

Effectiviteit van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn

Bijsturen van de afvoerverdeling tijdens hoogwater

Erik Arnold

RIZA | TUDelft

foto op omslag: Andreas Gursky, 1999 (layout: Corniel Nobel)

Voorwoord

Voor u ligt het rapport van mijn afstudeeronderzoek ter afronding van de opleiding Civiele Techniek, sectie Waterbouwkunde, aan de Technische Universiteit Delft. Het onderwerp van het afstudeeronderzoek komt voort uit een studie, uitgevoerd door HKVlijn in water en WL, getiteld *‘Beperking van overstromingsrisico’s in het Bovenrivierengebied. Een verkennende beleidsanalyse van rampenbeheersing en structurele maatregelen langs de Rijntakken’*.

De begeleiding van het afstuderen is verzorgd door prof. drs. ir. J.K. Vrijling (TU Delft), dr. ir. M. Kok (TU Delft), ir. E. van Velzen (RIZA), ir. C.J.M. Vermeulen (HKVlijn in water) en dr. S. Dijkstra (TU Delft). Gedurende het onderzoek heeft RIZA een werkplek geboden.

Gedurende 9 maanden heb ik met veel plezier aan het onderzoek gewerkt en ik zou dan ook graag iedereen, die me daarbij geholpen heeft, willen bedanken.

Daarnaast zou ik graag de leden van mijn afstudeercommissie willen bedanken voor hun leerzame bijdragen aan de vergaderingen. Ook wil ik graag RIZA en mijn collega’s daar bedanken voor de werkplek en de hulp waar nodig.

Erik Arnold

Delft, augustus 2004

Samenvatting

Zonder rivierdijken overstromen delen van Nederland bij hoogwater. Bescherming tegen water is daarom opgenomen in verschillende wetten en samengevat in de Wet op de Waterkering. Deze Wet deelt Nederland op in 53 dijkkringgebieden met elk een eigen overschrijdingsfrequentie van waterstanden. Langs de Rijntakken geldt dat vrijwel alle dijkkringgebieden een overschrijdingsfrequentie hebben van 1/1250 per jaar. Dit houdt in dat de dijken langs de Rijn worden ontworpen op een waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar. Deze waterstanden worden in het bovenrivieren gebied berekend op basis van een afvoer bij Lobith met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1/1250, ook wel de maatgevende afvoer genoemd.

De maatgevende afvoer is, voor zover bekend, nog nooit opgetreden. Dit betekent dat het onbekend is hoe de rivier zich onder dergelijke omstandigheden gedraagt. Bovendien is de invloed van verschillende natuurlijke processen (de geometrie van de rivier, de vegetatie in het winterbed, beddingsvormen in het zomerbed, de afvoerverdeling bij de splitsingspunten) op de waterstand tijdens hoogwater moeilijk van te voren te voorspellen. Dit betekent dat er allerlei onzekerheden in het spel zijn waardoor er, bij het daadwerkelijk optreden van een maatgevende afvoer, andere waterstanden kunnen ontstaan dan verwacht. In de huidige veiligheidsbenadering is geen rekening gehouden met deze onzekerheden. Hierdoor kunnen zich in werkelijkheid overstromingen voordoen bij bijvoorbeeld een lagere afvoer dan de maatgevende afvoer.

De waterstand op de benedenstroomse Rijntakken is sterk afhankelijk van de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn: een afwijking van enkele procenten in de afvoer geeft al snel een afwijking van enkele decimeters in de (maatgevende) hoogwaterstand. In [Kok et al., 2003] is verondersteld dat de onzekerheid in de waterstand kan worden verkleind door de afvoerverdeling bij te sturen. In de studie is de aanname gedaan dat de afwijkingen in de afvoerverdeling met 25% kunnen worden gereduceerd. Bovenstaande is echter op grove aannamen gebaseerd. Het doel van dit onderzoek is om te onderzoeken of een regelaar die de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijntakken stuurt een bijdrage zou kunnen leveren aan het verminderen van het overstromingskans.

Dit is uitgewerkt door een regelaar te simuleren in een hydraulisch model dat de waterbeweging van de Rijn nabootst. Aan de hand van het effect dat het bijsturen van de afvoerverdeling heeft op de waterstand op de benedenstroomse gelegen Rijntakken wordt een uitspraak gedaan over de effectiviteit van de regelaar. Dit effect is bepaald op basis van een vijftal casestudies waarin de waterbeweging op de Rijn op verschillende manieren is verstoord.

De verstoringen

De verstoringen die in het systeem zijn aangebracht zijn die verstoringen die volgens Schropp (2003) een rol spelen in afwijkingen in de afvoerverdeling:

- variatie van de hydraulische ruwheid;
- morfologische veranderingen in de omgeving van het splitsingspunt;
- windeffecten.

Met deze verstoringen zijn 5 casestudies uitgevoerd waarbij 2 casestudies met variatie in hydraulische ruwheid (hogere hydraulische ruwheid boven een beneden op de Waal), 2 casestudies met wind (windveld 11 dagen en 1 dag voor passeren afvoerpiek) en 1 casestudy met morfologische veranderingen in de omgeving van het splitsingspunt.

De doelen

De verstoringen die de afwijkingen in de afvoerverdeling veroorzaken hebben direct en indirect (via de afvoerverdeling) invloed op de waterstand op de Rijntakken. Als gevolg van de verstoringen zal de waterstand op bepaalde locaties op de Rijntakken boven de verwachte waterstand uitkomen bij die afvoer. Op deze locaties zal bij het passeren van de maatgevende afvoer de waterstand boven het toetspeil uitkomen. Dit negatieve effect ('de pijn') kan op verschillende manieren over de Rijntakken

verdeeld worden door de afvoerverdeling bij te sturen. In deze studie zijn twee doelen geformuleerd die beide onderzocht worden op haalbaarheid:

- de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken
- de pijn concentreren op één Rijntak

Criteria voor bijsturen

Om te toetsen of het waterproces op de Rijntakken verloopt volgens de geformuleerde doelen is het noodzakelijk om op verschillende meetstations langs de Rijntakken de waterstand te meten. Door de gemeten waterstand te vergelijken met de verwachte waterstand bij die afvoer op de meetstations kan vastgesteld worden hoeveel de actuele situatie afwijkt van de doelstelling. Door de afvoerverdeling bij te sturen kan de actuele situatie op de Rijn veranderd worden in de richting van de doelstelling. Om te bepalen welke kant de afvoerverdeling opgestuurd moet worden is de situatie op de verschillende Rijntakken met elkaar vergeleken. De situatie op een enkele Rijntak is vastgesteld worden door gebruik te maken van één of meer meetstations langs de riviertak. In het kader van het onderzoek zijn 3 criteria geformuleerd waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling is bijgestuurd. Hierbij zijn 2 criteria gebaseerd op verschillende meetstations (maximale of de gemiddelde waterstandafwijking) en 1 criterium op één meetstation namelijk het eerste meetstation op de riviertak.

Bijsturen afvoerverdeling

Om het effect te bepalen van het bijsturen van de afvoerverdeling op de waterstand is de regelaar geschematiseerd in een hydraulisch model dat de waterstand op de Rijn nabootst. Hiervoor is gebruik gemaakt van het 1-D Sobek Rijntakken. In het model wordt de afvoerverdeling bijgestuurd door een eenvoudige stuw die aangebracht is op de riviertakken benedenstrooms van de splitsingspunten. Ondanks de sterk vereenvoudigde schematisatie van het regelwerk is de schematisatie voldoende om de haalbaarheid van de doelen in te schatten. Voor de aansturing van de stuwen is gebruik gemaakt van een PI-regelaar (proportioneel integrerend). De PI-regelaar vertaalt de waterstandmetingen naar een instructie voor de stuwen.

Effectiviteit bijsturen afvoerverdeling

In het onderzoek zijn verstoringen in het watersysteem van de Rijn aangebracht die een negatieve invloed hebben op de waterstand tijdens (maatgevend) hoogwater. Als gevolg van de verstoringen zal de waterstand op één of meer Rijntakken boven het toetspeil uitkomen bij maatgevend hoogwater. Op basis van de geformuleerde stuurdoelen wordt de afvoerverdeling zodanig bijgestuurd dat op één of meer Rijntakken dit waterstandverschil verkleind wordt. Door dit waterstandverschil met en zonder bijsturen van de afvoerverdeling met elkaar te vergelijken wordt een beeld gekregen van de effectiviteit van de regelaar. In het onderzoek is de effectiviteit van de regelaar uitgedrukt in een score: verhouding tussen het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Rijntakken met en zonder regelaar.

Resultaten

Stuurdoel 1: door de pijn gelijkmatig te verdelen over de Rijntakken wordt in 2 casestudies het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Rijntakken verkleind met bijsturen (met 43% en 92%), voor de overige 3 casestudies is het effect van bijsturen klein (3 tot 8%). In 2 van de 3 casestudies wordt door bijsturen van de afvoerverdeling de situatie op de Rijntakken verslechterd. Stuurdoel 2: door de pijn te concentreren op één Rijntak kan het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil sterk verkleind worden op de overige Rijntakken door de afvoerverdeling bij te sturen (10 tot 100%). Beide stuurdoelen hebben als nadeel dat de waterstand bovenstrooms van de splitsingspunten wordt opgestuwd. Bovendien duurt het relatief lang voordat een verstoring van 10 cm is bijgestuurd: 3 à 4 dagen. Verstoringen die enkele uren voor de afvoerpiek optreden kunnen hierdoor nauwelijks gecorrigeerd worden.

Aanbevelingen

- Dit onderzoek is gebaseerd op een vijftal casestudies en daarom kan geen algemene uitspraak gedaan worden of de overstromingskans verminderd kan worden voor de geformuleerde stuurdoelen. Om een algemene uitspraak te kunnen doen of de overstromingskans verkleind kan

worden door bijsturen van de afvoerverdeling verdient het aanbeveling om de onzekerheid in de waterstand met bijsturen van de afvoerverdeling vast te stellen in een probabilistische berekening onder invloed van een groot aantal verstoringen. Bovendien zullen de onzekerheden die samenhangen met het bijsturen van de afvoerverdeling ingeschat moeten worden.

- In dit onderzoek is de afvoerverdeling op de Rijn bijgestuurd door de weerstand te verhogen op één riviertak benedenstrooms van het splitsingspunt (door middel van een beweegbare drempel). De waterstand op de bovenstroomse Rijntakken wordt hierdoor sterk opgestuwd. Bijsturen van de afvoerverdeling heeft hierdoor een negatief effect op de overstromingskans op de bovenstrooms gelegen Rijntakken. De afvoerverdeling kan ook gestuurd worden door bijvoorbeeld de weerstand op een riviertak te verlagen (bijvoorbeeld een nevengeul). Wellicht kan door een andere wijze van bijsturen van de afvoerverdeling opstuwning bovenstrooms van de splitsingspunten verkleind of voorkomen worden. Aanbevolen wordt om voor verschillende mogelijkheden waarop de afvoerverdeling bijgestuurd kan worden het effect op de bovenstroomse waterstand te onderzoeken.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting.....	v
Lijst met figuren	xiii
Lijst met tabellen.....	xv
1 Inleiding.....	1
1.1 Algemene problematiek	1
1.2 Probleemomschrijving	2
1.3 Doelstelling	3
1.4 Werkwijze.....	3
1.5 Afbakening	4
1.6 Leeswijzer	5
2 Onzekerheden.....	7
2.1 Inleiding.....	7
2.2 Onzekerheden in het ontwerpproces van rivierdijken	8
2.3 Onzekerheden in de waterstand bij maatgevende afvoer	9
2.3.1 Overzicht.....	9
2.3.2 Natuurlijke variabiliteit.....	10
2.3.3 Modelonzekerheden	13
2.3.4 Totale onzekerheid in maatgevende waterstanden.....	13
2.4 Onzekerheden in de afvoerverdeling.....	14
2.4.1 Onzekerheidsbronnen	14
2.4.2 Kwantificeren	14
2.4.3 Effect op de waterstand.....	17
2.5 Onzekerheden in de regeling.....	18
2.6 Meetonzekerheden	18
2.6.1 Meetfouten.....	18
2.6.2 Methoden om de meetonzekerheid te bepalen	19
2.6.3 Meetmethoden en de meetonzekerheid	20
2.7 Conclusies	22
3 Regeltheorie.....	23
3.1 Basisvoorwaarden voor regelen	23
3.2 Handmatig versus automatisch regelen	24
3.3 Automatisch regelen	25
3.3.1 Vormen van automatisch regelen	25
3.3.2 Keuze regeling.....	25
3.4 Onderdelen van een regeling	26
3.4.1 Proces.....	27
3.4.2 Meetorgaan.....	27
3.4.3 Regelorgaan	27

3.4.4	Corrigerend orgaan.....	29
4	Regelen van de afvoerverdeling op de Rijn.....	31
4.1	Locatiebeschrijving	31
4.2	De doelen van bijsturen	32
4.3	Verschil tussen bijsturen op afvoerafwijkingen en waterstandafwijkingen	32
4.4	Waterstanden of afvoeren	33
4.4.1	Eigenschappen van de verschillende meetmethoden	33
4.4.2	Bestaand meetnet van waterstanden en afvoeren langs de Rijn	35
4.4.3	Uitvoerbaarheid meetmethode tijdens hoogwater	35
4.4.4	Keuze meetmethode.....	35
4.5	Bijsturen op basis van waterstandmetingen	36
4.5.1	Bijsturen op waterstandafwijkingen	36
4.5.2	Criteria waarop basis van waterstanden wordt bijgestuurd.....	36
4.5.3	Bepalen van de verwachte waterstand.....	39
5	Regeling simuleren in een hydraulisch model	41
5.1	Sobek Rijntakken model zonder regeling	41
5.1.1	Modelschematisatie	41
5.1.2	Modelinvoer	43
5.1.3	Calibratie en verificatie	43
5.2	Sobek Rijntakken model met regeling	44
5.2.1	Uitbereiden van het Sobek Rijntakken model.....	44
5.2.2	Schematisatie van het regelwerk.....	45
5.2.3	Instellen van de regelaar	48
6	Effectiviteit van regelen afvoerverdeling.....	51
6.1	Casestudies	51
6.1.1	Keuze van de verstoringen	51
6.1.2	Hydraulische ruwheid	52
6.1.3	Morfodynamiek	53
6.1.4	Wind.....	54
6.2	Methode.....	56
6.2.1	Opzet	56
6.2.2	Modelberekeningen	56
6.2.3	Presentatie.....	57
6.3	Resultaten.....	59
6.3.1	Inleiding.....	59
6.3.2	Casestudy 1: hydraulische ruwheid verhoogd op eerste deel van Waal.....	60
6.3.3	Casestudy 2: hydraulische ruwheid verhoogd op tweede deel van Waal	62
6.3.4	Casestudy 3: opstekende wind 11 dagen voor passeren afvoerpiek.....	64
6.3.5	Casestudy 4: opstekende wind 1 dag voor passeren afvoerpiek bij Lobith	66
6.3.6	Casestudy 5: morfodynamiek op de Waal nabij het splitsingspunt	68
6.3.7	Synthese	70
7	Conclusies en aanbevelingen	77
7.1	Conclusies	77
7.2	Aanbevelingen	78

Verklarende woordenlijst	79
Literatuurlijst	81
Bijlage A: Schematisatie van het regelwerk	A-3
Bijlage B: Instellen van de regelaar	B-3
Bijlage C: Aansturing regelwerken	C-3
Bijlage D: Casestudies	D-3

Lijst met figuren

Figuur 1.1: dijkringgebieden en veiligheidsnormen volgens de Wet op de Waterkering.....	1
Figuur 2.1: schematische weergave van de onzekerheden die invloed hebben op de overstromingskans	7
Figuur 2.2: het 90% betrouwbaarheidsinterval van de werklijn van de Rijn bij Lobith	8
Figuur 2.3: onzekerheden in de maatgevende hoogwaterstanden schematisch weergegeven	9
Figuur 2.4: piekwaterstanden Nijmegen bij aangegeven piekwaterstand Lobith. Alle hoogwaters met $Q_{max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. (bron: Van Vuuren, 2003)	11
Figuur 2.5: systematische daling waterstanden Nijmegen t.o.v. Lobith in de tijd tijdens de hoogwaters met $Q_{max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. (bron: Van Vuuren, 2003).....	11
Figuur 2.6: piekwaterstanden Nijmegen bij aangegeven piekwaterstand Lobith. Alle hoogwaters met $Q_{max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. Gecorrigeerd voor differentiële waterstanddaling per afvoerklasse. (bron: Van Vuuren, 2003)	12
Figuur 2.7: fractie afvoer van Bovenrijn naar de Waal volgens metingen en jaarboek 1994 (bron: Ogink, 2003).....	15
Figuur 2.8: fractie afvoer van Pannerdense Kanaal naar de IJssel volgens metingen en jaarboek 1994. N.B. omcirkelde gegevens zijn waarschijnlijk meetfouten. (bron: Ogink, 2003)	15
Figuur 2.9: verandering in de waterstand op de Rijntakken als de afvoer op de riviertak met $100 \text{ m}^3/\text{s}$ verandert bij extreme afvoeren (bron: Ogink, 2003).....	17
Figuur 2.10: meetfouten (bron: Herschy, 1999).....	19
Figuur 2.11: standaardafwijking r_Q in afvoerklasse. Alle stations excl. Pannerden (bron: van Vuuren, 2001).....	21
Figuur 3.1: schematische voorstelling van een geregeld proces (bron: Cool et al., 1991)	23
Figuur 3.2: voorwaartsregeling (bron: Cool et al., 1991).....	25
Figuur 3.3: regeling door terugkoppeling (bron: Cool et al., 1991)	25
Figuur 3.4: blokschema van een automatische regelkring (bron: Cool et al., 1991)	26
Figuur 3.5: bijdrage proportionele term (blauw) en integrerende term aan ingreep (rood).....	28
Figuur 4.1: het stroomgebied van de Rijn met de splitsingspunten in Nederland	31
Figuur 4.2: verstoringen die invloed uitoefenen op de waterstand bij een gegeven afvoer.....	32
Figuur 4.3: waterstandmeetpunten in Midden-Oost Nederland (bron: www.actuelewaterdata.nl)	35
Figuur 4.4: gebruikte MSW-meetstations	37
Figuur 4.5: waterstandafwijking (verschil tussen gemeten waterstand en verwachte waterstand bij die afvoer) op de meetstations.....	38
Figuur 5.1: sobek schematisering van de Rijntakken (bron: Van der Veen, 2002).....	42
Figuur 5.2: dwarsprofiel Sobek op locatie 869 kmr op de Waal.....	42
Figuur 5.3: koppeling Sobek Rijntakken model met Matlab	44
Figuur 5.4: schematisatie stuw.....	46
Figuur 5.5: locatie van de beweegbare drempels	47
Figuur 5.6: hoge (rode lijn) en lage (blauwe lijn) integrerende versterkingsfactor	49
Figuur 6.1: riviertrajecten waarover de ruwheid van het zomerbed is verhoogd	52
Figuur 6.2: MHW-golven bij Lobith en hun onderschrijdingskansen. Hoe groter de kans, hoe breder de golf. De golf aangeven met de zwarte lijn wordt gebruikt voor MHW-berekeningen. (bron: Schropp, 2002)	53
Figuur 6.3: effect van golfvorm en morfologie op de afvoerverdeling (bron: Schropp, 2002)	53
Figuur 6.4: drempelhoogte als functie van de tijd.....	54
Figuur 6.5: effect van de wind op de afvoerverdeling (bron: Schropp, 2002)	54

Figuur 6.6: afvoer als functie van de tijd bij Lobith.....	55
Figuur 6.7: de gehanteerde methode om de haalbaarheid van de doelen te bepalen	56
Figuur 6.8: effect van bijsturen van de afvoerverdeling op het verschil piekwaterstand en toetspeil op de riviertakken.	58
Figuur 6.9: effect van bijsturen van de afvoerverdeling op het verschil piekwaterstand en toetspeil op de riviertakken	59
Figuur 6.10: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.....	61
Figuur 6.11: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.	61
Figuur 6.12: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.....	63
Figuur 6.13: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op de Waal en de Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.....	63
Figuur 6.14: wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.....	65
Figuur 6.15: wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.....	65
Figuur 6.16: wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.....	67
Figuur 6.17: wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.	67
Figuur 6.18: morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.....	69
Figuur 6.19: morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.	69
Figuur 6.20: voorkomen van overstroming door waterstandafwijking gelijkmatig te verdelen over Rijntakken	74
Figuur 6.21: vroegtijdige overstroming door de waterstandafwijking op de Waal en de Nederrijn te minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.....	75

Lijst met tabellen

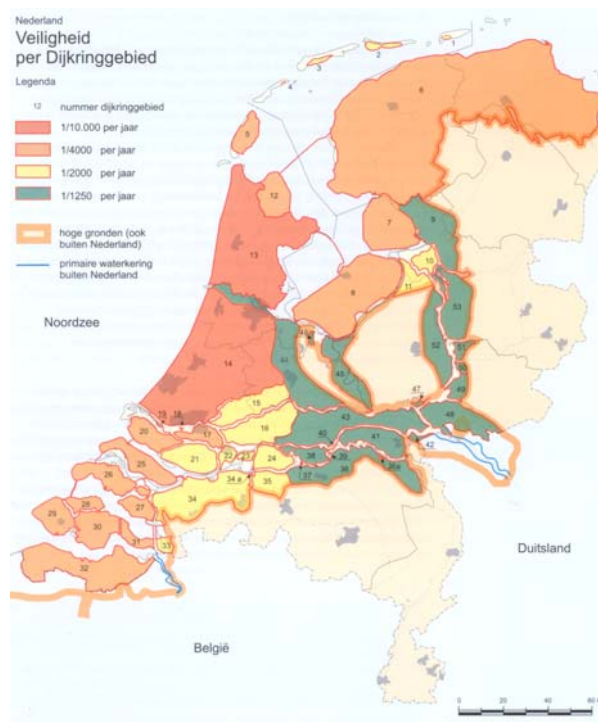
Tabel 1.1:	casestudies.....	4
Tabel 2.1:	standaardafwijking H_{\max} MSW- Q_{\max} Lobith-relatie (rij 1) en H_{\max} MSW- H_{\max} Lobith-relaties (rij 2) voor de hoogwaters met een Q_{\max} van meer dan 8000 m ³ /s.....	12
Tabel 2.2:	indicatieve standaardafwijkingen (σ): modelonzekerheid bij $Q_{\text{Lobith}} = 16000$ m ³ /s.....	13
Tabel 2.3:	indicatieve standaardafwijkingen (σ) in de maatgevende waterstand.....	13
Tabel 2.4:	samenvatting afvoereffecten (bron: Schropp, 2002).....	16
Tabel 2.5:	waterstandverandering in cm op locaties langs de Rijntakken als functie van een afwijking in de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop uitgedrukt als percentage van de MHW-afvoer (bron: Ogink, 2003)	17
Tabel 2.6:	meetmethoden en de meetonzekerheid.....	20
Tabel 4.1:	eigenschappen van de meetmethoden	34
Tabel 4.2:	criteria waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling op de splitsingspunten wordt bijgestuurd.....	36
Tabel 4.3:	bepalen situatie op de verschillende Rijntakken.....	38
Tabel 4.4:	de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken.....	38
Tabel 4.5:	de pijn concentreren op één Rijntak (IJssel).....	38
Tabel 5.1:	integrerende versterkingsfactor (K_i) voor het eerste stuurdoel: waterstandafwijkingen gelijkmatig verdelen over Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel.....	49
Tabel 5.2:	integrerende versterkingsfactor (K_i) voor het tweede stuurdoel: waterstandafwijkingen minimaliseren op Waal en Nederrijn ten koste van Pannerdensch Kanaal en IJssel	50
Tabel 6.1:	toename (+) of afname(-) van de maximale waterhoogte boven toetspeil op de Waal, de Nederrijn en de IJssel als gevolg van bijsturen van de afvoerverdeling ten opzichte van de situatie zonder bijsturen. *) in deze casestudies heeft de afwijking in de afvoer een positief effect op de waterstand op de Rijntakken.....	71
Tabel 6.2:	toename (+) of afname(-) van de maximale waterhoogte boven toetspeil op de Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal, Waal, Nederrijn en de IJssel als gevolg van bijsturen van de afvoerverdeling ten opzichte van de situatie zonder bijsturen.....	72
Tabel 6.3:	toename (+) of afname(-) van de maximale waterhoogte boven toetspeil op de Waal en de Nederrijn als gevolg van bijsturen van de afvoerverdeling ten opzichte van de situatie zonder bijsturen	73

1 Inleiding

1.1 Algemene problematiek

Twee grote rivieren: de Rijn en de Maas monden via Nederlands grondgebied uit in zee. Het water brengt Nederland voorspoed, maar ook gevaar. Om het gevaar te beperken wordt al eeuwen lang geprobeerd de loop van het rivierwater naar de zee zo goed mogelijk te beheersen. Om Nederland bewoonbaar te maken en te houden zijn van oudsher dijken aangelegd.

De hoogte van de dijk werd in het verleden vastgesteld op basis van de hoogst gemeten waterstand plus een overhoogte (0,8 tot 1 meter). Deze methode is tot de ramp in februari 1953 in gebruik gebleven, waarna de Deltacommissie werd geïnstalleerd die de grondslag legde voor de huidige beschermingsniveaus in Nederland (figuur 1.1). Deze werden niet langer gebaseerd op de hoogst gemeten waterstanden, maar op overschrijdingskansen en zogeheten maatgevende waterstanden. Langs de rivieren, tot waar de getij-involed merkbaar wordt, is de rivierafvoer de belangrijkste bepalende factor voor de maatgevende hoogwaterstanden. Deze waterstanden worden berekend op basis van een afvoer met een overschrijdingskans van 1/1250 jaar. In deze veiligheidsfilosofie wordt met onder meer toeslagen voor golfloop, zetting van het dijklichaam en klink van de ondergrond de dijkhoogte vastgesteld. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 is de afvoer waarbij de maatgevende waterstanden worden berekend, vastgesteld op 16000 m³/s voor de Rijn en 3800 m³/s voor de Maas. In lopende projecten 'PKB Ruimte voor de Rivier' en 'Maaswerken' wordt het rivierensysteem zo ingericht dat, gegeven de huidige veiligheidsfilosofie, deze afvoer veilig kan worden afgevoerd [TAW, 2000].



Figuur 1.1: dijkkringgebieden en veiligheidsnormen volgens de Wet op de Waterkering

De maatgevende afvoer is, voor zover bekend, nog nooit opgetreden. Dit betekent dat het onbekend is hoe de rivier zich onder dergelijke omstandigheden gedraagt. Bovendien is de invloed van verschillende natuurlijke processen (de geometrie van de rivier, de vegetatie in het winterbed, beddingsvormen in het zomerbed, de afvoerverdeling bij de splitsingspunten) op de waterstand tijdens hoogwater moeilijk van te voren te voorspellen. Dit betekent dat er allerlei onzekerheden in het spel

zijn waardoor er, bij het daadwerkelijk optreden van een maatgevende afvoer, andere waterstanden kunnen ontstaan dan verwacht. In de huidige veiligheidsbenadering is geen rekening gehouden met onzekerheden. Hierdoor kunnen zich in werkelijkheid overstromingen voordoen bij een lagere afvoer dan de maatgevende afvoer. Om deze reden is het verstandig om naast structurele maatregelen als dijkverhoging en rivierverruiming die genomen worden om het rivierensysteem te laten voldoen aan de wettelijke vereiste veiligheid ook te denken aan rampenbeheersingsmaatregelen.

Rampenbeheersingsmaatregelen worden in tegenstelling tot structurele maatregelen genomen wanneer een mogelijke overstromingscalamiteit zich aandient en hebben als doel om schade te voorkomen of te beperken. Het leggen van zandzakken op de rivierdijk wanneer de dijk dreigt te overstromen is een noodmaatregel waarmee tijdens hoogwater een overstroming voorkomen kan worden.

Het effect (kosten-batenanalyse) van hoogwaterbeschermingsmaatregelen kunnen met de huidige veiligheidsbenadering niet of nauwelijks in beeld worden gebracht, hiervoor zou de veiligheidsbenadering gebaseerd moeten worden op een risicoanalyse. In een risicoanalyse kunnen de kosten van verbetering van de veiligheid door middel van maatregelen worden afgewogen tegen de vermindering van de kans op overstroming verbonden met de omvang van de daardoor veroorzaakte schade. De Deltacommissie, ingesteld na de watersnoodramp in 1953, stelde al een veiligheidsbenadering voor die gebaseerd is op overstromingsrisico's. Destijds was door gebrek aan kennis over het rivierensysteem nog niet mogelijk om de overstromingskans te bepalen en is gekozen voor een veiligheidsbenadering gebaseerd op overschrijdingskansen. Inmiddels is veel kennis opgedaan in het berekenen van overstromingskansen. Momenteel loopt een project "Veiligheid van Nederland in Kaart" (VNK) waarin voor een eerste set van dijkringen de overstromingsrisico's zijn bepaald.

Door HKV en WL [Kok et al., 2003] is een studie uitgevoerd waarin een (globale) kentallen kosten-batenanalyse is gemaakt van diverse methoden (maatregelen/strategieën) om het overstromingsrisico van dijkringen in het bovenriviereengebied te beperken. In de studie zijn strategieën onderzocht die gericht zijn op het gecontroleerd overstromen, op het verkleinen van de onzekerheid in waterstanden, op het vergroten van de afvoercapaciteit en op schadebeperking. Een maatregel die genoemd wordt in de studie om tijdens een hoogwater schade te voorkomen of te beperken is het operationeel bijsturen van de afvoerverdeling tijdens hoogwater doormiddel van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn. De onzekerheid in de afvoerverdeling heeft grote invloed op de waterstand op de benedenstroomse Rijntakken: een afwijking van enkele procenten in de afvoer geeft al snel een afwijking van enkele decimeters in de (maatgevende) hoogwaterstand. Doormiddel van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn kan mogelijk de onzekerheid in de waterstand op de Rijn verkleind worden.

Een kosten-batenanalyse laat in de studie zien dat een regelwerk aantrekkelijk kan zijn. De betrouwbaarheid van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn om tijdens hoogwater de afvoerverdeling bij te sturen kon tijdens deze studie niet goed worden vastgesteld. [Kok et al., 2003].

1.2 Probleemomschrijving

Tijdens hoogwater is de waterstand op de Rijn afhankelijk van verschillende natuurlijke processen: de afvoerverdeling bij de splitsingspunten, de geometrie van de rivier, de vegetatie in het winterbed, beddingsvormen in het zomerbed, etc. Daarnaast is de maatgevende afvoer, voor zover bekend, nog nooit voorgekomen. Dit betekent dat het onbekend is hoe de rivier zich onder dergelijke omstandigheden gedraagt. Als gevolg van natuurlijke processen en gebrek aan kennis en gegevens kunnen bij het daadwerkelijk optreden van een maatgevende afvoer andere waterstanden ontstaan dan verwacht. Dit zou kunnen betekenen dat de veiligheid tegen overstromingen veel minder is dan nu wordt gedacht.

De waterstand op de benedenstroomse Rijntakken is sterk afhankelijk van de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn: een afwijking van enkele procenten in de afvoer geeft al snel een afwijking van enkele decimeters in de (maatgevende) hoogwaterstand. In [Kok et al., 2003] is verondersteld dat de onzekerheid in de waterstand kan worden verkleind door het bijsturen van de afvoerverdeling. In de studie is de aanname gedaan dat de afwijkingen in de afvoerverdeling met 25% kunnen worden gereduceerd. In de studie bleek dat zo'n reductie het overstromingsrisico dusdanig verminderde dat een regelwerk een kosten efficiënte maatregel zou kunnen zijn. Bovenstaande is echter op grove aannamen gebaseerd.

Bovenstaande leidt tot de volgende probleemstelling: is het mogelijk om de afvoerverdeling bij te sturen, en zo ja, heeft dat dan inderdaad voldoende reductie van de onzekerheden in waterstand tot gevolg?

1.3 Doelstelling

In dit onderzoek wordt onderzocht of een regelaar die de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijntakken stuurt een bijdrage kan leveren aan het verminderen van de overstromingskans. Het onderzoek richt zich hierbij op de aansturing van het regelwerk: is het mogelijk om op grond van waterstandmetingen of afvoermetingen de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn zodanig bij te sturen dat de overstromingskans verkleind wordt? Dit zal worden uitgewerkt door een regelaar te simuleren in een 1-dimensionaal hydraulisch model dat de waterbeweging in de Rijntakken nabootst. Aan de hand van het effect dat het bijsturen van de afvoerverdeling heeft op de waterstand op de benedenstroomse gelegen Rijntakken wordt een uitspraak gedaan worden over de effectiviteit van een regelaar.

1.4 Werkwijze

De volgende activiteiten zullen ondernomen worden om te komen tot een antwoord op de vraag: is het mogelijk om de afvoerverdeling bij te sturen, en zo ja, heeft dat dan inderdaad voldoende reductie van de onzekerheden in waterstand tot gevolg?

Door middel van literatuuronderzoek zal de onzekerheid in de afvoerverdeling ingeschat worden die bij hoogwater verwacht kan worden. Daarnaast zal vastgesteld worden welke verstoringen het meeste invloed uitoefenen op de afvoerverdeling tijdens hoogwater.

Om het effect van bijsturen van de afvoerverdeling op de waterstand op de benedenstroomse Rijntakken vast te stellen zal de regelaar geschematiseerd worden in een model dat de waterbeweging in de Rijn nabootst. Het effect zal bepaald worden aan de hand van een vijftal casestudies. In de casestudies, weergegeven in tabel 1.1, is de waterbeweging op de Rijn op verschillende manieren verstoord. De verstoringen hebben gemeenschappelijk dat ze allemaal een effect hebben op de afvoerverdeling.

Tabel 1.1: casestudies

verstoring	omschrijving
hydraulische ruwheid	ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop; ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop;
wind	wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen; wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen;
morfodynamiek	morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensche Kop.

De onzekerheid in de waterstand met en zonder regelaar kan kwantitatief bepaald worden door de verstoringen die invloed uitoefenen op de afvoerverdeling als stochasten te beschouwen bij het berekenen van de waterstand. In plaats van toekenning van een vaste waarde worden de onzekerheden in de afvoerverdeling nu beschreven door een kansverdeling met een bepaalde verwachtingswaarde en een standaardafwijking. De moeilijkheid is dat in veel gevallen de kansverdeling van de verstoringen niet bekend is en hierdoor wordt een nieuwe onzekerheid geïntroduceerd. Door de waterstand een aantal keer te berekenen met verschillende waarden voor de verstoringen die invloed hebben op afvoerverdeling kan de invloed zichtbaar gemaakt worden van de verstoringen op de waterstand. De verkregen spreiding in de waterstand geeft de onzekerheid in de waterstand weer. De Monte Carlo methode is een praktische methode waarmee de invloed van verschillende waarden van parameters op het eindresultaat onderzocht kan worden rekening houdend met de kans van voorkomen van de parameters.

1.5 Afbakening

De mogelijke reductie in de onzekerheid van de waterstand zal in dit onderzoek niet kwantitatief worden vastgesteld. De beschikbare tijd voor het afstudeeronderzoek is daarvoor niet toereikend. Wel zal kwalitatief een uitspraak gedaan worden over de mogelijke reductie in de onzekerheid in de waterstand. De uitspraak zal gebaseerd worden op een vijftal cases waarin kwantitatief vastgesteld zal worden welke effecten het bijsturen van de afvoerverdeling heeft op de waterstand langs de benedenstrooms gelegen takken.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk twee beschrijft het literatuuronderzoek. In het literatuuronderzoek worden de factoren onderzocht die van invloed zijn op de onzekerheid in de waterstand. De afvoerverdeling heeft grote invloed op de onzekerheid in de waterstand en deze onzekere factor zal nader onderzocht worden. In hoofdstuk drie zal aandacht besteed worden aan regeltheorie. De basisvoorwaarden voor regelen zullen hierin aanbod komen, daarnaast zal aandacht besteed worden aan de verschillende onderdelen van een regeling. Hoofdstuk vier spitst zich toe op het regelen van de afvoerverdeling op de Rijn. Om het effect van bijsturen op de waterstand te bepalen zal in hoofdstuk vijf de regelaar geschematiseerd worden in een model dat de waterbeweging op de Rijn nabootst. In hoofdstuk zes zal aan de hand van een vijftal case studies het effect vastgesteld worden dat bijsturen van de afvoerverdeling heeft op de waterstand langs de benedenstrooms gelegen riviertakken. Tenslotte komen in hoofdstuk zeven de conclusies en de aanbevelingen aanbod.

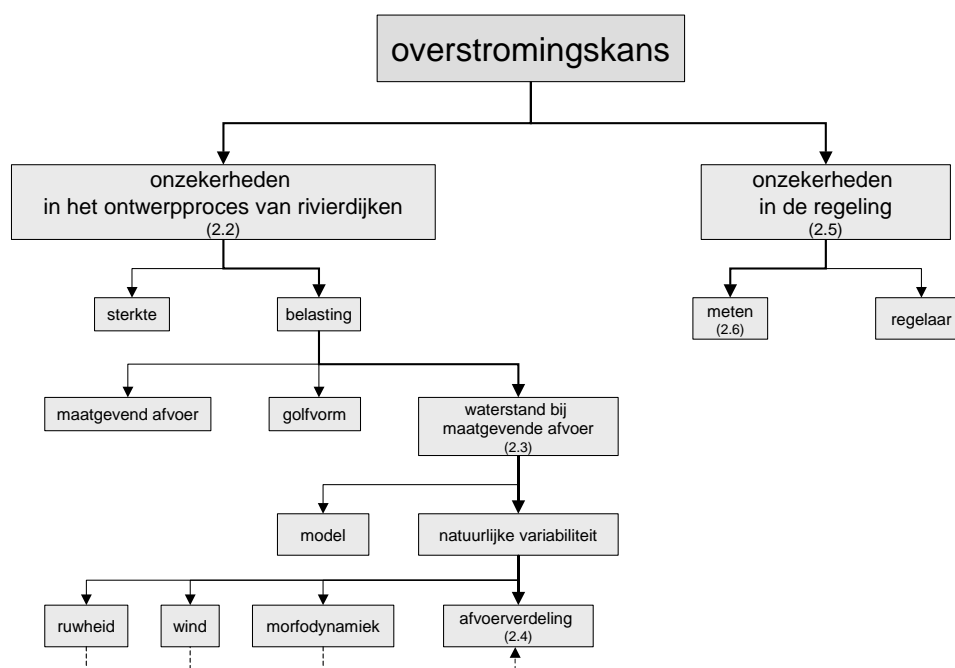
2 Onzekerheden

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op onzekerheden, zowel in het ontwerpproces van rivierdijken als in de regeling, die de overstromingskans beïnvloeden. Of de overstromingskans daadwerkelijk verkleind kan worden is afhankelijk van de grootte waarmee de onzekerheden in het ontwerpproces van rivierdijken (onzekerheid in waterstand) verkleind kan worden en de grootte van de onzekerheid die ontstaat als gevolg van het bijsturen van de afvoerverdeling (zie figuur 2.1).

Als gevolg van onzekerheden in het ontwerpproces van rivierdijken zoals onzekerheden in de maatgevende afvoer, de golfvorm en de waterstand kunnen in werkelijkheid overstromingen optreden bij een lagere afvoer dan verwacht. De kans hierop kan verkleind worden door deze onzekerheden te verkleinen. In het kader van het onderzoek zal onderzocht worden of het mogelijk is om de onzekerheid in de waterstand te verkleinen. De onzekerheid in de waterstand kan mogelijk verkleind worden door de afvoerverdeling bij te sturen op de splitsingspunten van de Rijn.

Met het bijsturen van de afvoerverdeling worden echter ook onzekerheden geïntroduceerd. Hierbij kan gedacht worden aan meetonzekerheden en onzekerheden die samenhangen met het gebruik van de regelaar.



Figuur 2.1: schematische weergave van de onzekerheden die invloed hebben op de overstromingskans

In de eerste paragraaf (2.2) zal ingegaan worden op onzekerheden in het ontwerpproces van rivierdijken. Hierbij zal hoofdzakelijk aandacht besteed worden aan de onzekerheden die verkleind kunnen worden. De onzekerheid in de waterstand (2.3) kan mogelijk verkleind worden door de onzekerheid in de afvoerverdeling te verkleinen (2.4) door middel van bijsturen van de afvoerverdeling. Hierna (2.5) zal aandacht besteed worden aan de onzekerheden in de regeling: meetonzekerheid (2.6). Het hoofdstuk wordt afgesloten met conclusies (2.7).

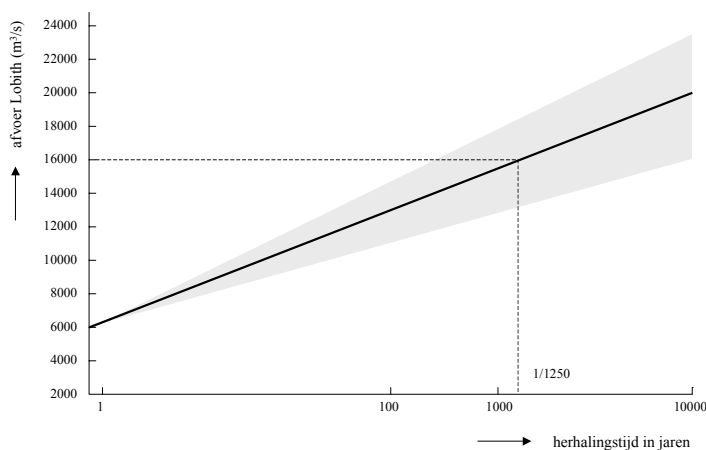
2.2 Onzekerheden in het ontwerpproces van rivierdijken

De dijkhoogte is in de huidige veiligheidsbenadering, zoals in de inleiding is aangegeven, afgeleid van de maatgevende waterstand. De maatgevende waterstand is weer afgeleid van de maatgevende afvoer. Zowel bij het bepalen van de maatgevende afvoer als maatgevende waterstand spelen onzekerheden een belangrijke rol.

Hieronder zijn de belangrijkste onzekerheden in het ontwerpproces opgesomd en toegelicht. De eerste drie onzekerheden hebben betrekking op de belasting en de laatste onzekerheid op de sterkte van een rivierdijk. In het kader van het onderzoek zal dieper ingegaan worden op de onzekerheid in de waterstand bij de maatgevende afvoer (ad 3). Bijsturen van de afvoerverdeling tijdens hoogwater is namelijk gericht op het verkleinen van de onzekerheid in de waterstand.

1. onzekerheid in de maatgevende afvoer
2. onzekerheid in de golfvorm
3. onzekerheid in de waterstand bij de maatgevende afvoer
4. onzekerheid in de sterkte van een rivierdijk

ad 1) De maatgevende afvoer bij Lobith ($16000 \text{ m}^3/\text{s}$) is via een statistische analyse afgeleid uit piekafvoeren die zich in het verleden hebben voorgedaan. Op de Rijn bij Lobith wordt gemeten vanaf het jaar 1901. Voordat een statistische analyse uitgevoerd kan worden zullen de meetgegevens gecorrigeerd moeten worden voor veranderingen die het stroomgebied van de Rijn in de 20^e eeuw heeft doorgemaakt. Het resultaat van een statistische analyse is een grafiek met op de horizontale as de kans van voorkomen van hoogwaters en op de verticale as de hoogte van de afvoer (zie figuur 2.2). De lijn door de opgetreden piekafvoeren wordt de werklijn genoemd. Door extrapolatie van die lijn kan de afvoer met een kans van voorkomen van 1/1250 per jaar worden afgelezen. De statistische analyse brengt echter statistische onzekerheden met zich mee. Statistische onzekerheid ontstaat doordat de parameters van de kansverdeling geschat worden op basis van een relatief korte reeks piekafvoeren. Hoe meer gegevens, des te kleiner is de statistische onzekerheid. Ook de onzekerheid met betrekking tot de keuze van het type kansverdeling behoort tot de statistische onzekerheid. De onzekerheid in de werklijn is aangegeven in figuur 2.2 door middel van een onzekerheidsband.



Figuur 2.2: het 90% betrouwbaarheidsinterval van de werklijn van de Rijn bij Lobith

ad 2) Tijdens hoogwater zal als gevolg van dynamische effecten de top van een hoogwatergolf afvlakken, ook wel topvervlakking genoemd. Hoe groot het effect van topvervlakking is hangt onder andere af van de golfvorm: hoe steiler de golf hoe groter de topvervlakking. De golfvorm wordt hoofdzakelijk bepaald door de mate van samenvallen in de tijd van piekafvoeren van de grote zijrivieren met die in de Rijn zelf. De richting en de snelheid waarmee een regenfront het stroomgebied passeert heeft hierop grote invloed. De richting en

de snelheid waarmee een regenfront het stroomgebied passeert is bij elk hoogwater anders waardoor het effect van topvervlakking op de waterstand onzeker is.

- ad 3) In de huidige veiligheidsbenadering worden de maatgevende hoogwaterstanden op de Rijntakken berekend op basis van een afvoer bij Lobith met een overschrijdingskans van 1/1250 jaar. Daarbij wordt gebruik gemaakt van computermodellen waarmee de stroming van het water in de rivier nagebootst kan worden. Bij de rekenprocedure van afvoer naar lokale waterstanden worden allerlei aannames gedaan. Die zorgen er uiteindelijk voor dat de waterstanden die berekend zijn kunnen afwijken van de waterstanden die onder de gegeven afvoeromstandigheden in werkelijkheid voorkomen.
- ad 4) Naast onzekerheden die betrekking hebben op de belasting van een rivierdijk zijn er ook onzekerheden in de sterkte van een rivierdijk. Faalmechanismen als piping, afschuiven, golfoverslag, etc. zijn omgeven door onzekerheden.

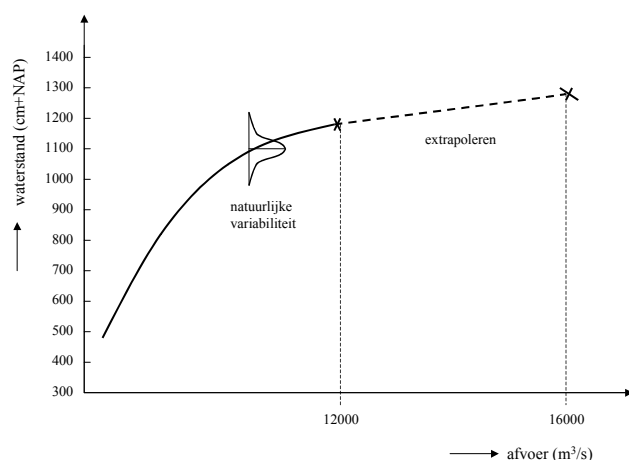
2.3 Onzekerheden in de waterstand bij maatgevende afvoer

Op grond van de maatgevende afvoer bij Lobith kunnen de maatgevende hoogwaterstanden berekend worden op de Rijntakken. Daarbij wordt gebruik gemaakt van computermodellen waarmee de stroming van het water in de rivier wordt nagebootst. De waterstanden worden hoofdzakelijk bepaald door de ruimte die in de rivier aanwezig is om het water af te voeren en door de stromingsweerstand die het water ondervindt van bijvoorbeeld vegetatie in de uiterwaarden. Bij het bepalen van de maatgevende waterstanden spelen onzekerheden een belangrijke rol en hierop zal in de komende paragraaf dieper worden ingegaan.

2.3.1 Overzicht

In [Van Velzen, 2003] worden natuurlijke variabiliteit van het rivierensysteem en onzekerheden die te maken hebben met model gebruik als voornaamste onzekerheidsbronnen genoemd in de maatgevende waterstanden.

De natuurlijke variabiliteit wordt bepaald door de variatie in allerlei natuurlijke processen op de Rijn: opwaaiing, topvervlakking, ruwheidsvariëaties in winter- en zomerbed, morfologische processen, laterale instromingen, afvoerverdeling op splitsingspunten, etc. Bij een bepaalde afvoer te Lobith kan de waterstand op een willekeurige plaats in het rivierengebied, als gevolg hiervan, een bepaalde spreiding vertonen ten opzichte van de verwachtingswaarde (zie figuur 2.3).



Figuur 2.3: onzekerheden in de maatgevende hoogwaterstanden schematisch weergegeven

Naast natuurlijke variabiliteit kan de waterstand bij het daadwerkelijk optreden van een maatgevende afvoer afwijken ten gevolge van modelonzekerheden. De maatgevende waterstanden op de Rijntakken worden namelijk voorspeld doormiddel van een model. Modellen zijn echter in beperkte mate in staat om de werkelijkheid te beschrijven en hierdoor ontstaat een fout. Van Velzen maakt hierbij onderscheid tussen twee soorten onzekerheden. De eerste onzekerheid heeft te maken met de onzekerheid of het calibratiehoogwater wel representatief is voor het systeem. Een calibratiehoogwater is representatief in het geval het precies het gemiddelde van de natuurlijke spreiding heeft, de kans hierop is echter klein. De tweede onzekerheid ontstaat bij het extrapoleren van calibratiehoogwater (12.000 m³/s) naar maatgevend hoogwater (16.000 m³/s). Bij de laatste maakt Van Velzen onderscheid tussen twee foutenbronnen. De eerste categorie fouten ontstaat door beperkingen in de schematisatie, procesbeschrijving en procesparameters die tijdens de calibratie “weggepoetst” zijn in de zomerbedruwheid maar bij extrapolatie een fout veroorzaken. De tweede categorie fouten ontstaat doordat de fysische processen tussen het calibratiehoogwater en het maatgevend hoogwater veranderen.

2.3.2 Natuurlijke variabiliteit

In [Van Vuuren, 2003] is de standaardafwijking van de natuurlijke variabiliteit afgeleid uit langjarige meetreeksen op de MSW-stations (Monitoring Systeem Water)¹. Hierbij is gebruik van piekwaterstanden tijdens historische hoogwaters op de Rijntakken.

De natuurlijke spreiding in de piekwaterstanden is zichtbaar gemaakt:

- via de relatie tussen piekafvoer bij Lobith en piekwaterstand op de MSW-stations, waarmee de absolute spreiding in de piekwaterstanden wordt verkregen en
- via de spreiding tussen piekwaterstand Lobith en piekwaterstand op de MSW-stations, waarmee de spreiding in de piekwaterstanden ten opzichte van de waterstand te Lobith wordt verkregen.

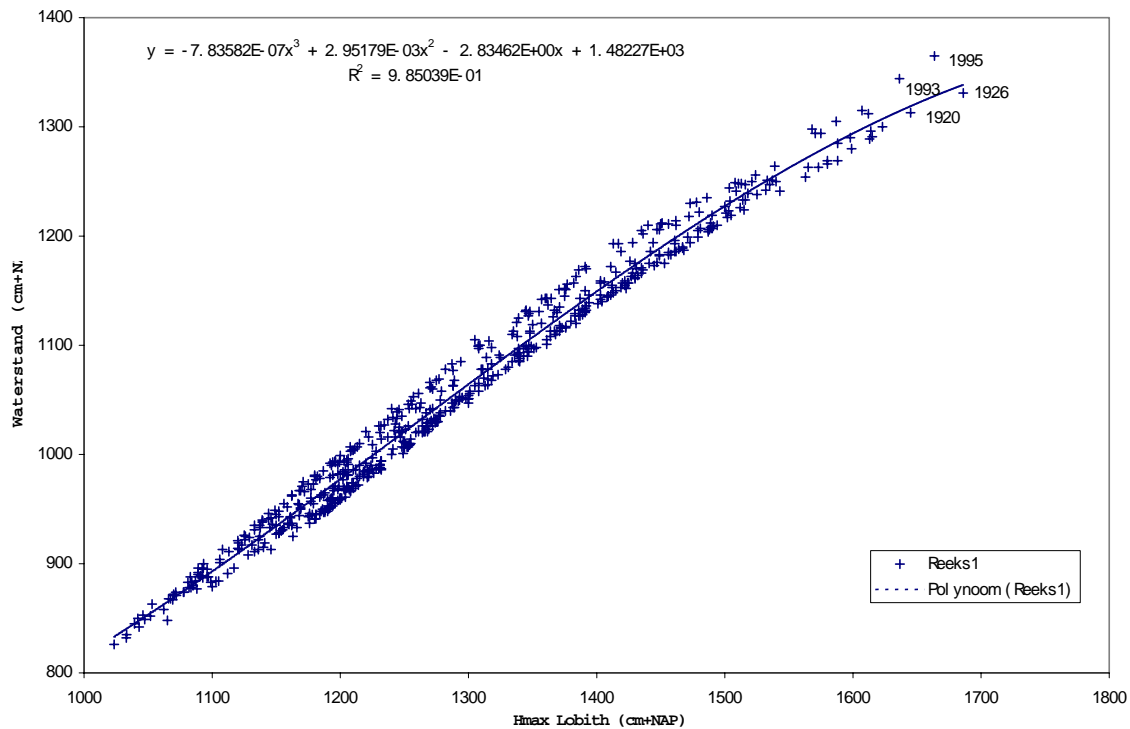
De tweede relatie is nauwkeuriger omdat gebruik gemaakt wordt van een piekwaterstand bij Lobith in plaats van een piekafvoer. De piekwaterstand wordt direct gemeten tijdens hoogwater terwijl de piekafvoer afgeleid wordt uit de piekwaterstand door middel een Qh-relatie. Het gebruik van een Qh-relatie brengt onzekerheden met zich mee. Een Qh-relatie kan een afwijking vertonen ten opzichte van de werkelijkheid als gevolg van in de tijd variërende omstandigheden: wind, bodemveranderingen, ruwheden, etc. en door hydraulische verschijnselen als hysteresis en topvervlakking.

Bij het bepalen van de natuurlijke variabiliteit is gebruik gemaakt van de toppenlijst van Lobith in de periode 1901-2001. In de toppenlijst is de datum, de piekafvoer (Q_{\max}) en de piekwaterstand (H_{\max}) van de opeenvolgende toppen gegeven. In de analyse zijn uitsluitend toppen meegenomen waarvoor geldt dat ze tenminste 15 dagen uit elkaar liggen en $Q_{\max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

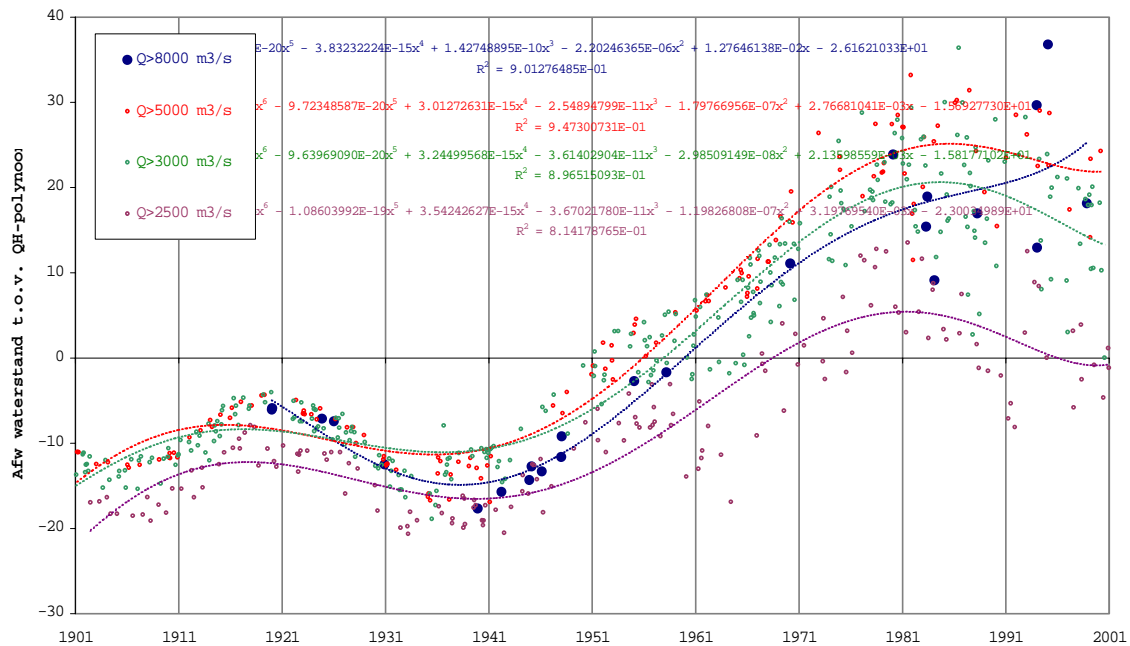
De natuurlijke spreiding in de piekwaterstanden is verkregen door piekafvoeren bij Lobith of piekwaterstanden bij Lobith uit te zetten tegen piekwaterstanden op een MSW-station voor alle hoogwaters met $Q_{\max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. Voor het MSW-station Nijmegen zijn in figuur 2.4 de piekwaterstanden bij corresponderende piekwaterstanden Lobith aangegeven. In de figuur is door de punten een polynoom gefit. Aangezien de piekwaterstanden in figuur 2.4 niet gecorrigeerd zijn voor veranderingen in de rivier die tijdens honderd jaar zijn opgetreden, zoals: bodemdaling zomerbed, opslibbing winterbed, kanalisatie en normalisatie, veranderingen in stuwbeheer, veranderingen in dijkhoogten versus overlaten, etc. geeft de spreiding om de polynoom nog niet zuiver de natuurlijke variabiliteit weer. In de eerste relatie wordt het effect van veranderingen in de rivier benedenstrooms van Lobith geëlimineerd door uit te gaan van de afvoer bij Lobith. Veranderingen in de rivier benedenstrooms van het MSW-station spelen echter nog wel een rol. Bij de tweede relatie speelt het effect van veranderingen in de rivier zowel een rol benedenstrooms van Lobith als benedenstrooms van het MSW-station. In beide relaties is het effect van veranderingen in

¹ Rijkswaterstaat beschikt over een aantal meetnetten waaronder het Monitoring Systeem Water (MSW). Dit meetnet levert doorlopend informatie over de actuele waterstanden op de Nederlandse kust- en binnenwateren. Langs de Bovenrijn bevinden zich 29 MSW-meetpunten.

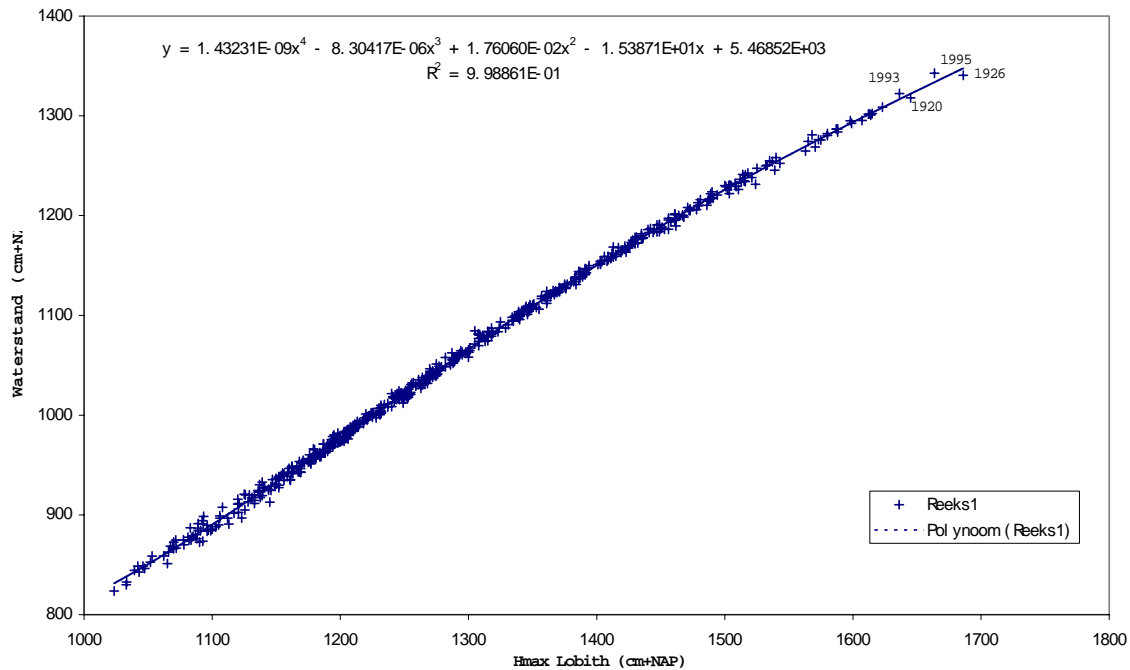
de rivier dus merkbaar. Om de spreiding ten gevolgen van de veranderingen in de rivier uit te filteren is in figuur 2.5 de afwijking per afvoerklasse uitgezet tegen de tijd en is voor iedere afvoerklasse een lijn door de puntenwolk gefit. In figuur 2.6 is volgens de relaties van figuur 2.5 gecorrigeerd voor veranderingen in de rivier.



Figuur 2.4: piekwaterstanden Nijmegen bij aangegeven piekwaterstand Lobith. Alle hoogwaters met $Q_{max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. (bron: Van Vuuren, 2003)



Figuur 2.5: systematische daling waterstanden Nijmegen t.o.v. Lobith in de tijd tijdens de hoogwaters met $Q_{max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. (bron: Van Vuuren, 2003)



Figuur 2.6: piekwaterstanden Nijmegen bij aangegeven piekwaterstand Lobith. Alle hoogwaters met $Q_{max} > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in de periode 1901-2001. Gecorrigeerd voor differentiële waterstanddaling per afvoerklasse. (bron: Van Vuuren, 2003)

Aangenomen wordt dat de standaardafwijking van de puntenwolk in figuur 2.6 een redelijke betrouwbare indicatie is van de natuurlijke variabiliteit. Voor hoogwaters met een Q_{max} van meer dan $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ (24 hoogste hoogwaters) is de standaardafwijking weergegeven in tabel 2.1. Het 95% betrouwbaarheidsinterval van de natuurlijke variabiliteit komt overeen met ca. twee keer de standaardafwijking.

Tabel 2.1: standaardafwijking $H_{max} \text{ MSW}-Q_{max}$ Lobith-relatie (rij 1) en $H_{max} \text{ MSW}-H_{max}$ Lobith-relaties (rij 2) voor de hoogwaters met een Q_{max} van meer dan $8000 \text{ m}^3/\text{s}$

methode	Lobith (cm)	Nijmegen (cm)	Tiel (cm)
$H_{max}-Q_{max}$ (1)	8,3	8,2	9,9
$H_{max}-H_{max}$ (2)	0,0	4,3	3,9

methode	Pannerden (cm)	Arnhem (cm)	Culemborg (cm)
$H_{max}-Q_{max}$ (1)	8,0	11,6	16,0
$H_{max}-H_{max}$ (2)	5,3	10,5	8,1

methode	Doesburg (cm)	Zutphen (cm)	Olst (cm)
$H_{max}-Q_{max}$ (1)	7,6	13,2	10,9
$H_{max}-H_{max}$ (2)	7,6	13,0	12,6

In [Ogink, 2003] is bovenstaande methode waarmee de natuurlijke variabiliteit is ingeschat geanalyseerd. De gepresenteerde standaardafwijkingen voor de maximale waterstand als indicator voor de natuurlijke variabiliteit geven volgens Ogink een te optimistisch beeld van de aanwezige variabiliteit. In beide methoden wordt een deel van de ruis onderdrukt door uit te gaan van de dagwaarden en moeten voorts vraagtekens worden gezet bij de piekwaterstanden voor Lobith.

2.3.3 Modelonzekerheden

In [Van Velzen, 2003] zijn de onzekerheden die te maken hebben met modelgebruik ingeschat. De modelonzekerheden (zie paragraaf 2.3.1) zijn ingeschat op grond van ervaring van deskundigen (tabel 2.2). In een review [Ogink, 2003] schat Ogink de standaardafwijking hoger in.

Tabel 2.2: indicatieve standaardafwijkingen (σ): modelonzekerheid bij $Q_{Lobith} = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$

soort onzekerheid	Nederrijn (cm)	Waal (cm)	IJssel (cm)
modelonzekerheden	9,3	12,2	8,7

2.3.4 Totale onzekerheid in maatgevende waterstanden

In [Van Velzen, 2003] is de totale onzekerheid in de maatgevende waterstand bepaald op grond van de inschatting van de natuurlijke variabiliteit (2.3.2) en van de modelonzekerheden (2.3.3). De overall standaardafwijking in de modelonzekerheid wordt gevonden door de wortel van de som van de kwadratische individuele bijdragen (tabel 2.3). De natuurlijke variabiliteit en de modelonzekerheid worden hierbij als twee onafhankelijke grootheden beschouwd. Door Van Velzen wordt opgemerkt dat onderstaande waarden een sterk indicatief karakter hebben omdat ze gebaseerd zijn op grove aannames.

Tabel 2.3: indicatieve standaardafwijkingen (σ) in de maatgevende waterstand

soort onzekerheid	Nederrijn (cm)	Waal (cm)	IJssel (cm)
natuurlijke variabiliteit	9,3	4,1	11,1
modelonzekerheden	9,3	12,2	8,7
Totaal	13,2	12,9	14,1

De onzekerheid in de maatgevende waterstand met een 95% betrouwbaarheidsinterval (2σ) komt volgens tabel 2.3 uit op 28 centimeter voor de IJssel en ongeveer 26 centimeter voor de Waal en de Nederrijn.

In [Kok et al., 2003] wordt verondersteld dat de onzekerheid in de waterstand verkleind kan worden door het bijsturen van de afvoerverdeling. Voor tabel 2.2 zou dit betekenen dat de standaardafwijking in de maatgevende waterstand verkleind kan worden. Door het bijsturen van de afvoerverdeling wordt de standaardafwijking in de natuurlijke variabiliteit verkleind: een afwijking in de afvoerverdeling is namelijk één de oorzaken van de natuurlijke variabiliteit. In bovenstaande studie is de aanname gedaan dat de afwijkingen in de afvoerverdeling met 25% kunnen worden gereduceerd. In de volgende paragraaf zal aan de hand van literatuuronderzoek onderzocht worden hoe groot de afvoerafwijking zou kunnen zijn bij maatgevend hoogwater.

2.4 Onzekerheden in de afvoerverdeling

In deze paragraaf zal eerst (2.4.1) aandacht besteed worden aan verstoringen die een afwijking van de afvoer tot gevolg hebben: de onzekerheidsbronnen. Hierna (2.4.2) zal de grootte van de afvoerafwijking ingeschat worden door middel van literatuuronderzoek. Ten slotte (2.4.3) zal het effect van een afvoerafwijking bepaald worden op de waterstand op de benedenstroomse Rijntakken.

2.4.1 Onzekerheidsbronnen

Tijdens hoogwater hebben de volgende onzekerheidsbronnen invloed op de afvoerverdeling [Kok et al., 2003]:

- Morfologische veranderingen tijdens een afvoergolf (morfodynamiek) die een belangrijke invloed op de ruwheid van het zomerbed kan hebben.
- Hydraulische ruwheid van de uiterwaarden (werkelijke ruwheid van vegetatie) onder maatgevende omstandigheden.
- Veranderingen van de riviergeometrie tussen de 5-jaarlijkse MHW bepalingen.
- Bezwiiken van afvoerverdelende kaden en overlaten.
- Zijdelingse uitstroming door het falen van dijken of het vullen van retentiebekkens.
- Opstuwing door zijdelingse toestroming.
- Opstuwing door wind.
- Vorm van de afvoergolf.

2.4.2 Kwantificeren

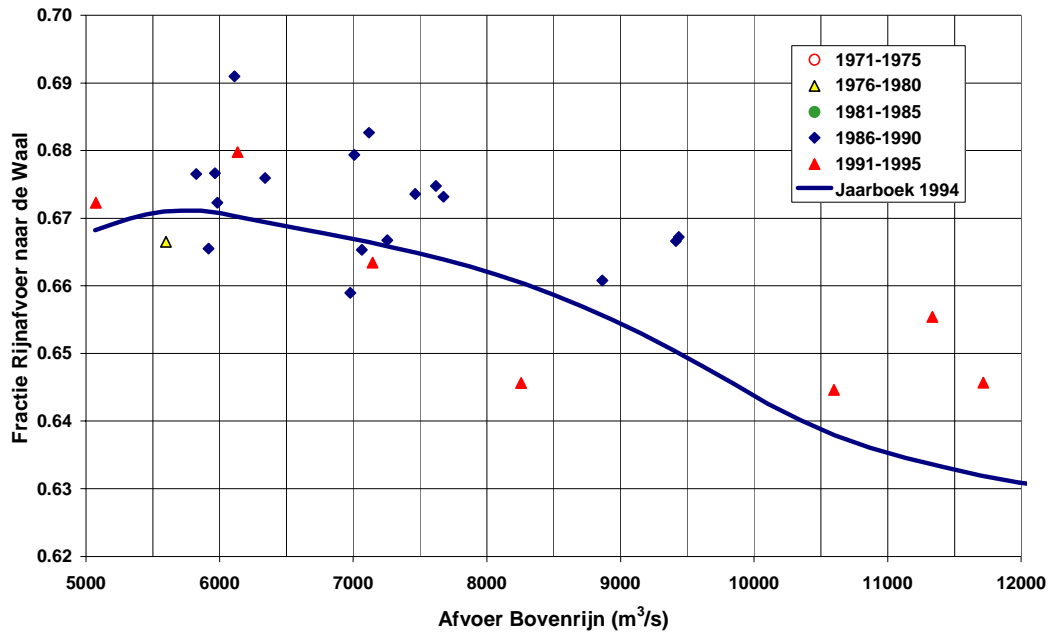
In de literatuur is de onzekerheid in de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn op verschillende manieren ingeschat:

1. analyse van historische afvoermetingen
2. gevoeligheidsanalyse in een hydraulisch model
3. afgeleid uit de natuurlijke variabiliteit

Ad 1: analyse van historische afvoermetingen

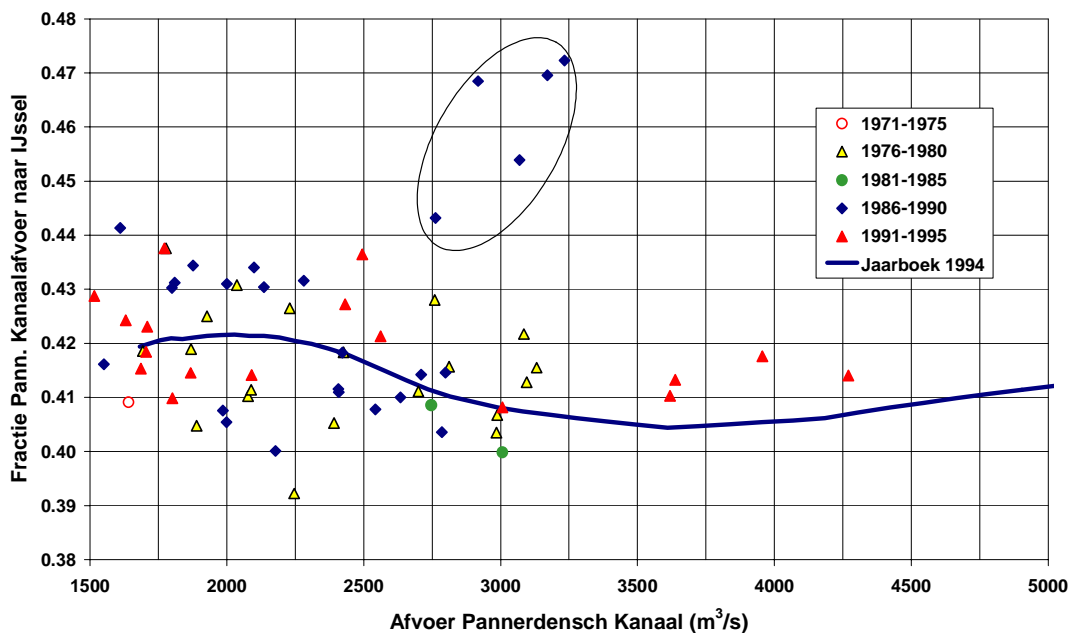
In [Ogink, 2003] is de spreiding in de afvoerverdeling op de splitsingspunten geanalyseerd op basis van afvoermetingen vanaf 1971. In figuur 2.7 is de fractie van de Rijnafoer aangegeven die via de Waal wordt afgevoerd voor afvoeren boven de 5000 m³/s. In de figuur is ook de fractie aangegeven die in het jaarboek van 1994² is aangehouden voor de verdeling over het splitsingspunt. De trend in deze lijn laat zien dat bij hogere afvoeren minder water tot afstroming komt op de Waal. De figuur laat een ruis zien met een range van orde 2% in de afvoerverdeling. De ruis geeft niet zuiver de onzekerheid in de afvoerverdeling weer: een deel van de ruis wordt namelijk veroorzaakt door meeton nauwkeurigheden in de afvoermeting.

² De afvoerverdeling uit Jaarboek 1994 (blauwe lijn) is afgeleid uit afvoerkromme, die tot een afvoer van orde 10.000 à 12.000 m³/s gebaseerd op echte afvoermetingen. Daarboven is de verdeling gebaseerd op extrapolaties met modellen.



Figuur 2.7: fractie afvoer van Bovenrijn naar de Waal volgens metingen en jaarboek 1994 (bron: Ogink, 2003)

In figuur 2.8 is voor afvoeren van het Pannerdensch Kanaal boven 1500 m³/s de fractie aangegeven die via de IJssel wordt afgevoerd. De range in de ruis in de verdelingspercentages blijkt bij hoge afvoeren slechts een orde van 1% van de Pannerdensch Kanaalafvoer te bedragen (exclusief meetfouten in de afvoer).



Figuur 2.8: fractie afvoer van Pannerdense Kanaal naar de IJssel volgens metingen en jaarboek 1994. N.B. omcirkelde gegevens zijn waarschijnlijk meetfouten. (bron: Ogink, 2003)

Ad 2: gevoeligheidsanalyse in een hydraulisch model

De onzekerheidsbronnen in de afvoerverdeling (zie paragraaf 2.4.1) tijdens maatgevend hoogwater (MHW) zijn kwantitatief verkend in [Schropp, 2002]. Het effect van de onzekerheden op de afvoerverdeling is geschat door van de betreffende parameters een groot domein door te rekenen. De kans van optreden van een bepaald effect geeft deze methode echter niet. Het betreft dus een gevoeligheidsanalyse en geen onzekerheidsanalyse. Voor een onzekerheidsanalyse zou een volledige probabilistische benadering moeten worden toegepast.

Het effect van de afzonderlijke onzekerheidsbronnen op de afvoerverdeling (zie tabel 2.4) wordt in het onderzoek geschat op enkele tientallen m^3/s , met uitzondering van zijdelingse toestroming waarvan het effect te verwaarlozen is en van de hydraulische ruwheid en morfodynamiek tijdens MHW waar het effect in de orde van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ligt. Aan de hand van de individuele effecten is de totale onzekerheid bepaald. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een 'worst case'-benadering: per tak is aangenomen dat alle onzekerheidsbronnen tegelijkertijd hun maximale bijdrage leveren en een meer realistische benadering waarbij de bronnen elkaar voor een deel compenseren. Een 'worst case'-benadering, levert voor Waal, Nederrijn en IJssel een toename van $400 \text{ m}^3/\text{s}$ en voor het Pannerdensch Kanaal een toename van $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij een meer realistische benadering zijn de waarden resp. 200 en $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 2.4: samenvatting afvoereffecten (bron: Schropp, 2002)

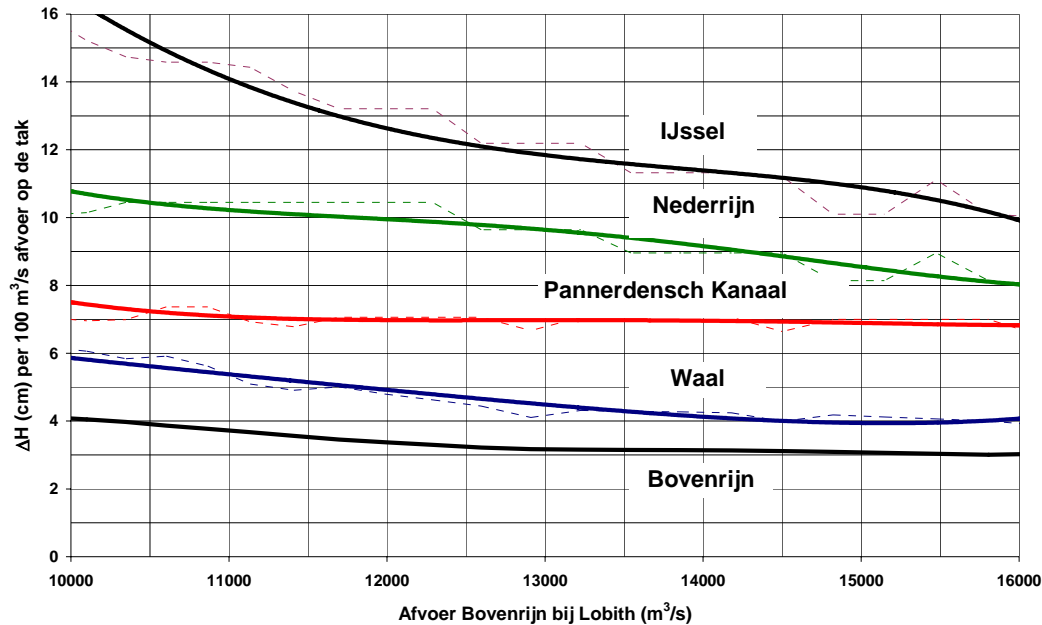
onzekerheidsbron	Waal		Nederrijn		IJssel	
	min. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	max. (m^3/s)	min. (m^3/s)	max. (m^3/s)
wind	-41	+20	-19	+10	-25	+52
zijdelingse toestroming	-3	+3	-3	+3	-5	+5
golfvorm	-5	+9	-44	+14	-55	+20
morfodynamiek tijdens MHW	-168	-28	+20	+133	+8	+35
retentiegebieden	-63	+73	-38	+33	-35	+30
falen van kades en overlaten	-64	+16	-36	+33	-7	+46
veranderingen riviergeometrie	-44	+44	-36	+36	-45	+45
hydraulische ruwheid zomerbed	-75	+75	-75	+75	-75	+75
hydraulische ruwheid uiterwaard	-116	+139	-72	+87	-67	+55
gebruikte modelparameters	-32	+35	-12	+10	-20	+21
TOTAAL	-611	+386	-315	+434	-326	+384

Ad 3: afgeleid uit de natuurlijke variabiliteit

In [van Vuuren, 2003] is de standaardafwijking in de natuurlijke variabiliteit afgeleid uit veeljarige meetreeksen op de MSW-stations (zie paragraaf 2.3.2). De afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn is één van de oorzaken van natuurlijke variabiliteit. De grootte van de natuurlijke variabiliteit vormt hierdoor een bovengrens voor de onzekerheid in de afvoerverdeling. De onzekerheid in de natuurlijke variabiliteit met een 95% betrouwbaarheidsinterval (2σ) komt volgens tabel 2.3 uit op ongeveer 22 centimeter voor de IJssel, 19 centimeter voor de Nederrijn en 8 centimeter voor de Waal.

2.4.3 Effect op de waterstand

Afwijkingen in de afvoerverdeling op de splitsingspunten hebben consequenties voor de waterstanden op de benedenstroomse riviertakken. In figuur 2.9 is aangegeven hoe groot de verandering in de waterstand is op een Rijntak indien bij hoge Rijnafoeren het debiet met 100 m³/s toe- of afneemt. In tabel 2.5 is aangegeven hoe groot de waterstandverandering is op de Rijntakken bij een verandering in de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop.



Figuur 2.9: verandering in de waterstand op de Rijntakken als de afvoer op de riviertak met 100 m³/s verandert bij extreme afvoeren (bron: Ogink, 2003)

Tabel 2.5: waterstandverandering in cm op locaties langs de Rijntakken als functie van een afwijking in de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop uitgedrukt als percentage van de MHW-afvoer (bron: Ogink, 2003)

afwijking (%)	Waal		Pan. Kan. (cm)	Nederrijn (cm)	IJssel	
	Bovenloop (cm)	Tiel (cm)			Bovenloop (cm)	Olst (cm)
1	6	9	11	8	7	5
2	13	18	22	15	14	11
3	19	26	34	23	20	16
4	26	35	45	30	27	22
5	32	44	56	38	34	27

2.5 Onzekerheden in de regeling

Bij het regelen van de afvoerverdeling worden onzekerheden geïntroduceerd. Hieronder zijn de belangrijkste onzekerheden die bij het regelen ontstaan opgesomd en toegelicht. De eerste onzekerheid, de meetonzekerheid, zal uitgebreid behandeld worden in de volgende paragraaf.

1. onderzekerheid in de meting
2. onderzekerheden met betrekking tot aansturing van het regelwerk
3. onderzekerheden met betrekking tot functioneren van het regelwerk

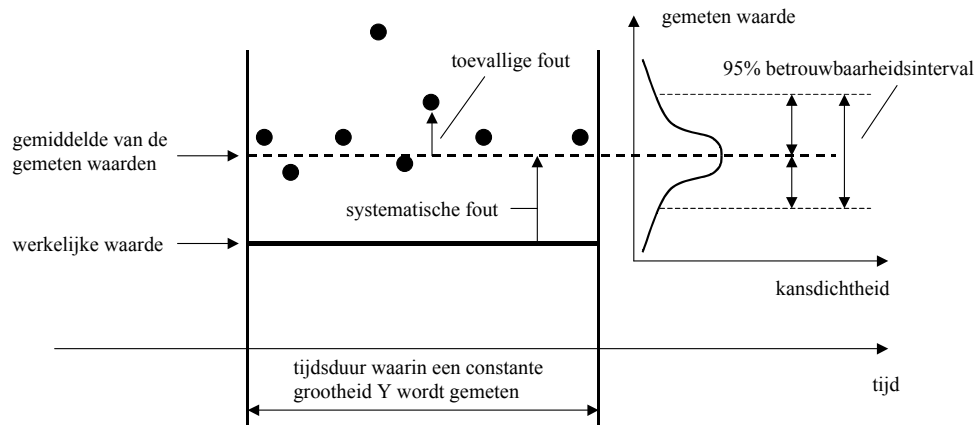
- ad 1) Door beperkingen in meetmethoden is het slechts mogelijk om de te meten grootte (bijvoorbeeld waterstand of afvoer) te benaderen. Het verschil tussen de gemeten waarden en de werkelijke waarden wordt veroorzaakt door systematische en toevallige fouten. De grootte van de meetfout, de meetonzekerheid, verschilt echter per meetmethode.
- ad 2) Bijsturen van de afvoerverdeling houdt in dat op een gegeven moment beslist moet worden tot een ingreep in het watersysteem: dit kan automatisch en/of met de hand gebeuren (zie hoofdstuk 3). Elke methode brengt echter onzekerheden met zich mee: technische storingen, energiestoringen, menselijk falen (vermoeidheid, gebrek aan kennis of ervaring), etc.
- ad 3) Als gevolg van bezwijken of falen kan een regelwerk zijn functie niet meer vervullen. Een regelwerk kan bijvoorbeeld bezwijken als gevolg van een aanvaring. Een regelwerk kan falen als gevolg van bijvoorbeeld een technische storing of een energiestoring.

2.6 Meetonzekerheden

Door middel van een regelaar, zie hoofdstuk 3, op de splitsingspunten van de Rijn kan mogelijk de onzekerheid in de afvoerverdeling verkleind worden en daarmee de onzekerheid in de waterstand. Om een regelwerk effectief in te kunnen zetten op de splitsingspunten van de Rijn zal iets gemeten moeten worden, bijvoorbeeld waterstanden of afvoeren. Bij gebruik van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn wordt een extra onzekerheid in de waterstand geïntroduceerd die samenhangt met het bijsturen van de afvoerverdeling: meetonzekerheden. De grootte van de meetonzekerheid heeft grote invloed op de mate waarmee de onzekerheid in de waterstand verkleind kan worden. In deze paragraaf (2.6.1) zal eerst aandacht besteed worden aan meetfouten: soorten meetfouten en hun oorzaak. Hierna (2.6.2) zullen de methoden besproken worden waarmee een meetfout kan worden ingeschat. Tenslotte (2.6.3) zal van veel gebruikte meetmethoden de meetnauwkeurigheid bepaald worden.

2.6.1 Meetfouten

Door middel van metingen wordt getracht de werkelijke waarde te bepalen van de te meten grootte: bijvoorbeeld waterstanden of afvoeren. Door beperkingen in meetmethoden is het slechts mogelijk om de werkelijke waarde te benaderen. Het verschil tussen de gemeten waarden en de werkelijke waarden wordt veroorzaakt door meetfouten (zie figuur 2.10).



Figuur 2.10: meetfouten (bron: Herschy, 1999)

Bij meetfouten wordt onderscheid gemaakt tussen:

- systematische fouten
- toevallige fouten

Een belangrijke kenmerk van een systematische fout is dat de afwijking tussen de gemeten en de werkelijke waarde steeds in één bepaalde richting uitvalt en meestal constant is bij verschillende metingen. Systematische fouten ontstaan bijvoorbeeld wanneer meetinstrumenten slecht gecalibreerd of geijkt zijn: bij een thermometer waarbij de schaalverdeling enkele millimeters naar beneden wordt geschoven zal bij elke volgende meting systematisch een te hoge temperatuur gemeten worden. Een toevallige fout is altijd aanwezig, maar bij herhaling van de meting is de fout over het algemeen anders van grootte en/of richting. De waarden liggen daarom gespreid ten opzichte van de werkelijke waarde (zonder systematische fouten). Toevallige fouten worden bepaald door het toeval en worden veroorzaakt door het meetinstrument (fouten in elektronica) en/of door waarnemer (afleesfouten, reactiefouten).

2.6.2 Methoden om de meetonzekerheid te bepalen

De meetonzekerheid van een meetmethode kan vastgesteld worden door de verschillende onzekerheidsbronnen in de meetmethode vast te stellen en te kwantificeren. De totale meetonzekerheid van de meetmethode wordt in deze theoretische benadering berekend uit de individuele bijdragen van de onzekerheidsbronnen. In de berekening wordt zowel rekening gehouden met systematische als toevallige fouten. De meetonzekerheid kan ook op een praktische manier berekend worden waarbij uitsluitend wordt gekeken naar de spreiding in de meetresultaten: de spreiding in de individuele waarden van de duplometingen (meervoudige metingen onder gelijke omstandigheden) om de gemiddelde waarde van de duplometing is dan een maat voor de meetonzekerheid. In de laatste methode kan uitsluitend de onzekerheid in de meting berekend worden ten gevolge van toevallige fouten.

2.6.3 Meetmethoden en de meetonzekerheid

In tabel 2.6 worden de meest gebruikte meetmethoden beschreven om de waterstand of de afvoer te meten.

Tabel 2.6: meetmethoden en de meetonzekerheid

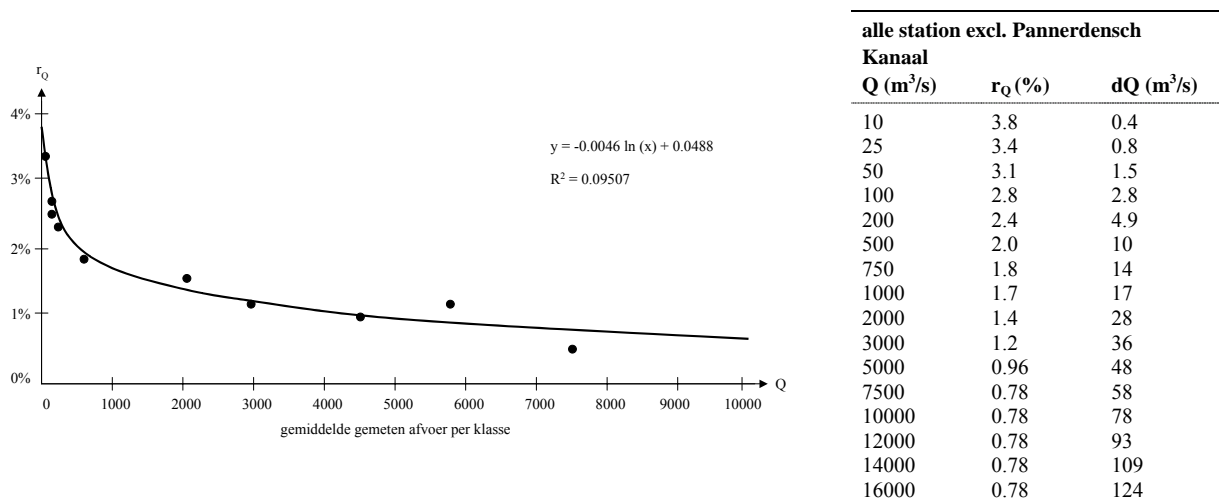
eigenschappen	waterstand peilschrijver digitaal	afvoer Ott-molen	ADCP-meting
meetprincipe	De meting is gebaseerd op een vlotter die drijft in een verticale peilbuis. Deze peilbuis staat via een horizontale toevoerleiding in verbinding met het buitenwater. Op deze manier wordt de invloed van de golfslag geëlimineerd. Met behulp van een digitale peilschrijver kan een waterstandmeting volledig geautomatiseerd worden. De vlotterbeweging wordt namelijk via een digitaal signaal overgebracht en kan vervolgens digitaal verwerkt en opgeslagen worden.	De afvoer wordt indirect gemeten. De gemeten afvoer is gebaseerd op een aantal gemeten grootheden zoals de breedte, de diepte en de stroomsnelheid op een bepaalde locatie. De stroomsnelheid van het water kan gemeten worden met een Ott-molen. Het principe is gebaseerd op de relatie tussen de snelheid van het water en de resulterende hoeksnelheid van de Ott-molen. De stroomsnelheden gecombineerd met de breedte- en de dieptemetingen levert een afvoer op over de gehele dwarsdoorsnede van de rivier.	De stroomsnelheid wordt gemeten met behulp van akoestische meetapparatuur die bestaat uit een digitale processor en een onderwaterdeel met vier akoestische transducenten. Vanuit de transducenten worden geluidspulsen verstuurd. De looptijd van de geluidspulsen tussen de transducenten is een maat voor de stroomsnelheid. De afvoer wordt in de digitale processor berekend uit de gemeten snelheid, uit de met behulp van een digitale niveaumeter gemeten waterhoogte en uit de dwarsdoorsnede van de waterloop.
meetnauwkeurigheid	Meetonzekerheid in een enkele waterstandmeting wordt maximaal geschat op 1 cm (betrouwbaarheidsinterval van 95%). [Herschey, 1999]	Meetonzekerheid in een enkele afvoermeting wordt geschat op 5% van de afvoer (betrouwbaarheidsinterval van 95%). [Herschey, 1999]	Meetonzekerheid in een enkele afvoermeting wordt geschat op 5% van de afvoer (betrouwbaarheidsinterval van 95%). [Herschey, 1999]

De meetnauwkeurigheid van de verschillende meetmethoden (tabel 2.6) is gebaseerd op [Herschey, 1999]. Hierin is aan de hand van de ISO standaard³ een redelijke schatting gemaakt van de meetonzekerheid door de verschillende onzekerheidsbronnen in de meetmethode vast te stellen en te kwantificeren.

³ In 1993 publiceerde ISO (International Standard Organisation) "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM), waarin een methode wordt aangeraden om de meetonzekerheid te bepalen van met name fysische meetmethoden.

De meetnauwkeurigheid van een digitale peilschrijver is relatief hoog, de meetonzekerheid in een enkele waterstandmeting bedraagt namelijk maximaal één centimeter [Hersch, 1999]. De waterstand wordt direct gemeten en is dus alleen afhankelijk van meetonzekerheden in de waterstandmeting. De afvoer wordt in tegenstelling tot de waterstand indirect gemeten. De afvoer is namelijk gebaseerd op een aantal gemeten grootheden zoals de breedte, de diepte en de stroomsnelheid. De meetonzekerheid in de afvoer is afhankelijk van de nauwkeurigheid van de afzonderlijke metingen. De meetonzekerheid in een enkele afvoermeting is voor de Ott-molen en de ADCP-meting gelijk, namelijk 5% van de afvoer [Hersch, 1999].

In [Van Vuren, 2001] is de nauwkeurigheid van de Ott-metingen in een historische analyse praktisch onderzocht. Bij het bepalen van de nauwkeurigheid is gebruik gemaakt van duplometingen (meervoudige metingen onder gelijke omstandigheden). Deze duplometingen zijn uitgevoerd bij verschillende afvoeren verdeeld over de verschillende Rijntakken in de periode 1956-1996. De spreiding in de individuele waarden van de duplometing om de gemiddelde waarde van de duplometing geeft per afvoerklasse een indicatie van de meetfout (zie figuur 2.11). Uit de analyse blijkt dat voor de riviertakken als de Bovenrijn en Waal de meetfout bij extreem hoge afvoeren zo'n 1.6% bedraagt. De meetfout van 1.6% heeft betrekking op een betrouwbaarheidsinterval van 95%. Bij een MHW-afvoer van 16000 m³/s komt dit neer op zo'n 250 m³/s.



Figuur 2.11: standaardafwijking r_Q in afvoerklasse. Alle stations excl. Pannerden (bron: van Vuuren, 2001)

De ADCP-meting (Acoustic Doppler Current Profiler) is een nieuwe methode om de afvoer te meten. Vanaf 1997 zijn door Rijkswaterstaat experimentele ADCP-metingen uitgevoerd op de Rijntakken. De meetresultaten vertonen grote verschillen met de Ott-metingen. De oorzaak hiervan is nog niet duidelijk. Als mogelijke oorzaak wordt genoemd de software die gebruikt wordt voor de conversie van ruwe ADCP-gegevens tot totale rivierafvoeren. Als andere reden wordt genoemd het foutief invoeren van bepaalde instelgegevens zoals bijvoorbeeld de insteekdiepte van de meetapparatuur (systematische fouten). In [Van Vuren, 2001] is aan de hand van 90 simultane metingen met verschillende ADCP-uitrustingen en de Ott-propellers de reproduceerbaarheid van de ADCP-metingen onderzocht. Uit de analyse blijkt dat de spreiding van de meestal in meervoud uitgevoerde ADCP-metingen zodanig klein te zijn dat verwacht mag worden dat deze metingen na het oplossen van voornoemde problemen juist een stuk nauwkeuriger zullen uitvallen dan de Ott-metingen (toevallige fouten).

2.7 Conclusies

- De onzekerheid in de maatgevende waterstand met een 95% betrouwbaarheidsinterval (2σ) wordt in [van Velzen, 2003] geschat op 28 centimeter voor de IJssel en ongeveer 26 centimeter voor de Waal en de Nederrijn. Dit is echter gebaseerd op grove aannamen. In een review schat Ogink de onzekerheid in de maatgevende waterstand hoger in.
- In [van Vuuren, 2003] is de spreiding in opgetreden piekwaterstanden tijdens historische hoogwaters op de Rijntakken over de periode 1901-2001 geanalyseerd. Hierin wordt de natuurlijke variabiliteit met een 95% betrouwbaarheidsinterval geschat op ongeveer 22 centimeter voor de IJssel, 19 centimeter voor de Nederrijn en 8 centimeter voor de Waal.
- Op basis van afvoermetingen vanaf 1971 is door Ogink (2003) vastgesteld dat rekening gehouden moet worden met variaties in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop van orde 2%. Afwijkingen van deze grootte leiden tot veranderingen in de waterstanden van orde 1 à 2 decimeter op de riviertakken. De geschatte variatie in de afvoerverdeling (2%) is inclusief meetfouten.
- Aan de hand van modelonderzoek [Schropp, 2002] is de totale onzekerheid in de afvoerverdeling geschat op ± 200 tot $300 \text{ m}^3/\text{s}$ per tak. Als aangenomen wordt dat de variatie in de afvoerverdeling ($300 \text{ m}^3/\text{s}$) overeenkomt met een 95% betrouwbaarheidsinterval dan is de standaardafwijking in de afvoerverdeling $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt neer op een standaardafwijking van 1% van de afvoer in de Bovenrijn. Voor alle riviertakken betekent een $150 \text{ m}^3/\text{s}$ hoger afvoer onder maatgevende omstandigheden een waterstandsverschil rond de 1 decimeter.
- Uit de studie van Schropp (2002) volgt dat onzekerheden in de ruwheid en morfologie de grootste onzekerheidsbronnen zijn in de afvoerverdeling tijdens maatgevend hoogwater.
- De meetonzekerheid van een enkele waterstandmeting wordt geschat op 1 cm. De meetonzekerheid van een enkele afvoermeting wordt, voor zowel de Ott-molen als de ADCP-meting, geschat op 5% van de afvoer.

3 Regeltheorie

In het vorige hoofdstuk zijn de onzekerheden in de waterstand op de Rijntakken onderzocht tijdens hoogwater. Natuurlijke processen zoals wind, ruwheid en morfodynamiek blijken direct via de waterstand en indirect (via de afvoerverdeling) veel invloed te hebben op de waterstand. Als gevolg hiervan kunnen bij maatgevend hoogwater waterstandafwijkingen verwacht worden van enkele decimeters. Met een regelaar kunnen deze waterstandafwijkingen mogelijk verkleind worden. In dit hoofdstuk komt de benodigde regeltheorie hiervoor aanbod. Allereerst (3.1) zal ingegaan worden op de basisvoorwaarden voor regelen, zonder deze voorwaarden is regelen van de afvoerverdeling niet mogelijk. Hierna (3.2) zal het verschil aangegeven worden tussen handmatig en automatisch regelen. Vervolgens (3.3) zal dieper ingegaan worden op automatisch regelen: verschillende vormen van automatisch regelen worden behandeld. Tenslotte (3.4) zullen de eigenschappen van de belangrijkste onderdelen van een automatische regelkring besproken worden.

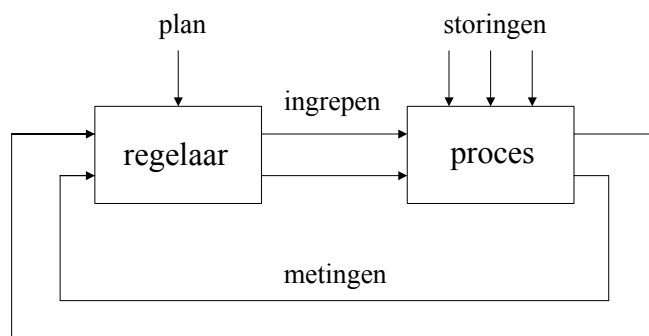
3.1 Basisvoorwaarden voor regelen

In [Cool et al., 1991] wordt de volgende definitie voor regeltechniek gegeven:

Regeltechniek houdt zich bezig met systemen die ten doel hebben bepaalde grootheden van een proces volgens vooraf opgesteld plan te laten verlopen.

Het volgens plan laten verlopen van bepaalde grootheden kan inhouden: constant houden, met de tijd variëren, variëren afhankelijk van één of meer andere grootheden of naar een optimum laten bewegen. Om te toetsen of de te regelen grootheid nog volgens plan verloopt moet de te regelen grootheid direct of indirect gemeten worden. Indirect meten is alleen nuttig wanneer de te meten grootheid iets zegt over de te regelen grootheid. Het volgens plan laten verlopen van de geregelde grootheid houdt ook in dat in het proces moet kunnen worden ingegrepen door middel van een corrigerend orgaan. Om van de metingen te komen tot ingrepen moeten de meetsignalen aan het plan worden getoetst en vertaald worden naar een ingreep. Deze functie wordt vervuld door de regelaar (figuur 3.1).

Een koelkast is een voorbeeld van een eenvoudige regeling. De temperatuur is hierbij de geregelde grootheid en het op constante temperatuur houden het plan. Op basis van temperatuurmetingen in de koelkast wordt het koelelement in- en uitgeschakeld.



Figuur 3.1: schematische voorstelling van een geregeld proces (bron: Cool et al., 1991)

De basisvoorwaarden voor regelen opgesomd:

- er moet een plan zijn
- er moet gemeten worden
- er moet ingegrepen kunnen worden

3.2 Handmatig versus automatisch regelen

In deze paragraaf zal ingegaan worden op de verschillen tussen met de hand en automatisch regelen. In onderzoek zal gebruik gemaakt worden van een automatische regeling. Om deze reden zal in het vervolg van het hoofdstuk uitsluitend ingegaan worden op regeltheorie dat betrekking heeft op automatische regelingen.

Verschillen tussen met de hand en automatisch regelen zijn:

- Een instrument is beperkt in het regelen door regels die tijdens de bouw van het apparaat zijn ingebracht. Een mens kan daarentegen denken en initiatief nemen.
- Snelheid waarmee een instrument data verwerkt ligt hoger dan bij een mens. Bovendien maakt het voor een instrument geen verschil of een handeling verschillende malen achterelkaar uitgevoerd moet worden. De reproduceerbaarheid van de mens daarentegen is afhankelijk van vermoeidheid en concentratie.

Wanneer de afvoerverdeling geregeld wordt met de hand dan is het waarschijnlijk dat bij het optreden van twee identieke hoogwaters elke keer iets anders wordt ingegrepen. Bij elk hoogwater beslissen namelijk andere mensen, met een eigen interpretatie van de situatie, over het regelen. Hoe groot de verschillen zullen zijn is onder andere afhankelijk van de mate waarin het stuurplan in protocollen is vastgelegd. Daarnaast kunnen verschillen ontstaan door menselijke falen: gebrek aan kennis en ervaring. Vermoeidheid en gebrek aan concentratie kunnen ook het regelproces beïnvloeden. Deze invloed kan verkleind worden door bepaalde handelingen te automatiseren. De mate waarin het doel van regelen wordt gehaald is hierdoor afhankelijk van veel onzekere factoren en daarom moeilijk in te schatten.

De mate waarin het doel van regelen wordt gehaald bij een automatische regeling is makkelijker in te schatten omdat de regeling handelt volgens regels die tijdens de bouw van het apparaat zijn ingebracht. Hierdoor is vooraf al bekend hoe een regelaar zal reageren op een bepaalde verstoring. Bij twee identieke hoogwaters mag verwacht worden dat een automatische regeling op een gelijke wijze ingrijpt. Regelen van de afvoerverdeling houdt bovendien in dat regelmatig (in orde van uren) bijgestuurd zal moeten worden. Bepaalde handelingen zullen daarom vaak achterelkaar uitgevoerd moeten worden in een korte periode. Een automatische regeling leent zich hier goed voor. De regeling wordt daarentegen wel een stuk gevoeliger voor storingen in elektronica en energiestoringen.

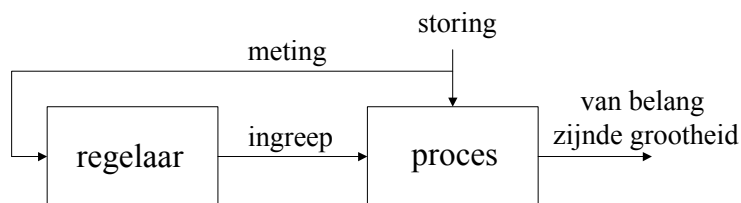
3.3 Automatisch regelen

Storende invloeden op de waterstand zoals wind, morfodynamiek, ruwheid, etc. tijdens hoogwater kunnen er toe leiden dat er waterstandafwijkingen ontstaan tijdens hoogwater. Een automatische regeling heeft als doel de waterstand minder afhankelijk te maken van deze storende invloeden. In deze paragraaf zal eerst (3.3.1) aandacht besteed worden aan verschillende vormen van automatisch regelen. Uiteindelijk (3.3.2) zal een keuze gemaakt worden voor een vorm van automatisch regelen.

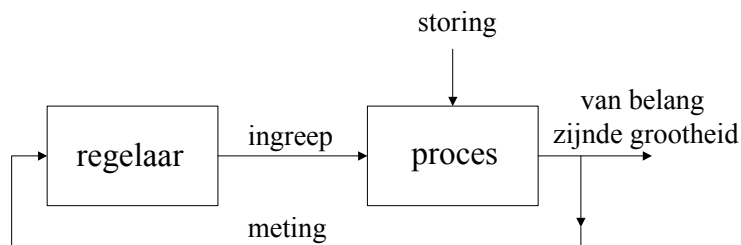
3.3.1 Vormen van automatisch regelen

Als gevolg van verstoringen kan de te regelen grootte afwijken van het plan. Aan de hand van metingen kan overgegaan worden tot een ingreep in het proces om deze afwijking tegen te gaan. Dit kan op twee manieren [Cool et al., 1991]:

- Storende invloeden kunnen worden tegengegaan door ze te meten (als het mogelijk is) en voor hun invloed op de belang zijnde grootte te compenseren. Dit wordt regeling door storingscompensatie of voorwaartsregeling genoemd (Eng. feedforward). Zie figuur 3.2.
- Anderzijds is het ook mogelijk de van belang zijnde grootte te meten en wanneer een afwijking van de ingestelde waarde optreedt, zodanig in te grijpen dat de afwijking wordt tegengegaan. Dit wordt regeling door terugkoppeling genoemd (Eng. feedback). Zie figuur 3.3.



Figuur 3.2: voorwaartsregeling (bron: Cool et al., 1991)



Figuur 3.3: regeling door terugkoppeling (bron: Cool et al., 1991)

De klimaatregeling in een woonhuis en een kantoor geeft goed het verschil tussen deze twee vormen van automatisch regelen weer. In een woonhuis wordt in het algemeen de temperatuur in de huiskamer gemeten. Wordt de huiskamer te warm dan wordt de verwarming minder hard gestookt, wordt het te koud dan wordt de verwarming juist opgestookt. Bij een kantoorgebouw is daarentegen niet één kamer representatief en daarom wordt de buitentemperatuur (verstoring) gemeten. Naarmate het buiten kouder is, wordt de verwarming harder gestookt. De klimaatregeling in een woonhuis is een duidelijk voorbeeld van een regeling door terugkoppeling (gevolg bepaald ingreep) en dat van het kantoorgebouw van een voorwaartsregeling (oorzaak bepaald ingreep).

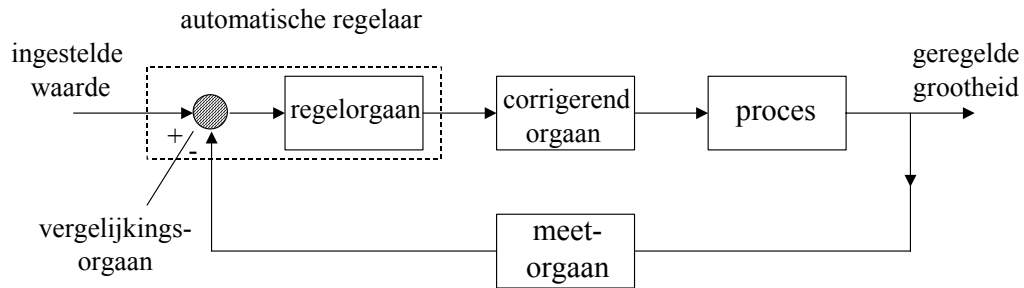
3.3.2 Keuze regeling

In het onderzoek zal uitsluitend gewerkt worden met een regeling dat gebaseerd is op terugkoppeling omdat een afwijking in de waterstand veroorzaakt kan worden door verschillende verstoringen (wind, morfodynamiek, ruwheid, etc.) waarvan de locatie vooraf niet bekend is. Het meten van verschillende

verstoringen met een vooraf onbekende locatie is gecompliceerd en het is de vraag hoeveel een voorwaartse regeling toevoegt ten opzichte van een regeling door terugkoppeling.

3.4 Onderdelen van een regeling

In een regeling zijn verschillende onderdelen te onderscheiden. Een regelkring bestaat tenminste uit: een proces, een regelorgaan en een corrigerend orgaan (zie figuur 3.4). In de volgende paragrafen zullen de eigenschappen van de afzonderlijke onderdelen van een regelkring behandeld worden.



Figuur 3.4: blokschema van een automatische regelkring (bron: Cool et al., 1991)

3.4.1 Proces

De waterbeweging op de Rijn is in dit onderzoek het proces. In het onderzoek zal het effect van bijsturen van de afvoerverdeling vastgesteld worden op de waterstand op de benedenstroomse Rijntakken. Dit zal gedaan worden door een regelaar te schematiseren in een model dat de waterbeweging van de Rijn nabootst. Het effect zal bepaald worden aan de hand van een vijftal casestudies waarin de waterbeweging op de Rijn op verschillende manieren wordt verstoord: windeffecten, morfodynamiek en variaties in de hydraulische ruwheid. Zij hebben direct of indirect (via de afvoerverdeling) invloed op de waterstand.

3.4.2 Meetorgaan

Het proces vormt het deel van de regeling waarop het corrigerend orgaan ingrijpt. Het doel van een regeling is om bepaalde grootheden van een proces volgens vooraf opgesteld plan te laten verlopen. De grootheden die volgens plan moeten verlopen, moeten direct of indirect worden gemeten om ze aan het plan te kunnen toetsen (zie figuur 3.4). Het plan van de regeling op de Rijn is het verkleinen van de onzekerheid in de waterstand. Om te toetsen of de waterstanden tijdens hoogwater daadwerkelijk worden gereduceerd zullen metingen moeten worden verricht op de Rijntakken. Waterstandmetingen en afvoermetingen liggen voor de hand. De meetonzekerheden van de meetmethoden zijn onderzocht in hoofdstuk 2.

3.4.3 Regelorgaan

Om van metingen te komen tot ingrepen moeten de meetsignalen aan het plan worden getoetst en aan logische of rekenkundige bewerkingen worden onderworpen. Het apparaat dat deze functie vervult wordt de regelaar genoemd (zie figuur 3.4). In de regeltechniek zijn een aantal standaard regelaars ontwikkeld die op een breed gebied kunnen worden toegepast.

Een veel toegepaste regelaar in de regeltechniek is de PI-regelaar. De afkorting 'PI' staat voor 'Proportioneel Integrerend'. In vergelijking (3.1) is de PI-regelaar wiskundig beschreven:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_t e(t) dt \quad (3.1)$$

$u(t)$ = ingreep (bijvoorbeeld drempelhoogte van een overlaat)

$e(t)$ = momentane afwijking (verschil tussen de ingestelde en de gemeten waarde)

K_p, K_i = proportionele factor en integrerende factor

In het rechterlid van de vergelijking zijn de onderdelen van een PI-regelaar terug te vinden: een proportionele term en een integrerende term. Aan de hand van het verschil tussen de ingestelde waarde en de gemeten waarde, de afwijking, wordt de ingreep berekend. Hierbij wordt zowel gebruik gemaakt van de afwijking op het moment van ingrijpen (proportionele term) als van alle afwijkingen tot aan ingrijpen (integrerende term). Door in elke term te vermenigvuldigen met een constante waarde (K_p of K_i) wordt de bijdrage verkregen van elke term aan de ingreep. Hieronder zijn de twee termen toegelicht.

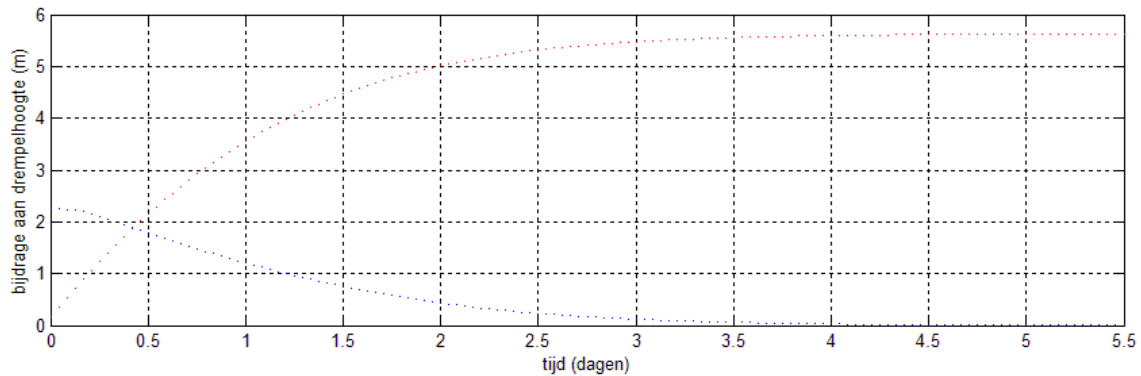
$$\text{Proportionele term: } y(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.2)$$

De proportionele term heeft als doel de ingestelde waarde snel te naderen. Bij een grootte afwijking is de bijdrage van deze term namelijk groot. Wanneer echter de ingestelde waarde wordt benadert wordt de bijdrage van deze term klein en tenslotte nul wanneer de ingestelde waarde wordt bereikt (zie figuur 3.5). De bijdrage van deze term is constant wanneer de afwijking onveranderd blijft in de tijd. De ingestelde waarde hoeft dan echter nog niet bereikt te zijn. Door middel van een factor (K_p) wordt

de momentane afwijking vertaald in een ingreep. De dimensie van de factor wordt bepaald door de dimensie van de ingreep.

$$\text{Integrerende term: } y(t) = K_i \cdot \int_t e(t) dt \quad (3.3)$$

Door middel van de integrerende term kan de ingestelde waarde precies bereikt worden. De integrerende term genereert namelijk nieuwe acties totdat de afwijking nul is (zie figuur 3.5). De bijdrage van deze term is relatief groot ten opzichte van de eerste term wanneer de ingestelde waarde wordt benadert. Door middel van een factor (K_i) kan de bijdrage berekend worden van deze term aan de ingreep. De dimensie van de factor wordt bepaald door de dimensie van de ingreep.



Figuur 3.5: bijdrage proportionele term (blauw) en integrerende term aan ingreep (rood)

3.4.4 Corrigerend orgaan

Het corrigerend orgaan wordt aangestuurd door het regelorgaan en is het fysieke onderdeel van de regeling dat direct ingrijpt op het proces (zie figuur 3.4). In dit onderzoek zal onderzocht worden of het mogelijk is om de onzekerheid in de waterstand te verkleinen tijdens hoogwater door het bijsturen van de afvoerverdeling. Om daadwerkelijk de afvoerverdeling bij te kunnen sturen is naast een regelorgaan ook een corrigerend orgaan nodig.

Het regelen van de afvoerverdeling door middel van een corrigerend orgaan is terug te voeren op de volgende principes:

- de weerstand van een riviertak verhogen. Hierdoor zal er minder water langs deze tak afgevoerd worden.
- de weerstand van een riviertak verlagen. Hierdoor zal er meer water langs deze tak afgevoerd worden.

In [Stijnen et al., 2002]] zijn de mogelijkheden tot het regelen van de afvoerverdeling onderzocht. In deze verkenning is ervan uitgegaan dat niet van tevoren is aan te geven welke kant de afvoerverdeling op moet werken: het water moet op een splitsingspunt beide kanten opgestuurd kunnen worden. Om de scheepvaart niet te hinderen is de beperking gesteld dat de maatregelen ten behoeve van sturing uitsluitend in het zomerbed aangelegd mogen worden. De rivierdelen rond de splitsingspunten worden namelijk druk bevaren door de scheepvaart. Hieronder zullen aan de hand van bovenstaande principes de mogelijke maatregelen opgesomd worden die in deze verkenning genoemd worden.

Regelen door de weerstand op een riviertak te verhogen

De afvoerverdeling op een splitsingspunt kan beïnvloed worden door het aanleggen van regelbare weerstanden in beide benedenstroomse riviertakken. Door de weerstand op een enkele tak te verhogen zal door opstuwning op het splitsingspunt meer water afgevoerd worden over de andere tak. Dit heeft echter een verhoging van de bovenstroomse waterstand tot gevolg. Zonder compenserende maatregelen (nabijgelegen overloopgebieden) komt dit neer op de keuze tussen verminderd overstromingsrisico benedenstrooms en verhoogd risico bovenstrooms. De weerstand op een riviertak kan tijdelijk verhoogd worden door het plaatsen van stuwten of afsluitbare constructies op korte afstand benedenstrooms van een splitsingspunt. In beide gevallen wordt de weerstand op de riviertak verhoogd door het verkleinen van het stroomprofiel van de rivier. Bij een stuw kan gedacht worden aan een beweegbare drempel en bij afsluitbare constructies aan het plaatsen van schotten tussen brugpijlers. De aanleg van de constructies in het winterbed om de scheepvaart te ontzien heeft voordelen boven aanleg in het zomerbed:

- aanleg, inspectie en onderhoud hoeft niet onder water te gebeuren;
- een simpelere en lichtere constructie volstaat;
- de kans op schade door (en belemmeringen voor) schepen is minder groot.

Regelen door de weerstand op een riviertak te verlagen

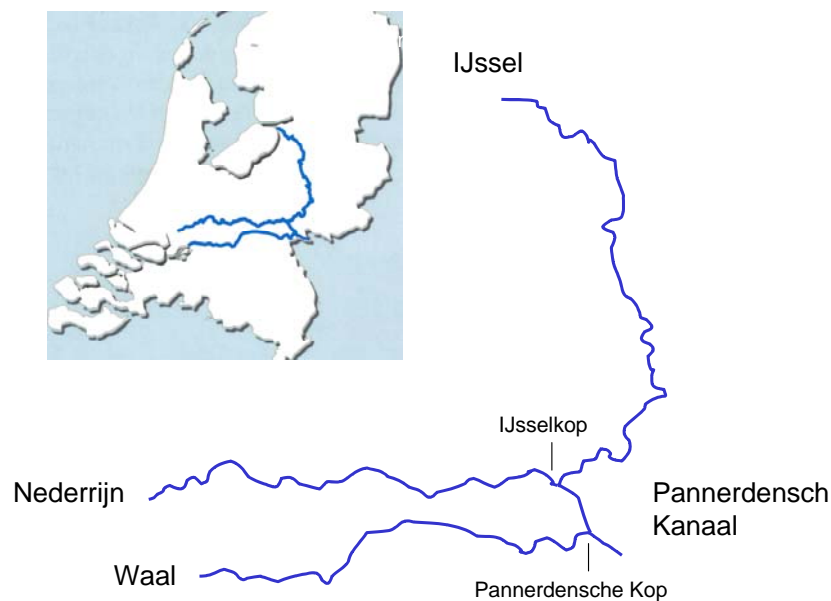
De afvoerverdeling op een splitsingspunt kan ook beïnvloed worden door het aanleggen van regelbare rivierverruimende maatregelen in beide benedenstroomse riviertakken. Door de weerstand op een enkele tak te verlagen zal door een waterstandverlaging op het splitsingspunt meer water afgevoerd worden over de tak. Het voordeel van rivierverruimende maatregelen is dat de waterstand bovenstrooms van het splitsingspunt niet verhoogd wordt. De weerstand op een riviertak kan verkleind worden door aanleg van een nevengeul (groene rivier) met inlaatwerk. Een nevengeul tot ver benedenstrooms van de splitsingspunten zal nodig zijn. Dit brengt echter hoge kosten met zich mee. Een andere mogelijkheid om meer water aan te trekken op een tak is het doorlaatbaar maken van scheidingsdammen op de splitsingspunten met schuiven die al dan niet geopend kunnen worden. Een nadeel van deze maatregel is dat weinig invloed uitgeoefend kan worden op de mate en de richting van sturing. Deze hangen namelijk af van de optredende waterstanden.

4 Regelen van de afvoerverdeling op de Rijn

In de vorige hoofdstukken is aan de hand van literatuuronderzoek onderzocht hoe groot de afwijking in de afvoerverdeling kan zijn tijdens hoogwater en wat er allemaal bijkomt kijken om de afvoerverdeling bij te sturen. In dit hoofdstuk zal het regelvraagstuk toegespitst worden op de splitsingspunten van de Rijn. Allereerst (4.1) volgt een locatiebeschrijving. Hierna (4.2) zullen de doelen van het bijsturen van de afvoerverdeling omschreven worden. Vervolgens (4.3) zal het verschil aangegeven worden tussen het bijsturen van de afvoerverdeling op afvoerafwijkingen of waterstandafwijkingen en de consequenties hiervan op de waterstand benedenstrooms van de splitsingspunten. Verder (4.4) zal aandacht besteed worden aan verschillende meetmethoden om waterstanden en afvoeren te meten. Tenslotte (4.5) zal bekeken worden hoe de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn bijgestuurd kan worden op basis van waterstandmetingen.

4.1 Locatiebeschrijving

De Rijn heeft in Nederland twee splitsingspunten: de Pannerdensch Kop en de IJssel Kop. Bij de Pannerdensch Kop, 5 kilometer benedenstrooms van Lobith, verdeelt het water van de Bovenrijn zich over de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Het Pannerdensch kanaal splitst zich bij de IJssel Kop, nabij Arnhem, op zijn beurt in de Nederrijn en de IJssel (zie figuur 4.1). Het Pannerdensch Kanaal, die de twee splitsingspunten verbindt, is ongeveer 12 kilometer lang.



Figuur 4.1: het stroomgebied van de Rijn met de splitsingspunten in Nederland

Bij hoge afvoeren van de Bovenrijn neemt de Waal ongeveer twee derde van de afvoer voor haar rekening, de Nederrijn twee negende en de IJssel een negende. De bovenstaande afvoerverdeling wordt door middel van een stelsel van kaden en overlaten zo goed mogelijk gefixeerd. De vorm en de inrichting van het rivierbed in de nabijheid van het splitsingspunt: de bodemhoogte van de hoofdgeul, hoogteligging en breedte van de uiterwaarden, aanwezigheid van dammen, kades, overlaten, bruggenhoofden en vegetatie hebben namelijk invloed op de afvoerverdeling. Veranderingen in de rivier tot enkele tientallen kilometers benedenstrooms van de splitsingspunten zijn merkbaar in de afvoerverdeling.

4.2 De doelen van bijsturen

De verstoringen, zie hoofdstuk 2, die de afwijkingen in de afvoerverdeling veroorzaken hebben direct en indirect (via de afvoerverdeling) invloed op de waterstand op de Rijntakken. Als gevolg van de verstoringen zal de waterstand op bepaalde locaties op de Rijntakken boven de verwachte waterstand uitkomen bij die afvoer. Op deze locaties zal bij het passeren van de maatgevende afvoer de waterstand boven het toetspeil uitkomen. Dit negatieve effect 'de pijn' kan op verschillende manieren over de Rijntakken verdeeld worden door de afvoerverdeling bij te sturen. In deze studie zijn twee doelen geformuleerd die beide onderzocht worden op haalbaarheid:

De pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken

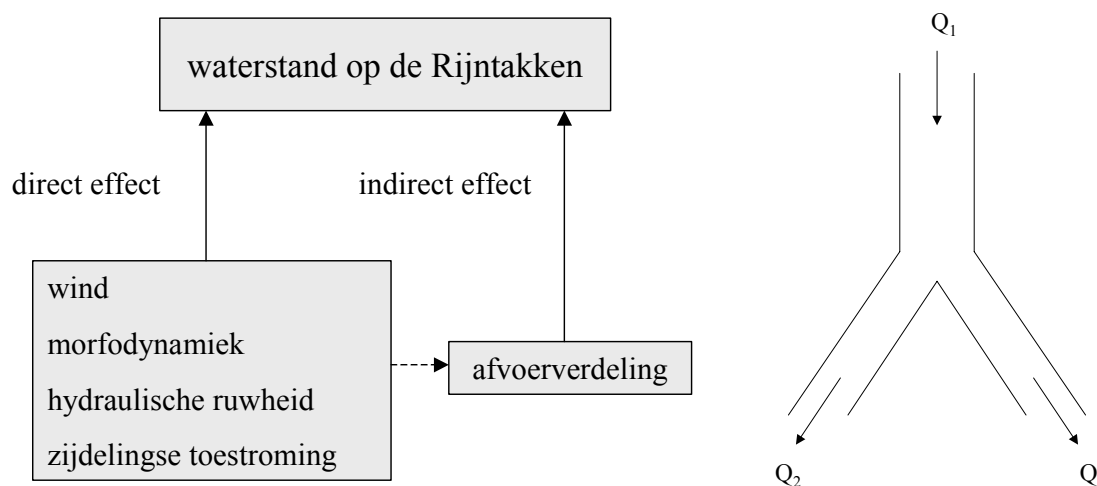
Tijdens hoogwater zal de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn zodanig worden bijgestuurd dat de waterstand op de Nederrijn, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel allemaal evenveel afwijken van de verwachte waterstand bij die afvoer.

De pijn concentreren op één Rijntak

In kader van het onderzoek zal de pijn geconcentreerd worden op de IJssel. Tijdens hoogwater zal de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn zodanig worden bijgestuurd dat de waterstand op de Waal en de Nederrijn gelijk is aan de verwachte waterstand bij die afvoer.

4.3 Verschil tussen bijsturen op afvoerafwijkingen en waterstandafwijkingen

In deze paragraaf zal het verschil aangegeven worden tussen bijsturen van de afvoerverdeling op een afvoerafwijking of een waterstandafwijking. Dit heeft namelijk consequenties voor de waterstanden op de benedenstroomse Rijntakken. In figuur 4.2 zijn de verstoringen aangegeven die de waterstand beïnvloeden.



Figuur 4.2: verstoringen die invloed uitoefenen op de waterstand bij een gegeven afvoer

Natuurlijke processen zoals wind, morfodynamiek, variatie van hydraulische ruwheid, zijdelingse toestroming, enz. hebben direct en indirect (via de afvoerverdeling) invloed op de waterstand op de benedenstroomse riviertakken van een splitsingspunt. Een wijziging in de afvoerverdeling heeft een effect op de waterstand, maar de wind, ruwheid, morfodynamiek, zijdelingse toestroming die de wijziging in de afvoerverdeling veroorzaken hebben ook rechtstreeks effect op de waterstand. Het netto effect bepaald de waterstand op de benedenstroomse riviertakken. Dit zal toegelicht worden aan de hand van twee voorbeelden:

Zijdelingse toestroming: tijdens hoogwater is het wateraanbod vanuit het binnendijkse gebied in het Nederlandse deel van het stroomgebied groot. Dit water zal met gemalen of onder natuurlijk verval op de rivier geloosd worden en zal op de betreffende riviertak tot een hogere waterstand leiden. Wanneer de lozing dichtbij een splitsingspunt plaatsvindt, dan is de waterstandverhoging tot daar merkbaar en is zo van invloed op de afvoerverdeling.

Wind: heeft door opwaaiing rechtstreeks effect op de waterstand. Door opstuwning kan het effect van de wind merkbaar zijn tot het splitsingspunt en is zo van invloed op de afvoerverdeling. Afhankelijk van de windrichting versterken deze effecten elkaar, of werken ze elkaar tegen.

Bijsturen van de afwijking in de afvoerverdeling betekent, als gevolg van deze twee effecten op de waterstand, niet per definitie dat de situatie op de Rijntakken verbeterd wordt. Dit zal worden toegelicht aan de hand van twee voorbeelden:

In één van de casestudies bestaat de verstoring uit een verhoging van de hydraulische over de eerste kilometers ruwheid op één benedenstroomse riviertak van een splitsingspunt. Dit heeft een waterstandverhoging op de betreffende riviertak tot gevolg over de eerste kilometers. Aangezien de waterstandverhoging merkbaar is tot aan het splitsingspunt zal meer water over de andere riviertak afgevoerd worden. De waterstandverhoging als gevolg van de hogere hydraulische ruwheid wordt hierdoor verdeeld over de benedenstroomse riviertakken. Herverdeling van de afvoer (afwijking in de afvoerverdeling) heeft in dit geval een positief effect op de waterstand op de riviertak waar de verstoring plaatsvindt.

In dit voorbeeld wordt de hydraulische ruwheid verlaagd over de eerste kilometers op één benedenstroomse riviertak van een splitsingspunt. Dit heeft een waterstandverlaging op de betreffende riviertak tot gevolg over de eerste kilometers. Aangezien de waterstandverlaging merkbaar is tot aan het splitsingspunt wordt meer water over deze riviertak afgevoerd. Op de riviertak waar de hydraulische ruwheid is verlaagd leidt dit tot hogere waterstanden benedenstrooms van de verstoring. Herverdeling van de afvoer (afwijking in de afvoerverdeling) heeft in dit geval een negatief effect op de waterstand op de riviertak waar de verstoring plaats vindt.

Bijsturen van afvoerafwijkingen

Door de afwijking in de afvoerverdeling bij te sturen wordt uitsluitend het indirecte effect van de verstoring op de waterstand verkleind. In het eerste voorbeeld wordt de situatie op de Rijntakken verslechterd wanneer de afwijking in de afvoerverdeling wordt bijgestuurd. Door de afwijking in de afvoerverdeling bij te sturen wordt het positieve effect van de herverdeling ongedaan gemaakt. In het tweede voorbeeld wordt de situatie op de Rijntakken verbeterd wanneer de afwijking in de afvoerverdeling wordt bijgestuurd.

Bijsturen van waterstandafwijking

Door op waterstandafwijkingen bij te sturen wordt op het netto effect (directe en indirecte effect op de waterstand) van de verstoring bijgestuurd.

4.4 Waterstanden of afvoeren

In deze paragraaf zal op grond van de eigenschappen van de meetmethoden: tijdsduur van de meting, meetnauwkeurigheid van de meetmethoden, bestaand meetneet op de Rijn en uitvoerbaarheid van de meting tijdens hoogwater gekozen worden voor waterstandmetingen of afvoermetingen.

4.4.1 Eigenschappen van de verschillende meetmethoden

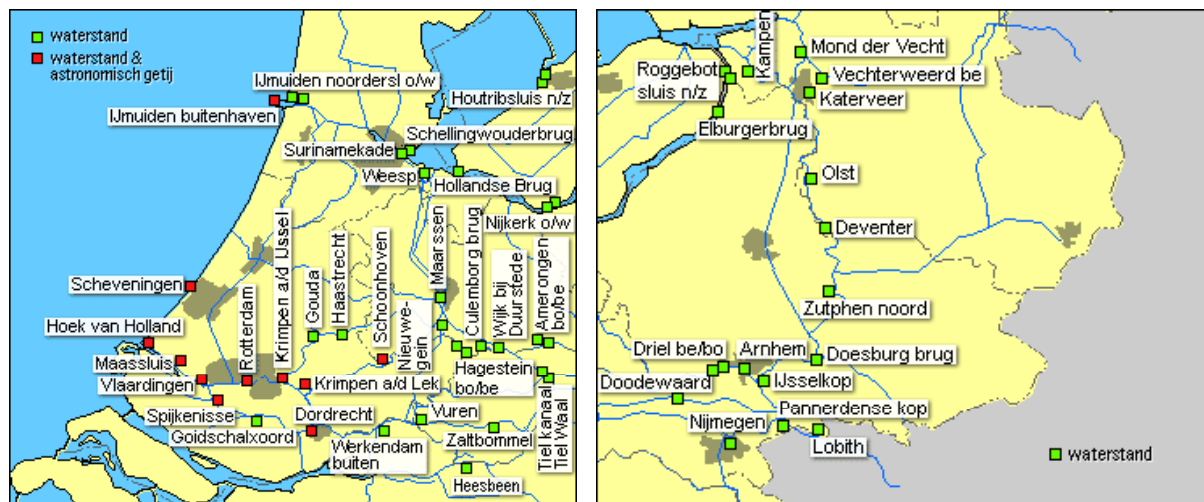
In tabel 4.1 worden de meest gebruikte meetmethoden beschreven voor waterstandmetingen en afvoermetingen. In de tabel is bij elke meetmethode het meetprincipe en de voor- en nadelen van de meetmethode aangegeven. De meetonzekerheid van de verschillende meetmethoden zijn reeds in hoofdstuk 2 behandeld maar zijn voor het overzicht opgenomen.

Tabel 4.1: eigenschappen van de meetmethoden

eigenschappen	waterstand peilschrijver digitaal	afvoer Ott-molen	ADCP-meting
meetprincipe	De meting is gebaseerd op een vlotter die drijft in een verticale peilbuis. Deze peilbuis staat via een horizontale toevoerleiding in verbinding met het buitenwater. Op deze manier wordt de invloed van de golflslag geëlimineerd. Met behulp van een digitale peilschrijver kan een waterstandmeting volledig geautomatiseerd worden. De vlotterbeweging wordt namelijk via een digitaal signaal overgebracht en kan vervolgens digitaal verwerkt en opgeslagen worden.	De afvoer wordt indirect gemeten. De gemeten afvoer is gebaseerd op een aantal gemeten grootheden zoals de breedte, de diepte en de stroomsnelheid op een bepaalde locatie. De stroomsnelheid van het water kan gemeten worden met een Ott-molen. Het principe is gebaseerd op de relatie tussen de snelheid van het water en de resulterende hoeksnelheid van de Ott-molen. De stroomsnelheden gecombineerd met de breedte- en de dieptemetingen levert een afvoer op over de gehele dwarsdoorsnede van de rivier.	De stroomsnelheid wordt gemeten met behulp van akoestische meetapparatuur die bestaat uit een digitale processor en een onderwaterdeel met vier akoestische transducenten. Vanuit de transducenten worden geluidspulsen verstuurd. De looptijd van de geluidspulsen tussen de transducenten is een maat voor de stroomsnelheid. De afvoer wordt in de digitale processor berekend uit de gemeten snelheid, uit de met behulp van een digitale niveaumeter gemeten waterhoogte en uit de dwarsdoorsnede van de waterloop.
meetnauwkeurigheid	Meetonzekerheid in een enkele waterstandmeting wordt maximaal geschat op 1 cm (betrouwbaarheidsinterval van 95%). [Herschey, 1999]	Meetonzekerheid in een enkele afvoermeting wordt geschat op 5% van de afvoer (betrouwbaarheidsinterval van 95%). [Herschey, 1999]	Meetonzekerheid in een enkele afvoermeting wordt geschat op 5% van de afvoer (betrouwbaarheidsinterval van 95%). [Herschey, 1999]
voordelen	<ul style="list-style-type: none"> • Volledig geautomatiseerd. • Makkelijk uit te voeren tijdens hoogwater. • Continue beschikbaar behoudens uitval als gevolg van bijvoorbeeld stroomuitval. • Er staan meetstations langs de Rijn. (Monitoring Systeem Water) 	<ul style="list-style-type: none"> • Veel ervaring mee. 	<ul style="list-style-type: none"> • Een enkele afvoermeting neemt enkele minuten in beslag. • Afvoermeting is geautomatiseerd
nadelen	<ul style="list-style-type: none"> • De afvoer wordt indirect gemeten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Een enkele afvoermeting neemt enkele uren in beslag. • Afhankelijk van beschikbaarheid van meetboten en personeel 	<ul style="list-style-type: none"> • Afhankelijk van beschikbaarheid van meetboten en personeel

4.4.2 Bestand meetnet van waterstanden en afvoeren langs de Rijn

Rijkswaterstaat beschikt over het Monitoring System Water (MSW). Dit meetnet levert doorlopend informatie over de actuele waterstanden op de Nederlandse kust- en binnenwateren (zie figuur 4.3). In het MSW worden digitale peilschalen gebruikt voor het meten van de waterstanden. Op de meetlocaties wordt uit de meetwaarden, elke 10 seconden een gemiddelde bepaald. De 10-seconden-gemiddelden worden, na automatische controle, omgezet naar gemiddelde waarden over 10-minuten. Deze 10-seconden-gemiddelden worden via een vaste telefoonverbinding naar een centraal computersysteem verstuurd en opgeslagen in een computerbestand.



Figuur 4.3: waterstandmeetpunten in Midden-Oost Nederland (bron: www.actuelewaterdata.nl)

De afvoer wordt daarentegen incidenteel gemeten door Rijkswaterstaat doormiddel van de Ott-molen en tegenwoordig ook doormiddel van ADCP-metingen. Bij hoogwater vinden bijvoorbeeld afvoermetingen plaats op de splitsingspunten van de Rijn om de afvoerdeling vast te stellen.

4.4.3 Uitvoerbaarheid meetmethode tijdens hoogwater

Om tijdens hoogwater in korte tijd over voldoende afvoermetingen te beschikken zullen op de splitsingspunten van de Rijn meer metingen tegelijk uitgevoerd moeten worden. Dit geldt het sterkst voor de Ott-meting die enkele uren in beslag neemt. Op korte termijn moet dus over meetboten en personeel beschikt kunnen worden. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van het materieel en personeel van de meetdienst van Rijkswaterstaat. Voor de waterstandmetingen kan gebruik gemaakt worden van het bestaande meetnet van Rijkswaterstaat. Hiermee kan snel en eenvoudig beschikt worden over voldoende actuele waterstanden.

4.4.4 Keuze meetmethode

De mate waarin de overstromingskans verkleind kan worden door middel van een regelaar wordt onder andere bepaald door de kwantiteit, de betrouwbaarheid en de actualiteit van de metingen tijdens hoogwater.

- Waterstandmetingen hebben een hoge meetnauwkeurigheid, zijn volledig geautomatiseerd, nemen nauwelijks tijd in beslag en zijn snel beschikbaar waardoor relatief eenvoudig over een betrouwbare continue reeks actuele waterstanden beschikt kan worden op verschillende locaties langs de rivier.
- De Ott-meting neemt veel tijd in beslag en daarom is het lastig om over voldoende afvoermetingen te beschikken tijdens hoogwater. De ADCP-meting biedt in dit opzicht meer perspectief maar de meetnauwkeurigheid van de afvoermeting, zowel van de Ott-meting als van

de ADCP-meting, is erg laag. De afwijking in de afvoerverdeling (zie hoofdstuk 2) is ingeschat op maximaal 2% van de te verdelen bovenafvoer terwijl de meetnauwkeurigheid van de afvoermeting is ingeschat op 5%.

Afvoermetingen voldoen niet aan de eisen die een regelaar eraan stelt: de Ott-meting neemt veel tijd in beslag en bovendien is de meetnauwkeurigheid van zowel de Ott-meting als de ADCP-meting te laag om de afvoer bij te sturen. Daarom zal in het vervolg van dit onderzoek onderzocht worden of de onzekerheid in de waterstand verkleind kan worden op grond van waterstandmetingen.

4.5 Bijsturen op basis van waterstandmetingen

In deze paragraaf zal bekeken worden hoe de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn bijgestuurd kan worden op basis van waterstandmetingen. Eerst (4.5.1) zal ingegaan worden op het principe van bijsturen op waterstanden: vergelijken van de gemeten waterstand op de Rijntakken met de verwachte waterstand bij die afvoer. Daarna (4.5.2) zullen 3 criteria geformuleerd worden waarop basis van waterstanden de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn bijgestuurd kan worden. Tenslotte (4.5.3) zal aangegeven worden hoe de verwachte waterstand bij een gegeven afvoer bepaald kan worden op de Rijntakken tijdens hoogwater.

4.5.1 Bijsturen op waterstandafwijkingen

Om te toetsen of het waterproces op de Rijntakken verloopt volgens de geformuleerde doelen wordt op verschillende meetstations langs de Rijntakken de waterstand gemeten. Door de gemeten waterstand te vergelijken met de verwachte waterstand bij die afvoer op de meetstations (waterstandafwijking) kan vastgesteld worden hoeveel de actuele situatie afwijkt van de doelstelling. Door de afvoerverdeling bij te sturen kan de actuele situatie op de Rijn veranderd worden in de richting van de doelstelling.

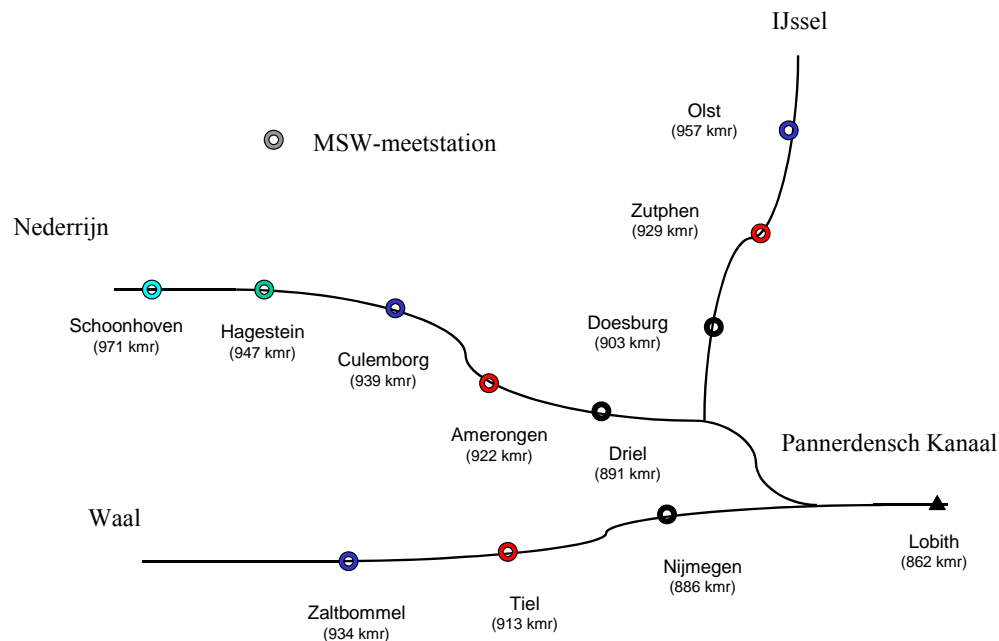
4.5.2 Criteria waarop basis van waterstanden wordt bijgestuurd

Om te bepalen welke kant de afvoerverdeling opgestuurd moet worden wordt de situatie op de verschillende Rijntakken met elkaar vergeleken. Per Rijntak zal bekeken worden hoeveel de waterstand op de tak afwijkt van de verwachte waterstand bij die afvoer. De situatie op een enkele Rijntak wordt vastgesteld door gebruik te maken van één of verschillende meetstations langs de riviertak. In het kader van het onderzoek zijn 3 criteria geformuleerd waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling bijgestuurd gaat worden. Hierbij zijn 2 criteria gebaseerd op verschillende meetstations (maximale of de gemiddelde waterstandafwijking) en 1 criterium op één meetstation namelijk het eerste meetstation op de riviertak (zie tabel 4.2).

Tabel 4.2: criteria waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling op de splitsingspunten wordt bijgestuurd

criterium	aantal meetstations (afhankelijk van de riviertak)	locatie	waterstandafwijking per tak
1	3-5	-	maximale
2	3-5	-	gemiddelde
3	1	eerste	-

Bij het bijsturen op waterstandafwijkingen zal gebruik gemaakt worden van de bestaande MSW-meetstations op de Rijn. In figuur 4.4 zijn de MSW-meetstations weergegeven die gebruikt zullen worden om de afvoer bij te sturen.

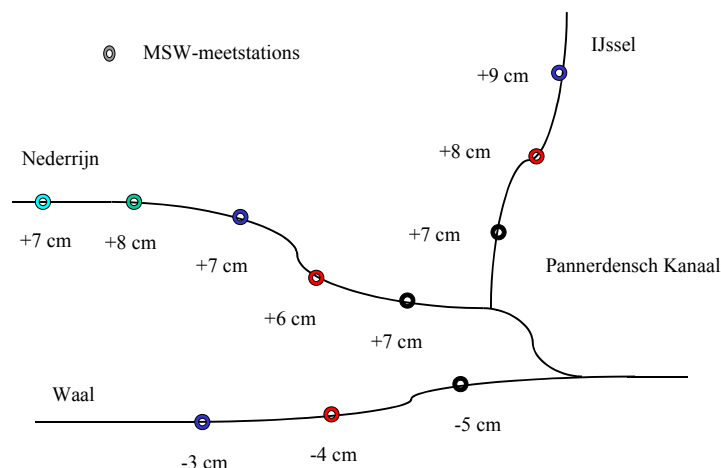


Figuur 4.4: gebruikte MSW-meetstations

Om instabiliteit in het regelproces te voorkomen als gevolg van negatieve wederzijdse beïnvloeding van de regelwerken op de IJsselkop en de Pannerdensch Kop zal het regelwerk op het Pannerdensch Kop aangestuurd worden op grond van waterstandmetingen op de Nederrijn en IJssel in plaats van het Pannerdensch Kanaal. De waterstand op de Rijntakken bovenstrooms van de splitsingspunten wordt namelijk beïnvloed door het regelwerk op de splitsingspunten van de Rijn. Bij elke ingreep van het regelwerk op de IJsselkop zal de waterstand op het Pannerdensch Kanaal wijzigen en hierop zal het regelwerk op de Pannerdensch Kop reageren. Door het regelwerk op de Pannerdensch Kop bij te sturen op grond van waterstandmetingen op de Nederrijn en de IJssel wordt het regelwerk op de Pannerdensch Kop ongevoelig voor het effect van het regelwerk op de IJsselkop op de waterstand van het Pannerdensch Kanaal.

Hieronder is in een voorbeeld aangegeven hoe op basis van de waterstandafwijking op de meetstations (verschil gemeten waterstand en verwachte waterstand bij die afvoer) bepaald kan worden naar welke kant de afvoerverdeling bijgestuurd moet worden op de splitsingspunten van de Rijn. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de twee doelen en de criteria waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling kan worden bijgestuurd.

Voorbeeld: Bepalen welke kant de afvoerverdeling bijgestuurd moet worden op de splitsingspunten van de Rijn op basis van de waterstandafwijking op de meetstations



Figuur 4.5: waterstandafwijking (verschil tussen gemeten waterstand en verwachte waterstand bij die afvoer) op de meetstations

Tabel 4.3: bepalen situatie op de verschillende Rijntakken

criterium	omschrijving	situatie per riviertak			
		Waal (cm)	Pan. Kan. * (cm)	Nederrijn (cm)	IJssel (cm)
1	één meetstation per riviertak (eerste)	-5	+7	+7	+7
2	verschillende meetstations per riviertak (gem. waterstandafwijking)	-4	+7,5	+7	+8
3	verschillende meetstations per riviertak (max. waterstandafwijking)	-3	+8,5	+8	+9

* gemiddelde waarde van Nederrijn en IJssel

Tabel 4.4: de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken

Rijntak	enkel meetstation per riviertak	verschillende meetstations per riviertak	
	eerste (cm)	gemiddelde (cm)	maximale (cm)
Waal	+6	+5,75	+5,75
Pannerdensch Kanaal	-6	-5,75	-5,75
Nederrijn	0	+0,5	+0,5
IJssel	0	-0,5	-0,5

Tabel 4.5: de pijn concentreren op één Rijntak (IJssel)

Rijntak	enkel meetstation per riviertak	verschillende meetstations per riviertak	
	eerste (cm)	gemiddelde (cm)	maximale (cm)
Waal	+5	+4	+3
Pannerdensch Kanaal	-	-	-
Nederrijn	-7	-7	-8
IJssel	-	-	-

4.5.3 Bepalen van de verwachte waterstand

Om de afvoerverdeling bij te kunnen sturen tijdens hoogwater moet de actuele situatie op de Rijntakken vergeleken kunnen worden met de gewenste situatie. Hiervoor zal de gemeten waterstand op de meetstations vergeleken worden met de verwachte waterstand bij die afvoer. De verwachtingswaarde van de waterstand bij die afvoer kan berekend worden aan de hand van het hydraulisch model dat gebruikt wordt om de toetspeilen op de Rijn te berekenen. Tijdens hoogwater wordt de verwachte waterstand verkregen door de afvoer of de waterstand bij Lobith te meten en deze in te voeren in het hydraulisch model. Waterstandmetingen liggen het meest voor de hand omdat de meetonzekerheid in de afvoermeting erg hoog is (zie hoofdstuk 2). Dat tijdens hoogwater precies de verwachtingswaarde van de waterstand bij die afvoer bij Lobith wordt gemeten is echter klein want:

1. de gemeten waterstand bij Lobith kan afwijken van de werkelijke waterstand als gevolg van meetonzekerheden;
2. de waterstand bij Lobith is afhankelijk van natuurlijke processen zoals wind, ruwheid en morfodynamiek;
3. de waterstand bij Lobith wordt mogelijk beïnvloed door de regelwerken op de splitsingspunten van de Rijn tijdens hoogwater. Deze invloed kan overigens verkleind worden door de waterstand verder bovenstrooms van de splitsingspunten te meten.

Door meetonzekerheden, onzekerheden in de Qh-relatie bij Lobith (variatie in natuurlijke processen en de invloed van de regelwerken) zal de gemeten waterstand afwijken van de verwachtingswaarde. Deze onzekerheden werken door bij het berekenen van de verwachte waterstand op de Rijntakken. Er zit dus een onzekerheid in de verwachte waterstand. De effectiviteit van het bijsturen van de afvoerverdeling wordt hierdoor beïnvloed. Hoe groot het effect is zal nader onderzocht moeten worden.

5 Regeling simuleren in een hydraulisch model

Door simulatie van de regeling in een hydraulisch model kan het effect op de waterstand bepaald worden van het bijsturen van de afvoerverdeling. Aan de hand van dit effect zal een uitspraak gedaan worden of het zinvol is om de afvoerverdeling te regelen op de splitsingspunten van de Rijn. De regeling zal gesimuleerd worden in het 1-D Sobek Rijntakken model. Dit model dat door Rijkswaterstaat (RIZA) in samenwerking met WL|Delft Hydraulics is ontwikkeld bootst de waterbeweging na op de Rijn. In dit hoofdstuk zal eerst (5.1) ingegaan worden op het 1-D Sobek Rijntakken model waarin de regeling gesimuleerd zal worden. Hierin zal aandacht besteed worden aan de schematisatie en de modelinvoer. Daarna (5.2) zal het Rijntakken model uitgebreid worden met een regeling. Hierbij zal aandacht besteed worden aan de volgende onderdelen: uitbreiding 1-D Sobek Rijntakken model, schematisatie van de regeling en tenslotte aan het instellen van de regelaar.

5.1 Sobek Rijntakken model zonder regeling

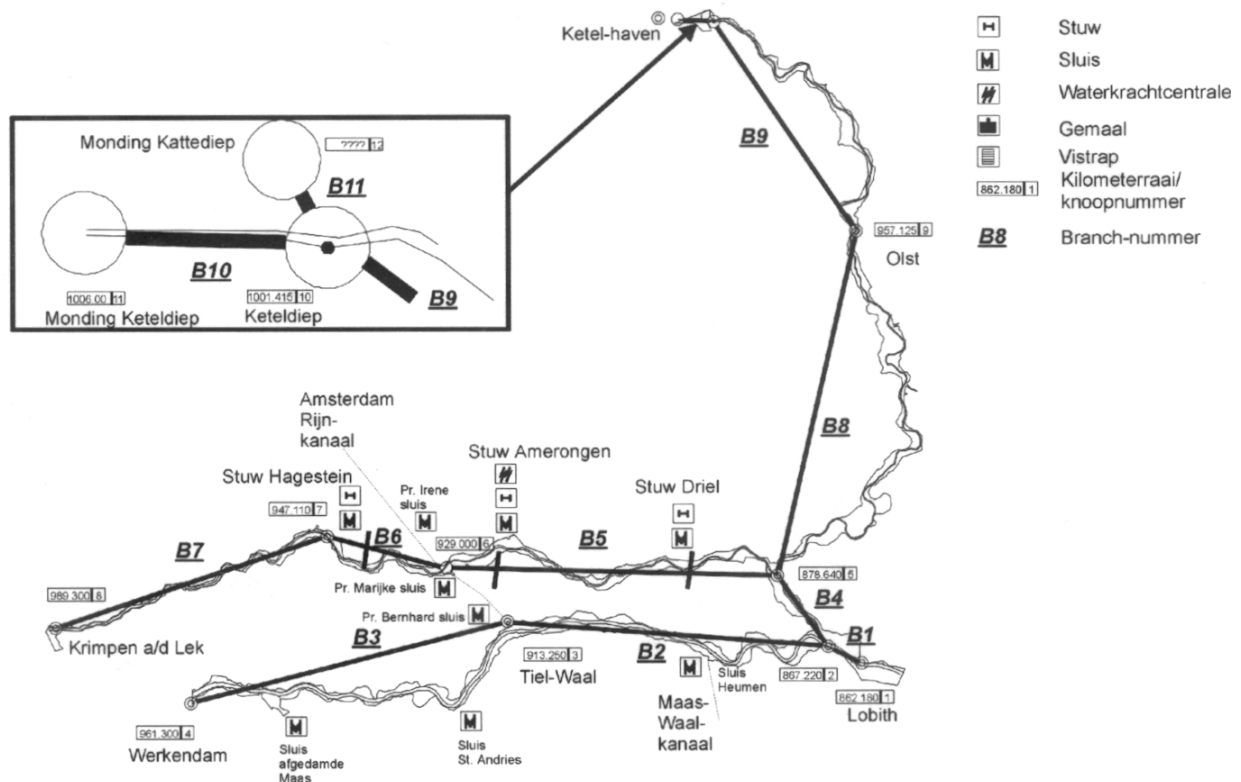
Met behulp van het Rijntakken model kunnen de waterstanden op de rivier berekend worden, rekening houdend met allerlei onregelmatigheden in de rivier, onder invloed van een hoogwatergolf. In de modelschematisatie (5.1.1) komt aanbod hoe deze onregelmatigheden zijn aangebracht in het hydraulisch model. Daarna (5.1.2) zullen bij de modelinvoer de randvoorwaarden, de beginvoorwaarde en de modelparameters aanbod komen. Tenslotte zal in (5.1.3) aandacht besteed worden aan de calibratie en de verificatie van het model.

5.1.1 Modelschematisatie

Het 1-D Sobek Rijntakken model beschrijft de Rijn met al zijn onregelmatigheden, zoals variaties in de geometrie, variaties in uiterwaardbreedte, variaties in vegetatietype in de uiterwaarden en de aan- of afwezigheid van zomerdijken.

Modelbeschrijving

Het Sobek Rijntakken model bestrijkt de Bovenrijn van Lobith, de Waal en Boven Merwede tot Werkendam. Het Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek tot Krimpen aan de Lek en de IJssel, Keteldiep en Kattendiep tot de monding in het Ketelmeer. In figuur 5.1 is het Rijntakkengebied en de schematisering in Sobek-takken en knopen globaal weergegeven. De Rijntakken zijn geschematiseerd als 11 takken en 7 knopen. Het model bevat 1 bovenrand, 4 benedenranden en 3 stuwen.

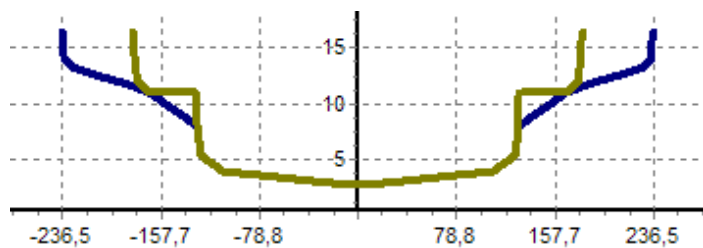


Figuur 5.1: sobek schematisering van de Rijntakken (bron: Van der Veen, 2002)

Riviergeometrie

De ruimtelijke geometrie van de rivier is in het Sobek Rijntakken model weergegeven in dwarsprofielen. Een dwarsprofiel is de kleinste eenheid waarin de geometrie van de rivier beschreven wordt. In Sobek is het dwarsprofiel opgedeeld in drie secties: het zomerbed, de oeversectie en het winterbed. Aangezien Sobek een 1-dimensionaal model is, wordt uitgegaan van een symmetrisch profiel: het linker gedeelte van het dwarsprofiel is gelijk aan het rechter gedeelte van het dwarsprofiel. Als gevolg hiervan treden alleen dwarsdoorsnede gemiddelde veranderingen op [Van der Veen et al., 2002].

De dwarsprofielen worden in Sobek beschreven door 15 punten. Voor elk punt wordt een totale breedte en een stroomvoerende breedte gegeven ten opzichte van een referentiehoogte. In figuur 5.2 is een dwarsprofiel voor locatie 869 kmr weergegeven.



Figuur 5.2: dwarsprofiel Sobek op locatie 869 kmr op de Waal

5.1.2 Modelinvoer

De invoer van het model bestaat uit: modelparameters, begin- en randvoorwaarden.

Modelparameters

Dit zijn de waarden van een model die voor de berekening zijn gedefinieerd en onveranderd blijven gedurende de berekening. Belangrijke modelparameters voor dit onderzoek zijn:

1. wind
2. hydraulische ruwheid

ad 1) De modelparameter wind, zowel windrichting als windkracht, kan in het Sobek Rijntakken model ingevoerd worden als functie van de tijd.

ad 2) De hydraulische ruwheid van het zomerbed is gerelateerd aan de afvoer op de betreffende tak; ruwheid (Chezy-waarde) als functie van de afvoer (Q) op de betreffende riviertak. Voor de hydraulische ruwheid van de winterbed wordt een constante waarde ingevoerd.

Beginvoorwaarde

Voor de hydraulische beginvoorwaarde wordt aan elke tak een constante afvoer opgelegd in combinatie met de hydraulische waterstand op elk rekenpunt langs de betreffende tak. Tussen opeenvolgende rekenpunten worden de waterstanden lineair geïnterpoleerd.

Randvoorwaarden

- Voor de bovenstroomse hydraulische randvoorwaarde van het model bij Lobith wordt gebruik gemaakt van een afvoerreeks: de afvoer (Q) als functie van de tijd (t).
- Voor de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarden van het model bij Werkendam, Krimpen aan de Lek en Ramspol-brug wordt gebruik gemaakt van een Q-h relatie: diepte (h) als functie van de afvoer (Q) van de betreffende riviertak.

5.1.3 Calibratie en verificatie

Om te komen tot een goede beschrijving van de waterbeweging in de rivier, waterstanden en afvoeren, is het Sobek Rijntakken model gecalibreerd op het hoogwater van januari 1995. Bij de calibratie procedure worden de ruwheden van het zomerbed, de oeversectie en het winterbed op systematische wijze gevarieerd totdat de verschillen tussen gemeten en berekende waarden van de waterstanden en de afvoeren klein genoeg zijn. Voor de verificatie is gebruik gemaakt van de hoogwaters 1993 en 1998.

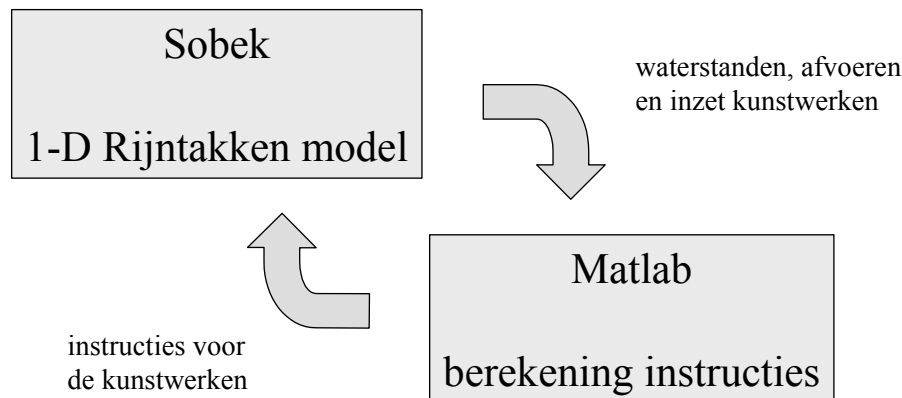
Het Sobek Rijntakken model is gecalibreerd en geverifieerd in Sobek River. Het doel van dit onderzoek is om te onderzoeken wat het effect van bijsturen van de afvoerverdeling is op de waterstand op de Rijn. Hiervoor zal het Sobek Rijntakken model uitgebreid moeten worden met een regeling. Dit is niet mogelijk in Sobek River. Daarom is de schematisatie van de Rijntakken overgezet naar Sobek Rural. Bij gelijke model invoer blijkt de waterstand op de Rijntakken bij de verschillende versies van Sobek te verschillen (maximaal 20 cm). Aangezien de afvoerverdeling op de splitsingspunten wordt bijgestuurd op waterstandafwijkingen en niet op absolute waterstanden kan Sobek Rural gebruikt worden zonder het model opnieuw gecalibreerd hoeft te worden.

5.2 Sobek Rijntakken model met regeling

Om het effect van het bijsturen van de afvoerverdeling op de waterstand op de benedenstrooms gelegen riviertakken te bepalen zal het Rijntakken model uitgebreid worden met een regeling. In deze paragraaf (5.2.1) wordt beschreven hoe het Rijntakken model is uitgebreid. Daarnaast (5.2.2) is aandacht besteed aan de schematisatie van het regelwerk. Ten slotte (5.2.3) worden de regelparameters ingesteld voor de regelaar.

5.2.1 Uitbereiden van het Sobek Rijntakken model

In het bestaande Sobek Rijntakken model is het niet mogelijk om de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn bij te sturen op basis van gemeten waterstanden op verschillende meetstations. Daarom zal het Sobek Rijntakken model gekoppeld worden aan Matlab: dit is een computerprogramma waarmee rekenkundige bewerkingen uitgevoerd kunnen worden. De koppeling maakt het mogelijk om tijdens een Sobek-berekening gegevens met Matlab uit te wisselen. Zo kunnen waterstanden, afvoeren en de inzet van de regelwerken uit het Sobek Rijntakken model worden toegeleverd aan Matlab, waarna in Matlab instructies voor de regelwerken berekend kunnen worden. Deze worden vervolgens teruggeven aan het Sobek Rijntakken model (zie figuur 5.3).



Figuur 5.3: koppeling Sobek Rijntakken model met Matlab

De waterbeweging op de Rijntakken wordt nagebootst in Sobek met rekenstappen van 10 minuten. Het Sobek Rijntakken model zal na een simulatieperiode van een uur onderbroken worden om nieuwe instructies voor de regelwerken te berekenen; deze instructies worden vervolgens gedurende de volgende periode door Sobek gehanteerd bij het simuleren van de waterbeweging op de Rijn. De reden waarom gekozen is voor een uur is dat een hoogwatergolf op de Rijn wordt gekenmerkt door een langzame stijging en daling van de waterspiegel in enkele dagen. Wanneer de hoogwatergolven van 1926, 1993 en 1995 erop na worden gekeken moet rekening gehouden worden een stijging/daling van ongeveer een 0.5 meter per dag. Het bijsturen van de afvoerverdeling zal daarom eerder plaats vinden op een tijdschaal van uren dan minuten.

5.2.2 Schematisatie van het regelwerk

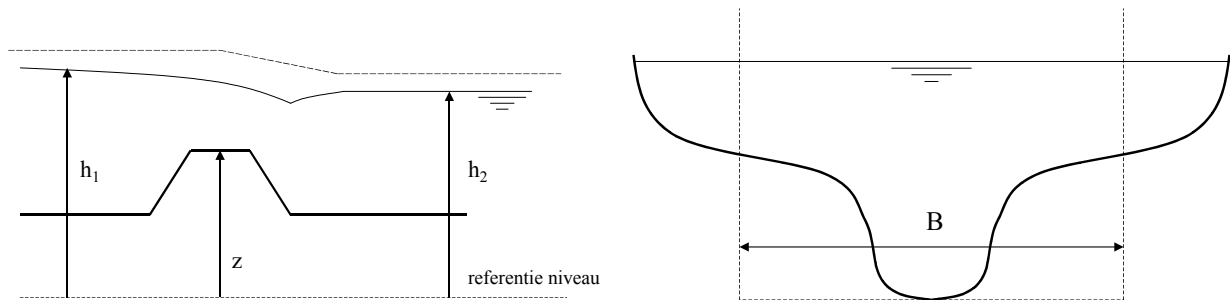
De afvoerverdeling zal in dit onderzoek bijgestuurd worden door de weerstand op een riviertak te vergroten. De weerstand op een riviertak zal in dit onderzoek vergroot worden door een beweegbare drempel aan te brengen op beide riviertakken benedenstrooms van het splitsingspunt. Eerst zal toegelicht worden waarom gekozen is om de weerstand op een riviertak te verhogen in plaats van de verlagen. Hierna zal ingegaan worden op de wijze waarop de beweegbare drempel geschematiseerd is in het Sobek Rijntakken model.

Keuze

In hoofdstuk 3 zijn de mogelijkheden tot het regelen van de afvoerverdeling onderzocht. De afvoerverdeling kan beïnvloed worden door met een regelwerk de weerstand op een riviertak te verhogen of te verlagen. Het plaatsen van stuwen of afsluitbare constructies in het winterbed op korte afstand benedenstrooms van een splitsingspunt en de aanleg van een nevengeul lijken de meest voor de hand te liggen maatregelen om respectievelijk de weerstand op een riviertak te verhogen of te verlagen. Weerstand verhogen heeft als nadeel dat het leidt tot een verhoging van de bovenstroomse waterstand. Een nevengeul brengt echter hoge kosten met zich mee omdat een nevengeul tot ver benedenstrooms van de splitsingspunt nodig zal zijn. In dit onderzoek wordt de afvoer bijgestuurd door de weerstand te verhogen op de riviertakken. Door de weerstand te verhogen op een riviertak kan door een relatief goedkoop en eenvoudig regelwerk de afvoerverdeling bijgestuurd worden.

Schematisatie

In het Sobek Rijntakken model is de weerstand op een riviertak verhoogd door een stuw (beweegbare drempel) aan te brengen in het rivierbed (figuur 5.4).



Figuur 5.4: schematisatie stuw

De volgende afvoervergelijkingen worden toegepast bij de Sobek-berekening:

Vrije afvoer

$$Q = c \cdot B \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot (h_1 - z)^3} \quad \text{als} \quad h_2 - z < \frac{2}{3} \cdot (h_1 - z) \quad (5.1)$$

Gestuwde afvoer

$$Q = c \cdot B \cdot (h_1 - z) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \text{als} \quad h_2 - z \geq \frac{2}{3} \cdot (h_1 - z) \quad (5.2)$$

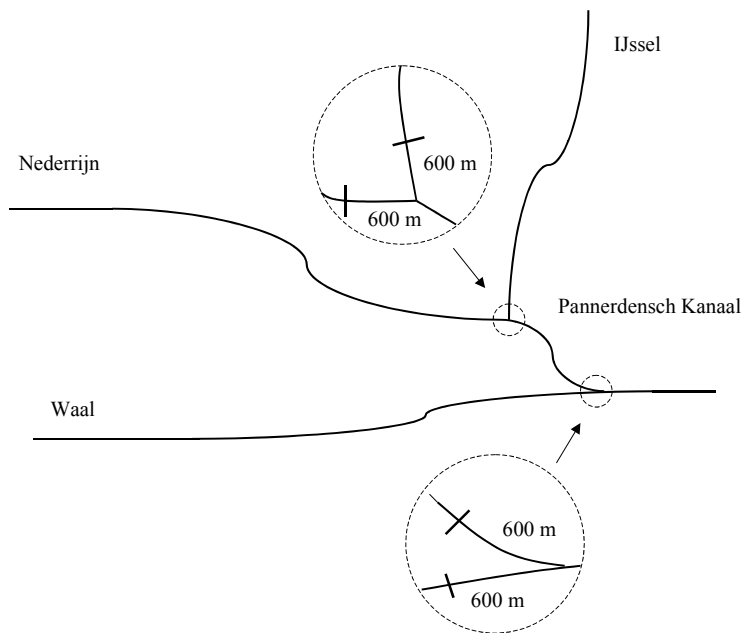
- $Q =$ afvoer over drempel (m^3/s)
- $B =$ drempelbreedte (m)
- $c =$ afvoercoëfficiënt (-)
- $z =$ drempelhoogte (m)
- $g =$ gravitatie constante (m/s^2)
- $h_1 =$ bovenstroomse waterhoogte (m)
- $h_2 =$ benedenstroomse waterhoogte (m)

De geometrie van de beweegbare drempel wordt uitsluitend beschreven door de breedte, de hoogte en de afvoercoëfficiënt van de drempel. De schematisatie van de drempel brengt de volgende beperkingen met zich mee:

- niet mogelijk om alleen de weerstand in het winterbed te verhogen
- niet mogelijk om de geometrie van de stuw aan te passen aan de geometrie van de rivier met karakteristieke zomer- en winterbed

Ondanks de sterk vereenvoudigde schematisatie van het regelwerk is de schematisatie voldoende om de haalbaarheid van de doelen, zie hoofdstuk 4, in te schatten. In een eventuele vervolgstudie waarin het regelwerk uitgewerkt wordt gaat deze schematisatie niet meer op.

Omdat niet van tevoren is aan te geven welke kant de afvoerbeïnvloeding op moet werken, zal op beide takken van een splitsingspunt een beweegbare drempel aangelegd worden. Het effect van een drempel is groter naarmate het dichterbij het splitsingspunt ligt. Daarom zal in het Sobek Rijntakken model drempels gelegd worden op 600 meter benedenstrooms van de splitsingspunten (zie figuur 5.5). In bijlage A is voor elke drempel aangegeven hoe de drempel is geschematiseerd in de rivierdoorsnede van de betreffende Rijntak. Daarnaast wordt in de bijlage voor elke drempel een grafiek gegeven waarin het verhang gegeven wordt over de drempel als functie van de drempelhoogte bij verschillende afvoeren bij Lobith.



Figuur 5.5: locatie van de beweegbare drempels

5.2.3 Instellen van de regelaar

De beweegbare drempels zullen aangestuurd worden op grond van waterstandmetingen op verschillende locaties langs de Rijn. Om van metingen te komen tot ingrepen zullen de meetsignalen aan rekenkundige bewerkingen onderworpen moeten worden. Het computerprogramma Matlab zal deze functie vervullen en is daarmee de regelaar. De vertaling van waterstanden tot ingegrepen zal gebeuren door middel van een discrete PI-regelaar.

Een PI-regelaar, zoals in hoofdstuk 3 beschreven, heeft twee parameters die afgeregeld moeten worden: de proportionele versterkingsfactor (K_p) en de integrerende versterkingsfactor (K_i). In deze paragraaf zal de methode omschreven worden die gevolgd is om de versterkingsfactoren te bepalen. Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar bijlage B. In totaal zullen 12 verschillende parametersets (K_p en K_i) afgeleid worden. Afgezien van twee splitsingspunten zijn voor het bijsturen van de afvoerverdeling wat variaties aangebracht: 2 verschillende doelen en 3 criteria om de afwijking in de waterstand per riviertak te bepalen. Aan het eind van deze paragraaf zijn de parametersets samengevat in twee tabellen.

Zoals eerder in dit hoofdstuk genoemd moet tijdens hoogwater rekening gehouden met een waterstandstijging van ongeveer een 0,5 m per dag. Dit komt neer op een waterstandverhoging van gemiddeld 2 cm/uur. Als gevolg van onzekerheden in de afvoerverdeling, zie hoofdstuk 2, kan de waterstandstijging op een riviertak hoger of lager uitvallen. In dit onderzoek wordt aangenomen dat in een uur de waterstand 10 cm hoger of lager uit kan vallen als gevolg van onzekerheden in de afvoerverdeling. Bij het afregelen van de parameters zal deze momentane waterstandafwijking als uitgangspunt dienen.

In vergelijking (5.3) is de discrete PI-regelaar wiskundig beschreven:

$$Z(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \sum_t e(t) \quad (5.3)$$

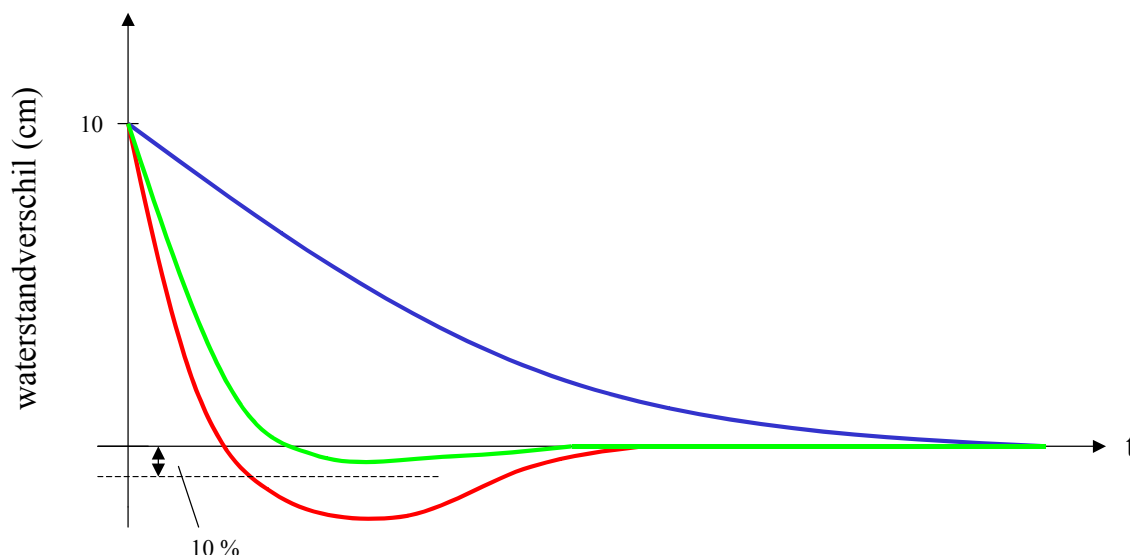
$Z(t)$ = drempelhoogte

$e(t)$ = momentane waterstandafwijking (verschil tussen de ingestelde en de gemeten waarde)

K_p, K_i = proportionele versterkingsfactor en integrerende versterkingsfactor

Door middel van de proportionele versterkingsfactor kan de momentane waterstandafwijking (10 cm) vertaald worden naar een drempelhoogte. Bij een te hoge proportionele versterkingsfactor wordt het proces instabiel: overcompensatie kan leiden tot opslingering. Daarom is voorzichtigheid geboden met de grootte van de ingreep. Daarnaast moet de drempelbeweging ook uitvoerbaar zijn: een drempel uitslag van 1 meter in 1 seconde is bijvoorbeeld niet reëel. In deze studie is de proportionele versterkingsfactor op 25 gesteld: bij een momentane waterstandafwijking van 10 cm komt neer op een drempeluitslag van 250 cm/uur. Dit komt overeen met een drempelbeweging van gemiddeld 4 cm/min.

De integrerende versterkingsfactor kan vervolgens praktisch worden bepaald door deze waarde op te voeren totdat het gewenste resultaat wordt bereikt. Bij een hoge integrerende versterkingsfactor ontstaat overcompensatie (zie figuur 5.6) en kans op opslinging. Bij een lage ontstaat geen overcompensatie maar duurt het langer voordat de ingestelde waarde wordt bereikt (zie figuur 5.6). Bij het afregelen van de parameters is overcompensatie getolereerd tot maximaal 10% van het bij te sturen waterstandverschil.



Figuur 5.6: hoge (rode lijn) en lage (blauwe lijn) integrerende versterkingsfactor

Voor elke drempel zullen de regelparameters apart vastgesteld moeten worden. Bij het bepalen van de regelparameters bleken de regelparameters van de twee drempels per splitsingspunt weinig van elkaar te verschillen. Daarom is ervoor gekozen om de regelparameters van de drempels per splitsingspunt aan elkaar gelijk te stellen.

In bijlage B zal ingegaan worden op de procedure die gevolgd is bij het afregelen van de regelparameters voor de verschillende doelen en de verschillende criteria waarop de afvoerverdeling bijgestuurd kan worden op basis van waterstandmetingen. In tabel 5.1 en 5.2 zijn de verschillende integrerende versterkingsfactoren gegeven. De proportionele versterkingsfactor is voor alle gevallen gelijk aan 25 en is daarom niet in de tabel opgenomen.

Tabel 5.1: integrerende versterkingsfactor (K_i) voor het eerste stuurdoel: waterstandafwijkingen gelijkmatig verdelen over Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel

regelaar	enkel meetstation	verschillende meetstations per riviertak	
	per riviertak	gemiddelde	maximale
	eerste	(-)	(-)
	(-)	(-)	(-)
Pannerdensche Kop	4	1,5	1,5
IJsselkop	4	2	2

Tabel 5.2: integrerende versterkingsfactor (K_i) voor het tweede stuurdoel: waterstandsafwijkingen minimaliseren op Waal en Nederrijn ten koste van Pannerdensch Kanaal en IJssel

Regelaar	enkel meetstation	verschillende meetstations per riviertak	
	per riviertak	gemiddelde	maximale
	eerste (-)	(-)	(-)
Pannerdensch Kop	5	1	1
IJsselkop	5	3	3

Bij het afregelen van de regelparameters voor de aansturing van de drempels wordt een indicatie verkregen van de tijdsduur waarin waterstandsafwijkingen weggeregeld kunnen worden. Voor alle drempels is de tijdsduur bepaald die nodig is om een de waterstandsafwijking van ongeveer 10 centimeter weg te regelen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de twee stuurdoelen en de verschillende manieren waarop basis van waterstandmetingen de afvoerdeling bijgestuurd kan worden. De tijdsduur waarin de waterstandsafwijking weggeregeld kan worden blijkt nauwelijks te verschillen voor de verschillende stuurdoelen. Bijsturen van de afvoerdeling op basis van een enkel meetstation of verschillende meetstations per riviertak maakt echter wel een verschil: het volledig weggeregelen van de waterstandsafwijking kost in het eerste geval ruim 2 dagen en in het tweede geval ongeveer 4 dagen. Bij het weggeregelen van de waterstandsafwijking wordt aan het begin van de periode het grootste rendement behaald: in het eerste geval is na 1 dag en in het tweede geval is na 2 dagen de waterstandsafwijking gereduceerd met 67%.

6 Effectiviteit van regelen afvoerverdeling

In dit hoofdstuk zal een uitspraak gedaan worden of bijsturen van de afvoerverdeling zinvol zou kunnen zijn. Dit zal gebeuren door het effect, van bijsturen van de afvoerverdeling, vast te stellen op de waterstand. Om het effect op de waterstand te kunnen bepalen zullen een aantal casestudies uitgevoerd worden waarin verschillende verstoringen aangebracht worden in het watersysteem van de Rijn. Als gevolg van de verstoringen, die allemaal een effect op de afvoerverdeling hebben, zullen de waterstanden gaan afwijken. Op basis van waterstandmetingen op verschillende locaties langs de Rijn zal de afvoerverdeling bijgestuurd worden voor de twee doelen: de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken en de pijn concentreren op één tak. In dit hoofdstuk zal eerst (6.1) ingegaan worden op de casestudies. Hierna (6.2) zal de methode toegelicht worden die gehanteerd is om het effect van bijsturen van de afvoerverdeling op de waterstand vast te stellen. Tenslotte (6.3) zullen de resultaten van de casestudies gepresenteerd en geanalyseerd worden.

6.1 Casestudies

Afgezien van het feit dat verschillende verstoringen invloed uitoefenen op de afvoerverdeling kunnen de verstoringen op verschillende locaties langs de Rijn en op verschillende tijdstippen tijdens een hoogwater optreden. Ten behoeve van de rekentijd en het overzicht zullen in het kader van het onderzoek enkele verstoringen uitgewerkt worden. In deze paragraaf zal eerst (6.1.1) aandacht besteed worden aan de keuze van de verstoringen. Hierna (6.1.2) zullen de gekozen verstoringen toegelicht worden: hoe groot is de verstoring, waar en hoe wordt de verstoring in het hydraulisch model aangebracht?

6.1.1 Keuze van de verstoringen

Bij de keuze van de verstoringen is gebruik gemaakt van [Schropp, 2002]. Hierin zijn de onzekerheden in de afvoerverdeling tijdens maatgevend hoogwater kwantitatief verkend.

In het kader van het onderzoek wordt variatie van de hydraulische ruwheid, morfologische veranderingen in de omgeving van het splitsingspunt en windeffecten als verstoring aangebracht in het hydraulisch model. Uit de studie van Schropp (2002), zie hoofdstuk 2, volgt namelijk dat variatie in ruwheid van zomerbed en uiterwaard en morfologische veranderingen in de omgeving van het splitsingspunt bij maatgevend hoogwater een flinke bijdrage leveren aan de onzekerheid in de afvoerverdeling. Als derde verstoring wordt het windeffect meegenomen: het effect op de afvoerverdeling is kleiner maar het is wel een verstoring die tijdens hoogwater plotseling op kan treden. Interessant hierbij is of het gevolg van de verstoring voor het passeren van de afvoerpiek gecorrigeerd kan worden. De verstoring wind zal op twee manier meegenomen worden waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen het tijdstip van optreden van de verstoring: windveld 11 dagen en 1 dag voor passeren afvoerpiek. Naast het soort verstoring kan ook onderscheid gemaakt worden naar de locatie van de verstoring. In dit onderzoek worden alle verstoringen aangebracht op de Waal. Wind vormt hierop een uitzondering omdat alleen gerekend kan worden met hetzelfde windveld over het hele Sobek Rijntakken model. Bij hydraulische ruwheid is onderscheid gemaakt tussen twee locaties op de Waal: hogere ruwheid van het zomerbed aan het begin en aan het eind van de riviertak.

Hieronder zijn de 5 verstoringen opgesomd die zullen worden aangebracht in het Sobek Rijntakken model. Aan de hand van deze verstoringen zal een uitspraak gedaan worden of bijsturen van de afvoerverdeling zinvol zou kunnen zijn.

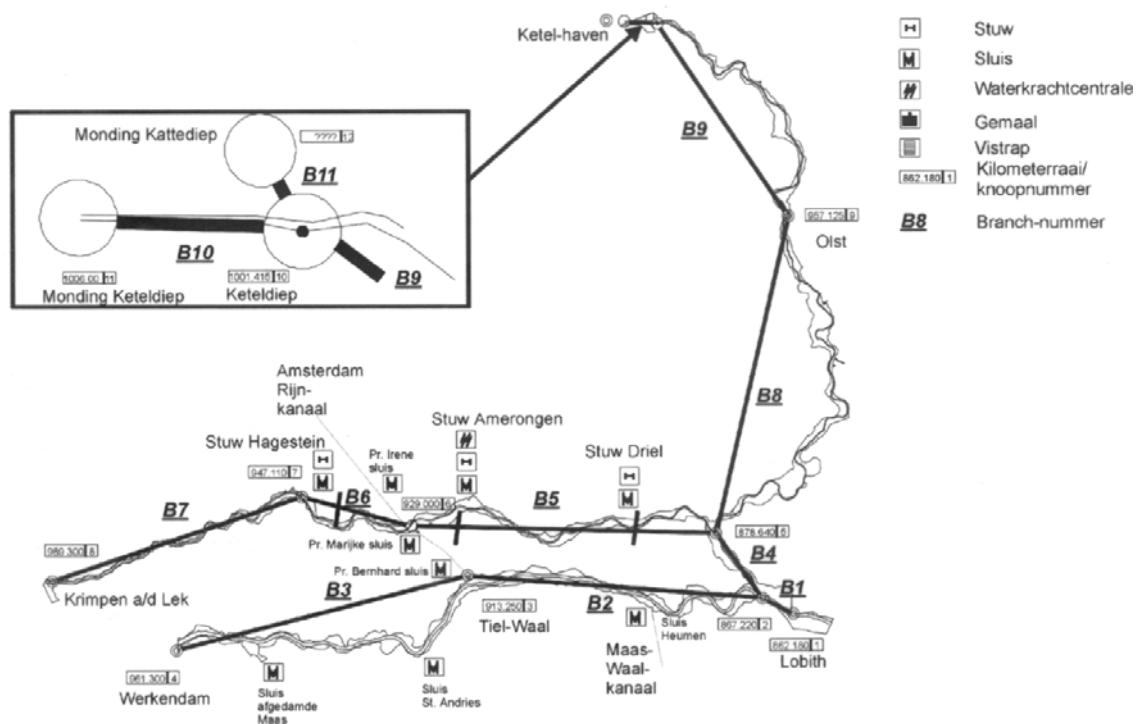
- Ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop
- Ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop

- Wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen en houdt aan tot eind van simulatie
- Wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen en houdt aan tot eind van simulatie
- Morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 meter van het splitsingspunt

6.1.2 Hydraulische ruwheid

De hydraulische ruwheid geeft de ruwheid weer van zowel het zomerbed als het winterbed. Het zomerbed oefent weerstand uit op de waterbeweging door beddingsvormen en het winterbed door vegetatie in de uiterwaarden. Het effect van hydraulische ruwheid op de afvoerverdeling is aanzienlijk wanneer de ruwheid op één riviertak veranderd wordt. Wordt de ruwheid echter op beide riviertakken verhoogd of verlaagd dan is het effect beperkt omdat beide effecten elkaar opheffen.

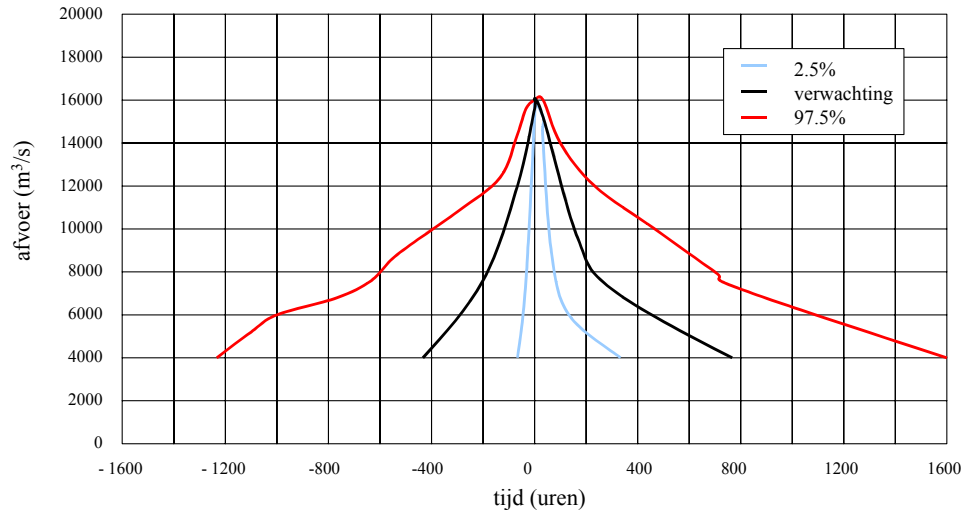
In het onderzoek zal de afvoerverdeling uit evenwicht gehaald worden door de ruwheid van het zomerbed op de Waal te verhogen, namelijk met 5%. In één geval is de ruwheid van het zomerbed op de Waal verhoogd over de eerste 47 km vanaf het splitsingspunt (branche 2). In het andere geval is de ruwheid van het zomerbed verhoogd over de tweede 47 km vanaf het splitsingspunt (branche 3), van 913 kmr tot 961 kmr (zie figuur 6.1).



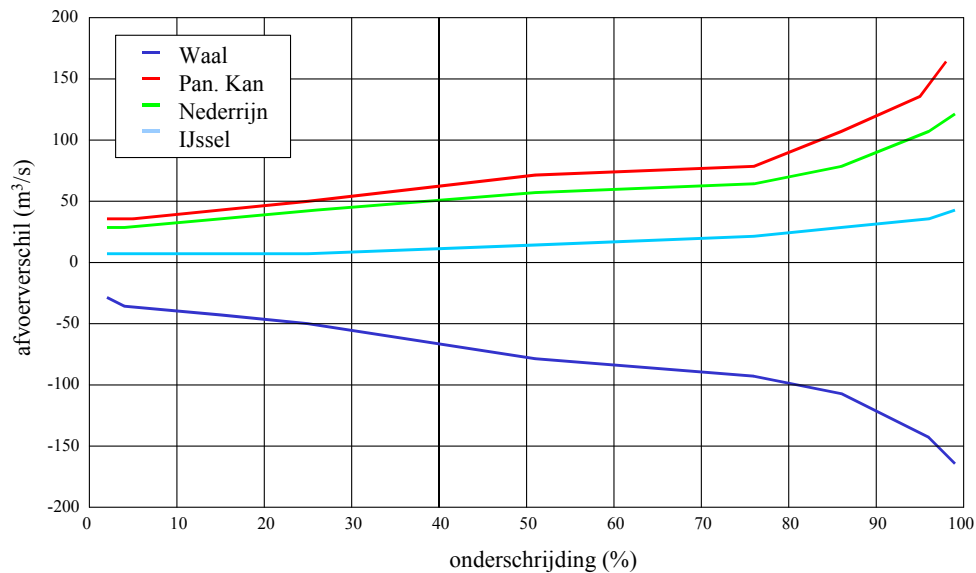
Figuur 6.1: riviervruchten waarover de ruwheid van het zomerbed is verhoogd

6.1.3 Morfodynamiek

Onder morfodynamiek worden veranderingen in de zomerbedruwheid verstaan als gevolg van morfologische processen, zoals duinvorming in de rivierbedding. In [Schropp, 2002] is het effect van morfodynamiek bepaald op de afvoerverdeling door voor verschillende golfvormen de waterbeweging op de Rijntakken door te rekenen (zie figuur 6.2). In alle gevallen gaat er als gevolg van de duinvorming minder afvoer naar de Waal (zie figuur 6.3). Als gevolg van morfologische processen rond de Pannerdensche kop ontstaat tijdens hoogwater door duinvorming een drempel op de Waal

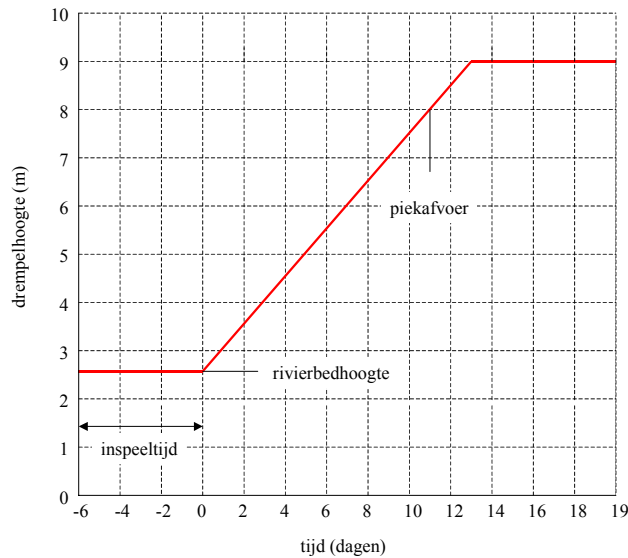


Figuur 6.2: MHW-golven bij Lobith en hun onderschrijdingskansen. Hoe groter de kans, hoe breder de golf. De golf aangegeven met de zwarte lijn wordt gebruikt voor MHW-berekeningen. (bron: Schropp, 2002)



Figuur 6.3: effect van golfvorm en morfologie op de afvoerverdeling (bron: Schropp, 2002)

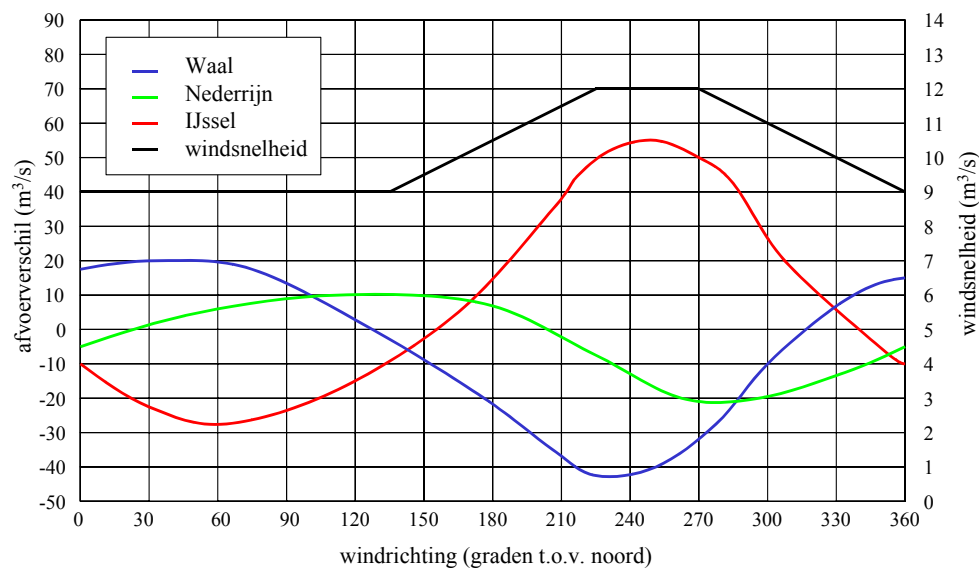
Door het overzetten van het Rijntakken model naar Sobek Rural is het niet mogelijk om de waterbeweging op de Rijntakken door te rekenen met een beweeglijke rivierbodem. Om morfodynamiek toch als verstoring mee te kunnen nemen wordt het effect van morfodynamiek nagebootst door een beweegbare drempel. De beweegbare drempel wordt aangebracht op de Waal 200 m benedenstrooms van het splitsingspunt. De afvoer naar de Waal kan verminderd worden door de drempel omhoog te bewegen. In figuur 6.4 is de beweging van de drempel als functie van de tijd weergegeven.



Figuur 6.4: drempelhoogte als functie van de tijd

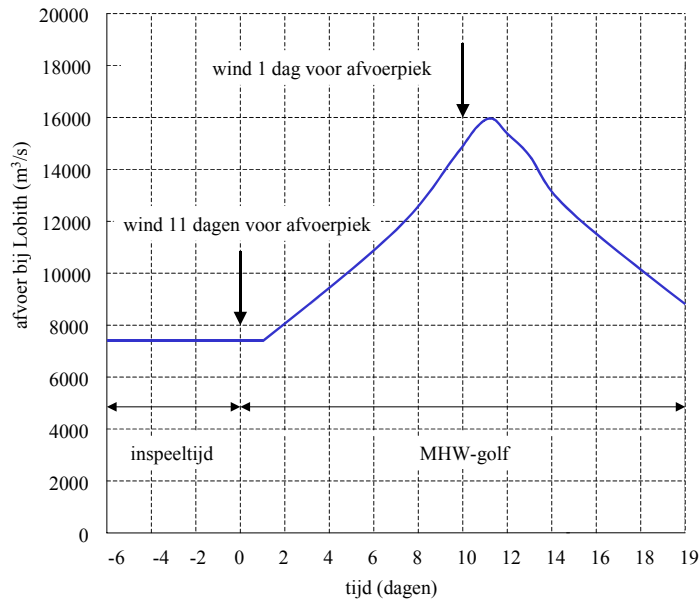
6.1.4 Wind

De wind heeft door opwaaiing rechtstreeks effect op de waterstand. Door opstuwing kan het effect van de wind merkbaar zijn tot het splitsingspunt en is zo van invloed op de afvoerverdeling. In [Schropp, 2002] is het effect van de wind op de afvoerverdeling onderzocht. Het grootste effect treedt op bij richtingen tussen zuid en west en deze richtingen hebben ook de grootste kans van voorkomen (zie figuur 6.5).



Figuur 6.5: effect van de wind op de afvoerverdeling (bron: Schropp, 2002)

De verstoring wind zal op twee manieren meegenomen worden in het onderzoek. In het eerste geval neemt de wind 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. In het tweede geval neemt de wind 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen (zie figuur 6.6).



Figuur 6.6: afvoer als functie van de tijd bij Lobith

6.2 Methode

In de methode zal ingegaan worden op de stappen (zie figuur 6.7) die genomen zullen worden om de haalbaarheid vast te stellen van de geformuleerde doelen voor de regelaar: de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken en de pijn concentreren op één Rijntak. De haalbaarheid van de doelen zal ingeschat worden op basis van het effect dat bijsturen heeft op de waterstand. Allereerst (6.1.1) zal de opzet van de methode toegelicht worden. Daarna (6.2.2) zal de methode zich toespitsen op het model: welke berekeningen zullen uitgevoerd worden en hoe? Ten slotte (6.2.3) zal aandacht besteed worden aan de presentatie van de modelberekeningen: naast het effect op de meetstations is het effect van bijsturen op de hele riviertak van belang met name tijdens passeren van de afvoerpiek.



Figuur 6.7: de gehanteerde methode om de haalbaarheid van de doelen te bepalen

6.2.1 Opzet

Het bijsturen van de afvoerverdeling dient een doel. In het kader van het onderzoek zijn twee doelen geformuleerd, zie hoofdstuk 4, die beiden onderzocht zullen worden op haalbaarheid. De haalbaarheid van de doelen zal onderzocht in een vijftal casestudies waarin de afvoerverdeling op basis van 3 criteria, zie hoofdstuk 4, bijgestuurd zal worden.

6.2.2 Modelberekeningen

Om de haalbaarheid van de doelen te onderzoeken zullen verschillende berekeningen uitgevoerd worden. De berekeningen die voor elke casestudie gemaakt zullen moeten worden zijn hieronder opgesomd en toegelicht.

Onder invloed van de maatgevende afvoergolf zullen de waterstanden op de meetstations berekend worden:

1. zonder verstoring en zonder bijsturen (verwachte waterstand bij een geven afvoer)
2. met verstoring en met bijsturen (gemeten waterstand)
3. met verstoring en zonder bijsturen

ad 1) De afvoerverdeling wordt bijgestuurd op waterstandafwijkingen (verschil gemeten waterstand en verwachte waterstand bij die afvoer op de meetstations). Om bij te kunnen sturen zal tijdens berekening 2 de berekende waterstanden op de meetstations (in werkelijkheid gemeten waterstanden) vergeleken moeten worden met de verwachte waterstanden bij die afvoer op de meetstations. De verwachte waterstanden zijn de waterstanden op de Rijntakken zonder verstoring, deze worden verkregen uit berekening 1.

- ad 2) Berekening 2 zal verschillende keren herhaald worden: voor de verschillende doelen en criteria.
- ad 3) Om het effect te kunnen bepalen van het bijsturen zal in elke casestudie de situatie zonder en met bijsturen van de afvoerverdeling met elkaar vergeleken worden. De situatie zonder bijsturen van de afvoerverdeling wordt verkregen uit berekening 3.

Het totaal aantal berekeningen (36) kan uit het bovenstaande worden afgeleid:

berekening	aantal	toelichting
1	1	voor alle casestudies 1 keer
2	30	voor elke casestudie 6 keer
3	5	voor elke casestudie 1 keer

6.2.3 Presentatie

De haalbaarheid van de doelen van de regelaar zal ingeschat worden op basis van het effect dat bijsturen van de afvoerverdeling heeft op de waterstand op de Rijntakken. Om te kunnen bepalen hoe groot het effect van bijsturen van de afvoerverdeling is op de Rijntakken zal bij de presentatie van de resultaten aandacht besteed worden aan de volgende punten.

Vergelijken van de situatie op de Rijntakken met en zonder bijsturen van de afvoerverdeling. Door deze twee situaties met elkaar te vergelijken wordt een goed beeld verkregen van het rendement van bijsturen.

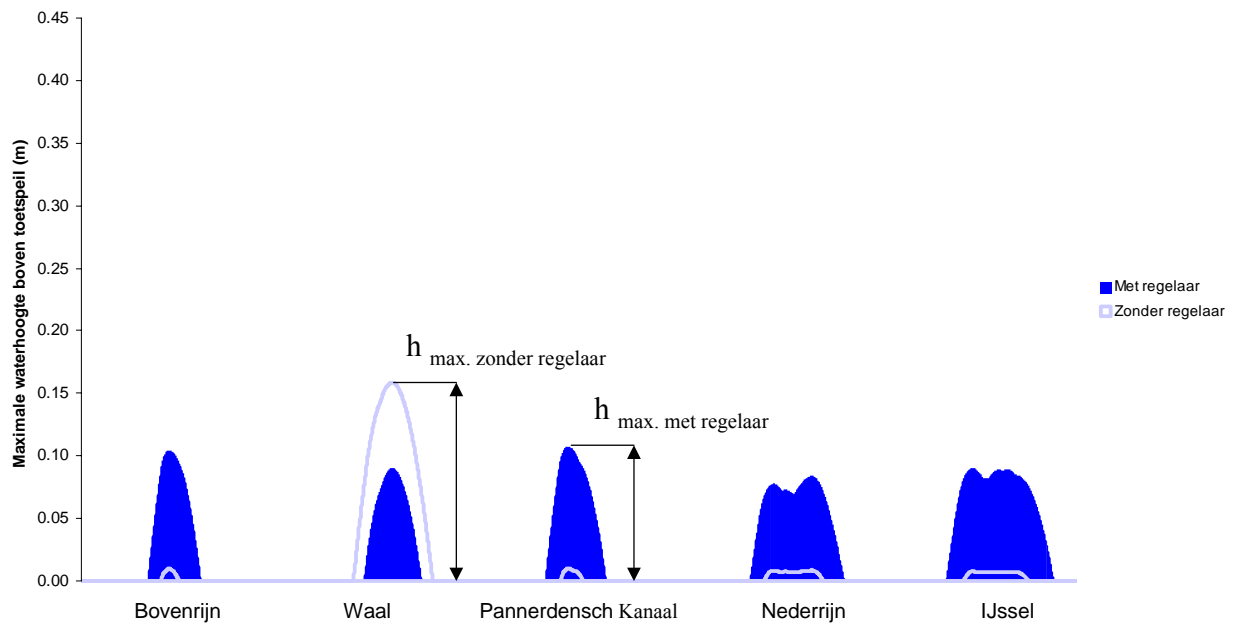
Naast de situatie op de meetstations zal ook gekeken worden naar situatie op de hele rivier. De afvoerverdeling wordt bijgestuurd op basis van een klein aantal meetstations, dit brengt beperkingen met zich mee; dat door bijsturen van de afvoerverdeling de situatie op de meetstations verbetert wil nog niet zeggen dat ook de situatie op de hele rivier is verbeterd. Om een indruk te krijgen van de situatie op de hele rivier zal om de kilometer het effect, van bijsturen van de afvoerverdeling, op de waterstand bepaald worden. Op een gegeven moment tijdens hoogwater is op elke riviertak een locatie aan te wijzen waar de situatie het meest kritisch is. Dit is namelijk de locatie waar het positieve verschil tussen de gemeten waterstand en de verwachte waterstand bij die afvoer het grootst is. Door deze locaties tijdens een hoogwatergolf met elkaar te vergelijken op de verschillende Rijntakken kan een indruk gekregen worden van de situatie op de hele rivier.

De situatie op de Rijntakken is bij het passeren van de maatgevende afvoerpiek het meest kritisch: de waterstand op de rivier is dan het hoogst. De hoogte van de dijk, afgezien van de extra waakhogte, is gebaseerd op deze waterstand (toetspeil). Als gevolg van een verstoring kan de piekwaterstand boven dit toetspeil uitkomen. Door bijsturen van de afvoerverdeling kan de hoogte van de piekwaterstand beïnvloed worden op elke tak: door op een splitsingspunt meer water naar de andere tak te sturen wordt de piekwaterstand op die tak verkleind ten koste van de piekwaterstand op de andere tak. In een piekenanalyse, waarin het verschil tussen de piekwaterstand en toetspeil is aangegeven, wordt dit zichtbaar gemaakt (zie figuur 6.8). De mate waarin de hoogte van de verschillende piekwaterstanden op de takken beïnvloed kan worden kan uitgedrukt worden in een score. De methode die hiervoor is gebruikt zal hieronder worden toegelicht voor de verschillende doelen van de regelaar:

Waterstandafwijkingen gelijkmatig verdelen over Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken)

Het maximale verschil tussen piekwaterstand en toetspeil bepalen op de Rijntakken, zowel in de situatie met en zonder bijsturen van de afvoerverdeling. Wanneer dit verschil verkleind kan worden met een regelaar dan heeft bijsturen van de afvoerverdeling een positief effect op de waterstand. Wordt dit verschil groter dan heeft bijsturen van de afvoerverdeling een negatief effect op de waterstand.

$$\text{score stuurdoel 1} = \left(\frac{h_{\text{max. zonderregelaar}} - h_{\text{max. metregelaar}}}{h_{\text{max. zonderregelaar}}} \right) \cdot 100\%$$



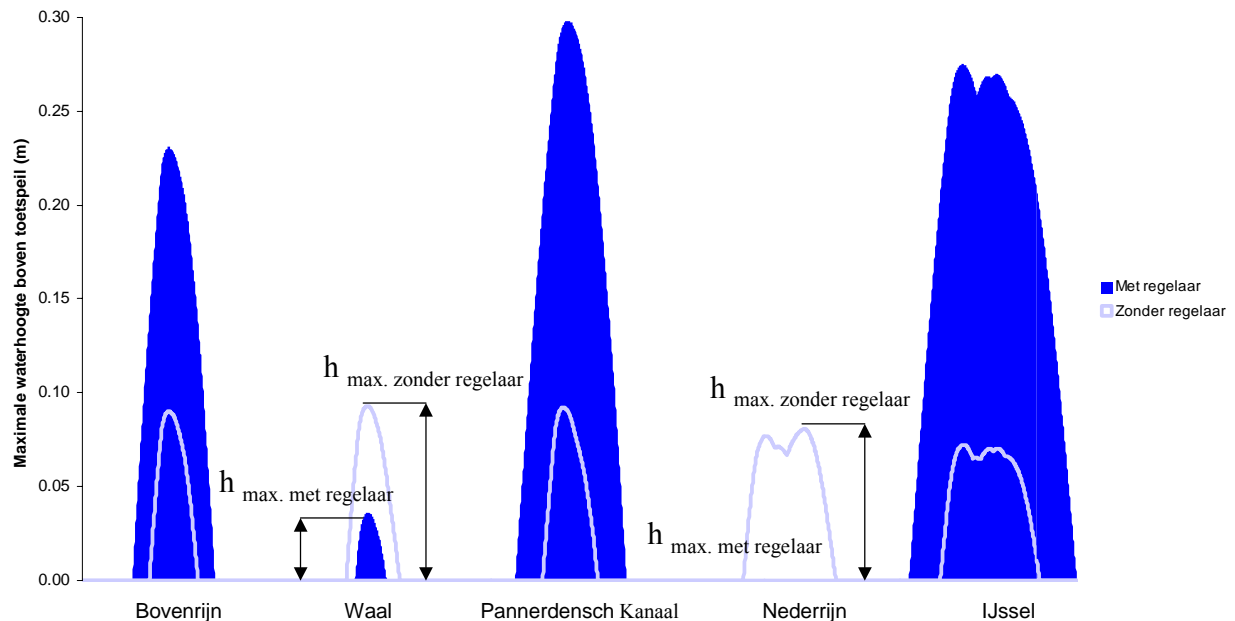
Figuur 6.8: effect van bijsturen van de afvoerverdeling op het verschil piekwaterstand en toetspeil op de riviertakken.

Toelichting bij figuur 6.8: voor elke Rijntak staat in de grafiek het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil uitgezet tegen de tijd bij het passeren van de maatgevende afvoerpiek.

Waterstandafwijkingen op de Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).

Bepalen van het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Waal en de Nederrijn, zowel in de situatie met en zonder bijsturen van de afvoerverdeling. De laagste score bepaald het effect van bijsturen. (in figuur 6.9 is dat de Waal)

$$\text{score stuurdoel 2} = \left(\frac{h_{\text{max. zonderregelaar}} - h_{\text{max. metregelaar}}}{h_{\text{max. zonderregelaar}}} \right) \cdot 100\%$$



Figuur 6.9: effect van bijsturen van de afvoerverdeling op het verschil piekwaterstand en toetspeil op de riviertakken

6.3 Resultaten

6.3.1 Inleiding

In deze paragraaf zal het effect van de regelaar op de waterstand op de benedenstroomse Rijntakken vastgesteld worden per casestudie (verstoring). Om het effect te bepalen van de regelaar wordt de situatie met en zonder regelaar bekeken. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen de twee stuurdoelen: de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken en de pijn concentreren op één Rijntak. Aangezien het effect van bijsturen van de afvoerverdeling in vrijwel alle casestudies het grootst is voor criterium 1: verschillende meetstations per riviertak (maximale afwijking) is uitsluitend het resultaat van criterium 1 gegeven. Voor het resultaat van bijsturen van de afvoerverdeling voor de andere criteria wordt verwezen naar bijlage D.

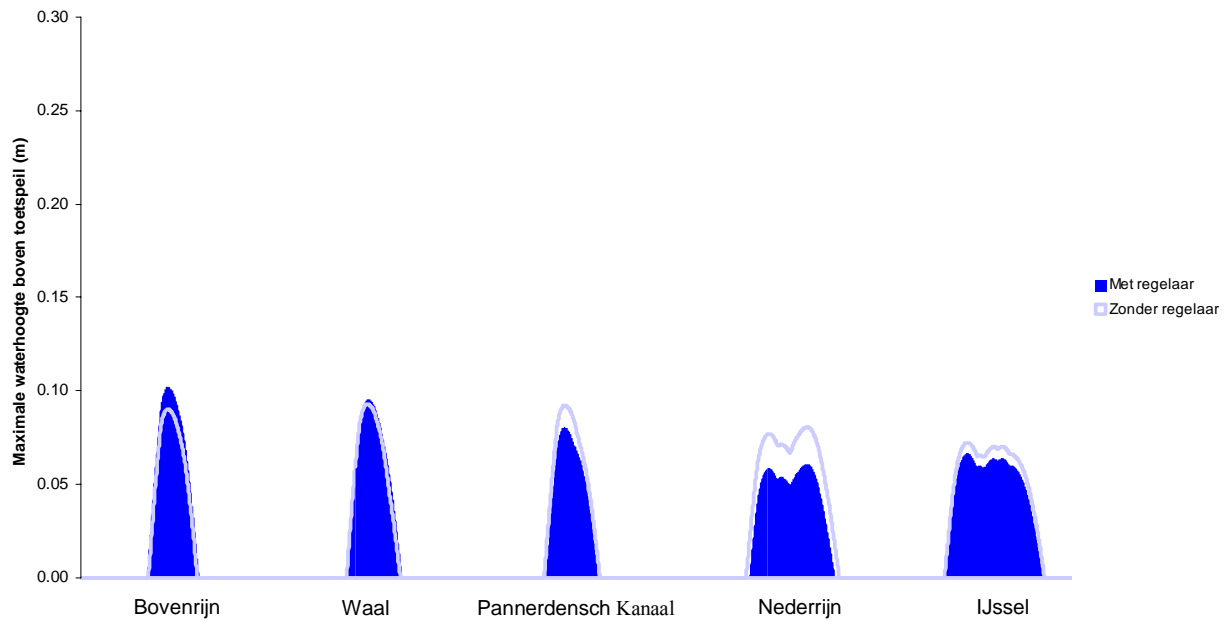
6.3.2 Casestudy 1: hydraulische ruwheid verhoogd op eerste deel van Waal

Zonder bijsturen van de afvoerverdeling

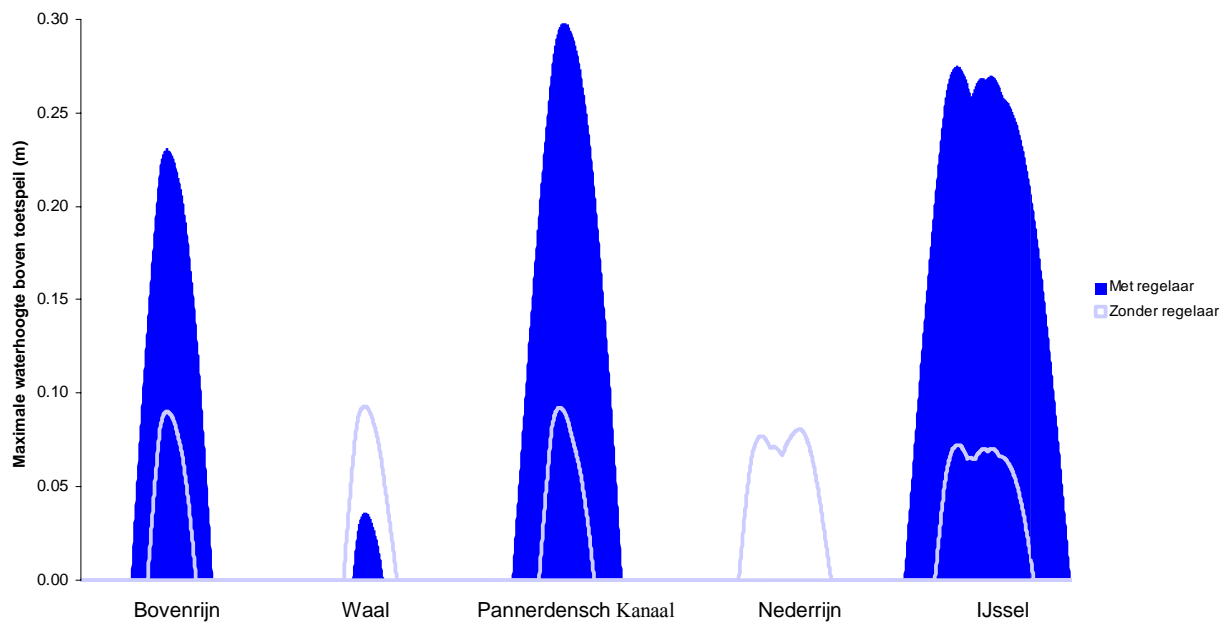
De verhoogde ruwheid (5%) van het zomerbed over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop heeft op al de Rijntakken een verhoging van de waterstand tot gevolg; tijdens het passeren van de afvoerpiek is het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op alle Rijntakken 7 tot 9 cm (zie figuur 6.10). De waterstand op de Waal wordt verhoogd omdat de hogere ruwheid van het zomerbed direct invloed uitoefent op de waterstand op de Waal: de waterstand bovenstrooms van de verstoring wordt opgestuwd. De piekwaterstanden op het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel blijken echter ook boven het toetspeil uit te komen zonder dat de ruwheid van het zomerbed is verhoogd op deze riviertakken. Dit wordt verklaard door het feit dat de verhoging van de ruwheid op de Waal ook indirect invloed uitoefent op de waterstand op de Rijn: via de afvoerverdeling. Wanneer de waterstandverhoging op de Waal merkbaar is tot aan het splitsingspunt dan zal meer water over het Pannerdensch Kanaal afgevoerd worden. Als gevolg hiervan zal de waterstand op de Waal afnemen en op het Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel toenemen. De waterstandverhoging op de Waal, als gevolg van de hogere ruwheid, wordt hierdoor over de Rijntakken verdeeld zonder dat de afvoerverdeling operationeel bijgestuurd wordt.

Met bijsturen van de afvoerverdeling

- *Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).*
Zonder dat de afvoerverdeling wordt bijgestuurd is het verschil tussen de piekwaterstand en het toetspeil het grootst op de Waal. Door de afvoerverdeling bij te sturen wordt dit verschil vergroot. Het positieve effect dat de hogere ruwheid over de eerste 47 km op de Waal heeft op de afvoerverdeling wordt door operationele sturing tegengewerkt. Met bijsturen van de afvoerverdeling wordt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil het minst vergroot wanneer de afvoerverdeling bijgestuurd wordt op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie figuur 6.10).
- *Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).*
Het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Waal en de Nederrijn zonder bijsturen, ongeveer 9 centimeter, wordt het sterkst verkleind wanneer de afvoerverdeling wordt bijgestuurd op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie figuur 6.11). Op de Waal wordt hiermee het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil verkleind tot minder dan 4 centimeter en op de Nederrijn tot 0 centimeter. Op de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel neemt hierdoor het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil sterk toe: 23 tot 30 cm. De toename in de waterstand op het Pannerdensch Kanaal is afgezien van een hogere afvoer het gevolg van de stuwende werking van het regelwerk op de IJsselkop. De waterstand op de Bovenrijn wordt opgestuwd door zowel het regelwerk op de IJsselkop als op de Pannerdensch Kop.



Figuur 6.10: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.



Figuur 6.11: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

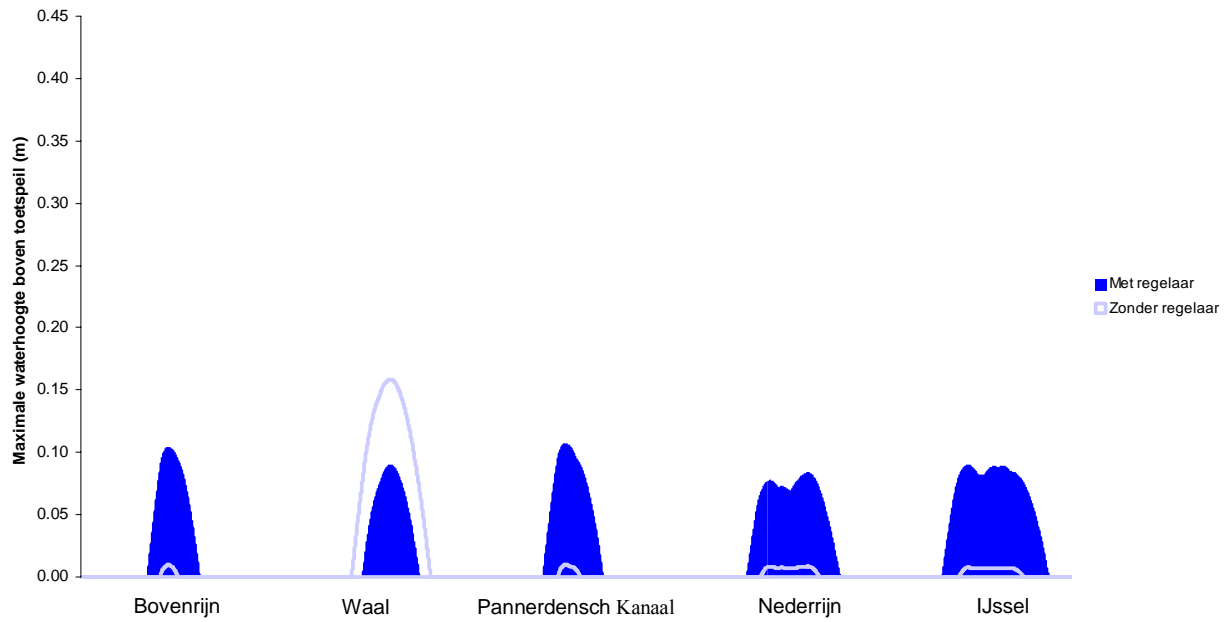
6.3.3 Casestudy 2: hydraulische ruwheid verhoogd op tweede deel van Waal

Zonder bijsturen van de afvoerverdeling

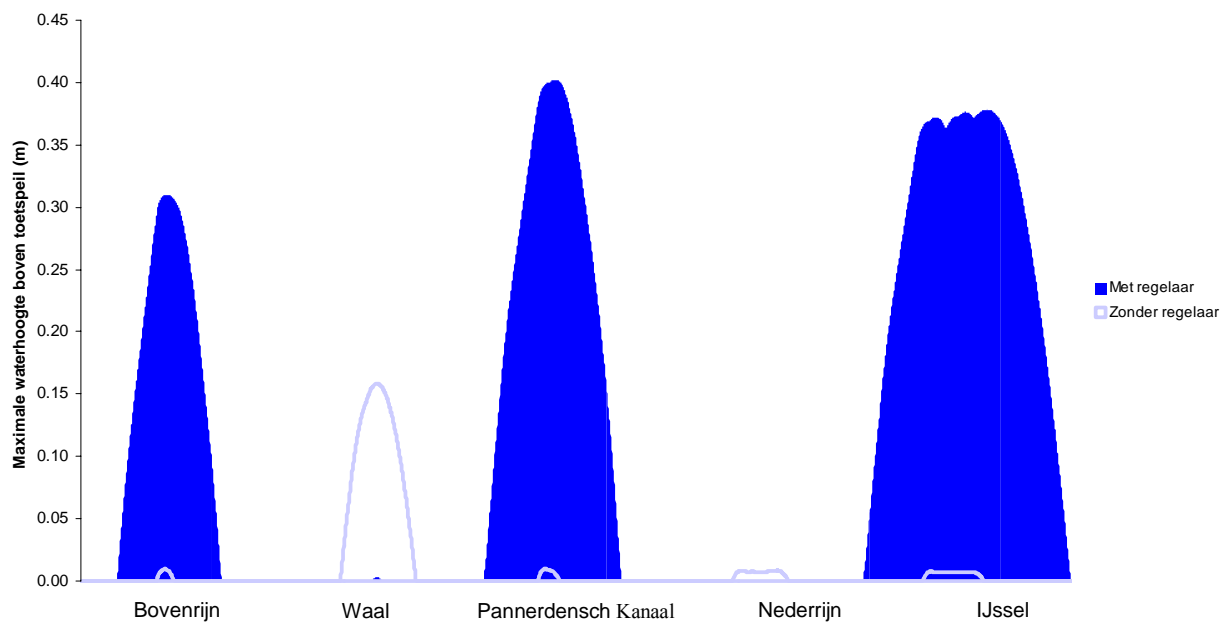
De hogere ruwheid (5%) van het zomerbed over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop heeft op al de Rijntakken een verhoging van de waterstand tot gevolg; tijdens het passeren van de afvoerpiek komt de piekwaterstand op de Waal ongeveer 16 centimeter boven het toetspeil uit, op de overige Rijntakken ongeveer 1 centimeter (zie figuur 6.12). De hogere ruwheid van het zomerbed op de Waal heeft weinig invloed op de piekwaterstand op de overige Rijntakken. De verstoring ligt 47 kilometer benedenstrooms van het splitsingspunt waardoor het opstuwende effect nauwelijks merkbaar tot op het splitsingspunt: er treedt vrijwel geen herverdeling op.

Met bijsturen van de afvoerverdeling

- *Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).*
De verschil tussen piekwaterstand en toetspeil, zonder bijsturen van de afvoerverdeling, is het grootst op de Waal (16 centimeter). Dit verschil kan verkleind worden door op de Pannerdensch Kop meer water naar het Pannerdensch Kanaal te sturen: de piekwaterstand op de Waal wordt verkleind ten koste van de piekwaterstand op het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en IJssel. Het beste resultaat wordt verkregen wanneer de afvoerverdeling bijgestuurd wordt op de maximaal gemeten waterstandafwijking per riviertak (zie figuur 6.12). Het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil wordt hierdoor gereduceerd met 33 procent. Na het bijsturen van de afvoerverdeling is het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op alle Rijntakken ongeveer 10 centimeter.
- *Stuurdoel 2: waterstandafwijking op de Waal en de Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).*
Het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil, zonder bijsturen van de afvoerverdeling, is het grootst op de Waal (16 centimeter). Dit verschil kan sterk verkleind worden wanneer de afvoerverdeling wordt bijgestuurd op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie figuur 6.13). Op de Waal wordt hiermee het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil verkleind tot minder dan 1 centimeter. Op de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel neemt hierdoor het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil sterk toe: 30 tot 40 cm. De toename in de waterstand op het Pannerdensch Kanaal is afgezien van een hogere afvoer het gevolg van het stuwende effect van het regelwerk op de IJsselkop. De waterstand op de Bovenrijn wordt opgestuwd door zowel het regelwerk op de IJsselkop als op de Pannerdensch Kop.



Figuur 6.12: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.



Figuur 6.13: ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op de Waal en de Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

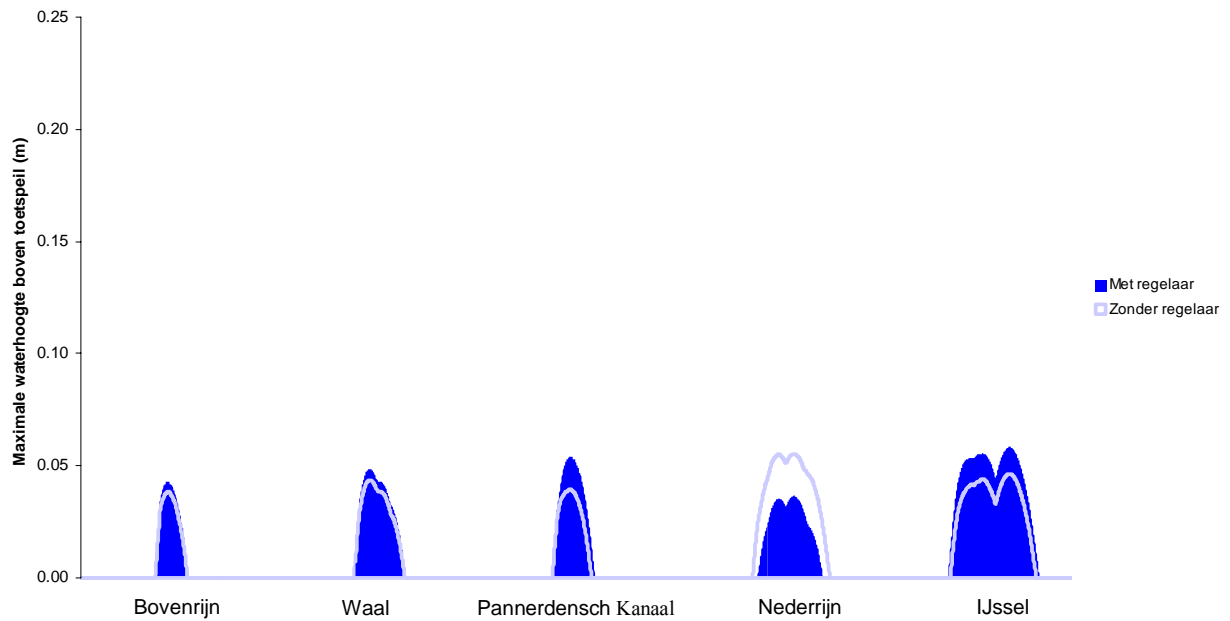
6.3.4 Casestudy 3: opstekende wind 11 dagen voor passeren afvoerpiek

Zonder bijsturen van de afvoerverdeling

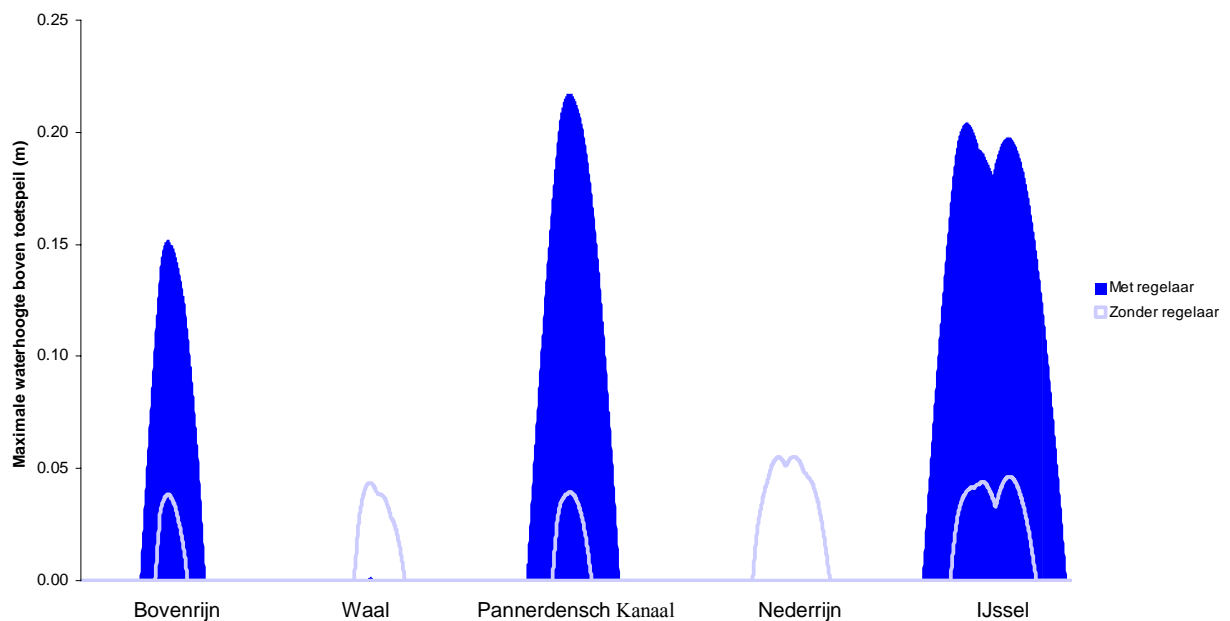
De westen wind van 12 m/s (6 Beaufort) heeft op al de Rijntakken een verhoging van de waterstand tot gevolg; tijdens het passeren van de afvoerpiek komt de waterstand op alle Rijntakken 4 tot 6 centimeter boven het toetspeil uit (zie figuur 6.14). De waterstand op de Waal en de Nederrijn neemt toe als gevolg van de wrijving die de wind uitoefent op het wateroppervlak: de westen wind stuwt het water op de Waal en de Nederrijn naar het splitsingspunt toe op. Door opstuwing is het effect van de wind merkbaar tot het splitsingspunt en is zo van invloed op de afvoerverdeling: als gevolg van de westen wind zal meer water afgevoerd worden over het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Hierdoor zullen de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel stijgen.

Met bijsturen van de afvoerverdeling

- *Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).*
Bij het passeren van de afvoerpiek is, zonder bijsturen van de afvoerverdeling, het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil het grootst op de Nederrijn: ongeveer 6 centimeter. Door op de IJsselkop meer water naar de IJssel te sturen wordt op de Nederrijn het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil verkleind ten koste van de IJssel. Voor alle criteria wordt te sterk bijgestuurd: het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil wordt met bijsturen van de afvoerverdeling groter dan zonder bijsturen. Door de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn bij te sturen op de maximaal gemeten waterstandafwijking per tak (zie figuur 6.14) wordt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil het minst vergroot. Als gevolg van het stuwende effect van het regelwerk op de IJsselkop zal de waterstand op het Pannerdensch Kanaal stijgen.
- *Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).*
Het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Waal en de Nederrijn: 4 á 5 cm, zonder bijsturen van de afvoerverdeling, kan sterk verkleind worden door de afvoerverdeling bij te sturen op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie figuur 6.15). Op de Waal wordt hiermee het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil verkleind tot enkele millimeters (97 procent). Op de Nederrijn wordt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil volledig gereduceerd (100 procent). Op de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel neemt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil hierdoor sterk toe: 5 tot 23 cm. Op de Bovenrijn en de het Pannerdensch Kanaal is het stuwende effect van de regelwerken op de Pannerdensch Kop en de IJsselkop duidelijk merkbaar in de waterstand.



Figuur 6.14: wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.



Figuur 6.15: wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

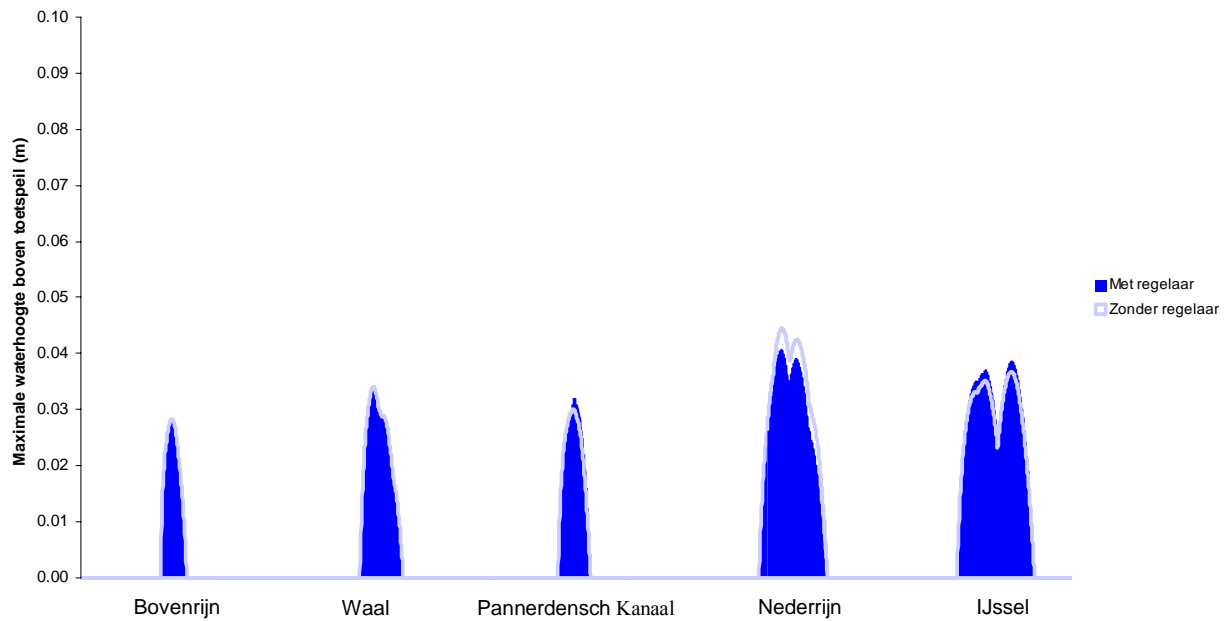
6.3.5 Casestudy 4: opstekende wind 1 dag voor passeren afvoerpiek bij Lobith

Zonder bijsturen van de afvoerverdeling

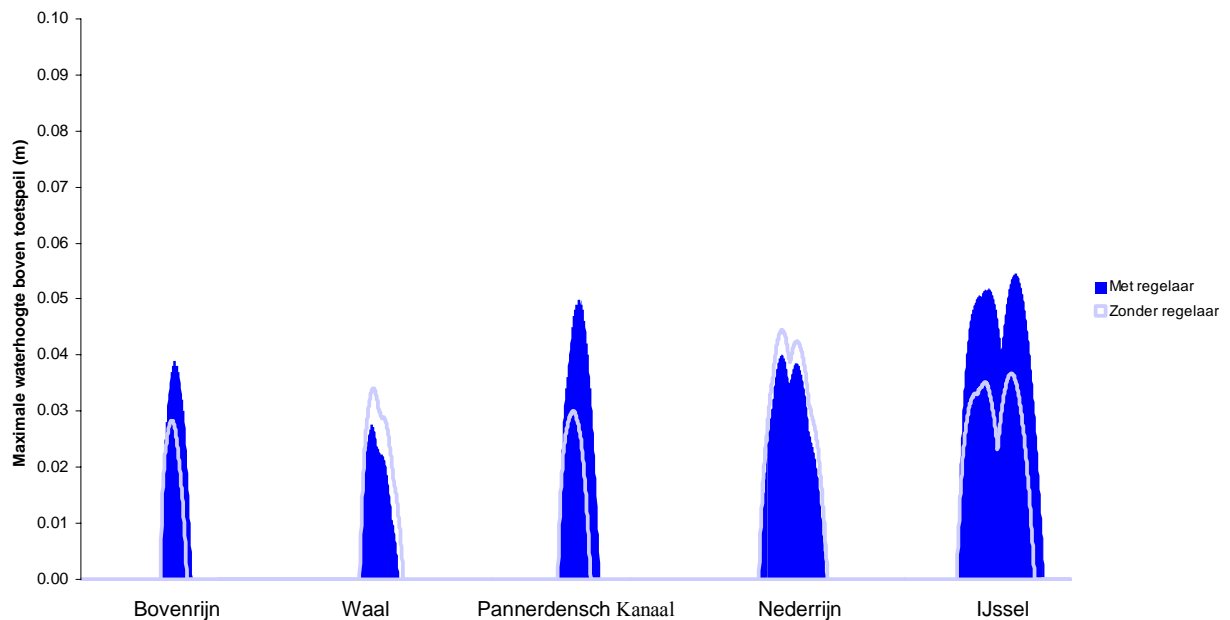
De westen wind van 12 m/s (6 Beaufort) heeft op al de Rijntakken een verhoging van de waterstand tot gevolg; tijdens het passeren van de afvoerpiek komt de waterstand op alle Rijntakken 3 tot 4 centimeter boven het toetspeil uit. Het effect op de piekwaterstand is minder groot dan in casestudy 3 omdat de wind in dit geval net opsteekt voor het passeren van de afvoerpiek: de wind heeft in dit geval 1 dag in plaats van 11 dagen invloed uitgeoefend op het watersysteem van de Rijn.

Met bijsturen van de afvoerverdeling

- *Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).*
In dit geval is het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil, zonder bijsturen van de afvoerverdeling, net als bij casestudy 3 het grootst op de Nederrijn (ruim 4 centimeter). Op de Nederrijn wordt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil verkleind door meer water af te laten stromen over de IJssel. Aangezien de wind opsteekt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith is de afvoerverdeling nog niet volledig bijgestuurd tijdens het passeren van de afvoerpiek; het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil is op de IJssel nog kleiner dan het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Nederrijn zonder bijsturen van de afvoerverdeling. Het beste resultaat wordt verkregen wanneer de afvoerverdeling bijgestuurd wordt op de maximaal gemeten waterstandafwijking per riviertak (zie figuur 6.16). In dit geval wordt het verschil tussen de piekwaterstand en toetspeil met 8 procent verkleind.
- *Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).*
Bijsturen van de afvoerverdeling heeft minder effect op de piekwaterstand op de Waal en de Nederrijn in vergelijking tot casestudy 3: voordat de afvoerverdeling volledig is bijgestuurd op basis van waterstandmetingen is de afvoerpiek al gepasseerd. Hoewel de piekwaterstand op de Waal en de Nederrijn het sterkst gereduceerd kan worden door de afvoerverdeling bij te sturen op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie casestudy 3) wordt op korte termijn een beter resultaat bereikt door de afvoerverdeling bij te sturen op basis van de waterstandafwijking op het eerste meetstation per riviertak. Bijsturen op het eerste meetstation per riviertak duurt ruim 2 dagen in plaats van 4. Door de afvoerverdeling bij te sturen op het eerste meetstation per riviertak kan in een tijdsbestek van enkele uren het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Waal met 21 procent verkleind worden en op de Nederrijn met 28 procent.



Figuur 6.16: wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.



Figuur 6.17: wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

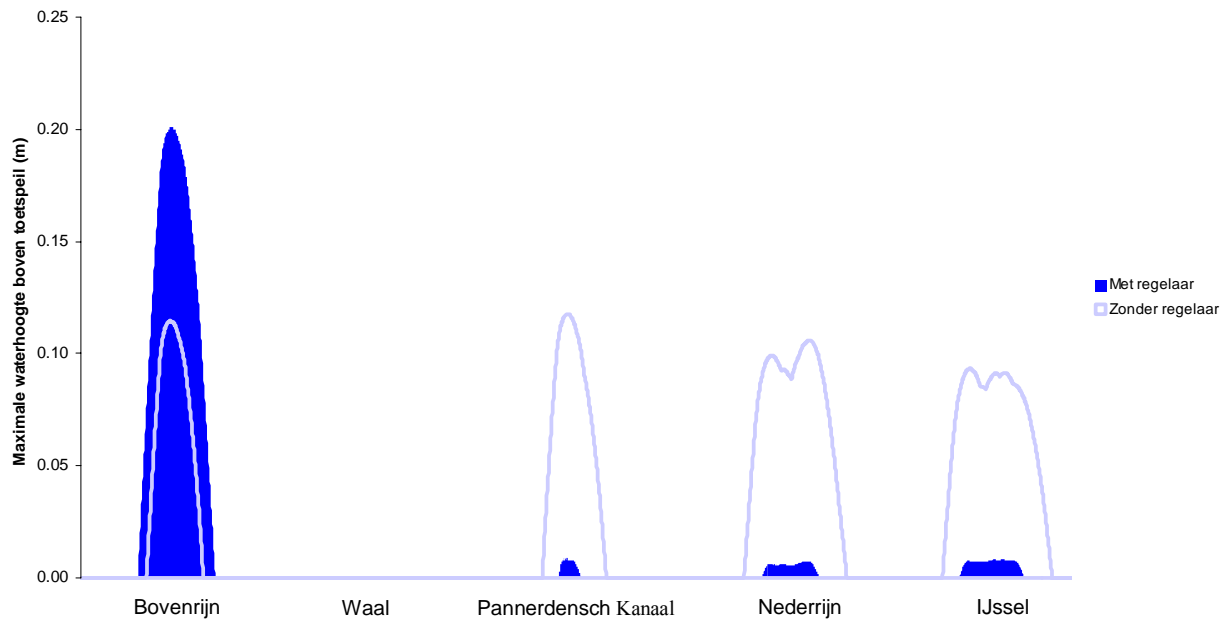
6.3.6 Casestudy 5: morfodynamiek op de Waal nabij het splitsingspunt

Zonder bijsturen van de afvoerverdeling

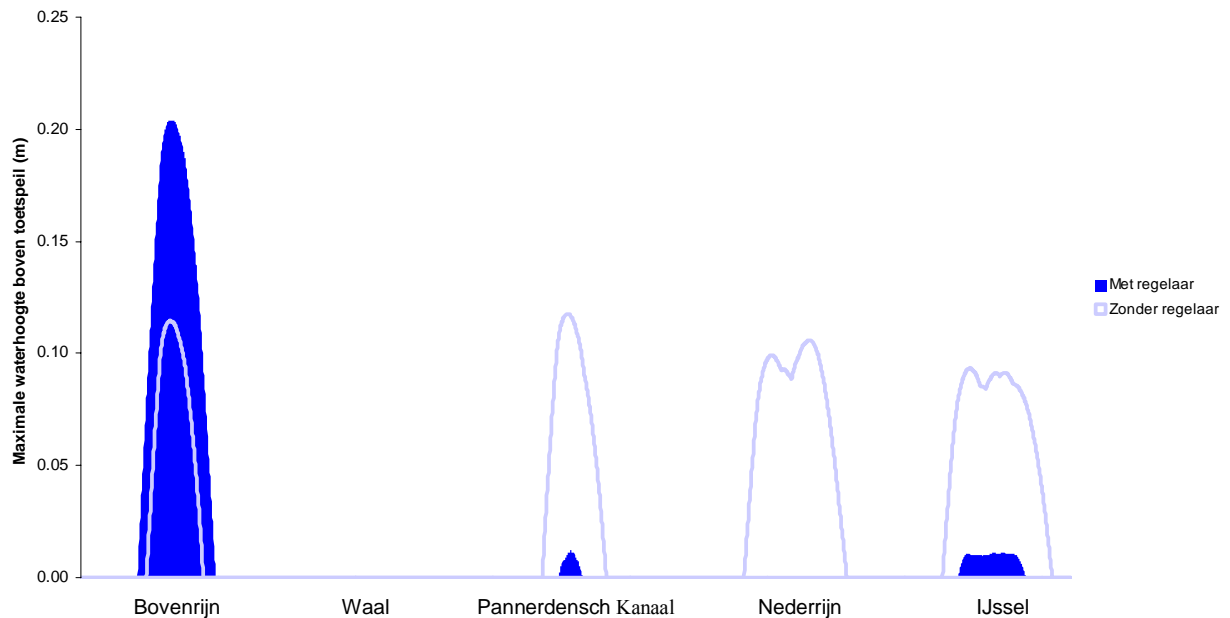
Doordat de drempel op de Waal met een constant tempo (ongeveer 2 cm/uur) ophoog beweegt tijdens hoogwater wordt de afvoerverdeling continue beïnvloed: geleidelijk gaat er steeds minder water naar de Waal en meer water naar het Pannerdensch Kanaal. Hierdoor zal de waterstand op de Waal dalen en op de overige Rijntakken stijgen; bij het passeren van de afvoerpiek komt de waterstand op de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en IJssel 9 tot 11 centimeter boven het toetspeil uit (zie figuur 6.18).

Met bijsturen van de afvoerverdeling

- *Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).*
Door met het regelwerk op de Pannerdensch Kop meer water over de Waal te sturen kan het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verkleind worden. De grootste reductie treedt op wanneer de afvoerverdeling bijgestuurd wordt op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie figuur 6.18). Het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil wordt hierdoor benedenstrooms van de Pannerdensch Kop verkleind tot 1 cm. Op de Bovenrijn neemt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil drastisch toe als gevolg van het stuwende effect van het regelwerk op de Pannerdensch Kop: ongeveer 20 cm.
- *Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).*
Op de Nederrijn kan het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil (ongeveer 10 cm), zonder bijsturen van de afvoerverdeling, sterk verkleind worden door de afvoerverdeling bij te sturen op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie figuur 6.19). Op de Nederrijn wordt hiermee het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil volledig bijgestuurd. Op de Bovenrijn neemt het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil hierdoor sterk toe (ongeveer 21 cm). De toename in de waterstand op het Pannerdensch Kanaal is afgezien van een hogere afvoer het gevolg van het stuwende effect van het regelwerk op de IJsselkop. De waterstand op de Bovenrijn wordt opgestuwd door zowel het regelwerk op de IJsselkop als op de Pannerdensch Kop.



Figuur 6.18: morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen.



Figuur 6.19: morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensch Kop. Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.

6.3.7 Synthese

In deze paragraaf zullen de resultaten van de afzonderlijke casestudies met elkaar vergeleken worden. Eerst zal voor de verschillende casestudies het effect van het bijsturen op de waterstand op de Rijntakken met elkaar vergeleken worden. Daarna zal aan de hand van dit effect voor de onderzochte casestudies een uitspraak gedaan worden of het bijsturen van de afvoerverdeling een positief effect zou kunnen hebben op de overstromingskans op de Rijntakken. Zowel bij de behandeling van het effect op de waterstand als op de overstromingskans op de Rijn zal onderscheid gemaakt worden tussen de twee stuurdoelen.

Effect op de waterstand op de Rijntakken

Het effect van bijsturen van de afvoerverdeling op de waterstand op de Rijn is bepaald door de maximale waterhoogte boven het toetspeil te vergelijken met en zonder bijsturen. Bij stuurdoel 1 wordt de maximale waterhoogte boven het toetspeil verkleind door de waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel te verdelen. Bij stuurdoel 2 wordt de maximale waterhoogte boven het toetspeil alleen verkleind op de Waal en de Nederrijn door de waterstandafwijking af te wenden op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Als gevolg van de aangebrachte verstoringen in de casestudies zal de waterstand namelijk op enkele of alle riviertakken boven het toetspeil uitkomen.

Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).

Bij het bijsturen van de afvoerverdeling wordt door het stuwende effect van de regelwerken op de splitsingspunten van de Rijn de waterstand bovenstrooms van de splitsingspunten ook beïnvloed. In tabel (6.1) is uitsluitend het effect van bijsturen van de afvoerverdeling vastgesteld op de Rijntakken benedenstroomse van de splitsingspunten: Waal, Nederrijn en IJssel. In tabel (6.2) is echter het stuwende effect van de regelwerken op de waterstand bovenstrooms van de splitsingspunten meegenomen door de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal mee te nemen bij het bepalen van de maximale waterhoogte boven toetspeil.

Tabel 6.1: toename (+) of afname(-) van de maximale waterhoogte boven toetspeil op de Waal, de Nederrijn en de IJssel als gevolg van bijsturen van de afvoerverdeling ten opzichte van de situatie zonder bijsturen. *) in deze casestudies heeft de afwijking in de afvoer een positief effect op de waterstand op de Rijntakken

casestudies	verschillende meetstations per riviertak		enkel meetstation per riviertak
	maximale (%)	gemiddelde (%)	eerste (%)
1. ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop	+3 *	+53 *	+6 *
2. ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop	-43	-31	-22
3. wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen	+6 *	+22 *	+7 *
4. wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen	-8 *	-2 *	-5 *
5. morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensche Kop	-92	-92	-92

Op de Waal, de Nederrijn en de IJssel wordt door bijsturen van de afvoerverdeling in 3 casestudies de maximale waterhoogte boven het toetspeil verkleind en in 2 casestudies vergroot. In alle casestudies neemt de maximale waterhoogte boven toetspeil het sterkst af of het minst toe als de afvoerverdeling wordt bijgestuurd op de maximaal gemeten waterstandafwijking op verschillende meetstations per riviertak.

In 3 van de 5 casestudies wordt zonder bijsturen van de afvoerverdeling de waterstandafwijking redelijk gelijkmatig over de riviertakken verdeeld; deze casestudies zijn met een sterretje * gemarkeerd. In deze casestudies oefent de aangebrachte verstoring veel invloed uit op de afvoerverdeling. De afwijking in de afvoerverdeling heeft in deze casestudies een positief effect op de waterstand op de Rijntakken. Bijsturen van de afvoerverdeling levert in deze casestudies minder resultaat op.

In 2 casestudies, casestudy 2 en 5, wordt met bijsturen van de afvoerverdeling een duidelijk beter resultaat bereikt dan zonder ingrijpen. Dit zijn de casestudies waarbij de waterstandafwijkingen op de verschillende Rijntakken onderling sterk verschillen.

Tabel 6.2: toename (+) of afname(-) van de maximale waterhoogte boven toetspeil op de Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal, Waal, Nederrijn en de IJssel als gevolg van bijsturen van de afvoerverdeling ten opzichte van de situatie zonder bijsturen

casestudies	verschillende meetstations per riviertak		enkel meetstation per riviertak
	maximale (%)	gemiddelde (%)	eerste (%)
1. ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop	+10	+53	+6
2. ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop	-33	-31	-22
3. wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen	+6	+22	+7
4. wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen	-8	-2	-5
5. morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensch Kop	+71	+70	+74

In tabel 6.2 zijn het Pannerdensch Kanaal en de Bovenrijn meegenomen. Door deze riviertakken mee te nemen neemt het rendement van het bijsturen in enkele casestudies af; met name in de casestudies waar de afvoerverdeling flink bijgestuurd moet worden zoals in casestudy 2 en 5. In casestudy 5, wordt de maximale waterstand boven het toetspeil op de Waal, Nederrijn en de IJssel flink gereduceerd (-92%) door de afvoerverdeling bij te sturen. Wordt het effect op de waterstand op het Pannerdensch Kanaal en de Bovenrijn meegenomen dan blijkt dat de waterstand op de Bovenrijn flink opgestuwd te worden: de maximale waterhoogte boven toetspeil neemt toe (+71%) door bijsturen van de afvoerverdeling.

Stuurdoel 2: waterstandafwijking op Waal en Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).

In de meeste casestudies treedt een flinke afname op in de maximale waterstand boven het toetspeil op de Waal en de Nederrijn (zie tabel 6.3). In 4 van de 5 casestudies wordt het beste resultaat verkregen wanneer bijgestuurd wordt op de maximaal gemeten waterstandafwijking op de verschillende meetstations per riviertak. Casestudy 4 vormt hier een uitzondering op omdat de wind in dit geval net opsteekt voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith. Hoewel de piekwaterstand op de Waal en de Nederrijn het sterkst gereduceerd kan worden door de afvoerverdeling bij te sturen op basis van de maximaal gemeten waterstandafwijking op elke riviertak (zie casestudy 3) wordt op korte termijn een beter resultaat bereikt door de afvoerverdeling bij te sturen op basis van de waterstandafwijking op het eerste meetstation per riviertak. Bijsturen van een waterstandafwijking van 10 centimeter op een riviertak duurt door gebruik te maken van het eerste meetstation per riviertak ruim 2 dagen in plaats van 4 bij gebruik van verschillende meetstations per riviertak.

Tabel 6.3: toename (+) of afname(-) van de maximale waterhoogte boven toetspeil op de Waal en de Nederrijn als gevolg van bijsturen van de afvoerverdeling ten opzichte van de situatie zonder bijsturen

casestudies	verschillende meetstations per riviertak		enkel meetstation per riviertak
	maximale (%)	gemiddelde (%)	eerste (%)
1. ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop	-61	+28	-60
2. ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensche Kop	-88	-69	-9
3. wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen	-97	-76	-87
4. wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen	-10	+1	-21
5. morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensche Kop	-100	-100	-100

Hoewel de piekwaterstand op de Waal en de Nederrijn flink gereduceerd kunnen worden leidt dit tot hoge piekwaterstanden op de overige Rijntakken; wanneer de piekwaterstand op de Waal en Nederrijn met enkele centimeters verlaagd wordt gaat de piekwaterstand op de Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal en de IJssel al snel met tientallen centimeters omhoog (zie bijlage D). Afgezien van het feit dat er meer water over het Pannerdensch Kanaal en de IJssel wordt afgevoerd zal de waterstand op het Pannerdensch Kanaal en de Bovenrijn sterk stijgen als gevolg van de stuwende werking van de regelwerken op de splitsingspunten van de Rijn. De waterstandverschillen op de Rijntakken wordt zo groot of het de vraag is of met een regelwerk op de splitsingspunten van de Rijn mogelijk is om de afvoerverdeling in die mate te beïnvloeden.

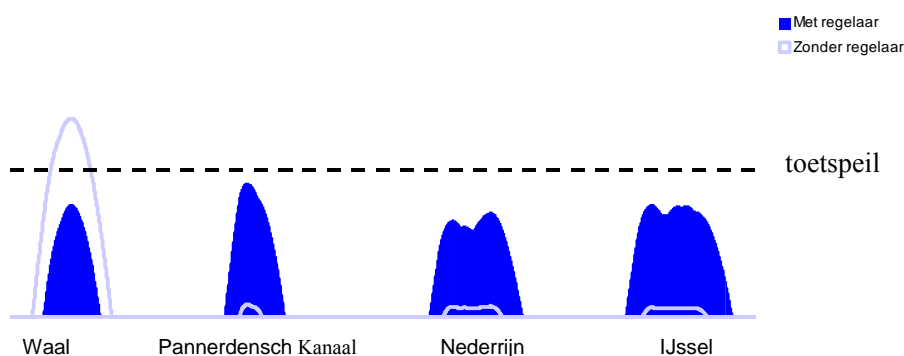
Effect op overstromingskans

Een afwijking in de afvoerverdeling kan veroorzaakt worden door verschillende verstoringen: variatie in hydraulische ruwheid, windeffecten, morfodynamiek, laterale toestroming, veranderingen in geometrie van de rivier, etc. Bovendien kunnen de verstoringen op verschillende plaatsen op de rivier optreden en op verschillende tijdstippen tijdens hoogwater optreden. In het onderzoek zijn echter 5 verstoringen onderzocht. Deze kunnen hierdoor een te rooskleurig of een te negatief beeld schetsen van het bijsturen van de afvoerverdeling, daarom kan aan de hand van de casestudies geen algemene uitspraak gedaan worden of door bijsturen van de afvoerverdeling de overstromingskans op de Rijn verminderd kan worden. Hiervoor zal de onzekerheid in de waterstand met bijsturen van de afvoerverdeling vastgesteld moeten worden onder invloed van een groot aantal verstoringen. Daarnaast wordt door het bijsturen van de afvoerverdeling onzekerheden geïntroduceerd: meetonzekerheid en onzekerheden die samenhangen met het functioneren van het regelwerk, deze zullen ook ingeschat moeten worden om de overstromingskans te bepalen. Wel kan voor elke casestudie apart aangegeven worden of bijsturen van de afvoerverdeling een positief effect heeft op de overstromingskans van de Rijntakken. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de twee stuurdoelen.

Stuurdoel 1: waterstandafwijking gelijkmatig over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel verdelen (de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken).

In casestudy 2, waarbij de ruwheid van het zomerbed is verhoogd over de tweede 47 km van de Waal, kan bij een lagere afvoer dan de maatgevende afvoer een overstroming op de Waal voorkomen worden door de verhoging in de waterstand op de Waal gelijkmatig te verdelen over de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel (zie figuur 6.20).

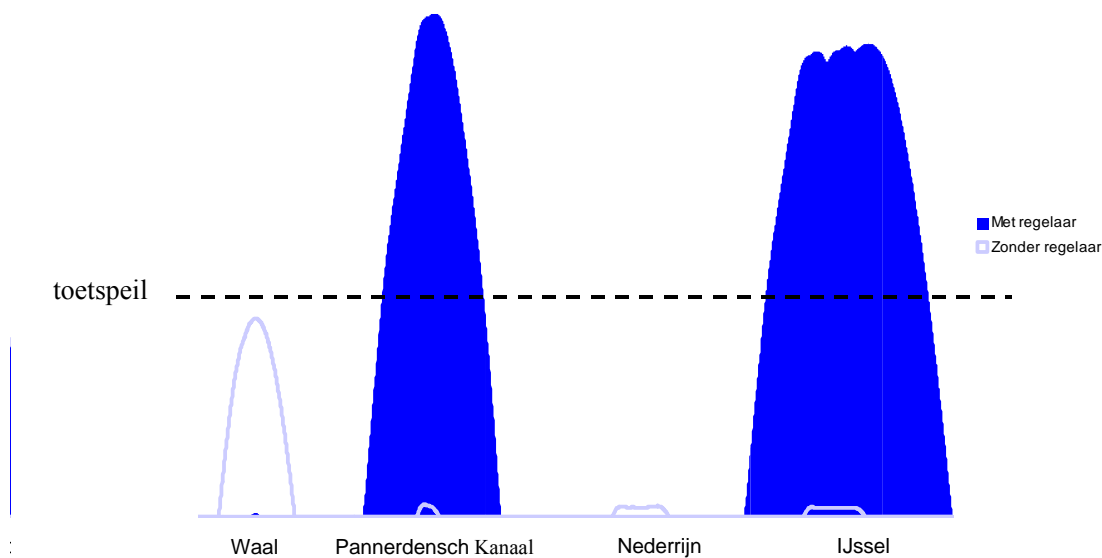
Figuur 6.20: voorkomen van overstroming door waterstandafwijking gelijkmatig te verdelen over Rijntakken



Bij de maatgevende afvoer komt echter de waterstand op de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de IJssel boven het toetspeil uit. Dit wil niet zeggen dat gelijk een overstroming optreedt. Bij het vaststellen van de dijkhoogte worden namelijk toeslagen aangebracht boven op het toetspeil voor bijvoorbeeld golfploop, zetting van het dijklichaam en klink van de ondergrond. Deze extra hoogte wordt ook wel de waakhoogte genoemd en bedraagt minimaal een 0,5 m. Door de waterstandafwijking gelijkmatig te verdelen over de Rijntakken wordt een overstroming tot het laatst uitgesteld. Bijsturen van de afvoerverdeling heeft in deze casestudie een gunstig effect op de overstromingskans van de Rijntakken. Dit geldt ook voor casestudies 4 en 5 waarbij door bijsturen van de afvoerverdeling de waterstandafwijking gelijkmatiger verdeeld wordt over de Rijntakken. In casestudies 1 en 3 wordt door bijsturen van de afvoerverdeling het tegenovergestelde effect bereikt: door bijsturen van de afvoerverdeling wordt de waterstandafwijking minder gelijkmatig over de Rijntakken verdeeld. In casestudies 1 en 3 heeft bijsturen van de afvoerverdeling daarom een negatief effect op de overstromingskans van de Rijntakken.

Stuurdoel 2: waterstandafwijking op de Waal en de Nederrijn minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel (de pijn concentreren op één Rijntak).

In casestudy 2, waarbij de ruwheid van het zomerbed is verhoogd over de tweede 47 km van de Waal, kan bij een lagere afvoer dan de maatgevende afvoer de waterstand op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel boven het toetspeil uitkomen wanneer de afvoerverdeling wordt bijgestuurd. Zonder dat de afvoerverdeling wordt bijgestuurd was dit niet gebeurd (figuur 6.21). Bijsturen van afvoerverdeling heeft in deze casestudie een negatief effect op de overstromingskans op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel. In al de uitgevoerde casestudies wordt de overstromingskans op het Pannerdensch Kanaal en de IJssel sterk vergroot door bijsturen van de afvoerverdeling. Bijsturen heeft echter in alle casestudies een positief effect op de overstromingskans op de Waal en de Nederrijn.



Figuur 6.21: vroegtijdige overstroming door de waterstandafwijking op de Waal en de Nederrijn te minimaliseren ten koste van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Algemeen

- Om te toetsen of het waterproces op de Rijntakken verloopt volgens plan is het noodzakelijk om tijdens hoogwater metingen te verrichten. Op basis van de verschil tussen de actuele situatie (vastgesteld door metingen) en de gewenste situatie op de Rijntakken kan de afvoerverdeling op de splitsingspunten gestuurd worden. De afvoerverdeling kan gestuurd worden op basis van waterstandmetingen en afvoermetingen. In het onderzoek is de afvoerverdeling gestuurd op basis van waterstandmetingen omdat de meetonzekerheid in de afvoermeting groter is dan de onzekerheid in de afvoerverdeling tijdens maatgevend hoogwater. De onzekerheid in de afvoerverdeling is geschat op 1-2% van de onverdeelde afvoer (bij maatgevend hoogwater) terwijl de meetonzekerheid in de afvoermeting is geschat op 5% van de afvoer. Afvoermetingen zijn hierdoor ongeschikt om de afvoerverdeling op bij te sturen. Waterstandmetingen hebben daarentegen een kleine meetonzekerheid (1 cm) en zijn bovendien volledig geautomatiseerd, nemen nauwelijks tijd in beslag en zijn snel beschikbaar waardoor relatief eenvoudig over een betrouwbare continue reeks actuele waterstanden beschikt kan worden.
- In het onderzoek is de afvoerverdeling gestuurd op basis van waterstanden. Om te bepalen welke kant de afvoer gestuurd moet worden op een splitsingspunt wordt het verschil tussen de opgetreden waterstand en de gewenste waterstand op de verschillende Rijntakken met elkaar vergeleken. Het verschil tussen de opgetreden en de gewenste waterstand kan vastgesteld worden door gebruikt te maken van één of meer meetstations langs de riviertak. In het kader van het onderzoek zijn 3 criteria geformuleerd waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling is gestuurd. Hierbij zijn 2 criteria gebaseerd op verschillende meetstations (maximale of de gemiddelde waterstandafwijking over de meetstations) en 1 criterium op één meetstation namelijk het eerste meetstation op de riviertak. Het doel van bijsturen wordt het best benaderd wanneer gestuurd wordt op de maximale waterstandafwijking op de meetstations per riviertak. In vrijwel al de casestudies wordt hiermee het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil het sterkst verkleind ten opzichte van de situatie zonder sturen.

Effectiviteit van de regelaar

In het onderzoek zijn verstoringen in het watersysteem van de Rijn aangebracht die een negatieve invloed hebben op de waterstand tijdens (maatgevend) hoogwater. Als gevolg van deze verstoringen zal de waterstand op één of meer Rijntakken boven het toetspeil uitkomen bij maatgevend hoogwater. Op basis van de geformuleerde stuurdoelen wordt de afvoerverdeling zodanig bijgestuurd dat op één of meer Rijntakken dit waterstandverschil verkleind wordt. Door dit waterstandverschil met en zonder bijsturen van de afvoerverdeling met elkaar te vergelijken is een beeld gekregen van de effectiviteit van de regelaar. Stuurdoel 1: door de pijn gelijkmatig te verdelen over de Rijntakken wordt in 2 casestudies het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil op de Rijntakken verkleind met bijsturen (met 43% en 92%), voor de overige 3 casestudies is het effect van bijsturen klein (3 tot 8%). In 2 van de 3 casestudies wordt door bijsturen van de afvoerverdeling de situatie op de Rijntakken verslechterd. Stuurdoel 2: door de pijn te concentreren op één Rijntak kan het verschil tussen piekwaterstand en toetspeil sterk verkleind worden op de overige Rijntakken door de afvoerverdeling bij te sturen (10 tot 100%). Beide stuurdoelen hebben als nadeel dat de waterstand bovenstrooms van de splitsingspunten wordt opgestuwd. Bovendien duurt het relatief lang voordat een verstoring van 10 cm is bijgestuurd: 3 à 4 dagen. Verstoringen die enkele uren voor de afvoerpiek optreden kunnen hierdoor nauwelijks gecorrigeerd worden.

7.2 Aanbevelingen

Dit onderzoek is gebaseerd op een vijftal casestudies en daarom kan geen algemene uitspraak gedaan worden of de overstromingskans verminderd kan worden voor de geformuleerde stuurdoelen.

- Om een algemene uitspraak te kunnen doen of de overstromingskans verkleind kan worden door bijsturen van de afvoerverdeling verdient het aanbeveling om de onzekerheid in de waterstand met bijsturen van de afvoerverdeling vast te stellen in een probabilistische berekening onder invloed van een groot aantal verstoringen. Bovendien zal de onzekerheden die samenhangen met het bijsturen van de afvoerverdeling ingeschat moeten worden.

Wanneer uit mogelijk vervolg onderzoek blijkt dat de overstromingskans daadwerkelijk gereduceerd kan worden door bijsturen van de afvoerverdeling wordt aangeraden de volgende praktische zaken nader te onderzoeken voordat overgegaan wordt tot aanleg van een regelwerk op de splitsingspunten op de Rijn:

- Om de afvoerverdeling bij te kunnen sturen tijdens hoogwater moet de actuele situatie op de Rijntakken vergeleken kunnen worden met de gewenste situatie. Hiervoor zal de gemeten waterstand op de meetstations vergeleken worden met de verwachte waterstand bij die afvoer. De verwachtingswaarde van de waterstand op de Rijntakken kan berekend worden aan de hand van het hydraulisch model dat wordt gebruikt om de toetspeilen op de Rijn te berekenen. Tijdens hoogwater wordt de verwachte waterstand verkregen door de afvoer of de waterstand bij Lobith te meten en deze in te voeren in het hydraulisch model. Waterstandmetingen liggen het meest voor de hand omdat de meetonzekerheid in de afvoermeting erg hoog is. Dat tijdens hoogwater precies de verwachtingswaarde van de waterstand bij die afvoer bij Lobith wordt gemeten is echter klein. Door meetonzekerheden, onzekerheden in de Qh-relatie bij Lobith (variatie in natuurlijke processen en de invloed van de regelwerken) zal de gemeten waterstand afwijken van de verwachtingswaarde. Deze onzekerheden werken door bij het berekenen van de verwachte waterstand op de Rijntakken. Er zit dus een onzekerheid in de verwachte waterstand. In welke mate deze onzekerheid het regelproces zal beïnvloeden is onzeker en zal nader onderzocht moeten worden.
- In dit onderzoek is de afvoerverdeling op de Rijn bijgestuurd door de weerstand te verhogen op één riviertak benedenstrooms van het splitsingspunt (door middel van een beweegbare drempel). De waterstand op de bovenstroomse Rijntakken wordt hierdoor sterk opgestuwd. Bijsturen van de afvoerverdeling heeft hierdoor een negatief effect op de overstromingskans op de bovenstrooms gelegen Rijntakken. De afvoerverdeling kan ook gestuurd worden door bijvoorbeeld de weerstand op een riviertak te verlagen (bijvoorbeeld een nevengeul). Wellicht kan door een andere wijze van bijsturen van de afvoerverdeling opstuwning bovenstrooms van de splitsingspunten verkleind of voorkomen worden. Aanbevolen wordt om voor verschillende mogelijkheden waarop de afvoerverdeling bijgestuurd kan worden het effect op de bovenstroomse waterstand te onderzoeken.

Verklarende woordenlijst

afvoercapaciteit	Het grootste volume water dat per tijdseenheid de rivier kan passeren.
afvoergolf	Een verhoudingsgewijs kortdurende verhoging van de afvoer, gekenmerkt door een snelle was, gevolgd door een trage val.
afwijking	Verskil tussen de waarde van de geregelde grootheid en de ingestelde waarde. (NEN 3009)
automatische regelkring	Een gesloten stelsel (kring) waarin de gemeten waarde van een geregelde grootheid wordt vergeleken met de ingestelde waarde. Afhankelijk van het verschil van deze twee waarden wordt automatisch de geregelde grootheid zodanig beïnvloed dat dit verschil verkleind wordt. Zo'n stelsel (kring) bestaat ten minste uit: proces, automatische regelaar, corrigerend orgaan en overbrengingsleidingen. (NEN 3009)*
dijkringgebied	Gebied dat door een stelsel van waterkeringen, of hoge gronden, beveiligd moet zijn tegen overstroming, in het bijzonder bij hoge stormvloed, bij hoogwater van één van de grote rivieren, bij hoogwater van het IJsselmeer of een combinatie daarvan.
effectiviteit van de regelaar	In het onderzoek zijn verstoringen in het watersysteem van de Rijn aangebracht die een negatieve invloed hebben op de waterstand tijdens (maatgevend) hoogwater. Als gevolg van de verstoringen zal de waterstand op één of meer Rijntakken boven de verwachte waterstand (toetspeil) uitkomen bij maatgevend hoogwater. Op basis van de geformuleerde stuurdoelen wordt de afvoerverdeling zodanig bijgestuurd dat op één of meer Rijntakken dit waterstandverschil verkleind wordt. Door dit waterstandverschil met en zonder bijsturen van de afvoerverdeling met elkaar te vergelijken wordt een beeld gekregen van de invloed die de regelaar heeft op de waterstand op de benedenstroomse Rijntakken. In het onderzoek is de effectiviteit van de regelaar uitgedrukt in een score: verhouding tussen het verschil tussen piekwaterstand en verwachte waterstand op de Rijntakken met en zonder regelaar.
geregelde grootheid	Grootheid van het proces, die automatisch wordt geregeld. (NEN 3009)*
ingestelde waarde	Waarde van de geregelde grootheid, waarop de automatische regelaar is ingesteld. (NEN 3009)*
kilometerraai (kmr)	Denkbeeldige meetlijn loodrecht op de rivier.
maatgevende afvoer	De maatgevende afvoer wordt via een statistische analyse afgeleid uit piekafvoeren die zich in het verleden hebben voorgedaan. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 is de

	maatgevende afvoer met een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 jaar vastgesteld op 16000 m ³ /s bij Lobith.
maatgevende hoogwaterstand	Ontwerppeil volgens de norm van art.3.2. van de Wet op de Waterkering.
overschrijdingskans	De kans dat een bepaalde waarde van een grootheid wordt overschreden. Voor de afvoer te Lobith wordt dit uitgedrukt in aantal malen per jaar. Voor de maatgevende afvoer (afvoer waarop de dijken worden gedimensioneerd) geldt een kans van 1/1250.
overstromingskans	De overstromingskans is de kans op overstromen van een dijkkring. Bij het bepalen van de overstromingskans wordt rekening gehouden met allerlei faalmechanismen waardoor een overstroming veroorzaakt zou kunnen worden. Daarnaast wordt rekening gehouden met onzekerheden.
probabilistisch	Rekening houdend met onzekerheden
toetspeilen	De waterstand behoren bij de normfrequentie van de betreffende waterkering, die bij de toetsing wordt gebruikt.
val	De periode van vanaf de top van de MHW-golf tot het einde van de MHW-golf.
verwachte waterstand	Dit is de waterstand die het hydraulisch model (voor bepaling van de toetspeilen) berekend bij die afvoer.
was	De periode van aanvang van de MHW-golf tot de top van de MHW-golf.
winterbed	Dwarsprofiel van de rivier tussen het zomerbed en de waterkering.
zomerbed	Dwarsprofiel van de rivier waar bij normale en lagere waterstanden de rivierafvoer plaatsvindt.

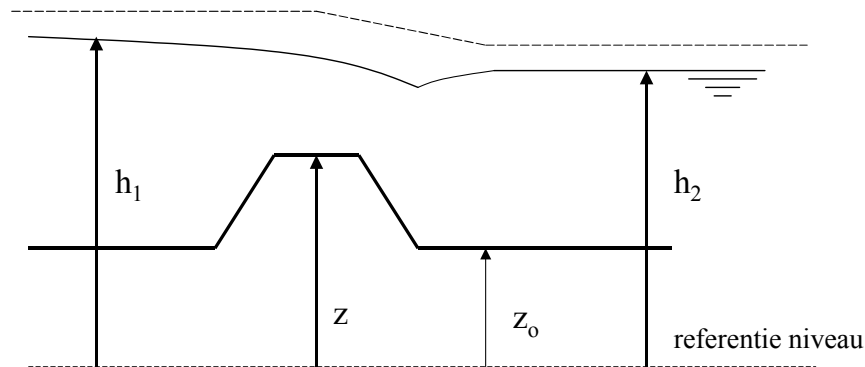
* NEN 3009: Nomenclatuur en definities in de techniek van het automatisch regelen

Literatuurlijst

- Battjes, J.A., *Stroming in waterlopen*. Delft: TUDelft, 2001.
- Brouwer, R., *Operational water management*. Delft: TUDelft, 2001.
- Cool, C. et al., *Regeltechniek*. Achtste druk. Delft: TUDelft, 1991.
- Herschey, R.W. , *Hydrometry: principles and practices*. 1999.
Hydraulische randvoorwaarden 2001. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001.
- Kok, M. et al., *Beperking van overstromingsrisico's in het Bovenrivierengebied, Een verkennende beleidsanalyse van rampenbeheersing en structurele maatregelen langs de Rijntakken*. Delft: WL, Lelystad: HKV [lijn in water](#), 2003.
- Les, B.A.J. en C. Gautier, *Onderzoek naar sturingsmechanismen voor de afvoerverdeling over de Pannerdensch Kop en de IJsselkop*. Rotterdam: Svasek, 1998.
- Middelkoop, H. (red), *Twee rivieren. Rijn en Maas in Nederland*. Arnhem: RIZA, 1998.
- Ogink, H.J.M. , *Nauwkeurigheid toetspeilen*. Delft: WL, 2003.
- Schropp, M.H.I., *Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater*. Arnhem: RIZA, 2002.
- Schropp, M.H.I., *Regelbereik afvoerverdeling Rijntakken. Een verkenning bij Maatgevend Hoogwater*. Arnhem: RIZA, 1999.
- Silva, W. et al., *Ruimte voor Rijntakken. Wat het onderzoek ons heeft geleerd*. Herziene 2^e oplage. Arnhem/Delft: Directie Oost Nederland (Rijkswaterstaat) en WLDelft, 2000.
- Stijnen, J.W. et al., *Onzekerheidsanalyse Hoogwaterbescherming Rijntakken, Onzekerheidsbronnen en gevolgen van maatregelen*. Lelystad: HKV [lijn in water](#), 2002.
- TAW, *van overschrijdingskans naar overstromingskans*. Den Haag, 2000.
- Veen, R. van der, *Inzet gecalibreerde model SOBEK-Rijntakken bij hoogwatervoorspellingen*. Arnhem/Lelystad: RIZA, 1996.
- Veen, R. van der, *Bouw en calibratie Sobek-Rijn*. Arnhem: RIZA, 2002.
- Velzen, E. van, *Onzekerheden bij de bepaling van de toetspeilen op de Rijntakken*. Arnhem: RIZA, 2003.
- Vermeulen, C.J.M., *Sobek-Matlab koppeling, Ontwerp RTC module*. Lelystad: HKV [lijn in water](#), 2004.
- Vuuren, W. van, *Een analyse van de spreiding in opgetreden piekwaterstanden tijdens historische hoogwaters op de Rijntakken over de periode 1901-2001 (Memo)*. Arnhem: RIZA, 2003
- Vuuren, W. van , *Bijdrage aan ADCM-workshop 4 december 2001 bij RIKZ (Memo)*. Arnhem: RIZA, 2001.

Bijlage A

Bijlage A: Schematisatie van het regelwerk



vrije afvoer

$$Q = c \cdot B \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot (h_1 - z)^3} \quad \text{als} \quad h_2 - z < \frac{2}{3} \cdot (h_1 - z) \quad (\text{A.1})$$

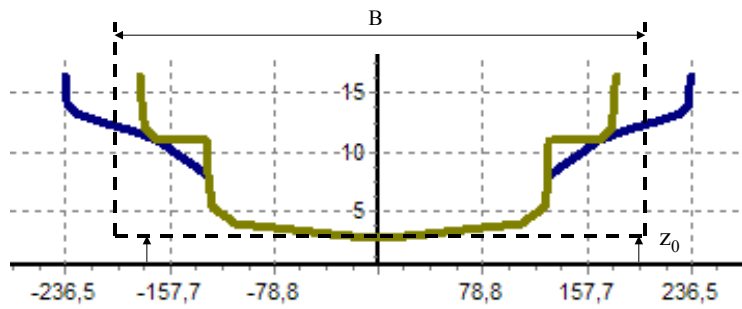
gestuwde afvoer

$$Q = c \cdot B \cdot (h_1 - z) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \text{als} \quad h_2 - z \geq \frac{2}{3} \cdot (h_1 - z) \quad (\text{A.2})$$

- $Q =$ afvoer over drempel (m^3/s)
- $B =$ drempelbreedte (m)
- $c =$ afvoercoëfficiënt (-)
- $z =$ drempelhoogte (m)
- $g =$ gravitatie constante (m/s^2)
- $h_1 =$ bovenstroomse waterhoogte (m)
- $h_2 =$ benedenstroomse waterhoogte (m)

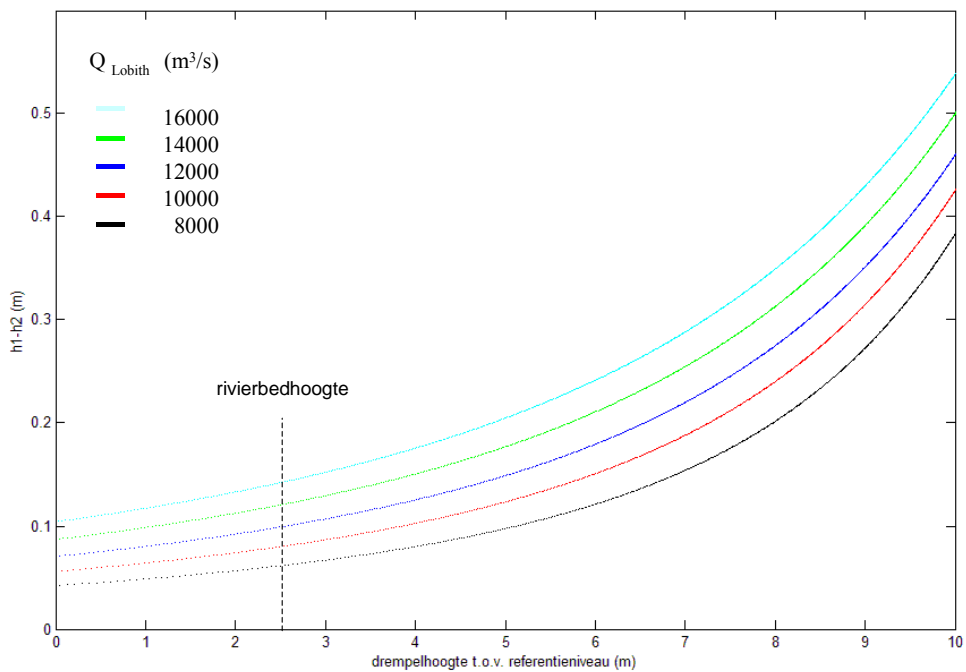
De invloed van de beweegbare drempels op de waterstand op de Rijn wordt wiskundig beschreven door vergelijking A.2: gestuwde afvoer. In deze bijlage is voor elke drempel aangegeven hoe de drempel is geschematiseerd in de rivierdoorsnede van de betreffende Rijntak. Daarnaast is in een grafiek het verhang gegeven over de drempel als functie van de drempelhoogte bij verschillende afvoeren bij Lobith. Deze grafiek kan getekend worden wanneer de Qh-relatie bekend is benedenstrooms van de drempel.

Beweegbare drempel op de Waal



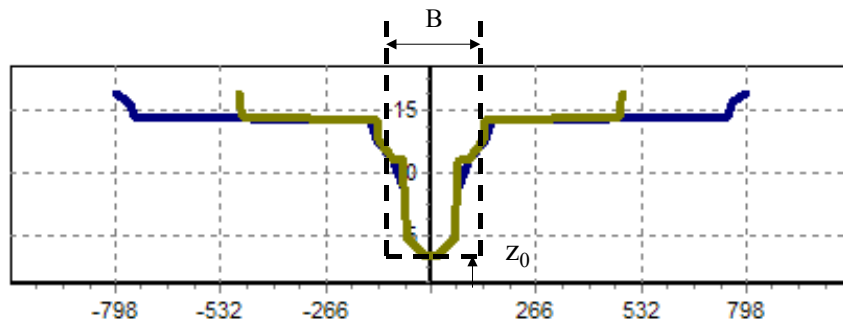
Figuur A.1: schematisatie beweegbare drempel op de Waal

parameters	omschrijving	eenheid	waarde	Q_{Lobith} (m^3/s)	Q_{Waal} (m^3/s)	h_2 (m)
B	breedte	m	400			
C	afvoercoëfficiënt	-	1	8000	5265	14,41
z_0	rivierbedhoogte	m	2,65	10000	6338	15,06
				12000	7437	15,73
				14000	8605	16,36
				16000	9765	16,97



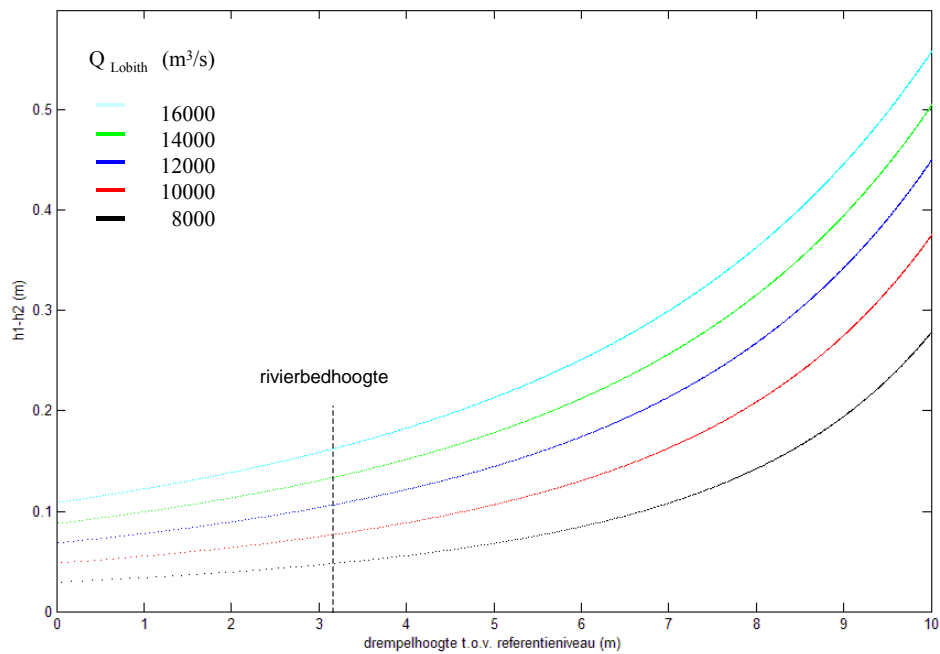
Figuur A.2: verhang over beweegbare drempel op de Waal als functie van de drempelhoogte

Beweegbare drempel op het Pannerdensch Kanaal



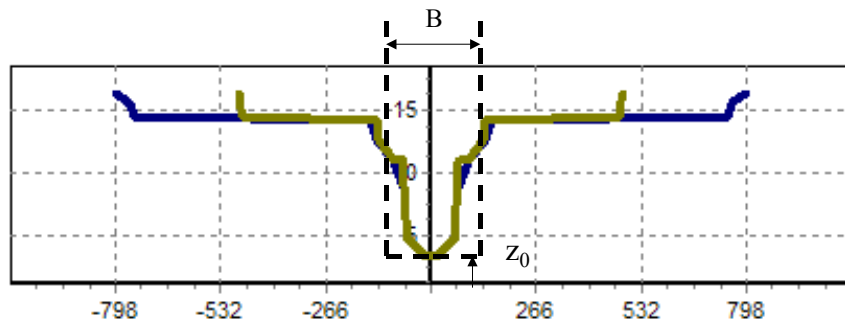
Figuur A.3: schematisatie beweegbare drempel op het Pannerdensch Kanaal

parameters	omschrijving	eenheid	waarde	Q_{Lobith} (m^3/s)	$Q_{Pan.Kan.}$ (m^3/s)	h_2 (m)
B	breedte	m	250			
C	afvoercoëfficiënt	-	1	8000	2735	14,41
z_0	rivierbedhoogte	m	3,2	10000	3662	15,03
				12000	4564	15,70
				14000	5395	16,36
				16000	6235	16,98



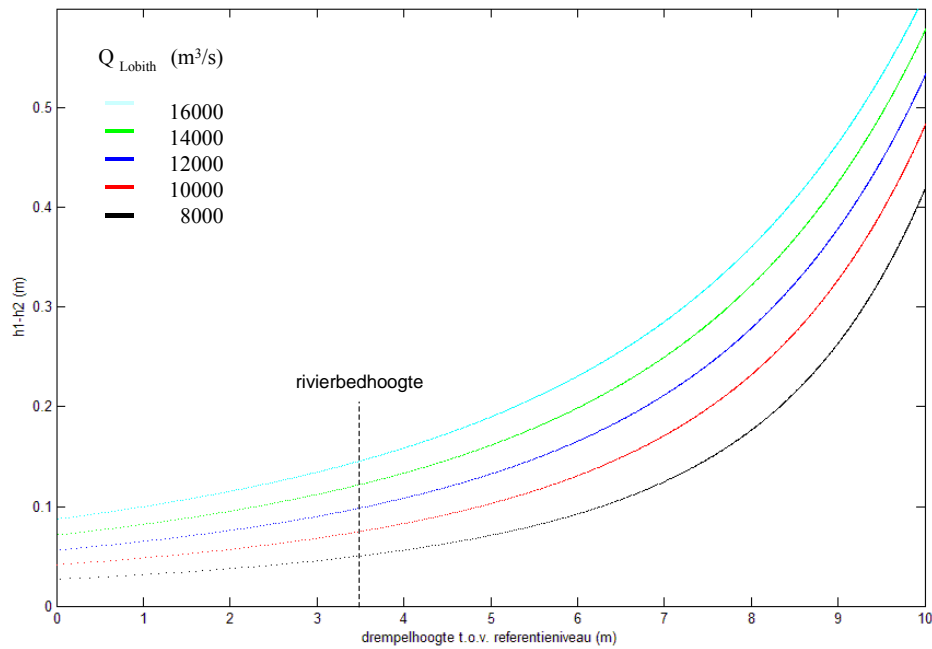
Figuur A.4: verhang over beweegbare drempel op het Pannerdensch Kanaal als functie van de drempelhoogte

Beweegbare drempel op het Nederrijn



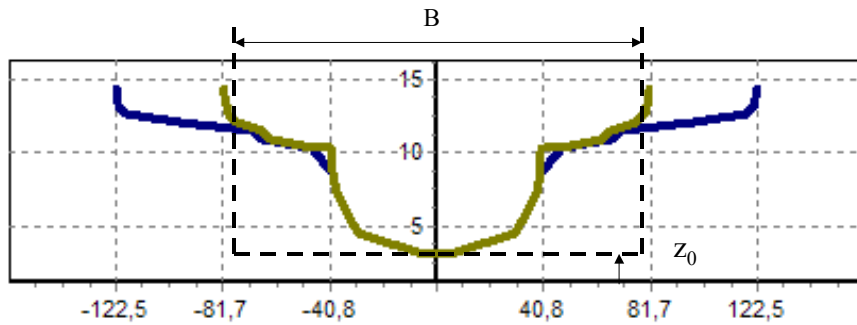
Figuur A.5: schematisatie beweegbare drempel op de Nederrijn

parameters	omschrijving	eenheid	waarde	Q_{Lobith} (m^3/s)	$Q_{Nederrijn}$ (m^3/s)	h_2 (m)
B	breedte	m	200			
C	afvoercoëfficiënt	-	1	8000	1634	12,84
z_0	rivierbedhoogte	m	3,45	10000	2135	13,49
				12000	2591	14,05
				14000	3031	14,60
				16000	3484	15,13



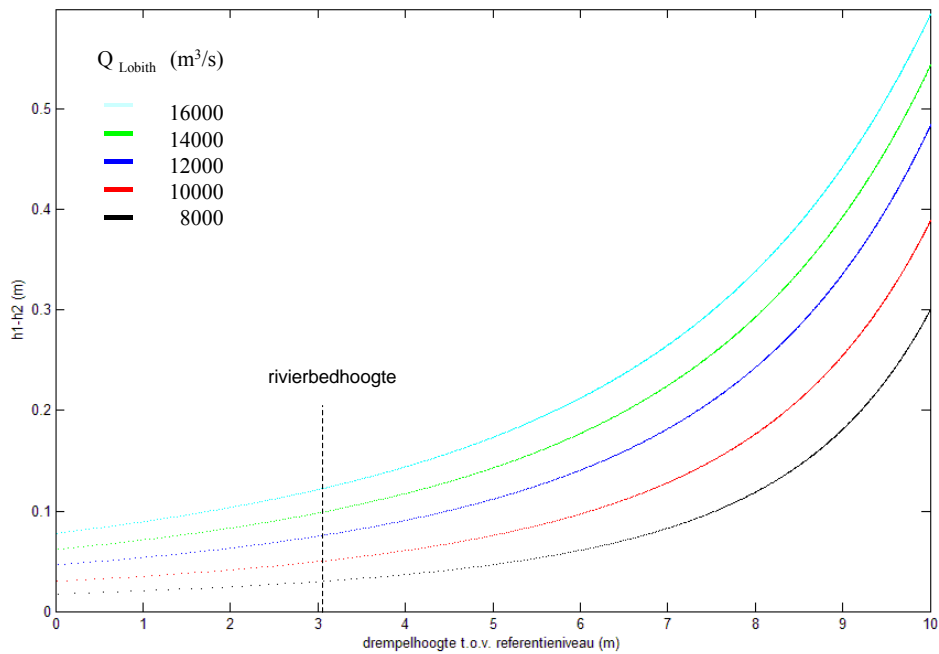
Figuur A.6: verhang over beweegbare drempel op de Nederrijn als functie van de drempelhoogte

Beweegbare drempel op het IJssel



Figuur A.7: schematisatie beweegbare drempel op de IJssel

parameters	omschrijving	eenheid	waarde	Q_{Lobith} (m^3/s)	Q_{IJssel} (m^3/s)	h_2 (m)
B	breedte	m	150	8000	1122	12,79
C	afvoercoëfficiënt	-	1	10000	1533	13,32
Z_0	rivierbedhoogte	m	3,05	12000	1979	13,80
				14000	2370	14,30
				16000	2756	14,79



Figuur A.8: verhang over beweegbare drempel op de IJssel als functie van de drempelhoogte

Bijlage B

Bijlage B: Instellen van de regelaar

In deze bijlage zal ingegaan worden op het instellen van de PI-regelaar: afregelen van een set regelparameters voor het aansturen van de beweegbare drempels. Eerst zal de procedure toegelicht worden die gevolg is om te komen tot een set regelparameters. Hierna zal de tijdsduur ingeschat worden die nodig is om een waterstandafwijking bij te sturen.

Procedure afregelen regelparameters

In de onderstaande procedure staat beschreven hoe de regelparameters per drempel worden afgeregeld. Deze procedure zal voor elke drempel een aantal keren herhaald moeten worden. De afvoerverdeling wordt namelijk op verschillende manieren bijgestuurd: verschillende stuurdoelen (2) en verschillende manieren om de waterstandafwijking per tak vast te stellen (3). Voor elke variatie wordt een aparte set regelparameters (K_p en K_i) afgeleid; in totaal zal de procedure 6 keer uitgevoerd moeten worden per drempel.

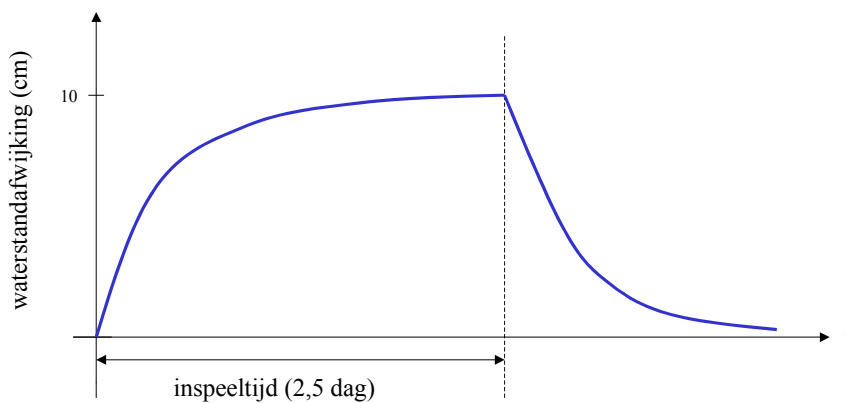
Bij het afregelen van de regelparameters zullen alle berekeningen uitgevoerd worden met een:

- constante afvoer bij Lobith van $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ (stationaire berekening)
- simulatieperiode van 8 dagen

Procedure:

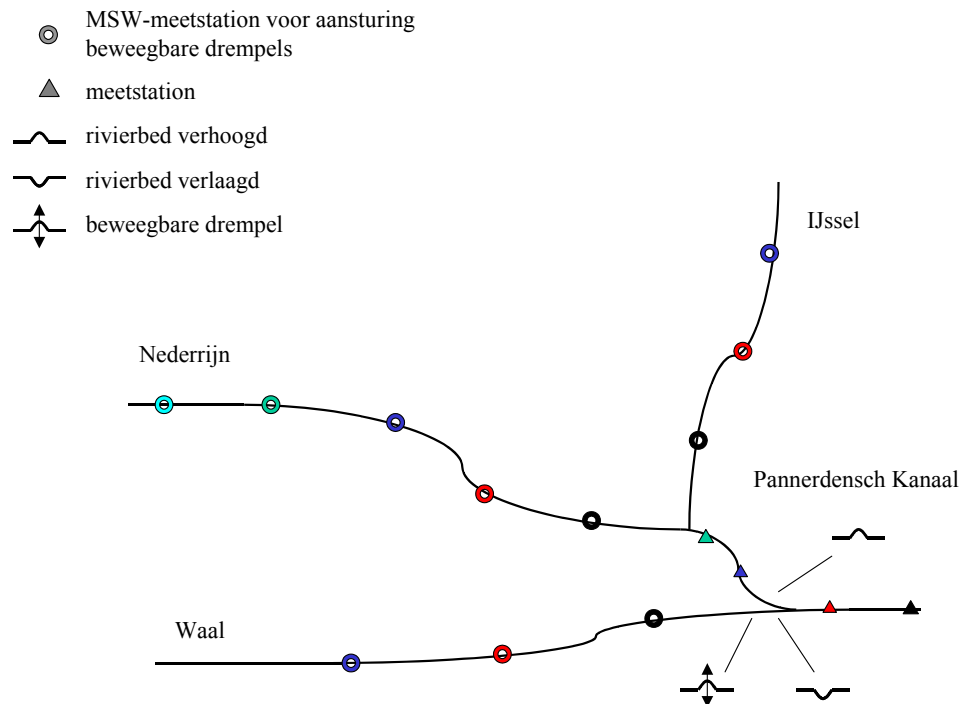
1. Simuleren van de waterbeweging op de Rijn zonder dat een verstoring is aangebracht in het Sobek Rijntakken model (referentieberekening).
 2. Simuleren van de waterbeweging op de Rijn nadat een verstoring is aangebracht in het Sobek Rijntakken model. Als gevolg van de verstoring zal de waterstand op de Rijn afwijken van de waterstand op de Rijn zonder verstoring (referentieberekening). Aan de hand van deze waterstandafwijking zullen de regelparameters voor de aansturing van de drempels afgeregeld worden.
- ad 1) Aan de hand van deze berekening zullen de referentiewaterstanden vastgesteld worden op de Rijn. Op basis van deze referentiewaterstanden kunnen de drempels aangestuurd worden in stap 2. Deze simulatie hoeft één keer uitgevoerd te worden omdat deze simulatie voor alle gevallen gelijk is.

- ad 2) De afvoerverdeling op de splitsingspunten wordt zodanig uit evenwicht gehaald dat een waterstandafwijking ontstaat van ongeveer 10 cm op de riviertak waarvan de regelparameters van de drempel afgeregeld moeten worden. Dit wordt bereikt door de rivierbedding benedenstrooms van de splitsingspunten over de eerste 2 kilometer te verhogen of te verlagen: de waterstand op de Waal wordt bijvoorbeeld verhoogd door de rivierbedding op de Waal te verlagen en op het Pannerdensch Kanaal te verhogen. Het hydraulisch model heeft enige inspeeltijd nodig voordat de gewenste waterstandafwijking van 10 cm is bereikt op de betreffende riviertak: na 2,5 dag ontstaat een constante waterstandafwijking (zie figuur B.1). Na de inspeeltijd zal deze waterstandafwijking verkleind worden door uitsluitend de drempel op de betreffende riviertak aan te sturen. Door de regelparameters te variëren, zie hoofdstuk 5, wordt proefondervindelijk de regelparameters voor de aansturing van de beweegbare drempels gevonden.



Figuur B.1: aanbrengen en bijsturen van waterstandafwijking

Voorbeeld: afregelen regelparameters voor aansturing drempel op de Waal



Figuur B.2: situatie schets

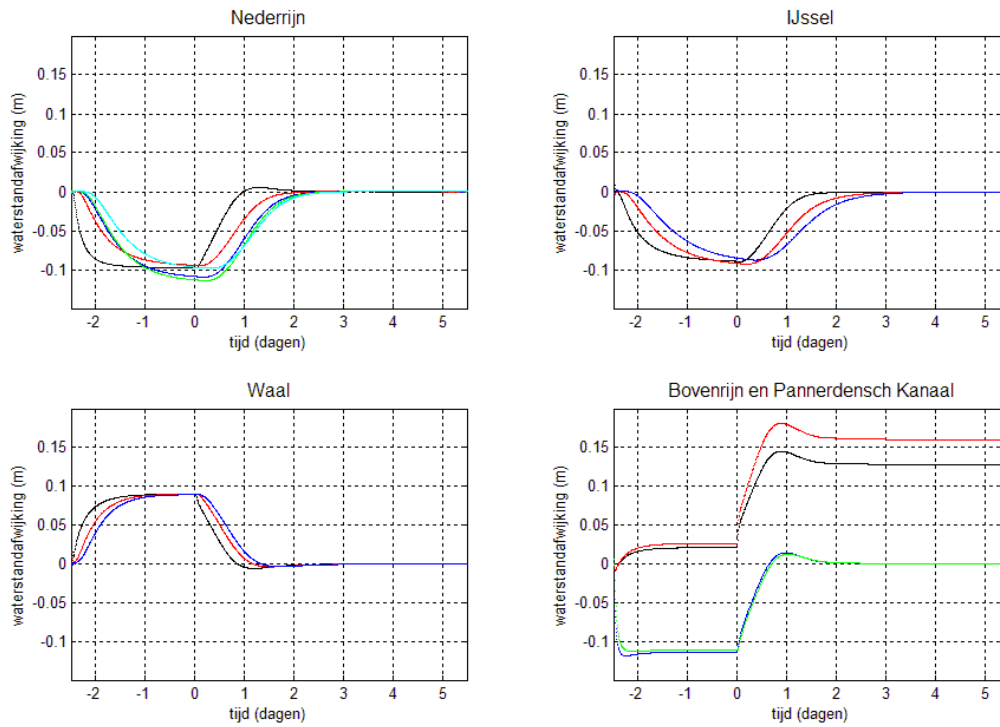
De waterstand op de Waal wordt ten opzichte van de referentieberekening (zonder verstoring) verhoogd met 10 cm door het rivierbed op de Waal te verlagen en op de het Pannerdensch Kanaal te verhogen:

riviertak	rivierbed over de eerste 2 km verhoogd/verlaagd
Waal	- 3 m
Pannerdensch Kanaal	+ 1 m

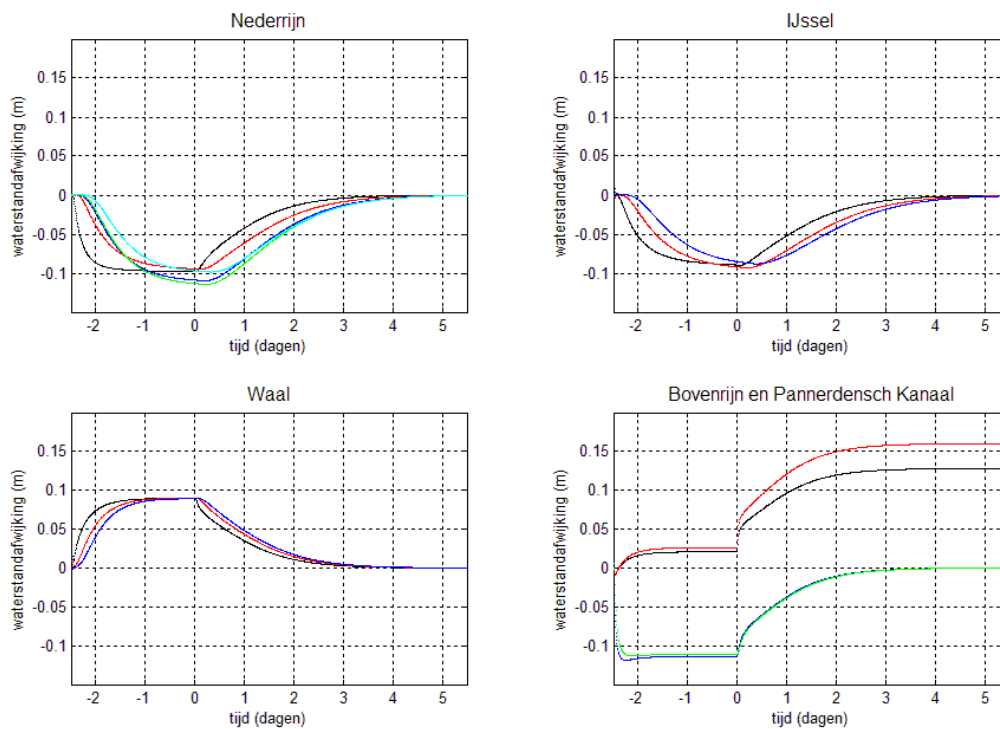
Als gevolg van de waterstandverhoging op de Waal (meer afvoer naar de Waal), dalen de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel met respectievelijk 11 cm, 10 cm en 9 cm (zie figuur B.3).

Na een inspeelperiode van 2,5 dag wordt een waterstandafwijking van ongeveer 9 cm bereikt op de Waal. Deze waterstandafwijking wordt vervolgens verkleind door uitsluitend de drempel op de Waal aan te sturen. De drempel zal in dit voorbeeld op basis van het maximale waterstandafwijking op verschillende meetstations per riviertak worden aangestuurd. In figuur B.3 is de integrerende versterkingsfactor te hoog afgesteld: de overcompensatie is te groot op de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal (>10%). In figuur B.4 is de integrerende versterkingsfactor verlaagd totdat de overcompensatie kleiner is dan 10%.

Figuur	K_p	K_i
B.3	25	4
B.4	25	2



Figuur B.3: afregelen regelparameters voor aansturing drempel op de Waal. (stuurdoel 1 criterium 1)



Figuur B.4: afregelen regelparameters voor aansturing drempel op de Waal. (stuurdoel 1 criterium 1)

Voor elke drempel zullen de regelparameters apart vastgesteld moeten worden. Bij het bepalen van de regelparameters voor de aansturing van de drempels blijken de regelparameters van de twee drempels per splitsingspunt weinig van elkaar te verschillen (zie figuur B.4 en figuur B.6). Daarom is ervoor gekozen om de regelparameters van de drempels per splitsingspunt aan elkaar gelijk te stellen. Voor een enkel geval bleek dit niet het geval te zijn hierbij is de parameterset van de drempel met de laagste integrerende versterkingsfactor aangehouden.

De tijdsduur waarin de initiële waterstandafwijking (± 10 cm) bijgestuurd kan worden is afhankelijk van het stuurdoel en de manier waarop de waterstandafwijking per riviertak vastgesteld wordt. In figuur B.4, B.7 en B.8 wordt op drie verschillende manieren de afvoerverdeling bijgestuurd op grond van waterstandmetingen, respectievelijk op de maximale waterstandafwijking op de verschillende meetstations, de gemiddelde waterstandafwijking over de verschillende meetstations en de waterstandafwijking op het eerste meetstation per riviertak. Uit de figuren blijkt dat wanneer de afvoerverdeling wordt bijgestuurd op verschillende meetstations per riviertak (max. en gem.) dat het ongeveer 2 dagen duurt voordat de waterstandafwijking is bijgestuurd. Wordt de afvoerverdeling bijgestuurd op alleen het eerste meetstation dan duurt dit ongeveer 1 dag. Dit kan als volgt verklaard worden. Wanneer de afvoerverdeling wordt bijgestuurd op het eerste meetstation per riviertak dan is het resultaat van bijsturen van de afvoerverdeling in korte tijd merkbaar op het meetstation en kan hierdoor relatief snel opnieuw ingegrepen worden. Wordt de afvoerverdeling daarentegen bijgestuurd op verschillende meetstations per riviertak dan gaat er meer tijd voorbij voordat het resultaat van bijsturen merkbaar is op alle meetstations hierdoor wordt het bijsturen van de afvoerverdeling vertraagd.

In tabel B.1 en B.1 zijn de verschillende integrerende versterkingsfactoren gegeven. De proportionele versterkingsfactor is voor alle gevallen gelijk aan 25.

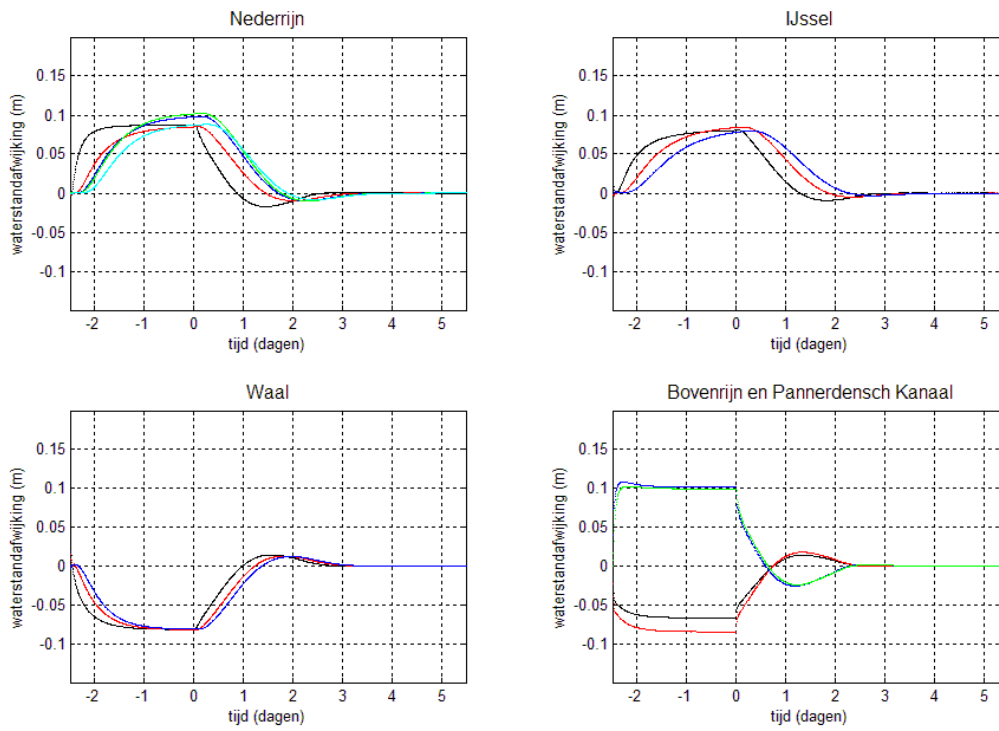
Tabel B.1: integrerende versterkingsfactor (K_i) voor het eerste stuurdoel: waterstandafwijkingen gelijkmatig verdelen over Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel

regelaar	enkel meetstation	verschillende meetstations per riviertak	
	per riviertak	gemiddelde	maximale
	eerste (-)	(-)	(-)
Pannerdensche Kop	4	1,5	1,5
IJsselkop	4	2	2

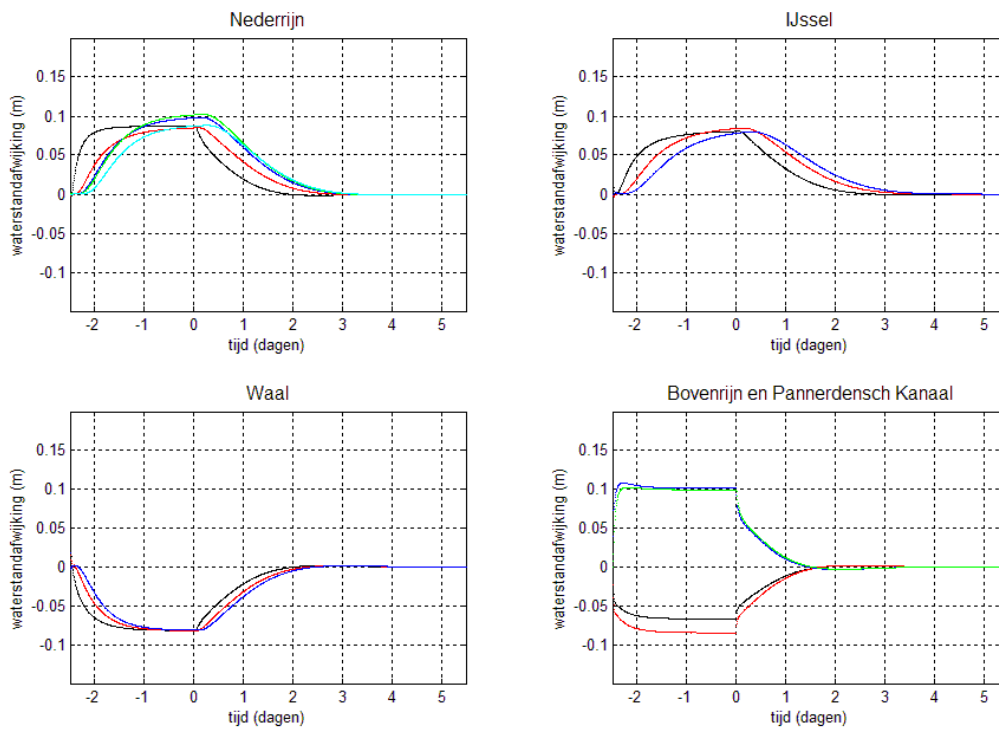
Tabel B.2: integrerende versterkingsfactor (K_i) voor het tweede stuurdoel: waterstandafwijkingen minimaliseren op Waal en Nederrijn ten koste van Pannerdensch Kanaal en IJssel

regelaar	enkel meetstation	verschillende meetstations per riviertak	
	per riviertak	gemiddelde	maximale
	eerste (-)	(-)	(-)
Pannerdensche Kop	5	1	1
IJsselkop	5	3	3

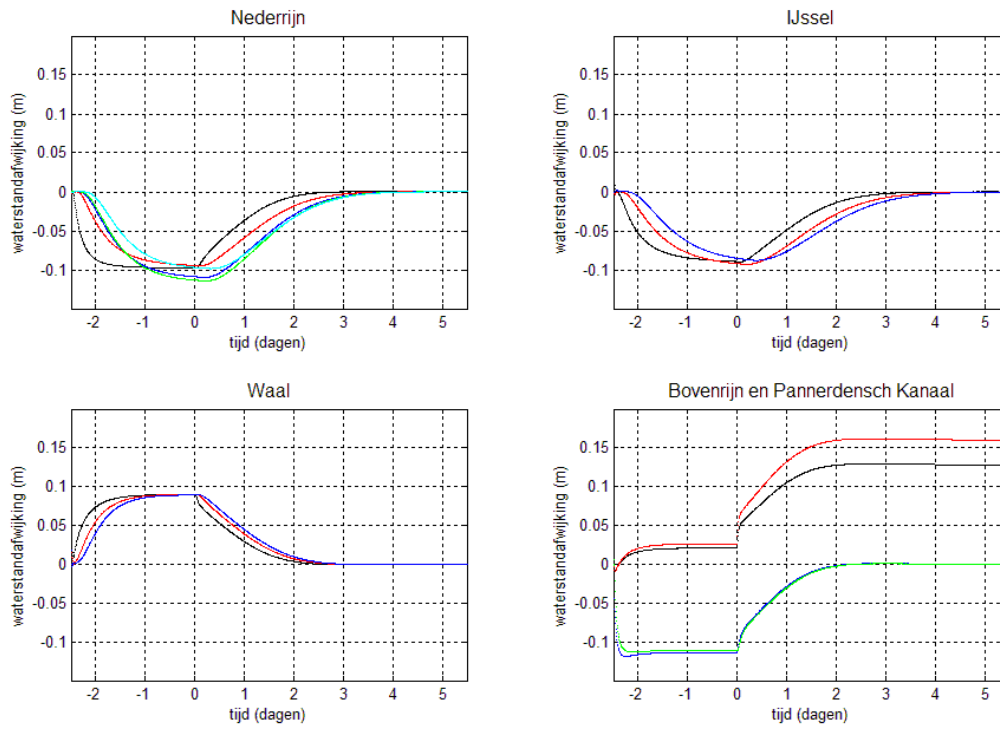
Pannerdensch Kanaal



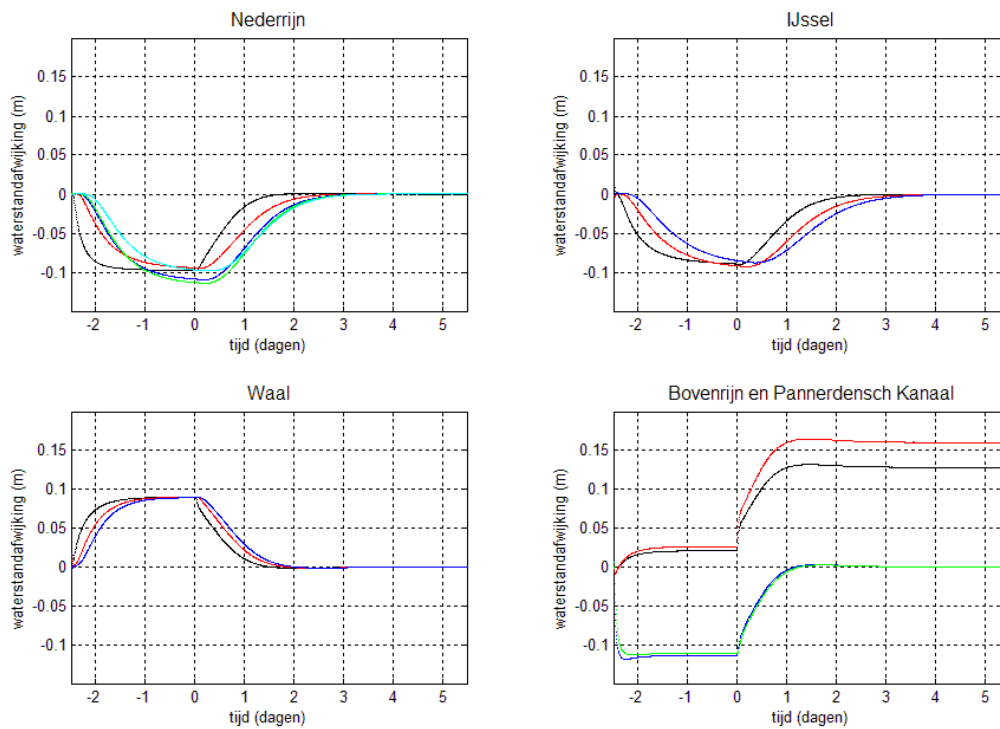
Figuur B.5: afregelen regelparameters voor aansturing drempel op het Pannerdensch Kanaal (stuurdoel 1 criterium 1)



Figuur B.6: afregelen regelparameters drempel Pannerdensch Kanaal (stuurdoel 1 criterium 1)



Figuur B.7: afregelen regelparameters drempel Waal (stuurdoel 1 criterium 2)



Figuur B.8: afregelen regelparameters drempel Waal (stuurdoel 1 criterium 3)

Tijdsduur bijsturen afvoerverdeling

Bij het afregelen van de regelparameters voor de aansturing van de drempels wordt een indicatie verkregen van de tijdsduur waarin waterstandafwijkingen weggeregeld kunnen worden. Voor alle drempels is de tijdsduur bepaald die nodig is om een de waterstandafwijking van ongeveer 10 centimeter weg te regelen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de twee stuurdoelen en de verschillende manieren waarop basis van waterstandmetingen de afvoerverdeling bijgestuurd kan worden (zie tabel B.4 en B.5). De tijdsduur waarin de waterstandafwijking weggeregeld kan worden verschilt nauwelijks voor de verschillende stuurdoelen. Bijsturen van de afvoerverdeling op een enkel meetstation of verschillende meetstations per riviertak maakt echter wel een verschil: het volledig weggeregelen van de waterstandafwijking kost in het eerste geval ruim 2 dagen en in het tweede geval ongeveer 4 dagen. Bij het weggeregelen van de waterstandafwijking wordt aan het begin van de periode het grootste rendement behaald: in het eerste geval is na 1 dag en in het tweede geval is na 2 dagen de waterstandafwijking gereduceerd met 67%.

Tabel B.3: benodigde tijdsduur (dagen) om een initiële verstoring (± 10 cm) voor 67% en 100% weg te regelen bij het eerste stuurdoel: waterstandafwijking gelijkmatig verdelen over de Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel

drempel	enkel meetstation per riviertak		verschillende meetstations per riviertak			
	eerste		gemiddelde		maximale	
	67%	100%	67%	100%	67%	100%
Waal	1	2	1	2,5	1,5	3
Pan. Kan	1	2	1,5	3	1	2,5
Nederrijn	1	2,5	1	5	1	5
IJssel	1	3	3	>5	3	>5

Tabel B.4: benodigde tijdsduur (dagen) om een initiële verstoring (± 10 cm) voor 67% en 100% weg te regelen bij het tweede stuurdoel: waterstandafwijking minimaliseren op Waal en Nederrijn ten koste van Pannerdensch Kanaal en IJssel

drempel	enkel meetstation per riviertak		verschillende meetstations per riviertak			
	eerste		gemiddelde		maximale	
	67%	100%	67%	100%	67%	100%
Waal	1	2	1	2,5	1	2
Pan. Kan	1	2	1,5	3	1,5	3
Nederrijn	1	3	1	5	1	5
IJssel	1	3	3	>5	3	>5

Vuistregels

Met de volgende vuistregel kan op basis van de regelparameters (K_p en K_i) de tijdsduur ingeschat worden waarin 67% van de initiële afwijking kan worden weggestuurd:

$$t_{67\%} = \frac{K_p}{K_i} \cdot \Delta t$$

<i>parameter</i>	<i>omschrijving</i>	<i>eenheid</i>	<i>enkel meetstation</i>	<i>verschillende meetstations</i>
K_p	proportionele versterkingsfactor	-	25	25
K_i	integreerende versterkingsfactor	-	4 tot 5	1 tot 3
Δt	tijdsduur tussen twee instructies	uren	1	1
$t_{67\%}$	benodigde tijdsduur om 67% van de afwijking weg te regelen	uren	5 tot 6	8-25

Met de vuistregel wordt de benodigde tijdsduur lager ingeschat om een waterstandafwijking met 67% te reduceren. Wanneer bij het bijsturen van de afvoerverdeling gebruik gemaakt wordt van een enkel meetstation kan de waterstandafwijking volgens de vuistregel in 5 tot 6 uur gereduceerd worden tot 67%. De modelberekening schat de benodigde tijdsduur hoger in: 1 dag. Wordt de afvoerverdeling bijgestuurd op grond van verschillende meetstations per riviertak dan kan volgens de vuistregel de waterstandafwijking in 8-25 uur gereduceerd worden tot 67%. Het model schat de benodigde tijdsduur wederom hoger in: 2 dagen.

Bijlage C

Bijlage C: Aansturing regelwerken

De berekening van de waterbeweging op de Rijn wordt onderbroken (om de n rekenstappen van SOBEK $n = 1, 2, \dots$) om met MATLAB nieuwe instructies voor de regelwerken op de splitsingspunten van de Rijn te berekenen. Deze instructies worden vervolgens gedurende de volgende periode door SOBEK gehanteerd bij het simuleren van de waterbeweging. In deze bijlage zullen de rekenkundige bewerkingen technisch uitgewerkt worden die door matlab uitgevoerd zullen moeten worden om van waterstandmetingen te komen tot een ingreep in het watersysteem. Beschreven wordt de structuur van het MATLAB programma en de uitwerking daarvan in losse procedures. De Matlab code is te vinden aan het eind van deze bijlage. Bij het schrijven van de bijlage is gebruik gemaakt van een handleiding, getiteld: 'Sobek-Matlab koppeling, ontwerp RTC module' geschreven door C.J.M. Vermeulen (HKV lijn in water).

Structuur Matlab-programma

In het programma worden de volgende activiteiten achtereenvolgens uitgevoerd (zie figuur C.1), tussen haakjes staat het MATLAB-bestand vermeld:

- Initialisatie (Initialisatie.m)
De eerste keer dat het MATLAB-programma wordt aangeroepen worden variabelen geïnitieerd en parameters ingelezen.
 - Inlezen actuele gegevens uit SOBEK simulatie (InvoerSobek.m)
De actuele waarden van waterstanden in de simulatie van SOBEK worden aan MATLAB doorgegeven.
 - Bepalen waterstandafwijking op de meetstations (Waterstandafwijking.m)
Vergelijken van actuele waarden van waterstanden met gewenste/referentiewaterstanden op de meetstations.
 - Berekenen instructies voor regelwerken (Advies.m)
Het berekenen van de gewenste instellingen van de regelwerken met MATLAB.
 - Versturen berekende instructies naar SOBEK simulatie (UitvoerSobek.m)
De berekende instructies voor de regelwerken worden aan SOBEK doorgegeven.
- Afzonderlijke procedures:
- Visualisatie van de MATLAB rekenresultaten (Presentatie.m)
De instructies voor de regelwerken en de waterstandafwijkingen op de meetstations kunnen onder andere gepresenteerd worden door MATLAB.

Detailuitwerking MATLAB-procedures

Hoofdprogramma	
Initialisatie	(initialisatie bij start programma)
InvoerSobek	(lezen van Sobek-variabelen)
Waterstandsafwijking	(bepalen waterstandsafwijkingen op meetstations)
Advies	(rekenhart)
UitvoerSobek	(presentatie van Matlab parameters)

Figuur C.1: programmastructuur MATLAB-programma

Initialisatie.m

De eerste keer dat het MATLAB programma wordt aangeroepen worden de parameters geïnitieerd. Ook kunnen er parameters vanuit files worden ingelezen. In de initialisatie zijn de volgende parameters gedefinieerd:

Href	gewenste of ingestelde waterstand op de meetstations (wordt vanuit file ingelezen)
t	tijdstap Sobek
i	instructie tijdstap
n	verhouding tussen tijdstap Sobek en instructie tijdstap ($i = n * t$)
starttijd	tijdstip waarop regelwerken worden geactiveerd
waterstandafwijking_tijdsinterval	gemiddelde waterstandafwijking over tijdsinterval `n` op een meetstation
stuurdoel_uitvoer	stuurdoel
gem_of_max_uitvoer	manier waarop waterstandafwijking per riviertak wordt bepaald
aantal_meetstations	aantal meetstations dat per tak wordt meegenomen
wegingsfactoren_meetstations	wegingsfactoren meetstations
rivierbedhoogte	rivierbedhoogte ter plaatse van de drempels
drempelhoogte_oud_riviertak	initiële drempelhoogte
Kp	proportionele versterkingsfactor
Ki	integreerende versterkingsfactor

InvoerSobek.m

In deze procedure worden de actuele waarden van de waterstand op de verschillende meetstations op de Rijn aan Matlab doorgegeven. De waarde van de SOBEK-parameters worden aan een MATLAB variabele toegekend (Hw).

Waterstandafwijking.m

Deze procedure bepaald de waterstandafwijking op de meetstations (Hverschil) op de Rijn door de actuele waterstanden (Hw) te vergelijken met de gewenste waterstanden (Href). De afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn zal bijgestuurd worden op grond van deze waterstandafwijkingen.

Advies.m

Het rekenhart van het programma. Hierin worden de waterstandafwijkingen door middel van rekenkundige bewerkingen omgerekend naar een instructie voor de regelwerken. Deze procedure is weer onderverdeeld in een aantal subprocedures. Tussen haakjes staat het MATLAB-bestand vermeld:

- Per meetstation kan over een gegeven tijdsinterval de gemiddelde waterstandafwijking berekend worden (gemiddelde_waterstandafwijking_tijdsinterval.m)
Deze procedure maakt het mogelijk om eerder gemeten waterstandafwijkingen mee te nemen bij het bepalen van de waterstandafwijking op een meetstation. Hiervan is geen gebruik gemaakt bij het onderzoek.
- Bepalen van de (gewogen) gemiddelde waterstandafwijking over de meetstations per riviertak (gemiddelde_waterstandafwijking.m)
In deze procedure kan de gemiddelde waterstandafwijking op de meetstations op een riviertak berekend worden. De invloed van sommige meetstations op het bijsturen van de afvoerverdeling kan beïnvloed worden door het toekennen van wegingsfactoren aan deze meetstations. Bijsturen op het eerste meetstation is mogelijk door aan het eerste meetstation op de riviertakken een 1 toe te kennen en aan de overige meetstations een 0.
- Bepalen maximale waterstandafwijking op de meetstations per riviertak (maximale_waterstandafwijking.m)
In deze procedure wordt de maximale waterstandafwijking op de meetstations bepaald per riviertak. Dit wordt bereikt door de waterstandafwijking op de meetstations met elkaar te vergelijken.
- De waterstandafwijking op de verschillende riviertakken met elkaar vergelijken (vergelijken_waterstandafwijking_riviertakken.m)
In deze procedure worden de waterstandafwijking op de verschillende Rijntakken met elkaar vergeleken. Door de waterstandafwijking op de verschillende riviertakken met elkaar te

vergelijken kan vastgesteld worden naar welke riviertak meer en naar welke riviertak minder water gestuurd zal moeten worden om het stuurdoel te bereiken.

- Berekenen van de instructies voor de regelwerken op de splitsingspunten van de Rijn (instructies_regelwerken.m)

In deze procedure wordt de waterstandafwijking op de verschillende riviertakken vertaald naar een drempelhoogte voor de regelwerken op de splitsingspunten van de Rijn.

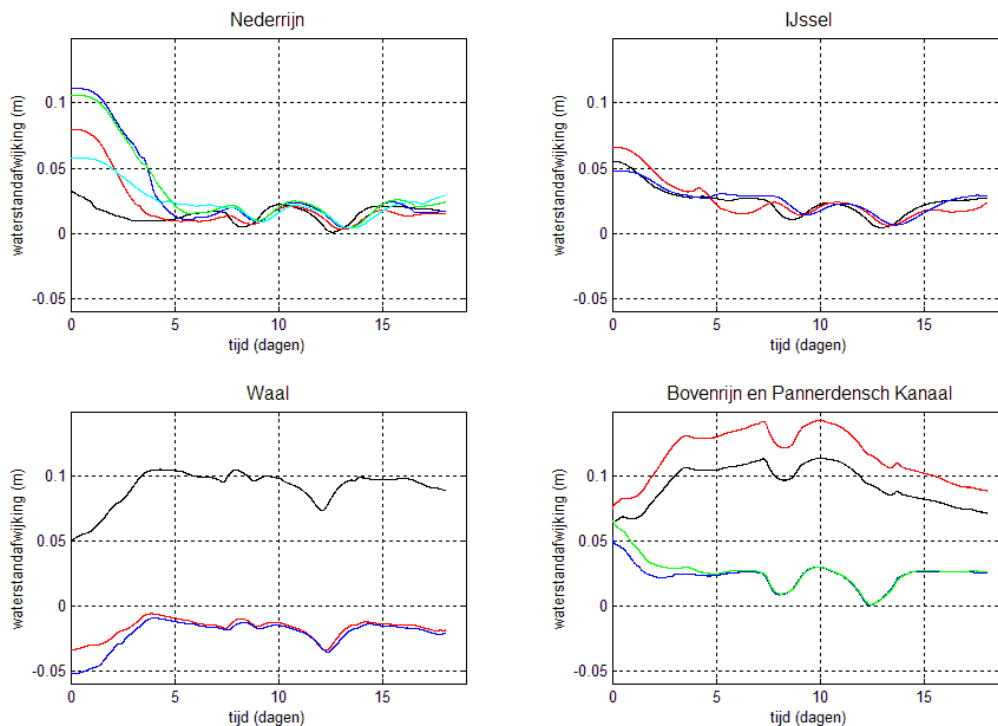
- Wegschrijven van parameters voor presentatie (parameters.m)

Uitvoersobek.m

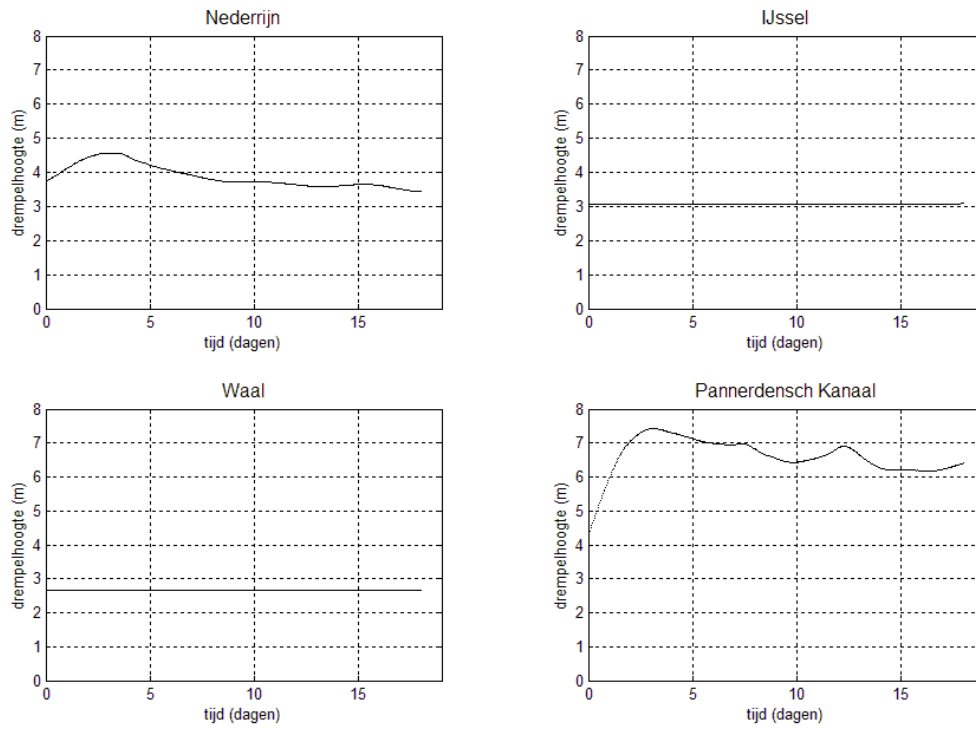
De berekende drempelhoogte van de drempels op de splitsingspunten van de Rijn worden aan de SOBEK simulatie toegeleverd. De waarde van de MATLAB variabelen met de berekende instructies worden aan de SOBEK parameters toegekend.

Presentatie.m

De berekende instructies voor de regelwerken en de waterstandafwijkingen op de meetstations kunnen gepresenteerd worden door MATLAB (zie figuur C.2 en figuur C.3).



Figuur C.2: presentatie van waterstandafwijkingen in Matlab



Figuur C.3: presentatie van waterstandafwijkingen in Matlab

Matlab code

```
% Bestandsnaam: Hoofdprogramma.m
%
% Doel:          Hoofdprogramma koppeling SOBEK-MATLAB
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter  | Betekenis                | Eenheid      | Dimensie
% -----|-----|-----|-----
% t          | Tijdstap Sobek           | --           | 1x1
% i          | Instructie tijdstap     | --           | 1x1
% n          | Verhouding (n = i/t)    | --           | 1x1

% Initialisatie
if SobekFirst==1
    Initialisatie
end

% Handelingen per tijdstap.
t=t+1;

% Inlezen gegevens uit Sobek
InvoerSobek

% Waterstandafwijking berekenen op alle meetstations.
Waterstandafwijking

if t==n*i % Handelingen over tijdsinterval 'n'

    % Advies
    Advies

    i=i+1;
else
end

% Wegschrijven van instructies voor de drempels naar Sobek.
UitvoerSobek
```

```

% Bestandsnaam: Initialisatie.m
%
% Doel:           Deze procedure initialiseert het rekenprogramma
% Datum:         9 augustus 2004

% Parameter  | Betekenis                               | Eenheid  | Dimensie
% -----|-----|-----|-----
% Href       | gewenste/referentiewaterstanden         | meter    | 4x5xt
% t          | Tijdstap Sobek                          | --       | 1x1
% i          | Instructie tijdstap                     | --       | 1x1
% n          | Verhouding (n = i/t)                    | --       | 1x1
% starttijd  | Starttijd                                | --       | 1x1
% Kp         | proportionele versterkingsfactor        | --       | 3x2
% Ki         | integrerende versterkingsfactor         | --       | 3x2

% stuurdoel_uitvoer                               | --       | 1x1
% gem_of_max_uitvoer                              | --       | 1x1
% wegingsfactoren_meetstations                    | --       | 5x3
% waterstandafwijking_tijdsinterval               | --       | 6x1
% rivierbedhoogte                                 | meter    | 1x1
% aantal_meetstations                             | --       | 1x1
% drempelhoogte_oud_riviertak                     | meter    | 4x1

t=0;

% Openen invoerfile referentiewaterstanden
load c:\MATLAB6p1\work\oefening2\Href.mat Href;

% Instructietijdstap (i)
i = 1;

% Tijdstip (i) waarop regelwerk op splitsingspunten van de Rijn worden ingeschakeld
starttijd = 144;

% Keuze stuurdoel
% 1 = Waterstandafwijking op de riviertakken eerlijk over de riviertakken verdelen
% 2 = Waterstandafwijking op de riviertakken afwenden op een tak
stuurdoel_uitvoer=2;

% Verschillende manieren om de afwijking op de verschillende meetstations per tak
mee te nemen
% 1 = Gewogen gemiddelde waterstandafwijking over de meetstations per tak
% 2 = Maximale waterstandafwijking op de meetstations per tak
gem_of_max_uitvoer=1;

% Wegingsfactoren meetstations
wegingsfactoren_meetstations = [1 0 0 0 0; 1 0 0 0 0; 1 0 0 0 0];

% Verhouding tussen TijdstapSobek (t) en Instructietijdstap (i)
n = 6;

% Meenemen van verschillende waterstandafwijkingen over tijdsinterval `n`
waterstandafwijking_tijdsinterval = [0 0 0 0 0 1];

% Parameters van het besturingssysteem
Kp = [25 25 25; 25 25 25];           % Proportionele versterkingsfactor
Ki = [5 5 5; 5 5 5];               % Integrerende versterkingsfactor

% Rivierbedhoogte ter plaatse van de drempels
rivierbedhoogte = [3.45 3.05 2.65 3.2];

% Aantal meetstations per riviertak (m=a(r)) resp. Nederrijn, IJssel, Waal,
% Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal.
aantal_meetstations = [5 3 3 4];

```

```

% Initiele drempelhoogte
drempelhoogte_oud_riviertak1 = 3.45;
drempelhoogte_oud_riviertak2 = 3.05;
drempelhoogte_oud_riviertak3 = 2.65;
drempelhoogte_oud_riviertak4 = 3.2;

% Bestandsnaam: InvoerSobek.m
%
% Doel:          Deze procedure leest de waarden uit Sobek
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter  | Betekenis                               | Eenheid  | Dimensie
% -----
% Hw         | actuele waterstanden                       | meter    | 4x5xt

% Riviertak 1 (Nederrijn)
H_r1m1 = SobekH_5_24;
Hw(1,1,t)= H_r1m1;
H_r1m2 = SobekH_5_86;
Hw(1,2,t)= H_r1m2;
H_r1m3 = SobekH_6_23;
Hw(1,3,t)= H_r1m3;
H_r1m4 = SobekH_6_36;
Hw(1,4,t)= H_r1m4;
H_r1m5 = SobekH_7_50;
Hw(1,5,t)= H_r1m5;

% Riviertak 2 (IJssel)
H_r2m1 = SobekH_8_48;
Hw(2,1,t)= H_r2m1;
H_r2m2 = SobekH_8_100;
Hw(2,2,t)= H_r2m2;
H_r2m3 = SobekH_9_18;
Hw(2,3,t)= H_r2m3;
H_r2m4 = SobekH_9_64;
Hw(2,4,t)= H_r2m4;
H_r2m5 = SobekH_10_5;
Hw(2,5,t)= H_r2m5;

% Riviertak 3 (Waal)
H_r3m1 = SobekH_2_36;
Hw(3,1,t)= H_r3m1;
H_r3m2 = SobekH_2_90;
Hw(3,2,t)= H_r3m2;
H_r3m3 = SobekH_3_41;
Hw(3,3,t)= H_r3m3;
H_r3m4 = SobekH_3_77;
Hw(3,4,t)= H_r3m4;

% Riviertak 4 (Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal)
H_r4m1 = SobekH_1_1;
Hw(4,1,t)= H_r4m1;
H_r4m2 = SobekH_1_9;
Hw(4,2,t)= H_r4m2;
H_r4m3 = SobekH_4_11;
Hw(4,3,t)= H_r4m3;
H_r4m4 = SobekH_4_22;
Hw(4,4,t)= H_r4m4;

```

```
% Bestandsnaam: Waterstandafwijking.m
%
% Doel:           Deze procedure berekent de waterstandafwijkingen op de
%                meetstations op de Rijntakken
% Datum:         9 augustus 2004

% Parameter  | Betekenis                               | Eenheid  | Dimensie
% -----|-----|-----|-----
% Hverschil  | Waterstandafwijkingen op de meetstations | --       | 4x5xt
% Href       | Gewenste/referentie waterstanden         | meter    | 4x5xt
% Hw         | Actuele waterstanden                     | meter    | 4x5xt
```

```
Hverschil(:, :, t) = Hw(:, :, t) - Href(:, :, t);
save c:\MATLAB6p1\work\oefening2\Hverschil.mat Href Hw Hverschil;
```

```
% Bestandsnaam: Advies.m
%
% Doel:           Deze procedure vertaald waterstandenafwijkingen naar
%                instructies voor de regelwerken (onderverdeeld in subprocedures
% Datum:         9 augustus 2004

% Parameter  | Betekenis                               | Eenheid  | Dimensie
% -----|-----|-----|-----
% --         | --                                       | --       | --
```

```
% Gemiddelde waterstandafwijking per meetstation over een bepaald tijdsinterval.
gemiddelde_waterstandafwijking_tijdsinterval
```

```
% Een waterstandafwijking vaststellen per riviertak.
gemiddelde_waterstandafwijking      % Gemid. waterstandsafw. over meetstations.
maximale_waterstandafwijking        % Max. waterstandafw. op de meetstations.
```

```
% Bij te sturen waterstandafwijking.
vergelijken_waterstandafwijking_riviertakken
```

```
% Vertaling waterstandafwijking naar drempelhoogte.
instructies_regelwerken
```

```
% Wegschrijven van parameters
parameters
```



```

% Bestandsnaam: gemiddelde_waterstandafwijking_tijdsinterval
%
% Doel:          Deze procedure berekent de gemiddelde waterstandafwijking
%               per meetstation over een bepaalde tijdsinterval
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                               | Eenheid   | Dimensie
% -----
% Hverschil_Tgem | Gemiddelde waterstandafwijking         | --        | 4x5xi
%               | over een bepaalde tijdsinterval       | --        |

```

```

for r = 1:1:4

    for m = 1:1:aantal_meetstations(r)
        som_Hverschil = 0;
        som_w = 0;
        tellertje = 1;

        for t = (t-n+1):1:t
            gewogen_Hverschil = waterstandafwijking_tijdsinterval(tellertje)*
                Hverschil(r,m,t);
            som_Hverschil = som_Hverschil + gewogen_Hverschil;
            som_w = som_w + waterstandafwijking_tijdsinterval(tellertje);
            tellertje = tellertje + 1;
        end

        Hverschil_Tgem(r,m,i) = som_Hverschil / som_w;

    end

end

```

```

% Bestandsnaam: gemiddelde_waterstandafwijking
%
% Doel:          Deze procedure berekent de gemiddelde waterstandafwijking
%               over de meetstations per riviertak
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                               | Eenheid   | Dimensie
% -----
% Hverschil_Tgem_Rgem | Gemiddelde waterstandafwijking         | --        | 4x5xi
%               | over de meetstations per riviertak    |

```

```

for r = 1:1:3
    som_Hverschil_Tgem = 0;
    som_wegingsfactoren_meetstations = 0;

    for m = 1:1:aantal_meetstations(r)
        gewogen_Hverschil_Tgem = wegingsfactoren_meetstations(r,m)*
            Hverschil_Tgem(r,m,i);
        som_Hverschil_Tgem = som_Hverschil_Tgem + gewogen_Hverschil_Tgem;
        som_wegingsfactoren_meetstations = som_wegingsfactoren_meetstations +
            wegingsfactoren_meetstations(r,m);
    end

    Hverschil_Tgem_Rgem(r,i) = som_Hverschil_Tgem /
        som_wegingsfactoren_meetstations;

end

Hverschil_Tgem_Rgem(4,i) = (Hverschil_Tgem_Rgem(1,i) + Hverschil_Tgem_Rgem(2,i))/2;

```

```

% Bestandsnaam: maximale_waterstandafwijking
%
% Doel:          Deze procedure berekent de maximale waterstandafwijking
%               op de meetstations per riviertak
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                               | Eenheid   | Dimensie
% -----
% Hverschil_Tgem_Rmax | Maximale waterstandafwijking           | --        | 4x5xi
%                   | op de meetstations per riviertak

for r=1:1:4
    if r==1
        for m=1:1:aantal_meetstations(r)
            X1(m) = Hverschil_Tgem(1,m,i);
        end
        Hverschil_Tgem_Rmax(1,i) = max(X1);
    elseif r==2
        for m=1:1:aantal_meetstations(r)
            X2(m) = Hverschil_Tgem(2,m,i);
        end
        Hverschil_Tgem_Rmax(2,i) = max(X2);
    elseif r==3
        for m=1:1:aantal_meetstations(r)
            X3(m) = Hverschil_Tgem(3,m,i);
        end
        Hverschil_Tgem_Rmax(3,i) = max(X3);
    elseif r==4
        Hverschil_Tgem_Rmax(4,i) = (Hverschil_Tgem_Rmax(1,i) +
            Hverschil_Tgem_Rmax(2,i))/2;
    end
end
end

```

```

% Bestandsnaam: vergelijken_waterstandafwijkingen_riviertakken
%
% Doel:          Deze procedure worden de watersafwijkingen op de verschillende
%              Rijntakken met elkaar vergeleken
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                               | Eenheid   | Dimensie
% -----
% Hverschil_ref  | Maximale waterstandafwijking           | --        | 2x2x2xi
%                | op de meetstations per riviertak

for stuurdoel = 1:1:2
    if stuurdoel == 1

        for gem_of_max = 1:1:2
            regelaar=1;
            if gem_of_max == 1
                for r = 1:2:4
                    Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i)=
                        (Hverschil_Tgem_Rgem(r,i) - Hverschil_Tgem_Rgem(r+1,i))/2;
                    regelaar = regelaar + 1;
                end
            else
                regelaar=1;
                for r = 1:2:4
                    Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i)=
                        (Hverschil_Tgem_Rmax(r,i) - Hverschil_Tgem_Rmax(r+1,i))/2;
                    regelaar = regelaar + 1;
                end
            end
        end
    end

else

    for gem_of_max = 1:1:2
        regelaar=1;
        if gem_of_max == 1
            for r = 1:2:4
                Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i)=
                    Hverschil_Tgem_Rgem(r,i);
                regelaar = regelaar + 1;
            end
        else
            regelaar=1;
            for r = 1:2:4
                Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i)=
                    Hverschil_Tgem_Rmax(r,i);
                regelaar = regelaar + 1;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

end
end

% Bestandsnaam: instructie_regelwerken
%
% Doel:          In deze procedure worden de watersafwijkingen op de verschillende
%               Rijntakken omgerekend naar een instructie voor de regelwerken
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                               | Eenheid   | Dimensie
% -----
% drempelhoogte | Drempelhoogte op de verschillende     | --        | 2x2x4xi
%               | riviertakken

for stuurdoel = 1:1:2
    for gem_of_max = 1:1:2
        for regelaar = 1:1:2

            if i == 1
                drempeltraject = 1;
            else

                if regelaar == 1
                    r=1;

                elseif regelaar == 2
                    r=3;
                end

                if drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r, i-1) >=
                    drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r+1, i-1)

                    if drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r, i-1) >= 0 &
                        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r, i-1) < 6
                        drempeltraject = 1;
                    elseif drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r, i-1) >= 6 &
                        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r, i-1) < 8
                        drempeltraject = 2;
                    else
                        drempeltraject = 3;
                    end

                else

                    if drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r+1, i-1) >= 0 &
                        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r+1, i-1) < 6
                        drempeltraject = 1;
                    elseif drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r+1, i-1) >= 6 &
                        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, r+1, i-1) < 8
                        drempeltraject = 2;
                    else

```

```

        drempeltraject = 3;
    end

end

end

proportional(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i) = Kp(regelaar,
drempeltraject) * Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i);

if i <= starttijd
    integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i) = Ki(regelaar,
drempeltraject) * Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max,
regelaar,i);
else
    integral(stuurdoel,      gem_of_max,      regelaar,      i)      =
integral(stuurdoel,
gem_of_max, regelaar, i-1) + (Ki(regelaar, drempeltraject) *
Hverschil_ref(stuurdoel, gem_of_max, regelaar,i));
end

if regelaar == 1

    if proportional(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i) +
integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i) > 0
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 1, i) =
rivierbedhoogte(1) + abs(proportional(stuurdoel, gem_of_max,
regelaar, i) + integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i));
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 2, i) =
rivierbedhoogte(2);
    else
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 1, i) =
rivierbedhoogte(1);
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 2, i) =
rivierbedhoogte(2) + abs(proportional(stuurdoel, gem_of_max,
regelaar, i) + integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i));
    end

elseif regelaar == 2

    if proportional(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i) +
integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i) > 0
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 3, i) =
rivierbedhoogte(3) + abs(proportional(stuurdoel, gem_of_max,
regelaar, i) + integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i));
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 4, i) =
rivierbedhoogte(4);
    else
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 3, i) =
rivierbedhoogte(3);
        drempelhoogte(stuurdoel, gem_of_max, 4, i) =
rivierbedhoogte(4) + abs(proportional(stuurdoel, gem_of_max,
regelaar, i) + integral(stuurdoel, gem_of_max, regelaar, i));
    end

end

end

end

end

end

```

```

% Bestandsnaam: parameters.m
%
% Doel:          Deze procedure schrijft parameters weg voor de presentatie
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                | Eenheid   | Dimensie
% -----
% --             | --                       | --        | --

save c:\MATLAB6p1\work\Oefening2\parameters.mat Hverschil_Tgem Hverschil_Tgem_Rgem
Hverschil_Tgem_Rmax Hverschil_ref proportional integral drempelhoogte;

```

```

% Bestandsnaam: UitvoerSobek.m
%
% Doel:          Deze procedure schrijft de waarden naar Sobek
% Datum:        9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                | Eenheid   | Dimensie
% -----
% --             | --                       |           |

if t < (starttijd*n)
    SobekS_stuw_riviertak1 = drempelhoogte_oud_riviertak1;
    SobekS_stuw_riviertak2 = drempelhoogte_oud_riviertak2;
    SobekS_stuw_riviertak3 = drempelhoogte_oud_riviertak3;
    SobekS_stuw_riviertak4 = drempelhoogte_oud_riviertak4;
else
    if t==n*(i-1)
        SobekS_stuw_riviertak1 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,1,(i-1));
        drempelhoogte_oud_riviertak1 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,1,(i-1));
        SobekS_stuw_riviertak2 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,2,(i-1));
        drempelhoogte_oud_riviertak2 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,2,(i-1));
        SobekS_stuw_riviertak3 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,3,(i-1));
        drempelhoogte_oud_riviertak3 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,3,(i-1));
        SobekS_stuw_riviertak4 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,4,(i-1));
        drempelhoogte_oud_riviertak4 =
            drempelhoogte(stuurdoel_uitvoer,gem_of_max_uitvoer,4,(i-1));

    else
        SobekS_stuw_riviertak1 = drempelhoogte_oud_riviertak1;
        SobekS_stuw_riviertak2 = drempelhoogte_oud_riviertak2;
        SobekS_stuw_riviertak3 = drempelhoogte_oud_riviertak3;
        SobekS_stuw_riviertak4 = drempelhoogte_oud_riviertak4;
    end
end
end

```

```

% Bestandsnaam: Presentatie.m
%
% Doel:           Deze procedure verzorgt de presentatie van de rekenresultaten
%               in Matlab (waterstandafwijking op de meetstations)
% Datum:         9 augustus 2004

% Parameter      | Betekenis                               | Eenheid | Dimensie
% -----
% Hverschil      | Waterstandafwijking op meetstations     | --      | 4x5xt

load c:\MATLAB6p1\work\oefening2\Hverschil.mat Href Hw Hverschil;

begin=1;
eind=3456;

figure(2);
set(gcf,'NumberTitle','off');
set(gcf,'Name','Gemiddelde waterstandafwijking per meetstation over tijdinterval
n');

% aantal meetstations op de riviertakken
aantal_meetstations = [5 3 3 4];

for r=1:1:4

    subplot(2,2,r)

    for m=1:1:a(r)

        for i=begin:1:eind

            X = -6+(i/144);
            Y = Hverschil(r,m,i);

            if m==1
                plot(X,Y,'k')
            elseif m==2
                plot(X,Y,'r')
            elseif m==3
                plot(X,Y,'b')
            elseif m==4
                plot(X,Y,'g')
            else m==5
                plot(X,Y,'c')
            end

            hold on;
            axis([0 19 -0.06 0.15]);

        end

    end

    if r==1
        title('Nederrijn','FontSize',12);
        xlabel('tijd (dagen)');
        ylabel('waterstandafwijking (m)');
        grid on;
    elseif r==2
        title('IJssel','FontSize',12);
        xlabel('tijd (dagen)');
        ylabel('waterstandafwijking (m)');
        grid on;
    elseif r==3
        title('Waal','FontSize',12);

```

```
xlabel('tijd (dagen)');  
ylabel('waterstandafwijking (m)');  
grid on;  
elseif r==4  
title('Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal','FontSize',12);  
xlabel('tijd (dagen)');  
ylabel('waterstandafwijking (m)');  
grid on;  
end  
  
end
```


Bijlage D

Bijlage D: Casestudies

In deze bijlage zullen per casestudie de volgende figuren getoond worden

eerste figuur

In een schets wordt een idee gegeven hoe de waterstand op de Rijntakken afwijkt van de verwachte waterstand bij die afvoer onder invloed van de verstoring.

tweede figuur

Geeft de waterstandafwijking op de meetstations weer zonder dat de afvoerverdeling wordt bijgestuurd onder invloed van de verstoring

derde figuur

Waterstandafwijkingen op de meetstations met bijsturen van de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn voor stuurdoel 1: de pijn gelijkmatig verdelen over de Rijntakken en criterium 1: verschillende meetstations per riviertak (maximale afwijking).

vierde figuur

Waterstandafwijkingen op de meetstations met bijsturen van de afvoerverdeling op de splitsingspunten van de Rijn voor stuurdoel 2: de pijn concentreren op één Rijntak en criterium 1: verschillende meetstations per riviertak (maximale afwijking). De reden dat alleen criterium 1 wordt gepresenteerd in de bijlage is dat dit criterium voor elk stuurdoel en vrijwel alle verstoringen het beste resultaat oplevert (de stuurdoelen worden hiermee het best benaderd).

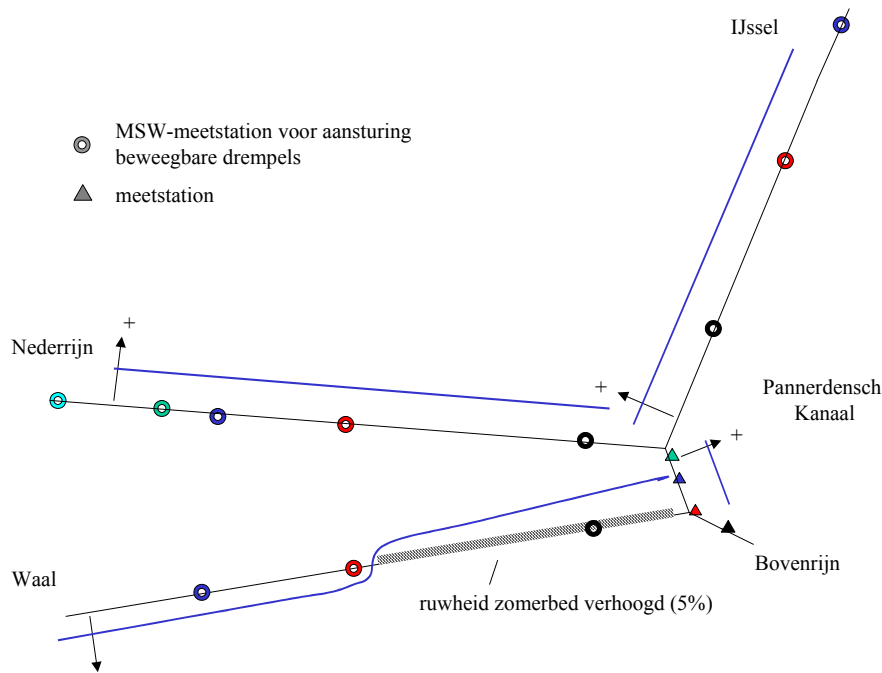
En tenslotte de piekenanalyse waarbij onderscheid is gemaakt tussen de 2 stuurdoelen en de 3 criteria.

Modelleren

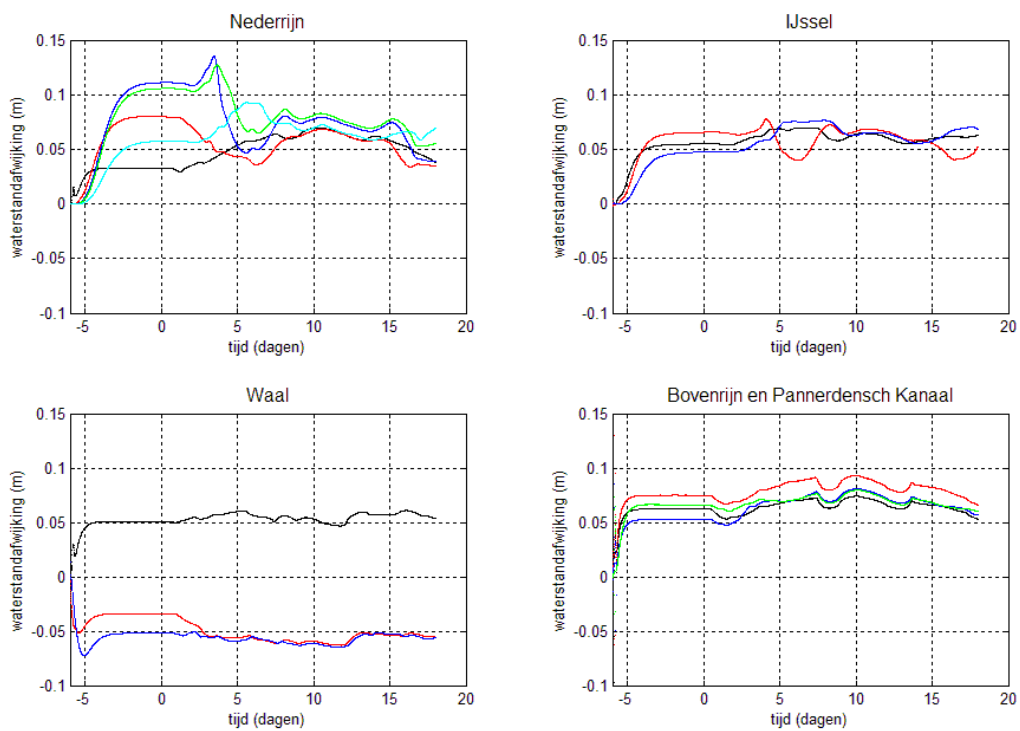
De meeste simulaties zijn stabiel verlopen op een enkele na:

- In de casestudie waarin de ruwheid van het zomerbed is verhoogd over de tweede 47 km van de Waal treedt aan het begin van de berekening een instabiliteit op (zie figuur A.8). Aan het begin van de berekening wordt de waterstandafwijking op de Rijntakken vergroot door bijsturen van de afvoerverdeling. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat aan het begin van de simulatieperiode de regelaar nog onvoldoende is ingespeeld. De integrerende term in de vergelijking van de PI-regelaar (3.1) heeft namelijk tijd nodig om van nul op te bouwen. Na verloop van tijd worden de waterstandafwijkingen weer kleiner.
- In de casestudie waarin morfodynamiek wordt gesimuleerd treedt een instabiliteit op in het model: de waterstand wordt instabiel op dag 1. Bij het optreden van de instabiliteit stuurt de regelaar de afvoerverdeling bij op waterstandafwijkingen als gevolg van de verstoring en als gevolg van instabiliteit in de berekening. De verstoring duurt echter maar kort en treedt ruim voor het passeren van de afvoerpiek op waardoor de berekening nog wel bruikbaar is om het effect van bijsturen van de afvoerverdeling vast te stellen op de piekwaterstanden op de riviertakken (zie figuur A.18).

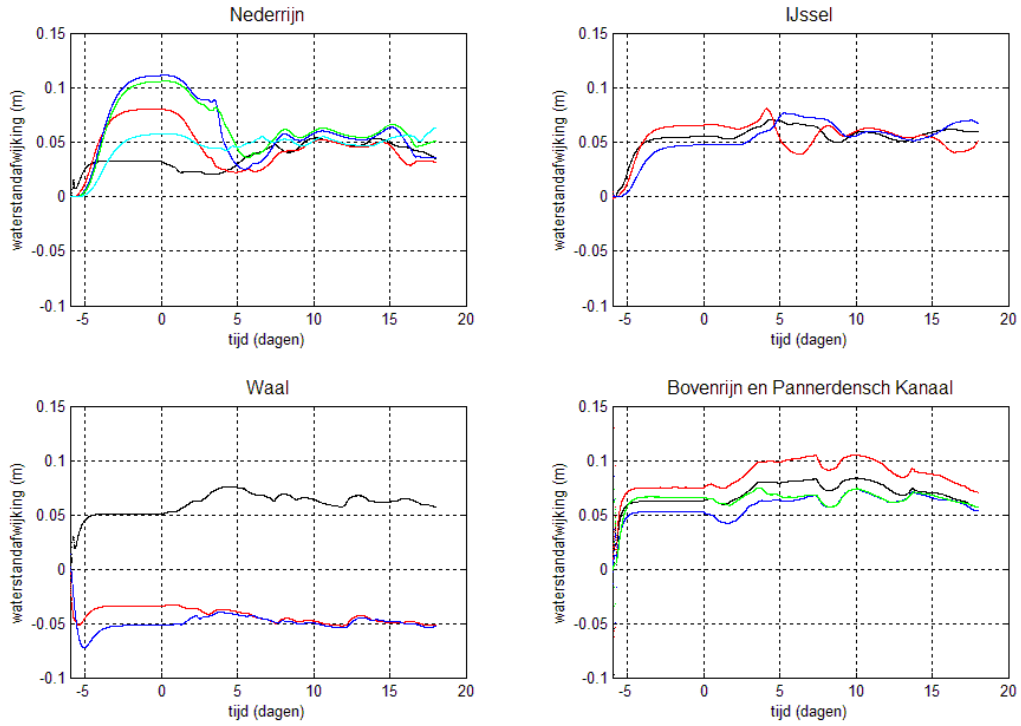
Ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de eerste 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop



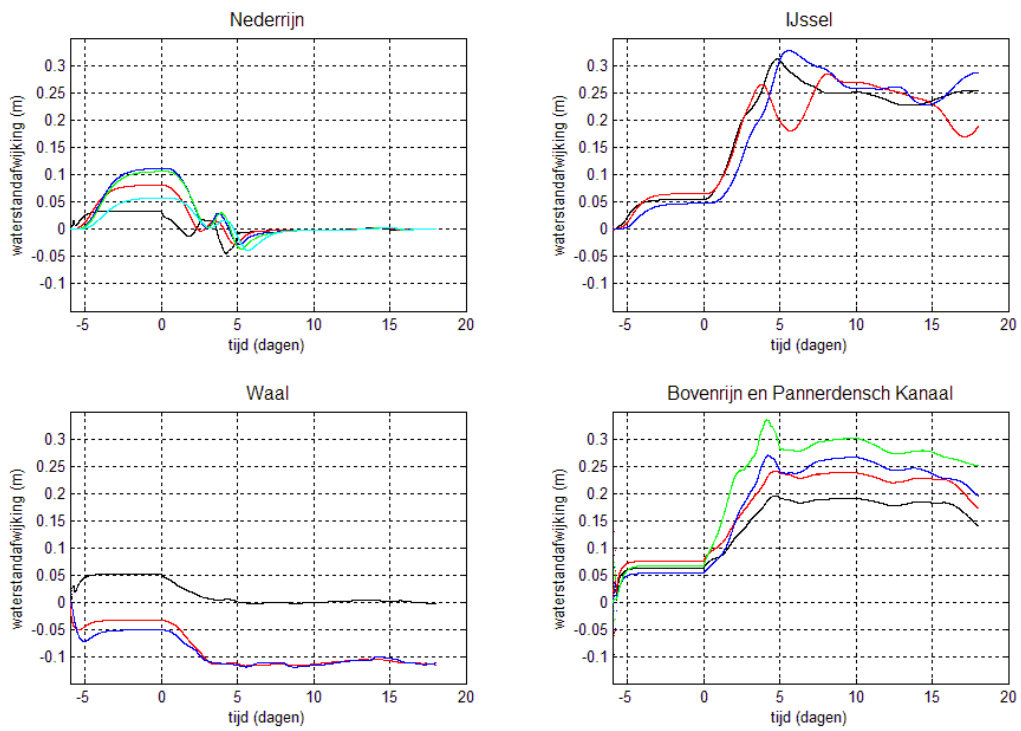
Figuur D.1: waterstandafwijking op Rijntakken bij hogere ruwheid op eerste deel Waal



Figuur D.2: waterstandafwijking op MSW-meetstations bij hogere hydraulische ruwheid op eerste deel Waal

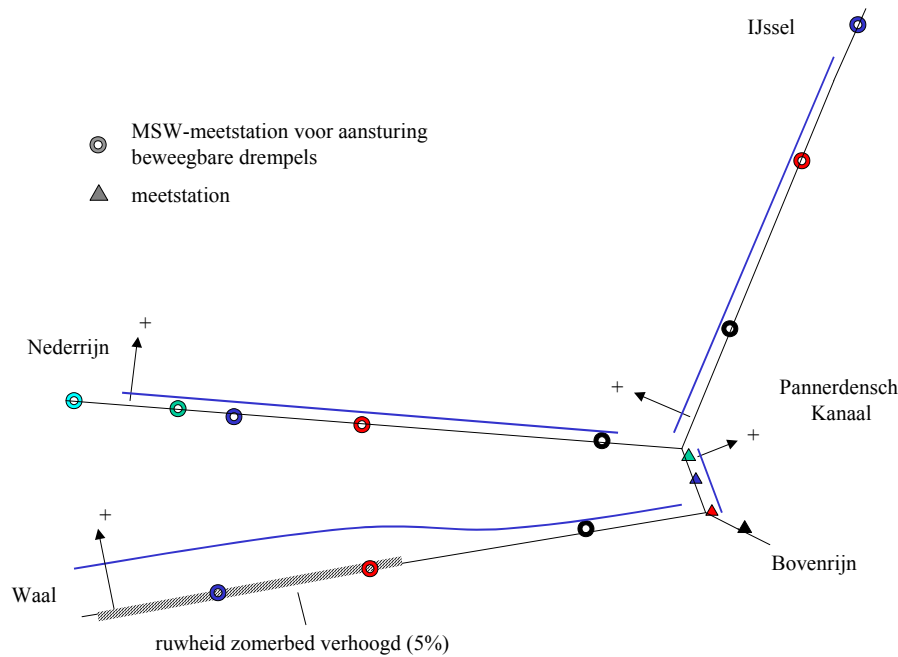


Figuur D.3: met bijsturen (stuurdoel 1 criterium 1) hydraulische ruwheid verhoogd eerste deel Waal

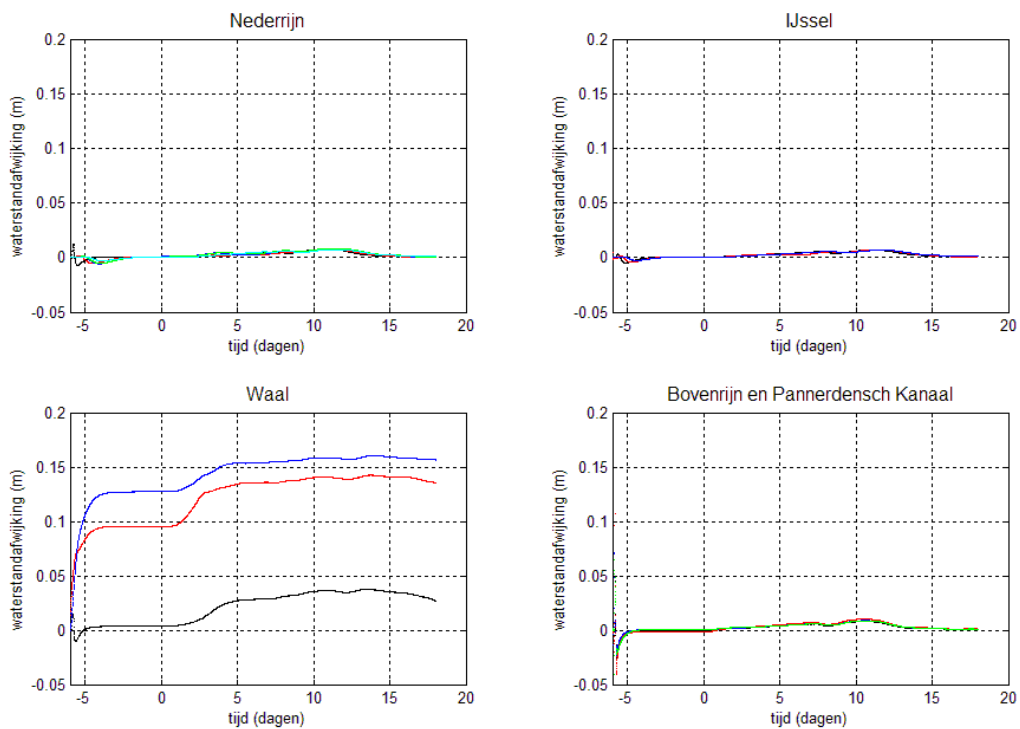


Figuur D.4: met bijsturen (stuurdoel 2 criterium 1) hydraulische ruwheid verhoogd eerste deel Waal

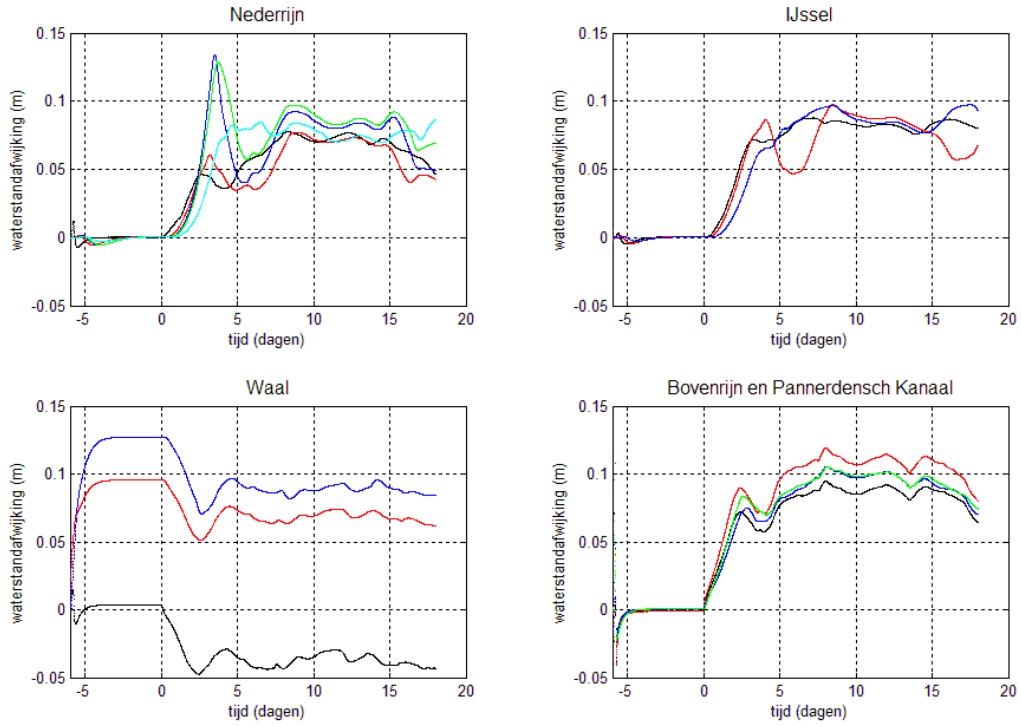
Ruwheid van het zomerbed verhoogd met 5% over de tweede 47 km van de Waal benedenstrooms van de Pannerdensch Kop



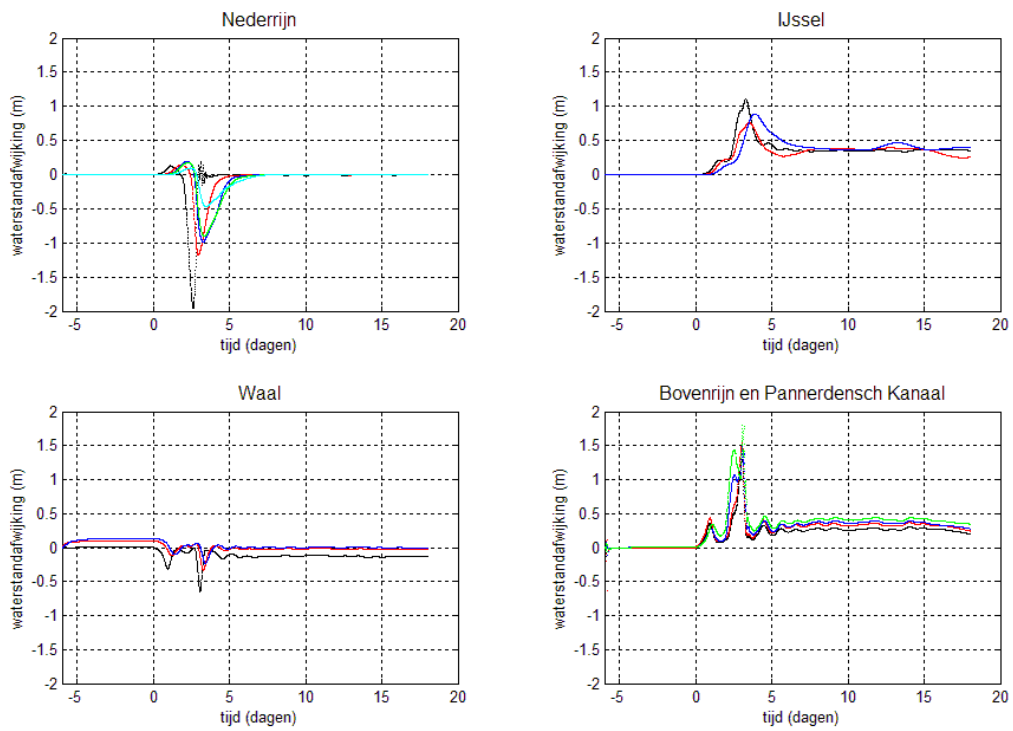
Figuur D.5: waterstandafwijking op Rijntakken bij hogere ruwheid tweede deel Waal



Figuur D.6: waterstandafwijking op MSW-meetstations bij hogere ruwheid tweede deel Waal

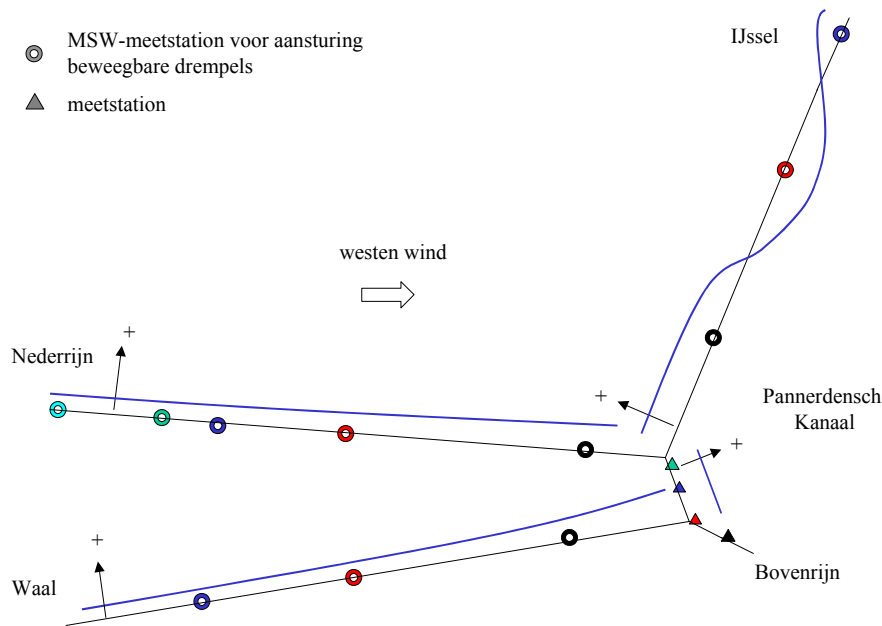


Figuur D.7: hydraulische ruwheid verhoogd op tweede deel Waal. (stuurdoel 1 criterium 1)

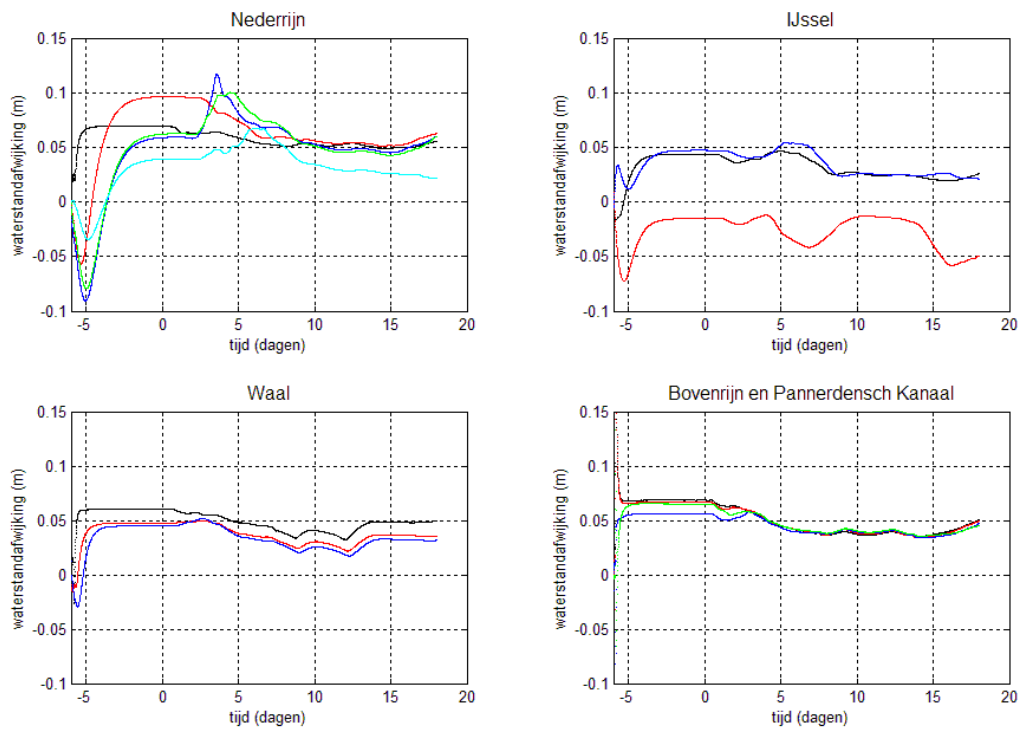


Figuur D.8: hydraulische ruwheid verhoogd op eerste deel Waal (stuurdoel 2 criterium 1)

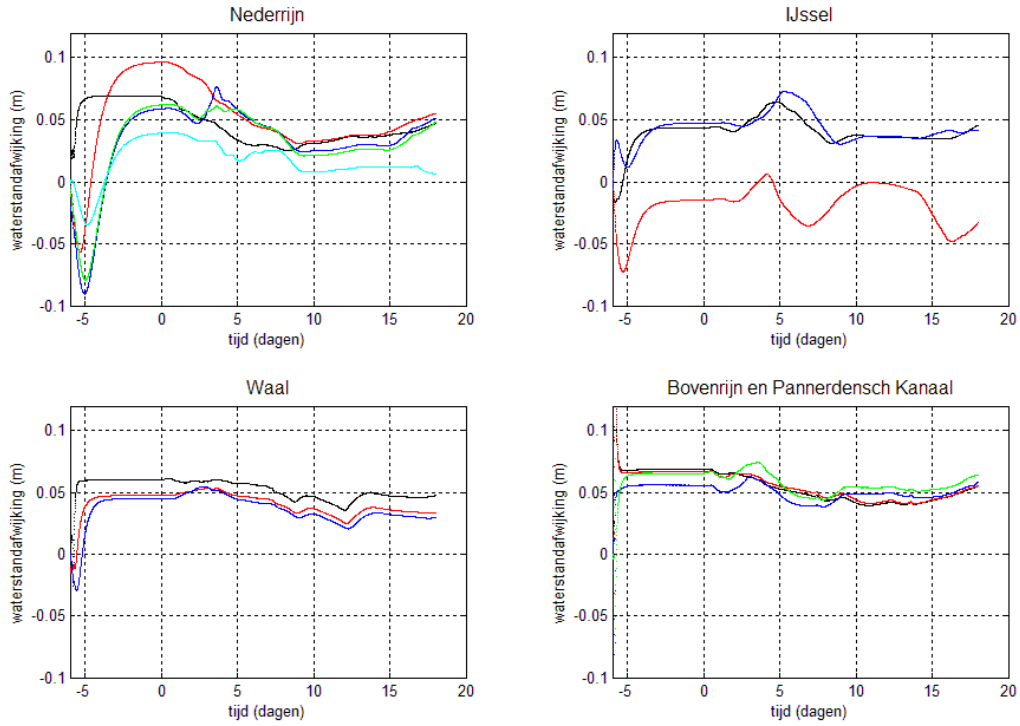
Wind neemt 11 dagen voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen



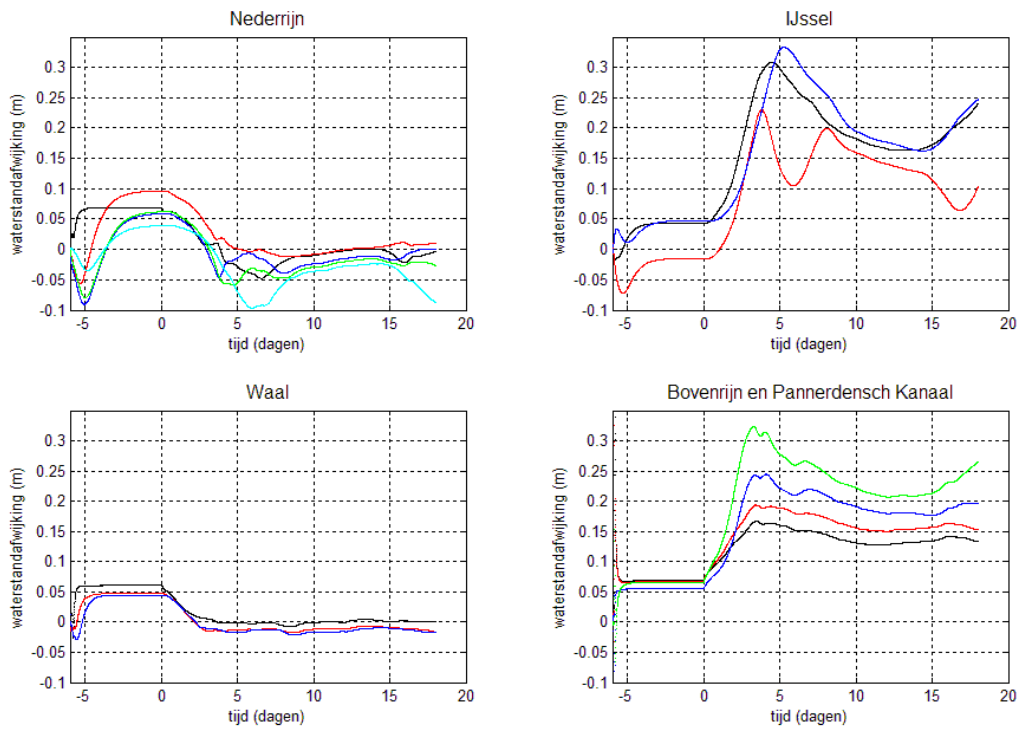
Figuur D.9: waterstandafwijking op Rijntakken bij opstekende wind 11 dagen voor afvoerpiek Lobith



Figuur D.10: waterstandafwijking op MSW-meetstations door opstekende wind 11 dagen voor afvoerpiek Lobith

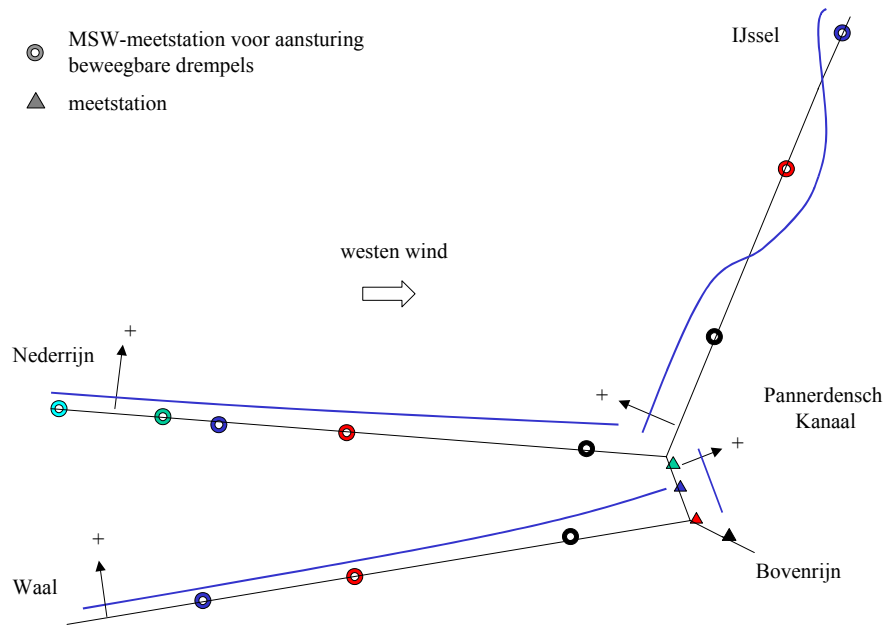


Figuur D.11: met bijsturen (stuurdoel 1 criterium 1) opstekende wind 11 dagen voor afvoerpiek bij Lobith

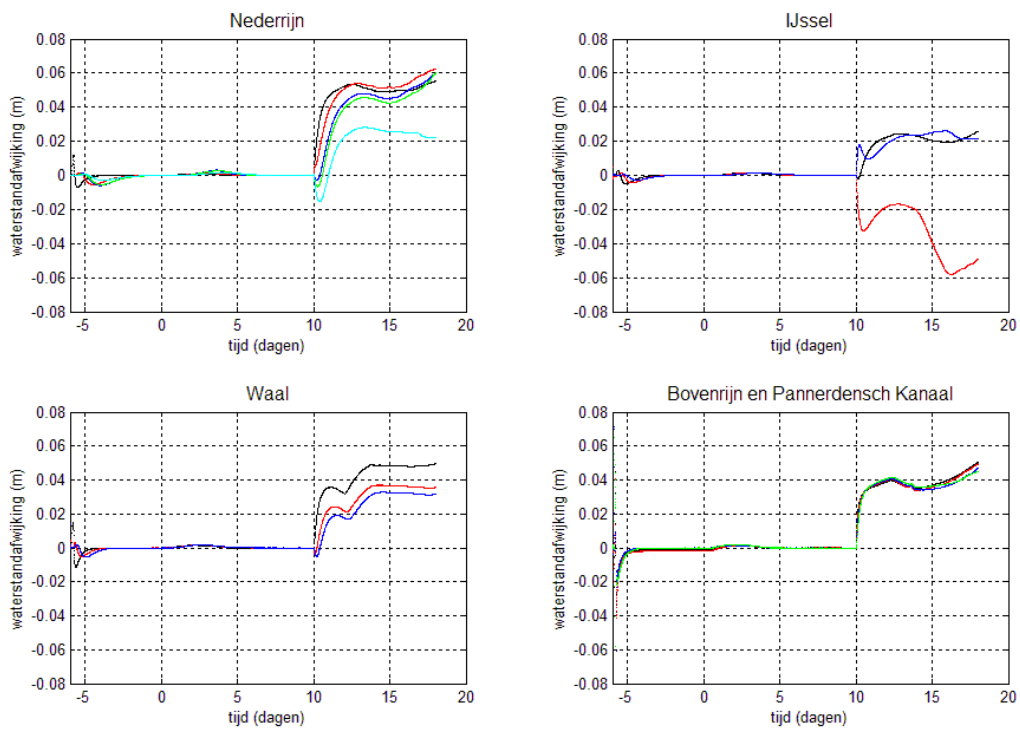


Figuur D.12: met bijsturen (stuurdoel 2 criterium 1) opstekende wind 11 dagen voor afvoerpiek bij Lobith

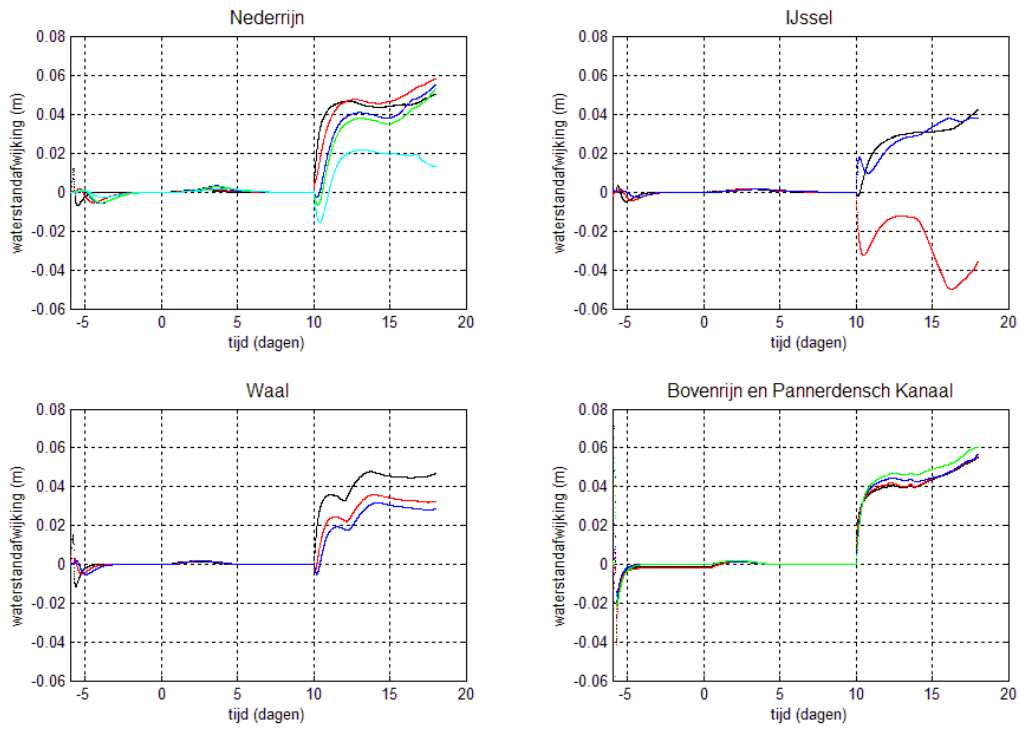
Wind neemt 1 dag voor het passeren van de afvoerpiek bij Lobith instantaan toe tot 12 m/s uit het westen



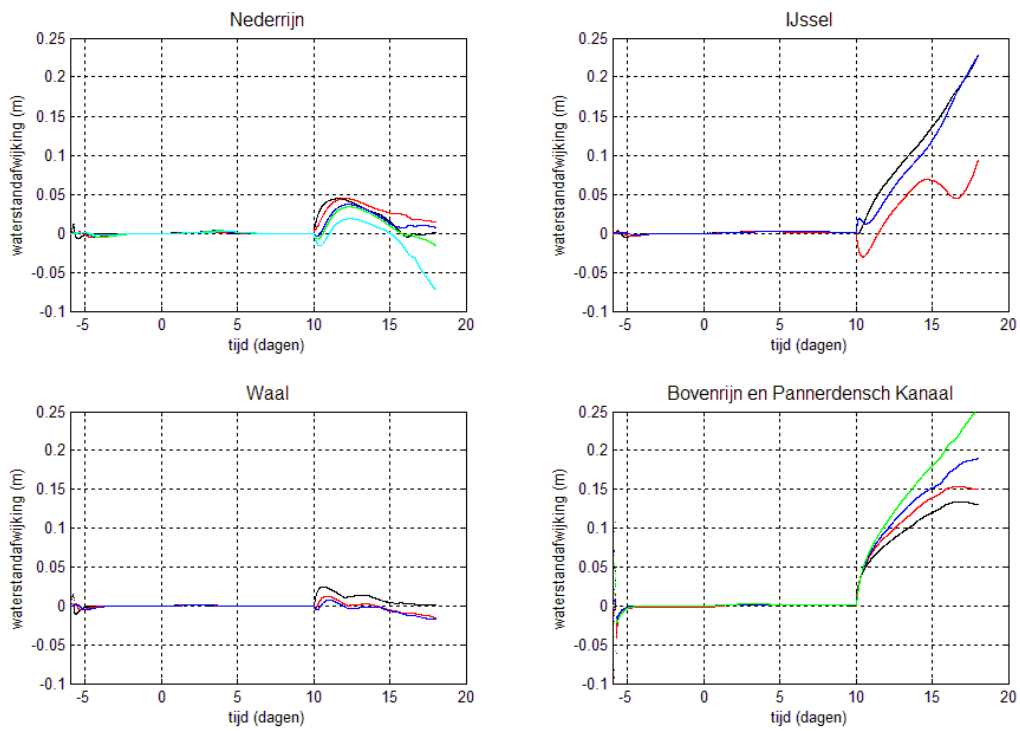
Figuur D.13: waterstandafwijking op Rijntakken bij opstekende wind 1 dag voor afvoerpiek Lobith



Figuur D.14: waterstandafwijking op MSW-meetstations bij opstekende wind 1 dag voor afvoerpiek Lobith

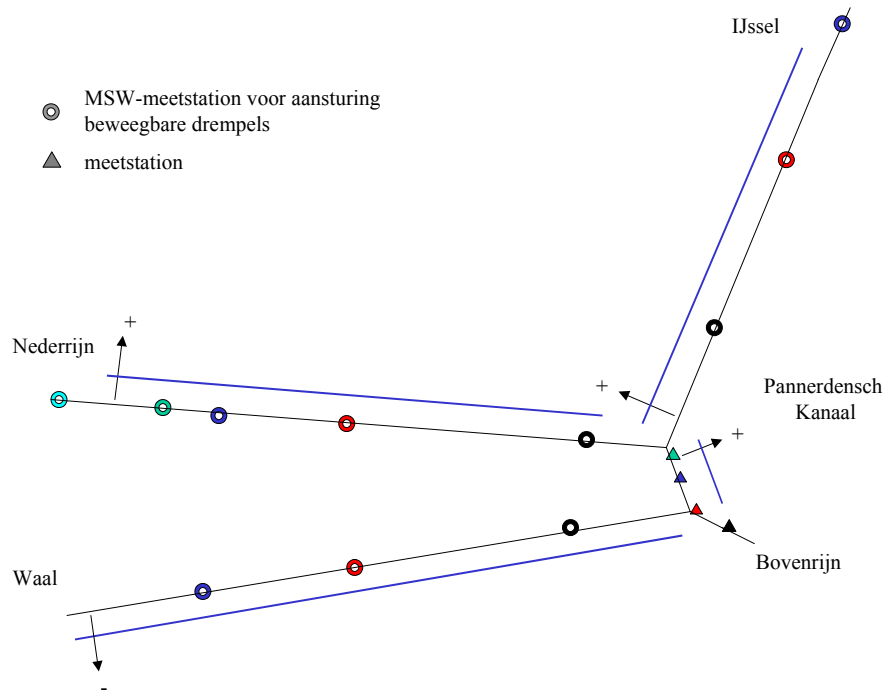


Figuur D.15: met bijsturen (stuurdoel 1 criterium 1) opstekende wind 1 dag voor afvoerpiek Lobith

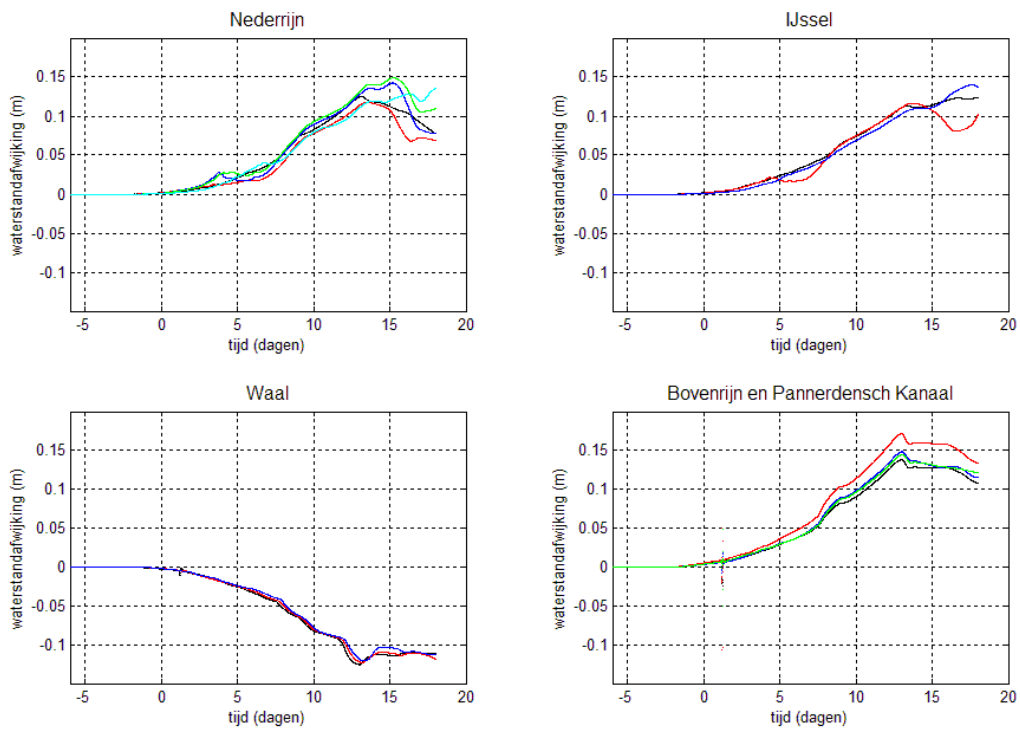


Figuur D.16: met bijsturen (stuurdoel 2 criterium 1) opstekende wind 1 dag voor afvoerpiek bij Lobith

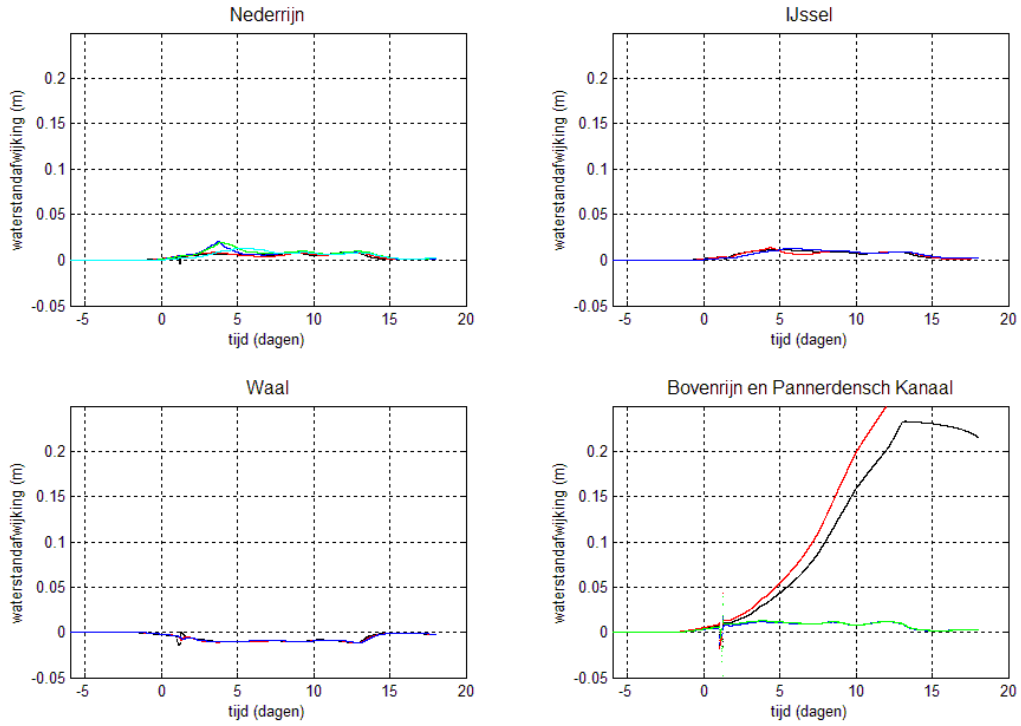
Morfodynamiek op de Waal geschematiseerd als een beweegbare drempel op 200 m van de Pannerdensch Kop



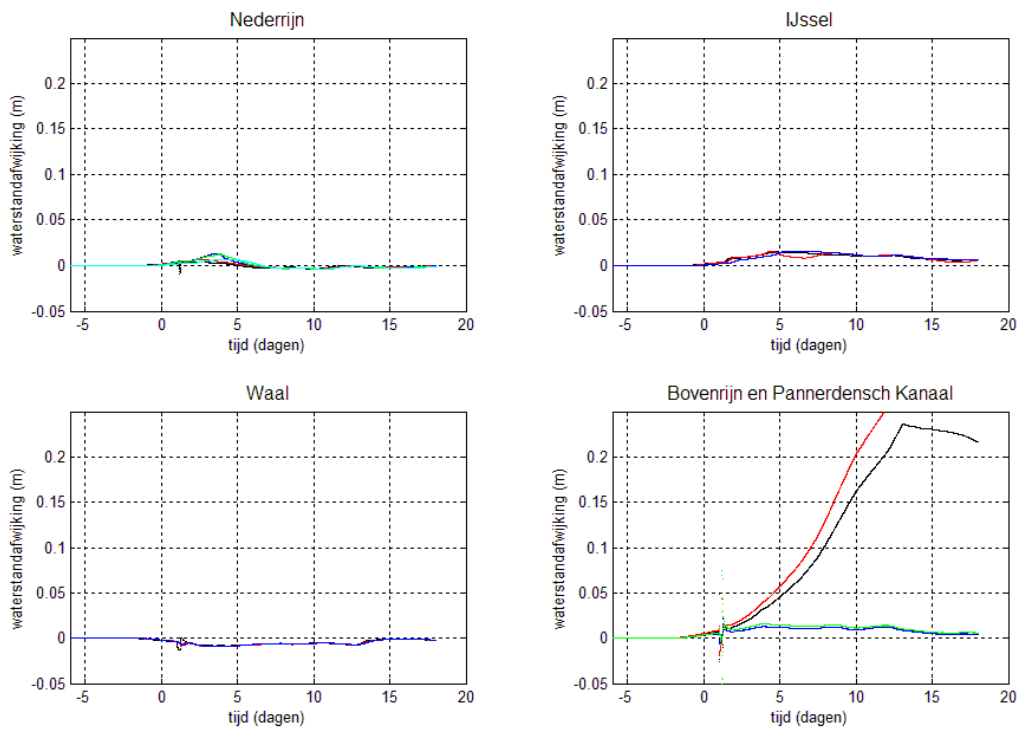
Figuur D.17: waterstandafwijking op Rijntakken bij morfologische veranderingen op splitsingspunt Waal



Figuur D.18: waterstandafwijking op MSW-meetstations bij morfologische veranderingen op splitsingspunt Waal



Figuur D.19: met bijsturen (stuurdoel 1 criterium 1) morfologische veranderingen op splitsingspunt Waal



Figuur D.20: met bijsturen (stuurdoel 2 criterium 1) morfologische veranderingen op splitsingspunt Waal

