



Realtime-control (sturing) kan afvalwatersystemen beter doen functioneren. Bijvoorbeeld met minder overstortingsvolume tot gevolg. Voorafgaand aan de investering is beoordeling van het te verwachten sturingsrendement zinvol. Job van de Werf ontwikkelde een verbeterde beoordelingsmethode voor analyse van het sturingsrendement. Hij onderzocht met casestudies in Eindhoven en Rotterdam het nut van verschillende sturingsstrategieën. Met name de invloeden van onzekerheden kunnen een groot effect hebben in het uiteindelijke rendement. Deze samenvatting geeft zowel de resultaten van dit onderzoek als aanbevelingen voor nuttige toepassing van sturing in stedelijk afvalwatersystemen.



Samenvatting promotieonderzoek Job van der Werf
Onzekerheden en de effecten op het functioneren van slimme sturing

Samenvatting promotieonderzoek Job van der Werf

Onzekerheden en
de effecten op het
functioneren van
slimme sturing.

Voorwoord

Het stedelijk afvalwatersysteem staat voor talrijke uitdagen. Emissiereductie, klimaatadaptatie en veranderend gebruik van de stedelijke omgeving vragen komende decennia mogelijk om flinke investeringen voor aanpassing. Naast fysieke maatregelen kan ook sturing, het op basis van informatie over het functioneren anders instellen van pompen of schuiven, bijdragen aan verdere optimalisatie van het afvalwatersysteem. Het voordeel van sturing is dat het geen grote investeringen in nieuwe infrastructuur vraagt. Mogelijk nadeel is dat beoordeling van een sturingsontwerp nog niet eenduidig is vastgelegd in de literatuur.

Job van der Werf onderzocht de onzekerheden in sturing van afvalwatersystemen en de gevolgen van deze onzekerheden op het rendement van verschillende vormen van sturing. Onzekerheden komen voort uit gebrekkige informatie over zowel de belasting op het afvalwatersysteem als over de actuele capaciteiten van het afvalwatersysteem. Job bedacht daarbij een eenduidige methodiek voor beoordeling van een sturingsstrategie.

Deze publicatie beschrijft de voor de praktijk van stedelijk waterbeheer belangrijkste resultaten. Details over de wetenschappelijke literatuur en de gebruikte methodes vindt u in het (Engelstalige) proefschrift via <http://repository.tudelft.nl/> en de titel: 'The effect of uncertainties on the performance of real-time control of urban drainage systems'.

Job heeft dit onderzoek gedaan binnen het door de sector gefinancierde Kennisprogramma Urban Drainage. Dit Kennisprogramma aan de TU-Delft zorgt voor nieuwe kennis en aanwas van ingenieurs en gepromoveerden in het vakgebied stedelijk waterbeheer. Beiden zijn nodig om het hoofd te bieden aan de uitdagingen waarvoor de sector staat. Denk hierbij aan: klimaatverandering, doelmatigheid, hergebruik, verouderende infrastructuur, verantwoording en transparantie, en opleiding van kwalitatief hoogwaardig personeel. De watersector zorgde voor de financiering en het Kennisprogramma Urban Drainage zorgde voor de wetenschappelijke begeleiding.

Veel leesplezier en inspiratie.

Hilde Niezen, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA
December 2023

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Uitdagingen	8
1.3	Doel van het onderzoek	8
1.4	Leeswijzer	9
2	'Slim sturen?'	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Onderzoeksmethode	10
2.3	Resultaten literatuurgebaseerd onderzoek naar sturingspotentie	12
2.4	Conclusie en praktische implicatie	15
3	Onzekerheid in regenvoorspelling	16
3.1	Inleiding en onderzoeksdoel	16
3.2	Onderzoeksopzet	16
3.3	Deelonderzoeksresultaten	17
3.4	Conclusies en aanbevelingen	20
4	Model- en systeemonzekerheid	21
4.1	Inleiding en onderzoeksdoel	21
4.2	Onderzoeksopzet	21
4.3	Onderzoeksresultaten	21
4.4	Conclusies	22
5	Stedelijke veranderingen	23
5.1	Inleiding en onderzoeksdoel	23
5.2	Onderzoeksopzet	23
5.3	Onderzoeksresultaten	24
5.4	Conclusies en aanbevelingen	26
6	Conclusies en praktische aanbevelingen	27
	Literatuurlijst	29
	Colofon	30

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het primaire doel van riolering is inzameling en afvoer van afvalwater uit een stedelijk gebied. Het afgevoerde afvalwater wordt in een rioolwaterzuiveringsinrichting (rwzi) gezuiverd en vervolgens in het oppervlaktewater geloosd. Het secundaire doel is bescherming van het oppervlaktewater waarin het stedelijk afvalwatersysteem het afvalwater uiteindelijk via verschillende uitlaten loost. In het oppervlaktewater treffen we steeds vaker nieuwe, verontreinigende en mens en ecologie bedreigende stoffen aan. Zo compleet mogelijke zuivering van afvalwater is daarom steeds belangrijker én uitdagender.

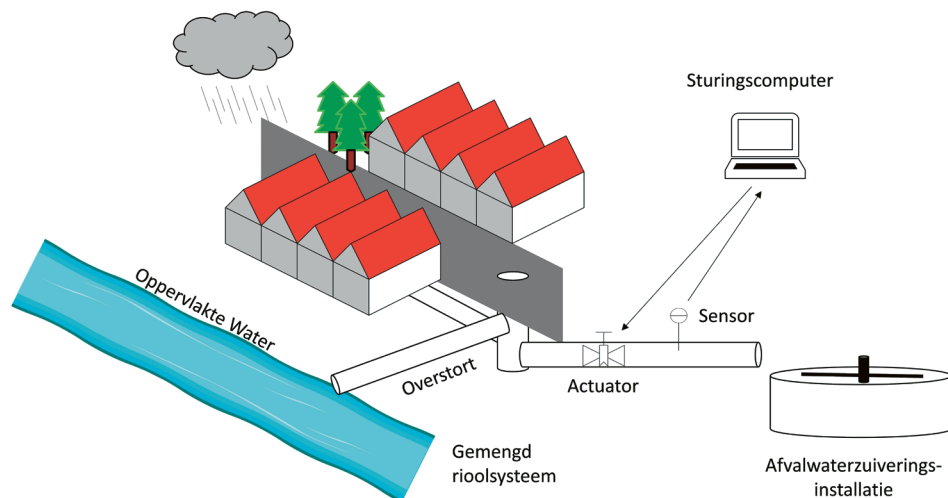
Naast uitbreiding van de zuiveringscapaciteit is terugdringing van directe emissies uit het rioolstelsel een belangrijke taak van waterschappen en gemeenten. Zowel overstortingen van gemengde rioolstelsels (die het gros van de rioolstelsels in Nederland vormen) als emissies via regenwateruitlaten kunnen tijdelijk leiden tot lokale waterkwaliteitsproblemen.

Er zijn verschillende manieren om overstortingen van gemengde rioolstelsels in frequentie en volume te reduceren:

- Allereerst het ombouwen van het rioolstelsel in gescheiden systemen die het afval- en het regenwater apart afvoeren. Dit is een veelgebruikte oplossing. Het aandeel gemengde riolering is daarom in de afgelopen decennia teruggelopen naar ongeveer tweederde (terwijl de aansluitingsgraad toenam).
- Ook investeren gemeenten veel in groenblauwe oplossingen (wadi's en andere infiltratietechnieken) of in grijze oplossingen (rioolstelsel uitbreiden of bergbezinkbassins achter de overstorten aanleggen).

Dit zijn echter kostbare oplossingen, die bovendien soms lastig zijn te implementeren in dichtbevolkte stedelijke gebieden. Met name in de historische binnensteden zijn deze oplossingen vaak praktisch onmogelijk.

In de voorlopige tekst (op het moment van schrijven van deze publicatie) van de herziene EU-richtlijn 'Stedelijk Afvalwater' is daarom ook een andere optie aangegeven. De mogelijkheid om de bestaande stedelijk waterinfrastructuur 'optimaal' te benutten moet volgens de nieuwe tekst expliciet als oplossing worden overwogen. Optimale benutting is te realiseren met 'slimme sturing' (real-time control, RTC): het dynamisch regelen van rioolpompen, verstelbare schuiven en kleppen (regelaars of actuators). Een ruw schema hiervan is te zien in figuur 1. Het voordeel van RTC ten opzichte van andere manieren om overstortingsvolumes te reduceren, is dat het meestal niet nodig is om een grote infrastructuur aan te leggen, of dat de dimensies van de toe te voegen of aan te passen infrastructuur kleiner kunnen zijn (denk bijvoorbeeld aan bergbezinkbassins).

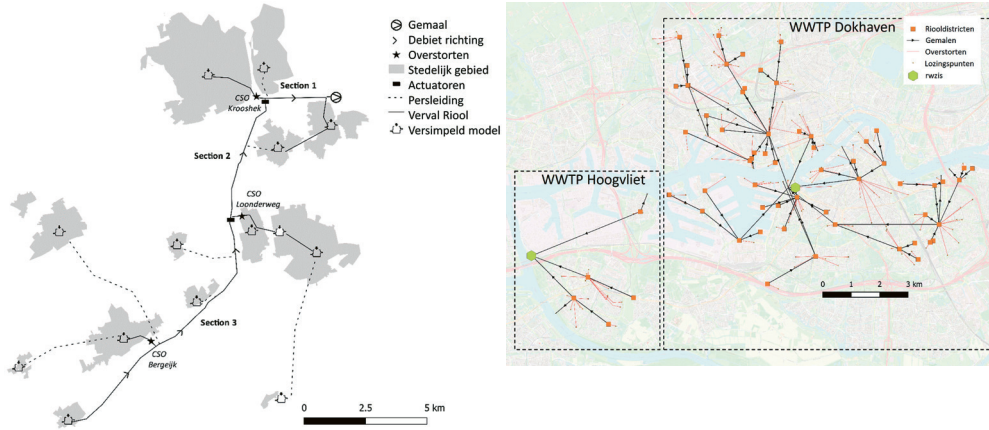


Figuur 1. Overzicht van het functioneren van RTC. Een sensor in het afvalwatersysteem stuurt informatie naar een computer, die vervolgens in real-time bepaalt wat de instellingen van regelaars of actuators (zoals schuiven of pompen) in het systeem moeten zijn.

RTC als techniek valt binnen de overkoepelende term ‘smart water’, een trend binnen de watersector om sensoren en modellen te integreren in de uitvoering van taken. Vanwege de snelle ontwikkelingen in de digitale wereld is het belangrijk om een stap terug te doen en de mogelijke risico’s van nieuwe technieken en automatisering te inventariseren en te onderzoeken. Daarnaast is het belangrijk om in kaart te brengen in hoeverre de nieuwe, geavanceerdere digitale tools de overstortingsvolumes daadwerkelijk reduceren. Hiervoor zijn echte casussen nodig.

In dit promotieonderzoek zijn de afvalwatersystemen van rwzi Hoogvliet en rwzi Dokhaven (beide in de gemeente Rotterdam) en een deel van het afvalwatersysteem van rwzi Eindhoven, bovenstrooms van gemaal Aalst. Het afvalwater stroomt van zuid naar noord. Twee grote kleppen reguleren het debiet door de transportleiding. Rechts een overzicht van de gepompte districten afvoerend op rwzi Dokhaven respectievelijk rwzi Hoogvliet in Rotterdam. Het is mogelijk om de pompen te reguleren voor een uitgebreide sturingsstrategie.

Figuur 2.
 Overzicht van de in dit promotieonderzoek gebruikte stedelijk afvalwatersystemen. Links het systeem van Eindhoven, bovenstrooms van gemaal Aalst. Het afvalwater stroomt van zuid naar noord. Twee grote kleppen reguleren het debiet door de transportleiding. Rechts een overzicht van de gepompte districten afvoerend op rwzi Dokhaven respectievelijk rwzi Hoogvliet in Rotterdam. Het is mogelijk om de pompen te reguleren voor een uitgebreide sturingsstrategie.



1.2 Uitdagingen

Het kunnen afwegen van de voor- en nadelen van de verschillende sturingsmogelijkheden vormt een van de grote uitdagingen binnen de RTC-literatuur. Zo is het niet duidelijk wanneer een sturing gebaseerd op overstortingsvolume beter is of wanneer er juist meer potentie is voor impactgebaseerd sturen. Of, zijn geavanceerdere sturingsvormen significant beter voor bepaalde afvalwatersystemen? Het is dan ook een grote uitdaging in de wetenschappelijke literatuur en de praktijk om de mogelijk toegevoegde waarde van complexere algoritmes in kaart te brengen en om inzicht in te krijgen wanneer dit soort algoritmes het grootste voordeel opleveren.

In een eerder promotieonderzoek heeft Petra van Daal-Rombouts (zie RIONED /STOWA publicatie 2017-32) een methode ontwikkeld om het functioneren van RTC stelselmatig in kaart te brengen. Onzekerheid in het functioneren van RTC-strategieën kwam daaruit naar voren als een kenmerk dat een rol speelt bij het analyseren van RTC. Als er grote onzekerheden zijn in de regenvoorspellingen, in het onderliggende model of in de real-time data, kan dat leiden tot automatiseringsfouten. Deze fouten kunnen vervolgens een groter overstortingsvolume tot gevolg hebben. De vraag is dan ook hoe RTC-strategieën in de praktijk functioneren, gezien alles wat onzeker is in de fysieke werkelijkheid.

1.3 Doel van het onderzoek

De centrale onderzoeksvraag in dit promotieonderzoek is:

In hoeverre beïnvloeden onzekerheden het praktisch functioneren van verschillende vormen van RTC?

Deze vraag is onderverdeeld in vier subvragen:

- Is vooraf de theoretische potentie van RTC voor overstortingsvolumereductie in te schatten? Hierbij is de vraag hoeveel verschillende soorten sturing kunnen bijdragen aan de vermindering van overstortingsvolumes. Zijn geavanceerdere algoritmes ook daadwerkelijk zoveel beter als de theorie suggereert?

- Brengt gebruik van onzekere weersvoorspellingen risico's met zich mee? Als we weten wat voor regen eraan komt, dan kunnen we hierop anticiperen. Als de voorspellingen echter niet nauwkeurig genoeg zijn, kan het ook zo zijn dat we op basis hiervan verkeerde beslissingen nemen.
- Brengen andere vormen van onzekerheid andere risico's met zich mee? Hierbij is in het onderzoek specifiek gekeken naar modelonzekerheden en onzekerheden in de pompprestatie. Welke van deze onzekerheden (ook in vergelijking met de onzekerheid van de regenvoorspelling) heeft het grootste effect op het functioneren van de sturing?
- Hoe gevoelig zijn sturingsmethoden voor een veranderende stad? Nieuwbouw en een groter accent op infiltratie van regenwater zorgen ervoor dat de afvoerpatronen van steden veranderen. In hoeverre heeft dit invloed op het functioneren van geautomatiseerde sturing?

Voor de beantwoording van deze vragen hebben we uitgebreide modelstudies gedaan met gebruikmaking van hydrodynamische modellen van (een deel van) de afvalwatersystemen van Eindhoven en van Rotterdam. Daarnaast hebben we een meta-analyse van RTC-functioneren uitgevoerd, gebaseerd op gerapporteerde onderzoeken in de wetenschappelijke literatuur.

Deze samenvatting presenteert de voor de praktijk meest relevante resultaten uit het promotieonderzoek. Verdere informatie (in het Engels) is te vinden in de *repository* van de Technische Universiteit Delft (<https://repository.tudelft.nl>, onder de titel *The Effect of Uncertainties on the Performance of Real-Time Control of Urban Drainage Systems*).

1.4 Leeswijzer

Naast dit inleidende hoofdstuk bevat deze publicatie de volgende hoofdstukken. Hoofdstuk 2 gaat in op de verschillende vormen van RTC en de verschillende potenties voor reductie van het overstortingsvolume. In hoofdstuk 3 komen de effecten van onzekere neerslagvoorspellingen op het functioneren van verschillende soorten RTC aan bod. Hoofdstuk 4 gaat in op de mogelijke risico's van model- en systeemonzekerheden. Hoofdstuk 5 gaat in op de houdbaarheid van sturingsregels en geavanceerde sturingsmethodes. Hoofdstuk 6 bevat een overzicht van de aanbevelingen en de conclusies. Elk hoofdstuk eindigt met een korte conclusie en praktische aanbevelingen naar aanleiding van de resultaten.

2 'Slim sturen?'

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de werking en het nut van verschillende sturingsvormen voor RTC. Over het algemeen zijn er twee verschillende soorten sturing:

- (1) heuristische sturing (vaak in de vorm van sturingsregels); en
- (2) real-time-optimalisatie.

'Sturing' is een veelomvattende term. Hier vallen simpele aan-uit-regelingen voor pompen (tijdens droogweerafvoer) onder, maar ook complexere centrale sturingsstrategieën, waarbij pompen en andere regelaars ingezet kunnen worden om benedenstroomse gebieden te beschermen.

Real-time-optimalisatie is een techniek waarbij voor elke tijdstap (meestal vijf minuten, omdat dit ook de frequentie van regenvoorspellingen is) de beste instellingen voor alle regelaars of actuatoren in een afvalwatersysteem worden berekend met modellen. Dit noemen we model-voorspellend sturen (MVS). Paragraaf 2.2 gaat verder in op de details van deze sturingsvorm.

Wetenschappelijke literatuur geeft vaak aan dat real-time-optimalisatie (via MVS) in theorie meer overstortingsvolume reduceert dan heuristische sturing. Het idee is dat MVS dynamischer reageert op niet-voorzien situaties en heterogene belasting van het afvalwatersysteem dan statische sturingsregels. Voor MVS zijn echter wel meer investeringen nodig in IT-infrastructuur en in goede, snelle modellen. Er zijn nog maar weinig geïmplementeerde voorbeelden waarbij het praktisch functioneren van MVS systematisch is bewezen. Het is daarom belangrijk dat u, voordat u besluit om (gedeeltelijk) voor MVS te kiezen, een goed inzicht heeft in de mogelijke voordelen hiervan boven andere (simpelere) vormen van sturing.

2.2 Onderzoeksmethode

Voor beter inzicht in de potentie van RTC voor verschillende stedelijk afvalwatersystemen hebben we in het kader van dit promotieonderzoek twee onderzoeken uitgevoerd: een uitgebreid literatuuronderzoek en een modelstudie.

In het literatuurgebaseerde onderzoek naar de potentie van RTC hebben we enkele tientallen goed gedocumenteerde voorbeelden uit de (wetenschappelijke) literatuur naast elkaar gelegd om te kijken of we relaties konden vinden tussen de gerapporteerde potentie van RTC en systeemeigenschappen. Ook hebben we gekeken naar het type sturing dat toegepast werd, om te zien of er inderdaad een duidelijk verschil zit tussen de potentie van verschillende vormen van sturing.

In de modelstudie hebben we voor dit onderzoek vier sturingsmethodes ontwikkeld en geïmplementeerd in een modelomgeving van twee praktijksituaties in Eindhoven en Rotterdam. Zo konden we het nut van de verschillende sturingsvormen beoordelen.

De vier voor dit onderzoek ontwikkelde sturingsmethodes zijn:

- (1) simpele sturingsregels (één sturingsregel per regelaar of actuator);
- (2) complexe sturingsregels (verschillende sturingsregels per actuator);
- (3) een hybride sturing-en-optimalisatie-procedure; en
- (4) real-time-optimalisatie.

Op de laatste drie sturingsmethodes ga ik hierna verder in. Deze vormen van sturing hebben de basis gevormd voor een groot deel van het promotieonderzoek en zullen ook in meer detail toegelicht worden in de komende hoofdstukken.

Complexe sturingsregels

We hebben twee verschillende soorten ‘complexere sturingsregels’ ontworpen:

Voor de casus-Eindhoven hebben we een strategie gemaakt waarbij de instellingen voor de actuatoren afhankelijk zijn van de boven- en de benedenstroomse fase. Vijf fases waren gedefinieerd: (1) droogweerafvoer, (2) vullend, (3) stabiel, (4) stabiel vol en (5) legend. De actuatorinstellingen (het door te laten debiet) bij elke combinatie van de fases is vervolgens geoptimaliseerd. De actuatoren bevinden zich in de transportleiding van Riool-Zuid, bovenstrooms van een groot gemeal waar Veldhoven en Valkenswaard tot aan Luijksgestel in lozen. Zie Figuur 2 voor een overzicht van de casus. Het debiet kan op twee locaties worden gestuurd. De hoofdleiding kan worden gesloten en het afvalwater kan via een bypass met bewegende schuiven worden geknepen.

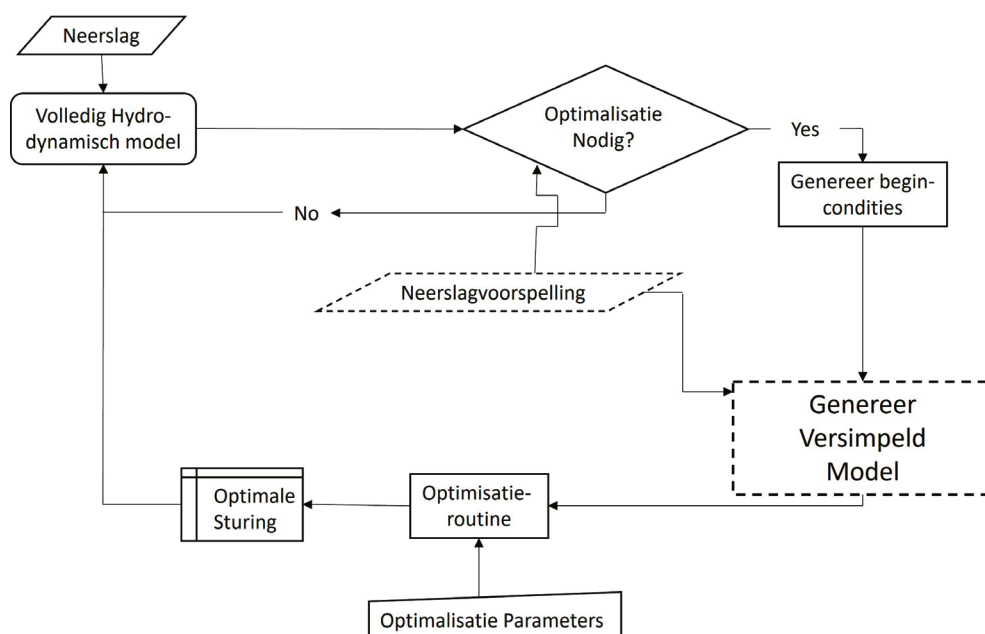
Voor de casus van Rotterdam hebben we de huidige sturingsregels uitgebreid door gebruik te maken van de regenvoorspellingen (voorspellend sturen). De voorspelde regen werd gecombineerd met de vullingsgraad van de verschillende districten om de pompen aan te sturen.

Hybride sturing-en-optimalisatie-procedure

De hybride sturing-en-optimalisatie-procedure is een nieuwe vorm van sturing die alleen de actuatoren met de meeste regelmacht optimaliseert volgens het MVS-schema (zie figuur 2). Deze hybride sturingsvorm is ontwikkeld in voorliggend promotieonderzoek. De actuatoren met minder invloed op het functioneren volgen sturingsregels. Zo is het mogelijk om gefaseerd met meer geavanceerde vormen van sturing te experimenteren zonder de gehele sturing over te laten aan een modelgebaseerde sturingsvorm. Het functioneren van deze hybride vorm van sturing hebben we vervolgens vergeleken met het functioneren van sturingsregels en MVS om te kijken wat de potentie en het potentiële verlies ten opzichte van MVS is. Er zijn twee manieren om de actuatoren te selecteren: statisch (altijd dezelfde actuatoren) of dynamisch (actuators afhankelijk van de belasting van het systeem). De statische methode wordt hier ‘hybride (0)’ genoemd en de dynamische methode ‘hybride (1)’.

Real-time-optimalisatie

Voor beide casussen is ook een MVS opgezet. Figuur 3 toont deze vorm van real-time-optimalisatie. De in deze samenvatting beschouwde onzekerheden staan in de gestippelde vakken. In essentie zijn van real-timedata afgeleide, actuele vullingsgraden in het systeem het uitgangspunt voor een versimpeld model. De voorspelde regen wordt dan gebruikt om de beste sturing te berekenen. De beste sturing is afhankelijk van het doel van de sturing, bijvoorbeeld het reduceren van het totale overstortingsvolume of het reduceren van het overstortingsvolume op een specifieke overstortlocatie. Wanneer het model berekend heeft wat de beste instellingen van de regelaars of actuatoren zijn, worden deze naar de lokale sturingscomputer gestuurd om ze vervolgens daar te implementeren.



Figuur 3. Stroomschema van een MVS. Het volledige hydrodynamische model wordt gebruikt als een stand-in voor het fysieke afvalwatersysteem. Eerst wordt een check gedaan of optimalisatie nodig is (tijdens droogweerafvoer is geen optimalisatie nodig). Als dit wel het geval is, genereert de computer een versimpeld model gebaseerd op de neerslagvoorspellingen en de huidige belasting van het afvalwatersysteem. Dit model wordt gebruikt om de beste sturingsinstellingen te vinden. Deze worden vervolgens ingevoerd in het volledige hydrodynamische model.

Al deze sturingsmethodes moeten flexibel zijn. Er is gebruikgemaakt van de open-source-software EPA-SWMM, die vanuit de python-programmeertaal aangestuurd kan worden. Dit is gratis software vergelijkbaar met commerciële pakketten zoals InfoWorks CS, D-Hydro (voorheen SOBEK) of 3Di. Hiermee is het mogelijk om regels en voorspellingen dynamisch aan het model toe te voegen, en is er genoeg flexibiliteit om alle mogelijk sturingsvormen uit te proberen.

2.3 Resultaten literatuurgebaseerd onderzoek naar sturingspotentie

De PASST-tool (2008, Schütze et al) herleidt de potentie van RTC uit de afvalwatersysteemeigenschappen zoals:

- de grootte van het stedelijk gebied;
- het aantal actuatoren dat aangestuurd kan worden; en
- de gemiddelde helling van de rioolbuizen.

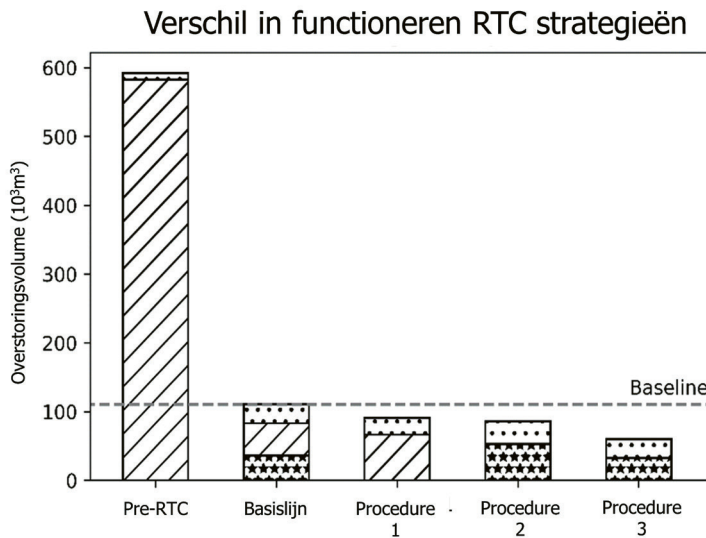
Deze tool geeft met een puntensysteem een indicatie van de potentie van RTC.

In de wetenschappelijke literatuur gedocumenteerde casussen hebben we onderzocht op een relatie tussen de RTC-potentie en de bovengenoemde systeemeigenschappen die Schütze et al als belangrijk hadden aangeduid. Daaruit bleken geen duidelijke verbanden. Wel bleek de relatie: hoe hoger het overstortingsvolume zonder RTC, hoe hoger de potentiële overstortingsvolumereductie. Hierbij gaat het om de totale volumereductie in kubieke meters, dus niet om procentuele verschillen of een verschil in millimeters overgestort volume per afvoerend oppervlak. Toepassing van de PASST-tool op deze locaties (als er genoeg informatie was) leverde geen duidelijk genoeg beeld op om te kunnen stellen dat de tool goed genoeg werkt. In de masterthesis van Sophie Brevoord (Brevoord, S.L., 2022) kwam dit ook naar voren. Ondanks dat de PASST-tool het afvalwatersysteem een hoge potentie tot verbetering toekende, haalde zelfs de meest complexe sturingsalgoritmes slechts enkele procenten winst. Het is blijkbaar (nog) niet mogelijk om enkel op basis van vaste systeemeigenschappen te weten hoeveel potentie RTC heeft binnen een afvalwatersysteem. Hiervoor is een (uitgebreide hydrodynamische) modelstudie nodig. De Kennisbank Stedelijk Water en een deskundig adviseur kunnen helpen bij het opzetten van zulke modelstudies.

Voorts werd duidelijk uit de literatuur dat er verschillende definities bestaan van 'functioneren van sturingen'. In veel studies wordt het functioneren van een RTC-strategie vergeleken met een 'zonder-RTC'-scenario. Dit kan een vertekend beeld geven van de potentie van RTC. Dit is duidelijk te zien in de casus van rwzi Eindhoven. Bij Eindhoven kon met een simpele aanpassing van de sturingsregels (zoals gedaan in 2014 als onderdeel van het KALLISTO-project) het overgrote deel van de potentie van RTC worden gerealiseerd (Simpelste Sturing in Figuur 4). Kleine aanvullende verbeteringen zouden gerealiseerd kunnen worden met complexere vormen van sturing, maar de grootste winst was al behaald met de simpelere vorm.

Daarnaast werd duidelijk dat sturing met name zin heeft wanneer er kleinere tot middelgrote buien vallen. Wanneer een afvalwatersysteem zo belast wordt dat alle berging al gebruikt is, kan sturing nog maar weinig toevoegen.

Het is belangrijk hierbij te benadrukken dat het in onderstaande vergelijking gaat om het *theoretisch* functioneren van de sturing, in een modelomgeving waarin alles werkt zoals het zou móéten werken. Hoe sturingen in de praktijk werken, is lastiger te bepalen.



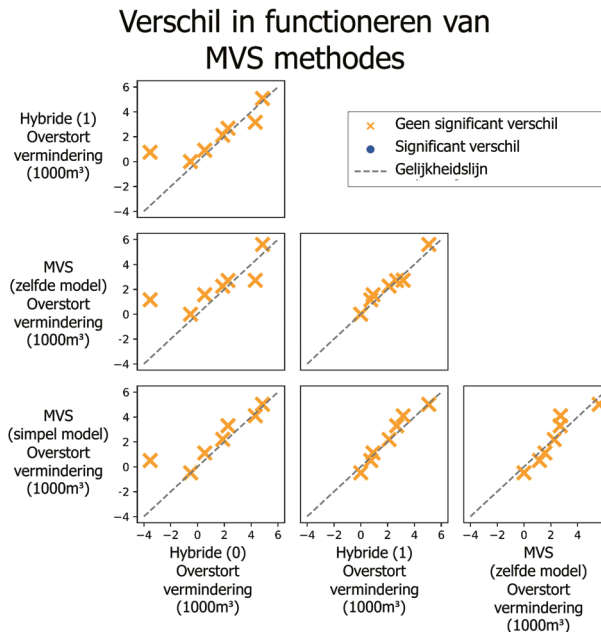
Figuur 4. Verschil in het theoretisch functioneren van sturing gebaseerd op steeds complexere regels. Deze figuur laat vooral duidelijk zien dat de 'pre-RTC' (geen sturing) geen goede maatstaf is om complexere sturing mee te vergelijken omdat het grootste verschil al met relatief simpele sturing kan worden bereikt.

Een simpele sturing zoals het instellen van enkele sturingsregels kan basaal lijken om te ontwerpen. Echter, een dergelijke sturing kan alleen worden opgezet als er een goed inzicht is in de dynamiek en het functioneren van het rioolstelsel. Hiervoor moet een uitgebreid meetnetwerk opgezet krijgen, en voor langere tijd (het liefst langer dan een jaar, en hoe langer hoe beter) gemeten worden. De meetresultaten moeten dan geïnterpreteerd worden om te zien of er potentie is voor sturing, en hoe zo'n sturing er dan uit moet zien. Het opzetten van zo'n meetnetwerk is vaak een complex proces. Hier is onlangs een e-book over verschenen (Bertrand-Krajewski et al 2021) en Remy Schilperoort heeft er in 2011 zijn proefschrift (Schilperoort, R.P.S., 2011) over geschreven.

Als we kijken naar het functioneren van de meer geavanceerde sturingsstrategieën, dan valt er consistent een theoretische verbetering ten opzichte van eenvoudige sturingsregels te zien. Dit geldt voor de afvalwatersystemen van rwzi Eindhoven (23,8% ten opzichte van de simpelste set regels), van rwzi Hoogvliet (5,93% ten opzichte van de centrale sturing) en van rwzi Dokhaven (5,2%, eveneens ten opzichte van de centrale sturing). Het verschil tussen de geavanceerdere methodes en simpelere sturingsmethodes kan dus relatief klein zijn. Hier moet ik wel bij zeggen dat de regenbuien die we hebben bekeken, een relatief hoog volume hadden. Als we naar de data van een jaar kijken, is de winst waarschijnlijk groter. De potentie van RTC ligt immers bij de kleinere buien waar er nog ruimte in het afvalwatersysteem is om regelmacht over uit te oefenen.

Figuur 5 laat zien dat het verschil in de overstortingsvolumevermindering voor alle methodes vrijwel hetzelfde is. De hybride methode maakt gebruik van minder actuatoren in de optimalisatie (in dit voorbeeld werd 60% van de actuatoren geoptimaliseerd in real-time), waarbij hybride (1) deze actuatoren dynamisch selecteert, afhankelijk van de belasting van het systeem, en hybride (0) altijd dezelfde actuatoren optimaliseert. Dit geeft de mogelijkheid om gefaseerd te experimenteren met real-time-optimalisatie zonder al te veel risico voor onvoorziene problemen binnen de nieuwe, complexere en geautomatiseerde sturingsmethodes. Het aantal te optimaliseren actuatoren wordt dan stapsgewijs uitgebreid om dichter bij de maximale potentie van het afvalwatersysteem te komen.

Figuur 5.
Overzicht van de verschillen
tussen het functioneren van de
geavanceerdere vormen van
sturing. Er is geen statistisch
significant verschil gevonden
tussen de vier methodes.



Overigens is het belangrijk om nogmaals te benadrukken dat het hier gaat om het theoretisch functioneren van de sturing, in een modelomgeving waarin alles werkt zoals het zou móéten werken. Hoe sturingen in de praktijk werken, is lastiger te bepalen. Hiervoor zijn data van hoge kwaliteit gedurende meerdere jaren nodig, waar wederom een uitgebreid meetnetwerk voor nodig is (zie het proefschrift van Petra van Daal-Rombouts uit 2017).

Om het functioneren van sturingen in verschillende casussen in de toekomst beter met elkaar te kunnen vergelijken, hebben we een methode ontwikkeld met een consistente basislijn om de sturingen tegen te kunnen afzetten. Het resultaat van de methode is een non-dimensionaal getal dat ik de ‘gerealiseerde potentie indicator’ (GPI) heb genoemd. De GPI positioneert het functioneren van de beschouwde sturingsvorm tussen een goed gedefinieerde basislijn en de maximaal haalbare potentie van sturing.

De basislijn van de GPI is het resultaat met sturingsregels in de simpelste vorm: één input en één instelling per actuator. Voor elke actuator is er dan een ‘beneden- en een bovengrenslijn’ instelling in de vorm van een simpele ‘als-dan’-sturingsregel: ‘als input meer dan X, dan Y. Anders, Z’. Voor deze basislijn worden de waarden van X, Y en Z geoptimaliseerd. Hiermee is de basislijn dus niet de ‘huidige’ sturing, of ‘geen’ sturing, maar juist de simpelste vorm van sturing. Hiermee wordt het mogelijk om te onderzoeken wat complexere sturingsmethodes daadwerkelijk aan meerwaarde opleveren.

Naast de eenduidige basislijn hebben we een methode ontwikkeld om de maximumpotentie van sturing te kunnen vinden. Deze potentie is gehaald wanneer de gehele capaciteit van het systeem benut is door de sturing. Als de totale capaciteit van een systeem als één bakje wordt gemodelleerd, is het totale overstortingsvolume van dit versimpelde model het maximaal haalbare rendement van sturing. Deze modeltechniek werkt alleen niet goed voor een afvalwatersysteem met veel pompgemalen omdat de pompcapaciteit limiterend is op de dynamiek van een rioolstelsel. Hiervoor hebben we een iteratief algoritme ontwikkeld dat het minimum-overstortingsvolume voor elke individuele cascade en voor een combinatie van de cascades van gepompte districten via bakjesmethode berekent. De minimumwaarde is dan de grootste overstortingsvolumereductie die was berekend.

2.4 Conclusie en praktische implicatie

Uit de literatuur- en modelstudie naar de potentiebepaling van sturingsvormen komen de volgende conclusies:

- Ondanks de ogenschijnlijke consensus vanuit de literatuur dat geavanceerdere algoritmes betere resultaten opleveren, lijkt er een 75-15-10%-regel te zijn. Hierbij kan RTC 75% van de potentiële winst (bijvoorbeeld de reductie in overstortingsvolumes) opleveren, met relatief simpele regels. De volgende 15% kan gerealiseerd worden met meer gecompliceerde sturingsregels, en het ingewikkeldere ‘real-time-optimalisatie’-verhaal kan de laatste procenten theoretische winst realiseren.
- De geavanceerdere methodes werken, in theorie, beter dan de heuristische methodes, met relatief weinig verschil tussen de verschillende opties. Het is aan te raden om gefaseerd te gaan werken met de geavanceerde sturingsmethodes, te beginnen met de toepassing van de optimalisatiealgoritmes op een select aantal actuatoren, waarna u deze selectie stapsgewijs kunt uitbreiden.
- Om een realistisch beeld te krijgen van de potentie van RTC is het nodig om te kijken naar de theoretische maximale potentie. Hiervoor moet u de fysieke limieten van een afvalwatersysteem in acht nemen. Dit levert ook een goede methode op om het functioneren van sturingsalgoritmes voor verschillende systemen met elkaar te vergelijken.

Voor de praktijk is het dus nog maar de vraag of de meest geavanceerde vorm van sturing ook de ‘slimste’ manier is. Ingildsen en Olsson lieten in hun boek uit 2016 (*Smart Water Utilities, Complexity made simple*) al zien dat de ogenschijnlijk simpelste methode soms juist de beste is.

3 Onzekerheid in regenvoorspelling

3.1 Inleiding en onderzoeksdoel

Regenvoorspellingen met een tijdshorizon van twee tot drie uur, zogeheten nowcasts (denk hierbij aan de bekende radarbeelden van bijvoorbeeld “buienradar”), kunnen gebruikt worden in zowel real-time-optimalisatie als in heuristische sturing. Immers, als we de belasting van het systeem over de komende tijd kennen, kunnen we hier pro-actief optimaal mee omgaan. We kunnen ruimte voor de bui maken, of als er juist geen regen meer komt, het water langer vasthouden. Een voor de hand liggende onzekerheid bij deze verschillende soorten van voorspellend sturen is de onzekerheid in de regenvoorspellingen zelf. Elke vijf minuten publiceert het KNMI, gebruikmakend van verschillende voorspellingsalgoritmes, regenverwachtingen voor de komende twee uur met een resolutie van 1x1 km. Deze voorspellingen zijn te downloaden vanaf het datacentrum van het KNMI (data-platform.knmi.nl) en kunnen met een simpele vergelijking omgezet worden naar regenintensiteiten.

Daarnaast zijn ook langetermijnvoorspellingen, met weersverwachtingen voor de hele week beschikbaar. Deze hebben we niet gebruikt in dit onderzoek, maar deze zouden wel gebruikt kunnen worden voor sturing van langzamere processen binnen de stedelijk watersystemen. Deze vorm van voorspellingen hebben we echter niet onderzocht in dit onderzoek. Dit onderzoek gaat over overstortingsvolumereductie. Een regenvoorspelling van 7 dagen kan daar weinig aan bijdragen.

Het doel van dit deel van het onderzoek was tweeledig. Aan de ene kant om inzicht te krijgen in de theoretische potentie om weersvoorspellingen te integreren in sturingsstrategieën voor meer regelmacht. En aan de andere kant beoordelen in hoeverre de onzekerheden die in de voorspellingen zitten een risico met zich meebrengen.

3.2 Onderzoeksopzet

In eerdere onderzoeken naar de mogelijke effecten van onzekerheid in de regenvoorspelling werd gebruikgemaakt van synthetische voorspellingen. Er werd dan een willekeurige foutmarge (ruis) toegevoegd aan de gemeten regen om onzekerheid in de voorspellingen na te bootsen. Dit levert geen goede weergave op van de onzekerheidsdynamiek die in de voorspellingen kan zitten. Daarom hebben we in dit onderzoek echte voorspellingen van het KNMI gebruikt.

Ook hebben we in dit onderzoek specifiek gekeken of een patroon zit in de nauwkeurigheid van regenvoorspellingen. Is het bijvoorbeeld makkelijker om grote of juist kleine buien nauwkeurig te voorspellen? Ik heb gekeken naar de verschillen tussen individuele ‘pixels’ (gebieden van 1x1 km), en ook naar de gemiddelde waarden voor het afstroomgebied van de afvalwaterzuiveringen. Hiervoor heb ik drie jaar aan historische weersvoorspellingen gebruikt.

Tijdens dit promotieonderzoek heeft Gemeentewerken Rotterdam de sturingsregels voor het afvalwatersysteem herzien. We hebben deze nieuwe sturingsregels uit het zogeheten CAS2.0 project, gebruikt als uitgangspunt voor dit onderzoek, en die sturingsregels uitgebreid met regels die gebruikmaken van de weersvoorspellingen. Deze nieuwe regels hebben we zo ontworpen dat ze gebruikmaken van verschillende aspecten van de voorspelling. Zo past een van de regels de instellingen aan als er geen regen meer voorspeld wordt aan het einde van een regenbui. Een andere regel maakt gebruik van een limiet van voorspelde regenval. Andere regels gebruiken een versimpeld model van het afvalwatersysteem om de belasting van het systeem te berekenen en afhankelijk daarvan de instellingen van de actuatoren te veranderen (wat hier ‘model-geïnformeerde heuristische sturing’ genoemd wordt). In totaal hebben we zes verschillende procedures (sets regels) bedacht en getest (zie tabel 1). Deze procedures heb ik getest met zowel echte voorspellingen als met perfecte voorspellingen waarbij de gemeten regenval als voorspelling werd gebruikt. Het verschil tussen de voorspelde overstortingsvolumes gebaseerd op model resultaten met de beide

weersvoorspellingsopties kan dan gezien worden als het risico gerelateerd aan de onzekerheid in de weersvoorspelling.

ID nieuwe sturing	Type sturing	Voorspelling aspect gebruikt	Regelbeschrijving
Procedure 1	Voorspelling direct in de sturingsregels	Einde van de regenbui	Als het einde van de regen wordt voorspeld, gaan de overstortgemalen uit.
Procedure 2	Voorspelling direct in de sturingsregels	Einde van de regenbui	Als het einde van de regen wordt voorspeld, switcht het systeem terug naar <80%-vullingsgraad-regels.
Procedure 3	Model-geïnformeerde heuristische sturing	Totaal voorspelde neerslagdieptes	Switchen naar de >80%-regels wanneer een vullingsgraad van >90% voorspeld wordt.
Procedure 4	Model-geïnformeerde heuristische sturing	Totaal voorspelde neerslagdieptes	Switchen naar de >80%-regels wanneer deze vullingsgraad voorspeld wordt.
Procedure 5	Model-geïnformeerde heuristische sturing	Volgen van een blok van een uur lange voorspelling	Volg de regels voor >80% wanneer er voor op z'n minst de helft van de tijd dit voorspeld werd binnen het uurblok.
Procedure 6	Model-geïnformeerde heuristische sturing	Volgen van een blok van een uur lange voorspelling voor boven- en benedenstroomse gebieden	Volg de regels voor >80% wanneer er voor op z'n minst de helft van de tijd dit voorspeld werd voor het district of voor een van de boven- en benedenstroomse gebieden binnen het uurblok.

Tabel 1. Overzicht van de nieuwe regels ten opzichte van het CAS2.0-project. Details voor de basissturing waarop deze regels gebaseerd zijn, zijn te vinden in een overzicht van het CAS2.0-project van de gemeente Rotterdam, en in een publicatie van Jeroen Langeveld (2022). Meer details van de sturingsmethodes zijn te vinden in de relevante wetenschappelijke publicatie uit 2023.

Voor de real-time-optimalisatie hebben we dezelfde methode gebruikt als beschreven in figuur 3, maar de voorspellingen die aan het versimpelde model gegeven werden, waren de echte KNMI-voorspellingen (voor het realistische scenario) of de KNMI-waarnemingen (voor het perfecte scenario). Ook hiervoor geldt: het verschil tussen het functioneren van deze twee opties geeft het risico van het gebruik van echte voorspellingen weer.

3.3 Deelonderzoeksresultaten

De deelonderzoeksresultaten bestaan uit drie delen. Beginnende bij de analyse van de nauwkeurigheid van de neerslagvoorspelling vanuit een stedelijkwaterperspectief, gevolgd door mogelijke effecten van de onzekerheid op het functioneren van sturingsregels, en daarna de mogelijke effecten op MVS.

3.3.1 Analyse nauwkeurigheid neerslagvoorspelling

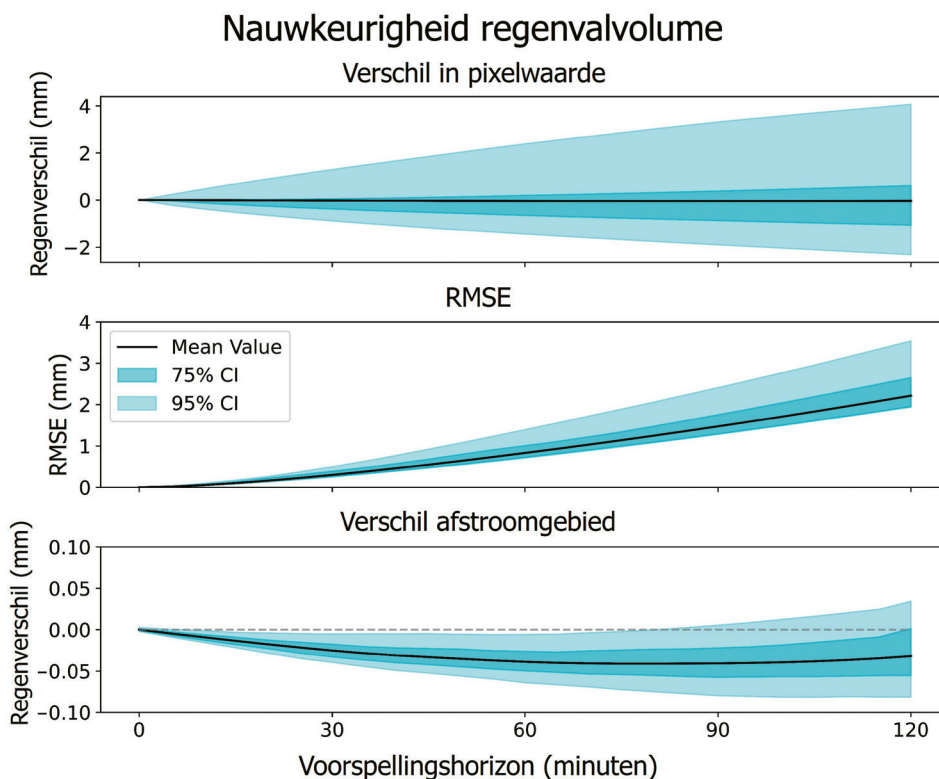
Het voorspellen van het einde van een regenbui

De analyse die we hebben gemaakt is gebaseerd op drie jaar regenvoorspellingen en laat zien dat de weermodellen vooral goed zijn in het voorspellen van het einde van een regenbui. Wanneer een model zegt dat er geen regen meer komt, is dit dus waarschijnlijk ook zo. Tegen het einde van een regenbui is het percentage van correct voorspelde regen of geen regen bijna twee keer zo hoog als op ieder ander moment in de bui. De definitie van regen is hierbij gebaseerd op verschillende grenswaarden (van minimaal 0,1 mm tot minimaal 1 mm), waarbij we geen wezenlijk verschil in het onderliggende patroon hebben gevonden.

Verlies aan nauwkeurigheid van voorspelde regenval bij een langere voorspellingshorizon

Aan de andere kant is er een duidelijk verlies aan nauwkeurigheid te zien bij een toenemende voorspellingshorizon. Dit is geen verrassing, maar het levert wel een interessante afweging binnen de sturingsontwikkeling op: aan de ene kant creëert een langere horizon meer proactieve regelmacht, maar aan de andere kant zijn voorspellingen voor een langere termijn minder nauwkeurig en zitten er dus mogelijk meer risico's aan vast. Een toenemende voorspellingshorizon heeft dus een steeds grotere onzekerheid tot gevolg. Het gaat hierbij om cumulatieve regenval, dus om de totale voorspelde regenval over de gehele horizon.

Figuur 6.
 Een langere voorspellingshorizon voor neerslag leidt tot een grotere mate van onzekerheid, zowel voor de individuele pixels als voor de gemiddelde voorspelling voor het hele stedelijk gebied (de onderste grafiek). De schaduwregio's geven de 75 en 95% betrouwbaarheidsintervallen (CI) aan.



Verlies aan nauwkeurigheid van voorspelde intensieve regen bij een langere voorspellingshorizon
 Behalve dat een langere voorspellingshorizon een verlies van nauwkeurigheid oplevert, wordt ook intensieve regen minder goed voorspeld. Dit is niet onlogisch, omdat zwaardere regen vaker gepaard gaat met een dynamischer atmosfeer, die lastiger te voorspellen is. Maar het is wel verbazingwekkend dat het verlies van nauwkeurigheid al te zien is bij relatief lage waarden met een regenintensiviteit van rond 2 mm/uur.

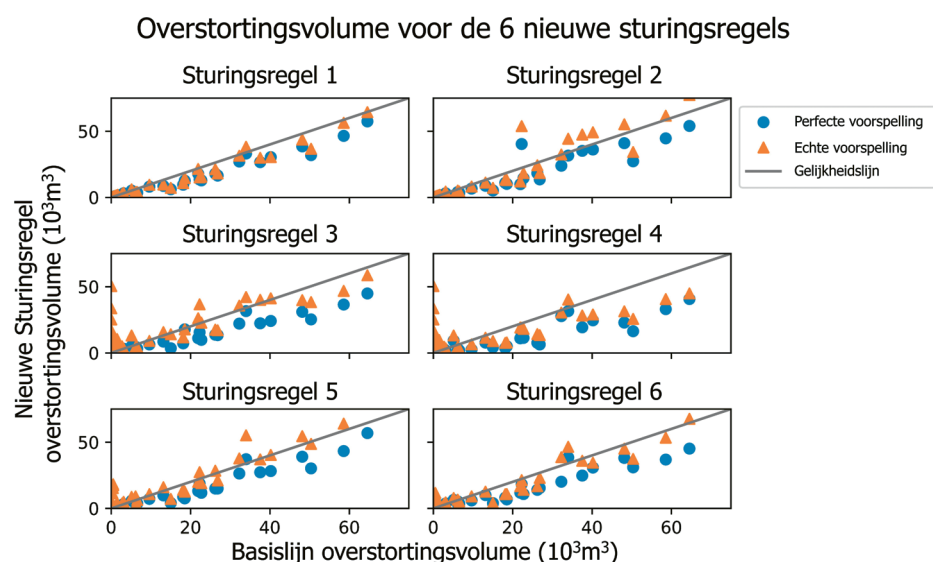
Bij deze resultaten moeten we wel de kanttekening plaatsen dat de resultaten toepasbaar zijn op het stedelijk gebied van Rotterdam. In een onderzoek naar onzekerheden over kortetermijn-weersvoorspelling in verschillende gebieden van Nederland heeft Ruben Imhoff in zijn proefschrift (2022) laten zien dat de nauwkeurigheid van de voorspellingen verschilt per regio. Hij liet zien dat dit afhankelijk is van de grootte en de locatie van het gebied. Het is daarnaast ook van belang om te bedenken dat weersvoorspellingen vaak niet gemaakt worden met stedelijk afvalwatersystemen in gedachten. Een weersvoorspellingsmodel wordt als goed gezien wanneer een regenbui binnen een straal van 20 km plaatsvindt; dit is voor stedelijk gebied een te grote marge.

Wat betekenen deze drie aspecten van de regenval voor de potentie van sturing(sregels)? Het lijkt erop dat proactief sturen op aankomende (intensieve) regen met een hoger risico gepaard gaat. Daarnaast is het jammer dat intensievere regen lastiger te voorspellen lijkt, omdat sturing hierbij (tot op zekere hoogte) juist meer potentie heeft. Binnen een sturing gebruikmaken van andere regels wanneer de regenbui voorbij is, lijkt de minst risicovolle manier van weersvoorspellingen gebruiken, maar het is de vraag of dit evenveel regelmacht geeft in vergelijking met andere sturingsopties. Voor de MVS is het lastiger om de mogelijke consequenties van een heterogene voorspelling van tevoren in te schatten.

3.3.2 Effect van nauwkeurigheid van neerslagvoorspelling op sturingsregels

Om te kijken of de onzekerheid in de neerslagvoorspellingen ook een risico oplevert, hebben we 95 (historische) regenbuien gesimuleerd met zowel de basisregels (de bestaande sturingsregels van Rotterdam) als met de nieuwe regels. De echte historische voorspellingen zijn hier ook gebruikt. Hieruit werd duidelijk dat de conclusies die uit de analyse van de nauwkeurigheid van de weersvoorspelling naar voren kwamen, grotendeels direct toepasbaar zijn op het risicoprofiel van de sturingsregels. Zo is duidelijk te zien in figuur 7 dat er maar weinig verschil zit tussen de echte voorspelling en de perfecte voorspelling van procedure 1 (een klein verschil tussen de blauwe cirkels en oranje driehoeken, waarbij een verticaal lagere positie beter functioneren weergeeft). Het enige nadeel is wel dat de

potentie van deze vorm van sturing relatief laag is: er kan iets meer dan 5% overstortingsvolumereductie gerealiseerd worden met deze regels. Als we dit bijvoorbeeld vergelijken met procedure 3, dan is duidelijk te zien dat deze meer potentie heeft (de blauwe bollen zijn significant lager dan de gelijkheidslijn, wat lagere overstortingsvolumes betekent). Maar het verschil tussen de echte voorspellingen en de perfecte voorspellingen voor deze regels is ook aanzienlijk hoger. Sterker nog: het totaal overgestorte volume ligt voor procedure 3 hoger dan bij de basisregels wanneer er echte voorspellingen gebruikt worden.



Figuur 7. Overzicht van het functioneren van de verschillende sturingsregels die afhankelijk zijn van verschillende aspecten van de neerslagvoorspellingen. Als de stip of de driehoek onder de gelijkheidslijn zit, betekent dit dat er een verbetering is ten opzichte van de huidige sturingsmethode. Er is een duidelijk verschil te zien tussen de echte en perfecte voorspellingen. Dit zijn de simulatie resultaten van de 95 historische regenbuien.

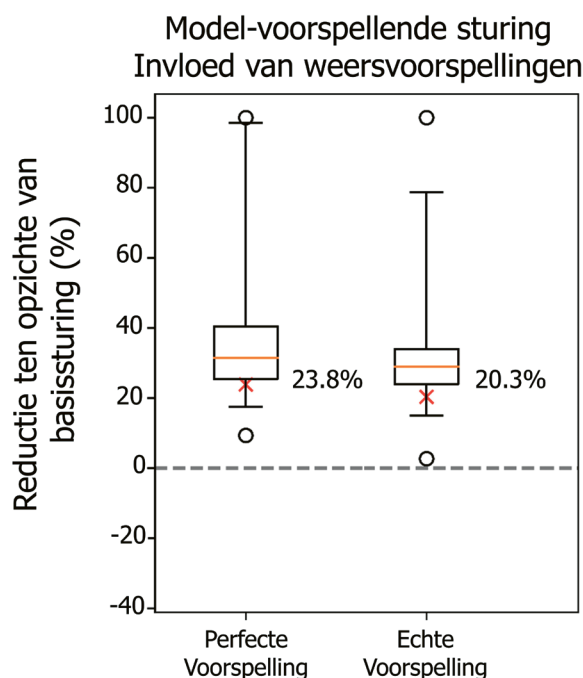
Wat vooral duidelijk te zien is in figuur 7 (met betrekking tot procedures 3 tot en met 5), is dat er redelijk wat regenbuien waren waarbij de nieuwe regels tot overstortingen leidden die anders niet waren voorgekomen. Dit is te zien aan de verticale ophoping van de oranje driehoeken aan de linkerkant van de grafieken. Deze dynamiek is vrij bepalend voor het minder functioneren van de nieuwe sturingsmethodes dan de basissturing en komt door de aanwezigheid van bemalen overstorten. Wanneer er incorrect een zwaardere bui voorspeld werd (wat relatief vaak voorkomt, gezien de eerdergenoemde problemen met het voorspellen van zwaardere buien), werden deze bemalen overstorten preventief aangezet. Dit soort bemalen overstorten zijn uiteraard niet aanwezig in alle stedelijk afvalwatersystemen, en de gevoeligheid van de regels voor de voorspelling hoeft dan ook niet altijd zo groot te zijn als in deze casus.

Vanuit deze resultaten kunnen we wel stellen dat mogelijke risico's als gevolg van het gebruik van neerslagvoorspellingen afhankelijk zijn van welk aspect van de regenval gebruikt wordt in de sturingsregels en van de sturingsregels zelf. Het is dan ook aan te raden om altijd een modelstudie te doen wanneer er nieuwe regels bedacht worden, waarbij het van belang is dat er echte historische voorspellingen gebruikt worden om de nieuwe sturingsregels te testen.

3.3.3 Analyse effect nauwkeurigheid neerslagvoorspelling op real-time-optimalisatie

Wanneer we kijken naar de effecten van onzekere weersvoorspelling op het functioneren van real-time-optimalisatie, dan is er maar een klein verschil met het perfecte scenario te zien voor de casus-Eindhoven. Een gemiddelde afname van het reductievermogen van 3,5 procentpunt ten opzichte van het perfecte scenario voor verschillende buien was berekend. Het is hierbij ook belangrijk om op te merken dat voor geen enkele van de buien die berekend waren, er een overstortingsvolume groter dan de basissturing voorkwam in de dataset. Dat zou betekenen dat er met betrekking tot de onzekerheid van de weersvoorspelling relatief weinig risico's aan MVS zitten.

Figuur 8.
Een boxplot die het verschil in het functioneren van MVS met perfecte of echte voorspellingen laat zien. Er is maar een relatief kleine reductie van het vermogen te zien, namelijk van 3,5 procentpunt. De rode kruisjes geven de gemiddelde reductie weer, en de boxplots geven de spreiding van de reducties voor de verschillende regenbuien aan.



Dit relatief kleine verschil komt doordat de sturing constant de nieuwe optimale instellingen van de regelaars berekent met nieuwe weersvoorspellingen. Deze constante herberekeningen zorgen ervoor dat wanneer er geen ideale sturing is, dit relatief snel gecorrigeerd kan worden. Daarnaast zijn de beslissingen die door de MVS genomen worden vaak subtieler, terwijl de ontwikkelde regels iets grover waren (vaak in de vorm van aan/uit voor pompen, in plaats van 50% van de capaciteit). Verder zijn er in deze casus ook geen bemalen overstorten, waardoor de beslissingen van de MVS minder direct gelinkt zijn aan de overstortingsvolumes.

3.4 Conclusies en aanbevelingen

Uit de modelstudies blijkt dat de onzekerheid in de neerslagvoorspellingen tot beperkte risico's leidt. Neerslagvoorspellingen kunt u dus gebruiken om sturingsmethodes met sturingsregels uit te breiden. Hiervoor is het wel nodig om een goede analyse te maken van de mogelijke consequenties, omdat de onzekerheid in de neerslagvoorspellingen juist ook slechtere sturingsprestatie tot gevolg kan hebben. Voor real-time-optimalisatiemethodes geldt dat er vrij weinig risico's zijn gevonden.

Gebaseerd op deze conclusie gelden de volgende aanbevelingen:

- Wanneer u overweegt om regenvoorspellingen te gebruiken voor automatische sturing, is het van belang om een goed inzicht te krijgen in de lokale nauwkeurigheid van de regenval. Dit kan voldoende zijn om een beeld van de gerelateerde risico's te krijgen.
- Het is aan te raden om een modelstudie te doen om de mogelijke risico's van het gebruik van weersvoorspelling verder in kaart te brengen. Hiervoor moet u altijd gebruikmaken van historische weersvoorspellingen, omdat de onzekerheden binnen de weersvoorspellingen heterogeen en locatiespecifiek zijn en niet goed nagebootst kunnen worden met ruis.
- Gebruikmaken van model-voorspellende sturingsmethodes levert een kleiner risico op in vergelijking met het gebruik van sturingsregels wanneer er naar de onzekerheid van weersvoorspellingen gekeken wordt. Tijdens een uitgebreide modelstudie hebben we slechts een kleine prestatievermindering ten opzichte van een perfecte weersvoorspelling gevonden.

4 Model- en systeemonzekerheid

4.1 Inleiding en onderzoeksdoel

‘Alle modellen zijn fout’ is een vaak herhaalde zin van George Box uit 1976. Twee jaar later voegde hij er de zin ‘maar sommige zijn nuttig’ aan toe. Ook dit promotieonderzoek is afhankelijk van verschillende modellen. Dit is noodzakelijk bij de ontwikkeling en evaluatie van nieuwe sturingsstrategieën. Het effect van modelonzekerheid op – met name – het functioneren van model-voorspellend sturen (MVS) is echter nog niet goed onderzocht.

4.2 Onderzoeksopzet

Figuur 2 geeft een overzicht van de gevonden faalmechanismen in dit veldonderzoek. Hemel-We hebben het model van het afvalwatersysteem van Eindhoven gebruikt om antwoord te geven op de derde onderzoeksvraag: “welke onzekerheden brengen de verschillen tussen het model en het systeem?”

We hebben daarbij twee verschillende scenario’s bekeken: eerst een MVS-methode die gebruikmaakt van een versimpeld bakjesmodel en eentje die gebruikmaakt van het volledige hydrodynamische model voor het optimaliseren (zie figuur 3 voor de details van hoe MVS werkt). Voor het versimpelde model is er een verschil tussen het representatieve model en het optimalisatiemodel, wat ook bij een geïmplementeerde versie van MVS het geval zou zijn (waarbij er per definitie een verschil zit tussen het fysieke systeem en het model). Het mogelijke verschil in het functioneren van de twee methodes kan dan toegekend worden aan modelonzekerheid (omdat er, net als in de praktijk, een verschil is tussen de voorspelde dynamiek en de dynamiek in het ‘echte’ systeem).

Het nadeel van deze methode is de tijd die nodig is om te optimaliseren met een volledig hydrodynamisch model. Voor een enkele middelgrote regenbui lag de simulatietijd boven de anderhalve maand. Om dit te omzeilen hebben we het versimpelde model van rwzi Hoogvliet gebruikt en verder versimpeld. Deze verdere versimpeling was nodig om een ander optimalisatiealgoritme te kunnen toepassen. Dit algoritme is wat in de literatuur ‘formeel’ genoemd wordt, en is daarmee altijd de beste oplossing voor het gestelde optimalisatieprobleem. De vraag is of de versimpeling die hiervoor nodig is de ‘formaliteit’ van de oplossing verstoort.

Behalve naar de modelonzekerheid hebben we ook gekeken naar de onzekerheid in de benedenstroomse pompcapaciteit. Deze pompcapaciteit kan staan voor een rioolgemaal of voor de uiteindelijke rwzi. Verlies van pompcapaciteit in gemalen of rwzi’s is een veelvoorkomend probleem. Dit probleem kan gevolgen hebben wanneer een geautomatiseerde sturing dit niet ‘weet’ of ‘ziet’. Om dit te testen heb ik historische data van het rioolgemaal Aalst (halverwege de transportleiding van Riool-Zuid) gebruikt (een pomp die niet als actuator in de sturing gebruikt wordt).

4.3 Onderzoeksresultaten

Voor de casus van rwzi Eindhoven is te zien dat modelonzekerheden een verlies in het functioneren van RTC-methodes kunnen opleveren. Ongeveer 35% van de potentie (het gemiddelde van twee regenbuien) voor overstortingsvolumereductie ging verloren ten opzichte van de simulatie zonder onzekerheid. Hier was echter geen risico aan verbonden: de MVS werkte in alle gevallen beter dan de simpelste sturingsregels (23,8% reductie in totaal) en dan de complexere regels (9,1%). Om erachter te komen waar dit verlies in functioneren vandaan kwam, hebben we de voorspelde beste dynamieken naast elkaar gelegd. Het was lastig om hier een vast patroon in te zien, deels omdat er relatief weinig regenbuien gesimuleerd waren. Omdat de MVS probeert alle beschikbare ruimte in een rioolstelsel te benutten, kan een foute beslissing al snel tot grote problemen leiden.

Voor de casus rwzi Hoogvliet waren de resultaten tegenovergesteld. Het verschil tussen het onzekere en het 'perfecte' scenario is zeer klein (zie figuur 5, het verschil tussen de twee MVS). De reductie van het totale overstortingsvolume ging van 5,93% naar 5,84%. Het versimpelde model gebruikte wel een formeler optimalisatiealgoritme wat mogelijk was door de versimpeling van het model. De complexiteit van de dynamiek in het afvalwatersysteem, en daarmee de mogelijkheid om het systeem te modelleren met behulp van een simpeler model, zal dus in grote mate uitmaken of MVS een duidelijke verbetering van het functioneren van het afvalwatersysteem oplevert of niet.

Ik moet hier wel een grote kanttekening bij plaatsen, namelijk dat de resultaten gebaseerd zijn op een beperkt aantal gesimuleerde regenbuien. Er zijn meer simulaties nodig om een beter inzicht te krijgen in de effecten van modelonzekerheid op het functioneren van deze casussen.

Onzekerheid in pompcapaciteit kan een groot effect hebben op de beslissingen die een geautomatiseerde optimalisatie-RTC neemt, en dus ook op het functioneren van deze vorm van sturing. Wanneer een pomp, zuivering of actuator ander gedrag vertoont dan het model aanneemt, zijn de optimale instellingen niet meer optimaal. Het kan dan ook gebeuren dat de beslissingen van de MVS uiteindelijk leiden tot een slechter functionerend systeem dan bij het gebruik van een heuristische sturingsmethode; het zogenoemde risico van operationele achteruitgang. Dit risico is wel relatief beperkt (het kwam voor bij een van de zeventien gesimuleerde regenbuien). Gemiddeld gaat het functioneren van de sturing wel met bijna 50% achteruit ten opzichte van wanneer de MVS exact weet wat de benedenstroomse pomp gaat doen. Dit is hier het risico van verlies van potentiële winst genoemd. Het gedrag dat het optimalisatiealgoritme als beste beschouwt, is in dit geval duidelijk suboptimaal. Ook deze resultaten zullen casusafhankelijk zijn, maar er kan wel gesteld worden dat er een belang is om het gedrag van pompen en andere actuatoren binnen een MVS-ontwerp altijd mee te nemen.

Wanneer we kijken naar de dynamiek, is te zien dat de MVS relatief minder knijpt (dus meer afvalwater doorlaat) wanneer zij ervan uitgaat dat het benedenstroomse gemaal de volle capaciteit heeft. Ook hierbij zullen de effecten van falen van pomp en actuator afhankelijk zijn van de casus. Maar het is wel duidelijk dat het belangrijk is om in de optimalisatieroutine de debieten van de pompgemalen te monitoren en deze informatie te gebruiken. Om te bepalen wat de beste manier is om deze informatie te integreren in een voorspellende sturingsroutine, is verder onderzoek nodig.

4.4 Conclusies

Wanneer we kijken naar de onzekerheden van modellen en van het functioneren van dynamische actuatoren, zijn de volgende conclusies en praktische aanbevelingen mogelijk:

- Onzekerheden die gerelateerd zijn aan het model dat gebruikt wordt om de instellingen van de actuatoren te bepalen, kunnen een significant verlies in het functioneren van RTC-methodes opleveren. De risico's zijn echter relatief beperkt, mits er geen systematische fouten (bias) in het model aanwezig zijn. Als het model de gehele dynamiek van het afvalwatersysteem goed kan nabootsen, dan zijn de risico's minimaal en niet statistisch significant.
- Het is noodzakelijk om pompcapaciteiten en het functioneren van actuatoren actief te monitoren, en de gegevens te integreren in een model-voorspellende sturing. Want als actuatoren niet functioneren als verwacht, kan dit een groot effect hebben op de resultaten van een optimalisatieroutine.

5 Stedelijke veranderingen

5.1 Inleiding en onderzoeksdoel

Het ontwerp van sturingsstrategieën is gebaseerd op een (gekalibreerd) model, waarin de dynamiek van het stedelijk afvalwatersysteem zo goed mogelijk nagebootst wordt. De stedelijke omgeving is alleen niet statisch, en ondergaat komende decennia grote veranderingen. Zo leidt de wooncrisis tot de wens om in grote hoeveelheden huizen bij te bouwen. Daarnaast zorgen klimaatadaptieve maatregelen, de vervangingsopgave van de openbare ruimte en van de woningvoorraad alsmede de vergroeningsopgave voor een ander afvoerpatroon binnen de bestaande bebouwde kom. Al deze veranderingen hebben effect op het afvoeren van afval- en hemelwater, en zijn te beschouwen als een onzekerheid binnen de sturingsmethodiek. Het doel van dit onderzoek was om uit te vinden hoelang de bestaande sturingsstrategieën houdbaar zijn gegeven de onzekerheden door een veranderend stedelijk gebied.

5.2 Onderzoeksopzet

Om de houdbaarheid van RTC te onderzoeken zijn er toekomstscenario's nodig. We hebben twee verschillende methodes gebruikt om de transities van de stedelijke omgeving na te bootsen: een gedetailleerde en een stochastische methode. De gedetailleerde methode creëert veranderingen aan het volledige hydrodynamische model op straatniveau, en bootst daarmee het testen van het functioneren van sturing na wanneer duidelijk is welke veranderingen er exact zullen plaatsvinden. De stochastische methode is gebaseerd op een statistisch model dat de veranderingen op een grotere (district) schaal bepaalt, en is toegepast op een versimpeld model. Deze tweede methode hebben we ontwikkeld om een beter inzicht te krijgen in de houdbaarheid van sturing voor verschillende toekomstscenario's in plaats van een gedetailleerde planning.

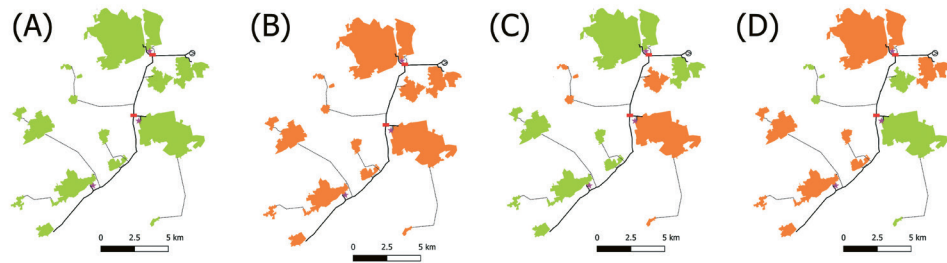
De stochastische veranderingen hebben we toegepast op het versimpelde model van het afvalwatersysteem van rwzi Hoogvliet (in Rotterdam). Om transities te simuleren heb ik drie probabilistische scenario's gemaakt, waarbij de verandering in het afgevoerde volume afval- en regenwater via het gemengde rioolsysteem afhankelijk is van een vooropgestelde normaalverdeling. De drie probabilistische scenario's waren:

- (1) een even grote kans op verharding en implementatie van blauwgroene infrastructuur in het stedelijk gebied;
- (2) een grotere kans op verharding; en
- (3) een grotere kans op de implementatie van blauwgroene infrastructuur.

Voor elk scenario werden er honderd kettingen gemaakt, waarbij elke ketting vijftien veranderingen heeft (waarbij een probabilistische verandering toegepast werd op het model, afhankelijk van het scenario). Deze momenten worden dan gesimuleerd met negen verschillende regenbuien. Dit geeft een dataset van 13.500 unieke simulaties.

Voor de casus van de rwzi Eindhoven hebben we vier scenario's ontworpen, waarbij de stedelijke gebieden die lozen in de drie delen (de transportleiding wordt verdeeld in deze delen door de regelstations), investeren in het bevorderen van de doorlaatbaarheid van het stedelijk gebied (door middel van bijvoorbeeld SUDS), of juist kiezen voor een uitbreiding van het verhard oppervlak. Voor elk van de scenario's hebben we, via een geautomatiseerd algoritme, op straatniveau gekeken of er ruimte was voor de transitie die het scenario aangaf. Met andere woorden: voor scenario A hebben we in elke straat gekeken of er binnen de straat verdere verharding mogelijk is (bestrating van tuinen of een groenstrook die ruimte moet maken voor nieuwbouw). Als dit het geval is, wordt een cumulatieve verharding van 0,4% per jaar toegepast op dit gebied. Als het gaat om vergroening, dan gaat dit met 0,67% per jaar. Beide getallen zijn gebaseerd op historische data en globale planning. Deze transities worden toegepast en de resultaten op het functioneren van de sturing worden getest na vijf en vijftientig jaar.

Figuur 9. Overzicht van de vier scenario's, waarbij de kleur aangeeft wat voor soort transitie er waar worden doorgevoerd. Voor scenario A wordt er verharding van het gehele gebied gebruikt; scenario B doet het tegenovergestelde, en kijkt naar vergroening. Voor scenario C verharden de stedelijke gebieden die zich op het middelste stuk van de transportleiding bevinden (het stuk tussen de twee regelstations), en de rest vergroent juist. Scenario D is het tegenovergestelde van scenario C.



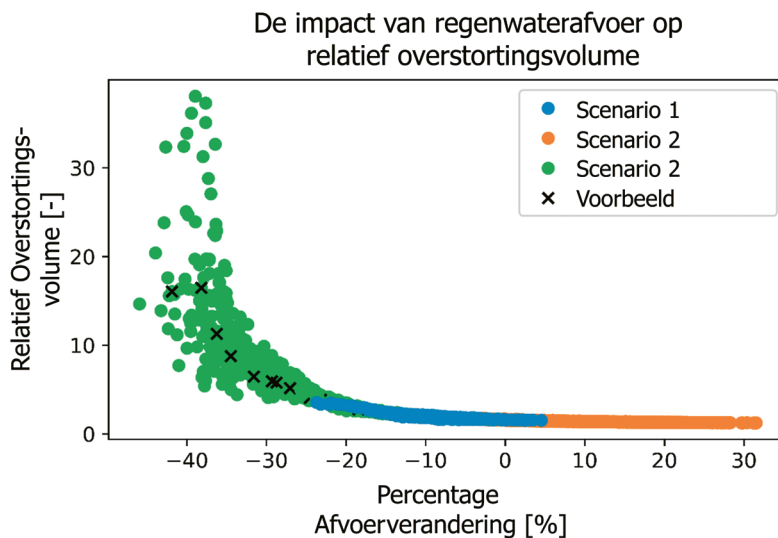
Voor alle gevallen hebben we niet alleen gekeken naar het totale overstortingsvolume als indicator van het functioneren van de sturing, maar ook naar de mate waarin de sturingsstrategie de volle potentie van sturing kan bereiken. Dit laatste verandert mee met de hoeveelheid regenwater die wordt afgevoerd door het gemengde rioolstelsel. Zoals al eerder gezegd, heeft RTC meer potentie voor buien die tot minder regenwaterafvoer leiden (dus kleinere volumes).

5.3 Onderzoekresultaten

Als we kijken naar de resultaten van de stochastische transitie, dan is het patroon dat eruit naar voren komt niet veel anders dan verwacht: in totaal minder overstortingsvolume wanneer er minder regenwater afgevoerd werd. Wanneer het overstortingsvolume genormaliseerd werd (het totale volume gedeeld door de totale hoeveelheid afgevoerd regenwater), bleek er eenzelfde maar niet evenredige trend te zijn. Dit betekent dat de toename of de afname van het afvoerdebit een relatief grotere impact heeft op het overstortingsvolume van een gestuurd afvalwatersysteem dan de verwachte 1:1-verandering. Ook betekent het dat de invloed van RTC (met sturingsregels) op de interactie van verandering van regenwaterafvoer en overstortingsvolumes relatief beperkt is (voor deze casus).

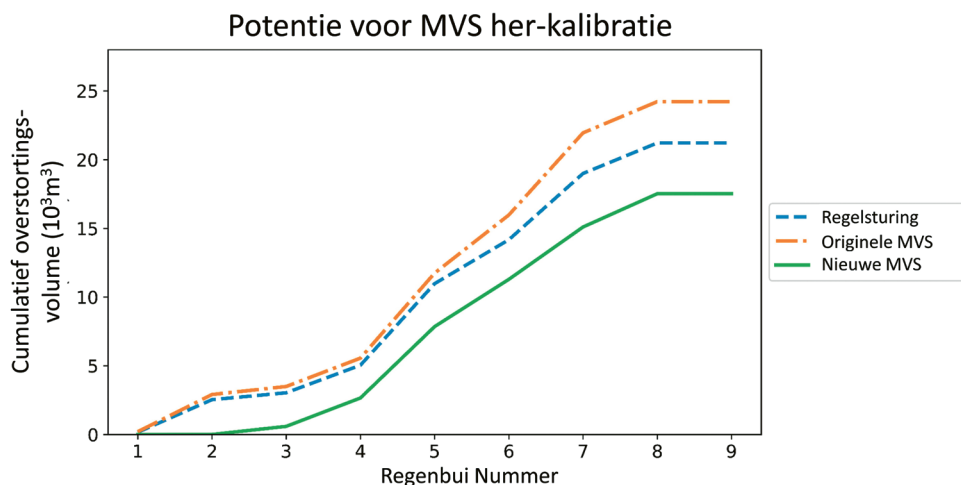
Als we kijken naar de relatie tussen het relatieve overstortingsvolume (een maat ter beoordeling of de sturing de RTC potentie ook daadwerkelijk heeft kunnen waarmaken) en het percentage afvoerandering, dan wordt een duidelijke relatie zichtbaar (zie figuur 10). Dit laat vooral zien dat de mogelijke potentie van sturing bij een transitie waarbij significant minder regenwater via het gemengde rioolstelsel afgevoerd wordt, veel groter wordt én onbenut blijft.

Figuur 10. De relatie tussen de verandering van afvoer en het relatieve overstortingsvolume. De drie verschillende kleuren staan voor de verschillende scenario's die zijn onderzocht.



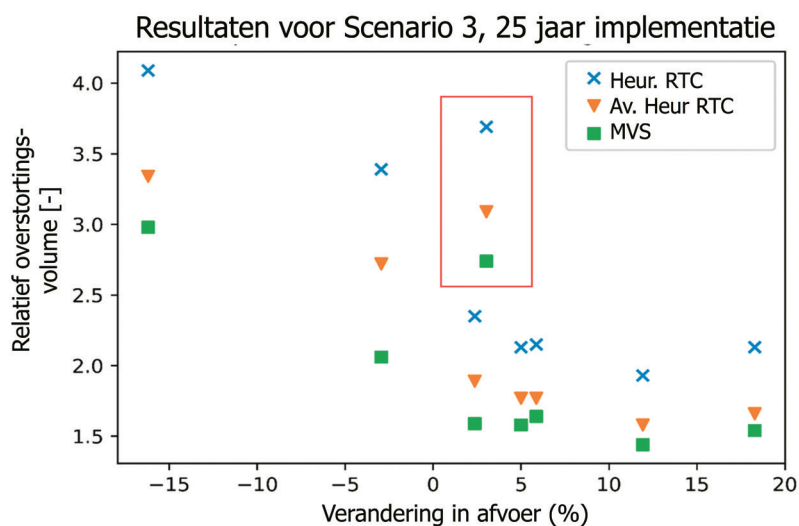
Een van de kettingen is uitgelicht om de effecten van de transitie op het functioneren van de MVS te onderzoeken. We hebben hier gekozen voor een ketting die een interessante dynamiek vertoonde, namelijk een ketting met een vrij hoge reductie in afvoervolume. De laatste link in de ketting (de vijftiende verandering) hebben we vervolgens gebruikt om verder te analyseren. Hiervoor hebben we drie verschillende methodes gebruikt: eerst de onaangepaste regels, gevolgd door een MVS-methode waarvan het optimalisatiemodel niet was aangepast, en tot slot een MVS-methode met een aangepast optimalisatiemodel.

Figuur 11 laat het verschil in functioneren tussen deze drie sturingsmethodes zien. Te zien is dat – voor deze casus – de MVS gevoeliger is voor de veranderingen dan de sturingsregels. Wanneer de MVS opnieuw gekalibreerd wordt, en dus weer een accuraat beeld heeft van wat er geoptimaliseerd moet worden, functioneert de MVS weer beter. Dit verlies in functioneren is een vergelijkbaar effect als eerder was gevonden zowel in de onzekerheid in de regenvoorspellingen als in de modelonzekerheden. De veranderingen kunnen gezien worden als een stelselmatige fout in het optimalisatiemodel, met vergelijkbare consequenties als de eerder bekeken modelonzekerheden.



Figuur 11. Overzicht van de dynamiek voor een link van een van de kettingen. Er is te zien dat de MVS-strategie, wanneer deze niet aangepast wordt aan de nieuwe situatie, een hoger overstortingsvolume kan hebben dan simpele rekenregels. De rekenregels lijken hier dus langer houdbaar te zijn dan een MVS-strategie.

Voor de gedetailleerde studie waren de effecten van de transities minder duidelijk als er naar de relatieve overstortingsvolumes gekeken werd. We hebben geen patroon kunnen ontdekken in de relatie tussen de sturingsmethodes en de genormaliseerde volumes of de totale overstortingsvolumes. Als we keken naar de relatieve overstortingsvolumes, zagen we wél een patroon. De impact van de veranderingen op de relatieve overstortingsvolumes voor de simpelste sturing was ongeveer anderhalf keer zo groot als met de MVS-methode. De sturingsmethode met de meer geavanceerde sturingsregels zaten tussen de MVS en de simpelste regels in. Dit is het tegenovergestelde effect van wat ik in de casus van de rwzi Hoogvliet had gevonden: een verrassend resultaat. De aanname was: hoe gecompliceerder een sturing, hoe makkelijker er iets mis kan gaan. Dit bleek in deze casus niet het geval te zijn. Een directe link tussen de verandering in afvoer en de effecten op het overstortingsvolume was minder makkelijk te vinden dan in de casus van de rwzi Hoogvliet (zie figuur 12), deels omdat er minder buien en transities gesimuleerd waren.



Figuur 12. Een minder duidelijke relatie tussen de verandering in afvoer en de relatieve overstortingsvolumes is te zien in de casus van de rwzi Eindhoven.

5.4 Conclusies en aanbevelingen

Gebaseerd op de resultaten zijn de volgende conclusies en aanbevelingen mogelijk:

- Stedelijke transities hebben pas een duidelijke impact op het functioneren van de sturingsstrategie wanneer er een structurele verandering van ongeveer 15% in het afvoerpatroon ontstaat. De houdbaarheid van sturingsstrategieën is dus hoog, mits er geen grote veranderingen in het systeem plaatsvinden.
- Qua gevoeligheid is er geen duidelijk verschil gevonden tussen sturing gebaseerd op regels of MVS. Voor de twee bestudeerde casussen waren de gevoeligheden tegengesteld aan elkaar. Op basis hiervan is de conclusie dat beide sturingsmethodes door de veranderingen binnen het stedelijk gebied beïnvloed worden.
- Om de impact van stedelijke veranderingen op het functioneren van de sturingsmethode te kunnen begrijpen, is het noodzakelijk om niet alleen te kijken naar het functioneren van de RTC, maar ook naar de potentie van sturing om overstortingsvolume te reduceren. Het is misschien niet altijd nodig om de sturingsmethode nog eens te evalueren, maar het is wel wenselijk om ongewenste lozingen zo ver mogelijk terug te dringen.

In de praktijk is het dus belangrijk dat diegenen die binnen de organisatie verantwoordelijk zijn voor de uitvoering van de sturing, ook op de hoogte zijn van geplande veranderingen binnen het stedelijk gebied. Goede communicatie tussen de planners en de operators kan ervoor zorgen dat de sturing optimaal blijft functioneren en er geen onnodige lozingen van afvalwater plaatsvinden. Het lijkt voldoende te zijn om eens in de vijf jaar de sturingsregels te evalueren of het optimalisatiemodel te her-kalibreren. Het is wenselijk om hiervoor methodes te blijven ontwikkelen (zogeheten data-assimilatie-algoritmes).

6 Conclusies en praktische aanbevelingen

De vorige hoofdstukken gaven een kort overzicht van de onderzoeken die we hebben uitgevoerd tijdens mijn promotieonderzoek. In mijn proefschrift zijn gedetailleerdere conclusies opgenomen. Wanneer we kijken naar alle resultaten, zijn dit de belangrijkste conclusies en praktische aanbevelingen:

- Om goed inzicht te krijgen in de toegevoegde waarde van real-time control (RTC, oftewel sturing), is het voorafgaand nodig om een goede basislijn te definiëren en voor ogen te krijgen wat de maximale potentie van RTC is.
- Er lijkt een 75-15-10%-systematiek te zijn, waarbij de eerste 75% van de potentie van RTC zit in het instellen van simpele maar slimme regels. De laatste 10% is te winnen via geavanceerde sturingsmethodes, die in dit onderzoek ook uitgebreid onderzocht zijn.
- Neerslagvoorspellingen meenemen in de sturingsregels kan daarnaast ook tot een significante verbetering van de sturing leiden.
- Het is (nog) niet mogelijk om van tevoren te weten of een afvalwatersysteem gevoelig is voor verbetering door middel van RTC. Modelstudies en een uitgebreid meetnetwerk zijn altijd nodig om dit goed te kunnen bepalen. Voor sommige afvalwatersystemen zal de potentie een stuk hoger liggen dan voor andere en investeren in (geavanceerde) sturing is het dus niet altijd waard.
- Als niet duidelijk is waar de onzekerheden binnen een geautomatiseerde optimalisatie liggen, dan kan het zo zijn dat simpele sturingsregels beter werken dan een 'state-of-the-art'-sturingsmethode. Het gaat hierbij om onzekerheden in de modellen, functioneren van actuatoren en weersvoorspellingen.
- Onzekerheden in de regenvoorspelling hebben niet veel effect op het functioneren van model-voorspellende sturing, maar kunnen wel een groot effect hebben op het functioneren van heuristische sturing. Heuristische sturing kan tot een groter overstortingsvolume leiden dan wanneer er met simpele regels wordt gestuurd.
- De onzekerheid van regenvoorspelling is niet homogeen, en is afhankelijk van bepaalde aspecten van de regenval. Zo is de voorspelling tegen het einde van een regenbui betrouwbaarder dan het volume aan het begin. Dit heeft directe gevolgen voor hoe regenvoorspellingen gebruikt kunnen worden binnen sturingsregels. Het risico dat kleeft aan het gebruik van regenvoorspellingen is direct gelinkt aan de nauwkeurigheid van deze voorspellingen voor sturingsregels.
- De grootschalige transities die stedelijke gebieden de komende decennia zullen ondergaan, kunnen een grote impact hebben op het functioneren van de sturingsmethode. Met name de potentie van RTC zal sterk veranderen. Als dit niet frequent geanalyseerd wordt, dan kan het zijn dat de sturing ofwel slechter functioneert dan gedacht (en dus tot meer overstortingsvolume leidt dan andere vormen van sturing), ofwel de potentie van sturing niet haalt. Als de sturing meebeweegt met gebieds- en klimaatontwikkelingen, dan kunnen deze potentiële verliezen tegengegaan worden.

Uit deze conclusies zijn de volgende lessen te trekken voor de praktijk. Dit zijn aanbevelingen voor waterschappen, gemeenten, adviesbureaus, leveranciers en andere stakeholders als het gaat om de (langetermijn)-implementatie van real-time control:

- Om real-time control te implementeren kunt u het beste beginnen met simpele maar slimme sturingsregels. Hiervoor is het nodig om een meetnetwerk op te zetten. Met simpele sturing kan het functioneren van het afvalwatersysteem sterk verbeteren. Real-time-optimalisatie kunt u het beste stapsgewijs implementeren, te beginnen met simpele regels. Vervolgens kunt u dit zo nodig langzaam uitbreiden tot een volledig geautomatiseerde, geoptimaliseerde sturing. Deze gefaseerde vorm van implementeren kan beginnen met het toepassen van model-gestuurde en voorspellende optimalisatie van enkele actuatoren, waarmee u kunt experimenteren zonder grote risico's.

- Het is noodzakelijk om onzekerheden mee te nemen bij het ontwerpen van een RTC-strategie. Onzekerheden kunnen een significante invloed hebben op het uiteindelijke functioneren (de vermindering van overstortingsvolume) van de RTC-strategie. Dit kunt u tegengaan door een goed inzicht in de interacties tussen onzekerheden en de sturing. Het gaat hierbij met name om modelonzekerheden, maar ook een goed inzicht in het functioneren van pompgemalen en het meenemen van geobserveerde data kunnen mogelijke risico's en verliezen minimaliseren.
- U kunt regenvoorspellingen gebruiken in sturingsregels, mits u van tevoren een uitgebreide analyse van de effecten van de onzekerheden hebt uitgevoerd. Proactieve sturing, waarbij de voorspelde regen meegenomen wordt in de real-time-sturing, kan tot een beter functionerend systeem leiden. U moet daarbij wel expliciet rekening houden met de onzekerheid in de voorspellingen. Als dit niet gebeurt, dan kan het zijn dat de 'verbeterde' sturing een minder goed functioneren van het systeem tot gevolg heeft. Lokale dynamieken kunnen leiden tot verschillende voorspellingsnauwkeurigheden, en brengen dus ook verschillende risico's met zich mee. Het is essentieel om via modelresultaten een goed beeld van deze risico's te krijgen, om voorspellende sturing te kunnen implementeren.
- Langetermijnveranderingen in de inrichting van het stedelijke gebied kunnen invloed hebben op het functioneren van RTC, maar mogen geen barrière vormen voor het implementeren van RTC. Wanneer u met enige regelmaat (dit kan eens in de vijf jaar zijn) de regels en de relevante modellen controleert, zorgt u ervoor dat de sturing op de lange termijn goed blijft functioneren. Daarnaast is het noodzakelijk dat diegene die verantwoordelijk is voor de uitvoering van de sturing direct communiceert met degene die verantwoordelijk is voor de inrichting van de openbare ruimte. Het is raadzaam om een logboek bij te houden van de geplande en gedane veranderingen die invloed kunnen hebben op de afvoer van een afvalwatersysteem.

Literatuurlijst

- Bertrand-Krajewski, J.L., Clemens-Meyer, F. and Lepot, M., 2021, Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug and pray.. IWA Publishing. Gratis e-book: <https://www.iwapublishing.com/books/9781789060102/metrology-urban-drainage-and-stormwater-management-plug-and-pray>.
- Brevoord, S.L., 2022, RTC strategy reducing the ecological impact of an urban drainage system. MSc Thesis, Delft University of Technology, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f718b950-385f-4223-af0b-fce839dd6a43>
- Van Daal-Rombouts, P.M.M., 2017, Performance evaluation of real time control in urban wastewater systems. PhD Thesis, Delft University of Technology, <https://doi.org/10.4233/uuid:b1d5d733-b271-474f-ad32-b5fd-de257161>.
- Imhoff, R.O. 2022, Rainfall Nowcasting For Flood Early Warning. PhD Thesis, Wageningen University and Research, <https://doi.org/10.18174/573867>. Ingildsen, Pernille, and Gustaf Olsson, Smart water utilities: Complexity made simple. IWA Publishing, 2016.
- Langeveld, J.G., Liefing, H.J., Schoester, J., Schepers, J. & De Groot, A.C., 2022, 'Development and implementation of a large-scale real time control system: the Rotterdam case study'. In: Proceedings of the International Conference on Urban Drainage Modelling, USA.
- M. Schütze, V. Erbe, U. Haas, M. Scheer & M. Weyand, 2008, 'Sewer system real-time control supported by the M180 guideline document', Urban Water Journal, 5(1), 69-78, link: <https://doi.org/10.1080/15730620701754376>.
- Schilperoort, R.P.S., 2011. Monitoring as a tool for the assessment of wastewater quality dynamics. PhD Thesis, Delft University of Technology, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A74d9e8b4-5d71-4eaf-82da-fece9e9eba56?collection=research>
- Van der Werf, J.A., Kapelan, Z. and Langeveld, J.G., 2023, 'Predictive heuristic control: inferring risks from heterogenous nowcast accuracy'. Water, Science and Technology, 87(4): 1009. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2023.027>.

Colofon

STOWA en Stichting RIONED in het kort

Stichting RIONED is de koepelorganisatie voor stedelijkwaterbeheer in Nederland. Wij zijn er voor en door alle relevante overheden en bedrijven. Inspelend op nieuwe opgaven en mogelijkheden komen wij op voor het belang van stedelijk waterbeheer: goed zorgen voor afval-, hemel- en grondwater in de steden en dorpen. Stichting RIONED bevordert innovatie, nieuwe kennis en verspreiding van kennis. Wij begrijpen en ondersteunen de vakwereld.

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

© 2023 Stichting RIONED en STOWA

Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

disclaimer

Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van deze publicatie.

promotoren

Prof. Dr. Ir. Z. Kaplan (Technische Universiteit Delft)

Dr. ir. J.G. Langeveld (Technische Universiteit Delft)

auteur

Dr. ir. J.A. Van der Werf (Technische Universiteit Delft)

omslagfoto

Dr. ir. J.A. Van der Werf (Technische Universiteit Delft)

vormgeving

Marieke Eijt, gaw ontwerp+communicatie b.v., Wageningen

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

rapportnummer

2023-20

isbn/ean

9789073645851

