die analoog is aan de Nikuradse zandruwheid. De tweede methode is identiek aan de methode om de Manning coëfficiënt om te schrijven naar een Chézy coëfficiënt, zie vergelijking (3.18). Het verschil is echter dat gebruik wordt gemaakt van de Strickler coëfficiënt. In de ontwerppraktijk is deze echter gelijk aan de Manning coëfficiënt.

$$C = 25 \left(\frac{R}{k_{sz}} \right)^{1/6} \quad (3.17)$$

$$C = k_s R^{1/6} \quad (3.18)$$

De laatste twee methoden om de wand- en bodemruwheid te beschrijven in Sobek zijn de methoden van White-Colebrook, zie vergelijking (3.4), en De Bos en Bijkerk, zie vergelijking (3.5). Bij de methode van White-Colebrook moet de Nikuradse ruwheidhoogte opgegeven worden. Bij de vergelijking van De Bos en Bijkerk moet een waarde opgegeven worden voor de coëfficiënt γ . Aangezien de methode van De Bos en Bijkerk de wand- en bodemruwheid van een watergang beschrijft in een Manning coëfficiënt, wordt deze met behulp van vergelijking (3.16) omgeschreven naar een Chézy coëfficiënt.

3.4 Te gebruiken methode

Om te bepalen welke methode gebruikt moet worden in Sobek om de vegetatie in de watergangen zo goed mogelijk te kunnen beschrijven, zal een

i	C _d	C _b	C	k _M	k _s	γ	k _n	V _o	m	D	k	s
[-]	[-]	[m ^{1/2} /s]	[m ^{1/2} /s]	[m ^{1/3} /s]	[m ^{1/3} /s]	[s ⁻¹]	[m]	[%]	[m ⁻²]	[m]	[m]	[m]
<i>Geen of Nauwelijks Vegetatie</i>												
0,0005	1,80	35	40	40	40	40	0,05	95	150	0,0025	0,05	0,08
<i>Weinig Vegetatie</i>												
0,0005	1,80	35	25	25	25	25	0,10	70	400	0,01	0,10	0,05
<i>Veel Vegetatie</i>												
0,0005	1,80	35	10	10	10	10	0,50	25	1000	0,01	0,50	0,03

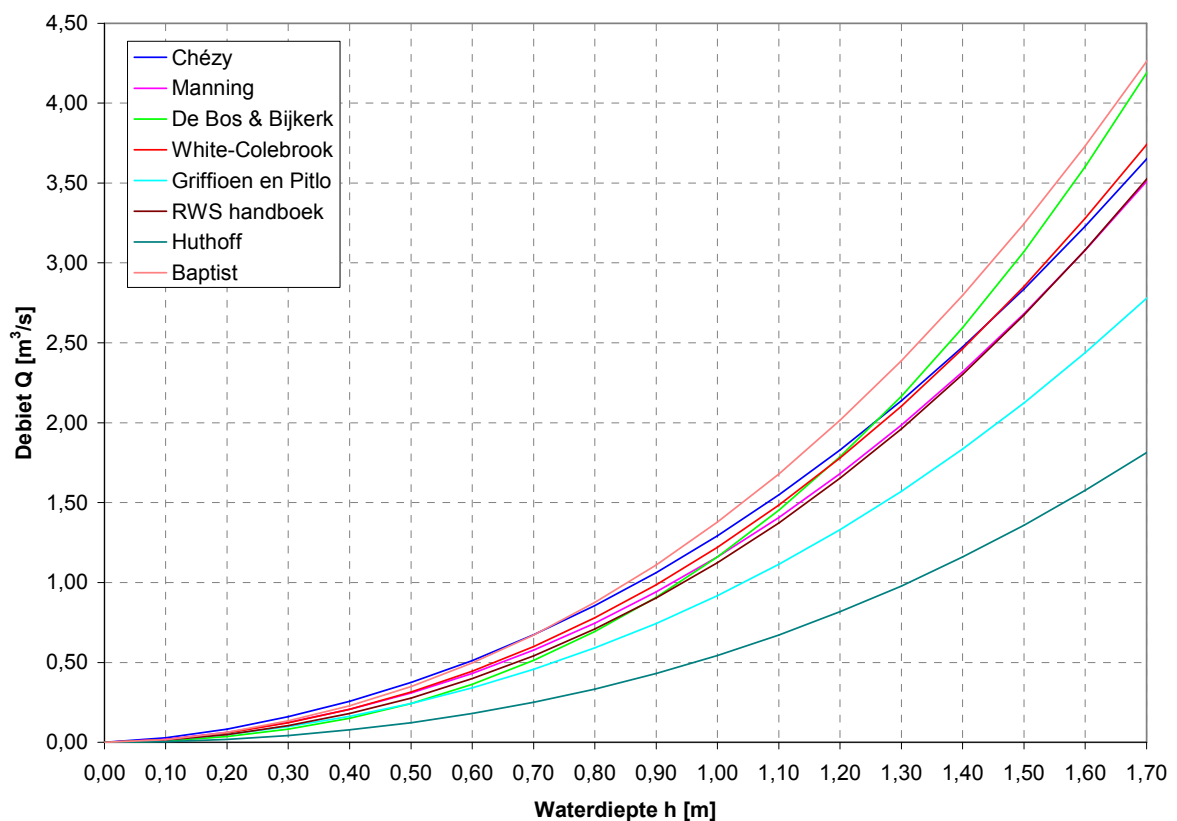
Tabel 3.1: Parameters nodig voor het toepassen van de verschillende methoden.

afweging gemaakt moeten worden tussen de eerder beschreven methoden. Deze afweging zal gedaan worden op basis van vergelijking van de methoden. Alle methoden, behalve de methode van Strickler, worden meegenomen bij deze vergelijking. De methode van Strickler wordt niet meegenomen omdat deze vrijwel identiek is aan de methode van Manning.

3.4.1 Vergelijking

Van alle methoden zijn grafieken gemaakt waarin het debiet uitgezet wordt tegen de bijbehorende waterstand in een standaard watergang. Voor de dimensies van deze watergang is uitgegaan van een standaard profiel zoals deze veel voorkomt in het beheersgebied van Waterschap Veluwe: bodembreedte 1 m, taludhelling 1:1 en een maximale waterdiepte van 1,65 m. Deze gegevens zijn bepaald aan de hand van ingemeten profielen van watergangen zoals deze bekend zijn bij Waterschap Veluwe. Van drie situaties zijn grafieken gemaakt. De eerste situatie is representatief voor geen of nauwelijks sprake van vegetatie in de watergang, zie figuur 3.2. De tweede situatie is representatief voor beginnend groeiende vegetatie, maar is nog steeds sprake van weinig vegetatie, zie figuur 3.3. Ten slotte is de derde situatie representatief voor een sterke vegetatiegroei in de watergang en is sprake van veel vegetatie, zie figuur 3.4. In tabel 3.1 zijn alle parameters terug te vinden zoals deze zijn gebruikt bij de verschillende methoden. Voor de parameters die nodig zijn voor de methode van Rijkswaterstaat is gebruik gemaakt van de parameters behorende bij het structuurtype 'Natuurlijk Gras en Hooiland'[14]. Dit structuurtype komt het beste overeen met de vegetatie in de watergangen en op de bermen van de watergangen van een poldergebied.

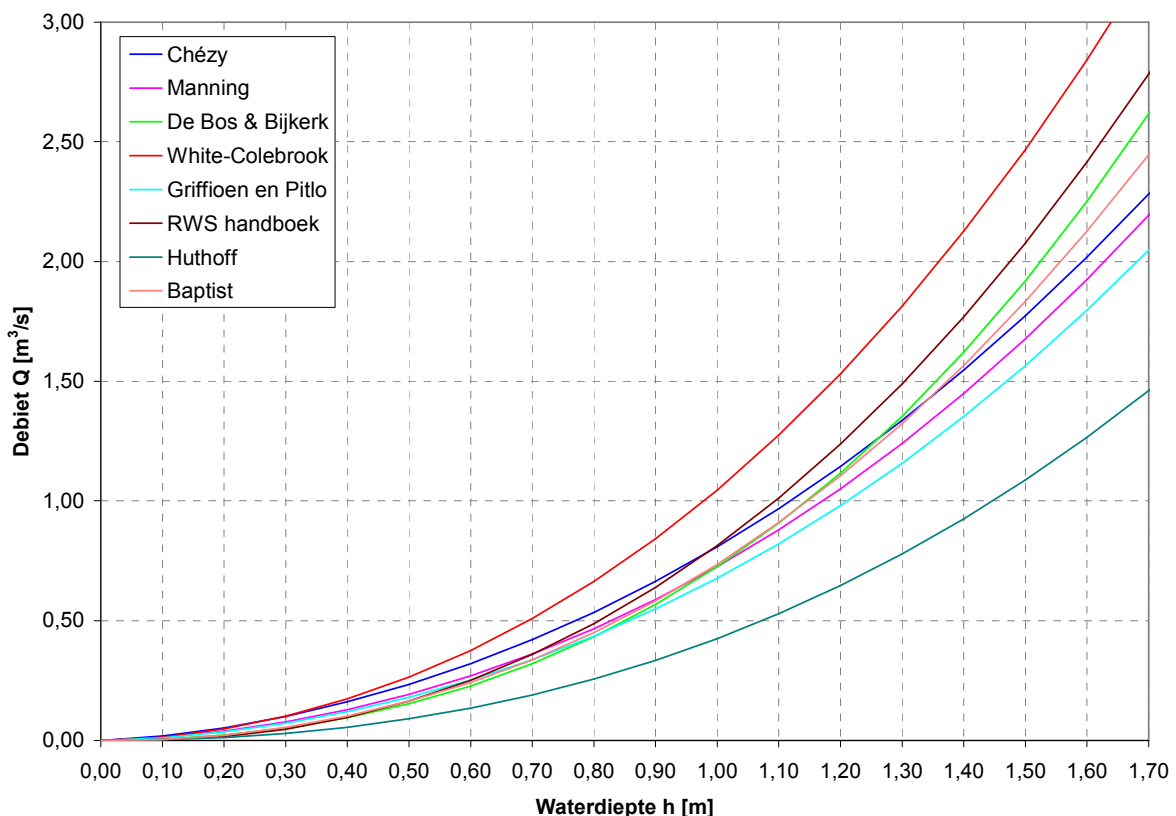
In tabel 3.1 zijn ook waarden opgenomen voor de Chézy en Manning coëfficiënt. Deze Chézy en Manning coëfficiënt worden gebruikt voor de methode



Figuur 3.2: Grafieken van de verschillende methoden zonder vegetatie.

van Chézy en Manning. De overige parameters zijn inschattingen van de waarde van deze parameters behorende bij de desbetreffende situatie. Gedurende het maken van de grafieken is veelvuldig gevarieerd met verschillende waarden van deze parameters om het effect van de parameters te bepalen. Zo is opgevallen dat de dichtheid van de vegetatie in de watergang zeer weinig invloed heeft op de wand- en bodemruwheid van de watergang en daarmee het debiet door de watergang. De hoogte van de vegetatie echter, heeft een zeer grote invloed op de wand- en bodemruwheid. Naarmate de hoogte van de vegetatie toeneemt, is een zeer sterke daling van het debiet te zien.

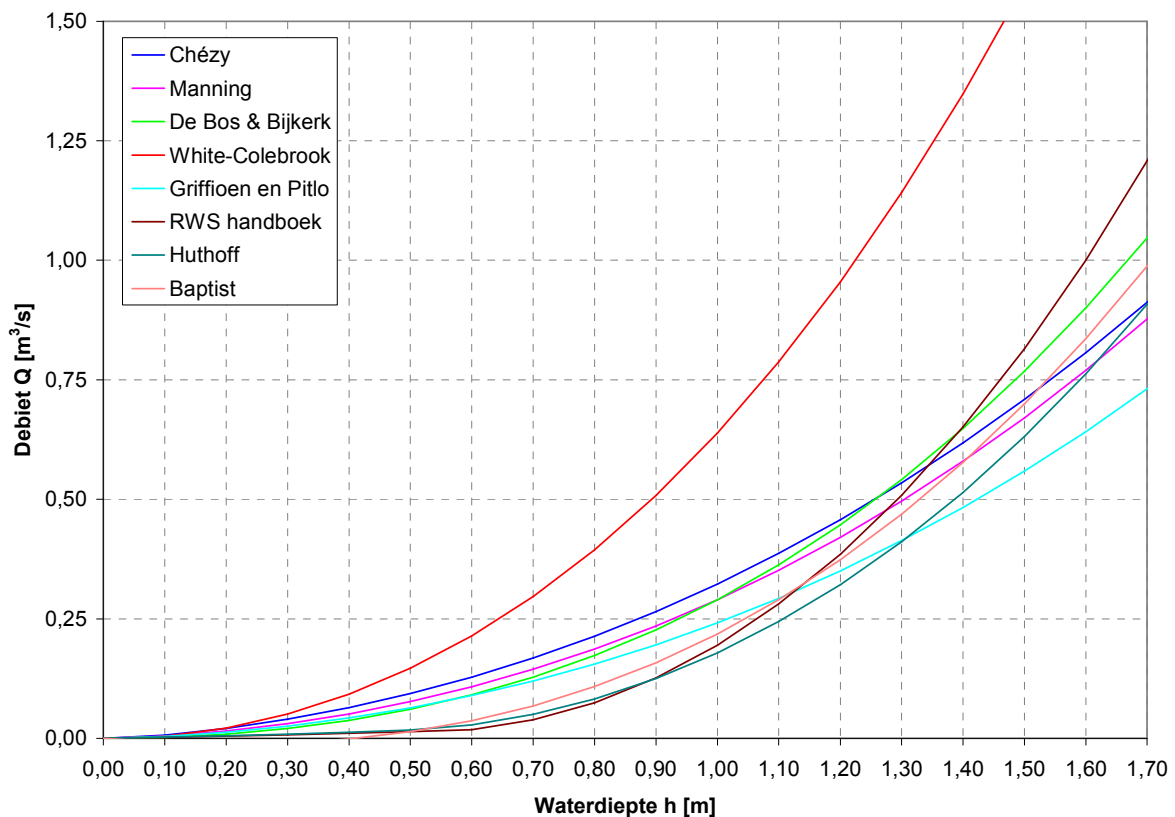
Bij de grafiek van figuur 3.2, de situatie zonder vegetatie in de watergang, valt op dat zes methoden zeer dicht bij elkaar liggen en dat de methoden van Griffioen en Pitlo en Huthoff een lager debiet verwachten bij hogere waterstanden dan de overige vijf methoden. De methode van Huthoff verwacht over het gehele traject een veel lager debiet dan de overige methoden. Dat de methode van Griffioen en Pitlo een lager debiet voorspelt kan verklaard worden doordat de methode een maximale Manning coëfficiënt hanteert van $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Deze maximum waarde voor de Manning coëfficiënt vloeit voort uit de beperking dat het openwater percentage maximaal 90% mag zijn bij de methode van Griffioen en Pitlo. Toepassing van vergelijking (3.7) levert dan een Manning coëfficiënt op van $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. De overige methoden gebruiken in de situatie zonder vegetatie een hogere waarde. Het verschil tussen de zes overige methoden is minimaal. Zoals bij de grafieken van figuur 3.3 en 3.4 is te zien, verwacht de methode van White-Colebrook een steeds hoger debiet naarmate de hoeveelheid vegetatie in de watergang toeneemt, in vergelijking met de overige methoden. In de situatie zonder vegetatie, figuur 3.2, is te zien dat de curve van White-Colebrook zeer dicht bij de overige methoden ligt. Sterker: de methode komt vrijwel exact overeen met de methode van Chézy. Dit komt door de lage waarde van de Nikuradse zandruwheid. Deze lage Nikuradse zandruwheid komt overeen met een wandruwheid waarvoor de vergelijking van White-Colebrook bedoeld is. Dit verklaart waarom de methode van White-



Figuur 3.3: Grafieken van de verschillende methoden met weinig vegetatie.

Colebrook alleen in deze situatie zeer goed met de meeste methoden overeenkomt. Bij de andere situaties wordt namelijk niet gerekend met een wandruwheid, maar met een vegetatieruwheid. Deze komen in deze situatie met elkaar overeen. Wat verder opvalt, is dat de curven voor de methode van Baptist en de methode van De Bos en Bijkerk dicht bij elkaar liggen en dat de methode van Manning en Rijkswaterstaat vrijwel identieke waarden geven voor het debiet bij dezelfde waterstanden.

Wat direct opvalt bij de grafiek van figuur 3.3, de situatie met weinig vegetatie in de watergang, is dat de methode van White-Colebrook zeer hoge waarden van het debiet voorspelt bij hoge waterstanden in vergelijking met de overige methoden. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de methode van White-Colebrook niet toepasbaar is voor het bepalen van de wand- en bodemruwheid bij vegetatiegroei in de watergang. Dit valt buiten het bereik van de methode. De methode van Huthoff voorspelt wederom een zeer laag debiet bij alle waterstanden in vergelijking met de overige methoden. De overige methoden voorspellen tot een waterdiepte van ongeveer 1,20 m dezelfde waarden van het debiet. Daarna beginnen de verschillen iets groter te worden. Hoewel de methode van Griffioen en Pitlo bij deze situatie wel zeer dicht in de buurt komt van de overige methoden, voorspelt deze nog steeds één van de laagste waarden van het debiet. Evenals in de situatie zonder vegetatie valt ook bij deze situatie op dat de methoden van Baptist en De Bos en Bijkerk een zelfde kromming van de curve laten zien. Voornamelijk bij hogere waterdieptes voorspellen beide methoden een hoger debiet dan de overige methoden, met uitzondering van de methode van White-Colebrook. Ter vergelijking kan gekeken worden naar de verwachte waterstand van de verschillende methoden in de situatie met weinig vegetatie. Wanneer gekeken wordt naar een debiet van 1,0 m³/s, is af te lezen dat de methode van White-Colebrook dit debiet al verwacht bij een waterdiepte van nog net geen 1,0 m. Huthoff verwacht dit debiet pas bij een waterdiepte van 1,45 m. De overige 6 methoden verwachten een debiet van 1,0 m³/s bij een waterdiepte van ongeveer



Figuur 3.4: Grafiek methoden veel vegetatie.

1,15 m. Dit houdt in dat de methode van White-Colebrook de vegetatie veel minder ruw beschouwt dan de methode van Huthoff.

De methode van White-Colebrook voorspelt bij de situatie waarin veel vegetatie in de watergang staat, zie figuur 3.4, een enorm hoog debiet bij elke waterdiepte in vergelijking met de overige vergelijkingen. Dat de methode van White-Colebrook niet toepasbaar is voor het bepalen van de wand- en bodemruwheid wanneer voor de waarde van de Nikuradse ruwheidhoogte de hoogte van de vegetatie wordt gebruikt, lijkt hiermee te zijn aangetoond. Om te bepalen wat de waarde van de Nikuradse ruwheidhoogte wel moet zijn om in de buurt te komen van de overige methoden, is de Nikuradse ruwheidhoogte voor de methode van White-Colebrook gewijzigd. Bij de situatie zonder vegetatie was de methode van White-Colebrook redelijk gelijk aan de overige methoden. Bij de situatie met weinig vegetatie, moet de Nikuradse ruwheidhoogte drie maal zo groot worden, van 0,10 naar 0,30 m, om overeen te komen met de methode van Baptist en De Bos en Bijkerk. Bij de situatie met veel vegetatie moet de Nikuradse ruwheidhoogte 4½ maal zo groot worden, van 0,50 naar 2,25 m, om bij de methoden van Baptist en De Bos en Bijkerk in de buurt te komen. Het lijkt er dus op dat naarmate de vegetatie in een watergang toeneemt, de Nikuradse ruwheidhoogte steeds groter genomen moet worden om een correcte verwachting te verkrijgen van het te verwachten debiet.

Wat verder opvalt aan de grafiek van figuur 3.4, is dat de methode van Rijkswaterstaat zeer hoge waarden aan gaat nemen voor het debiet bij waterdieptes groter dan 0,80 m. Als gekeken wordt naar het verloop van de curve van de methode van Rijkswaterstaat bij de grafieken van de figuren 3.2, 3.3 en 3.4, is te zien dat wanneer geen of nauwelijks vegetatie aanwezig is in de watergang de methode zeer goed overeenkomt met de overige methoden en zelfs bijna identiek is aan de methode van Manning. Wanneer weinig vegetatie in de watergang aanwezig is, verwacht de methode van Rijkswaterstaat tot een waterdiepte van 0,50 m een gemiddeld debiet ten opzichte van de overige methoden en bij een waterdiepte groter dan 0,50 m stijgt het debiet behorend bij een bepaalde waterdiepte tot vlak boven de overige methoden. Wanneer veel vegetatie in de watergang aanwezig is, verwacht de methode van Rijkswaterstaat tot een waterdiepte van 0,80 m lage waarden voor het debiet in vergelijking met de overige methoden. Bij hogere waterdiepten verloopt de curve zeer steil voor het debiet behorende bij een bepaalde waterdiepte in vergelijking met de overige methoden.

Dit verloop wordt veroorzaakt doordat de methode gebruikmaakt van een Chézy coëfficiënt die de ruwheid van de toplaag van de vegetatie weergeeft, C_v . Deze Chézy coëfficiënt voor de toplaag van de vegetatie wordt groter naarmate de waterdiepte groter wordt, zie tabel 3.2. De toplaag van de vegetatie wordt dan gladder naarmate de waterstand stijgt. Voor de situatie met bijna geen vegetatie is de waarde voor de Chézy coëfficiënt van de toplaag van de vegetatie bijna gelijk aan de Chézy

h [m]	C_v [$m^{1/2}/s$]		
	Geen of Nauwelijks Vegetatie	Weinig Vegetatie	Veel Vegetatie
0,10	8,73	10,35	1,54
0,20	17,31	10,35	1,54
0,30	21,31	15,77	1,54
0,40	23,94	18,94	1,54
0,50	25,90	21,19	1,54
0,60	27,47	22,93	1,54
0,70	28,78	24,36	6,96
0,80	29,90	25,56	10,13
0,90	30,87	26,61	12,38
1,00	31,74	27,53	14,13
1,10	32,53	28,35	15,55
1,20	33,24	29,10	16,76
1,30	33,89	29,78	17,80
1,40	34,49	30,40	18,72
1,50	35,05	30,98	19,54
1,60	35,57	31,52	20,29
1,70	36,06	32,03	20,97

Tabel 3.2: Waarden voor C_v per waterdiepte en vegetatie scenario.

coëfficiënt van de overige methoden, zie tabel 3.1. Dat is ook de reden dat de methode van Rijkswaterstaat in die situatie dicht bij de overige methoden ligt. Bij de andere situaties wordt de Chézy coëfficiënt van de toplaag van de vegetatie weliswaar niet zo hoog als bij de situatie zonder vegetatie, maar is het verschil ten opzichte van de Chézy coëfficiënt van de overige methoden wel steeds groter.

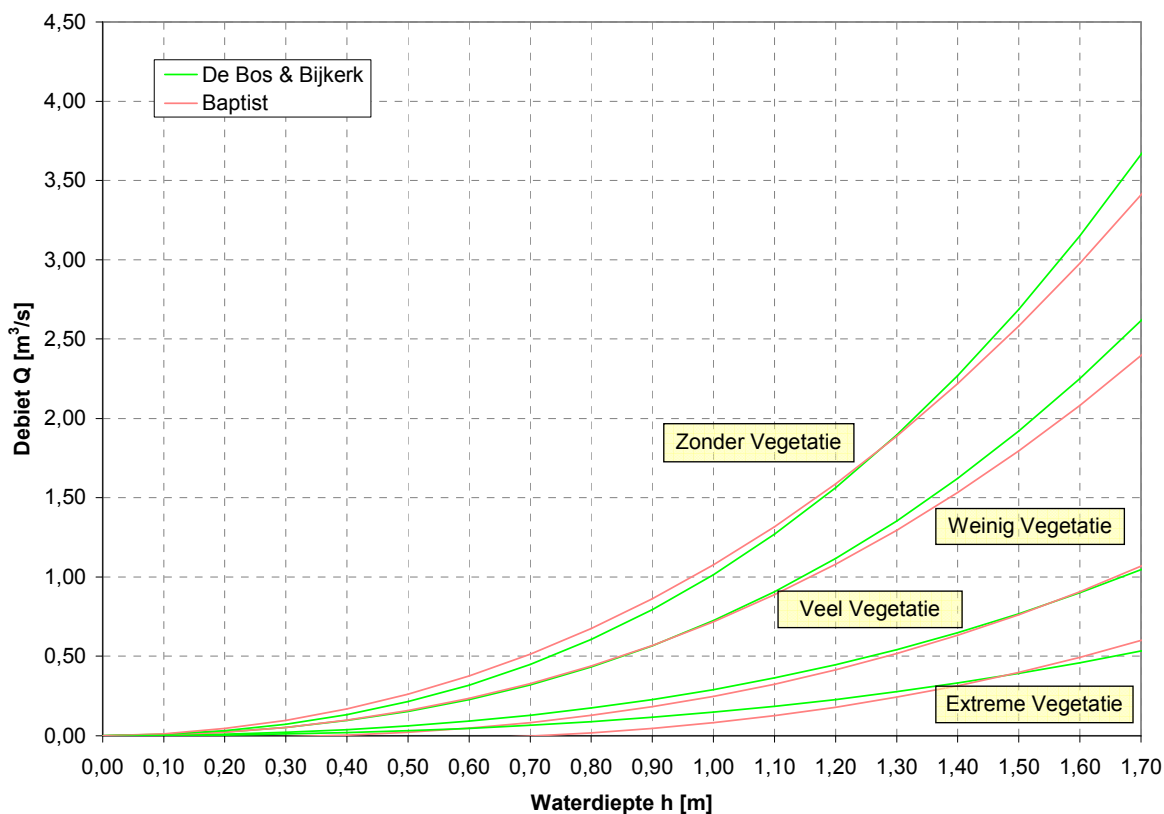
Wanneer de waterdiepte groter wordt dan de vegetatiehoogte, schiet hierdoor het water als het ware over de vegetatie heen.

γ [s ⁻¹]	m [m ²]	D [m]	k [m]	Is te Vergelijken met:
Geen of Nauwelijks Vegetatie				
35	500	0,0025	0,058	Fig. 3.1 1 ^e links
Weinig Vegetatie				
25	500	0,01	0,10	Fig. 3.1 2 ^e links
Veel Vegetatie				
10	1000	0,01	0,45	Fig. 3.1 4 ^e links
Extreem Veel Vegetatie				
5,10	2000	0,01	0,80	Fig. 3.1 5 ^e links

Tabel 3.3: Ingeregelde parameters voor de methoden van Baptist en De Bos en Bijkerk.

De methode van Huthoff laat eenzelfde curve zien als de curve behorende bij de methode van Baptist en De Bos en Bijkerk. Hieruit kan mogelijk opgemaakt worden dat de methode van Huthoff alleen toepasbaar is voor de situaties waarbij sprake is van veel vegetatie in de watergang. De methoden van Baptist en De Bos en Bijkerk laten weer eenzelfde verloop zien ten opzichte van de andere situaties: beide curven van de methoden komen ook in de situatie met veel vegetatie sterk met elkaar overeen.

Nog niet eerder besproken zijn de methode van Chézy en Manning. Beide methoden laten in alledrie de situaties eenzelfde verloop zien. Steeds met slechts een minimaal verschil tussen de beide curven. Dit is niet zo merkwaardig, aangezien de beide methoden vrijwel gelijk aan elkaar zijn.



Figuur 3.5: Vergelijking Baptist met De Bos en Bijkerk voor verschillende situaties.

3.4.2 Keuze

Het valt op dat bij alledrie de situaties de methoden van Baptist en De Bos en Bijkerk vrijwel dezelfde kromming laten zien in hun curven. Beide methoden verwachten een laag debiet bij lage waterdieptes en lopen geleidelijk op naarmate de waterdiepte toeneemt. Weliswaar vertonen alle methodes dit verloop, maar de methodes van Baptist en De Bos en Bijkerk laten dit effect net iets beter zien. Gekozen is om beide methoden uit de grafieken te lichten van de figuren 3.2, 3.3 en 3.4 en weer te geven in een nieuwe grafiek, zie figuur 3.5. Door verschillende parameters te variëren (de vegetatiehoogte, hoeveelheid vegetatie per m², stengeldiameter en de waarde van de coëfficiënt γ), is geprobeerd de curven van de methoden van De Bos en Bijkerk en Baptist nog beter met elkaar overeen te laten komen. Dit heeft geresulteerd tot figuur 3.5. Om te testen of de overeenstemming tussen de beide methoden niet berust op toeval, is nog een vierde situatie toegevoegd. Deze situatie geeft een watergang weer waarin extreem veel vegetatie voorkomt.

In figuur 3.5 is te zien dat de beide methoden na inregelen van de parameters vrijwel gelijk aan elkaar zijn. De parameters die veranderd zijn ten opzichte van de eerder gemaakte grafieken, zijn samen met de waarden voor de situatie met extreme vegetatie terug te vinden in tabel 3.3. Zoals in deze tabel te zien is, zijn de parameters niet veel veranderd om tot de grafieken van figuur 3.5 te komen.

De methode van Baptist is een betrouwbare methode voor het beschrijven van de wand- en bodemruwheid bij een watergang waarin zich vegetatie bevindt. Dit wordt onderbouwd doordat de methode overeenkomt met een grote hoeveelheid data uit zowel 177 datasets uit tien verschillende stroomgoot experimenten als een grote hoeveelheid modelresultaten. De methode van De Bos en Bijkerk is vrijwel identiek hieraan. Daarom wordt gekozen om in Sobek Rural met de ruwheidvergelijking van De Bos en Bijkerk te werken. De methode van Baptist is immers geen bestaande methode in Sobek Rural en de methode van De Bos en Bijkerk wel. De Bos en Bijkerk maken de ruwheid in hun vergelijking waterstandafhankelijk. Dit geeft ook een goed gevoel over de vergelijking, aangezien de ruwheid in de praktijk ook afhankelijk is van de waterdiepte. De ruwheid is immers hoger bij kleine waterdieptes en lager bij grote waterdieptes. Dit is met name het geval wanneer sprake is van vegetatiegroei in een watergang. Bij lage waterstanden ondervindt de stroming immers meer hinder van de vegetatie dan bij hoge waterstanden, waar de vegetatie door de stroming vaak wordt platgedrukt [22] en veelal een kleiner percentage van het totale natte profiel met vegetatie gevuld is.

De waarde van γ zal gekozen moeten worden op basis van de waarden van γ in tabel 3.3. Dit houdt in dat bij het niet of nauwelijks aanwezig zijn van vegetatie in een watergang een γ gekozen wordt van 35 s⁻¹ en wanneer extreem veel vegetatie zich in de watergang bevindt een γ van ongeveer 5 s⁻¹.

4

Gevoeligheidsanalyse

4.1 *Sobek Rural*

Om te bepalen hoe gevoelig het systeem zoals beschreven in de gebiedsbeschrijving is, zie hoofdstuk 2, en hoe dit systeem reageert op verschillende soorten ruwheden en neerslagsscenario's is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Deze gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met behulp van Sobek Rural. Sobek Rural kent een aantal verschillende rekenmodules, bijvoorbeeld 'Sewer flow', 'Channel flow' en 'Rainfall-runoff'. Van de laatste twee modules wordt gebruik gemaakt tijdens dit onderzoek.

4.1.1 **Rainfall-runoff**

De Rainfall-runoff module wordt ook wel het bakjesmodel genoemd [19]. Drie soorten bakjes kunnen gemodelleerd worden in Sobek. Dit zijn een open water bakje, een onverhard oppervlak bakje, zie groene vierkantjes in figuur 4.2, en een verhard oppervlak bakje, zie rode vierkantjes in figuur 4.2. Aan deze bakjes kunnen verschillende parameters worden opgegeven. Bij een onverhard oppervlak bakje moet bijvoorbeeld het oppervlak van het geschematiseerde stuk land, het landgebruik, de maaiveldhoogte (constant of variabel), het grondwaterniveau en de grond infiltratie- en drainagecapaciteit worden opgegeven. Het Sobek model waarmee gerekend gaat worden kent voornamelijk onverhard oppervlak bakjes, een aantal verhard oppervlakte bakjes en geen open water bakjes.



Figuur 4.1: Bakjes- of kopjesmodel?

Alleen bij de Rainfall-runoff module kan een regenbui meegenomen worden in de berekening. De regenbui valt op de verschillende bakjes en in het geval van een onverhard oppervlakte bakje infiltreert de neerslag in de grond of stroomt de neerslag af over het maaiveld, afhankelijk van de ingevoerde maat van infiltratie. Het grondwater stroomt af naar óf een openwater bakje óf middels een verbinding naar de Channel flow module. Als het bakje vol zit en niet kan afstromen naar een ander bakje of de Channel flow module, zal het maaiveld inunderen.

De verbinding tussen de Rainfall-runoff en Channel flow module gebeurt met een speciale verbinding. In deze verbinding tussen de twee modules moet altijd een

stuw, gemaal, of ander ruwheidselement geschematiseerd worden. Dit wordt in de Rainfall-runoff module gedaan met Rainfall-runoff kunstwerken.

4.1.2 Channel Flow

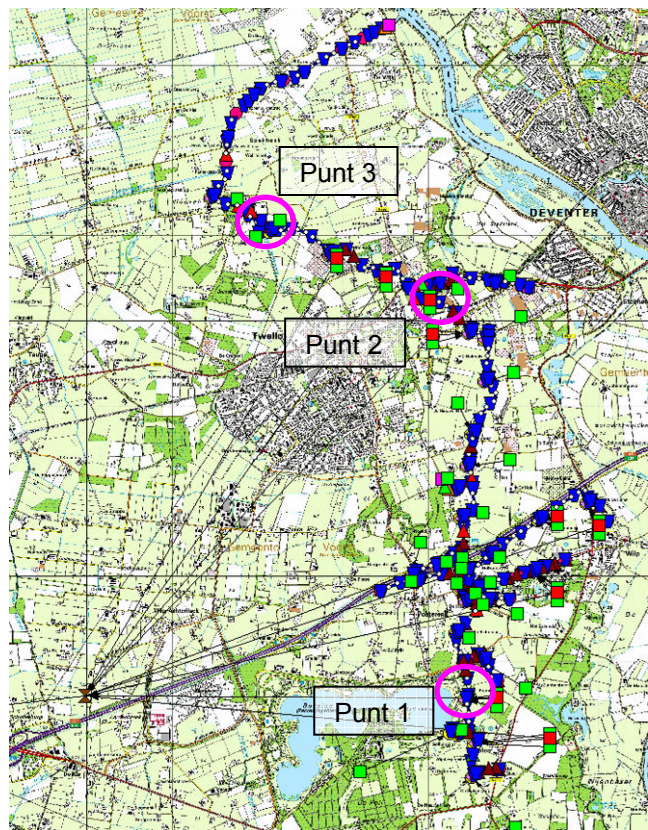
In de Channel flow module worden de watergangen gemodelleerd en wat daarbij hoort, zoals stuwen, gemalen en duikers. In de Channel flow module worden de hydraulische berekeningen uitgevoerd. Door middel van knooppunten met daartussen verbindingssegmenten kan de loop van een watergang worden geschematiseerd. Door aan deze verbindingssegmenten profielen te koppelen, blauwe trapeziumvormen in de figuren 4.2 en 4.3, en kan de watergang worden gedefinieerd. Aan deze profielen kan onder andere de ruwheid, de bodemhoogte en de maaiveldhoogte worden opgegeven.

Op de schematisatie in de Channel flow module kan geen regenbui vallen. Aanvoer van water in Channel flow kan alleen gebeuren door een opgelegde constante of variabele waterstand of opgelegd constant of variabel debiet vanuit de randen van de schematisatie of vanuit laterale toestroming op knooppunten. Een regenbui kan alleen indirect vallen op de geschematiseerde watergangen middels de Rainfall-runoff module die de neerslag opvangt en vervolgens afvoert naar de Channel flow module.

In Sobek kan gekozen worden om eerst de berekening van de Rainfall-runoff module te doen en vervolgens de berekening van de Channel flow module, of de beide modules simultaan te berekenen. Gekozen wordt om de beide modules simultaan te berekenen. Dit levert de nauwkeurigste resultaten op, omdat de beide modules elkaar op deze wijze kunnen beïnvloeden. Dit levert ook een realistischere weergave van de werkelijkheid op. De berekeningsstap van Sobek is vijf minuten.

4.2 De Fliert in Sobek

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met behulp van een deel van het al bestaande Sobek model van de Noordelijke IJsselvallei. Uit de schematisatie van de Noordelijke IJsselvallei in Sobek, is het deelstroomgebied van de Fliert geknipt, zie figuur 4.2. Met dit deelmodel zal de gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd. Voor de Fliert is gekozen omdat deze slechts gevoed wordt door de afvoer van regenwater vanaf de omliggende graslanden en door de recreatieplas Bussloo. Van overige aanvoer vanuit andere watergangen is bij de Fliert geen sprake. Het Sobek model van de Fliert kent alleen op sommige knooppunten laterale



Figuur 4.2: Schematisatie Fliert model.

toestroming, die de aanvoer van water in de Fliert vanuit B- en C-watergangen weergeven. Ten tweede is gekozen voor de Fliert omdat in de Fliert een begroeiingproef wordt gehouden, zie voor de beschrijving van deze begroeiingproef hoofdstuk 2.

4.2.1 Initiële Situatie

Om de berekeningen voor de gevoeligheidsanalyse te kunnen beginnen is een begin- of initiële situatie nodig die als startsituatie geldt voor de waterstand in en het debiet door de Fliert. Om deze initiële situatie te verkrijgen, wordt één berekening gedaan waarin aan het begin van de berekening in alle watergangen 2 m water staat. Vervolgens wordt gerekend gedurende één maand zonder neerslag te laten vallen. Aan het einde van deze berekening staat een natuurlijke waterstand in de Fliert, doordat het overtollige water uit de Fliert is weggepompt naar de IJssel. Droogvallen van de Fliert is niet mogelijk, aangezien het model zo is opgebouwd dat op locaties waar de Fliert dreigt droog te vallen, altijd een waterdiepte van 0,1 m wordt gehandhaafd. Dit wordt echter numeriek meegenomen. De waterbalans blijft wel kloppend, zodat geen water wordt toegevoegd. In werkelijkheid kan de Fliert vooral in de zomer wel droogvallen. De resultaten van deze berekening worden weggeschreven en gebruikt als initiële conditie voor de overige berekeningen.

4.2.2 Randvoorwaarden

De Fliert wordt in Sobek gevoed door neerslag, afstroming van deze neerslag door de grond en over de graslanden vanuit de Rainfall-runoff module en laterale toestroming op sommige knooppunten. Alle bovenstrooms gelegen randen van de schematisatie, waar een watergang begint, behoeven daarom geen opgelegd debiet of waterstand. Vanuit de initiële situatie staat immers in alle watergangen een bepaalde hoeveelheid water. De benedenstrooms gelegen randen, dit zijn de randen van het model waar watergangen eindigen, moeten echter wel randvoorwaarden opgelegd krijgen. Anders kan het water dat uit het model stroomt nergens naar toe.

De belangrijkste benedenstrooms gelegen rand in het model is het punt waar het Toevoerkanal loost op de IJssel via gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz in Terwolde, zie figuur 4.3 waarin de benedenstrooms gelegen rand aangegeven is met een paars vierkantje en het gemaal met een oranje driehoekje. Achter dit



Figuur 4.3: Rand schematisatie bij de IJssel.

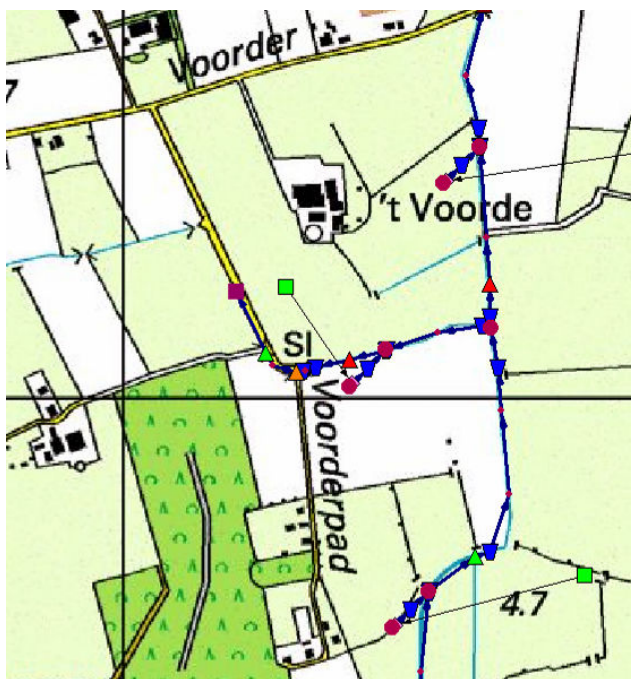
gemaal is een eindpunt geschematiseerd die een vaste waterstand heeft van 2,5 m +NAP. Het gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz pompt dus het water weg op een watergang, in dit geval de IJssel, die altijd dezelfde waterstand heeft. Hiermee wordt de invloed van de waterstand van de IJssel op het model uitgeschakeld.

Een andere benedenstrooms gelegen rand is te vinden bij het Voordepad. Ook hier staat een gemaal, gemaal Voordepad, dat het water naar een rand van de

schematisatie pompt. Deze rand heeft een vaste waarde voor de waterstand opgelegd gekregen van 3,5 m +NAP.

Hoewel de Fliert niet gevoed wordt door andere wateren, mondt deze wel uit in de Terwoldse Wetering. Niet de gehele Terwoldse Wetering wordt echter meegenomen bij de gevoeligheidsanalyse. Ook het Toevoerkanaal, waar de Terwoldse Wetering weer in uitmondt, wordt niet in zijn geheel meegenomen in het Sobek model. Omdat alleen de Fliert onderwerp is van de gevoeligheidsanalyse wordt aan de randen van de Terwoldse Wetering en het Toevoerkanaal geen extra afvoer opgelegd. De Terwoldse Wetering en het Toevoerkanaal fungeren hierdoor alleen als afvoerkanalen van het water vanuit de Fliert naar de IJssel.

4.2.3 Gemalen en Stuwen



Figuur 4.4: Schematisatie gemaal Voorderpad.

In het model zijn twee gemalen geschematiseerd: gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz in Terwolde bij de IJssel, en gemaal Voorderpad, zie figuur 4.4. In hoofdstuk 2 worden deze gemalen verder beschreven.

Deze gemalen zijn ook gemodelleerd in Sobek. Het gemaal mr. A. C. Baron van der Feltz in Terwolde is een gemaal met drie frequentiegestuurde pompen. In Sobek is dit gemaal gemodelleerd als een gemaal met drie pompen die trapsgewijs op maximale capaciteit aanspringen. Het eerste niveau heeft een aanslagpeil van 2,98 m +NAP, een afslagpeil van 2,80 m +NAP en het gemaal pompt dan met een capaciteit van 5 m³/s. Het gemaal gaat pompen met een

capaciteit van 10 m³/s op het tweede niveau. Dit niveau heeft een aanslagpeil van 3,00 m +NAP en een afslagpeil van 2,82 m +NAP. Wanneer de waterstand dan nog steeds blijft stijgen, zal het gemaal gaan pompen op niveau 3 met een capaciteit van 14,17 m³/s. Dit niveau wordt ingeschakeld bij een waterstand van 3,02 m +NAP en slaat af bij een waterstand van 2,85 m +NAP. Gemaal Voorderpad is in werkelijkheid ook frequentiegestuurd, maar is gemodelleerd in Sobek met een vaste capaciteit van 0,63 m³/s die aanslaat bij een waterstand van 3,40 m +NAP en een afslagpeil heeft van 3,30 m +NAP.

In de Fliert zijn vier stuwen gelegen die ook alle vier in Sobek zijn gemodelleerd. Alle vier stuwen zijn gestreken in Sobek gemodelleerd. De stuwen vormen in het model dus geen belemmering voor de doorstroming van de Fliert. Mogelijk kan de breedte van de stuwen wel voor een vernauwing zorgen van de Fliert waardoor het water wordt opgestuwd. Voor verdere beschrijving van de stuwen wordt verwezen naar hoofdstuk 2.

4.3 *Neerslagscenario's*

De gevoeligheidsanalyse zal worden uitgevoerd met een aantal verschillende buien: vier statistische buien, één bui met een constante neerslag per dag en één bui die in 2005 werkelijk gevallen is binnen het beheersgebied van Waterschap Veluwe. De reden dat met deze verscheidenheid aan buisoorten wordt gerekend, is dat op deze manier inzicht verkregen wordt hoe het systeem reageert op verschillende buien. Dat betekent dat niet volstaan kan worden met het kiezen van twee extreme buien.

4.3.1 Statistische Buien

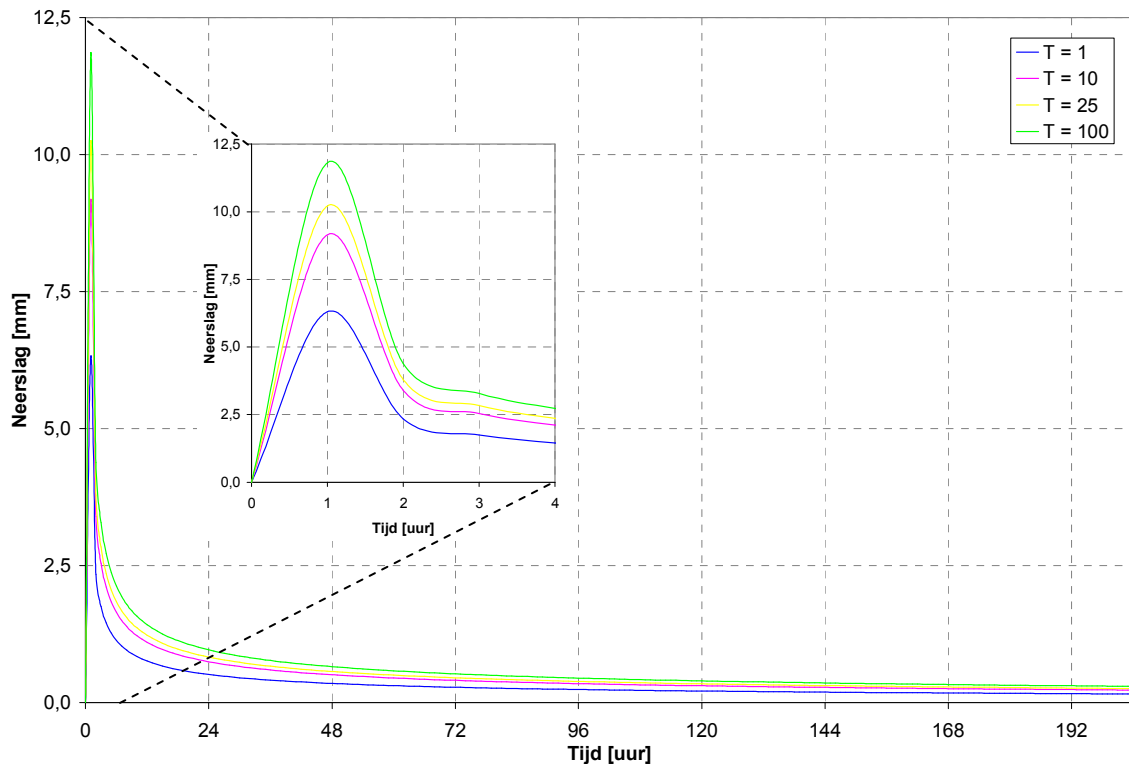
Vier statistische buien zijn gemodelleerd met herhalingstijden van 1, 10, 25 en 100 jaar. Deze vier verschillende buien worden ook wel respectievelijk $T = 1$, $T = 10$, $T = 25$ en $T = 100$ buien genoemd. Met behulp van gegevens uit een rapport van het KNMI en HKV lijn in water [20], is bepaald hoe deze buien eruit zien. De statistische buien worden gemodelleerd met een duur van 8 dagen, aangezien het systeem in landelijk gebied vaak trager reageert dan bijvoorbeeld stedelijk gebied. Bij elke herhalingstijd en duur van de bui hoort een bepaalde totale neerslaghoeveelheid en een verdeling van de neerslag in procenten over deze 8 dagen. Deze verdeling is gegeven in het rapport van het KNMI en HKV lijn in water [20]. De totale neerslag van de buien $T = 1$, $T = 10$, $T = 25$ en $T = 100$ met een duur van 8 dagen is respectievelijk 71, 103, 115 en 133 mm. Let wel: dit is geen constante neerslag.

Deze verschillende statistische buien hebben alle vier dezelfde procentuele verdeling over de 8 dagen. De verdeling in procenten van deze statistische buien zijn slechts gegeven op een aantal momenten. Daarom is een curve gefit op de verdeling, zie bijlage VI. Deze curve heeft een fit met $R^2 = 0,9995$. R^2 geeft aan hoeveel variatie in de data wordt verklaard met een trendlijn. 99,95% van de data komt overeen met de curve. Vergelijking (4.1) is de vergelijking behorende bij deze curve.

$$y = 0,0888x^{0,4553} \quad (4.1)$$

In deze vergelijking is y het percentage neerslag dat gevallen is na een x aantal uren.

Met behulp van deze vergelijking kan niet alleen bepaald worden hoeveel procent van de totale neerslag cumulatief gevallen is, maar ook hoeveel procent van de totale neerslag elk uur valt en met behulp van de totale hoeveelheid neerslag in mm/uur. De hoeveelheid neerslag in mm/uur wordt vervolgens in Sobek gebruikt om de bui te definiëren. De grafieken van de vier verschillende buien waarin de hoeveelheid neerslag per uur is uitgezet tegen de looptijd van de bui, zijn te zien in figuur 4.5. Omdat alle vier buien in het begin sterk pieken, is in de figuur een detailgrafiek opgenomen waarin de eerste 4 uur van de looptijd van de buien zijn uitgezet.



Figuur 4.5: Neerslag per uur van de statistische buien $T = 1$, $T = 10$, $T = 25$, $T = 100$.

De buien zoals te zien in figuur 4.5 zijn bepaald op basis van statistische data van buien met een looptijd van 8 dagen. 8 dagen omvat 192 uur. In figuur 4.5 is echter te zien dat de vier statistische buien een duur hebben van 204 uur. Hiervoor is gekozen omdat vergelijking (4.1) na 192 uur nog niet op 100% van de gevallen neerslag zit. Om toch de volledige hoeveelheid neerslag te laten vallen behorende bij de verschillende statistische buien, moet daarom de looptijd van de buien niet 8 dagen zijn, maar $8\frac{1}{2}$ dag. Dit verandert nauwelijks iets aan de vorm van de buien en vrijwel niets aan de vorm van de buien tijdens de eerste 48 uur van de buien, hierdoor is de verkleining van de intensiteit van de bui nihil. De eerste 48 uur van deze buien zijn namelijk de belangrijkste, aangezien in deze periode de meeste neerslag valt. Hierdoor wordt dit minimale verschil geaccepteerd.

De buien zijn in Sobek ingevoerd met een neerslag per uur. De buien lopen twee weken lang. Dit betekent niet dat gedurende deze twee weken constant neerslag valt. De eerste $8\frac{1}{2}$ dag van deze twee weken valt de bui, waarna op de overige dagen geen neerslag valt. Deze periode wordt de weerslagperiode van de bui genoemd. Deze weerslagperiode wordt gebruikt om de neerslag die valt op de onverharde oppervlakken van het model uit te laten zakken naar de watergangen. Door hiervan gebruik te maken wordt verwacht dat een duidelijk beeld ontstaat van de locatie en het tijdstip van de eventueel optredende afvoerpiek.

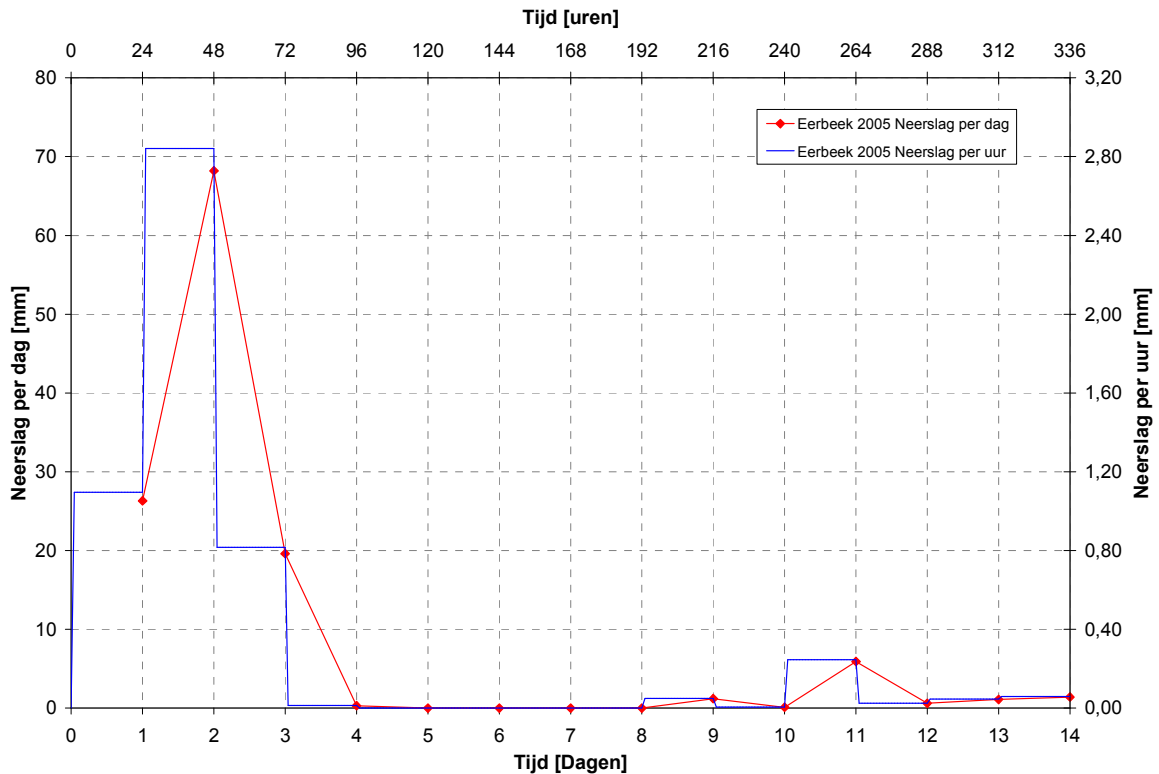
4.3.2 Constante Bui

Een ander neerslagscenario dat is gebruikt in Sobek, is een bui die gedurende 2 weken een constante intensiteit heeft. Bij Waterschap Veluwe is het gebruikelijk om voor een dergelijke bui een neerslag te kiezen van 2 mm/dag. In Sobek wordt ook deze bui gemodelleerd door per uur aan te geven hoeveel neerslag valt. 2 mm/dag

komt overeen met 0,0833 mm/uur. Dit is representatief voor zogenaamde dagelijkse omstandigheden.

4.3.3 Werkelijke Bui

Het is niet alleen interessant om te onderzoeken hoe de Fliert zich gedraagt bij theoretische neerslagscenario's. Het is zeker zo interessant om te onderzoeken hoe de Fliert zich gedraagt bij een werkelijk gevallen bui.



Figuur 4.6: Eerbeek 2005 bui: neerslag per dag en per uur.

Bij Waterschap Veluwe zijn neerslaggegevens bekend vanaf 2000 van verschillende meetstations binnen het beheersgebied van Waterschap Veluwe [21]. Deze gegevens zijn afkomstig uit de maandelijkse neerslagoverzichten van het KNMI. Van alle data is een neerslagreeks uitgekozen die gemeten is door het meetstation Eerbeek in 2005. Op dag 330 van 2005, in het weekend dat Oost-Nederland geteisterd werd door hevige sneeuwbuien, werd een neerslag gemeten van 68,2 mm. Dit was de grootste hoeveelheid neerslag die gevallen is op één dag van dat jaar. De neerslag viel dan ook als sneeuw en niet als regen. Gekozen is om van één dag voor deze dag en 12 dagen na deze dag de neerslaggegevens te selecteren en te gebruiken in Sobek. In figuur 4.6 is de bui intensiteit te zien in mm/dag, zie de rode curve in dit figuur.

De gegevens die de rode curve weergeeft, zijn millimeters per dag. Besloten is om de neerslag die valt per dag te middelen over 24 uur. Dit levert de grafiek op die in figuur 4.6 te herkennen is aan de blauwe curve. Deze curve is met die vorm ook ingevoerd in Sobek met de naam 'Eerbeek 2005', verwijzend naar de plaats en het jaar waar deze bui is gevallen. De keuze om de neerslaggegevens te middelen over 24 uur zal vermoedelijk een onderschatting geven van de maximale intensiteit van de bui. Voor de gevoeligheidsanalyse maakt dit echter niet uit.

4.4 *Ruwheidscenario's*

Niet alleen worden verschillende buien doorgerekend in Sobek. Ook verschillende ruwheidscenario's waarbij alle watergangen dezelfde ruwheid hebben, worden in Sobek gemodelleerd. In hoofdstuk 3 is onderbouwd dat in Sobek gerekend gaat worden met de De Bos en Bijkerk vergelijking. Voor de De Bos en Bijkerk vergelijking is de waarde van de coëfficiënt γ nodig. Deze coëfficiënt is gelijk aan de Manning coëfficiënt van de watergang bij een waterdiepte van 1,0 m.

Aangezien het hier om een gevoeligheidsanalyse gaat, wordt een vijftal ruwheidscenario's gemodelleerd, met een coëfficiënt γ van 30 s^{-1} , 25 s^{-1} , 15 s^{-1} , 10 s^{-1} en 5 s^{-1} . De reden dat gekozen is voor een maximale gladheid van 30 s^{-1} in deze gevoeligheidsanalyse, is dat deze waarde in het model van de Noordelijke IJsselvallei is gebruikt. Een waarde voor de coëfficiënt γ van 30 s^{-1} , behoort bij een onderhoud van de watergangen zoals in het verleden altijd is toegepast. Een waarde voor de coëfficiënt γ hoger dan 30 s^{-1} betekent gladdere watergangen en dus een intensiever onderhoud van de watergangen. Het is niet het doel van de gevoeligheidsanalyse om het effect te onderzoeken van een intensiever onderhoud, dus wordt een maximale waarde voor γ aangehouden van 30 s^{-1} . Voor een vegetatiebeeld behorende bij een waarde voor γ , wordt verwezen naar tabel 4.1.

4.5 *Cases*

Door de verschillende buientypes met de verschillende ruwheidscenario's te combineren, worden dertig verschillende cases verkregen, zie tabel 4.1. De namen in tabel 4.1 zijn gelijk aan de namen die in Sobek aan de verschillende cases gegeven zijn. Aan de hand van deze dertig cases zal de gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd. De ruwheidscenario's zijn gebaseerd op de bevindingen in hoofdstuk 3.

Watergang is: Coëfficiënt γ Buitype:	Zwaar begroeid 5 s^{-1}	Begroeid 10 s^{-1}	Redelijk begroeid 15 s^{-1}	licht begroeid 25 s^{-1}	Schoon 30 s^{-1}
2 mm / dag	DBB5_T2mm	DBB10_T2mm	DBB15_T2mm	DBB25_T2mm	DBB30_T2mm
T = 1	DBB5_T1	DBB10_T1	DBB15_T1	DBB25_T1	DBB30_T1
T = 10	DBB5_T10	DBB10_T10	DBB15_T10	DBB25_T10	DBB30_T10
T = 25	DBB5_T25	DBB10_T25	DBB15_T25	DBB25_T25	DBB30_T25
T = 100	DBB5_T100	DBB10_T100	DBB15_T100	DBB25_T100	DBB30_T100
Eerbeek 2005	DBB5_Eerbeek2005	DBB10_Eerbeek2005	DBB15_Eerbeek2005	DBB25_Eerbeek2005	DBB30_Eerbeek2005

Tabel 4.1: Verschillende cases gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse.

4.6 *Modelresultaten*

Van dertig verschillende cases zijn de modelresultaten bestudeerd. Vanwege de overzichtelijkheid worden alleen de belangrijkste figuren gepresenteerd. Voor overige figuren wordt verwezen naar de bijlage I, II en III.

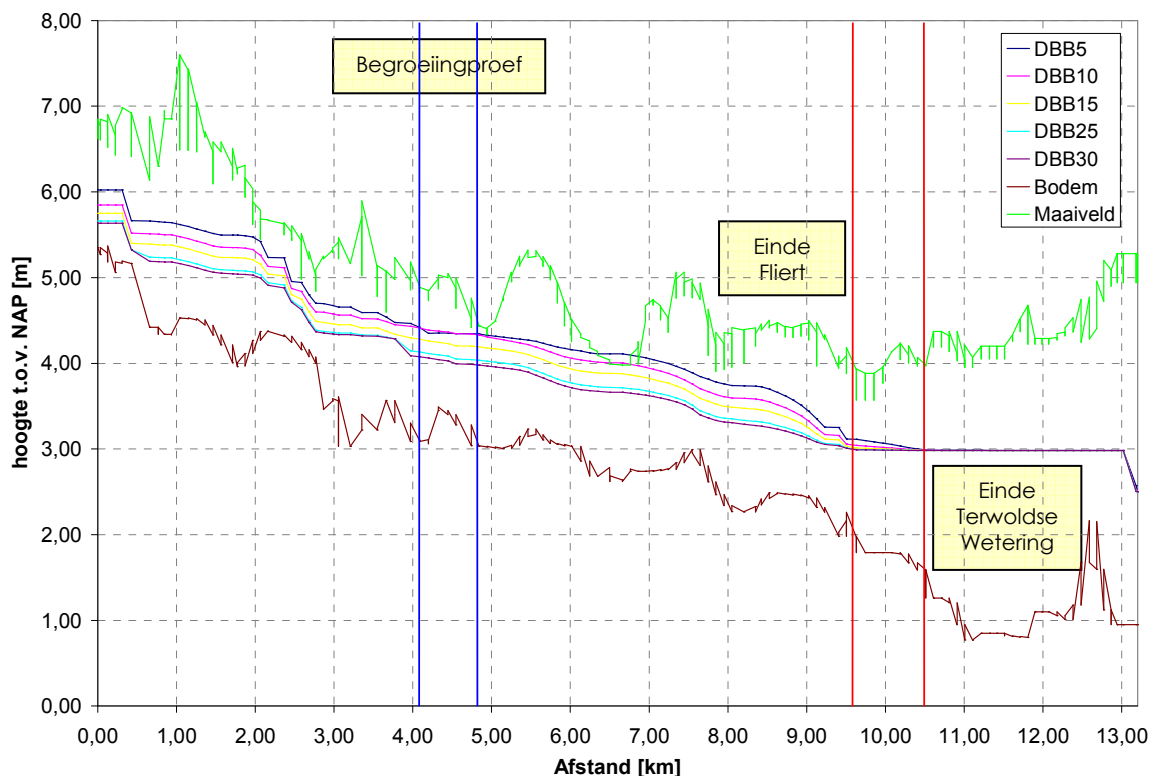
De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden op drie wijzen gepresenteerd. De maximale waterstand die gedurende de berekening optreedt

uitgezet tegen het lengteprofiel van de Fliert, de waterstand op een drietal punten in de Fliert uitgezet tegen de tijd en het debiet op hetzelfde drietal punten in de Fliert uitgezet tegen de tijd.

4.6.1 Maximale Waterstanden

Bij de buien met een neerslag van 2 mm/dag en bij een herhalingstijd van één keer per jaar, treedt geen wateroverlast op in de Fliert. Weliswaar is de maximale waterstand in het geval van een zwaar begroeide watergang, $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$, zeker een halve meter hoger dan wanneer gerekend wordt met een schone watergang, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, toch komt geen water op het maaiveld te staan bij alle ruwheidscenario's.

Dit is niet het geval bij een bui met een herhalingstijd van 10 jaar of meer. In figuur 4.7 zijn de maximale waterstanden te zien van de vijf verschillende cases behorende bij een $T = 10$ bui. In de figuur geven de verticale blauwe lijnen de locatie weer van de begroeiingsproef, de verticale linker rode lijn het einde van de Fliert en de verticale rechter rode lijn het einde van de Terwoldse Wetering. De groene en bruine curve geven respectievelijk het maaiveld en de bodem van de watergang weer. De namen DBB5 t/m DBB30, die in de legenda zijn te zien, staan voor de verschillende cases waarmee is gerekend, zie tabel 4.1. In figuur 4.7 is te zien dat de curven met $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ en $\gamma = 10 \text{ s}^{-1}$ op ongeveer 6,5 km vanaf het begin van het model boven het maaiveld uitkomen. Dit betekent dat op die locatie inundatie optreedt van het maaiveld. Bij lagere ruwheden blijft het water in de Fliert. Bij een $T = 100$ bui treedt alleen in het geval van een schone watergang, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, geen inundatie op van het maaiveld, zie figuur I-5 in bijlage I. Bij de Eerbeek 2005 bui, treedt veel wateroverlast op, zie figuur 4.9. Bij alle ruwheidscenario's in combinatie met deze bui komt het water op een aantal locaties op het maaiveld te staan. Over een zeer lang traject is de maximale waterstand bijna gelijk aan de



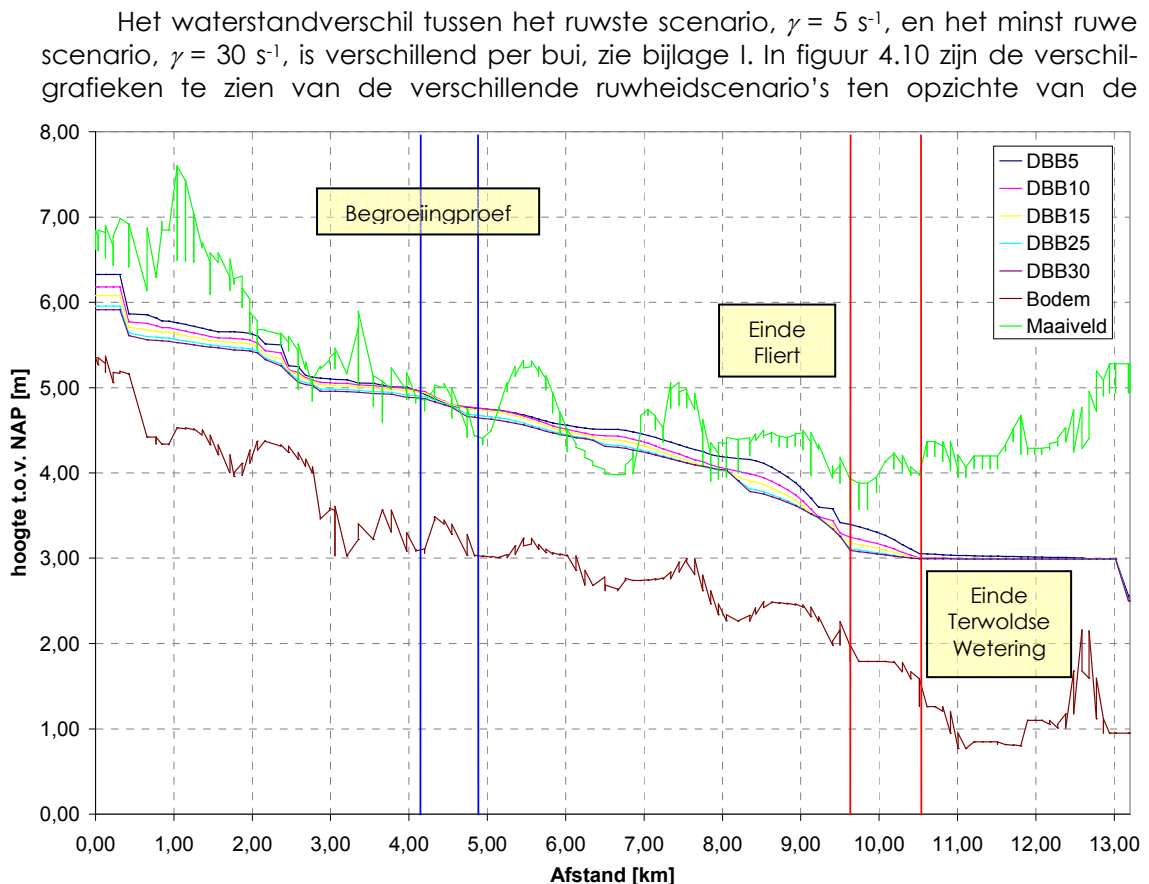
Figuur 4.7: Grafiek met maximale waterstanden en verschillende ruwheden bij bui $T = 10$.

maaiveldhoogte. Het lijkt erop dat er maar iets meer neerslag hoeft te vallen en hele gebieden onder water lopen. Om deze conclusie hard te kunnen maken zal een analyse van de hoogteligging van het onderzoeksgebied gedaan moeten worden.

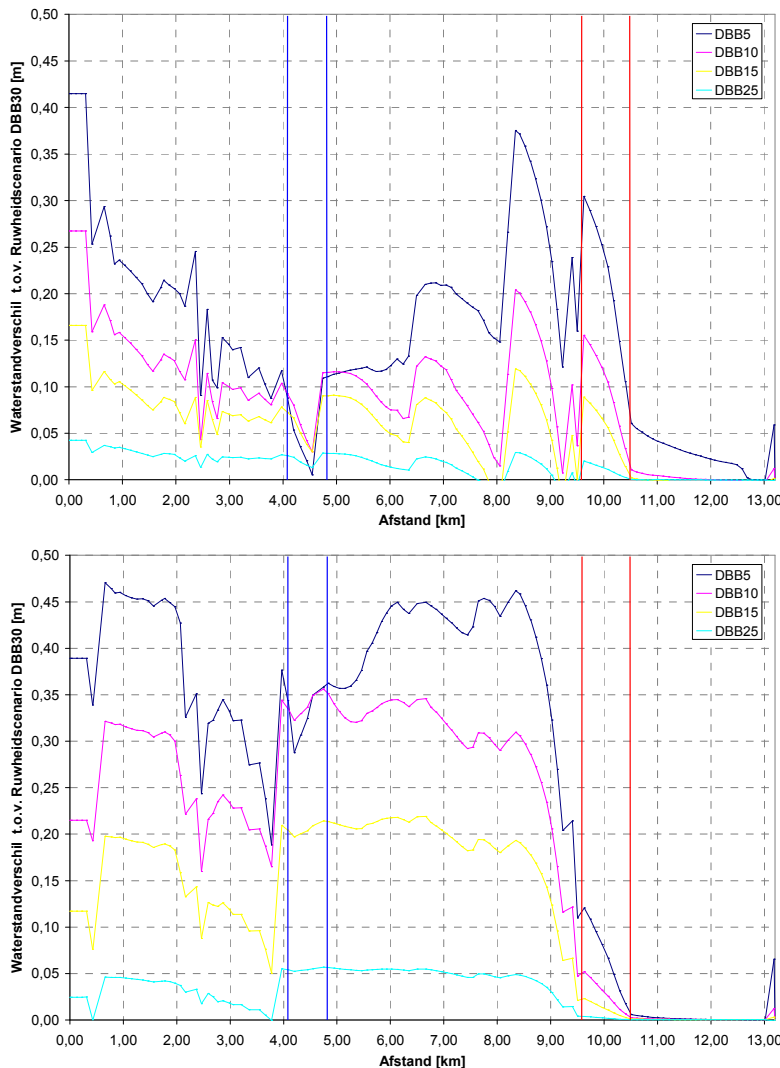
Op twee locaties ontstaat tijdens de Eerbeek 2005 bui veel wateroverlast. Dat is op dezelfde locatie waar ook bij hoge ruwheden in combinatie met de $T = 10$ bui overlast optreedt en direct benedenstrooms van de begroeiingsproef. Bij de rayonleider van het rayon waarin de Fliert gelegen is, zijn dit bekende knelpunten. Het betreft de sportvelden aan het einde van de begroeiingsproef, zie figuur 4.8, en een traject vanaf de spoorlijn Deventer – Apeldoorn tot de provinciale weg N344 bij Twello. Het is bekend bij de afdeling Onderhoud van het Waterschap Veluwe, dat bij veel waterafvoer door de Fliert op deze locaties het eerst overlast optreedt. Deze overeenstemming tussen modelresultaten en praktijkervaring geven een goed gevoel over de betrouwbaarheid van het Sobek model. Op het moment dat de Eerbeek 2005 bui viel, was echter geen sprake van wateroverlast. Dit kwam doordat de bui viel als sneeuw, waardoor neerslag vertraagd tot afvoer kwam.



Figuur 4.8: Sportvelden die inunderen bij de Fliert.



Figuur 4.9: Grafiek met maximale waterstanden en verschillende ruwheden bij bui Eerbeek 2005.



Figuur 4.10: Verschilgrafieken maximale waterstand t.o.v. scenario schone watergangen, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$. Onder voor $T = 10$ bui, boven voor Eerbeek 2005 bui.

waterstandverschil van bijna 10 cm en bij een ruwheid met een De Bos en Bijkerk coëfficiënt van 10 s^{-1} en 5 s^{-1} , verschil 5 s^{-1} , een waterstandverschil van ruim 30 cm. Weliswaar variëren deze verschillen, maar deze tendens blijft hetzelfde gedurende de gehele loop van de Fliert.

Bij de Eerbeek 2005 bui is dit trapsgewijze verschil ook te zien aan het begin van de Fliert, maar niet in de rest van de loop van de Fliert. Het waterstandverschil tussen de verschillende ruwheden verloopt veel meer met pieken: ter hoogte van de begroeiingsproef, tussen de verticale blauwe lijnen, is het waterstandverschil tussen de verschillende ruwheden gereduceerd tot een paar centimeter. Ongeveer 4 km benedenstrooms van dit punt is het waterstandverschil bijna maximaal tot bijna 40 cm. Hier is ook weer het trapsgewijze waterstandverschil te herkennen tussen de verschillende ruwheidscenario's. Het waterstandverschil tussen de ruwheidscenario's is veel kleiner bij deze bui dan bij de overige doorgerekende buien, zie bijlage I. Wat ook opvalt, is dat heel lokaal het waterstandverschil van een ruwer scenario soms lager is dan van een gladder scenario. Dit is bijvoorbeeld te zien in figuur 4.10 bij 4,5 km, ter hoogte van de begroeiingsproef, waar het scenario met een $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ een kleiner waterstandverschil, dus een kleinere waterdiepte, laat zien dan de overige

situatie met schone watergangen, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, voor de buien $T = 10$ en Eerbeek 2005. De verschillen in de waterstanden tussen de verschillende cases zijn in het geval van de $T = 10$ bui veel groter dan de waterstandverschillen tussen de cases bij de Eerbeek 2005 bui. Bij de $T = 10$ bui is ook een duidelijk verloop te zien in het waterstandverschil:

Het lijkt erop dat bij een $T = 10$ bui het waterstandverschil ten opzichte van een goed onderhouden watergang een steeds grotere stapgrootte neemt naarmate de ruwheid groter wordt. Immers, wanneer gekeken wordt aan het begin van de Fliert, op 0,0 km, zit tussen een ruwheid met een De Bos en Bijkerk coëfficiënt van 25 s^{-1} en 15 s^{-1} , verschil 10 s^{-1} , een waterstandverschil van bijna 10 cm, bij een ruwheid met een De Bos en Bijkerk coëfficiënt van 15 s^{-1} en 10 s^{-1} , verschil 5 s^{-1} , ook een

ruwheidscenario's. Dit is een vreemd verschijnsel, aangezien alle condities in Sobek hetzelfde zijn, bui en schematisatie, en alleen de ruwheid verschilt met de overige scenario's. Hierdoor wordt juist verwacht dat het waterstandverschil groter is dan de overige scenario's. Mogelijk komt dit doordat de Fliert op deze locatie een stuk smaller wordt en vlak voor dit versmalde stuk gemaal Voorderpad zich bevindt. Door de hogere ruwheid treedt sneller een bepaalde waterstand op waardoor gemaal Voorderpad aanslaat en de waterstand doet zakken. Een andere mogelijke verklaring hiervoor is, dat de maximale waterstanden die in figuur 4.10 met elkaar worden vergeleken niet tegelijkertijd optreden, zie paragraaf 4.6.2. De piekerigheid van de verschilgrafiek van de Eerbeek 2005 bui is ook te verklaren dat in de ruwere scenario's gemaal Voorderpad wel aanstaat en in de overige scenario's niet.

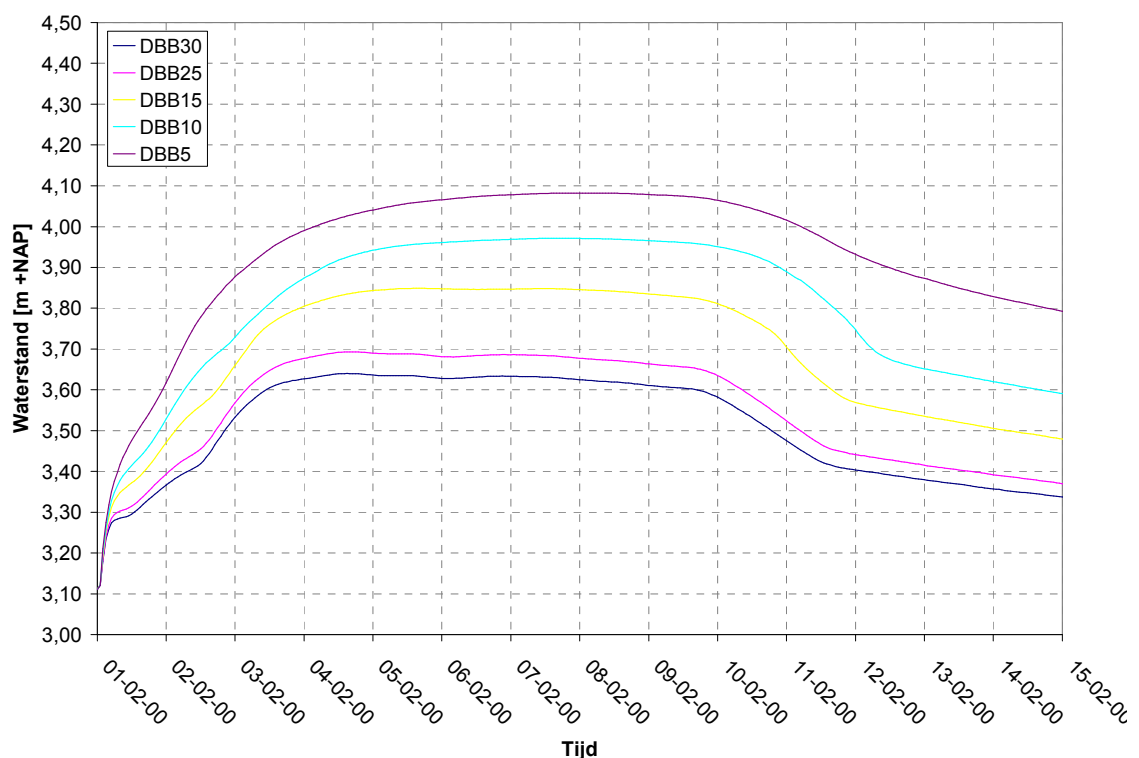
Een ander punt dat opvalt in de grafieken 4.7 en 4.9 is dat op sommige locaties een stuwkromme ontstaat. Dit is onder meer het geval aan het einde van de Fliert, ter hoogte van de linker rode verticale lijn in de figuren 4.7 en 4.9. Hier blijkt een duiker te liggen die mogelijk zorgt voor opstuwing van de Fliert, zie figuur 4.11. Mogelijk zou vergroting van deze duiker zorgen voor een aanzienlijke waterstandverlaging voor alle ruwheidscenario's. Ook op andere locaties waar een stuwkromme ontstaat zijn duikers aanwezig, die mogelijk te krap zijn. Het vergroten van de te krappe duikers is een scenario die mogelijk later doorgerekend kan worden in dit afstudeeronderzoek.



Figuur 4.11: Duiker bij einde Fliert.

4.6.2 Waterstand in Tijd

Het is niet alleen interessant om te kijken naar de maximale waterstand, maar

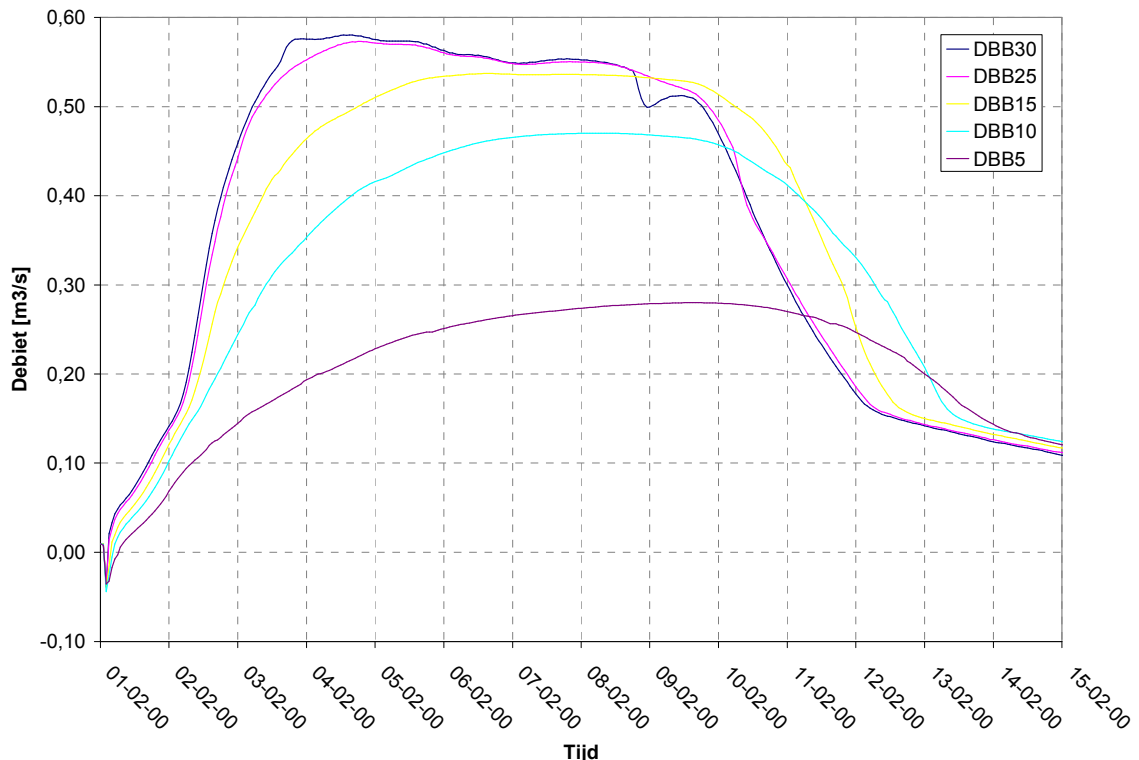


Figuur 4.12: Waterstandverloop midden Fliert voor scenario's met $t = 10$ bui.

ook het verloop van de waterstand te analyseren gedurende de gehele berekening. In bijlage II zijn van drie locaties in de Fliert grafieken opgenomen van de dertig verschillende scenario's waarin de waterstand uitgezet is tegen de tijd. De eerste locatie is aan het begin van de Fliert bij Bussloo, node 1911 in het Sobek model en punt 1 in figuur 4.2, de tweede locatie is in het midden van de Fliert, node 1891 in het Sobek model en punt 2 in figuur 4.2, en de derde locatie is aan het einde van de Fliert, node 1748 in het Sobek model en punt 3 in figuur 4.2. De punten aan het begin, het midden en het einde van de Fliert, de punten 1 t/m 3 in figuur 4.2, zijn terug te vinden op respectievelijk de kilometers 1,36, 6,86 en 9,63 in de figuren 4.7, 4.9 en 4.10.

In figuur 4.12 is het waterstandverloop te zien van de locatie in het midden van de Fliert van de ruwheidscenario's behorende bij een $T = 10$ bui. Te zien is dat naarmate de ruwheid in de Fliert groter wordt, niet alleen de waterstand stijgt, maar ook de duur van het hoge water toeneemt en de piek van het hoge water later komt. Hieruit blijkt dat de hogere ruwheid in de watergang het water belemmert om snel af te stromen. Het water wordt dus vastgehouden door de vegetatie in de watergang. Hierdoor duurt de hoogwaterperiode langer, maar komt ook de piek steeds later naarmate de ruwheid toeneemt. Ten opzichte van het minst ruwe scenario met een De Bos en Bijkerk coëfficiënt van 30 s^{-1} komt de afvoerpiek van het scenario met een De Bos en Bijkerk coëfficiënt van 5 s^{-1} ongeveer 2,5 dag later. De maximale waterstanden zoals te zien in de grafieken van figuren 4.7 en 4.9 treden dus niet gelijktijdig op.

Dit effect is bij alle buien op alledrie de locaties te zien, zie bijlage II, behalve bij de constante bui met een neerslag van 2 mm/dag . Daar blijft de waterstand gestaag stijgen. Dat is niet vreemd, aangezien bij die bui sprake is van een constante toevoer van neerslag, waardoor de waterstand blijft stijgen als de berging is opgevuld en de afvoer kleiner is dan de aanvoer. Deze stijging is echter zo nihil dat, ook als de constante bui nog twee weken extra valt, verwacht wordt dat geen wateroverlast plaatsvindt. Uiteindelijk zal zelfs een evenwicht bereikt worden en zal de waterstand constant blijven bij deze bui.



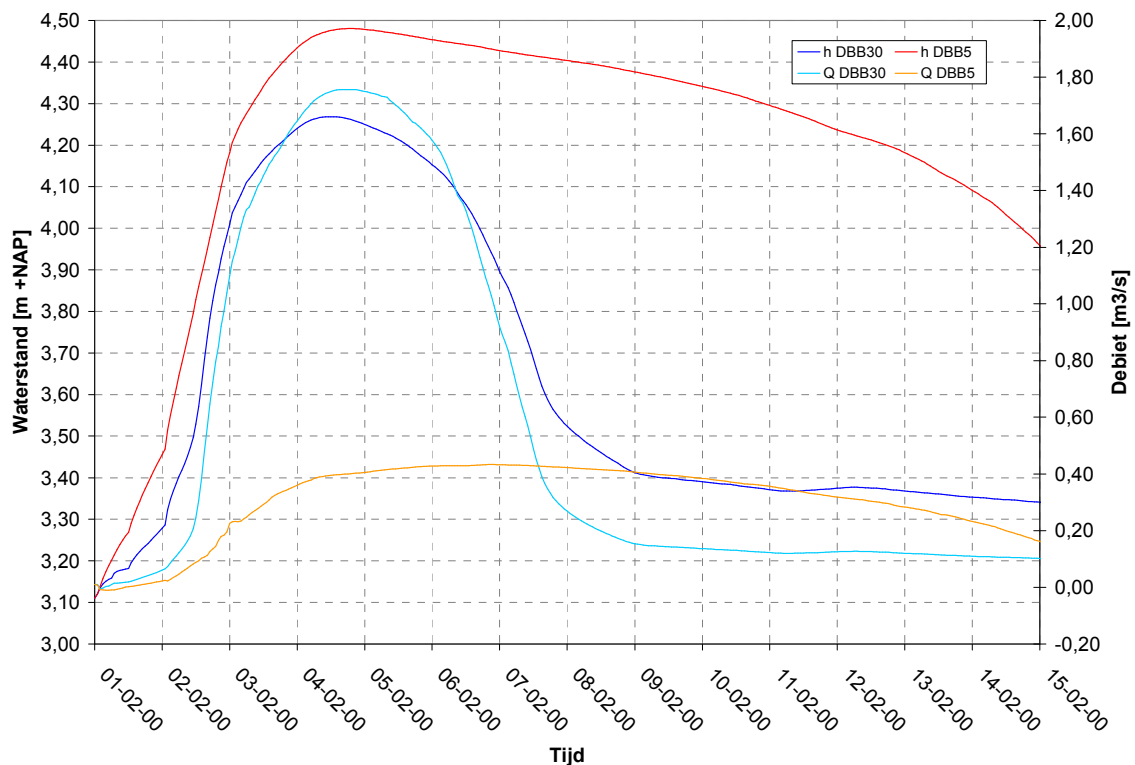
Figuur 4.13: Debietverloop midden Fliert voor scenario's met $T = 10$ bui.

Wanneer gekeken wordt naar de grafieken van de waterstand uitgezet tegen de tijd van de locatie aan het einde van de Fliert, is het effect van het gemaal mr. A. C. baron van der Feltz in Terwolde duidelijk te zien, zie bijlage II. Vooral bij de grafieken behorende bij de 2 mm/dag bui is duidelijk het aan- en afslagpeil te ontdekken van het gemaal. De reden dat dit niet bij alle grafieken even goed te zien is, is omdat de waterstand in die gevallen sterker stijgt dan het gemaal wegpompen kan.

4.6.3 Debiet in Tijd

Voor de gevoeligheidsanalyse is ook gekeken naar het verloop van het debiet gedurende de tijd. Op drie locaties in de Fliert is gekeken naar dit verloop. De locaties zijn dezelfde als waar gekeken is naar het verloop van de waterstand in de tijd, dus aan het begin, het midden en het einde van de Fliert, zie bijlage III.

In figuur 4.13 zijn de grafieken te zien van het verloop van het debiet in de loop van de tijd behorende bij een $T = 10$ bui. De grafieken behorende bij de overige buien zijn terug te vinden in bijlage III. Wat als eerste opvalt aan de grafieken van figuur 4.13 is dat de scenario's met een De Bos en Bijkerk coëfficiënt van 25 s^{-1} en 30 s^{-1} bijna exact hetzelfde verloop laten zien. Bij alle buien en locaties is deze overeenkomst terug te vinden. Wat vervolgens opvalt, is dat het hoogste debiet optreedt bij de laagste ruwheid: het geval van de schone watergang, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$. Hoe hoger de ruwheid, hoe lager de piek van het debiet. Dit is het tegenovergestelde van het verloop van de waterstand in de tijd. Wat wel overeenkomt met het verloop van de waterstand in de tijd, is dat de piek in het debiet bij een hoge ruwheid langer aanhoudt dan bij een lage ruwheid. Dat bij een lage ruwheid een hoog debiet hoort, is te verklaren. Door de lage ruwheid wordt het water in de Fliert immers snel afgevoerd, wat een kortdurend hoog debiet tot gevolg heeft. Bij een hoge ruwheid wordt het water minder snel afgevoerd, het wordt immers vastgehouden door de vegetatie. Hierdoor ligt de piek van het debiet een stuk



Figuur 4.14: Waterstand en debiet in tijd voor twee ruwheidscenario's voor bui Eerbeek 2005 in het midden van de Fliert.

lager, maar houdt wel langer aan, zodat dezelfde hoeveelheid water wordt afgevoerd als bij de overige ruwheidscenario's.

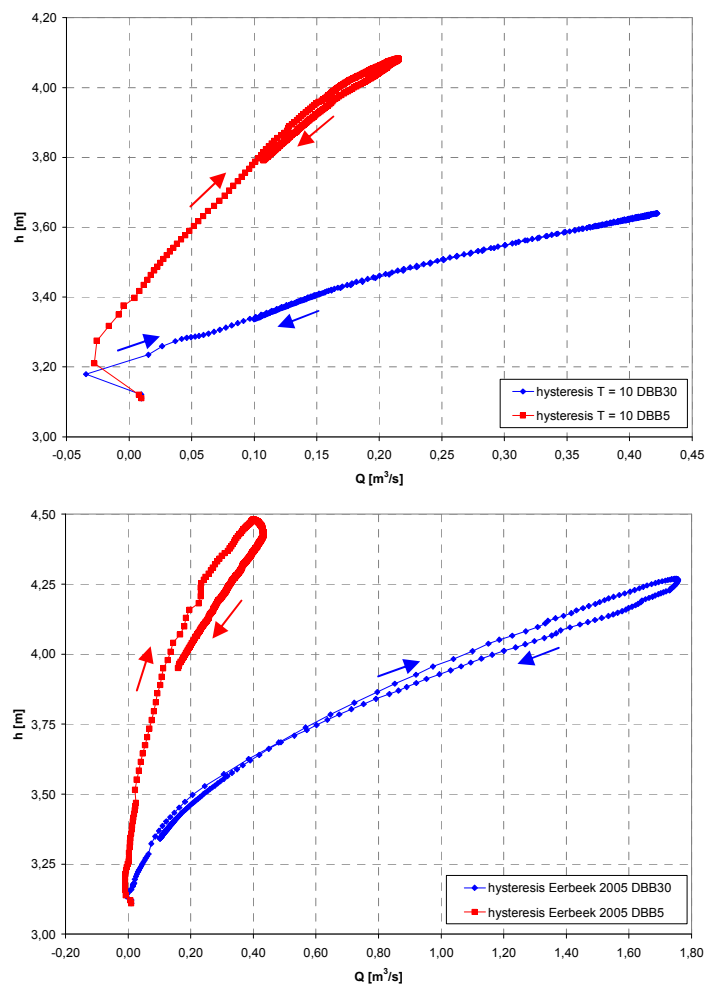
Dat het water wordt vastgehouden en daardoor later wordt afgevoerd als gevolg van de vegetatie in de watergang, blijkt ook uit het tijdstip wanneer de piek van het debiet optreedt. Naarmate de ruwheid toeneemt, komt het maximum debiet later. Het verschil tussen de afvoerpieken van scenario met schone watergangen, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$ en het scenario met zware vegetatiegroei, $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$, bedraagt ruim 5 dagen.

Wanneer het verloop van de waterstand en het verloop van het debiet in één grafiek worden gezet, zijn duidelijk overeenkomsten te zien. In figuur 4.14 is van de locatie in het midden van de Fliert het verloop van de waterstand en het debiet te zien van het meest ruwe scenario, $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$, en het minst ruwe scenario, $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, behorende bij de case met de Eerbeek 2005 bui. In deze figuur is duidelijk te zien dat de curve van het debiet en waterstand van hetzelfde ruwheidscenario synchroon aan elkaar lopen. Wanneer het debiet door de watergang toeneemt, neemt ook de waterstand toe. De top van het debiet valt vrijwel samen met de hoogste waterstand. In figuur 4.14 is duidelijk te zien dat wanneer de watergang niet gemaaid wordt en dus de ruwheid toeneemt in de watergang, de waterstand hoger en het debiet lager is dan in het scenario waarin de watergang goed onderhouden wordt en dat de piek in de waterstand en debiet veel langer duurt dan het goed onderhouden scenario, doordat de vegetatie het water vasthoudt. Wordt de watergang goed onderhouden, zal bij veel neerslag dus kortstondig een piek optreden in de waterstand en debiet. Dit wordt veroorzaakt doordat geen vegetatie aanwezig is in de watergang die de afvoer van het water kan belemmeren.

4.6.4 Hysteresis

De grafieken waarin de waterstand en het debiet uitgezet worden tegen de tijd kunnen ook gecombineerd worden tot Q-h relaties. Dit is gedaan voor de ruwheidscenario's met $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ en $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$ behorende bij de Eerbeek 2005 bui en $T = 10$ bui, zie figuur 4.15.

Het eerder beschreven effect dat bij een hogere ruwheid de maximale waterstand hoger wordt, maar het maximale debiet lager, is duidelijk terug te vinden in beide grafieken.



Figuur 4.15: Q-h relaties van ruwheidscenario's met $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ en $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$. Bovenste grafiek voor $T = 10$ bui en onderste grafiek voor Eerbeek 2005 bui.

Wat ook goed naar voren komt is de traagheid van het debiet ten opzichte van de waterstand. In figuur 4.15 is duidelijk het hysteresis effect te zien. Hysteresis is het effect dat bij een waterstand, wanneer deze stijgt, het debiet verschilt ten opzichte van het debiet behorende bij diezelfde waterstand wanneer de waterstand na een maximale waterstand weer daalt. In figuur 4.15 is dit effect het meest duidelijk te zien voor de Eerbeek 2005 bui met een ruwheid van $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$. Het debiet behorende bij een waterstand van 4,00 m +NAP is wanneer de waterstand stijgt ongeveer 0,15 m³/s en wanneer de waterstand daalt ongeveer 0,20 m³/s. Hieruit blijkt dat het debiet een zekere vertraging heeft ten opzichte van de waterstand. Duidelijk te zien in figuur 4.15 is dat het maximale debiet ook pas optreedt als de waterstand al iets lager is dan de maximale waterstand. Dit hysteresis effect is een stuk minder bij een ruwheid van $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, dan bij een ruwheid van $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$. Hieruit blijkt dat het systeem minder gevoelig is voor hysteresis wanneer de ruwheid lager is. Het debiet heeft dan aanzienlijk minder vertraging ten opzichte van de ruwheid. Naarmate meer vegetatie in een watergang aanwezig is, zal het debiet dus een grotere vertraging hebben op de waterstand.

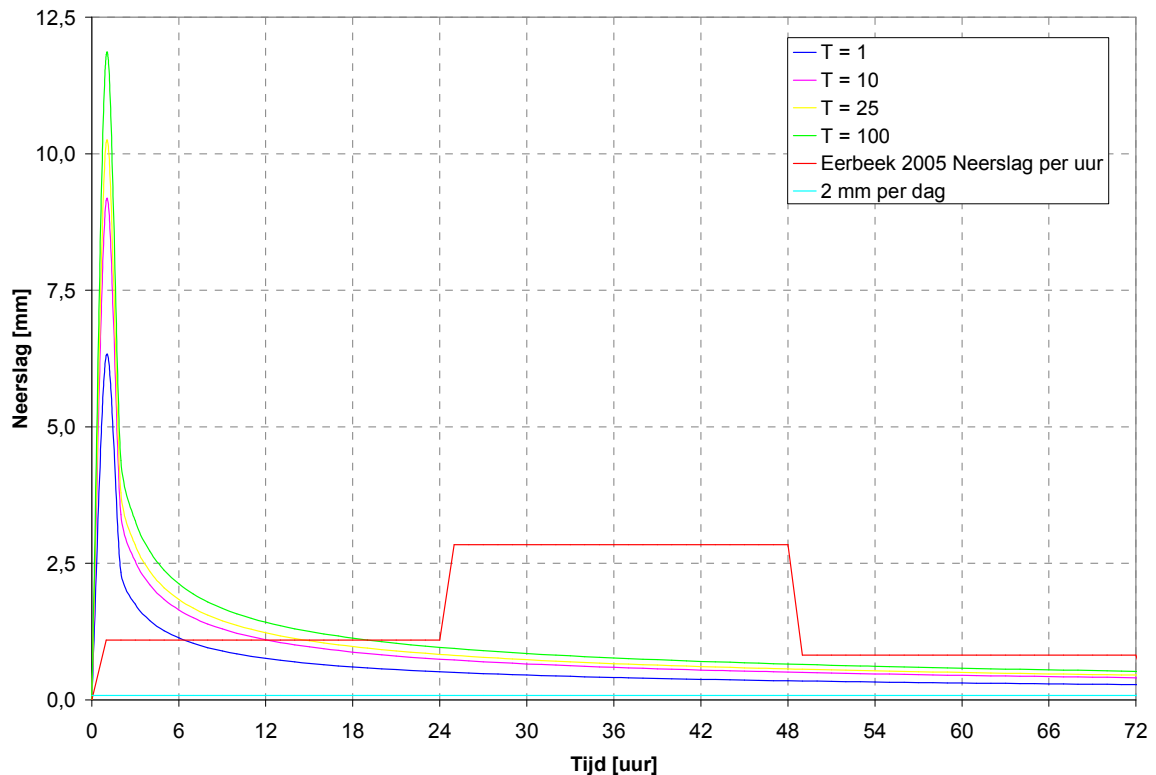
In de grafieken van figuur 4.15 is ook het tijdsaspect terug te vinden. De ruimte tussen de vierkante blokjes in de curven van deze figuur geeft een tijdspanne weer van één uur. Sobek geeft namelijk ieder uur van de berekening de waterstand en het debiet. Hierdoor is in figuur 4.15 te zien dat bij een hogere ruwheid hoge waterstanden langer aanhouden dan bij een lage ruwheid. Dit is op te maken uit de concentratie van vierkantjes bij de hoge waterstanden in figuur 4.15 bij de cases met een hoge ruwheid. Dit viel echter ook al op te maken uit figuur 4.14.

4.7 Analyse & Conclusie

De gevoeligheidsanalyse heeft inzicht gegeven in de werking van het systeem bij verschillende neerslagsscenario's en ruwheidscenario's. Het is gebleken dat de constante bui met een neerslag van 2 mm/dag nauwelijks invloed heeft. Weliswaar stijgt de waterstand naarmate de ruwheid groter wordt, maar dit heeft totaal geen gevolgen voor eventuele inundatie van aanliggend gebied. Ditzelfde geldt voor de T = 1 bui.

Het effect van de verruwing van de watergangen als gevolg van de toenemende hoeveelheid vegetatie in de Fliert begint pas negatieve gevolgen te krijgen bij de T = 10 bui. Dit negatieve effect wordt sterker naarmate de herhalingsdij van de bui groter wordt en dus de hoeveelheid water die valt groter wordt. Bij de T = 25 bui en zeker bij de T = 100 bui zijn de negatieve gevolgen bijzonder groot. Zelfs in het geval van de laagste ruwheid, waarbij de watergangen goed schoon worden gehouden, komt het water bijna op het maaiveld te staan bij een T = 100 bui. Bij de Eerbeek 2005 bui is het zelfs zo dat bij alle ruwheidscenario's het water op het maaiveld komt te staan. Navraag bij de afdeling Onderhoud van Waterschap Veluwe leert dat tijdens deze bui geen wateroverlast ontstond in de Fliert. Dit kwam doordat in het weekend van 25 en 26 november 2005, het weekend dat deze bui viel, de neerslag viel als sneeuw. Hierdoor wordt de neerslag ten opzichte van regen vertraagd en geleidelijker afgevoerd, waardoor het systeem niet ineens veel water te verwerken krijgt. Op andere locaties in het beheersgebied van Waterschap Veluwe is echter wel degelijk tijdens deze bui sprake geweest van wateroverlast.

De reden dat bij de Eerbeek 2005 bui alle ruwheidscenario's voor wateroverlast zorgen en dat de waterstandverschillen van de maximale waterstanden gedurende de rekenreeks ten opzichte van de ruwheidscenario's onderling weinig verschillen, zie figuur 4.9, moet gezocht worden in de vorm van de

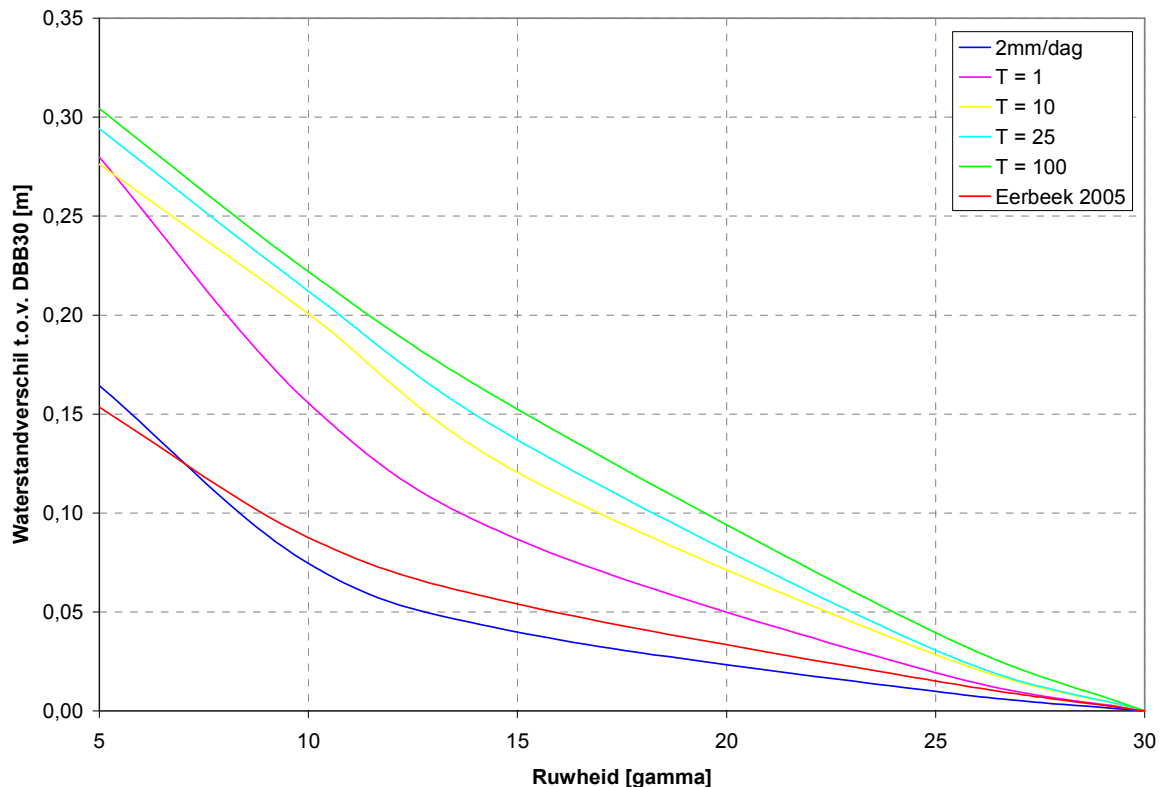


Figuur 4.16: Vorm van de buien in de eerste 3 dagen, of 72 uur.

buien. In figuur 4.16 zijn de buivormen te zien van de eerste 3 dagen, of 72 uur. Wat hierin opvalt, is dat de statistische buien in het eerste uur sterk pieken en vrijwel direct daarna afzakken tot minder dan 1 mm/uur. De werkelijk gevallen Eerbeek 2005 bui heeft weliswaar niet een dergelijke sterke piek, maar heeft wel gedurende lange tijd een behoorlijke neerslaghoeveelheid. Hierdoor komt het water meer geleidelijk in de watergang terecht en niet op één moment veel water. Hieruit blijkt dat wanneer één hoge afvoerpiek gedurende een uur optreedt de watergang het water nog net of net niet kan afvoeren, maar dat als continu een behoorlijke hoeveelheid water aangevoerd wordt, de watergang vol raakt en dus zal overstromen. Ook wanneer gekeken wordt naar de totale neerslag van de verschillende buien wordt duidelijk waarom de Eerbeek 2005 bui voor veel wateroverlast zorgt, zie tabel 4.2. De totale neerslag intensiteit van deze bui ligt namelijk tussen de $T = 25$ bui en de $T = 100$ bui. In figuur 4.16 is ook te zien waarom de constante neerslag van 2 mm/ dag nauwelijks gevolgen heeft. Per uur is de neerslag namelijk bijzonder laag.

De buivorm heeft dus grote invloed op de waterstand. Bij de Eerbeek 2005 bui inundeert bij alle ruwheidsscenario's het maaiveld, terwijl bij de statistische piekbuien het sterk afhangt van de ruwheid of het maaiveld inundeert. Dit wordt veroorzaakt doordat de totale hoeveelheid neerslag van de Eerbeek 2005 bui zeer groot is. Zelfs bij het scenario waarin de watergangen goed onderhouden zijn, komt het water op het maaiveld te staan, zie figuur 4.9. De vraag is of op basis hiervan gesteld kan worden of het systeem gevoelig is voor een bui als de Eerbeek 2005 bui, of dat dit veroorzaakt wordt door de grote hoeveelheid neerslag. Immers, rondom elke watergang zal wateroverlast optreden als maar een grote hoeveelheid water door de watergang moet worden afgevoerd en elke watergang is 'gevoelig' voor een grote hoeveelheid neerslag.

Om de gevoeligheid van het systeem voor de buien verder te onderzoeken, is figuur 4.17 gemaakt. Om dit figuur te maken is het gemiddelde genomen van alle maximale waterstandverschillen per buisoort ten opzichte van de case met een ruwheid $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, de case waarin de watergangen goed onderhouden zijn. Wat als



Figuur 4.17: Gemiddelde van de maximale waterstandverschillen ten opzichte van goed gemaaid scenario per bui uitgezet tegen de De Bos en Bijkerk coëfficiënt γ .

eerste opvalt is dat naarmate de bui een grotere piek heeft, dus wanneer de analytische bui een steeds grotere herhalingsstijd heeft, het waterstandverschil lineair toeneemt met het omhoog gaan van de ruwheid. Wat daarbij ook opvalt, is dat naarmate de bui minder gepiekt wordt, deze lineariteit steeds verder afneemt tot bijna een exponentiële groei. Dit verband tussen de buisoorten is ook terug te zien bij het maximale waterstandverschil. Hoe gepiechter de bui, hoe groter het waterstandverschil tussen de verschillende ruwheidscenario's ten opzichte van de case met goed onderhouden watergangen. Hoe constanter de bui, hoe minder de maximale waterstanden van de verschillende ruwheidscenario's ten opzichte van elkaar verschillen. Hieruit blijkt dat het systeem bij elk ruwheidscenario erg gevoelig is voor een sterke piekbui. Uit figuur 4.17 blijkt dat vooral bij de hogere ruwheden, $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ en $\gamma = 10 \text{ s}^{-1}$, het systeem ook gevoelig is voor een constante bui als de Eerbeek 2005 bui.

Voor het vervolg van de studie is het niet van belang om nog te kijken naar de 2 mm/dag bui en de $T = 1$ bui. Gekozen wordt om ook geen verder onderzoek te doen met de $T = 25$ en $T = 100$ buien, aangezien het waterschap watergangen in landelijk gebied met grasland volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water [22] slechts hoeft te dimensioneren op een bui met een herhalingsstijd van 10 jaar, de $T = 10$ bui. Om deze reden zal de Eerbeek 2005 bui niet mee worden genomen in het doorrekenen van mogelijke oplossingen. Omdat de Eerbeek 2005 werkelijk gevallen is en in de jaarlijkse neerslagstatistieken [21] een duidelijke tendens te zien is dat elk jaar een dergelijk heftige bui valt, is het wel interessant om mogelijke oplossingen die voldoende blijken te zijn voor de $T = 10$ bui te toetsen aan de Eerbeek 2005 bui.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de keuze van de ruwheid van de watergang grote invloed heeft op de waterstand en het afvoerpatroon van de watergang. Een interessante conclusie uit de gevoeligheidsanalyse is dat wanneer

de ruwheid in de watergang hoger wordt, de maximale waterstand hoger wordt en dat deze maximale waterstand later optreedt, maar langer aanhoudt. Voor het maximale debiet geldt dat deze lager wordt naarmate de ruwheid hoger wordt, later optreedt en ook langer aanhoudt. Deze twee principes lopen vrijwel synchroon aan elkaar.

De ruwheidscenario's met een γ van 25, 15 en 10 s^{-1} zijn in de gevoeligheidsanalyse gebruikt als zogenaamde tussenscenario's tussen het scenario waarin de watergangen goed onderhouden zijn en wanneer de watergangen volledig begroeid zijn. Zodoende is inzichtelijk gemaakt wat precies gebeurt wanneer de vegetatie in de watergang nog niet volledig volgroeid is. Voor het vervolg van het onderzoek zal gebruik worden gemaakt van één ruwheidscenario.

Buitype	Totale neerslag [mm]
T = 1	71
T = 10	103
T = 25	115
T = 100	133
Eerbeek 2005	125
2 mm per dag	28

Tabel 4.2: Totale neerslag hoeveelheden in 2 weken van de verschillende buien.

5

Oplossingsrichtingen

5.1 *Basisscenario*

Uit de gevoeligheidsanalyse, hoofdstuk 4, blijkt dat de vegetatiegroei in de watergangen een grote invloed heeft op de waterstand. Om eventuele oplossingen op een correcte wijze te kunnen doorrekenen, is het van belang om de werkelijk optredende ruwheid in de watergangen zo dicht mogelijk te benaderen wanneer de watergangen niet onderhouden worden. Het is weliswaar interessant voor de gevoeligheidsanalyse om te bestuderen wat gebeurt als alle watergangen een ruwheid van $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ hebben, in werkelijkheid zal de ruwheid van de watergangen fluctueren per locatie.

Op basis van de onderhoudskaarten van Waterschap Veluwe, zie figuur 5.1, is geschat wat de ruwheid van de watergangen van de Fliet is wanneer de watergangen niet onderhouden worden. In werkelijkheid fluctueert de ruwheid van de watergangen gedurende het groeiseizoen, maar op deze manier wordt de situatie benaderd die optreedt vlak voor het moment dat de watergangen gemaaid mogen worden. Tabel 5.1 is gebruikt om de maaifrequentie te koppelen aan de ruwheid uitgedrukt in de parameter γ gebruikt in de vergelijking van De Bos en Bijkerk. Alle blauwe watergangen in figuur 5.1 krijgen zodoende een ruwheid van $\gamma = 10 \text{ s}^{-1}$ en alle rode watergangen in figuur 5.1 een ruwheid van $\gamma = 15 \text{ s}^{-1}$. In tabel 3.3 is de fysieke betekenis van deze waarden terug te vinden. De gedachte die hier achter zit, is dat watergangen die minder vaak gemaaid worden, minder ruw worden dan watergangen die vaker gemaaid worden wanneer de Flora- en Faunawet wordt nageleefd.



Figuur 5.1: Maaifrequentie van watergangen in de Fliet. Blauw is 3x, rood is 2x maaien per seizoen.

Maaifreq.	Ruwheid $\gamma \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Typering
1x	20	licht ruw
2x	15	redelijk ruw
3x	10	ruw
4x	5	zeer ruw

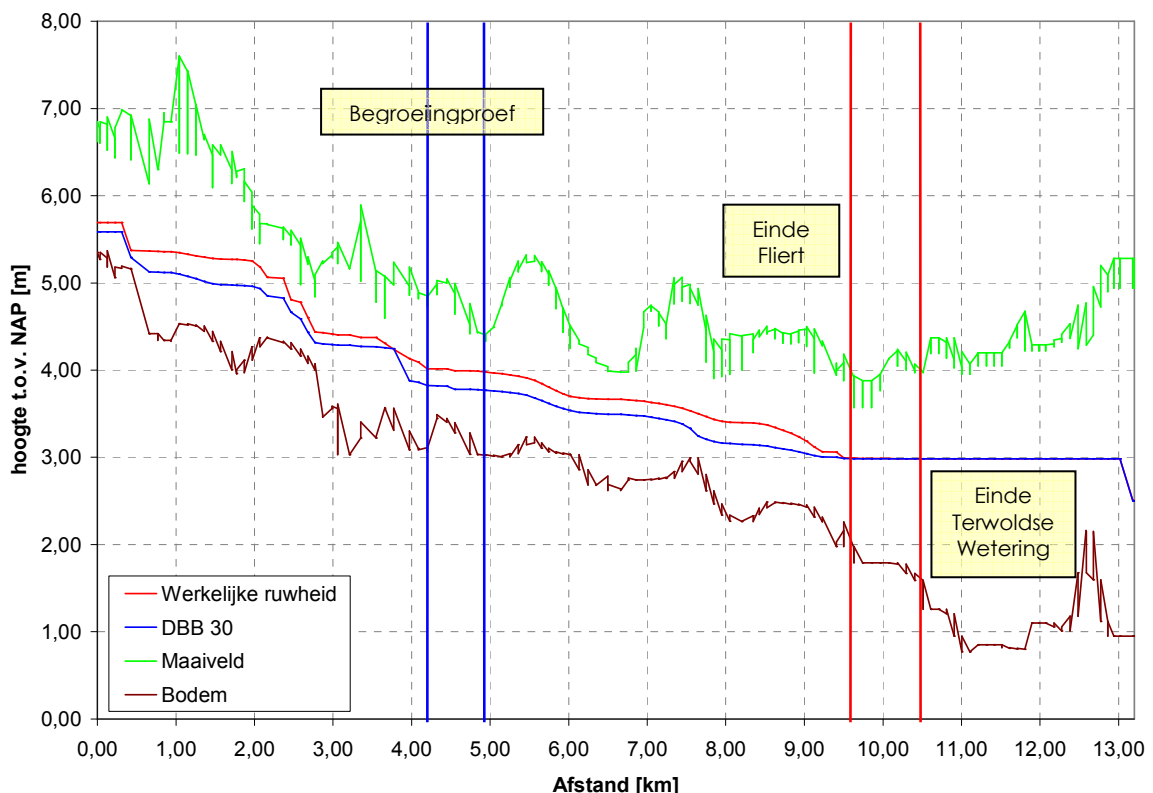
Tabel 5.1: Ruwheid gekoppeld aan maaifrequentie.

Met dit de werkelijkheid benaderende ruwheidscenario is eerst een berekening gedaan met een bui die eens in de 10 jaar voorkomt, de $T = 10$ bui, zodat het effect van deze bui op dit ruwheidscenario inzichtelijk gemaakt kan worden. Hoewel dit scenario de werkelijkheid benaderd, wordt in vervolg dit scenario 'Werkelijke ruwheid' genoemd.

5.2 Taakstelling

Aan de hand van het basisscenario is bepaald hoeveel waterstanddaling bewerkstelligd moet worden met de mogelijk te nemen maatregelen. De gewenste waterstanddaling wordt ook wel de taakstelling genoemd.

In eerste instantie is geprobeerd aan de hand van het Peilbesluit Terwolde [27] geprobeerd uit te zoeken wat het gewenste peil is in de Fliert, zodat op basis hiervan de taakstelling bepaald kan worden. Echter, de Fliert valt net buiten het gebied waarvoor het Peilbesluit Terwolde geldig is. Op de Fliert is geen enkel peilbesluit van toepassing, omdat het niet mogelijk is om water de Fliert in te pompen. Daarom ligt de Fliert in een streefpeilgebied. Op twee locaties in de Fliert zijn streefpeilen gedefinieerd. Bij de Voordersteeg geldt een streefpeil in de winter van 3,20 m + NAP en in de zomer een streefpeil van 3,70 m + NAP. Waar de spoorlijn Apeldoorn – Deventer de Fliert kruist geldt een streefpeil in de winter van 3,00 m + NAP en in de zomer van 3,50 m + NAP. Dit zijn echter peilen die onder dagelijkse omstandigheden zoveel mogelijk gehaald moeten worden en zijn niet maatgevend bij een $T=10$ bui. Daarom zijn deze streefpeilen niet bruikbaar om te gebruiken voor de taakstelling.



Figuur 5.2: Verhoging van de waterstand wanneer de Fliert niet onderhouden wordt bij een $T = 10$ bui, scenario Werkelijke ruwheid. DBB30 is het referentie scenario waarin de watergangen goed onderhouden worden. De taakstelling is het verschil tussen deze twee scenario's.

Een andere mogelijkheid zou zijn om de taakstelling te bepalen aan de hand van droogleggingnormen. Vanuit hoofdstuk 2 is bekend dat de ondergrond van de gronden rondom de Fliert bestaat uit zand en klei. Voor grasland met als ondergrond klein en zand bedragen de droogleggingnormen respectievelijk 0,90 m en 0,85 m onder maaiveld [25]. Hetzelfde geldt echter voor de droogleggingnormen als voor de streefpeilen: ze moeten alleen gehaald worden onder dagelijkse omstandigheden. Ook de droogleggingnormen zijn dus niet bruikbaar om de taakstelling te baseren.

De bovengenoemde mogelijkheden om de taakstelling te bepalen zijn niet toepasbaar. Daarom wordt aangenomen dat de huidige dimensionering van de Fliert in combinatie met goed onderhouden watergangen, dus $\gamma = 30 \text{ s}^{-1}$, tegemoet komt aan de bovengenoemde normen bij een $T = 10$ bui. Ook wordt aangenomen dat bij de huidige dimensionering en onderhoud de NBW norm wordt gehaald dat bij grasland maximaal 5% van het maaiveld mag inunderen bij een $T = 10$ bui [22]. Zodoende wordt gesteld dat het waterpeil in de Fliert niet hoger mag zijn dan waterpeil in het scenario waarin de watergangen goed onderhouden zijn.

Het basisscenario waarbij op basis van de maaifrequentie de werkelijk optredende ruwheid wanneer niet wordt gemaaid getracht is te naderen is vergeleken met het goed onderhouden scenario. In figuur 5.2 is te zien dat het waterpeil van het werkelijke ruwheid scenario gemiddeld 20 cm hoger is dan het goed onderhouden scenario, DBB30. Het verschil tussen beide scenario's is de taakstelling die gehaald moet worden. Het waterpeil van het werkelijke ruwheid scenario moet dus op het niveau van het goed onderhouden scenario komen.

5.3 Duikers

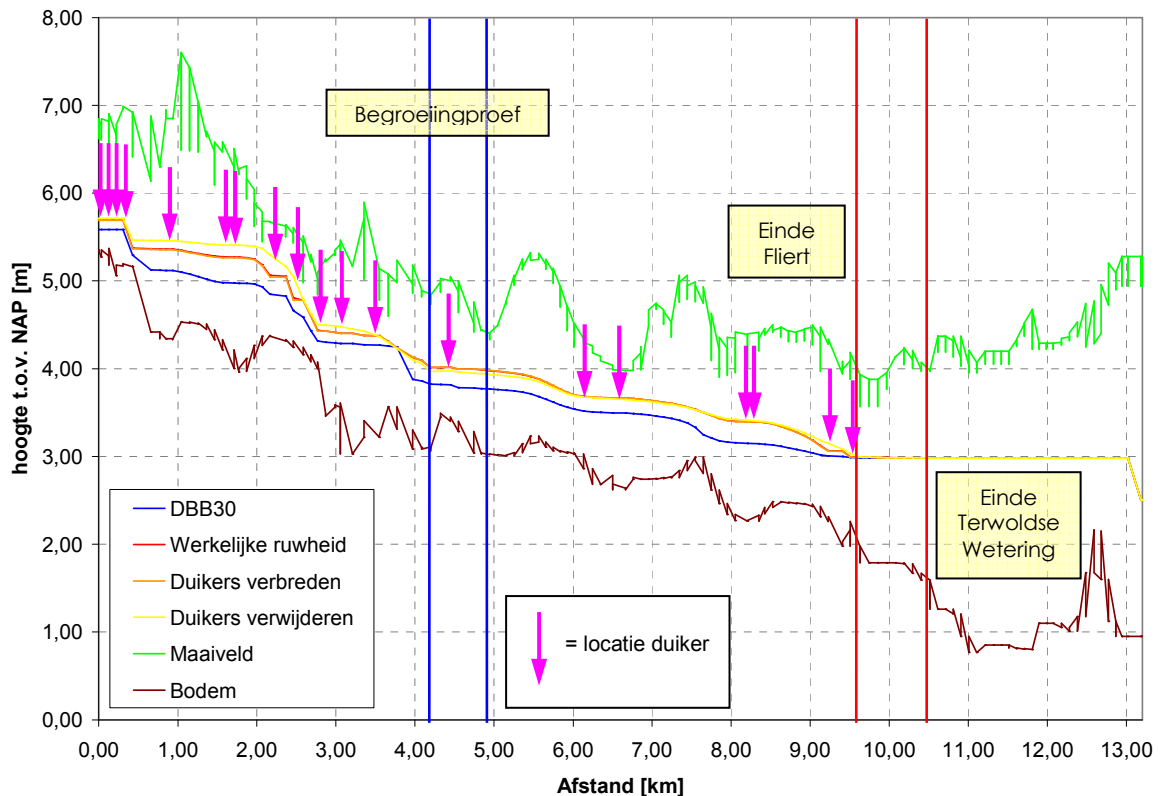
Een eerste mogelijkheid om de waterstand te verlagen is door de duikers aan te passen in de Fliert. Deze oplossingsmogelijkheid wordt ook aangedragen vanuit de gevoeligheidsanalyse, zie het einde van paragraaf 4.6.1. Duikers zorgen immers voor een vernauwing van de watergang en daarmee voor mogelijke opstuwung van water bovenstrooms van de duikers.

5.3.1 Duikers vergroten

In eerste instantie is gekozen om de duikers te vergroten. De grootte van de duikers in de Fliert varieert van een diameter van 0,3 m in het bovenstrooms gedeelte van de Fliert tot een diameter van 1,5 m in het benedenstrooms gedeelte. Rechthoekige duikers komen lokaal voor met een breedte van 2 m en hoogte van 1 m. Deze rechthoekige duikers komen bijvoorbeeld voor waar de Fliert de snelweg onderdoor gaat.

Alle duikers in het Fliert model zijn eerst anderhalf maal vergroot. Na deze berekening bleek echter dat de duikers vergroten totaal geen effect heeft. Om te bepalen of het vergroten van duikers enig effect heeft, zijn vervolgens alle duikers in het Fliert model vergroot tot rechthoekige duikers met afmetingen van 3,80 m breed en 2,50 m hoog. Voor deze afmetingen is gekozen, omdat dit formaat duikers zeker niet tot beperkingen in doorstroom capaciteit zullen leiden.

Het vergroten van de duikers tot deze bijzonder grote afmetingen heeft echter ook nauwelijks effect op de waterstand, zie figuur 5.3. In figuur 5.3 is te zien dat



Figuur 5.3: Waterstandeffect van het verbreden en verwijderen van duikers in de Fliet.

wanneer de duikers enorm worden verbreed, de waterstand op een minimaal aantal locaties in de Fliet slechts enkele centimeters daalt. De paarse pijlen geven de locaties van de duikers weer in dit figuur. Deze grafieken zijn ook weergegeven in bijlage IV. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het aanpassen van de duikers geen goede oplossingsmogelijkheid is om de taakstelling teniet te doen. Blijkbaar zijn de duikers groot genoeg om het water adequaat te kunnen afvoeren. De stuwkrommes die lijken te ontstaan in figuur 4.7 en 4.9 van de gevoeligheidsanalyse worden dus niet veroorzaakt door de duikers. Dit is ook te zien in figuur 5.3, waar de stuwkrommes nog duidelijk zichtbaar zijn. De oorzaak van deze stuwkrommes moet gezocht worden in andere oorzaken, bijvoorbeeld de geometrie van de watergang.

5.3.2 Duikers verwijderen

Om zeker te zijn dat de duikers echt geen effect hebben op het verhogen van de waterstand is een berekening gedaan waarbij alle duikers uit de schematisatie van de Fliet zijn gehaald.

In figuur 5.3 is de curve van de waterstand te zien behorende bij het scenario waarin alle duikers verwijderd zijn. Wat direct opvalt aan deze curve, is dat de waterstand op sommige locaties stijgt ten opzichte van de scenario's waarin alle duikers nog aanwezig zijn. In het bovenstrooms gelegen traject van de Fliet stijgt de waterstand lokaal zelfs tot 24 cm. Op één traject, ter hoogte van de begroeiingsproef, is de waterstand wel lager dan de scenario's waarin de duikers nog wel aanwezig zijn.

Dat de waterstand op sommige locaties hoger is bij het scenario waarin de duikers zijn verwijderd ten opzichte van de scenario's waarin de duikers nog wel aanwezig zijn, wordt veroorzaakt door de ruwheid. De duikers zorgen weliswaar voor

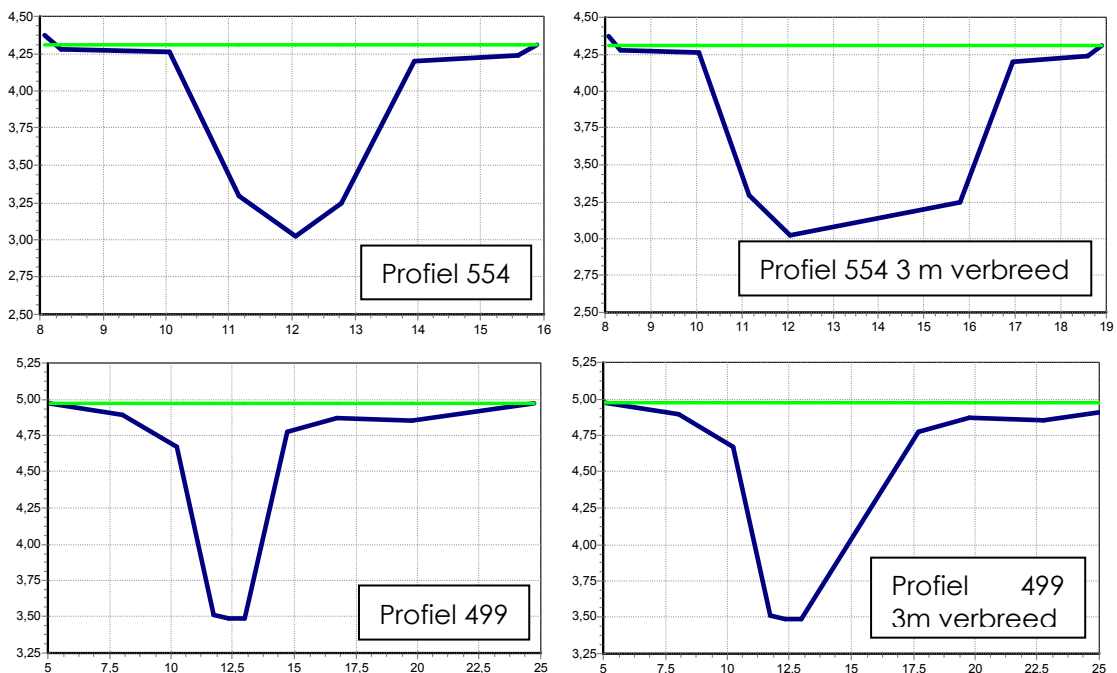
een vernauwing van de watergang, maar de ruwheid in de duikers is vele malen lager dan de ruwheid van de watergang en aangezien net geconcludeerd is dat de duikers de watergangen amper vernauwen, kan gesteld worden dat de duikers elementen in de watergang zijn die over een paar meter aanzienlijk gladder zijn dan de watergang zelf. Als deze elementen worden verwijderd, komt de ruwere watergang daarvoor in de plaats, met als gevolg dat de waterstand stijgt. Dat de waterstand ter hoogte van de begroeiingproef lager is bij het scenario waarin de duikers verwijderd zijn dan de scenario's waarin de duikers nog wel aanwezig zijn, heeft te maken met het vasthouden van water bovenstrooms door de daar toegenomen ruwheid.

5.4 Watergangen verbreden

Een andere mogelijkheid om het overtollige water op te vangen is het verruimen van de watergang. Verdiepen is geen optie, aangezien verdieping leidt tot een dieper drainage effect van de sloten. Om verdroging van het gebied in drogere perioden tegen te gaan is het daarom niet raadzaam om de watergangen te verdiepen. Daarom worden de watergangen verbreed. Op deze manier wordt meer berging gecreëerd voor het overtollige water in de watergang. Over de gehele breedte blijft tijdens de verbreding de ruwheid gelijk.

5.4.1 Uniform verbreden

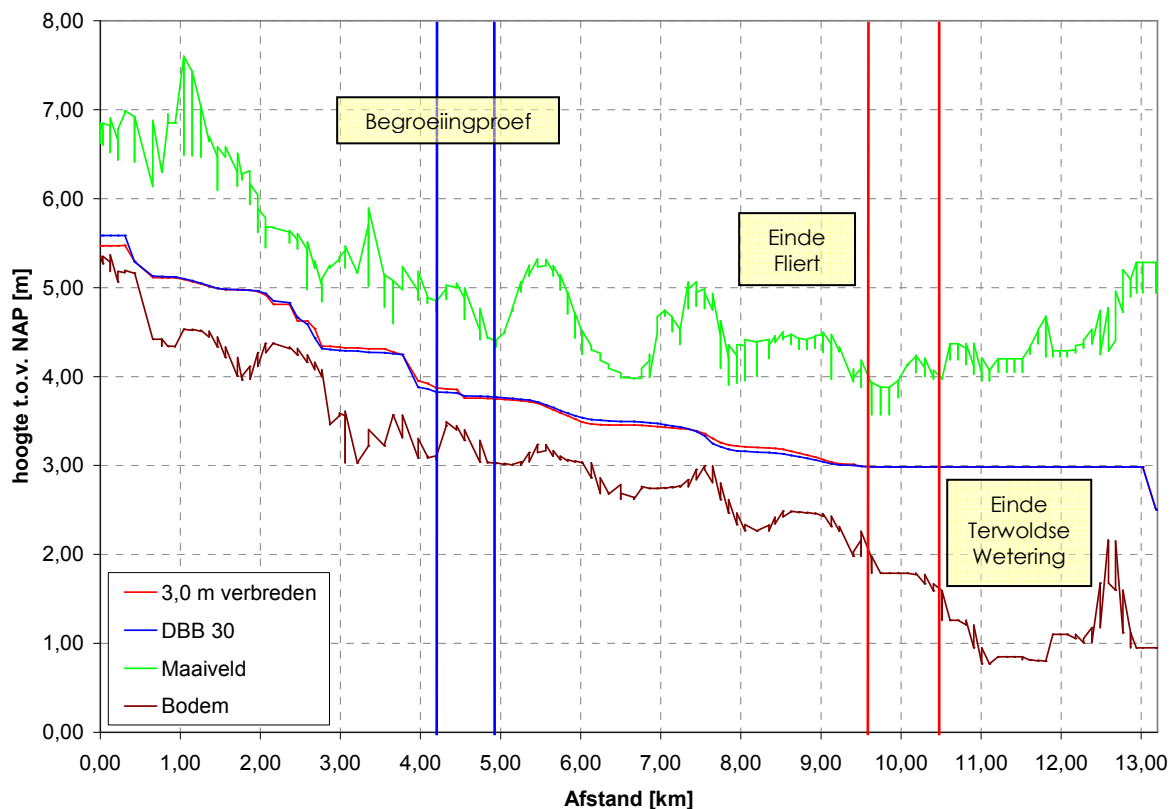
Om te bepalen hoeveel de Fliert verbreed moet worden om de waterstandstijging als gevolg van de toegenomen ruwheid teniet te doen, zijn berekeningen gedaan waarbij de rechteroever van de Fliert met stappen van een halve meter landinwaarts wordt verlegd. De Fliert wordt op deze wijze steeds in zijn geheel uniform met een halve meter verbreed. Deze kleine stapgrootte is gekozen omdat onduidelijk is hoe groot het effect zal zijn van verbreding van de Fliert. Door deze stapgrootte te kiezen, wordt dit effect inzichtelijk gemaakt.



Figuur 5.4: Voorbeelden van 2 verbrede profielen met de toegepaste methode.

Alle profieldefinities in Sobek worden weggeschreven in een profile.def bestand. Dit bestand kan geopend worden in Microsoft – Excel, zodat hiermee bewerkingen gedaan kunnen worden. Het verbreden van de profielen is gedaan door in Excel een formule te maken die op zoek gaat naar het laagste punt van het profiel. Het punt daarop volgend wordt een aantal opgegeven meters naar rechts gelegd, zodat het profiel verbreed wordt. Hoe de profielen worden verbreed, wordt hierdoor afhankelijk hoe ver de verschillende punten waaruit het profiel is opgebouwd van elkaar liggen. Ter verduidelijking zijn in figuur 5.4 twee voorbeelden te zien van twee verschillende profielen in het model welke met de bovenstaande methode zijn verbreed.

In bijlage V zijn de berekeningsresultaten te vinden van de berekeningen waarbij de Fliert is verbreed tot 3,0 m. In figuur 5.5 is de grafiek te zien van de berekening waarbij de gehele Fliert is verbreed met 3,0 m. In die figuur is te zien dat de waterstand bij een verbreding van de Fliert met 3,0 m goed overeenkomt met het scenario waarin de Fliert niet verbreed is, maar wel goed onderhouden is. Om de waterstandcurven in figuur 5.5 van beide scenario's nog beter op elkaar te krijgen, wordt op basis van het scenario waarin de Fliert met 3,0 m is verbreed, op sommige locaties de Fliert iets meer en op sommige locaties iets minder verbreed. Dit proces wordt 'finetuning' genoemd.



Figuur 5.5: Waterstand in de Fliert bij een uniforme verbreding van 3,0 m met $T = 10$ bui. DBB30 staat voor het scenario met goed onderhouden watergangen.

5.4.2 Finetuning

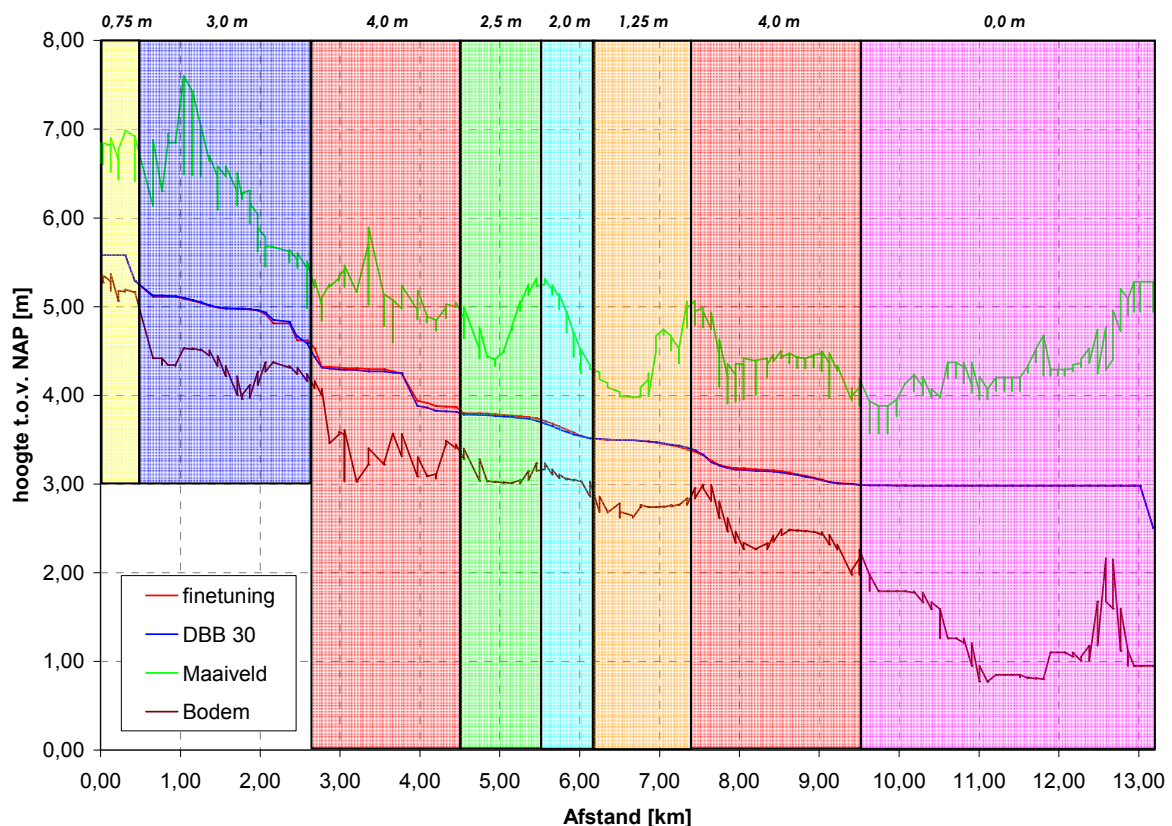
Op basis van het scenario waarin de Fliert met 3,0 m is verbreed, is per locatie in de Fliert bekeken of extra verbreding, of minder verbreding nodig is.

In figuur 5.6 zijn de waterstandcurven van beide scenario's weergegeven. In dit figuur is ook de verbreding weergegeven van de Fliert. Boven de gekleurde blokken staat de mate van verbreding. In tabel 5.2 is de verbreding van de Fliert na de finetuning per kilometer weergegeven. Op de volgende pagina is een overzichtkaart van de Fliert weergegeven, figuur 5.8. waarop de verbreding per traject is weergegeven. De kleuren die gebruikt zijn om de verbreding van de Fliert aan te geven op deze kaart komen overeen met de kleuren die gebruikt zijn in figuur 5.6.

Locatie [km]	Verbreding [m]
0 – 0,428	0,75
0,428 – 2,769	3,00
2,769 – 4,549	4,00
4,549 – 5,461	2,50
5,461 – 6,131	2,00
6,131 – 7,342	1,25
7,342 – 9,503 (einde Fliert)	4,00

Tabel 5.2: Verbreding van de Fliert per locatie.

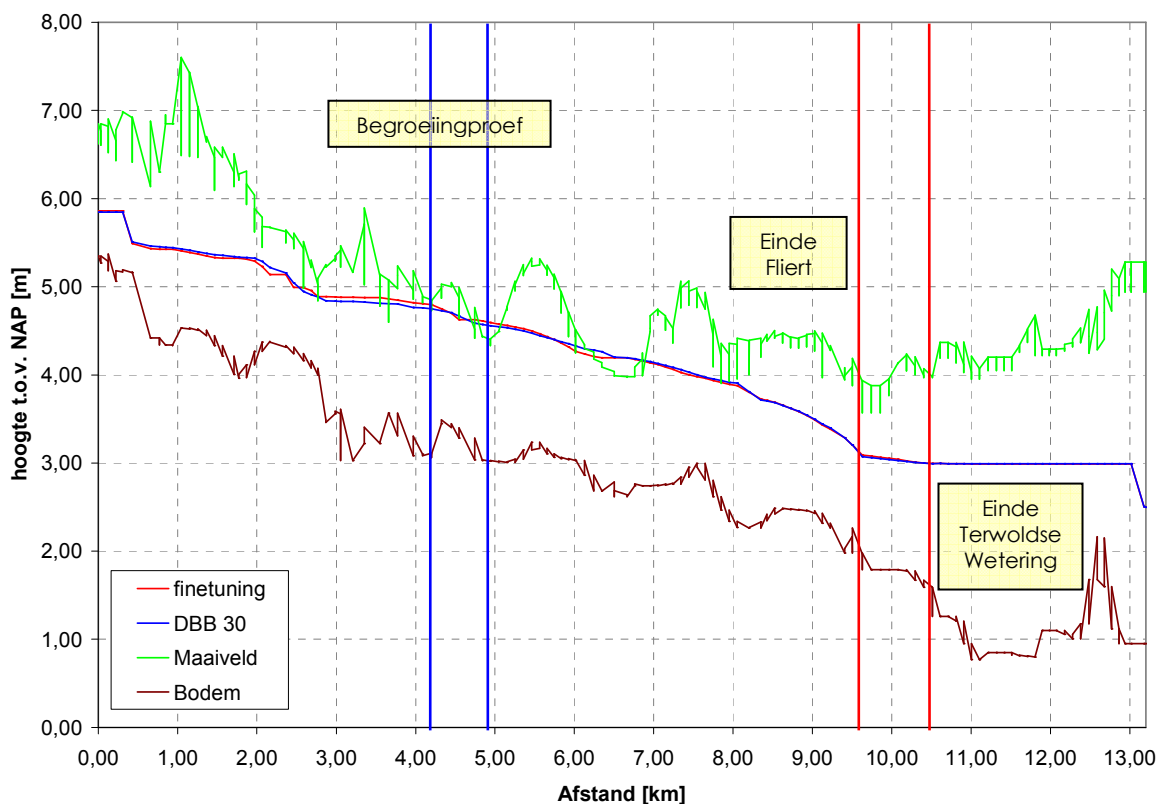
De berekeningen zijn tot dusverre alleen uitgevoerd voor de bui die een herhalingstijd heeft van 10 jaar, de $T = 10$ bui. Hierop moet het waterschap zijn watergangen dimensioneren [22]. Toch is het interessant om te onderzoeken of de maatregelen die voldoen voor de $T = 10$ bui ook voldoende zijn voor andere buitypen. Hierbij wordt gekeken of de verbreding van de Fliert de waterstand bij andere buitypen ook op het niveau brengt van het scenario waarbij de Fliert niet



Figuur 5.6: Waterstand in de Fliert na finetuning met $T = 10$ bui. DBB30 staat voor het scenario met goed onderhouden watergangen. De gekleurde blokken in de grafiek geven de verbreding van de Fliert weer na finetuning.

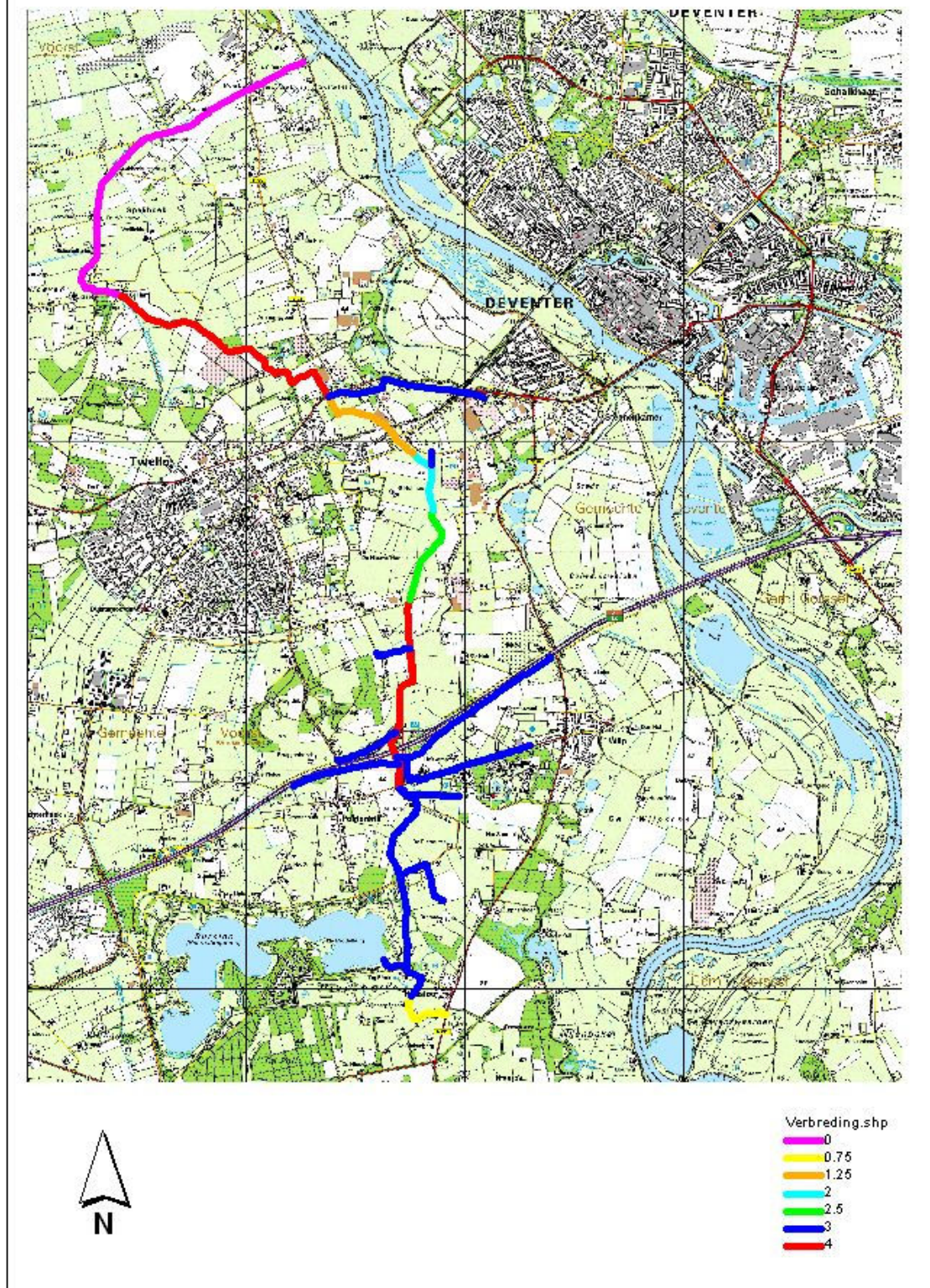
verbreed is, maar wel goed onderhouden wordt. De verbrede Fliert is door gerekend met het scenario dat niet gemaaid wordt en dat de Eerbeek 2005 bui valt. In figuur 5.7 zijn hiervan de resultaten te zien. In dit figuur is duidelijk te zien dat de verbreding van de Fliert ervoor zorgt dat de waterstand van het scenario waarin de watergangen niet onderhouden worden op hetzelfde niveau komt als het scenario waarin de Fliert niet verbreed is en de watergangen wel goed onderhouden worden.

Eenzelfde berekening is gedaan voor de dagelijkse omstandigheden. Dagelijkse omstandigheden worden gerepresenteerd door een bui met een neerslag van 2 mm per dag. Hoewel in de gevoeligheidsanalyse is geconcludeerd dat deze buivorm totaal geen gevolgen heeft voor wateroverlast, is het toch interessant om naar deze bui te kijken in verband met verdroging. Het is belangrijk dat door de verbreding van de Fliert de waterstand in de Fliert niet verder zakt dan in het scenario waarin de Fliert niet verbreed is, maar wel goed onderhouden is. De waterstand mag niet verder zakken, in verband met verdroging van het gebied. Als de waterstand verder zal zakken, of als de watergangen zelfs droog komen te staan als gevolg van de verbreding van de Fliert, heeft dit een slechte invloed op de omliggende graslanden. Deze zullen dan onder dagelijkse omstandigheden verdrogen als direct gevolg van de verbreding van de Fliert. In figuur 5.9 zijn de berekeningsresultaten weergegeven. In de grafiek is te zien dat de curven van de scenario's met de 2 mm per dag bui vrijwel exact met elkaar overeenkomen. Er is geen sprake van dat door de verbreding van de Fliert de waterstand zal dalen onder dagelijkse omstandigheden. Door de verbreding ontstaan dus geen verdrogingsproblemen.

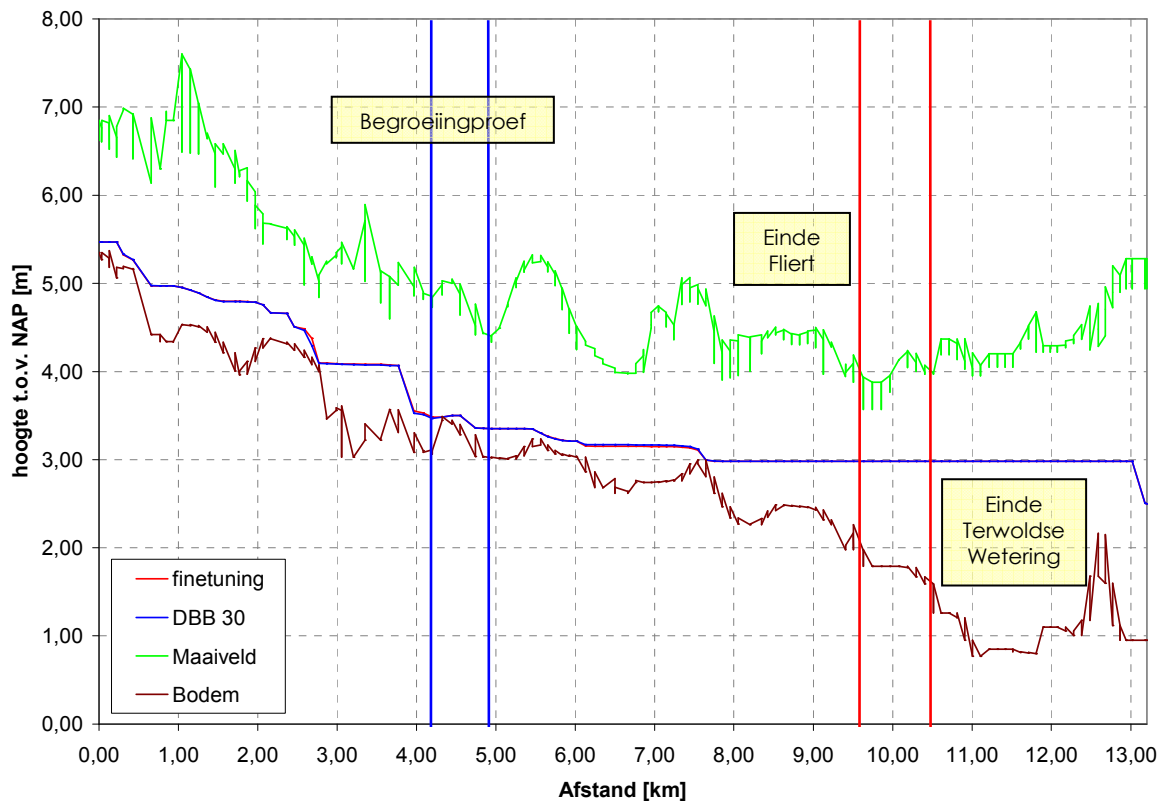


Figuur 5.7: Waterstand in de verbrede Fliert met Eerbeek 2005 bui. DBB30 staat voor het scenario met goed onderhouden watergangen zonder verbreding met Eerbeek 2005 bui.

Verbreiding Fliet



Figuur 5.8: Overzichtskaart waarop de verbreiding van de Fliet per traject is weergegeven. Het kleurgebruik van deze kaart komt overeen met het kleurgebruik van figuur 5.5.



Figuur 5.9: Waterstand in de verbrede Fliet met 2 mm per dag bui. DBB30 staat voor het scenario met goed onderhouden watergangen zonder verbreding met 2 mm per dag bui.

Uit de berekeningen met de constante bui Eerbeek 2005 en de 2 mm per dag bui, kan geconcludeerd worden dat door de verbreding van de Fliet bij elke buivorm de waterstand op nagenoeg hetzelfde niveau wordt gebracht als wanneer de Fliet niet verbreed, maar wel goed onderhouden is. Dit is exact het effect wat beoogd is met de verbreding.

Het verbreden van de Fliet heeft een bijkomend voordeel. Het te verbreden gedeelte kan ingericht worden als een natuurvriendelijke oever, mits het talud lokaal flauw genoeg is. Op deze wijze wordt berging gecreëerd voor het overtollige water en wordt tevens de natuur bediend. Op de foto van figuur 5.10 is te zien hoe een dergelijke natuurvriendelijke oever ingericht kan worden. Nadeel van het verbreden van de Fliet is dat grote stukken land aangekocht moeten worden om de verbreding te realiseren. De vraag is in hoeverre de landeigenaren behoefte hebben om dat land te verkopen.



Figuur 5.10: Natuurvriendelijk ingerichte oever voor waterberging naast een watergang.

5.5 Overige mogelijkheden

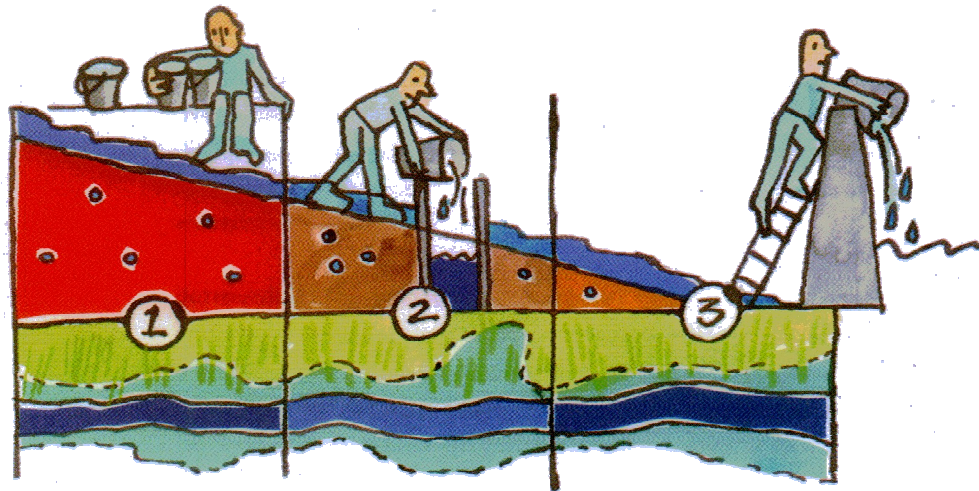
Het verbreden van de Fliert is niet de enige maatregel die genomen kan worden om de taakstelling te halen. Andere maatregelen kunnen ook genomen worden om dit overtollige water op te vangen. Het creëren van berging door middel van retentiegebieden voor het overtollige water is één van deze mogelijkheden. Door bepaalde graslanden in te richten als retentiegebied, kan ten tijde van hoog water, het overtollige water 'geparkeerd' worden, zie figuur 5.11. Door middel van een overlaatconstructie kan bepaald worden bij welk waterpeil water in een dergelijk retentiegebied wordt toegelaten. Zodoende kan een retentiegebied volledig gestuurd worden. Naast de Fliert zou een voldoende aantal graslanden aangewezen en ingericht kunnen worden als retentiegebieden. Op deze wijze kan de taakstelling gehaald worden.



Figuur 5.11: Berging voor overtollig water. De retentie wordt afgesloten door middel van een betonnen overlaat constructie.

Belangrijk bij het zoeken naar oplossingen om hoge waterpeilen teniet te doen, is dat rekening wordt gehouden met het principe 'bergen, vasthouden, afvoeren'. Dit wordt ook wel de drietrapsstrategie van de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw [23] genoemd, zie figuur 5.12. Deze drietrapsstrategie houdt in dat overtollig water in eerste instantie zoveel mogelijk bovenstrooms vastgehouden moet worden in de bodem en oppervlaktewater. Het voordeel van het overtollige water vasthouden in eigen gebied, is dat op deze manier ook de verdroging van natuurterreinen bestreden kan worden en in perioden van droogte watertekorten aangevuld kunnen worden met gebiedseigen water. De behoefte om gebiedsvreemd water in te laten neemt daardoor af, wat op sommige locaties de waterkwaliteit ten goede komt. Immers, de waterkwaliteit van gebiedsvreemd kan beduidend minder zijn dan het gebiedseigen water. Dit is echter niet altijd het geval. Nadeel van deze aanpak is dat sommige gebieden vaker met natte omstandigheden te maken zullen krijgen. Consequentie daarvan is dat voor sommige gebieden het grondgebruik aangepast zal moeten worden.

Wanneer nodig kan in tweede instantie het water tijdelijk worden geborgen in retentiegebieden langs de waterlopen waarvoor dan ruimte gecreëerd moet worden, zie figuur 5.11. Ten slotte, als vasthouden en bergen onvoldoende oplevert, het overtollige water afvoeren of als dat niet kan, het water bij zeer extreme omstandigheden gecontroleerd opvangen in daarvoor aangewezen gebieden. Deze gebieden zijn niet daarvoor ingerichte retentiegebieden, maar worden ook wel overloopgebieden genoemd. Het verschil is dat retentiegebieden volledig gestuurd zijn en overloopgebieden onder extreme, bovenmaatgevende omstandigheden onder water worden gezet. Vaak zijn deze gebieden al wel aangewezen, maar worden ze pas ingezet wanneer veel wateroverlast dreigt te ontstaan.



Figuur 5.12: 1. Vasthouden, 2. Bergen, 3. Afvoeren. [23]

6

Conclusies & Aanbevelingen

6.1 *Conclusies*

De vraag waar een antwoord op gevonden moet worden tijdens dit onderzoek, is of het vanuit het oogpunt van waterkwantiteit verantwoord is de sloten in de lager gelegen poldergebieden van het beheersgebied van Waterschap Veluwe niet te maaien, als gevolg van de Flora- en Faunawet. Deze vraag van het onderzoek kan kort worden samengevat in de centrale vraag: 'Maaien of niet?'

Het laten groeien van de vegetatie in de watergangen, heeft een verhoogde ruwheid van de watergangen tot gevolg. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de toenemende ruwheid in de watergangen als gevolg van de groeiende vegetatie wel degelijk een negatieve invloed heeft op de waterstand in de watergangen. Uit berekeningen uitgevoerd tijdens de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de watergangen in het laaggelegen poldergebied van het beheersgebied van Waterschap Veluwe voornamelijk gevoelig zijn voor piekbuien. Het waterstandverschil tussen het goed onderhouden scenario met schone watergangen en het slecht onderhouden scenario waarin de watergangen volledig begroeid zijn in combinatie met een regenbui met een herhalingstijd van 10 jaar, bedraagt gemiddeld 28 cm, zie figuur 4.17. Dit gemiddelde waterstandverschil tussen deze ruwheidscenario's bedraagt bij een hevige bui die gevallen is in Eerbeek in 2005 gemiddeld slechts 15 cm. Hoewel de Eerbeek 2005 bui ook al bij het scenario waarin de watergangen goed onderhouden zijn wateroverlast veroorzaakt, kan gesteld worden dat de watergangen in het laaggelegen poldergebied van het beheersgebied van Waterschap Veluwe het meest gevoelig zijn voor piekbuien, aangezien het waterstandverschil per verruwing van de watergangen groter is.

Aangezien de watergangen het meest gevoelig zijn voor piekbuien en volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water [22] de watergangen ontworpen moeten worden op een regenbui met herhalingstijd van 10 jaar, is op basis van deze bui naar mogelijke oplossingen gezocht. De mogelijke oplossingen moeten de waterpeil stijgingen in de watergangen als gevolg van het niet maaien van deze watergangen teniet doen. Op basis van de huidige maai frequentie van de Fliert is bepaald hoe groot de ruwheid is, als de watergangen niet gemaaid worden tot 15 juli. Uit deze berekening met de werkelijkheid benaderende ruwheid, blijkt dat de waterstand aanzienlijk zal stijgen wanneer geen maatregelen worden genomen. Deze waterstandstijging is de taakstelling die verholpen moet worden en bedraagt gemiddeld ongeveer 20 cm.

Na de gevoeligheidsanalyse bestond de verwachting dat de hoge waterstanden mogelijk veroorzaakt worden door de aanwezige duikers in de Fliert. Na een aantal berekeningen uitgevoerd te hebben waarbij de duikers verscheidene malen breder zijn gemaakt tot uiteindelijk 3,80 m breed en 2,50 m hoog, blijkt dat de invloed van de duikers verwaarloosbaar klein is. Het verwijderen van alle duikers uit de Fliert heeft nauwelijks invloed en heeft zelfs als gevolg dat op sommige locaties een waterstandverhoging optreedt. Dit wordt veroorzaakt doordat een duiker vaak van beton gemaakt is. Beton heeft een lagere ruwheid

dan de volledig begroeide watergang die voor de te verwijderen duiker in de plaats komt. Uit deze verhoging van de waterstand wanneer de duikers verwijderd worden, blijkt dat het noodzakelijk is dat de duikers wel schoon gehouden worden.

Het verbreden van de Fliert levert wel de beoogde waterstandverlaging op, waardoor het waterpeil in de Fliert met volledige begroeiing op hetzelfde niveau ligt als in het scenario waarin de Fliert niet verbreed is, maar wel goed onderhouden is. Figuur 5.7 is een overzichtskaart van de Fliert waarin met kleur is aangegeven op welke locatie de Fliert hoever moet worden verbreed, om het waterpeil op het gewenste niveau te krijgen. Deze verbrede Fliert met volledige begroeiing is ook doorgerekend met de Eerbeek 2005 bui en met een 2 mm per dag bui. Het blijkt dat door de verbreding het waterpeil in de watergangen bij beide buitypen precies naar het niveau zakt als bij het goed onderhouden scenario. Dit is exact het effect wat beoogd is met de verbreding. Buiten deze voorgestelde verbreding om, bestaan ook andere mogelijkheden om berging te creëren. Deze mogelijkheden moeten gezocht worden in de drietrapsstrategie 'vasthouden, bergen, afvoeren'. Voor het realiseren van berging kunnen bijvoorbeeld retentiegebieden worden ingericht.

Rest het antwoord op de vraag: 'Maaien of niet?'. Wanneer besloten wordt om de watergangen niet meer te maaien tot 15 juli, zal berging gecreëerd moeten worden voor het stijgende water als gevolg van de toenemende ruwheid in de watergangen. Deze berging kan gecreëerd worden in de vorm van verbreding van de watergangen. Wanneer besloten wordt om de watergangen te blijven maaien, is het creëren van berging niet noodzakelijk. Dit gaat echter tegen de Flora- en Faunawet in. Er zal dan ontheffing aangevraagd moeten worden bij het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit [26]. Een laatste mogelijkheid is dat de watergangen niet worden gemaaid en ook niet worden verbreed. Het probleem dat dan ontstaat is dat de watergangen niet voldoen aan de norm die is opgelegd vanuit het Nationaal Bestuursakkoord Water [22]. Hierin wordt namelijk gesteld dat de watergangen in grasland ontworpen moeten worden op een regenbui die eens in de 10 jaar voor kan komen, waarbij niet meer dan 5% van het maaiveld mag inunderen.

6.2 ***Aanbevelingen***

Om de watergangen in het laaggelegen poldergebied van het beheersgebied van Waterschap Veluwe te laten voldoen aan de norm, zullen deze watergangen aangepast moeten worden. Dit kan gedaan worden door berging te creëren in of naast de watergang. Naar aanleiding van de conclusies van dit rapport kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Bij naleving van de Flora- en Faunawet, dus niet maaien van de watergangen voor 15 juli, moet berging gecreëerd worden om de waterstand niet verder te laten stijgen dan onder de huidige omstandigheden.
- Deze berging kan gerealiseerd worden door bijvoorbeeld de watergangen te verbreden.
- Verbreding van de watergangen kan wellicht gerealiseerd worden als natuurvriendelijke oever, zodat zowel berging voor het overvloedige water als meer ruimte voor de natuur gerealiseerd wordt.

- Duikers in de watergangen moeten goed schoon worden gehouden om een negatief effect van de duikers op het waterpeil te voorkomen.

Overige aanbevelingen die gedaan kunnen worden als suggestie voor vervolg op dit onderzoek zijn de volgende:

- De voorgestelde aanpassingen aan de Fliert zijn gebaseerd op de aanname dat momenteel de watergangen zo gedimensioneerd zijn, dat ze tegemoet komen aan de geldende normen. Hieruit is een taakstelling vastgesteld, die gehaald moet worden. Mogelijk is deze aanname niet juist en daarmee ook de voorgestelde aanpassingen aan de Fliert. Verwacht wordt dat de voorgestelde aanpassingen wel in dezelfde orde van grootte genomen moeten worden, maar toch is het belangrijk dat verder onderzoek naar de taakstelling ondernomen moet worden.
- Verder onderzoeken wat lokaal in het beheersgebied van Waterschap Veluwe mogelijk is voor berging van het overtollig water vanuit het principe 'vasthouden, bergen afvoeren'.
- Blijvend onderzoek naar de mogelijkheden van het modelleren van de vegetatieruwheid voor gebruik in Sobek.

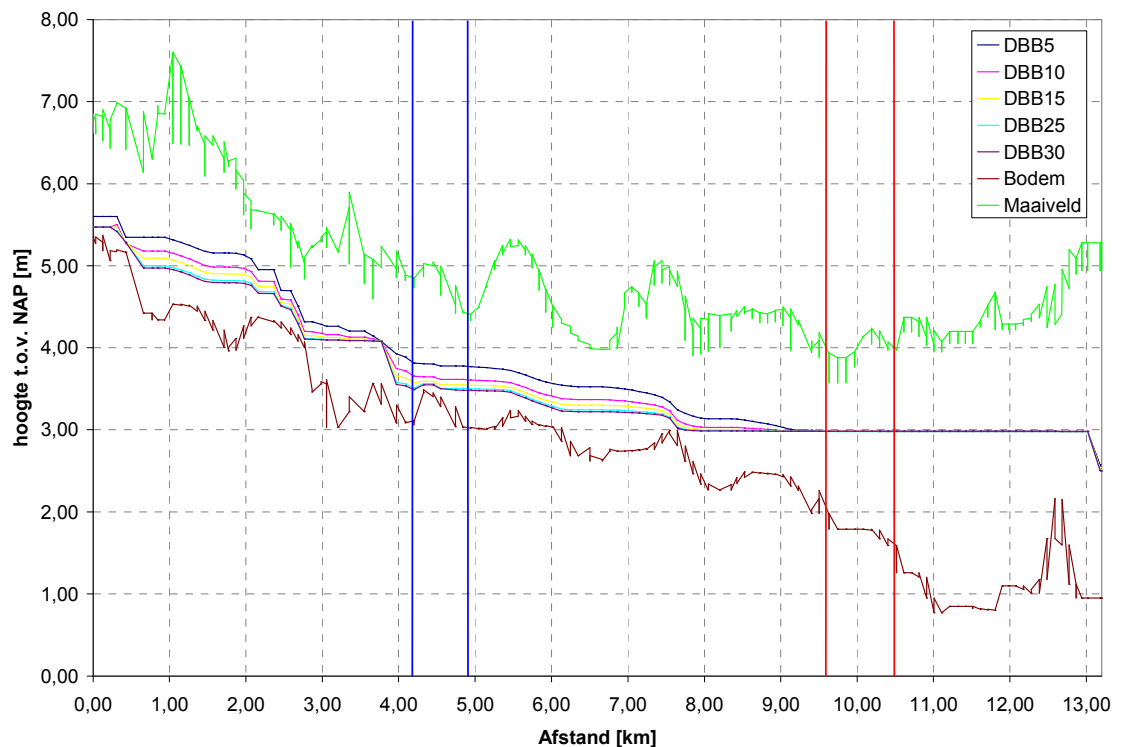
7

Literatuurlijst

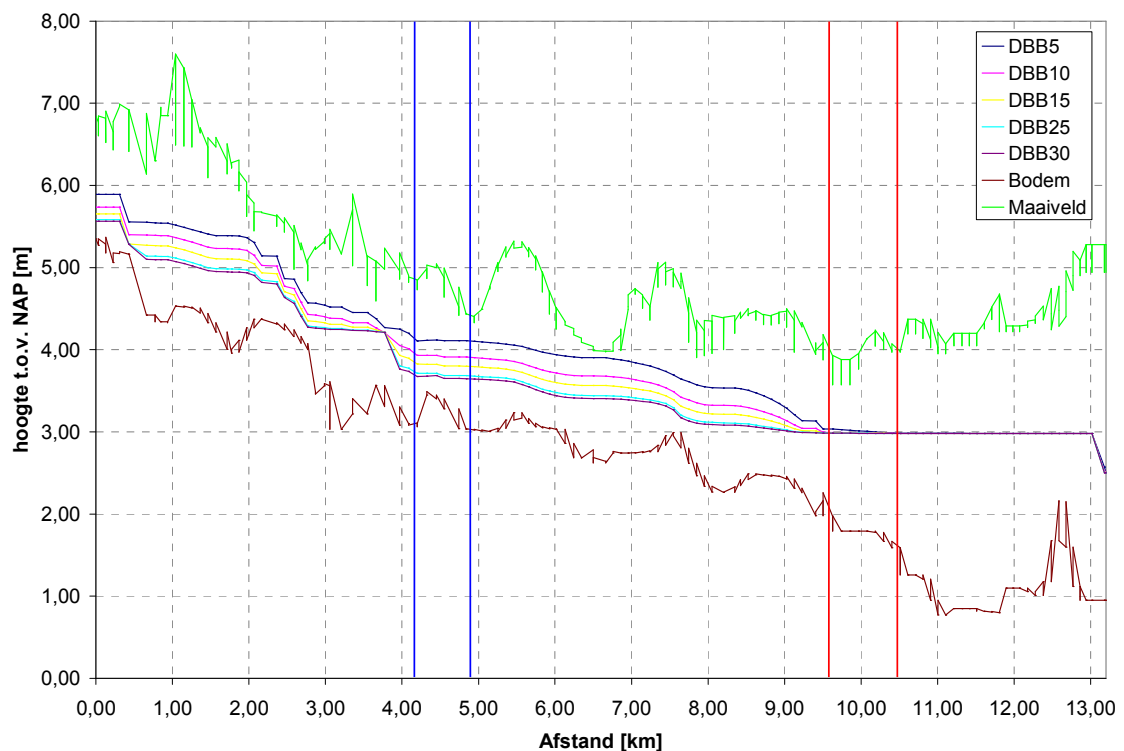
- [1] *Flora- en faunawet*. Den Haag: Ministerie voor Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, 1998.
- [2] *Gedragscode Flora- en Faunawet voor waterschappen, werkdocument*. Utrecht: STOWA, 2005.
- [3] Querner E. *Aquatic weed control within an integrated water management framework*. Wageningen: Landbouwniversiteit, 1993.
- [4] www.knmi.nl Geraadpleegd: maart 2006
- [5] Steur G. G. L., Locher W. P. en De Bakker H. *Bodemkunde veldboekje*. Den Bosch: Malmberg uitgeverij, 1990.
- [6] Green J. C. *Modelling flow resistance in vegetated streams: review and development of new theory*. Hydrological Processes 19: 1245 – 1259, 2005.
- [7] Veldman W.G. *Literatuurstudie 'Maaien of niet?'*. Enschede: Universiteit Twente, 2006.
- [8] www.wikipedia.nl, geraadpleegd: april 2006.
- [9] Ribberink J. S. en Hulscher S.J.H.M. *Ondiepwaterstromingen*. Enschede: Universiteit Twente, Civiele Techniek en management, 2003.
- [10] Manning R. *On the flow of water in open channels and pipes*. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland 20: 161 – 207, 1889.
- [11] Colebrook C. F. *Turbulent flow in pipes*. Institution Journal 11: 133-156, 1939.
- [12] De Bos W. P. en Bijkerk C. *Een nieuw monogram voor het berekenen van waterlopen*. Cultuurtechnisch Tijdschrift, deel 3, nummer 4: 149-155, 1963.
- [13] Griffioen C. J. H. en Pitlo R. H. *Stromingsmodel voor begroeide waterlopen*. Waterschapsbelangen 10: 345 – 348, 1991.
- [14] Van Velzen E. H., Jesse P., Cornelissen P. en Coops H. *Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden, deel 1 en deel 2*. Arnhem: RIZA, 2003.
- [15] Huthoff F., Augustijn D. C. M. en Hulscher S. J. H. M. *Depth-averaged flow in presence of submerged cylindrical elements*. Submitted.

- [16] Baptist M. J., Babovic V., Uthurburu J. R., Keijzer M., Uittenbogaard R. E., Mynett A. en Verwey A. *On inducing equations for vegetation resistance*. Journal of Hydraulic Research, 2006.
- [17] Baptist M. J., Babovic V., Uthurburu J. R., Keijzer M. *Determining Equations for Vegetation Induced Resistance using Genetic Programming*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference '05, 25 – 29 juni 2005, Washington D.C., U.S.A.
- [18] *Sobek Online Help*. Delft, WL | Delft Hydraulics, 2006.
- [19] Visser M. en Elfrink A. *Een bakjesmodel voor het beheergebied*. Apeldoorn: Waterschap Veluwe, afdeling projecten, 2006.
- [20] Smits A., Wijngaard J. B., Versteeg R. P. en Kok M. *Statistiek van extreme neerslag in Nederland*. De Bilt: KNMI en HKV lijn in water in opdracht van STOWA, 2004.
- [21] KNMI *Maandoverzicht neerslag en verdamping in Nederland*. MONV-bulletin, januari 2001 t/m juni 2006.
- [22] *Nationaal Bestuursakkoord Water*. Den Haag, Nederland leeft met water, 2003.
- [23] *Waterbeleid voor de 21^e eeuw. Advies van de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw*. Commissie Waterbeheer 21^e eeuw, 2000.
- [24] Gary E. Freeman, William J. Rahmeyer en Ronald R. Copeland. *Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation*. Washington, D.C: U.S. Army Corps of Engineers, 2000.
- [25] Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum. *Cultuurtechnisch Vademecum*. Utrecht: Cultuurtechnische vereniging, 1988.
- [26] Brochure: *Buiten aan het werk? Houd tijdig rekening met beschermde dieren en planten!* Den Haag: Ministerie van landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2006.
- [27] Peerdeman C.P., Jansen E.J., Jeurink N. *Peilbesluit Terwolde Toelichting*. Deventer: Tauw bv, 2000.

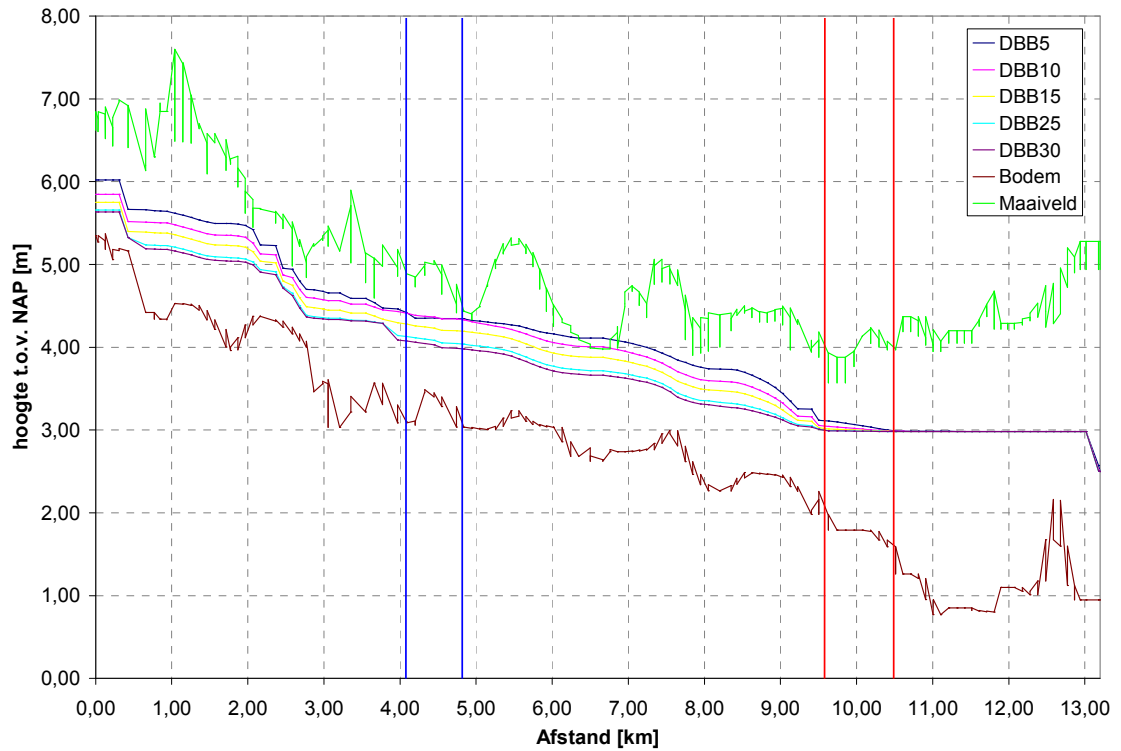
Bijlage I: Maximale waterstanden



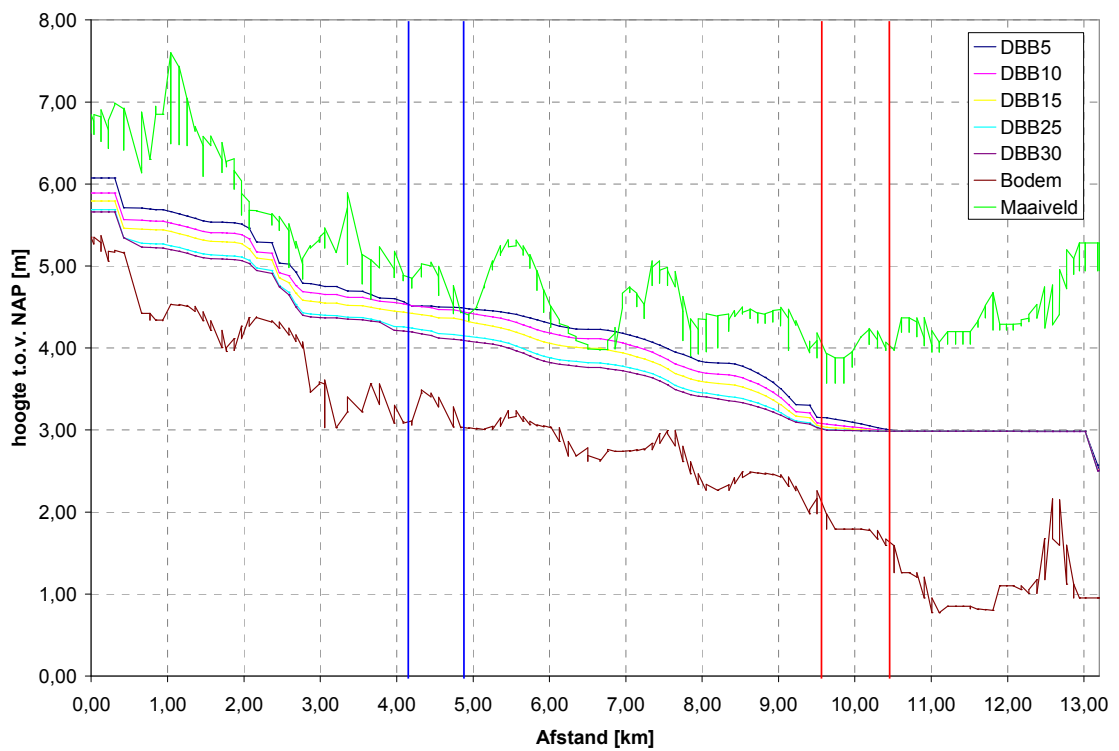
Figuur I-1: Maximale waterstanden Fliert voor verschillende ruwheden bij bui 2 millimeter per dag.



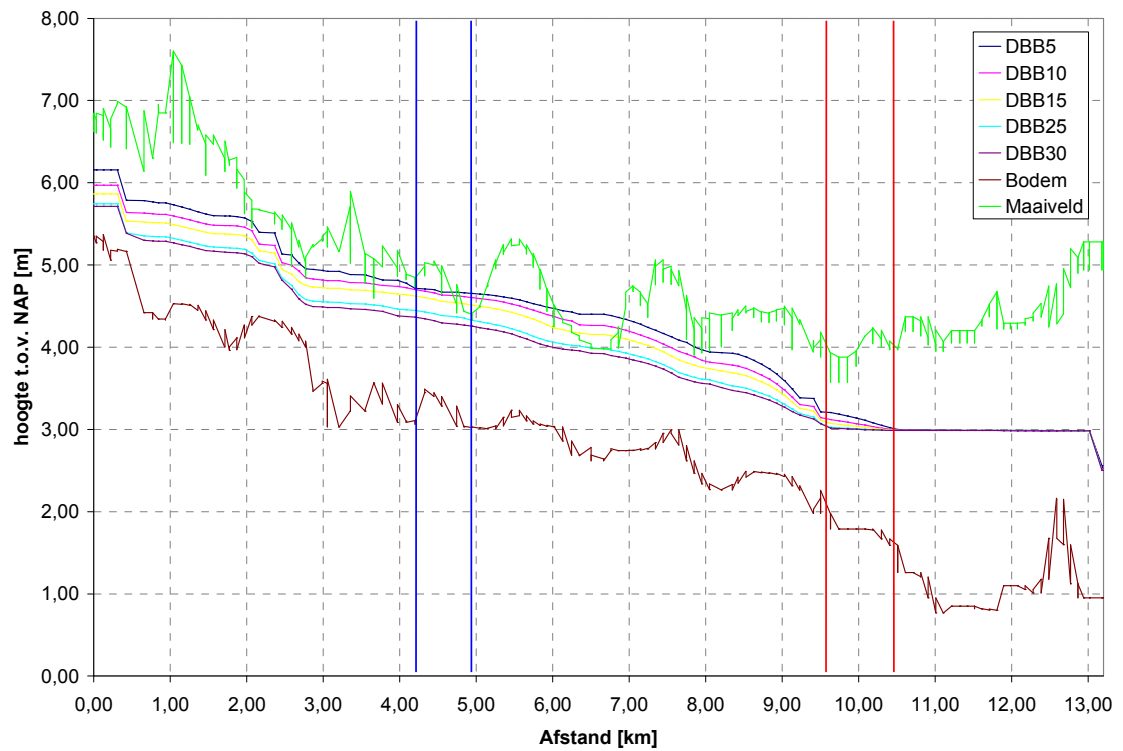
Figuur I-2: Maximale waterstanden Fliert voor verschillende ruwheden bij bui met een herhalingsstijg van 1 jaar, $t = 1$.



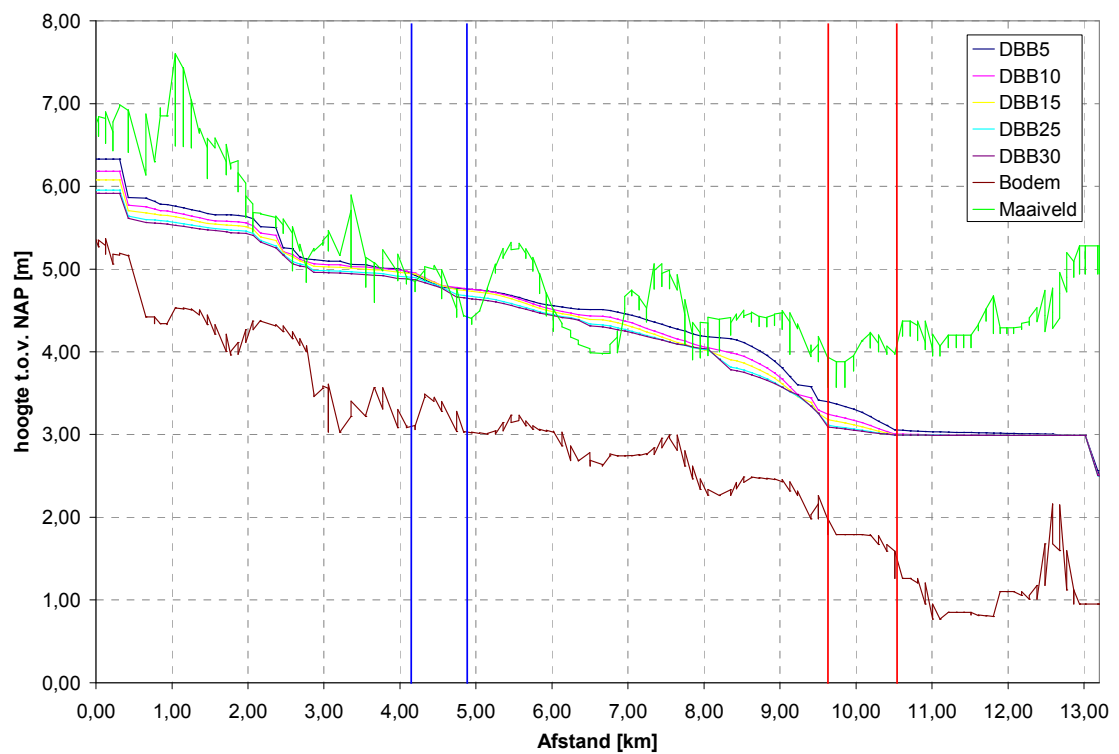
Figuur I-3: Maximale waterstanden Fliert voor verschillende ruwheden bij bui met een herhalingsijd van 10 jaar, $t = 10$.



Figuur I-4: Maximale waterstanden Fliert voor verschillende ruwheden bij bui met een herhalingsijd van 25 jaar, $t = 25$.

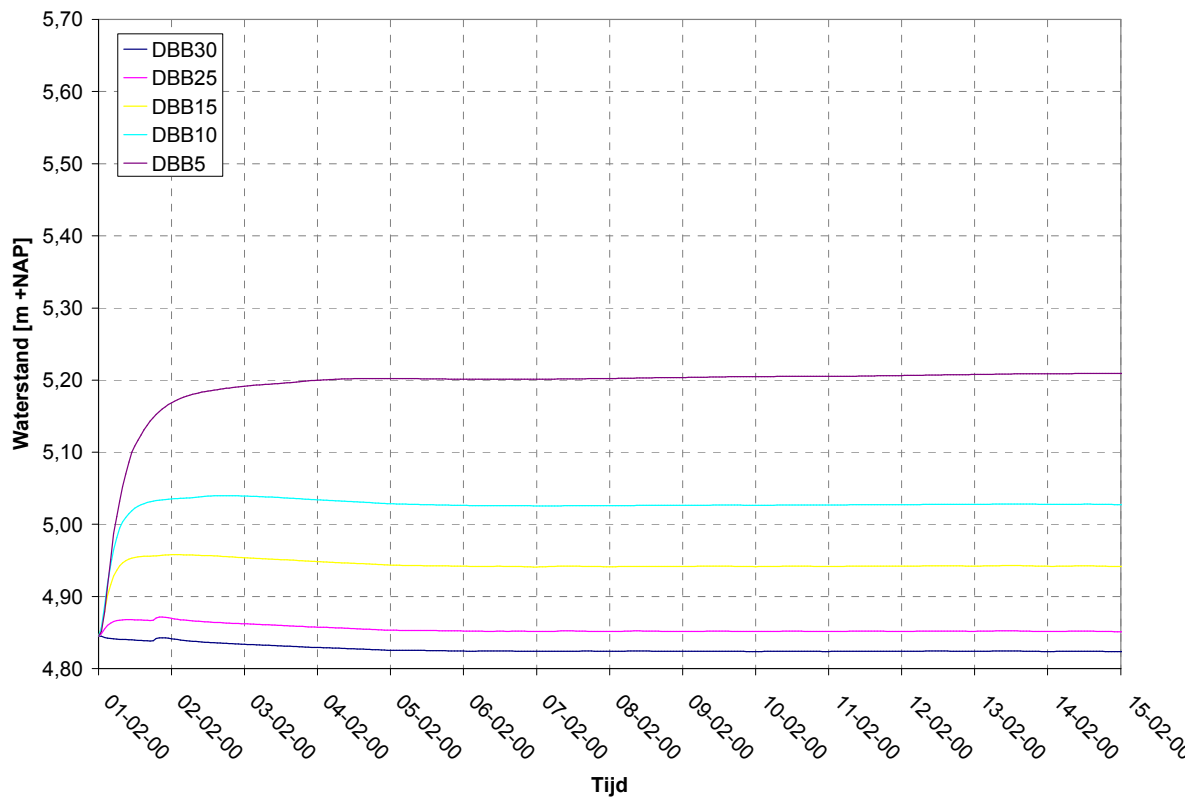


Figuur I-5: Maximale waterstanden Fliert voor verschillende ruwheden bij bui met een herhalingsjijd van 100 jaar, $t = 100$.

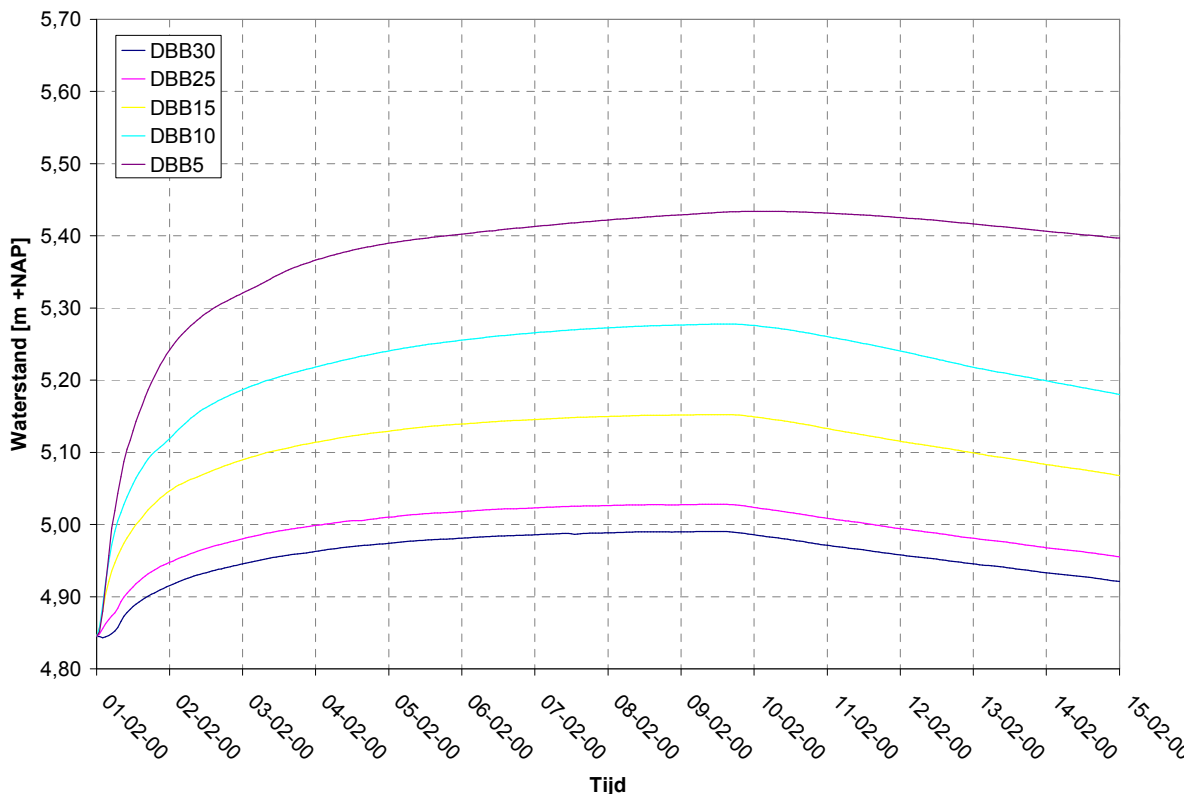


Figuur I-6: Maximale waterstanden Fliert voor verschillende ruwheden bij een werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, Eerbeek 2005 bui.

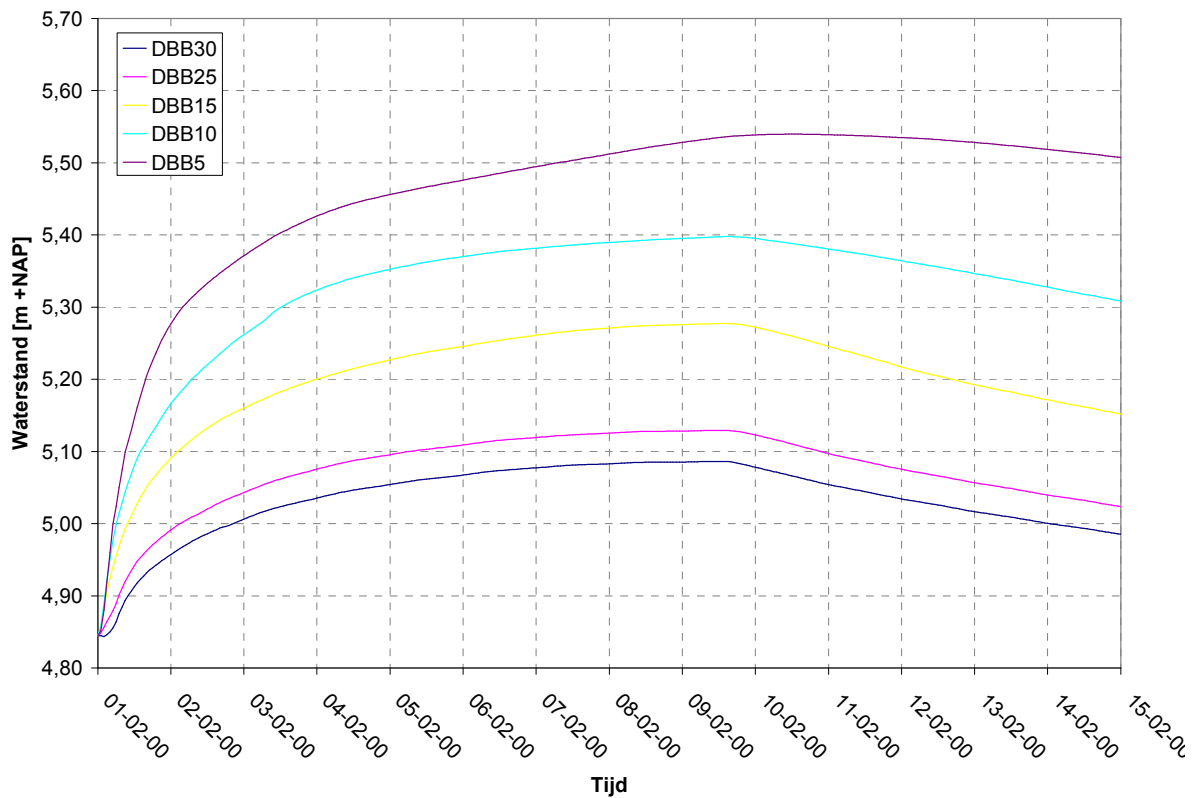
Bijlage II: Waterstand in tijd



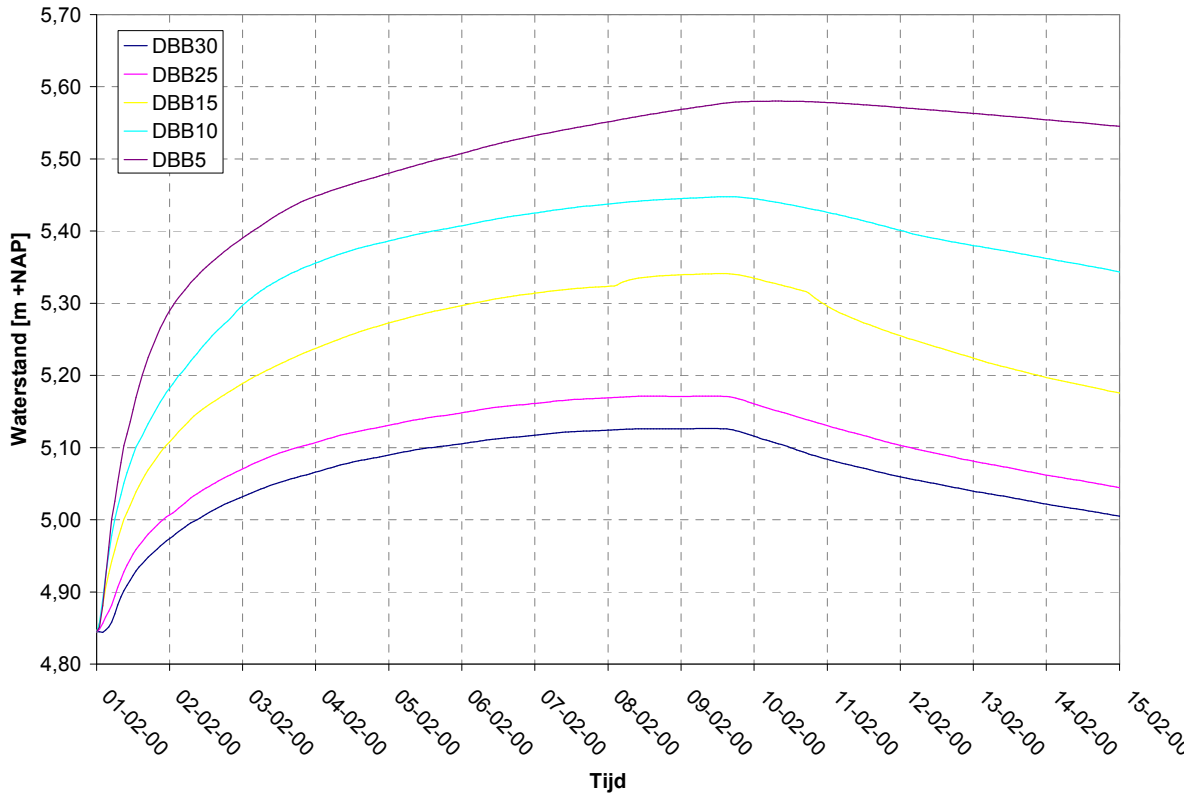
Figuur II-1: Waterstand in tijd begin Fliert voor bui 2 millimeter per dag.



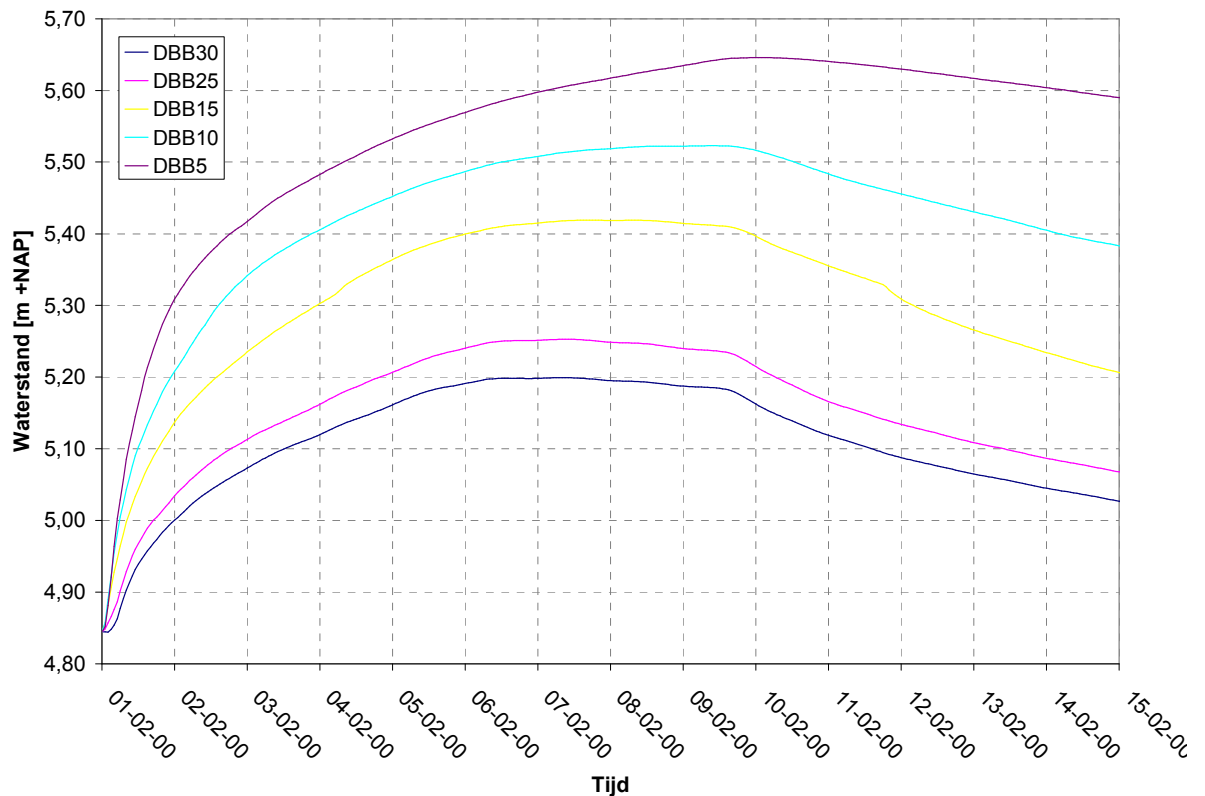
Figuur II-2: Waterstand in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingsdij van 1 jaar, $t = 1$.



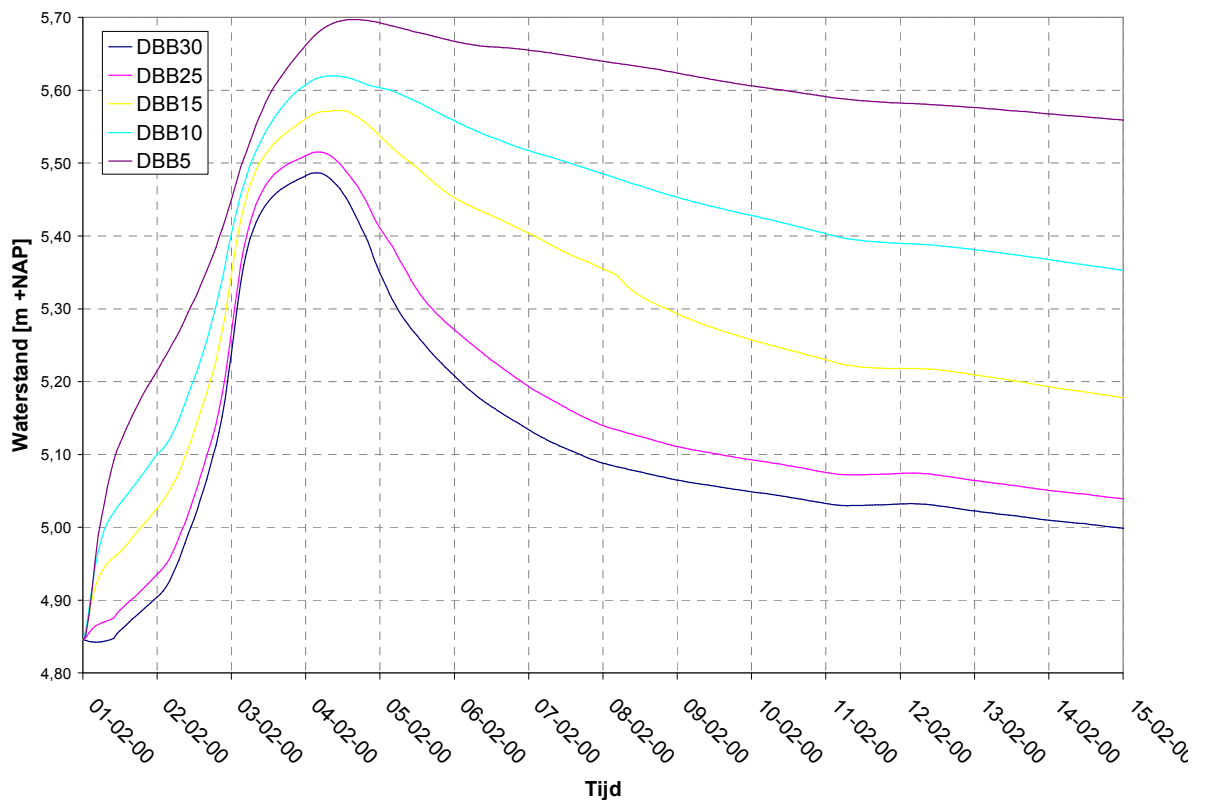
Figuur II-3: Waterstand in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 10 jaar, $t = 10$.



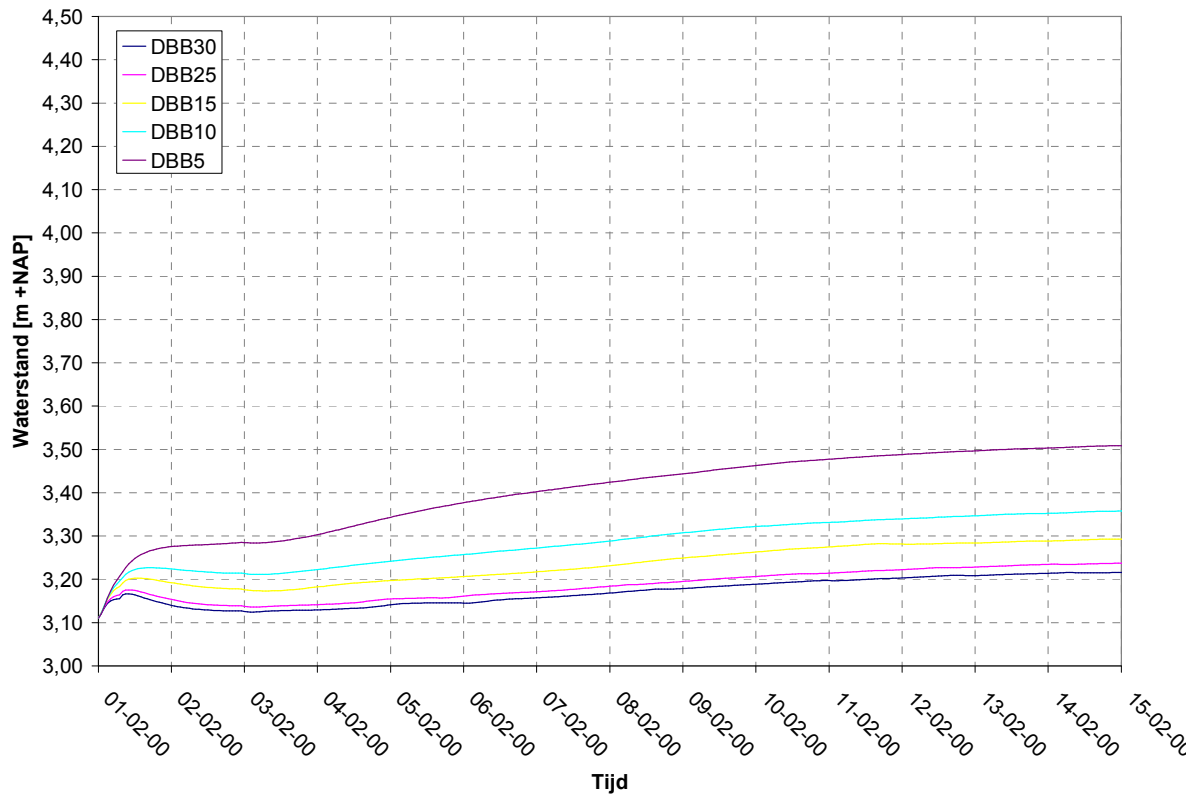
Figuur II-4: Waterstand in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 25 jaar, $t = 25$.



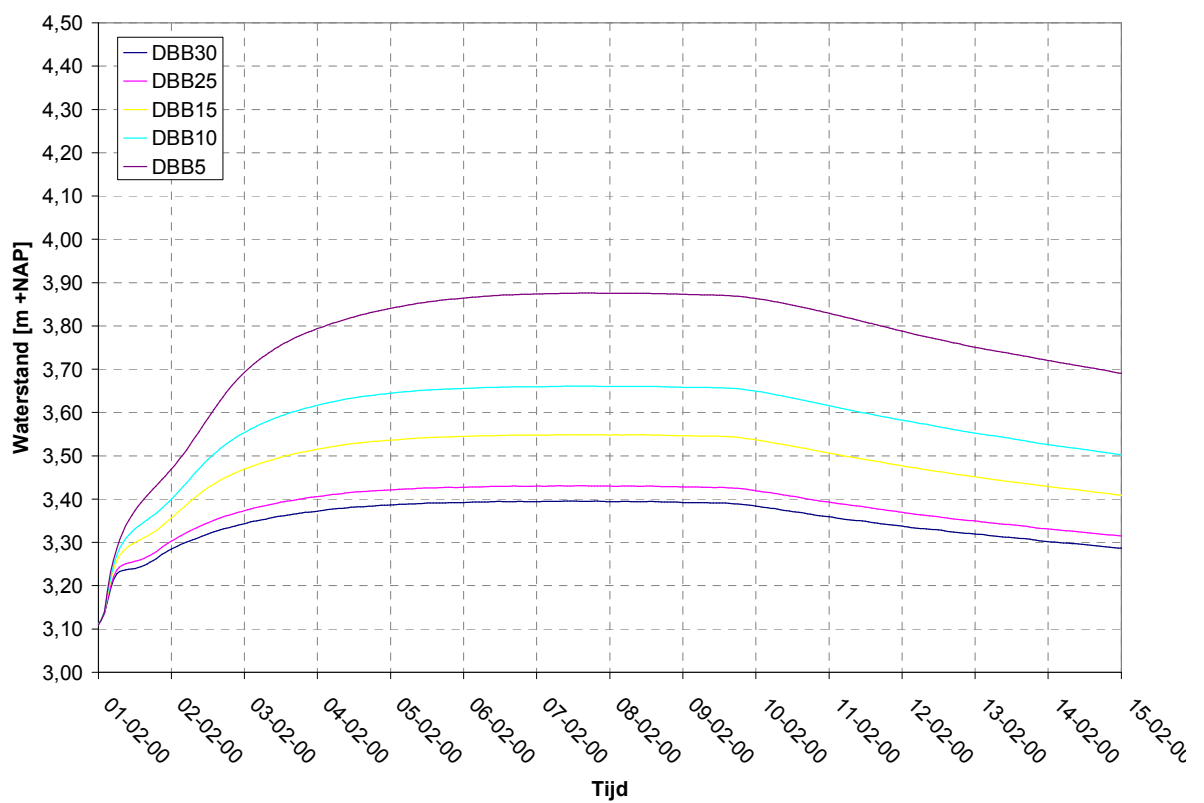
Figuur II-5: Waterstand in tijd begin Fliert voor bui met een herhalings-tijd van 100 jaar, $t = 100$.



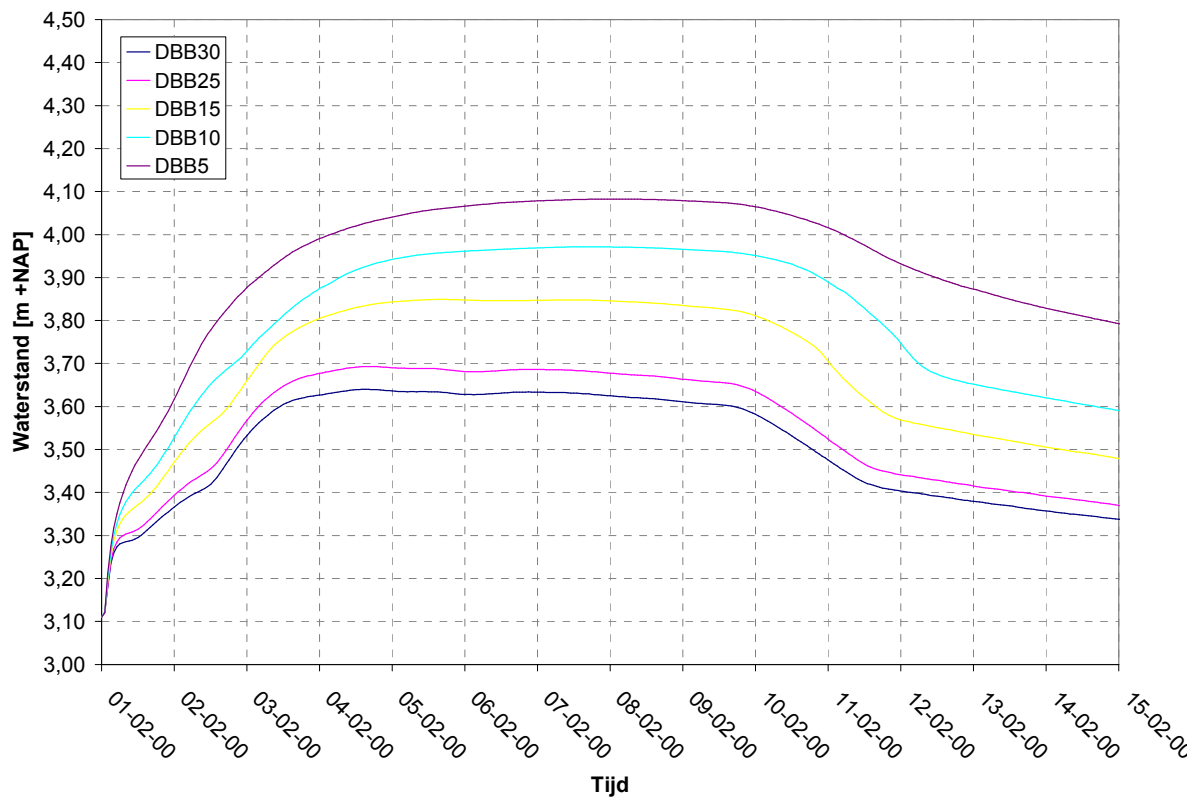
Figuur II-6: Waterstand in tijd begin Fliert voor werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, de Eerbeek 2005 bui.



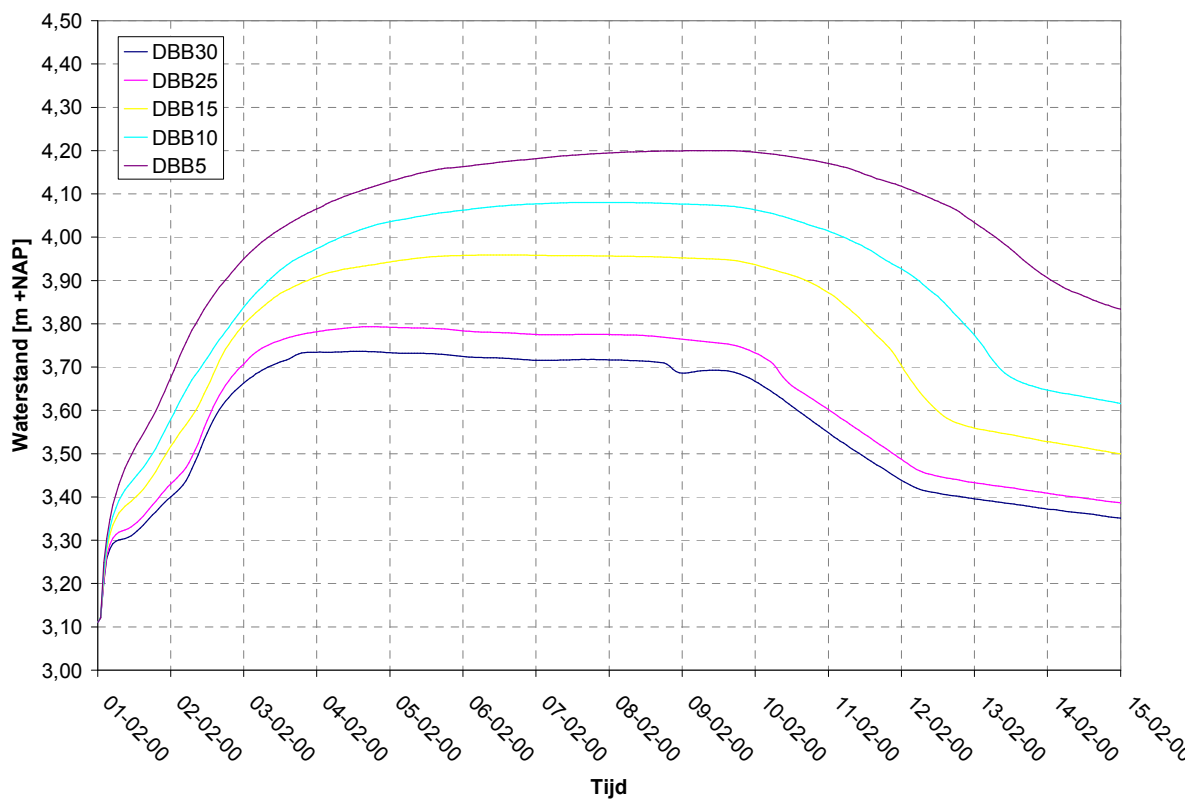
Figuur II-7: Waterstand in tijd midden Fliert voor bui 2 millimeter per dag.



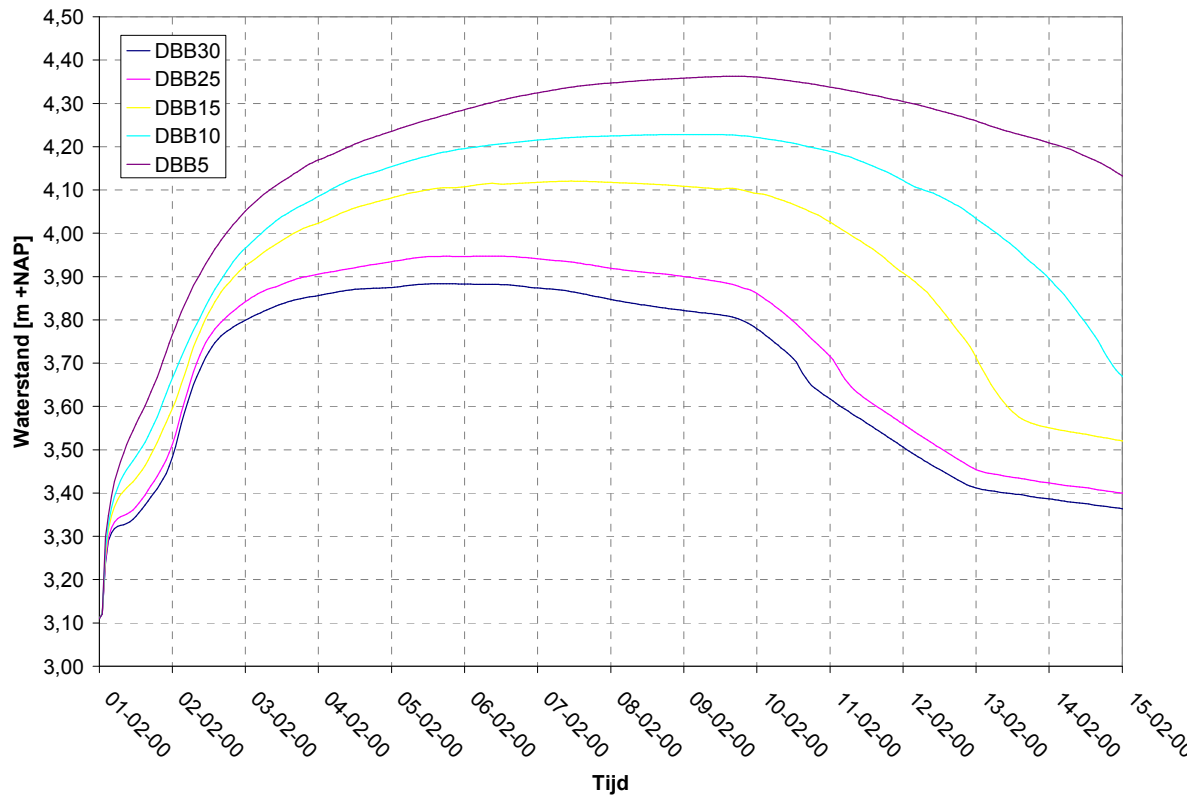
Figuur II-8: Waterstand in tijd midden Fliert voor bui met een herhalings-tijd van 1 jaar, $t = 1$.



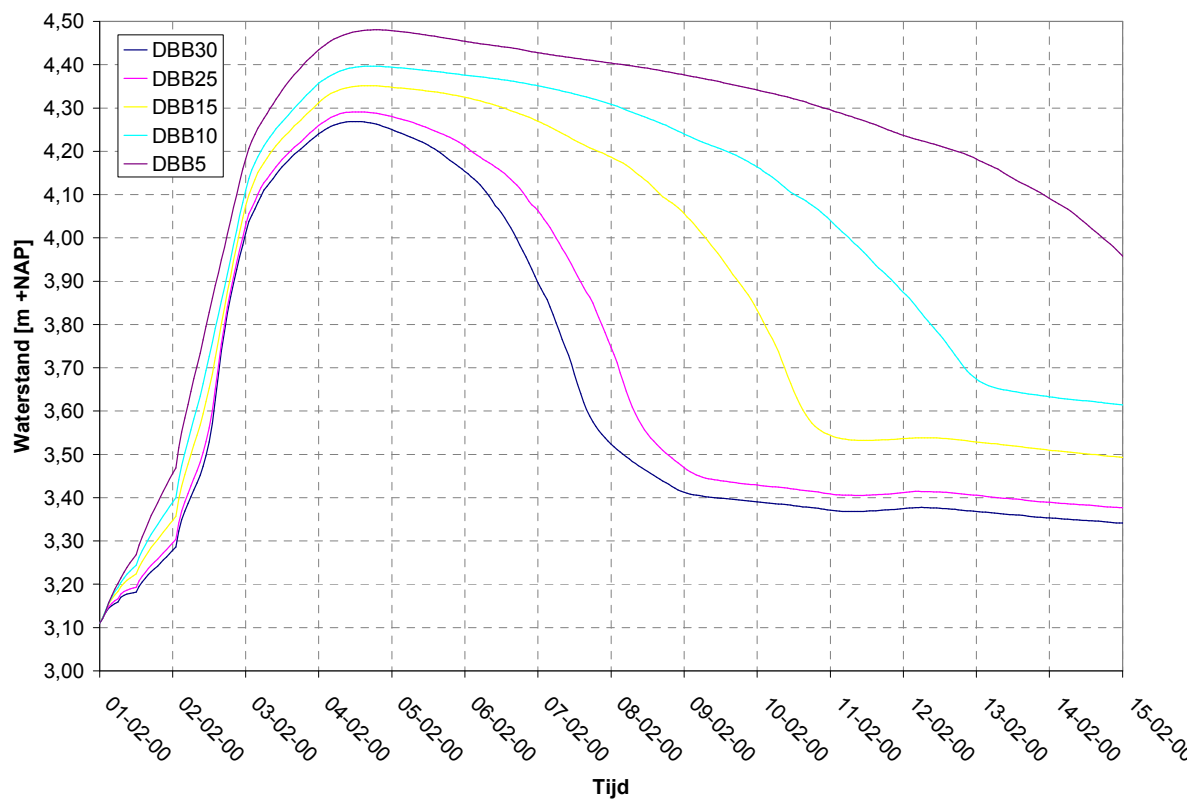
Figuur II-9: Waterstand in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 10 jaar, $t = 10$.



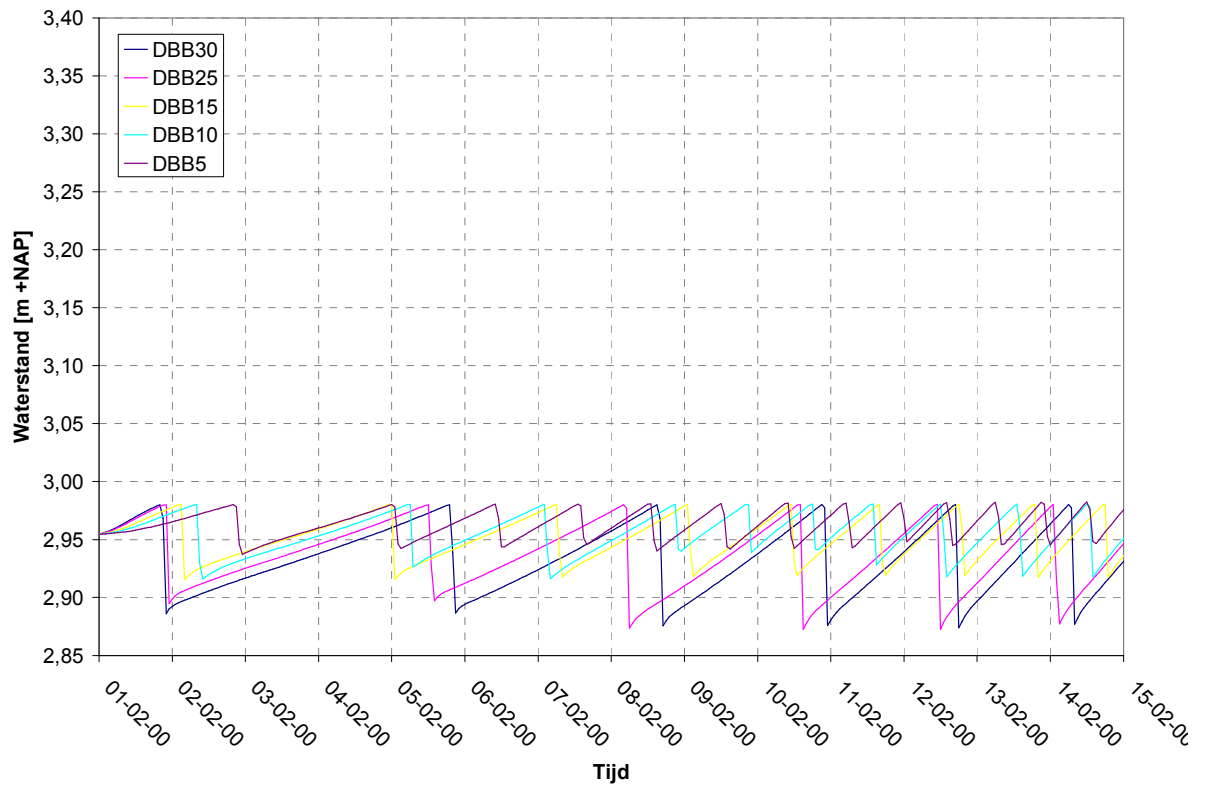
Figuur II-10: Waterstand in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 25 jaar, $t = 25$.



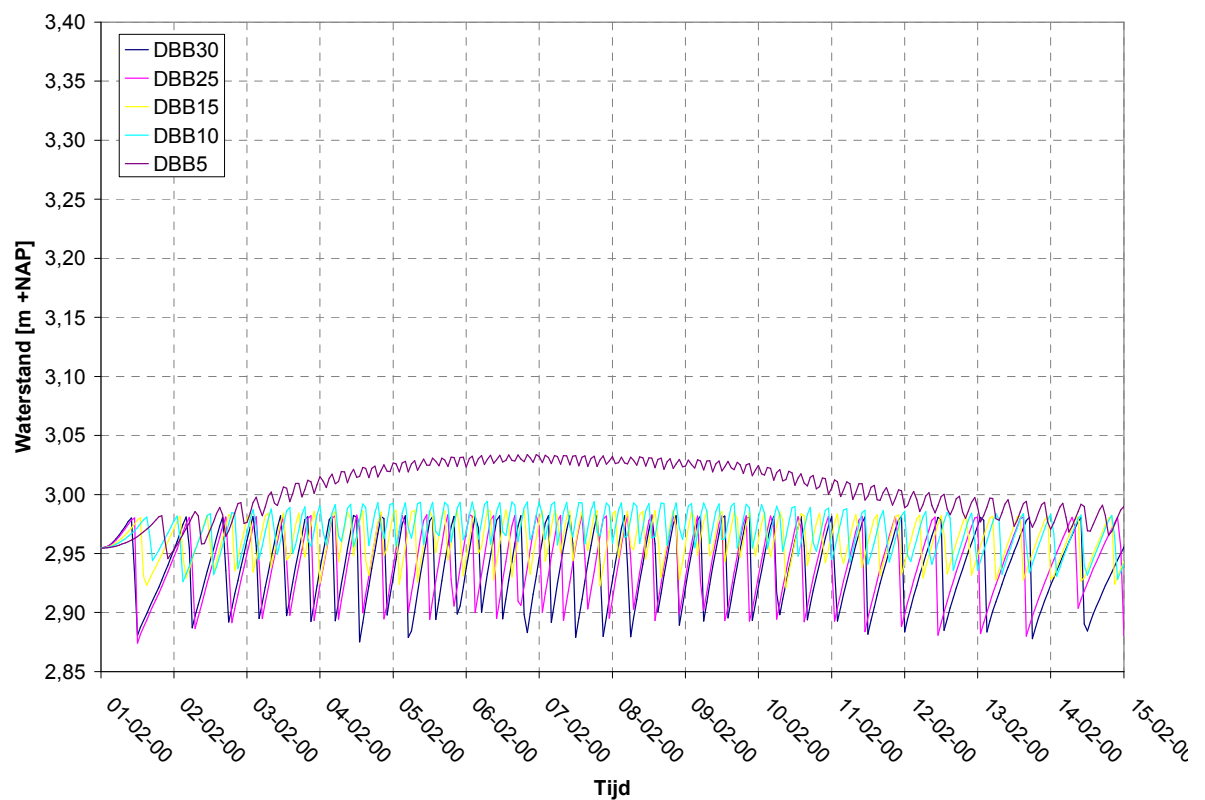
Figuur II-11: Waterstand in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 100 jaar, $t=100$.



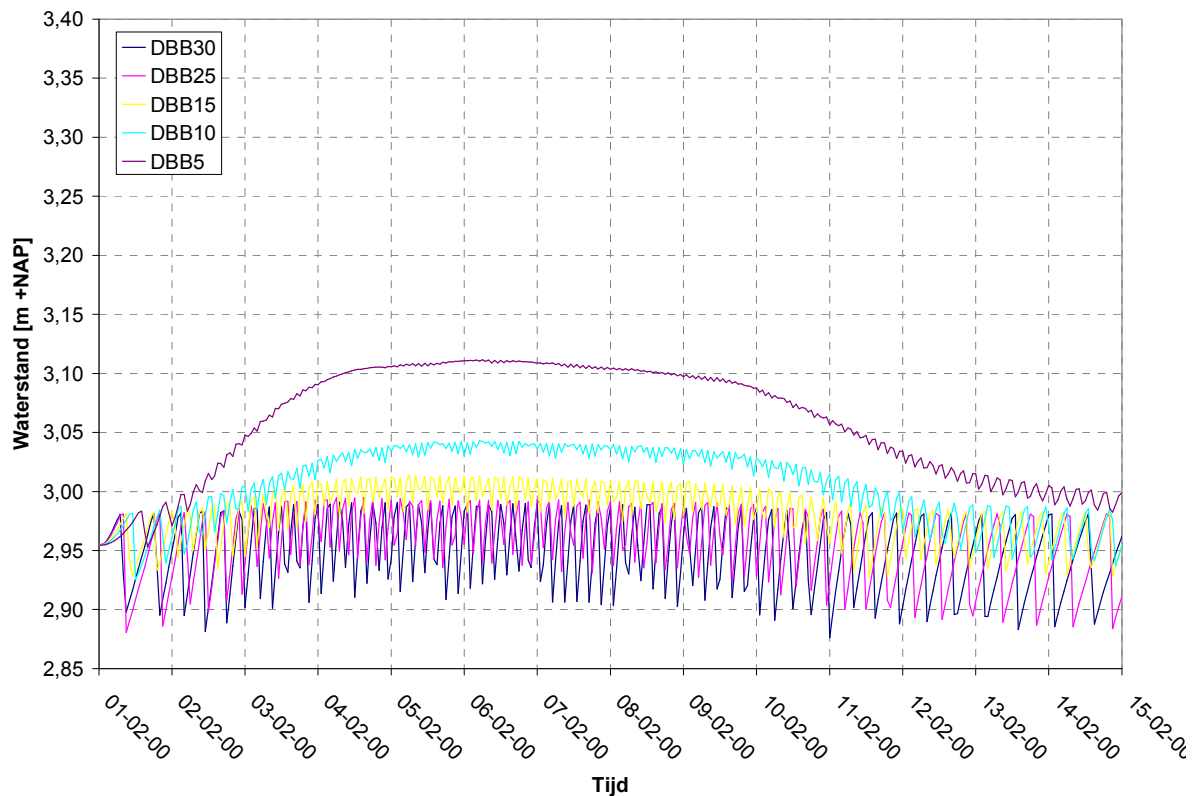
Figuur II-12: Waterstand in tijd midden Fliert voor werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, de Eerbeek 2005 bui.



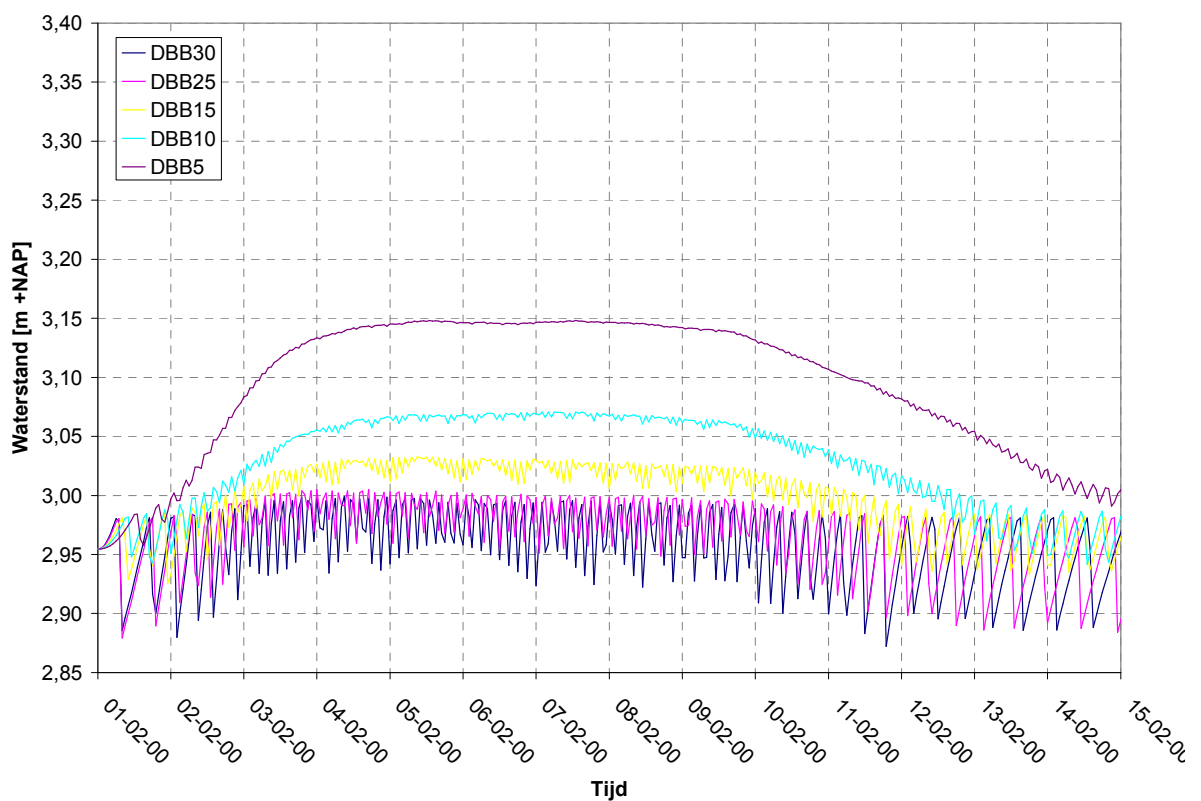
Figuur II-13: Waterstand in tijd einde Fliert voor bui 2 millimeter per dag.



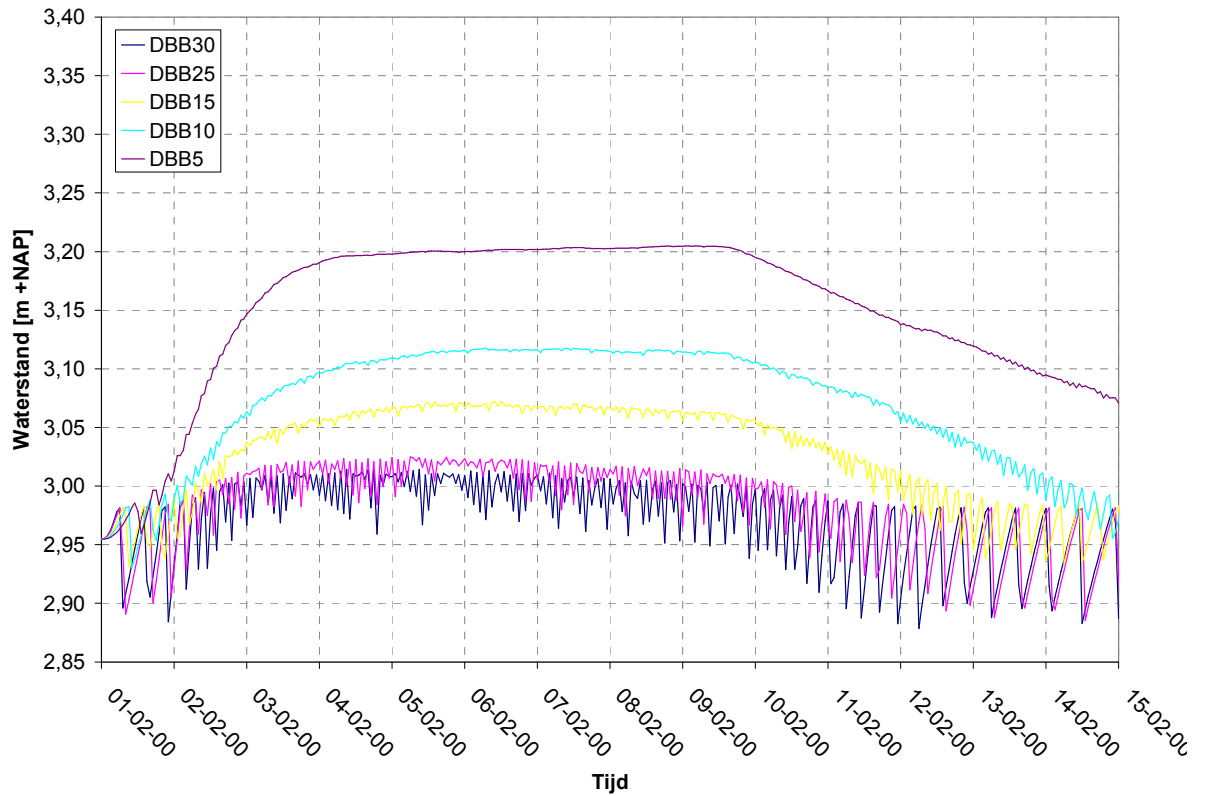
Figuur II-14: Waterstand in tijd einde Fliert voor bui met een herhalings-tijd van 1 jaar, $t = 1$.



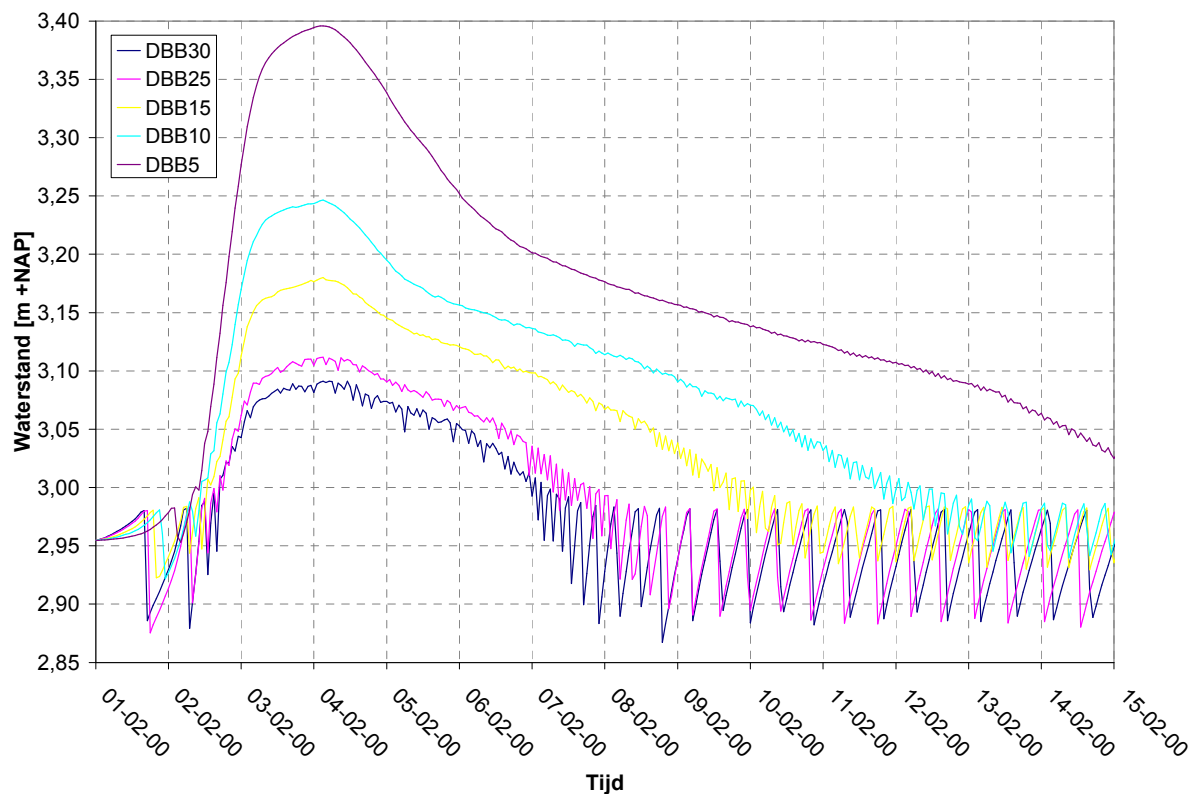
Figuur II-15: Waterstand in tijd einde Fliet voor bui met een herhalingsjijd van 10 jaar, $t = 10$.



Figuur II-16: Waterstand in tijd einde Fliet voor bui met een herhalingsjijd van 25 jaar, $t = 25$.

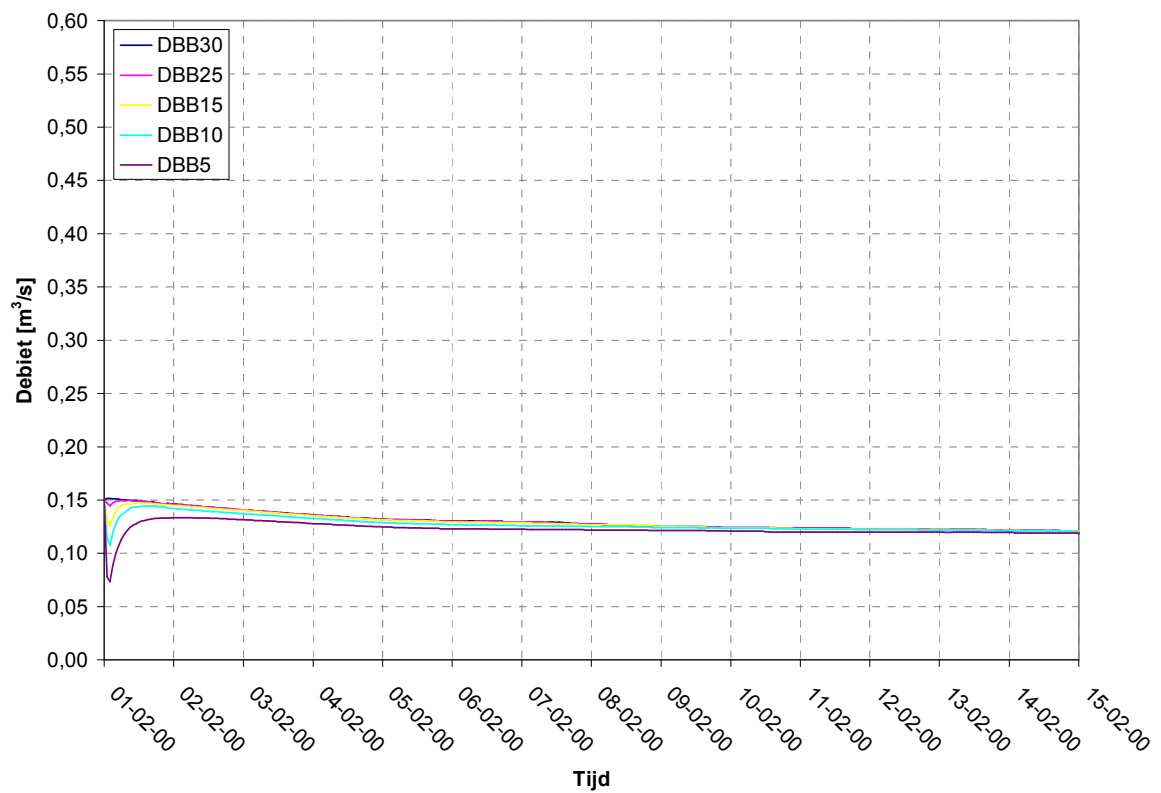


Figuur II-17: Waterstand in tijd einde Fliet voor bui met een herhalingsjijd van 100 jaar, $t=100$.

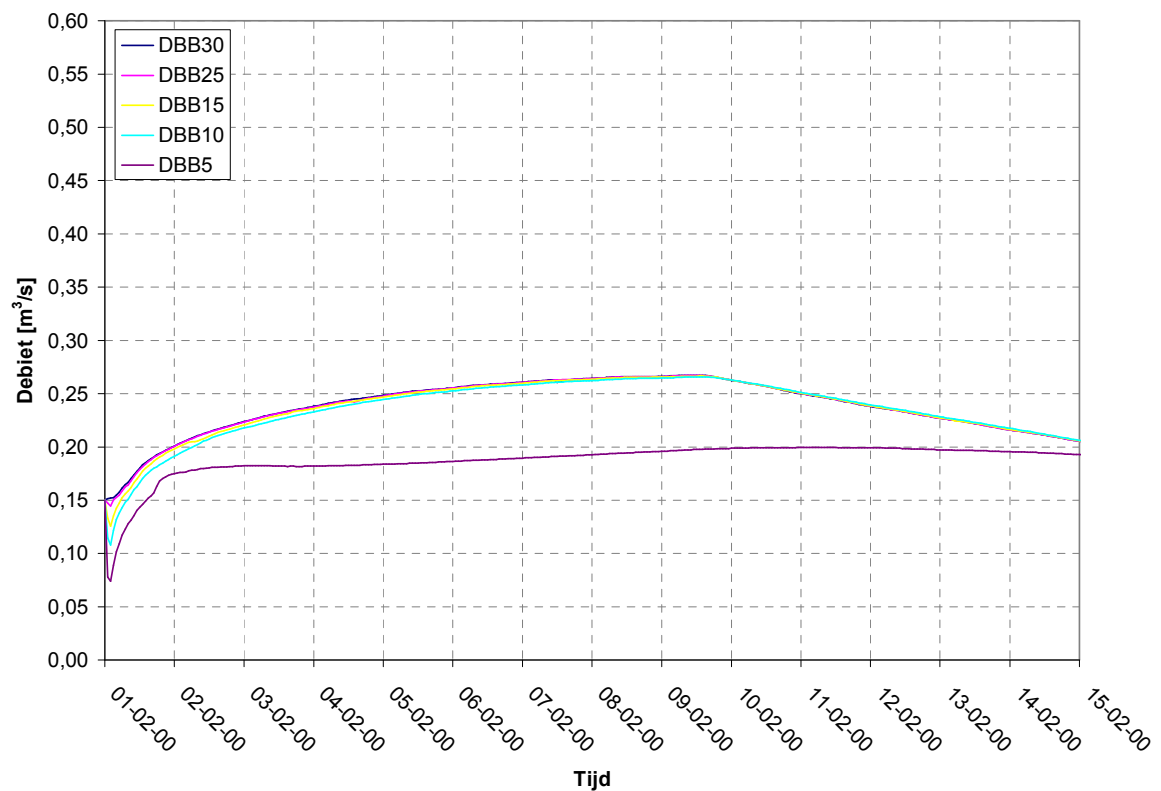


Figuur II-18: Waterstand in tijd einde Fliet voor werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, de Eerbeek 2005 bui.

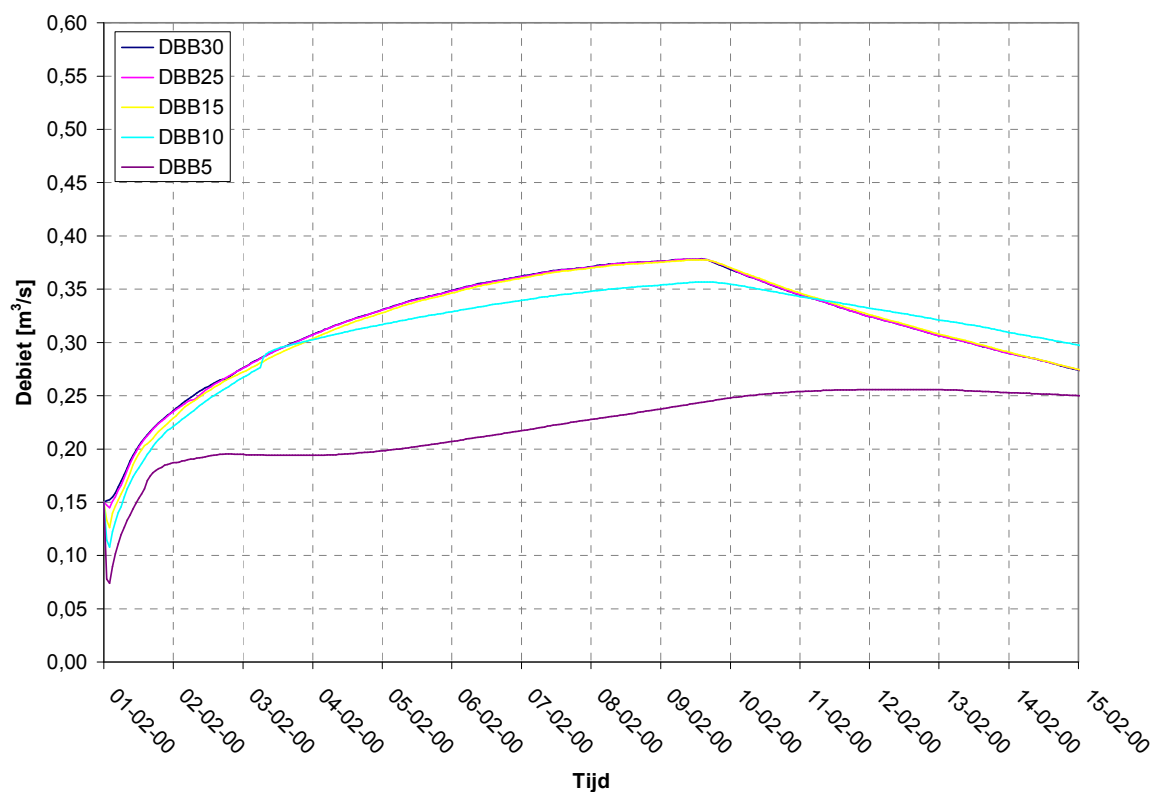
Bijlage III: Debiet in tijd



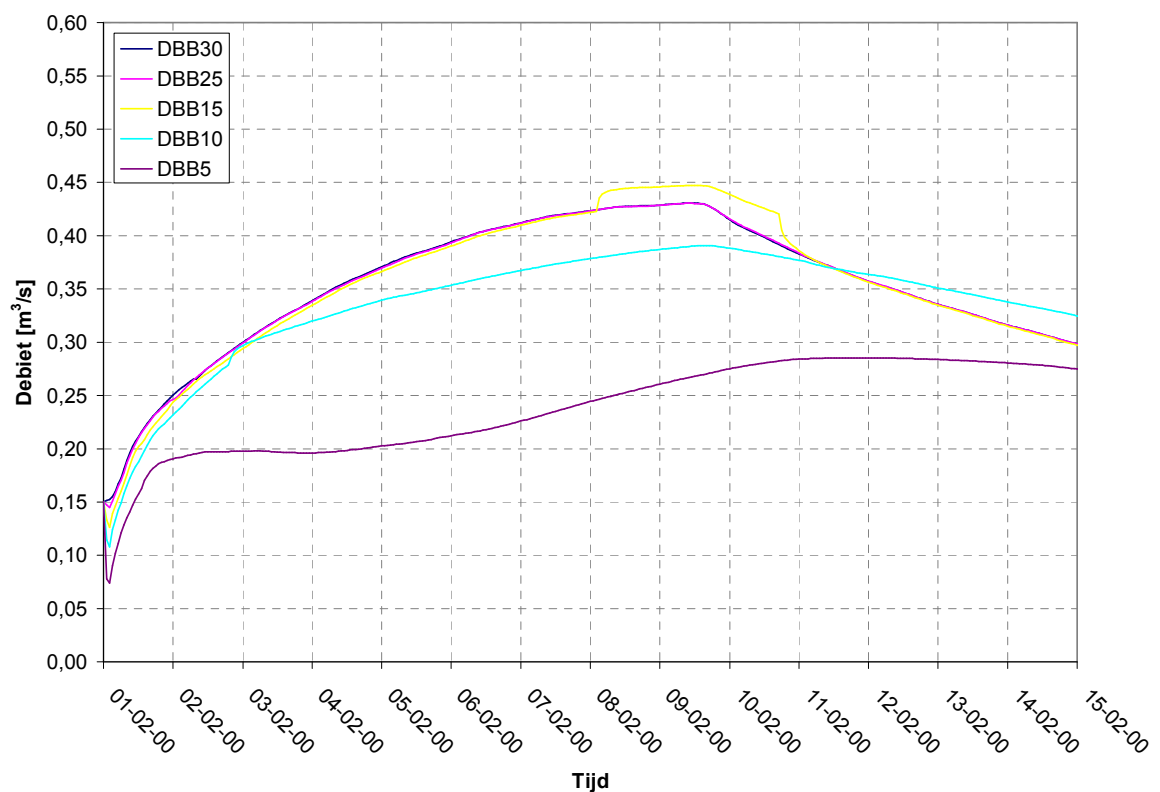
Figuur III-1: Debiet in tijd begin Fliert voor bui 2 millimeter per dag.



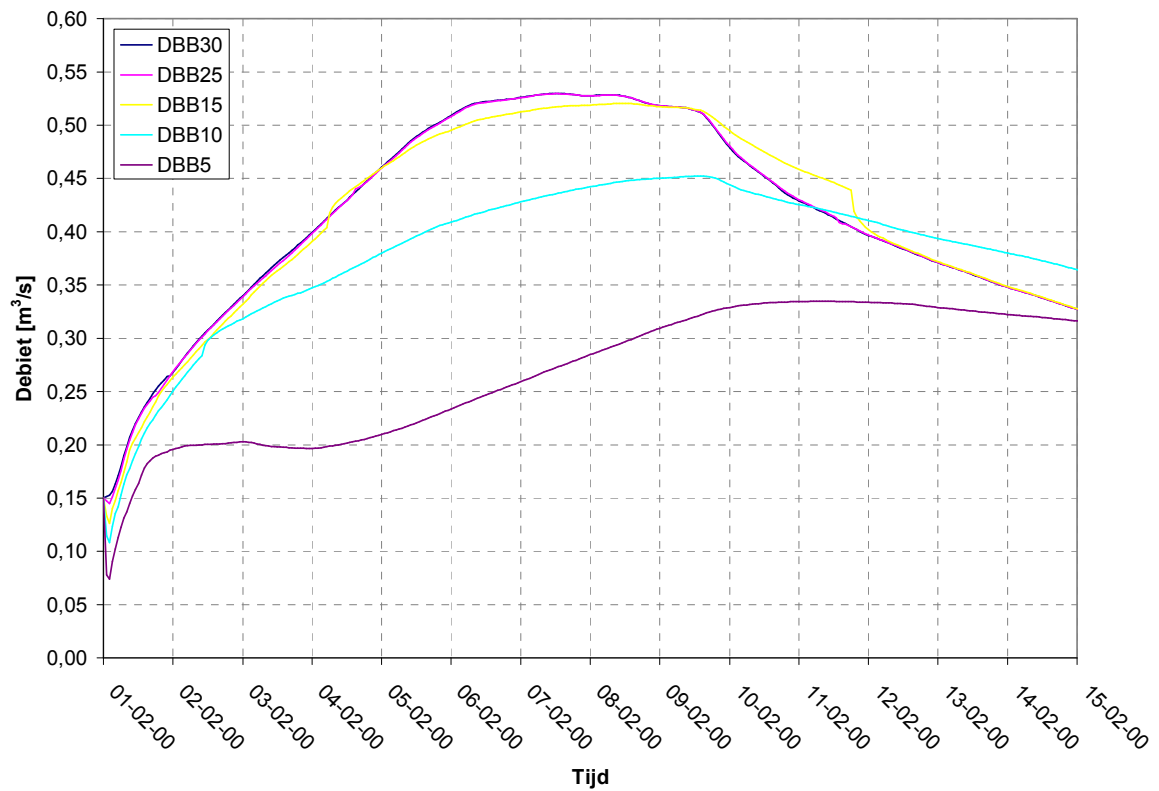
Figuur III-2: Debiet in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingsdij van 1 jaar, $t = 1$.



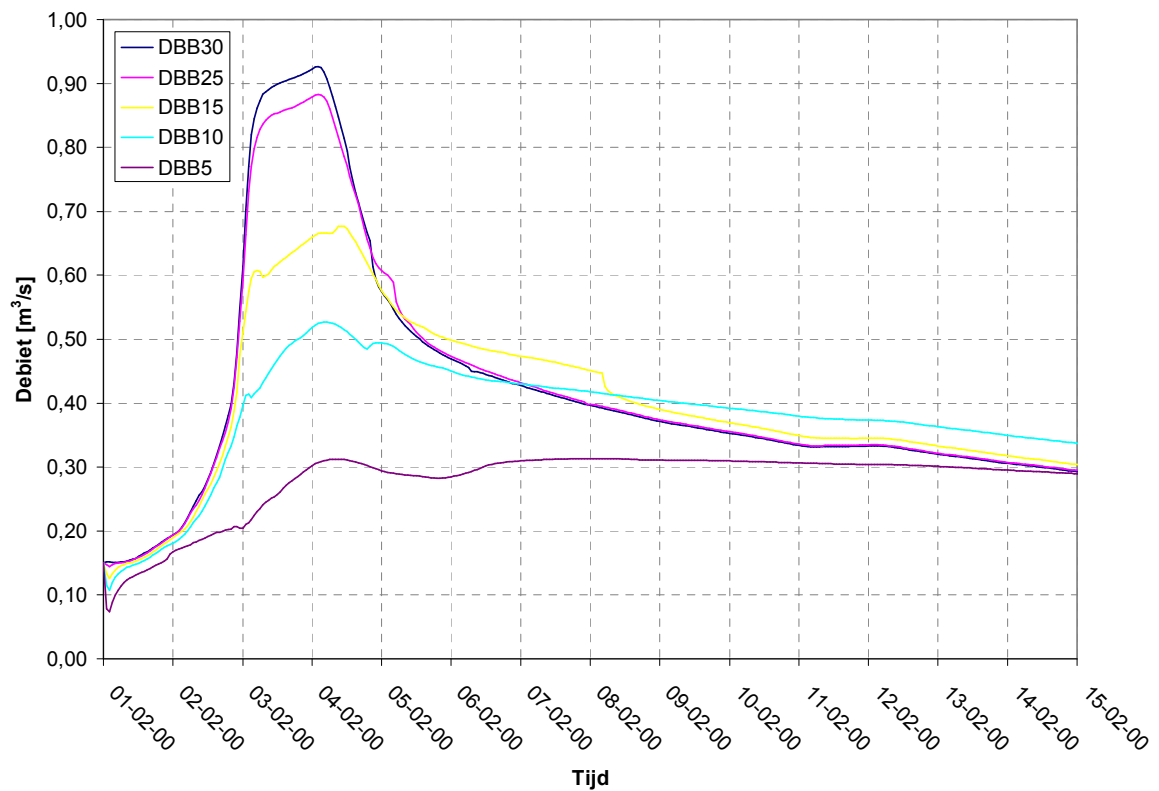
Figuur III-3: Debiet in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingstijd van 10 jaar, $t = 10$.



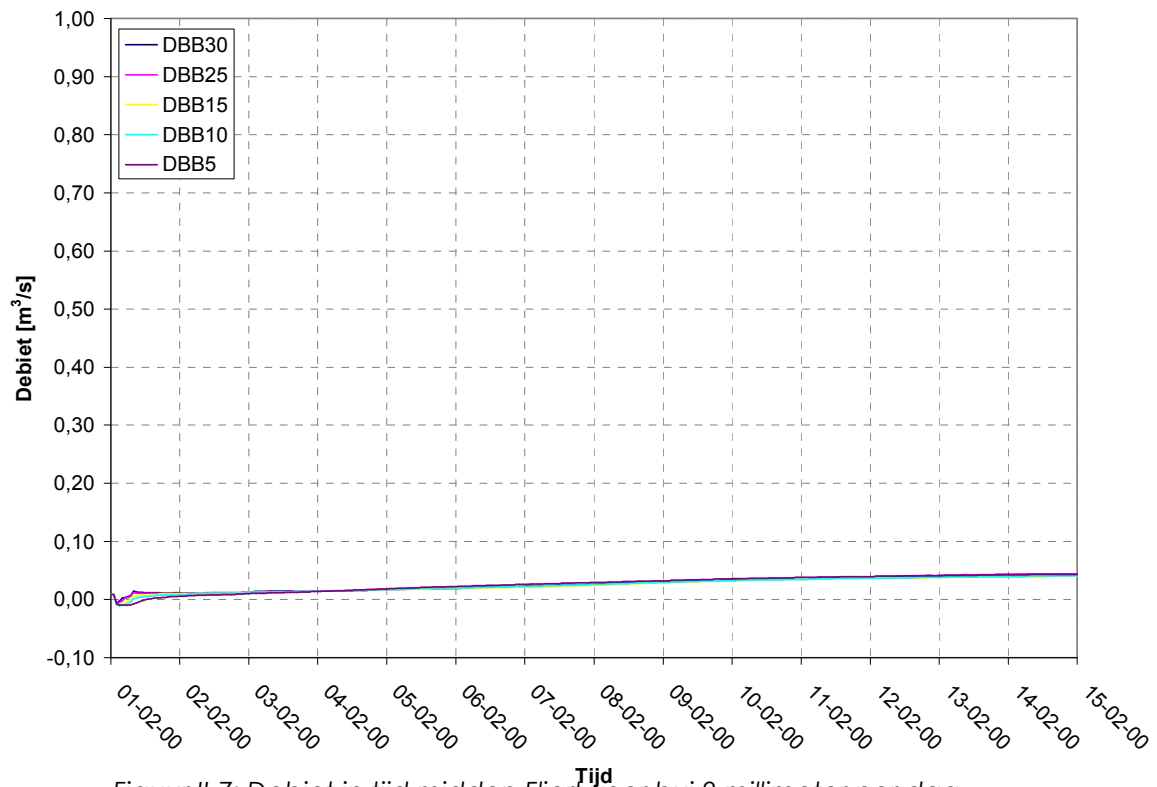
Figuur III-4: Debiet in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingstijd van 25 jaar, $t = 25$.



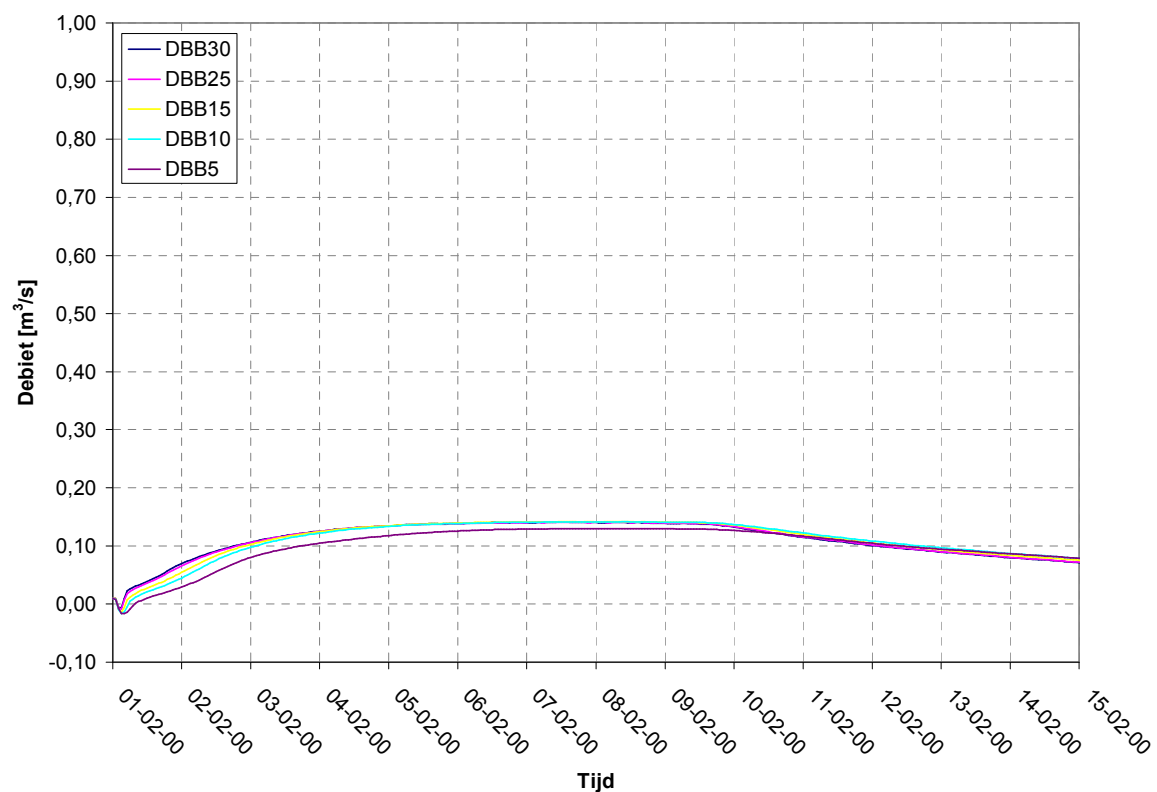
Figuur III-5: Debiet in tijd begin Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 100 jaar, $t = 100$.



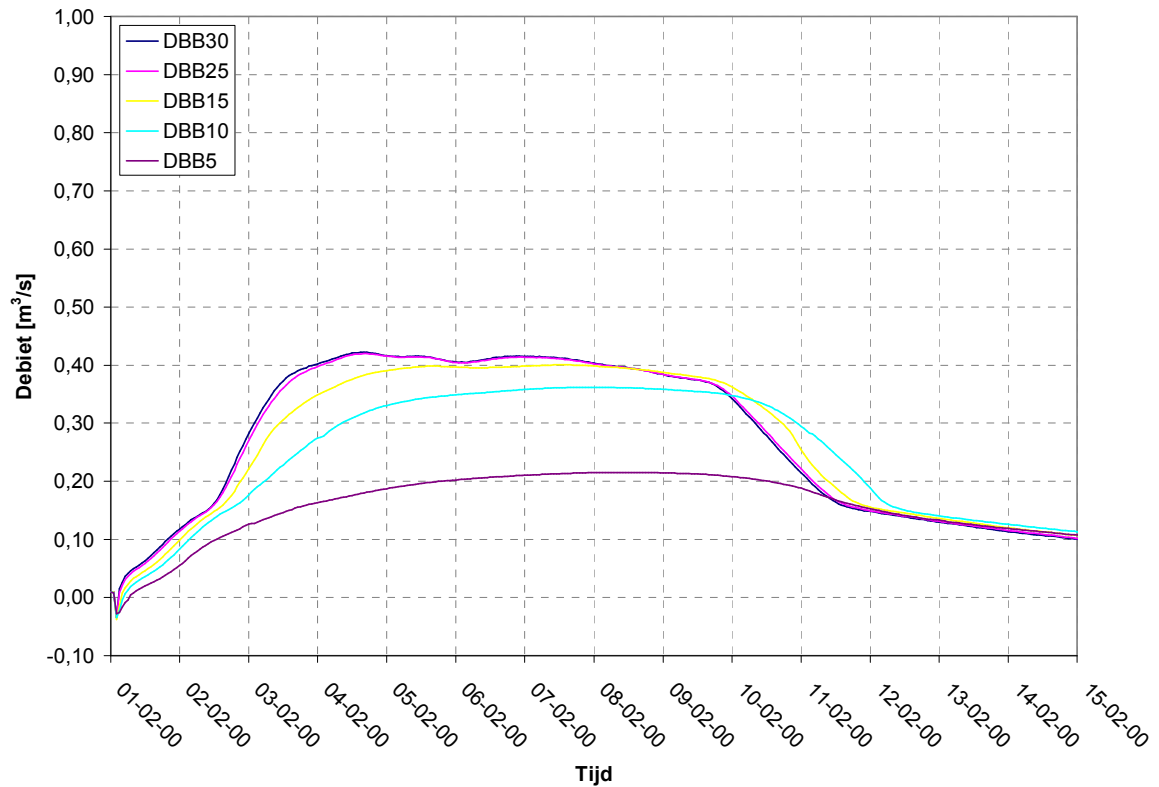
Figuur III-6: Debiet in tijd begin Fliert voor werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, de Eerbeek 2005 bui.



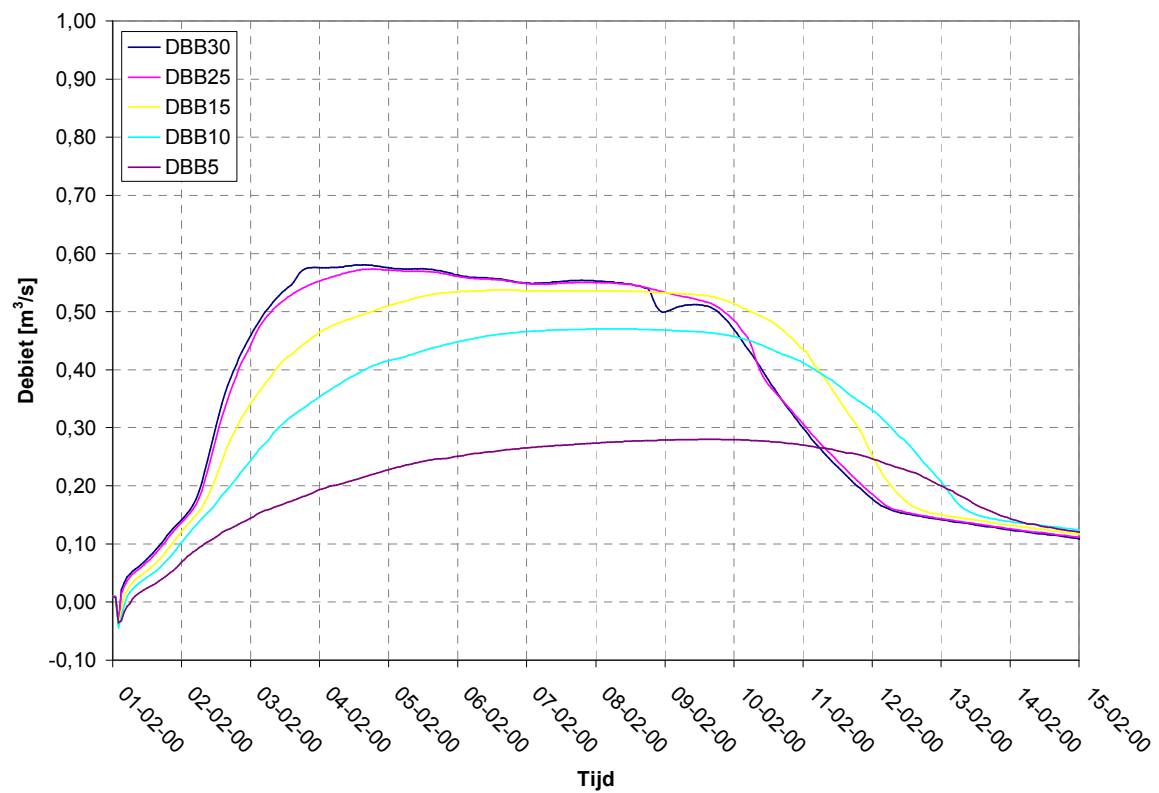
Figuur II-7: Debiet in tijd midden Fliert voor bui 2 millimeter per dag.



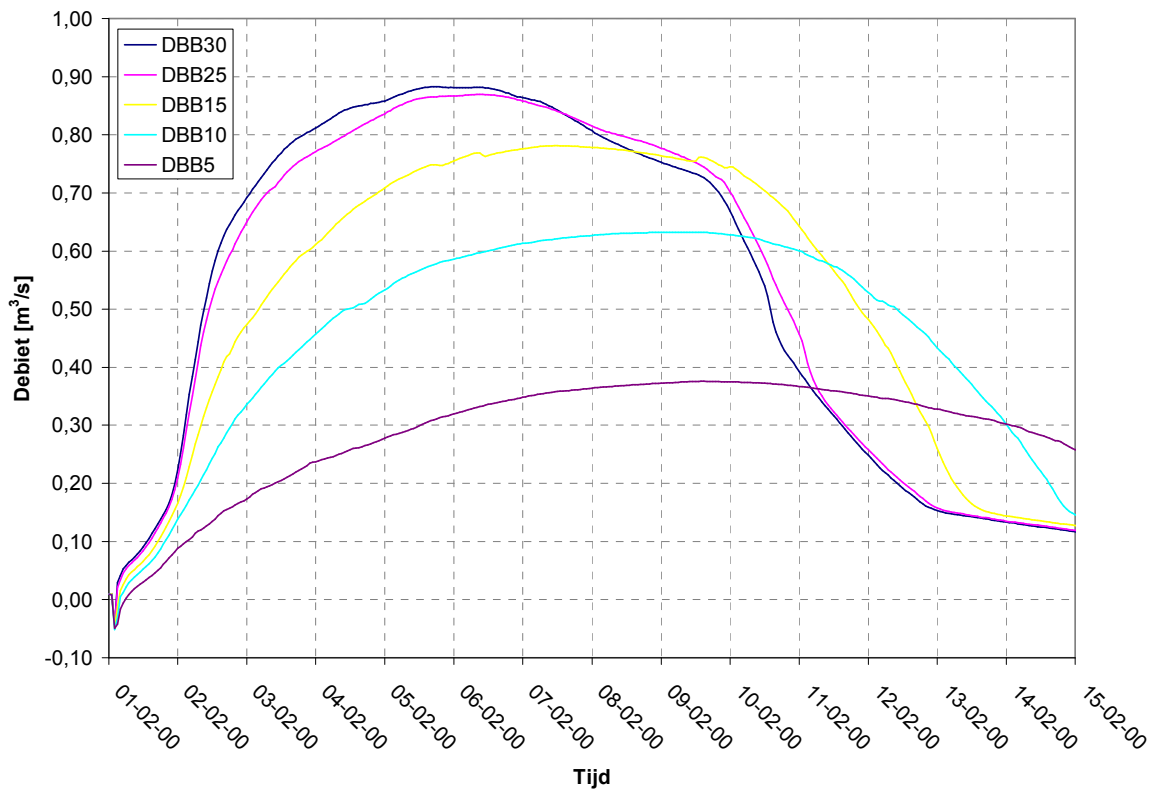
Figuur III-8: Debiet in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsijd van 1 jaar, $t = 1$.



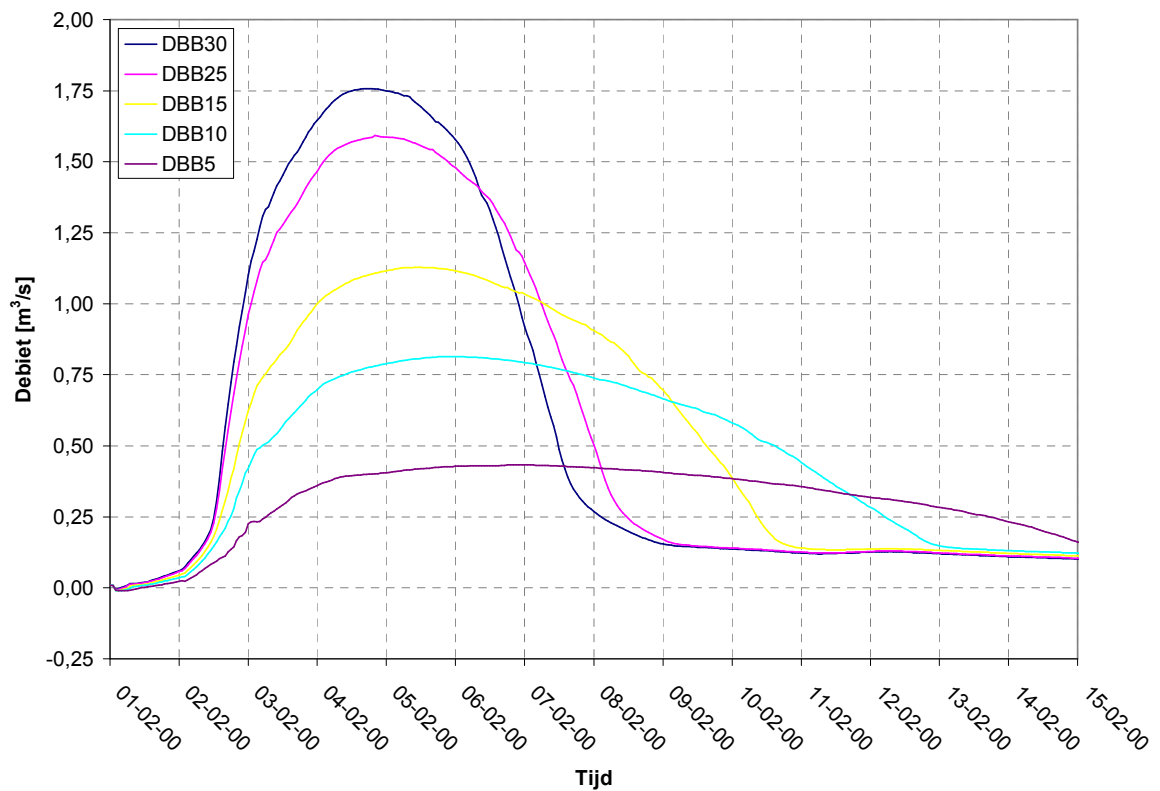
Figuur III-9: Debiet in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 10 jaar, $t = 10$.



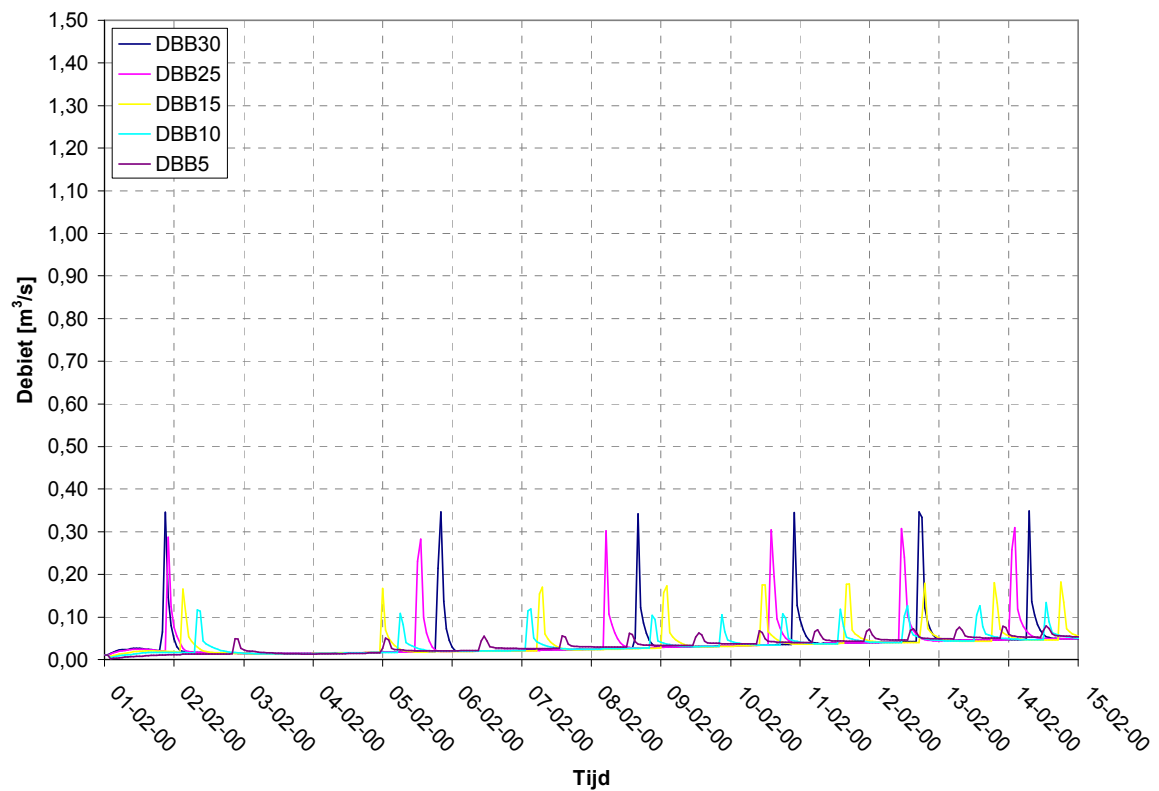
Figuur III-10: Debiet in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 25 jaar, $t = 25$.



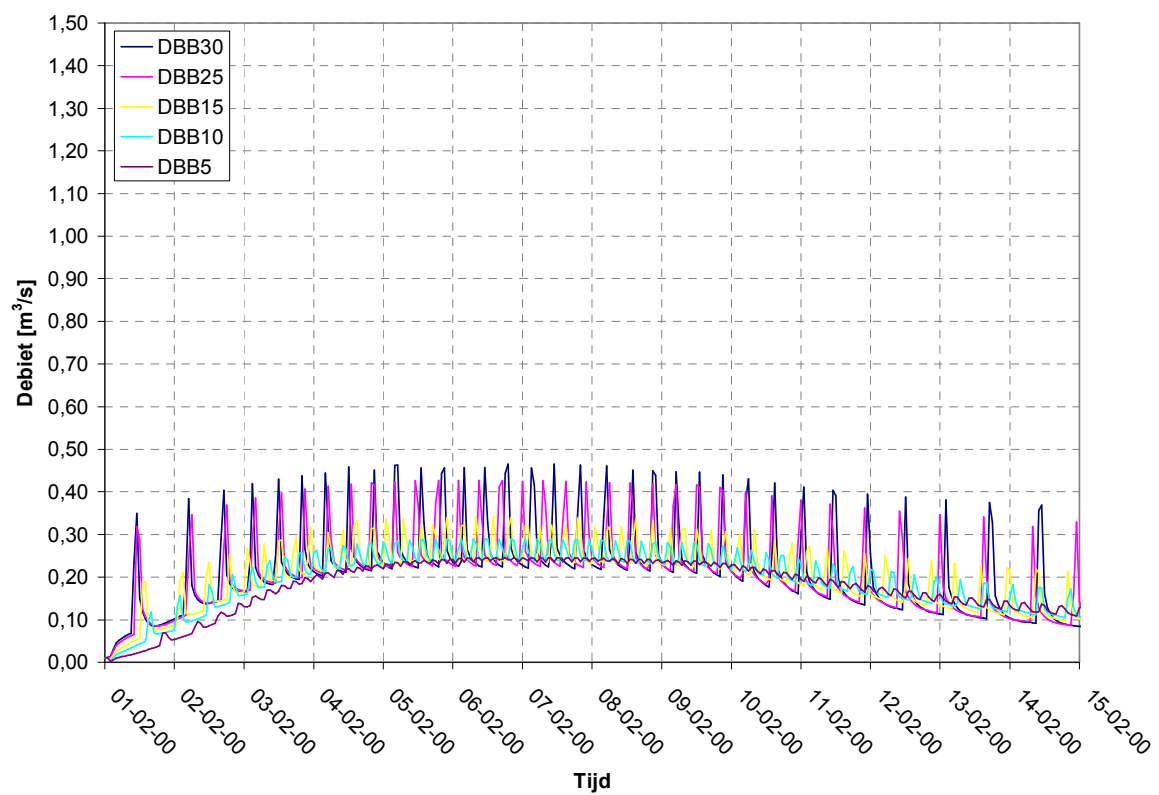
Figuur III-11: Debiet in tijd midden Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 100 jaar, $t=100$.



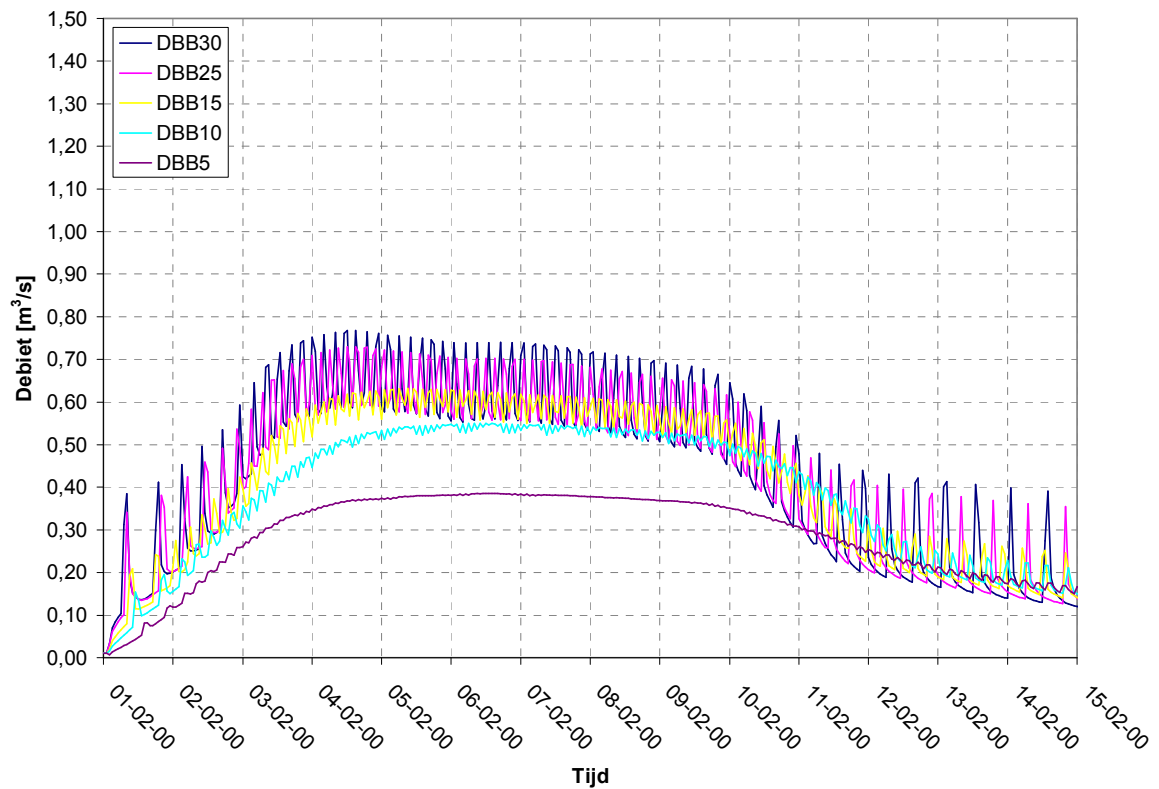
Figuur III-12: Debiet in tijd midden Fliert voor werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, de Eerbeek 2005 bui.



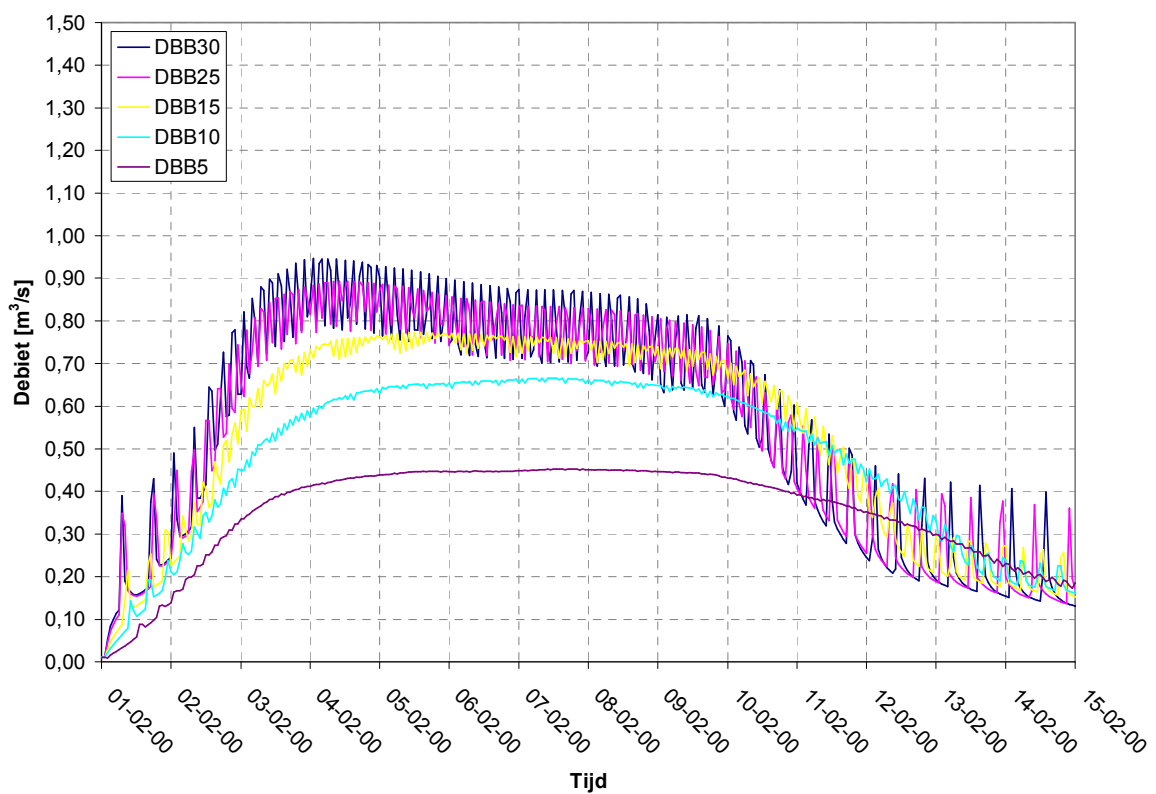
Figuur III-13: Debiet in tijd einde Fliet voor bui 2 millimeter per dag.



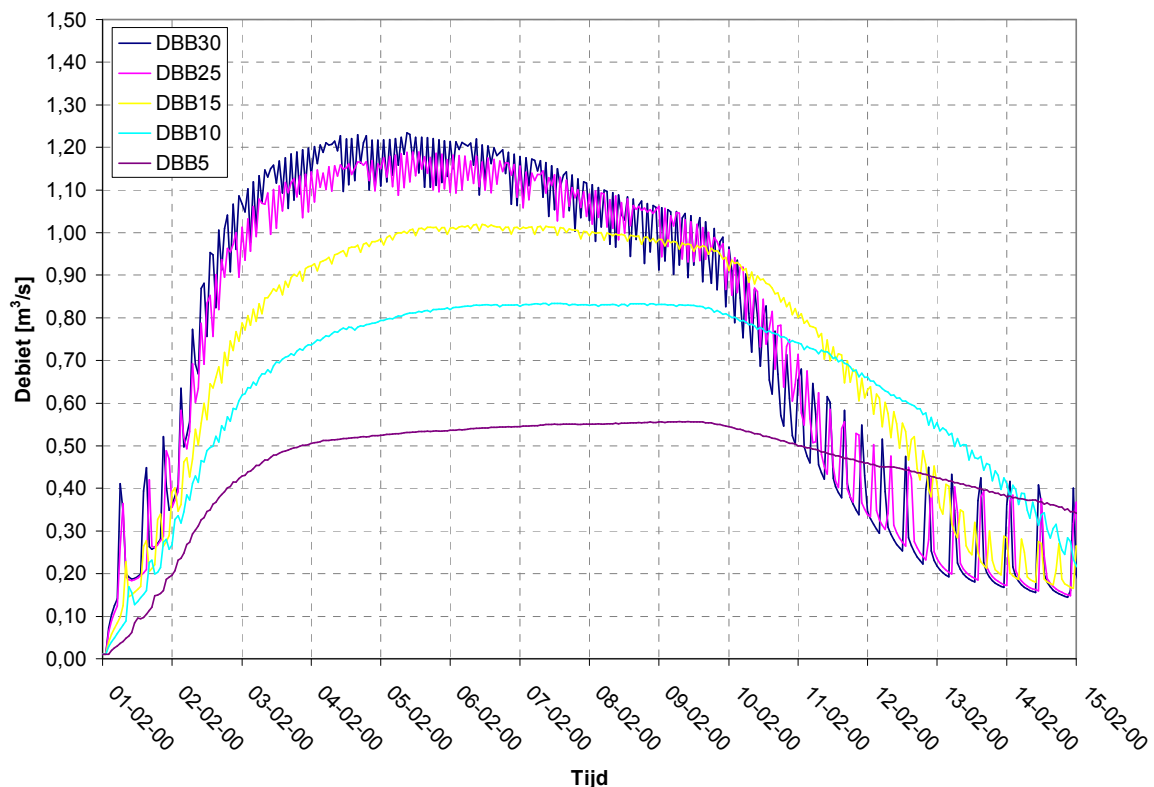
Figuur III-14: Debiet in tijd einde Fliet voor bui met een herhalingsijd van 1 jaar, $t = 1$.



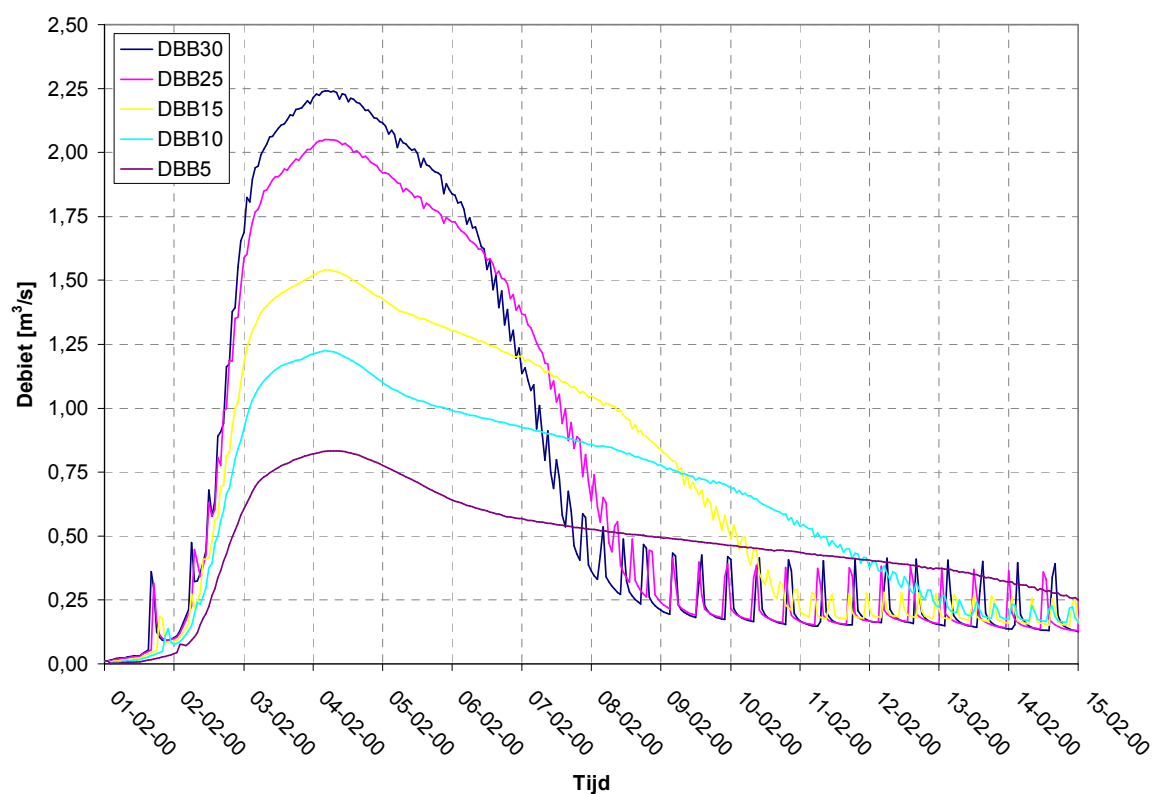
Figuur III-15: Debiet in tijd einde Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 10 jaar, $t = 10$.



Figuur III-16: Debiet in tijd einde Fliert voor bui met een herhalingsjijd van 25 jaar, $t = 25$.

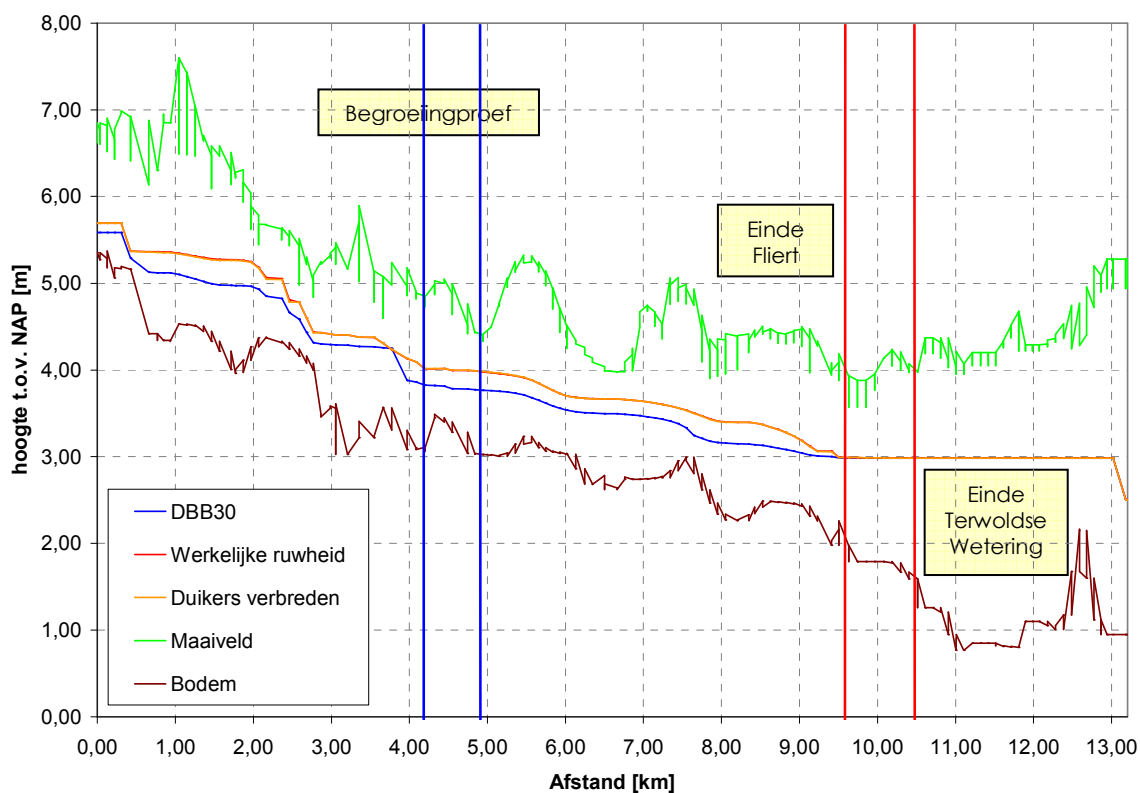


Figuur III-17: Debiet in tijd einde Fliert voor bui met een herhalingsstijd van 100 jaar, $t = 100$.

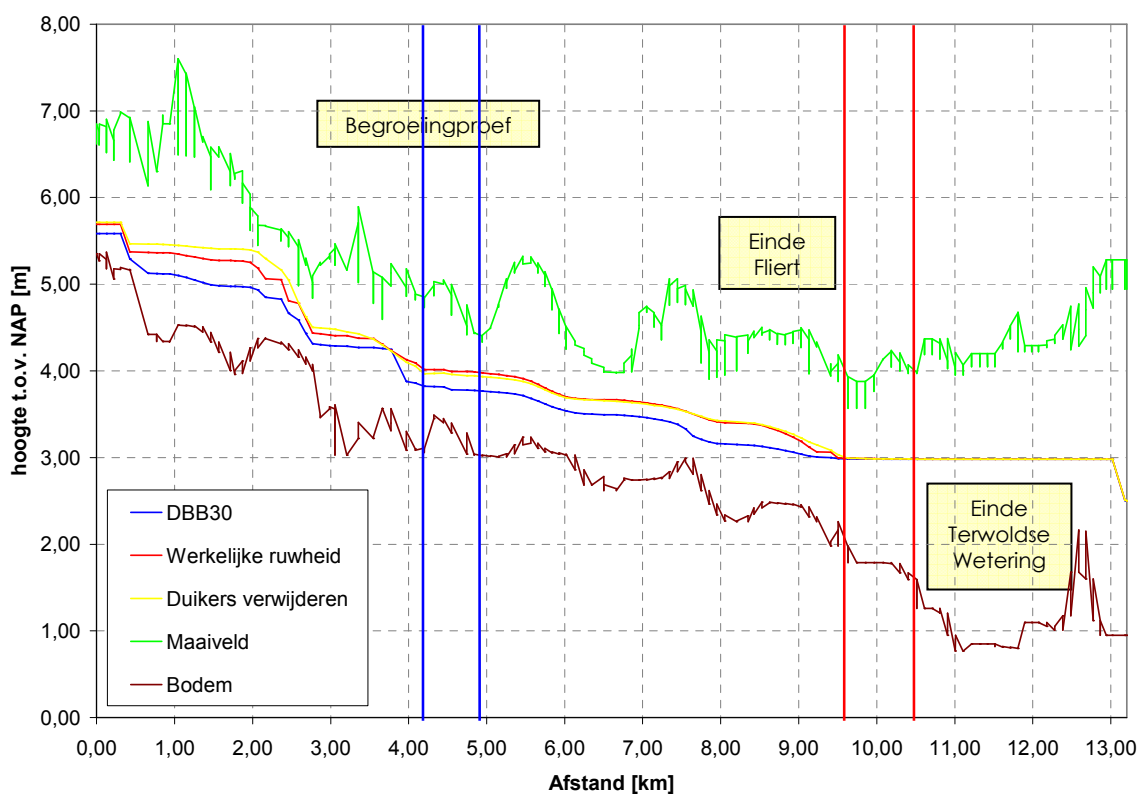


Figuur III-18: Debiet in tijd einde Fliert voor werkelijk gevallen bui bij Eerbeek in 2005, de Eerbeek 2005 bui.

Bijlage IV: Duikers

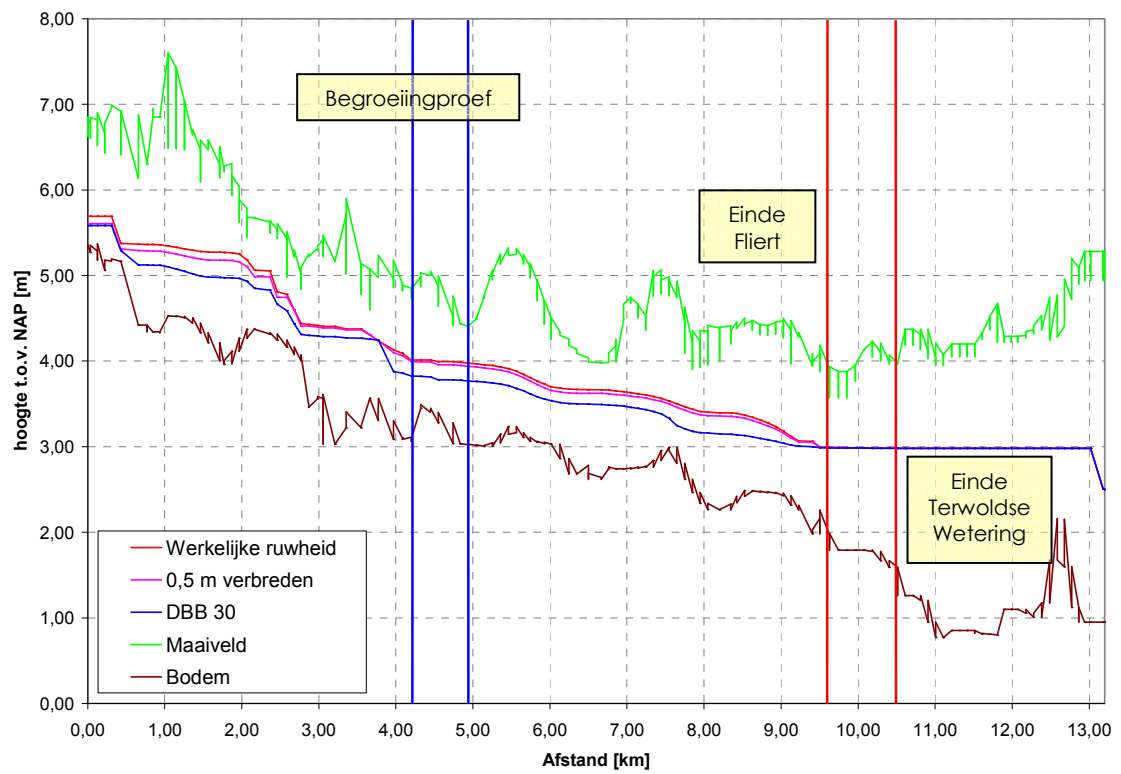


Figuur IV-1: Waterstand in de Fliet wanneer de duikers in de Fliet worden verbreed.

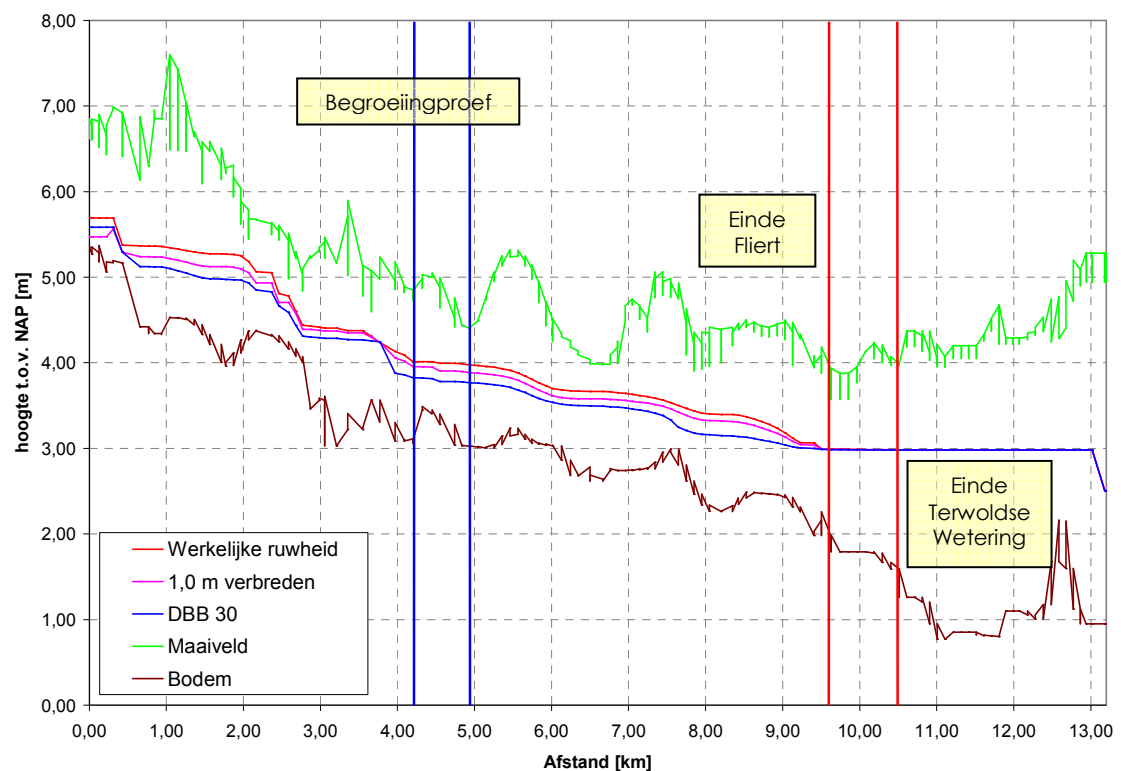


Figuur IV-2: Waterstand in de Fliet wanneer de duikers in de Fliet worden verwijderd.

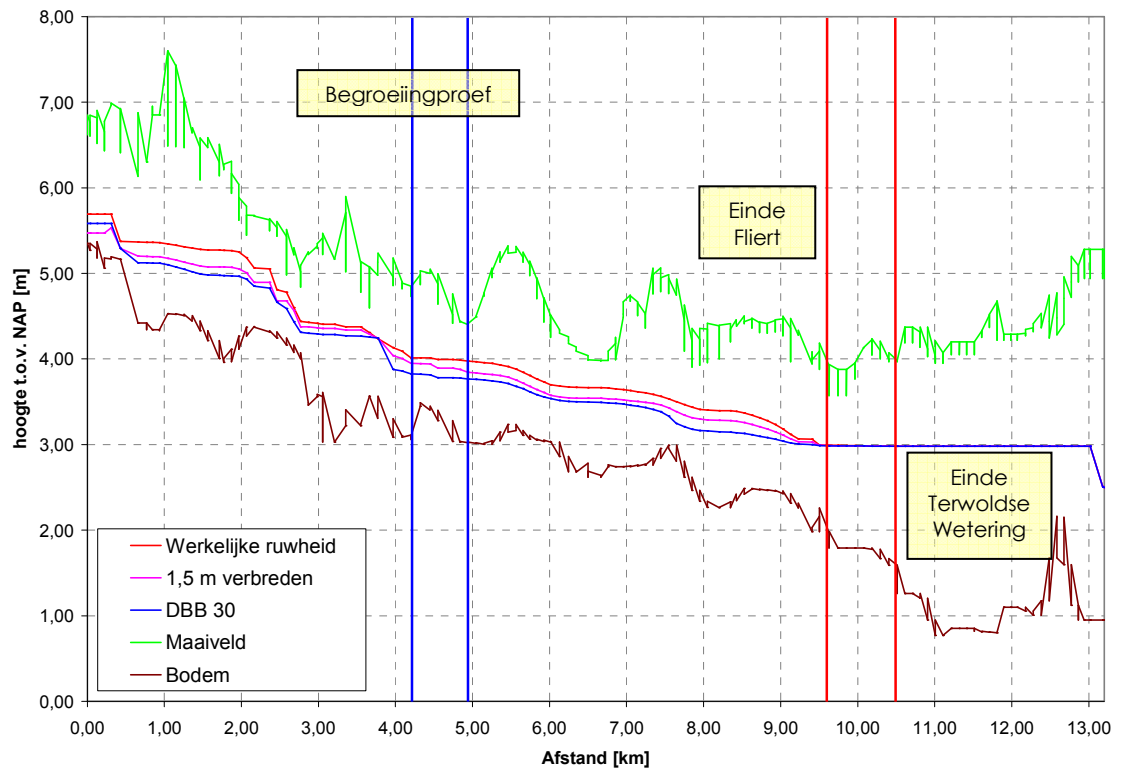
Bijlage V: Verbreding Fliert



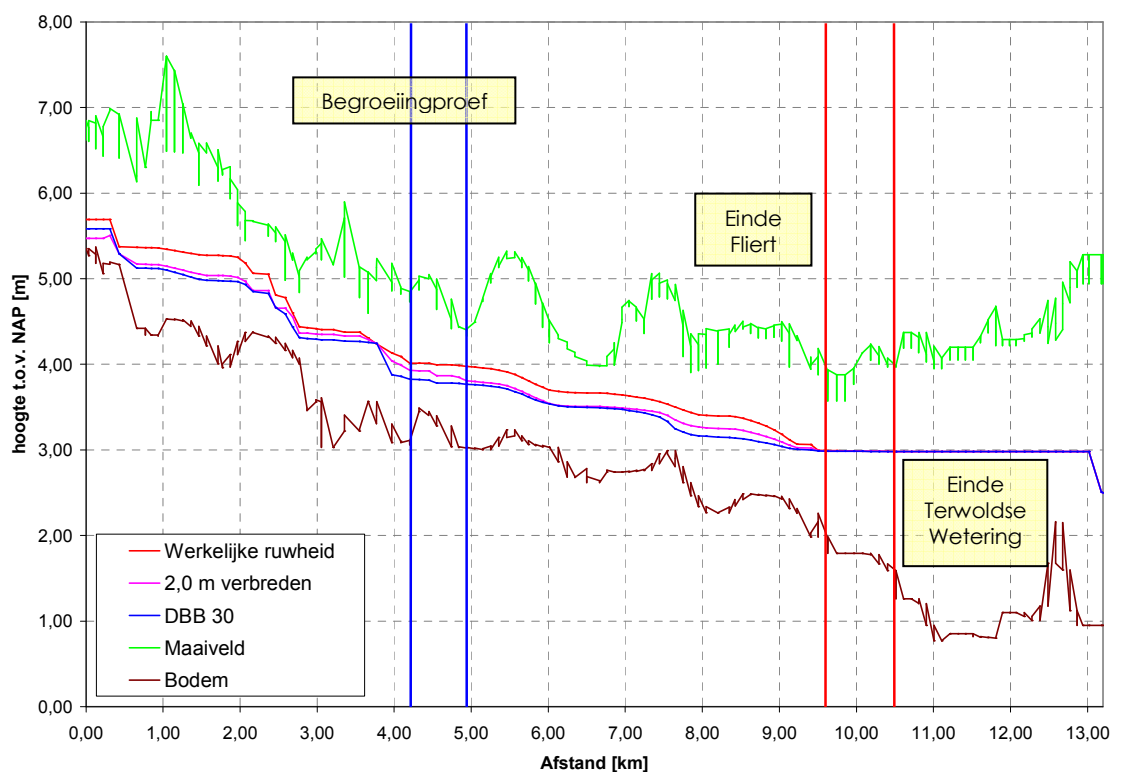
Figuur V-1: Maximale waterstand na 0,5 m verbreding en $T = 10$ bui.



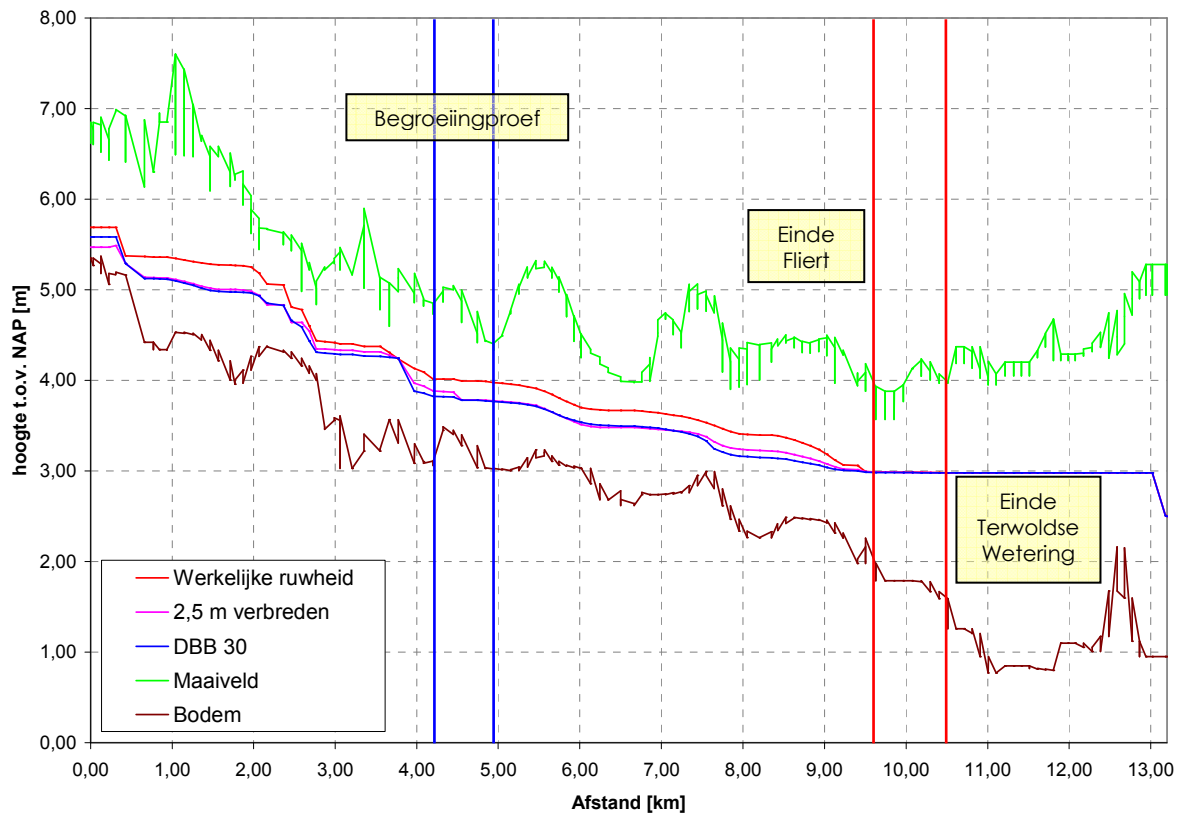
Figuur V-2: Maximale waterstand na 1,0 m verbreding en $T = 10$ bui.



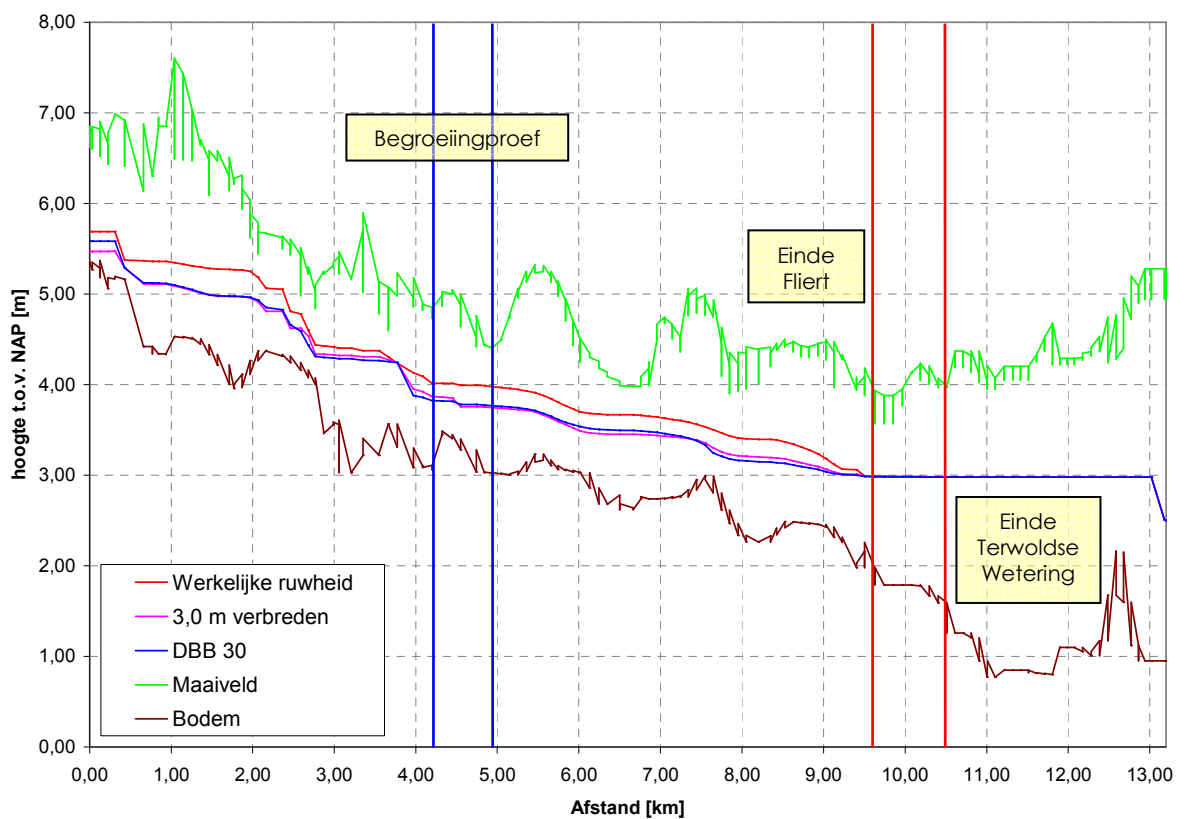
Figuur V-3: Maximale waterstand na 1,5 m verbreding en $T = 10$ bui.



Figuur V-4: Maximale waterstand na 2,0 m verbreding en $T = 10$ bui.

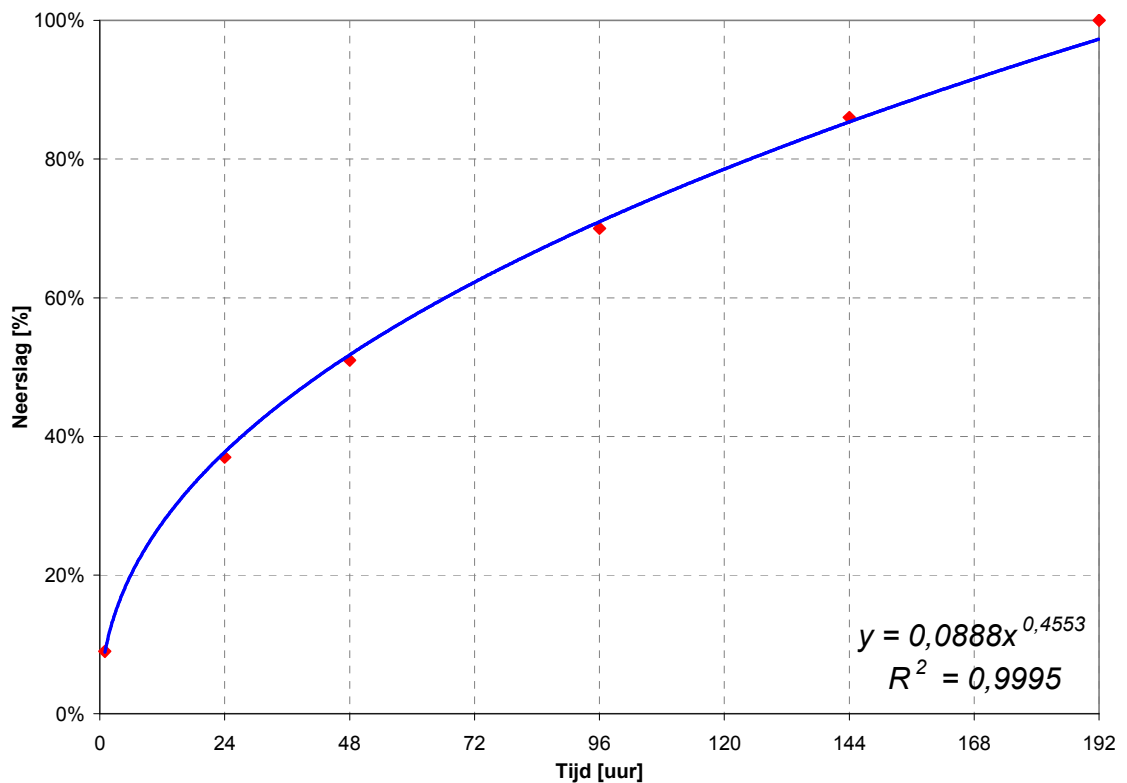


Figuur V-5: Maximale waterstand na 2,5 m verbreding en $T = 10$ bui.

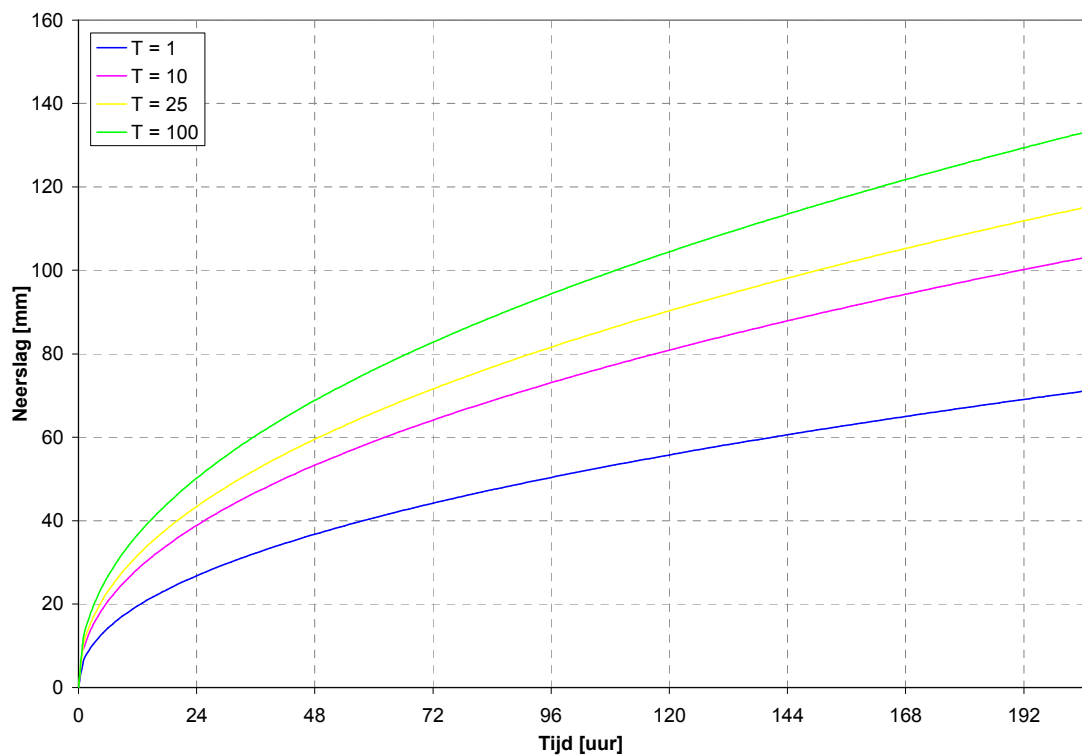


Figuur V-5: Maximale waterstand na 3,0 m verbreding en $T = 10$ bui.

Bijlage VI: Buien



Figuur VI-1: Curve gefit op de verdeling in procenten van de statistische buien, inclusief de daarbij behorende vergelijking.



Figuur VI-2: Cumulatieve neerslag bepaald met de vergelijking uit de grafiek van figuur VI-1.