

Samenvatting proefschrift Marco van Bijnen:

De invloed van rioleringsonderhoud
op droge voeten en volksgezondheid

Samenvatting proefschrift Marco van Bijnen:

De invloed van rioleringsonderhoud op droge voeten en volksgezondheid

Voorwoord

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *The impact of sewer condition on the performance of sewer systems* van Marco van Bijnen. Hij is de vijfde die binnen het Kennisprogramma Urban Drainage met succes een promotieonderzoek heeft afgerond. Dit door de afvalwatersector gefinancierde meerjarig onderzoeksprogramma levert wetenschappelijke kennis voor belangrijke vraagstukken én wetenschappelijk geschoolde vakkrachten voor stedelijk waterbeheer.

Het onderzoek beoogde inzicht in de relatie tussen de onderhoudstoestand van afzonderlijke objecten (buizen en putten) en het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel als geheel. Marco ontwikkelde een methodiek voor evaluatie van de effecten van de onderhoudstoestand op het functioneren van stedelijke afvalwatersystemen en paste deze methodiek toe op rioolstelsels in Tuindorp (wijk in gemeente Utrecht) en Loenen.

Het onderzoek laat zien dat met de gangbare wijze van beheer het functioneren van rioolstelsels in de praktijk fors achter kan blijven bij het theoretisch functioneren. De veiligheid voor water op straat, die in het ontwerp normaliter ligt op een herhalingsdij van 2 jaar, kan door achterstallig onderhoud in de praktijk verschuiven naar 1 jaar. Een belangrijk gevolg hiervan is dat het risico op contact met rioolwater in de praktijk groter is dan gedacht. Dit leidt tot de aanbeveling dat gemeenten met 'risicogestuurd beheer' de nadruk meer op de risico's en de prestaties moeten leggen dan op besparing van de kosten.

De voorliggende samenvatting presenteert de voor de praktijk meest relevante resultaten van het uitgevoerde promotieonderzoek. Het proefschrift met de detailinformatie en de wetenschappelijke onderbouwing van de resultaten kunt u via <http://repository.tudelft.nl/> vrij downloaden.

Wij wensen u veel leesplezier en inspiratie toe.

Hugo Gastkemper, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA
September 2019

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en aanleiding	7
1.2	Onderzoek	8
1.3	Leeswijzer	8
2	Invloed van de onderhoudstoestand van een rioolsysteem op het hydraulisch functioneren	9
2.1	Onderzoeksgebieden	9
2.2	Gebruik praktijkwaarnemingen in modellering	10
2.3	Modelopzet	10
2.4	Resultaten Monte Carlo-simulaties	12
2.5	Conclusies gevoeligheid onderhoudstoestand op water op straat	15
3	Het gebruik van modelkalibratie als indicatie voor reinigen en inspecteren van een rioolsysteem	16
3.1	Modelkalibratie	16
3.2	Case Tuindorp	17
3.3	Hydrodynamisch model en kalibratie Tuindorp	18
3.4	Conclusies toepassing modelkalibratie voor noodzaak tot onderhoud	24
4	Grafenmethode voor het identificeren van kwetsbare locaties met betrekking tot het hydraulisch functioneren	25
4.1	Grafentheorie	25
4.2	Grafentheorie als toepassing in rioolssystemen	26
4.3	Pilots en resultaten Tuindorp en Loenen	27
4.4	Conclusies grafenmethode voor identificeren belangrijke locaties	28
5	Gezondheidsrisico's bij meer water op straat als gevolg van onderhoudstoestand	29
5.1	Kwantificering gezondheidsrisico's in relatie tot onderhoudstoestand	29
5.2	Gemiddelde kans op infectie wijken Tuindorp en Loenen	31
5.3	Conclusie gezondheidsrisico's bij toename water op straat	32
6	Conclusies, aanbevelingen en toepassing in de praktijk	33
6.1	Conclusies	33
6.2	Aanbevelingen en gebruik in de praktijk	34
	Dankwoord	35
	Literatuur	36
	Wetenschappelijke publicaties die uit het onderzoek zijn voortgekomen	37
	Colofon	38

1 Inleiding

Goed functionerende riolering is een essentiële voorwaarde voor een gezond leefklimaat in steden en dorpen. Riolering levert ten eerste een bijdrage aan de volksgezondheid door het zorgen voor de afvoer van afvalwater, waardoor het contactrisico met ziekteverwekkende organismen wordt beperkt. Ten tweede zorgt de riolering voor ‘droge voeten’, door het verwerken van hemelwater, waarbij de oppervlaktewaterkwaliteit zo veel mogelijk wordt ontzien.

1.1 Achtergrond en aanleiding

Jaarlijks wordt in Nederland 1,5 miljard euro besteed aan het in stand houden en verbeteren van de riolering. Om dit geld goed te besteden, gaan steeds meer gemeenten aan de slag met ‘risicogestuurd beheer’. Een noodzakelijke voorwaarde voor risicogestuurd beheer is inzicht in de relatie tussen de toestand en het functioneren van de infrastructuur. Om ervoor te zorgen dat rioolstelsels volgens een gewenst serviceniveau blijven functioneren, is onderhoud noodzakelijk. Inzicht in de toestand en het functioneren van een rioolsysteem is daarbij een voorwaarde. Om de (onderhouds)toestand te bepalen is het gebruikelijk om riolen te reinigen en rioolinspecties uit te voeren en op basis daarvan gerichte acties te nemen. Om inzicht te krijgen in het functioneren van rioolsystemen (wateroverlast en emissies) worden meestal hydraulische berekeningen uitgevoerd met rekenmodellen. Ook praktijkmetingen in de riolering, gericht op het in beeld brengen van de werking van rioolsystemen, worden steeds vaker toegepast.

Als met hydraulische berekeningen de riolering op wateroverlast en vuilemissie beoordeeld wordt, wordt ervan uitgegaan dat er geen sediment en andere belemmeringen voor het hydraulisch functioneren aanwezig zijn. Zoals wortelingroei, oppervlakteschade, obstakels, aangehechte en bezonken afzettingen. Dat hiermee meestal geen rekening wordt gehouden bij het maken van (ontwerp)berekeningen met modellen, komt voornamelijk door een gebrek aan bruikbare gegevens. Het is dan ook niet vreemd dat resultaten van modelberekeningen niet altijd overeenkomen met praktijkwaarnemingen. *Stanić et al. (2017)* toonde bijvoorbeeld al aan dat corrosie kan leiden tot aanzienlijk hogere hydraulische ruwheden in verouderde betonnen buizen.

Het inspecteren van riolen gebeurt over het algemeen met camera-inspecties. Deze visuele camera-inspecties geven informatie over de aangetroffen schades en belemmeringen in riolen en inspectieputten. Maar niet over de invloed hiervan op het stromen van water door de riolen. De toestand van deze afzonderlijke onderdelen van een rioolstelsel beïnvloedt de hydraulische prestaties van het rioolstelsel. Een slechte toestand kan leiden tot meer wateroverlast. In de huidige praktijk is onvoldoende bekend wat de operationele toestand van afzonderlijke objecten betekent voor de hydraulische prestaties op systeemniveau van een rioolstelsel. Blootstelling aan water op straat vormt een gezondheidsrisico voor mensen. Dit komt door de aanwezigheid van ziekteverwekkende organismen in water op straat afkomstig uit gemengde riolering (figuur 1.1).

Figuur 1.1 Water op straat vanuit de gemengde riolering door hevige neerslag



1.2 Onderzoek

Om het hydraulisch functioneren van rioolstelsels en de daarbij passende onderhoudsmaatregelen te beoordelen, is meer informatie nodig over de relatie tussen de onderhoudstoestand van afzonderlijke objecten (buizen en putten) en de invloed op het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel als geheel.

Dit onderzoek gaat over de invloed van een operationele momentane toestand van een rioolstelsel op het hydraulisch functioneren van een rioolstelsel als geheel. Aanvullend is een methode ontwikkeld om met behulp van modelkalibratie inzicht te krijgen in veranderend systeemgedrag. Daarnaast laat het onderzoek zien dat met de gangbare wijze van beheer het functioneren van rioolstelsels in de praktijk fors achter kan blijven bij het theoretisch functioneren. De veiligheid voor water op straat, die in het ontwerp normaliter ligt op een herhalingsperiode van 2 jaar, kan door achterstallig onderhoud in de praktijk verschuiven naar 1 jaar. Een belangrijk gevolg hiervan is dat het risico op contact met rioolwater in de praktijk groter is dan gedacht. Dit leidt tot de aanbeveling dat gemeenten met 'risicogestuurd beheer' de nadruk meer op de risico's en de prestaties moeten leggen dan op besparing van de kosten.

In deze samenvatting van het proefschrift *The impact of sewer condition on the performance of sewer systems* leest u de voor de praktijk meest relevante conclusies en de aanpak waarmee de conclusies tot stand zijn gekomen. Als u interesse heeft in meer gedetailleerde informatie en onderbouwing, dan kunt u dit lezen in het vrij te downloaden proefschrift: <http://repository.tudelft.nl>.

1.3 Leeswijzer

Inzicht in het hydraulisch functioneren van ondergrondse rioolssystemen en het kunnen detecteren van afwijkend systeemgedrag geeft riool- en beleidsmedewerkers de noodzakelijke kennis voor het inrichten van 'risicogestuurd beheer'. Om hier invulling aan te geven is in hoofdstuk 2 de invloed van vervuiling en sediment in het riool op de hydraulische prestaties van een systeem bestudeerd. Hoofdstuk 3 beschrijft de toepassing van modelkalibratie om afwijkingen van het hydraulisch functioneren te kunnen identificeren. Hoofdstuk 4 introduceert de grafentheorie om het hydraulisch functioneren van een rioolstelsel op de meest kritische locaties te kunnen bewaken. Hoofdstuk 5 gaat in op de gevolgen van de onderhoudstoestand op gezondheidsrisico's in stedelijk gebied. Hoofdstuk 6 zet de conclusies en aanbevelingen op een rij.

2 Invloed van de onderhoudstoestand van een rioolsysteem op het hydraulisch functioneren

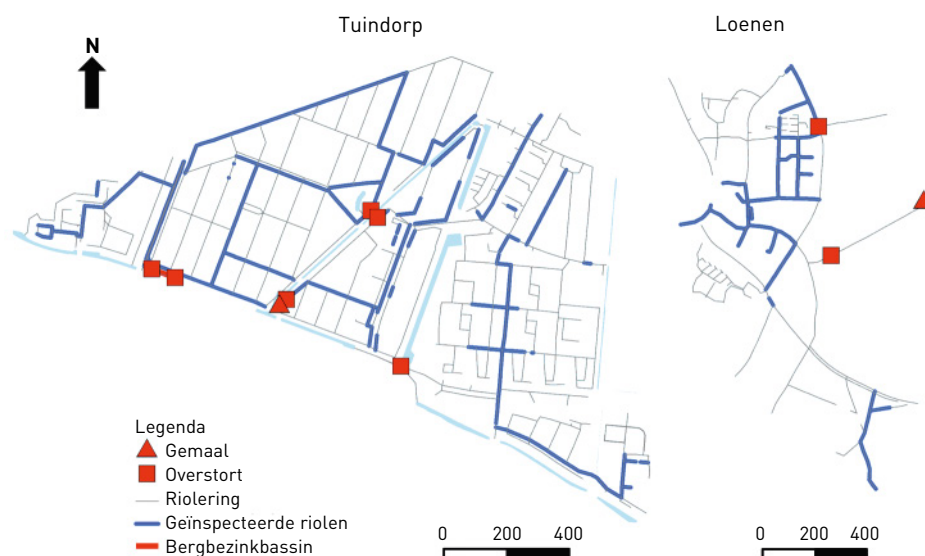
In de praktijk gedragen rioolsystemen zich nooit precies hetzelfde als gesimuleerd in theoretische rekenmodellen. Een rekenmodel gebruikt immers een beschrijving van de werkelijkheid met daarin aannames en vereenvoudigingen. Die beschrijving van de werkelijkheid bestaat uit de geometrie van het stelsel en wiskundige beschrijvingen van optredende processen. Naast deze geometrische en wiskundige beschrijvingen van de werkelijkheid, heeft ook de onderhoudstoestand van de riolering invloed op het hydraulisch functioneren ervan in de praktijk. Toch wordt het hydraulisch functioneren in simulaties beoordeeld alsof er geen gebreken, obstakels en sediment aanwezig zijn. Dit hoofdstuk kwantificeert voor twee verschillende rioolstelsels het effect van onderhoud van de riolering op het hydraulisch functioneren. Hierbij is gekeken naar het functioneren van het totale rioolstelsel als één geheel en niet naar de werking van afzonderlijke objecten. Er is gebruik gemaakt van een theoretisch rekenmodel, gevoed met in het veld verzamelde data over de onderhoudsconditie van het systeem.

2.1 Onderzoeksgebieden

In twee gemengd gerioleerde wijken is de invloed van een operationele onderhoudstoestand (aanwezigheid van vervuiling van onder andere wortels, afzettingen en sediment) van het riool op stedelijke wateroverlast op netwerkniveau onderzocht. Het betreft de woonwijken Tuindorp in de gemeente Utrecht en Loenen in de gemeente Apeldoorn. In tabel 2.1 ziet u de kenmerken en in figuur 2.1 de structuur van beide onderzoeksgebieden.

Kenmerken	Tuindorp	Loenen
Maaiveldverloop	Vlak	Licht hellend
Structuur systeem	Vermaasd	Gedeeltelijk vertakt
Maaiveldhoogte (m NAP)	0,75 - 2,25	17,8 - 28,6
Lengte riolering (km)	28,8	12,3
Afvoerend oppervlak (ha)	56,9	23,4
Aantal externe overstorten	5	2
Berging (mm)	8,2	3,9
Bergbezinkbassin (mm)	1,4	0

Tabel 2.1 Algemene kenmerken onderzoeksgebieden Tuindorp en Loenen



Figuur 2.1 Structuur onderzoeksgebieden Tuindorp (woonwijk Utrecht) en Loenen (woonwijk Apeldoorn)

2.2 Gebruik praktijkwaarnemingen in modellering

Informatie over de aanwezigheid van sediment en andere belemmeringen en verstoringen in riolsystemen (de onderhoudstoestand) is nodig om de invloed ervan op het stromen van (afval)water door leidingen en putten te kwantificeren. Hiervoor zijn visuele camera-inspecties uitgevoerd in een gedeelte van de riolsystemen van beide onderzoeksgebieden (figuur 2.1). Ook zijn de waargenomen hoeveelheden sediment binnen de gemeente Utrecht gebruikt.

Hoewel de afgelopen decennia veel onderzoek is gedaan naar het modelleren van morfologische processen (sedimentafzetting en -transport) in riolering, zijn de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van dergelijke modellen nog steeds zeer beperkt. Naar verwachting komen er op korte termijn geen modellen beschikbaar die praktisch toepasbaar zijn (*Ashley et al., 2004 en Schellart, 2007*). Daarom zijn in dit onderzoek waargenomen hoeveelheden sediment gebruikt als input voor het modelmatig kwantificeren van de invloed van sediment en andere belemmeringen en verstoringen op het hydraulisch functioneren van riolsystemen.

De gemeente Utrecht meet voorafgaand aan rioolreinigingsprojecten aanwezig sediment en slaat de aangetroffen hoeveelheden op in een database. Sediment is hier gedefinieerd als materiaal dat met de gebruikelijke reinigingsmethoden uit de riolering te verwijderen is. De dikte van een sedimentlaag wordt uitgedrukt in een percentage van de hoogte van de leiding (relatieve slibdikte). De in dit onderzoek gebruikte gegevensverzameling omvat slibwaarnemingen van 10.735 riolen. De waargenomen sedimentlaagdiktes zijn vertaald naar modelparameters (zie paragraaf 2.3), waarbij rekening is gehouden met de onzekerheid bij het waarnemen ervan. Om dit zo veel mogelijk te ondervangen, zijn alle waarnemingen ingedeeld in klassen.

De camera-inspectiebeelden zijn verwerkt volgens het ten tijde van het onderzoek algemeen gehanteerde classificatiesysteem (NEN-EN 13508-2 en NEN 3399). Er is gekeken naar de volgende toestandsaspecten:

- wortelingroei (BBA);
- oppervlakteschade (BAF);
- aangehechte afzettingen (BBB);
- bezonken afzettingen (BBC);
- andere obstakels (BBE).

De waargenomen toestandsaspecten zijn vertaald in parameters in de hydrodynamische rekenmodellen (zie paragraaf 2.3).

2.3 Modelopzet

Om systematisch de gevoeligheid te onderzoeken voor water op straat als gevolg van vervuiling en gebreken van een rioolstelsel, is gebruik gemaakt van Monte Carlo-simulaties met een gedetailleerd rekenmodel (InfoWorks®). De datasets die zijn gebruikt om de theoretische rioleringsmodellen van zowel Tuindorp als Loenen te maken, en het rioleringsmodel zelf, zijn uitgebreid geautomatiseerd en in het veld gecontroleerd om fouten zoveel mogelijk te elimineren. Hiervoor zijn de gegevens ten aanzien van structuur en geometrie, waaronder maaiveldhoogten en gemaalcapaciteiten, geverifieerd. Ook zijn de resultaten van berekeningen getoetst aan ontvangen meldingen en bijbehorende informatie met betrekking tot water op straat.

Wat is een Monte Carlo-procedure?

Een Monte Carlo-procedure is een simulatietechniek waarbij een fysiek proces niet één keer maar vele malen wordt gesimuleerd. Elke simulatie wordt uitgevoerd met steeds een andere set startcondities, uitgaande van reëel te verwachten omstandigheden. Het resultaat van de verzameling simulaties vormt een verdelingsfunctie die het hele gebied van mogelijke uitkomsten weergeeft.

Om binnen het onderzoek het effect van een onderhoudstoestand op het hydraulisch functioneren te kwantificeren, kreeg het rioleringsmodel bij elke nieuwe simulatie in de Monte Carlo-procedure een andere 'vervuilingsgraad'. Voor deze 'vervuilingsgraad' in het rioleringsmodel zijn waarden ingevoerd die gebaseerd zijn op in de praktijk waargenomen gebreken en hoeveelheden sediment (zie paragraaf 2.2). In de rioleringsmodellen zijn de gebreken en hoeveelheden sediment vertaald naar modelparameters. De hydraulische ruwheid is gebruikt om het effect van wortelingroei, oppervlakteschade, aangehechte afzettingen en bezonken afzettingen te simuleren (wrijvingsweerstand). Voor het simuleren van sediment is in het rioleringsmodel in de rioolleidingen een laag sediment aangebracht (sedimentlaagdikte).

Ook de grenzen voor de parametervariatie zijn bepaald op basis van praktijkwaarnemingen (visuele inspecties en slibwaarnemingen). Voor de hydraulische ruwheid en de sedimentlaagdikte is uitgegaan van een kansverdeling die is gebaseerd op deze praktijkwaarnemingen. Een kansverdeling is een grafische weergave van alle mogelijke voorkomende parameterwaarden en hun bijbehorende kans op optreden. Zo is een kansverdelingsfunctie gemaakt van alle waargenomen sedimentlaagdiktes die zijn opgeslagen in de database (zie paragraaf 2.2). Alle geregistreerde laagdiktes zijn hiertoe in klassen ondergebracht (frequentieverdeling) en de bijbehorende kans van voorkomen (relatieve frequentie) is berekend. Door deze beide parameters in een grafiek tegen elkaar uit te zetten, wordt een kansverdeling zichtbaar. In deze kromme kunnen we dan voor elke sedimentlaagdikte de kans op vóórkomen aflezen. Voor elke leidingdiameter en profielvorm (ei-vormig of rond) is op deze manier een kansverdeling gemaakt. Deze kansverdelingen zijn vervolgens gebruikt als input in de Monte Carlo-simulaties.

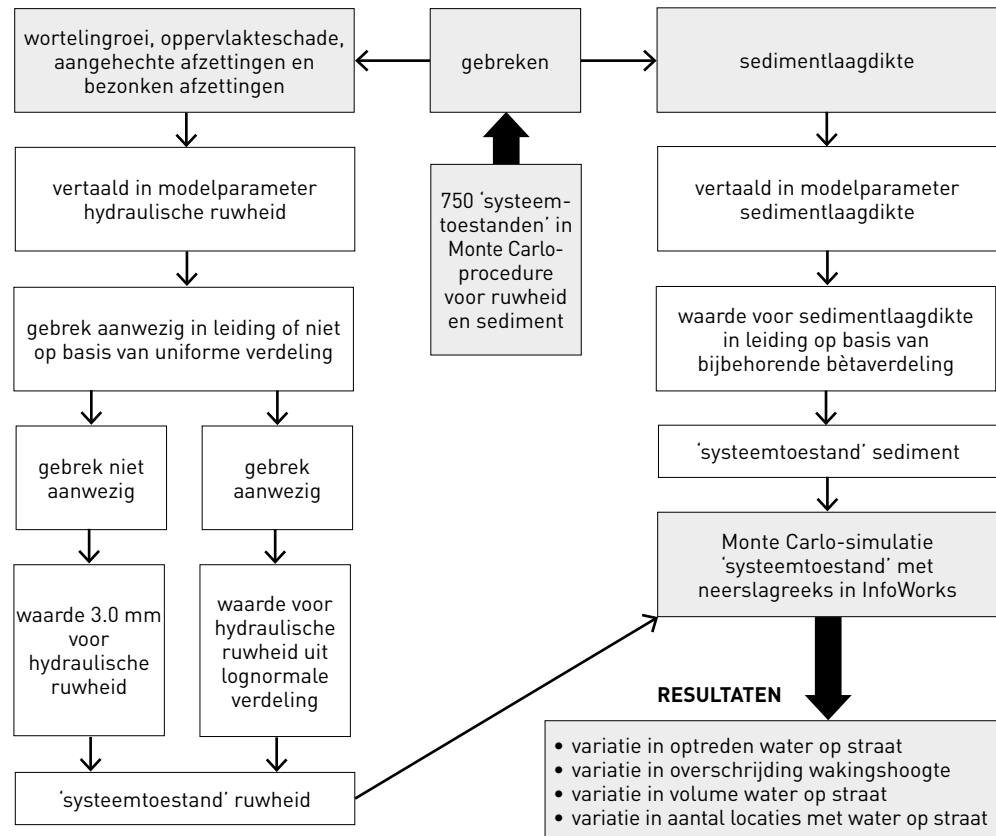
Er bestaan verschillende typen kansverdelingen en elk type heeft zijn eigen wiskundige eigenschappen. Door het onderbrengen van de kansverdelingen in één van de bestaande typen, wordt het ook mogelijk om gebruik te maken van de wiskundige eigenschappen die horen bij deze typen. Voor de hydraulische ruwheid is gekozen voor een lognormale verdeling. Voor de sedimentlaagdikte blijkt de bètaverdeling het beste bij de waarnemingen aan te sluiten.

Om met behulp van een Monte Carlo-procedure systematisch de gevoeligheid van de beide rioolstelsels voor water op straat als gevolg van aanwezige gebreken te onderzoeken, moest voor elke afzonderlijke leiding in elke simulatie worden bepaald of deze wel of geen gebrek had en of er sediment aanwezig was. Leidingen zonder gebrek kregen 3,0 mm als hydraulische ruwheid en voor de leidingen waar wel een gebrek werd gesimuleerd, werd een waarde voor de ruwheid getrokken uit de kansverdeling. Bij aanwezigheid van sediment is voor elke leiding, afhankelijk van het profieltype en afmeting, uit één van de kansverdelingen voor sediment een sedimentlaagdikte afgeleid.

De modelsimulaties zijn uitgevoerd volgens de werkmethoden van de Leidraad Rioleringsmodule C2100 (nu Kennisbank Stedelijk Water). Voor de bepaling van de neerslagbelasting is uitgegaan van de meerjarige neerslagreeksen 1955-1964 zoals waargenomen in de Bilt. Om de rekentijden te beperken is een netwerk van twintig computers ingericht (parallel rekenen). Daarnaast is gebruik gemaakt van filtertechnieken om het aantal door te rekenen gebeurtenissen in de neerslagreeksen te beperken. Dit filter reduceert het aantal buien voor Tuindorp tot 322 en voor Loenen tot 572.

Eén modelberekening in de Monte Carlo-simulatie houdt dus een simulatie van 322 of 572 buien in. De aandacht gaat uit naar gemiddelden en de mate van spreiding in de uitkomsten van de berekeningen (frequentie van water op straat en volumes). Daarom is het noodzakelijk om in de simulaties uit te gaan van een neerslagreeks. Het volstaat niet om met enkele neerslaggebeurtenissen te rekenen. Voor beide stelsels zijn zowel voor de hydraulische ruwheid als voor de sedimentlaagdikte afzonderlijke Monte Carlo-simulaties uitgevoerd van elk 750 modelberekeningen. In totaal zijn dus vier Monte Carlo-simulaties uitgevoerd. In figuur 2.2 staat de Monte Carlo-procedure beschreven. Elke afzonderlijke modelberekening heeft een eigen set parameterwaarden voor ruwheid of sediment voor iedere afzonderlijke leiding. Dit wordt de 'systeemtoestand' of 'onderhoudstoestand' genoemd. Deze gedefinieerde systeem- of onderhoudstoestand is een weergave van één enkele situatie zoals een systeem er in werkelijkheid bij kan liggen.

Figuur 2.2 Uitgevoerde Monte Carlo-procedure



2.4 Resultaten Monte Carlo-simulaties

De resultaten van de Monte Carlo-simulaties, gebaseerd op een tienjarige neerslagreeks, zijn geanalyseerd op de volgende parameters:

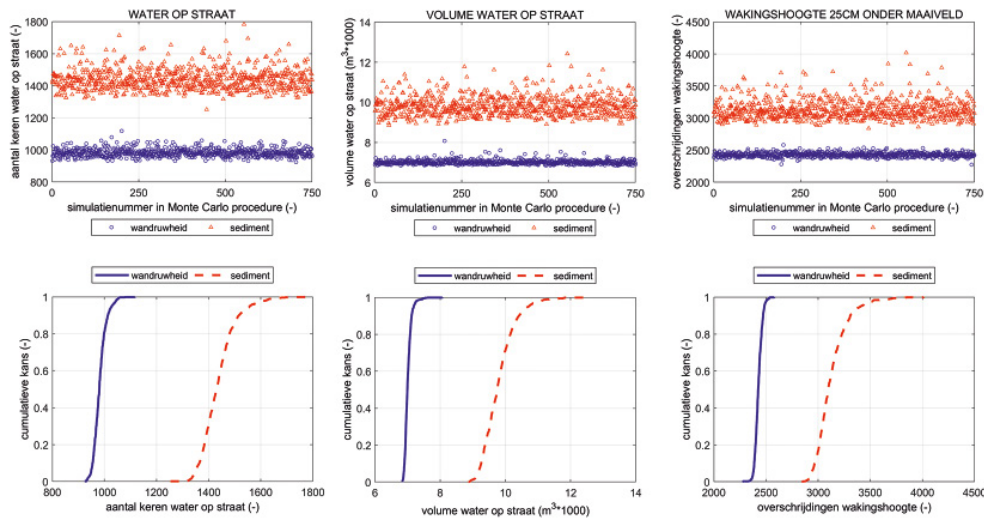
- variatie in optreden van water op straat;
- variatie in de overschrijding van de wakingshoogte (25 cm onder maaiveld);
- variatie in het totale volume water op straat;
- variatie in het aantal locaties waar water op straat optreedt.

Onder water op straat verstaan we hier het totaal aantal keren dat het waterpeil in de tienjarige neerslagreeks in het model boven maaiveld komt. Dit betekent dat wanneer er op tien knooppunten tijdens de simulatie op elk van de tien locaties vijf maal water boven maaiveld is berekend, dit als vijftig keer is geteld. Hetzelfde geldt voor het aantal overschrijdingen van de wakingshoogte. Onder het aantal locaties water op straat verstaan we het totaal aantal locaties waar in de tienjarige neerslagreeks water op straat is berekend. Elke locatie telt hierbij maar éénmaal mee. Een locatie waar het berekende waterpeil tien keer boven maaiveld komt, telt als één locatie met water op straat. In de figuren 2.3, 2.4 en 2.5 ziet u de resultaten voor beide rioolstelsels. In deze figuren is de variatie in de uitkomsten van de berekeningen, en daarmee de invloed van verschillende onderhoudstoestanden op de beschouwde parameters, in beeld gebracht.

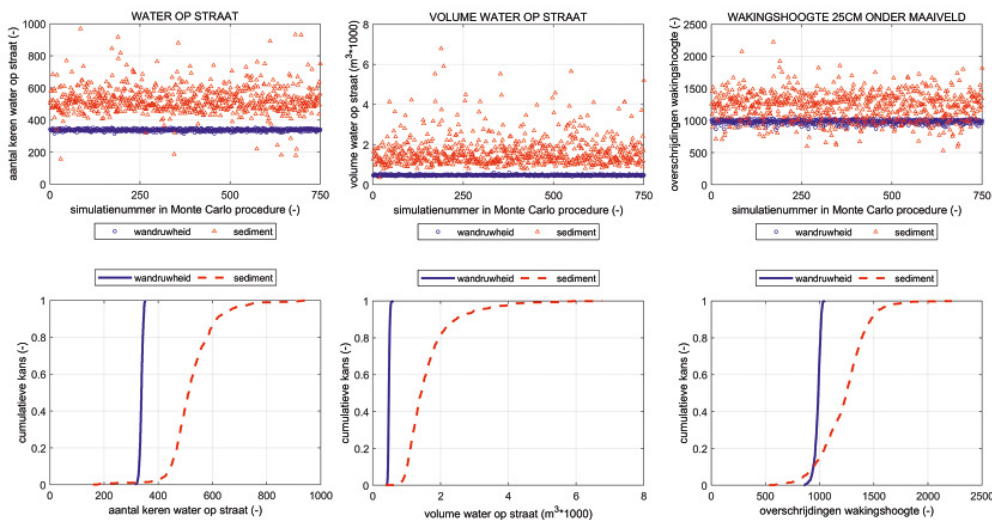
Figuur 2.3 geeft de resultaten voor het rioolstelsel in Tuindorp weer. Het algemene beeld voor Tuindorp is dat het gemiddelde aantal keren dat water op straat voorkomt als gevolg van de aanwezigheid van sediment aanzienlijk groter is, dan bij de berekeningen waarin alleen met een verhoogde hydraulische ruwheid is gerekend. Dit geldt ook voor de parameters volume water op straat en de overschrijding van de wakingshoogte. De gemiddelde herhalingsstijd van water op straat is circa eenmaal per jaar. Dit geldt voor het stelsel inclusief aanwezige gebreken. De uitschieters in figuur 2.3 zijn het gevolg van sedimentatie in cruciale leidingen tussen verschillende deelgebieden in het rioolstelsel van Tuindorp.

Figuur 2.4 toont de resultaten voor het rioolstelsel in Loenen. Vergeleken met de resultaten van Tuindorp is er een verschil in respons te zien tussen een vlak en vermaasd systeem (Tuindorp) en een min of meer hellend en deels vertakt systeem (Loenen). In beide stelsels heeft de aanwezigheid van sediment een groter effect dan een verhoogde hydraulische ruwheid (figuur 2.4). De effecten zijn voor het vlakke Tuindorp echter groter dan voor Loenen.

Dat heeft ook te maken met de wijze van modelleren (zie ook paragraaf 2.5). In een vlak gebied treedt overbelasting meestal op meerdere plaatsen tegelijk op terwijl in hellende gebieden slechts een beperkt aantal plaatsen met overlast te maken krijgt. De gevolgen in termen van schade kunnen wel groter zijn. Daar is echter in dit onderzoek niet naar gekeken.



Figuur 2.3 Berekende variatie in aantal keren water op straat, volume water op straat en overschrijdingen van de wakingshoogte voor Tuindorp

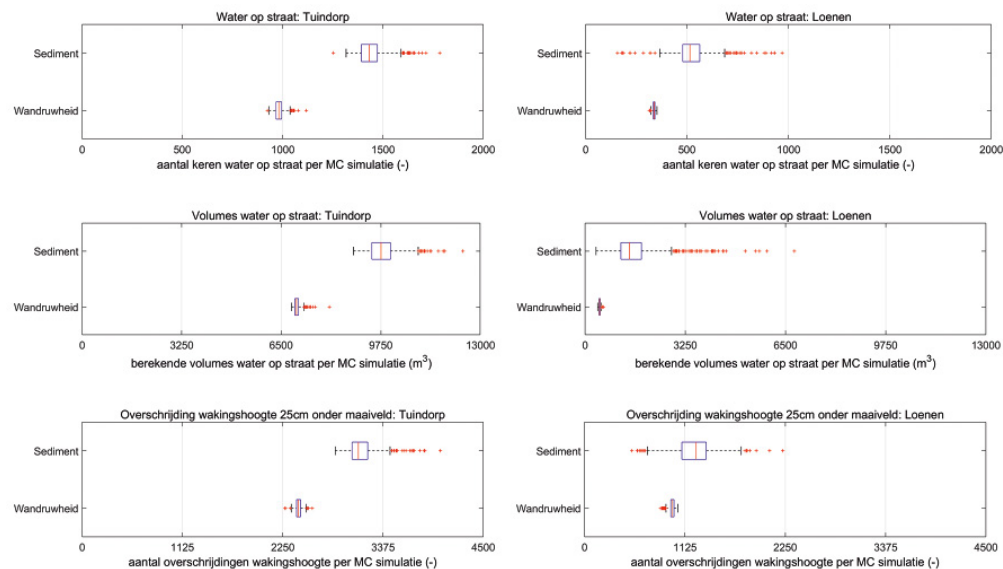


Figuur 2.4 Berekende variatie in aantal keren water op straat, volume water op straat en overschrijdingen van de wakingshoogte voor Loenen

Wat is een mediaan?

Onder de mediaan van een set getallen (in dit onderzoek uitkomsten uit de Monte Carlo simulaties) wordt die waarde verstaan waarvoor geldt dat 50% van de waarnemingsuitkomsten kleiner is. Bij het op volgorde van grootte rangschikken van de waarnemingsuitkomsten, is de mediaan bij een oneven aantal waarnemingsuitkomsten gelijk aan de middelste waarnemingsuitkomst. In het geval van een even aantal waarnemingsuitkomsten is de mediaan gelijk aan het gemiddelde van beide middelste waarnemingsuitkomsten. Het voordeel van de mediaan ten opzichte van het rekenkundig gemiddelde is dat deze minder gevoelig is voor uitschieters, zowel naar boven als naar beneden.

Figuur 2.5 Overschrijding van wakingshoogte, volume water op straat en optreden van water op straat voor beide rioolstelsels



Wat is een boxplot?

Voor het grafisch weergeven van statistische grootheden die iets zeggen over een kans en de mate van spreiding van een variabele, wordt hier gebruik gemaakt van een boxplot (ook wel box-whiskerplot genoemd). Een boxplot bestaat uit een box (de blauwe rechthoekjes in figuur 2.5) waarbinnen de helft van de waarnemingen valt. De rode verticale lijn die de box in twee delen verdeelt, is de mediaan. De whiskers zijn de zwarte lijnen die lopen vanaf de beide uiteinden van de box en die worden begrensd door de zwarte verticale lijnen. Deze whiskers geven de spreiding weer van de rest van de waarnemingen. Alle waarnemingen die niet als een uitschieter worden beschouwd, vallen binnen deze whiskers. Uitschieters in de waarnemingen zijn in figuur 2.5 afgebeeld als een rood plusteken. Door de verzameling waarnemingsuitkomsten van de Monte Carlo-simulaties in de vorm van een boxplot grafisch te presenteren, ontstaat inzicht in de verdeling van de waarnemingsuitkomsten per beschouwde parameter.

Tabel 2.2 laat het effect van hydraulische ruwheid en de aanwezigheid van sediment zien op de mediane waarden van hydraulische overbelasting in vergelijking met een 'schone' situatie zonder gebreken in het stelsel. De variatie in de hydraulische ruwheid is gebruikt om de effecten van oppervlakteschade, wortelingroei en afzettingen te simuleren (wrijvingsweerstand, geen verkleining van het doorstroomoppervlak).

Tabel 2.2 Effect van hydraulische ruwheid en sediment op de mediane waarden van water op straat karakteristieken in vergelijking met een situatie zonder gebreken

	Tuindorp		Loenen	
	Ruwheid	Sediment	Ruwheid	Sediment
Aantal keren water op straat	4%	52%	-1%	50%
Aantal locaties met water op straat	2%	10%	12%	78%
Volume water op straat	4%	45%	32%	302%

De toename in het aantal keren water op straat is voor beide stelsels vergelijkbaar (Tuindorp 52% en Loenen 50%). Dit is te verklaren doordat bij het oorspronkelijke ontwerp van de systemen gelijksoortige uitgangspunten zijn gebruikt. De afname (-1%) in Loenen bij variatie van de ruwheid wordt veroorzaakt door opstuwing in het stelsel, waardoor tijdelijk iets meer water wordt geborgen dan bij lagere ruwheden. Dit effect is ook wel bekend als dynamische berging. Hierdoor treedt er wat minder water op straat op ter plaatse van de laagtes in het maaiveld benedenstrooms nabij het gemaal en de overstort. De toename van het aantal locaties waar water op straat wordt berekend als gevolg van de introductie van gebreken, is significant groter voor Loenen dan voor Tuindorp. Dit geldt ook voor de berekende volumes.

2.5 Conclusies gevoeligheid onderhoudstoestand op water op straat

Analyse van de resultaten laat zien dat de aanwezigheid van wortelingroei, oppervlakteschade, aangehechte afzettingen, bezonken afzettingen en de aanwezigheid van slib/sediment een significant effect heeft op de frequentie waarmee hydraulische overbelasting plaatsvindt. In vergelijking met een volledig 'schoon' stelsel gaat het om een grote afname van de bescherming tegen 'natte voeten'. Ook is duidelijk dat de aanwezigheid van sediment een groter effect heeft dan een toename van de hydraulische weerstand. Dit is uiteraard geen conclusie die geldt voor alle stelsels, omdat de relatieve bijdrage van beide oorzaken per stelsel anders zal zijn. Deze significante invloed vanuit het ondergrondse rioleringsmodel is belangrijk bij het toetsen van rioolssystemen aan het regulier functioneren. Hiermee wordt niet het toetsen onder extreme neerslagsituaties bedoeld. Voor het regulier functioneren wordt getoetst aan de vastgestelde frequentie voor water op straat in beleidsplannen zoals een vGRP. Deze frequentie is meestal gesteld op eenmaal per twee jaar en wordt hoofdzakelijk bepaald door de neerslaggebeurtenissen die frequenter optreden dan de herhalingstijden die gebruik worden bij toetsing aan extreme neerslag. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat de frequentie van water op straat kan oplopen van eenmaal per twee jaar naar eenmaal per jaar als er te weinig onderhoud wordt gepleegd aan een rioolstelsel.

Dit onderzoek is uitgevoerd met een 1D-0D modeltype (zie ook Kennisbank Stedelijk Water). Dat wil zeggen dat er een 1D-strengenmodel is gebruikt, gekoppeld aan een 0D-model voor stroming over maaiveld. Als de hydraulische belasting de bergings- en afvoercapaciteit van het rioleringsmodel overschrijdt, wordt het water geborgen in een geschematiseerde kegel. Als het waterpeil na afloop van de neerslaggebeurtenis weer zakt, stroomt het water weer het rioleringsmodel in. De water op straat kegel is zo geschematiseerd dat hij het wegoppervlak en de trottoirs weergeeft. Het rioleringsmodel is hierbij het inloopmodel voor het oppervlaktemodel (kegel). Deze wijze van modelleren is geschikt om de gevoeligheid van de onderhoudstoestand in het ondergrondse rioolnetwerk te kwantificeren. Bovendien is het praktisch (nog) niet mogelijk om meerjarenreeksen door te rekenen, waarbij het ondergrondse rioleringsmodel gekoppeld is aan het bovengrondse maaiveldmodel (zogenaamd 1D-2D⁽⁺⁾ model, zie Kennisbank Stedelijk Water). Er heeft, aanvullend voor een aantal neerslaggebeurtenissen, een vergelijking plaatsgevonden tussen de berekende volumes van water op straat tussen de 1D-0D benadering en een 1D-2D modeltype. De berekende volumes per straat tussen beide modellen bleken redelijk goed overeen te komen.

3 Het gebruik van modelkalibratie als indicatie voor reinigen en inspecteren van een rioolsysteem

Bij het hydrodynamisch doorrekenen van rioolstelsels gaat men uit van het systeem zoals dat bekend is uit beheerdata. Daarbij houdt men géén rekening met omstandigheden als:

- De aanwezigheid van obstakels, zoals sedimentlagen of wortelingroei.
- Een toename van de hydraulische weerstand van leidingen, bijvoorbeeld door aantasting.

Het is echter bekend dat deze omstandigheden een belangrijk effect kunnen hebben op het hydraulisch functioneren (zie onder andere Stanić, 2017 en Saegrov, 2006). Deze benadering leidt ertoe dat berekeningen een ander beeld kunnen schetsen wat betreft het hydraulisch functioneren. In de praktijk heeft een slechte operationele toestand invloed op het hydraulisch functioneren en komt dit tot uitdrukking in de werkelijke frequentie, ernst en omvang van wateroverlast.

Het hydraulisch gedrag van een systeem verandert in de loop van de tijd. Dit kan worden gebruikt als uitgangspunt voor het nemen van besluiten over inspectie, reiniging of andere beheermaatregelen. Idealiter onderneemt een beheerder pas een beheeractie als het functioneren van een systeem niet meer aan de gestelde eisen voldoet. Dat betekent dat er maatregelen nodig zijn, zodra wordt geconstateerd dat de actuele hydraulische capaciteit van een systeem tot onacceptabele gevolgen leidt, zoals wateroverlast of een toename van lozingen via overstorten en uitlaten op ontvangend oppervlaktewater. In de huidige praktijk gebeurt reiniging en inspectie van systemen doorgaans:

- Met een vaste frequentie. In dit geval bestaat zowel de kans op onnodige activiteiten als op ‘te laat komen’. Dit brengt als regel hogere kosten met zich mee dan proactief handelen.
- Naar aanleiding van incidenten. Ook in dit geval is men ‘te laat’ en is er onnodige overlast en/of schade ontstaan.

Een alternatief hiervoor is het monitoren van de hydraulische capaciteit van een systeem. Het meten van het hydraulisch gedrag, in combinatie met modelkalibratie, levert een ‘hydraulische vingerafdruk’ op. Deze kan worden gebruikt om het moment van beheermaatregelen te optimaliseren. Veranderingen in de tijd van deze ‘vingerafdruk’ geven namelijk aanwijzingen over de aard en omvang en de mogelijke locatie van obstakels en vervuiling in het systeem.

In de volgende paragrafen leest u een beschrijving van deze methode en een toelichting en illustratie ervan met een casestudy.

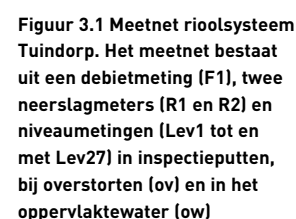
3.1 Modelkalibratie

Kalibratie is een proces waarbij de waardes voor verschillende modelparameters zodanig worden bepaald, dat de berekende waterstanden zo goed mogelijk overeenkomen met de gemeten waterstanden in de praktijk. In dit onderzoek gebruiken we voor de modelkalibratie alleen modelparameters die gerelateerd zijn aan de gemodelleerde processen. Parameters die te maken hebben met de structuur en geometrie van het systeem blijven in het kalibratieproces buiten beschouwing. Zij hebben ‘vaste’ waardes tijdens het kalibreren (bijvoorbeeld variatie in omvang van het afvoerend oppervlak). Deze ‘vaste’ parameters zijn gecontroleerd bij het valideren van het rioleringsmodel.

In de huidige praktijk is het kalibreren van rioleringsmodellen geschikt voor het opsporen van onvolkomenheden (zogenaamde bias of systematische fouten) in de meetgegevens en de dataset waarmee het rioleringsmodel is gemaakt. Het kalibreren van een rioleringsmodel voor een enkele neerslaggebeurtenis biedt geen zekerheid dat dit gekalibreerde model ook betrouwbare resultaten oplevert bij belasting van het model met andere neerslaggebeurtenissen. De overdraagbaarheid van de kalibratieparameters is namelijk maar beperkt mogelijk (Korving, 2004). Dit komt onder andere doordat de voorgeschiedenis van een neerslaggebeurtenis bij elke neerslaggebeurtenis anders is en de onderhoudstoestand in de tijd verandert.

Dat betekent dat naast het rioleringsmodel ook de meetdata van goede kwaliteit moeten zijn. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een gevalideerd rioleringsmodel en gevalideerde meetdata (zie paragraaf 3.2). Als er aan het einde van het kalibratieproces nog systematische fouten resteren, komen deze voort uit de afwijkingen tussen het theoretische rioleringsmodel en het werkelijke rioolsysteem. Dit verschil wordt gebruikt om verandering van systeemgedrag op te sporen. Op basis daarvan kan de noodzaak tot reinigen, inspecteren of andere beheermaatregelen worden vastgesteld.

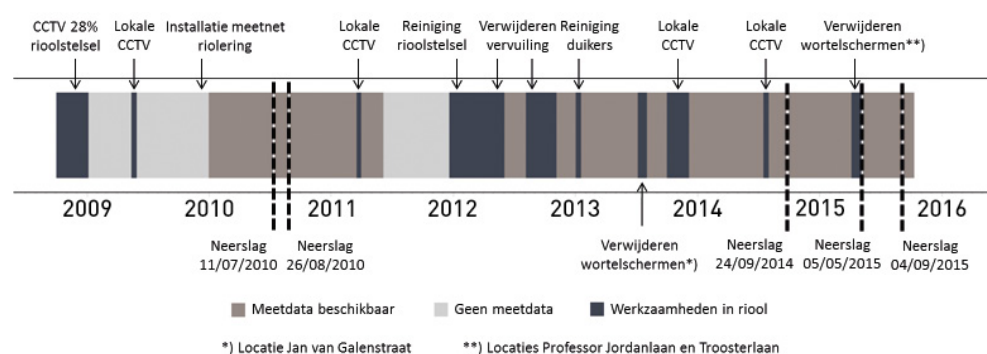
Voor het maken van de 'hydraulische vingerafdruk' is in het rioolsysteem van de wijk Tuindorp in Utrecht een meetnet geïnstalleerd (zie figuur 3.1). Tuindorp is een woonwijk met circa 10.000 inwoners. De wijk heeft een gemengd rioolstelsel, dat in de jaren '70 is aangelegd. Er zijn vijf externe overstortlocaties in het systeem. Zie figuur 2.1 en tabel 2.1 voor een overzicht en meer informatie over dit gebied. Het meetnet bestaat uit twee neerslagmeters, een debietmeting op de uitgaande persleiding van het gemaal en 27 locaties met een niveaumeter (figuur 3.1). De gehanteerde meetfrequentie is 1 keer per 5 minuten voor alle sensoren.



Van januari 2010 tot en met september 2015 is er gemeten (figuur 3.2). Naast metingen van het hydraulisch gedrag van het systeem zijn ook gegevens verzameld over de technische staat (paragraaf 2.2). In 2008 is 28% van de totale leidinglengte van het systeem gereinigd en een camera-inspectie uitgevoerd. In januari 2012 is het gehele systeem gereinigd en ontdaan van obstakels als wortelingroei, aangehechte afzettingen, et cetera. In juli 2013 is de aanwezige wortelingroei klasse 5 tussen Lev 26 en Lev 27 in de Jan van Galenstraat verwijderd. In april 2015 zijn de wortelschermen tussen de locaties Lev 12 en Lev 13 in de Professor Jordanlaan en tussen Lev 23 en Lev 24 in de Troosterlaan verwijderd.

In de periode april tot en met oktober 2015 is het systeem gemonitord om informatie te verzamelen om een hydrodynamisch model te kalibreren voor het 'schone' systeem. Dit model is vervolgens gebruikt voor de bepaling van de 'hydraulische vingerafdruk'. Voorafgaand aan de modelkalibratie zijn de meetgegevens gevalideerd, zoals beschreven in *Van Bijnen en Korving (2008)*.

Figuur 3.2 Beschikbaarheid van meetdata, uitgevoerde werkzaamheden en gebruikte neerslaggebeurtenissen meetnet rioolsysteem Tuindorp in de periode 1 oktober 2008 tot en met 6 oktober 2015

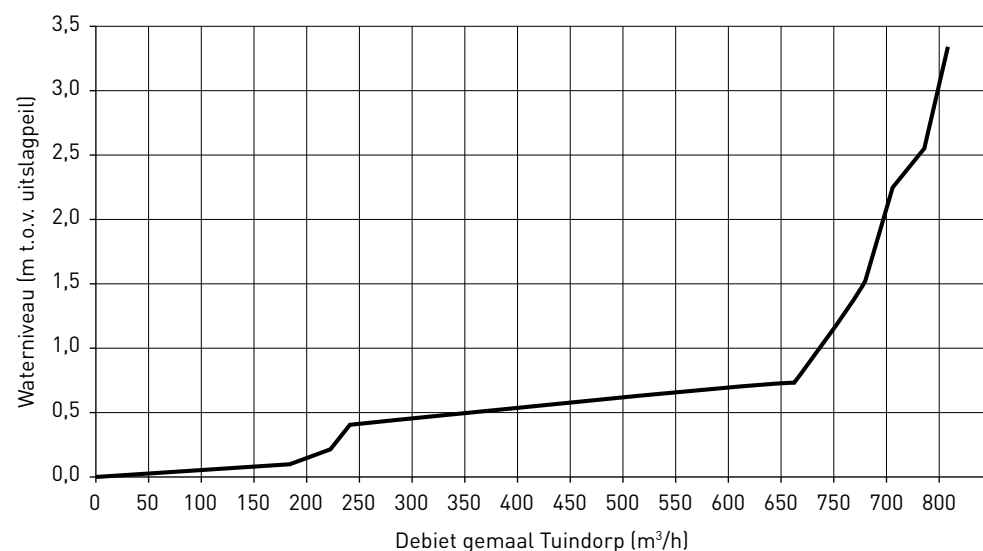


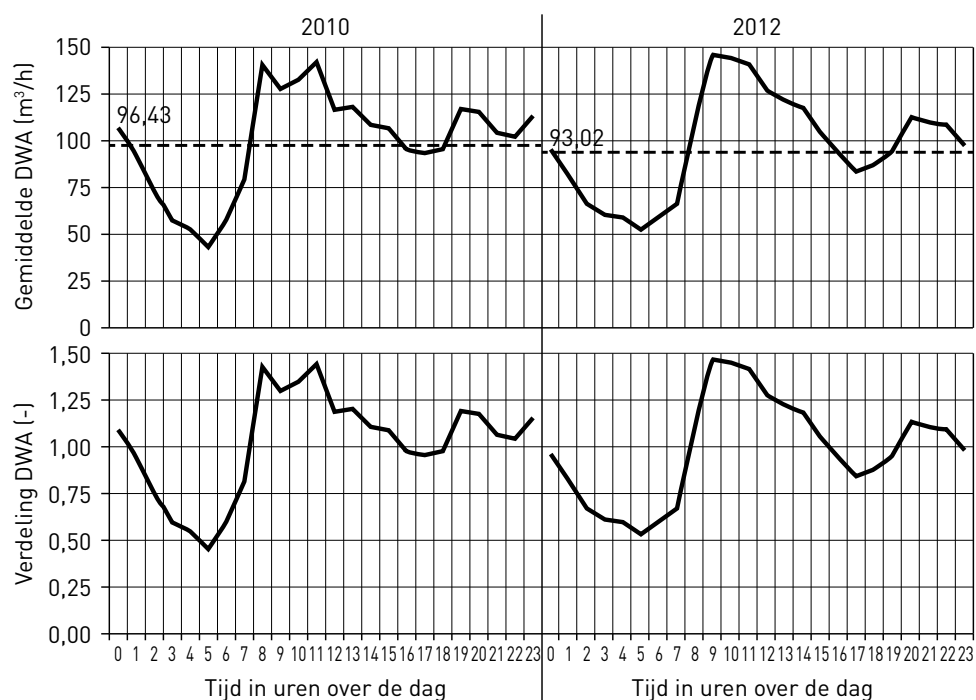
3.3 Hydrodynamisch model en kalibratie Tuindorp

Voor de hydrodynamische modellering is in de studie gebruik gemaakt van het rekenmodel InfoWorks© in combinatie met het NWRW 4.3 inloopmodel. Er is gewerkt volgens de methodes zoals beschreven door *Van Luijtelaar en Rebergen (1997)* en *Van Mameren en Clemens (1997)*. Om voldoende betrouwbare berekeningen te kunnen uitvoeren, is het rioleringsmodel voorafgaand aan het kalibreren gevalideerd. Alle invoergegevens over geometrie en structuur van het systeem en het aanwezige afvoerend oppervlak zijn gevalideerd volgens de methoden zoals beschreven door *Van Mameren en Clemens (1997)* en *Clemens (2001)*. Daarnaast heeft een intensieve veldinventarisatie plaatsgevonden voor het controleren en nalopen van onvolkomenheden.

Gebaseerd op metingen in de periode juni 2014 tot en met mei 2015 is een Q-H-relatie voor het gemaal afgeleid (zie figuur 3.3). Zoals u kunt zien, is het gedrag significant afwijkend van de bij de gemeente bekende pompcapaciteit van 540 m³/h. Het verloop van de droogweerafvoer (DWA) over de dag is bepaald op grond van de metingen tijdens DWA voor de jaren 2010 en 2012 (zie figuur 3.4). De kalibratie is uitgevoerd zoals beschreven in *Clemens (2001)*.

Figuur 3.3 Q-H-relatie gemaal Tuindorp. Afgeleid op basis van debiet- en niveaumetingen ter plaatse van het gemaal in de periode juni 2014 tot en met mei 2015





Figuur 3.4 Gemiddelde droogweerafvoer over de dag in de jaren 2010 en 2012

In de kalibratie is gekozen voor modelparameters die de omvorming van neerslag naar rioolloop (inloopmodel), de overlaatcoëfficiënt en wrijvingsweerstand weergeven. Hierbij is het belangrijk dat de praktijkmetingen ook informatie moeten leveren om het effect van wijziging van de betreffende parameter op de rekenresultaten (waterstand) te kunnen weergeven. Denk bijvoorbeeld aan de berging op vlakke daken en gesloten verhardingen als onderdeel van de omvorming van neerslag naar rioolloop. Op basis van een niveau-meting hoog in een inspectieput kan geen onderscheid worden gemaakt in het aandeel van de berging op het vlak dak en het aandeel van de berging op de gesloten verharding. Beide parameters zijn dan niet individueel te onderscheiden op basis van de metingen. In de kalibratieprocedure kunnen beide modelparameters dan niet onafhankelijk van elkaar worden geschat. Er is een correlatie tussen beide parameters. Bij een positieve correlatie betekent dit dat een vergroting van de ene parameter wordt gecompenseerd door ook een vergroting van de andere parameter, om de residuen zo klein mogelijk te houden. In de kalibratie kunnen beide modelparameters in dat geval als één gezamenlijke modelparameter worden meegenomen in plaats van ieder afzonderlijk.

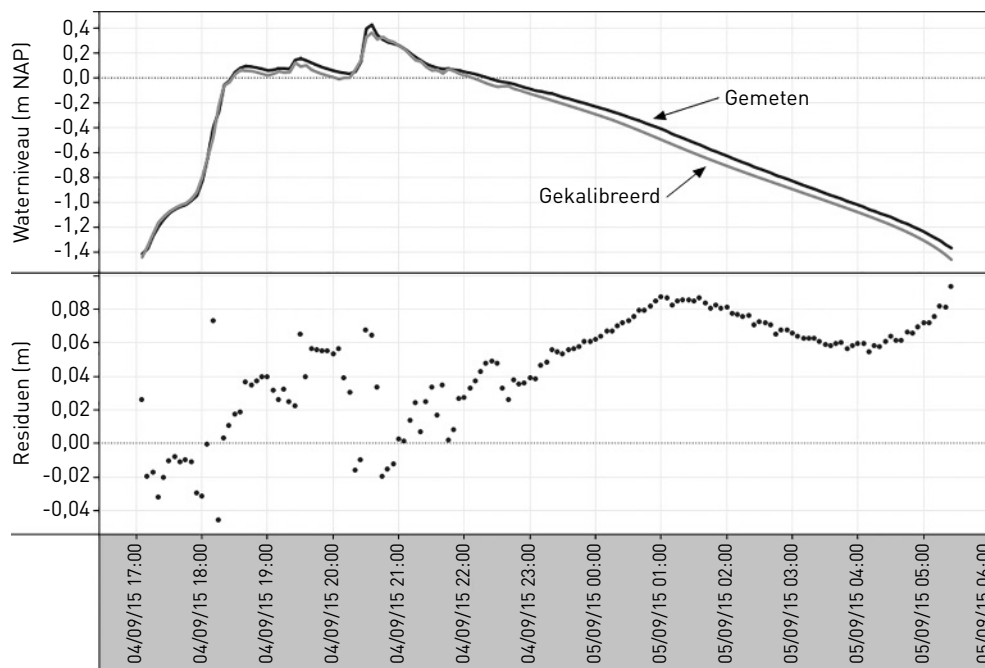
Op basis van genoemde correlatie tussen modelparameters is uiteindelijk een gereduceerde set individueel te onderscheiden modelparameters opgesteld die in het kalibratieproces is gebruikt. Deze set bestaat uit de modelparameters berging, infiltratie, afstroming, overlaatcoëfficiënt en wandruwheid.

In de eerste kalibratieronde is uitgegaan van vijf verschillende typen afvoerend oppervlak (volgens NWRW 4.3 inloopmodel). Uit de analyse van de resultaten bleek dat het model hiermee overgeparametriseerd was. Dat wil zeggen dat er te veel onbekende modelparameters aanwezig waren in verhouding tot de beschikbare informatie in de metingen. Daarom is het aantal typen afvoerend oppervlak in de tweede kalibratieronde teruggebracht tot drie (hellende daken, vlakke daken en uitgestrekt vlak oppervlak). Deze parameterreductie zorgde voor een duidelijke verbetering van het kalibratieresultaat. De belangrijkste reden hiervoor is dat er relatief veel grotere verharde oppervlakken aanwezig zijn, die een belangrijke bijdrage leveren aan de omvang van de rioolloop. Voorbeelden hiervan zijn schoolpleinen met een enkele kolk in het midden van het terrein, daken met veel berging en parkeerterreinen met een beperkt aantal kolken. De inloop wordt hier in grote mate bepaald door de hydrologische omstandigheden voorafgaand aan een neerslaggebeurtenis. Daarom is besloten het type 'uitgestrekt vlak' mee te nemen.

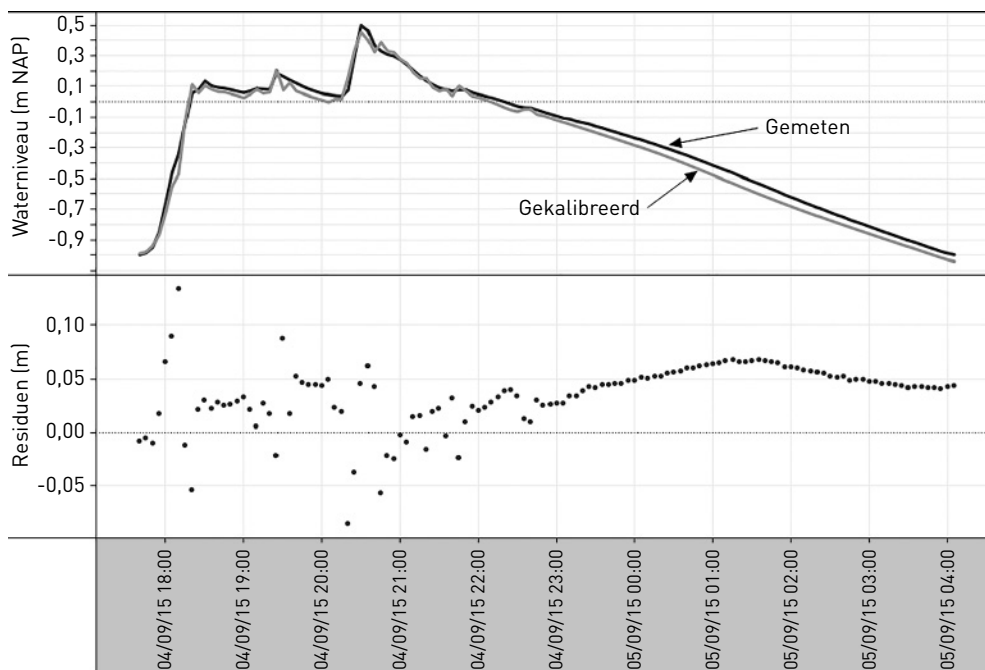
Van januari 2010 tot begin 2012 waren er verschillende bekende obstakels en gebreken in het systeem aanwezig (maat voor de operationele onderhoudstoestand). In de periode na 2013 zijn alle bekende obstakels verwijderd en is het systeem gereinigd. Het is daarna als 'schoon' beschouwd. Zowel voor de situatie inclusief aanwezige obstakels als voor de beschouwde 'schone' situatie is het rioleringsmodel voor een aantal geregistreerde neerslaggebeurtenissen

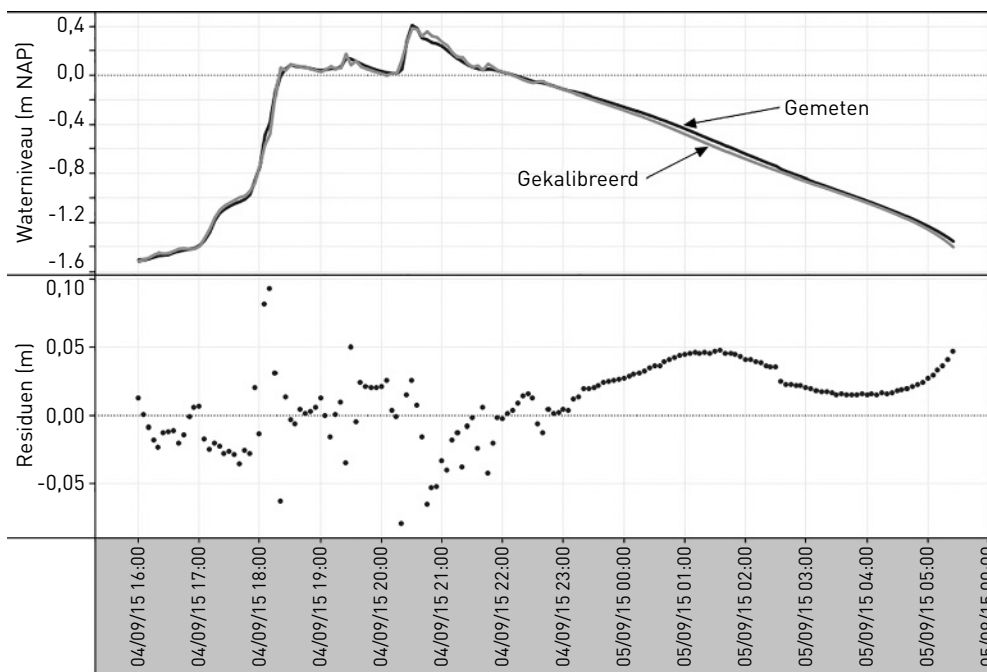
gekalibreerd. De figuren 3.5 tot en met 3.7 geven voor drie locaties het kalibratieresultaat voor het als 'schoon' beschouwde systeem weer. Er is een acceptabele overeenkomst tussen model en metingen, hoewel er nog steeds kleine afwijkingen zijn. Dit komt doordat het systeem in werkelijkheid niet 100% schoon is. Vooral tijdens het leegpompen na een neerslaggebeurtenis treden systematische afwijkingen in orde van grootte van enkele centimeters op. Het leegpompgedrag was niet de focus van dit onderzoek. Daarom is het gekalibreerde model gebruikt als referentie voor het gereinigde systeem zonder de bekende obstakels ('hydraulische vingerafdruk'). De weergave van waterniveaus tijdens vulling en maximale belasting (in verband met water op straat) wordt door het model goed gereproduceerd, met afwijkingen in de orde van grootte van centimeters.

Figuur 3.5 Gemeten en gekalibreerd waterpeil (boven) en residuen (onder) ter plaatse van Lev7 tijdens een neerslaggebeurtenis op 4 september 2015. Dit betreft het rioolsysteem waarin alle bekende obstakels uit het systeem verwijderd zijn. Niveaumeting Lev7 is in het zuiden van Tuindorp nabij het gemaal en een overstort geïnstalleerd. Zie ook figuur 3.1.



Figuur 3.6 Gemeten en gekalibreerd waterpeil (boven) en residuen (onder) ter plaatse van Lev10 tijdens een neerslaggebeurtenis op 4 september 2015. Dit betreft het rioolsysteem waarin alle bekende obstakels uit het systeem verwijderd zijn. Niveaumeting Lev10 is meer bovenstrooms in het rioolsysteem van Tuindorp geïnstalleerd. Zie ook figuur 3.1.





Figuur 3.7 Gemeten en gekalibreerd waterpeil (boven) en residuen (onder) ter plaatse van Lev19 tijdens een neerslaggebeurtenis op 4 september 2015. Dit betreft het rioolsysteem waarin alle bekende obstakels uit het systeem verwijderd zijn. Niveaumeting Lev19 is in het midden van het rioolsysteem van Tuindorp geïnstalleerd. Zie ook figuur 3.1.

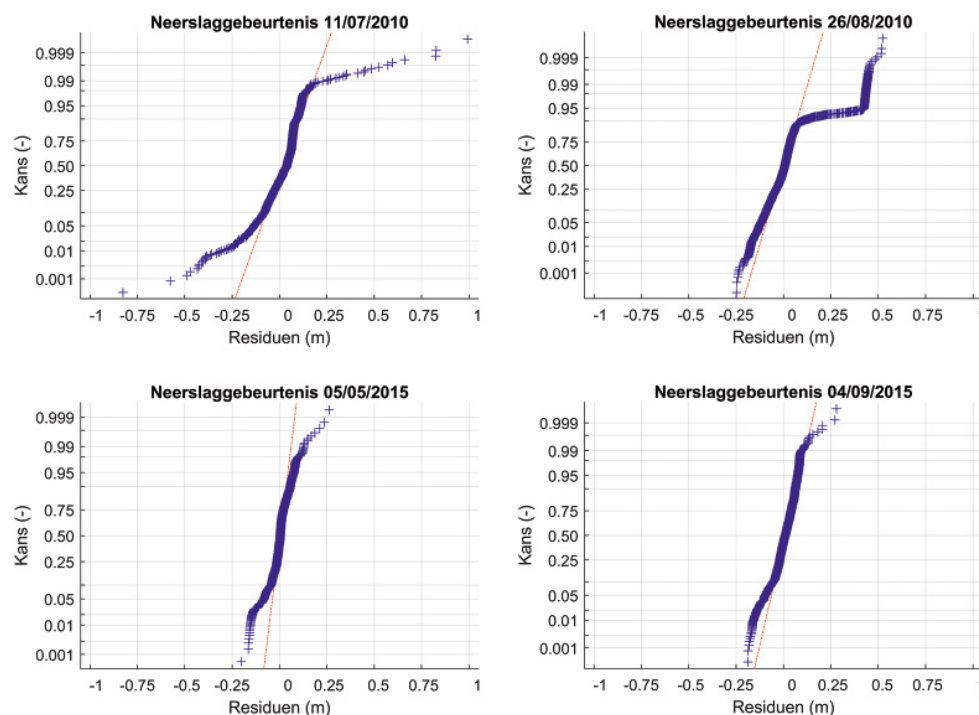
De 'juistheid' van een kalibratieresultaat wordt onder andere afgemeten aan de mate waarin de onderlinge residuen tussen gekalibreerd model en de metingen voldoen aan een normale (Gausse) verdeling. Als de verdelingsfrequentie van de resterende residuen afwijkt van deze normale verdeling, zijn er systematische afwijkingen aanwezig in ofwel de meetdata of het rioleringsmodel. In figuur 3.8 ziet u de verdeling van de residuen na kalibratie voor een aantal neerslaggebeurtenissen voor het referentiesysteem ('hydraulische vingerafdruk') en het systeem inclusief obstakels en gebreken. De afwijkingen ten opzichte van de normale verdeling (in het rood weergegeven in figuur 3.8) zijn zichtbaar. In figuur 3.8 is te zien dat de berekende residuen voor het systeem inclusief vervuiling significant grotere afwijkingen vertonen ten opzichte van de normale verdeling in vergelijking met de afwijkingen voor het systeem exclusief vervuiling. Dit gegeven kan worden gebruikt om veranderingen (het ontstaan van obstakels of vervuiling) in het systeem vroegtijdig op te sporen. Door deze residuen per meetlocatie in de tijd uit te zetten, wordt inzichtelijk op welke locaties tijdens welke tijdstippen de afwijkingen voorkomen en kan gericht worden gezocht naar de oorzaak.

Normale Gaussverdeling en residuen

Veel verschijnselen in de praktijk kunnen bij benadering wiskundig worden beschreven met behulp van een zogenaamde normaalverdeling (ook wel gaussverdeling genoemd). Deze verdeling is gebaseerd op twee parameters: de verwachtingswaarde en de standaardafwijking. De verwachtingswaarde is de waarde die de variabele 'gemiddeld genomen' heeft (hier in het geval van residuen gesteld op 0). Het gaat dan dus om een symmetrisch geconcentreerde verdeling van de residuen ten opzichte van de verwachtingswaarde (zie ook figuur 3.8). Afwijkingen van de verwachtingswaarde zijn dan steeds onwaarschijnlijker naarmate de afwijking groter is. Hier wordt van uitgegaan bij de berekening van de residuen tijdens een modelkalibratie. Afwijking hiervan is een aanduiding voor de aanwezigheid van systematische afwijkingen in meetdata en/of rioleringsmodel (zie ook figuur 3.8).

Eenvoudig gesteld: eerst wordt het systeem zonder obstakels en gebreken gekalibreerd. De hieruit volgende verdeling van de residuen dient als referentie voor een periode waarin het systeem kan vervuilen. Zodra er significante afwijkingen ontstaan in verdelingen van residuen na kalibratie van het systeem in deze periode, is dit een aanwijzing dat het systeemgedrag verandert en er mogelijk moet worden schoongemaakt.

Figuur 3.8 Verdelingsfunctie van de residuen na kalibratie (alle meetlocaties, in het blauw weergegeven), ten opzichte van een normaalverdeling (in het rood weergegeven), voor vier verschillende neerslaggebeurtenissen. Boven voor het systeem inclusief de waargenomen gebreken (neerslaggebeurtenissen in 2010) en onder voor het 'schoon' veronderstelde systeem ('hydraulische vingerafdruk', neerslaggebeurtenissen in 2015)



In het ideale geval vertonen residuen geen ruimtelijke correlatie. Daarom kan ook worden gekeken naar de aanwezige ruimtelijke correlatie tussen residuen. Als deze aanwezig is, is ook dit een indicatie voor verandering in het systeem. Het ontbreken van de ruimtelijke correlatie is echter alleen mogelijk als het model de processen perfect beschrijft, de geometrie van het systeem volledig bekend is en er geen systematische meetfouten zijn.

Dit is in de praktijk niet haalbaar.

Een grotere correlatie tussen de residuen van een aantal monitoringslocaties tijdens een neerslaggebeurtenis ten opzichte van een andere neerslaggebeurtenis is een indicatie van verandering in het systeem, onder de voorwaarde dat hetzelfde modelconcept, geometrie en kwaliteit van monitoringgegevens worden toegepast. Hier wordt de correlatie tussen residuen na kalibratie bedoeld, niet het gebruiken van de gekalibreerde modelparameters (als resultaat van de kalibratie van de eerste neerslaggebeurtenis) in de andere gebeurtenis. Het gaat er hierbij dus om dat er in het geval van de ene kalibratie grotere systematische afwijkingen worden gevonden dan bij de andere. Het analyseren van de ruimtelijke correlatie om systeemverandering te constateren werkt alleen met residuen en niet met de verschillen in waterstanden. Dit komt doordat er bij de wiskundige berekening van de residuen ook andere informatie met betrekking tot de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de resultaten meekomt.

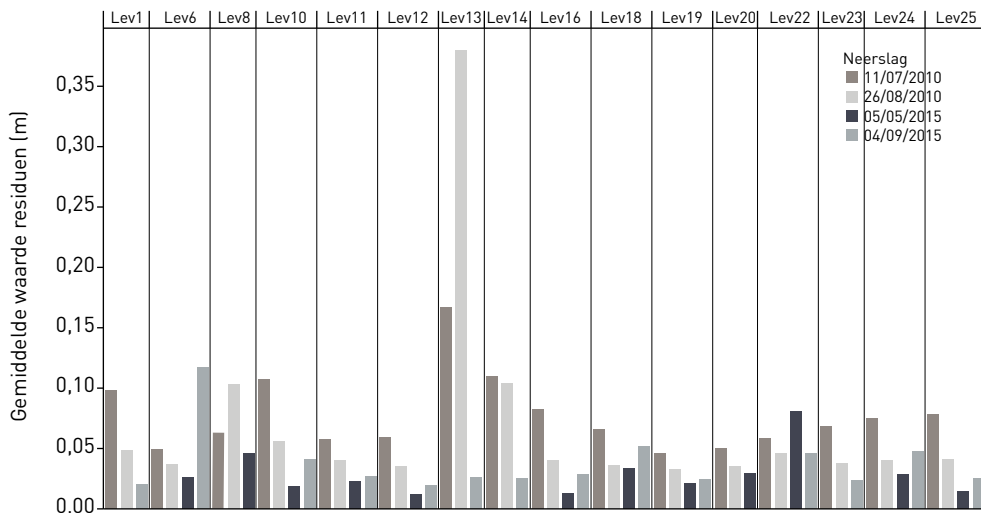
Voorbeeld aanwezigheid van ruimtelijk correlatie tussen residuen

Stel dat een rioolstelsel uit twee delen bestaat die door een buis zijn verbonden. Het waterniveau wordt in beide delen gemeten. Na het kalibreren van het model voor bui 1 is de correlatie tussen de residuen voor beide delen klein (bijvoorbeeld 0,1) en voor de wandruwheid is een waarde van 2 mm berekend. Stel nu dat er in de buis die de verbinding vormt tussen beide stelsels een laag sediment is ontstaan. Het gaat regenen en het rioleringsmodel wordt opnieuw gekalibreerd (bui 2). Nu wordt na kalibratie een veel grotere correlatie (bijvoorbeeld 0,9) en wandruwheid berekend (bijvoorbeeld 10 mm). De verhoogde wandruwheid geeft aan dat er een toename in weerstand is. De verhoogde correlatie geeft aan dat deze verhoogde weerstand wordt veroorzaakt door een obstructie tussen beide delen van het systeem (sedimentlaag). Het kalibratie-algoritme probeert het verschil in waterstanden te compenseren door het aanpassen van de wandruwheid en dit resulteert in een systematische afwijking tussen berekend en waargenomen waterpeil. Deze analyse kan ook worden uitgevoerd voor ruimtelijke correlatie in residuen tussen clusters sensoren. Bijvoorbeeld de correlatie tussen een cluster sensoren boven- en benedenstrooms van een obstakel.

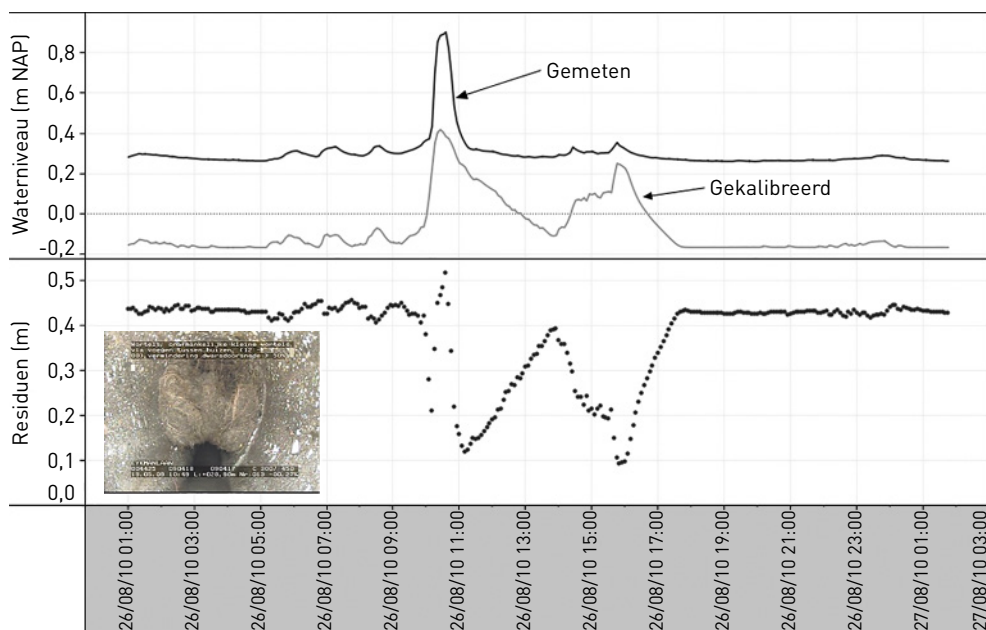
Figuur 3.9 geeft de gemiddelde absolute waarden van de verschillen tussen waargenomen en berekende waterpeilen (residuen) weer voor de vier verschillende neerslaggebeurtenissen waarop het rioleringsmodel gekalibreerd is. Dit geeft meer informatie over de problemen die zich in het systeem voordoen. Het gaat hier om:

- twee neerslaggebeurtenissen in 2015 waarin alle waargenomen obstakels en gebreken in het rioolsysteem zijn verwijderd;
- twee neerslaggebeurtenissen in 2010 toen de waargenomen obstakels en gebreken nog in het rioolsysteem aanwezig waren.

Figuur 3.9 laat zien dat de gemiddelde residuen als resultaat van de kalibratieprocedures voor het vervuilde rioolsysteem groter zijn dan de gemiddelde residuen na kalibratie van het schoongemaakte systeem. Verder valt op dat de locaties Lev13 en Lev14 er bovenuit springen wat betreft de afwijkingen tussen model en meting. Deze zijn duidelijk groter in vergelijking met de overige locaties voor de buien 11/7/2010 en 26/8/2010 (vervuild systeem). Uit de praktijk is bekend dat er in de directe omgeving van beide locaties een wortelscherm aanwezig was, dat het lokale hydraulische gedrag van het systeem duidelijk beïnvloedde (zie figuur 3.10). De verschillen op de locaties Lev1, Lev8, Lev10, Lev16, Lev23, Lev24 en Lev25 zijn te herleiden tot afzettingen en sediment, dus stromingsbelemmerende omstandigheden in het rioolsysteem. De gebreken en het sediment zijn vervolgens uit het rioolsysteem verwijderd. In de resultaten van de modelkalibraties met het systeem zoals dat er in 2015 buiten bij ligt zien we de meetlocaties Lev6 en Lev22 als afwijkende locaties naar boven komen. Hier zijn stromingsbelemmerende omstandigheden aangetroffen die tijdens de eerdere camera-inspecties nog niet waren gezien.



Figuur 3.9 Gemiddelde waarde van de residuen na kalibratie per meetlocatie voor het rioolsysteem inclusief waargenomen obstakels en gebreken (2010) en exclusief (2015)



Figuur 3.10 Gemeten en berekende waterstanden (bovenste grafiek) bovenstrooms van een wortelscherm (Lev13) tijdens de neerslaggebeurtenis op 26 augustus 2010. De residuen zijn in de onderste grafiek weergegeven

3.4 Conclusies toepassing modelkalibratie voor noodzaak tot onderhoud

Het is bekend dat de operationele onderhoudstoestand van een rioolsysteem de prestaties van het riool beïnvloedt. Inzicht in de onderhoudstoestand wordt normaal gesproken verkregen met camera-inspecties. Aangezien de inspectiefrequentie meestal één keer per tien jaar is, moet de rioolbeheerder vertrouwen op schaarse gegevens over de operationele onderhoudstoestand.

Het hydraulisch bewaken van (belangrijke delen van) een rioolsysteem levert hoogfrequente gegevens op over de hydraulica over een lange periode. In dit hoofdstuk is de meerwaarde van modelkalibratie aangegeven om informatie over het (veranderend) systeemgedrag te verkrijgen. De rioolbeheerder heeft dan informatie over het hydraulisch functioneren zonder of tussen periodieke inspecties in.

Elke modelkalibratie levert een reeks modelparameterwaarden, hun onzekerheden en restwaarden op. Modelparameters veranderen tussen verschillende neerslaggebeurtenissen. De parameterwaarden zelf omvatten ook de voorafgaande toestand van het stroomgebied van de gekalibreerde gebeurtenis. Ze zijn daarom minder geschikt om rioleringsgebreken te identificeren. De residuen, en meer specifiek de combinatie van hun absolute waarden, statistische eigenschappen en correlaties tussen residuen op verschillende locaties, zijn wél zeer sterke indicatoren voor het optreden van systeemverandering.

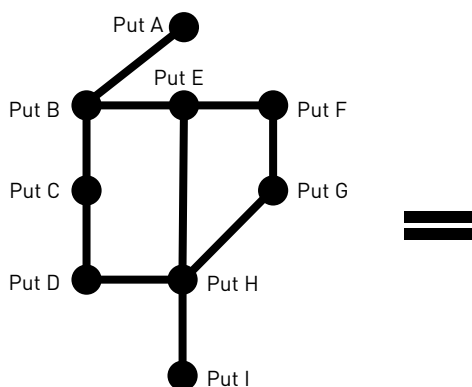
Modelkalibratie kan worden gebruikt als een indicatie voor lokale veranderingen in systeemgedrag (bijvoorbeeld wortelingroei, sedimentafzettingen of aangehechte afzettingen zoals vet). We concluderen dat modelkalibratie wijzigingen in de hydraulische eigenschappen van een rioolsysteem kan aantonen en dus kan worden gebruikt om het beheer van riolen, en in het bijzonder reiniging en inspectie daarvan, te optimaliseren. Dit kan worden gedaan op basis van 'hydraulische vingerafdrukken'.

4 Grafenmethode voor het identificeren van kwetsbare locaties met betrekking tot het hydraulisch functioneren

Rioolstelsels zijn netwerken die uit veel verschillende soorten objecten bestaan, die niet allemaal even belangrijk zijn voor de prestaties van het stelsel. De invloed van een individueel object op het functioneren van het netwerk hangt af van de kenmerken ervan en de positie in het netwerk. Dit hoofdstuk presenteert de grafentheorie als een middel om het hydraulisch functioneren van de meest kritische rioolstrengen in een systeem te identificeren in relatie tot het rioolsysteem als geheel.

4.1 Grafentheorie

Grafen zijn netwerken die bestaan uit knopen en verbindingen. Netwerken zoals waterleidingnetwerken, rioolstelsels en elektriciteitsnetwerken zijn typische voorbeelden van grafen die bestaan uit koppelingen (leidingen en kabels) en knooppunten (verbindingen of putten). Binnen de wiskunde wordt het gebied dat de eigenschappen van grafen bestudeert de grafentheorie genoemd. Een graaf is een verzameling punten of knopen, waarbij een aantal knopen verbonden zijn door bijvoorbeeld lijnen of bogen (zie figuur 4.1 links). Een graaf kan worden gebruikt om een netwerk en de verbindingen daarin (knooppunten en koppelingen) te vereenvoudigen. Zo kan een graaf worden weergegeven in de vorm $G=(V, E)$, een geordend paar waarin V een willekeurige verzameling is en E een verzameling bestaande uit sets van twee al dan niet verschillende elementen uit V . In rioleringstaal is dit het rioolstelsel (G) bestaande uit een verzameling putten (V) met sets van strengen (E) elk bestaande uit twee elementen van V , namelijk een 'van put' en een 'naar put'. Door de grafische weergave (figuur 4.1 links) te vertalen in een voor een computer begrijpelijke taal, ontstaan er tal van wiskundige mogelijkheden voor het analyseren van dergelijke netwerken. Dat kan in de vorm van een matrix (figuur 4.1, rechts).



$G = (V, E)$
 $V = \{A, B, C, D, E, F, G, H, I\}$
 $E = \{AB, BC, CD, BE, DH, EF, EH, FG, GH, HI\}$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B	1	0	1	0	1	0	0	0	0
C	0	1	0	1	0	0	0	0	0
D	0	0	1	0	0	0	0	1	0
E	0	1	0	0	0	1	0	1	0
F	0	0	0	0	1	0	1	0	0
G	0	0	0	0	0	1	0	1	0
H	0	0	0	1	1	0	1	0	1
I	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Figuur 4.1 Weergave grafentheorie als toepassing in rioolstelsels. Met links een rioolsysteem bestaande uit de putten A tot en met I (verzameling V) en een aantal strengen (verzameling E). Dit 'netwerk' kan ook wiskundig worden beschreven in de vorm van een matrix (rechts). Zie als voorbeeld put E. Deze is met een streng verbonden met de putten B, F en H, wat in de matrix is weergegeven met een 1.

Ook is het mogelijk om door middel van getallen verschillen in gewicht aan de lijnen toe te kennen (bijvoorbeeld de afstand tussen twee knopen of de hoeveelheid energie die nodig is om water te transporteren van A naar B). In dit geval spreken we van een gewogen graaf. Diverse structuren kunnen als grafen worden weergegeven. Vervolgens worden algoritmes gebruikt om specifieke eigenschappen van een graaf te berekenen en op basis daarvan voorspellingen te doen of beslissingen te nemen. Een voorbeeld hiervan is een routekaart (structuur) tussen een aantal steden met de bijbehorende afstanden, waarbij algoritmes op basis van de afstanden de optimale route tussen twee steden berekenen. Denk aan uw navigatiesysteem in de auto. Grafen gebruikt men bijvoorbeeld ook om relaties weer te geven binnen fysieke-, sociale- of informatiesystemen.

4.2 Grafentheorie als toepassing in riolsystemen

Dit onderzoek past de grafentheorie toe als een concept om de voor het hydraulisch functioneren belangrijkste delen van een riolsysteem te identificeren. Om inzicht te krijgen in de mate waarin afzonderlijke rioolleidingen in een riolsysteem invloed uitoefenen op het hydraulisch functioneren van het geheel, worden vaak heel veel berekeningen uitgevoerd met hydrodynamische rekenmodellen. Hiervoor zijn rekenmodellen nodig en vooral veel tijd. Daarom is als alternatief voor deze tijdrovende simulaties de toepassing van de grafentheorie onderzocht. In de grafenmethodiek wordt, in plaats van tijdrovende iteratieve hydraulische berekeningen, de structuur van het netwerk als uitgangspunt genomen en zijn de resultaten onafhankelijk van de gekozen neerslagbelasting. De (veel) kortere rekentijd van deze methode maakt voor het eerst de analyse van grote omvangrijke netwerken mogelijk.

Het riolsysteem wordt hierbij vertaald in een graaf. De putten vormen de knopen en de strengen zijn de verbindingen tussen de knopen (zie ook paragraaf 4.1). De verbindingen tussen de knopen bestaan elk uit twee koppelingen tussen twee knopen. Hiermee is onderscheid tussen een positieve en een negatieve stromingsrichting mogelijk. Voor het bepalen van de meest kritieke rioolleidingen wordt uitgegaan van de structuur van het rioolstelsel. Tijdens perioden met hevige neerslag treden externe overstorten in werking. Op dat moment is het transport van het (afval)water gericht naar de externe overstorten. Het rioolnetwerk wordt verdeeld in deelgrafen, bekeken vanuit deze overstorten. Uitgaande van een constante neerslagintensiteit en daarmee een eveneens constante (stationaire) stromingstoestand in het riolsysteem, wordt voor elke put de hoeveelheid energie berekend die nodig is om het water vanaf deze put naar een externe overstort te transporteren. Maatgevend voor de route die het water vanaf een put moet afleggen naar een externe overstort is de totale hoeveelheid benodigde energie over het traject. Elke rioolleiding (verbinding in de graaf) heeft een gewicht. Dit is de hoeveelheid energie die bij een constante (stationaire) belasting nodig is om (afval)water door de leiding te transporteren. De benodigde hoeveelheid energie is berekend met de gangbare vloeistofmechanica formules voor stationaire stromingscondities (onder andere de formule van Chézy). Door van alle rioolleidingen die onderdeel uitmaken van het traject naar een externe overstort de hoeveelheid energie op te tellen, krijgt elk traject zijn eigen 'kosten'. Vervolgens is voor elke put de 'goedkoopste' route naar één van de externe overstorten bepaald. Dit is gedaan op basis van het Dijkstra-algoritme (Dijkstra, 1959). Door nu één voor één alle rioolleidingen te verwijderen, kan de invloed van elke afzonderlijke leiding worden gekwantificeerd ten opzichte van de referentiesituatie. Het eindresultaat is een overzicht van alle rioolleidingen met hun bijbehorende 'kosten'. Door de leidingen aflopend te sorteren van hoge naar lage 'kosten' (energieverliezen), ontstaat een rangschikking met bovenaan de meest kritieke leiding met betrekking tot het hydraulisch functioneren en onderaan de minst kritieke.

Dijkstra algoritme

Een algoritme is een lijst met instructies die, afhankelijk van beslissingen tijdens het proces, worden uitgevoerd om van een gegeven starttoestand naar een einddoel te komen. Het Dijkstra algoritme is een graaf-algoritme dat kan worden toegepast voor het bepalen van de route met de minste kosten tussen twee gegeven punten. In dit geval is dit de route met het minste energieverlies van een put naar een externe overstort. Het Dijkstra algoritme gaat uit van drie soorten knooppunten: huidige, bezochte en niet-bezochte knooppunten. De huidige knoop is de knoop van waaruit de route berekend wordt. Deze krijgt een voorlopige waarde 0 en alle andere knopen zijn niet-bezochte knopen. Als eerste worden nu voor elke direct aan de huidige knoop grenzende knopen de energieverliezen vanaf de huidige knoop opgeteld bij de voorlopige waarde van de huidige knoop. De aangrenzende knopen krijgen nu een voorlopige waarde gelijk aan deze energieverliezen. De knoop met de kleinste voorlopige waarde wordt gekozen en ingesteld als huidige knoop. De bestaande huidige knoop krijgt als label bezochte knoop. Vervolgens wordt de procedure herhaald voor deze nieuwe huidige knoop (knoop met de kleinste voorlopige energieverliezen). Op deze manier vinden we van alle andere knopen de route met de minste energieverliezen tot de beginknoop.

Het kan voorkomen dat door het verwijderen van een rioolleiding in een deelgraaf een deel van het stelsel niet meer kan afwateren naar een externe overstort. Omdat dit in de praktijk betekent dat er dan water op straat optreedt, zijn dit dus belangrijke leidingen voor het hydraulisch functioneren. Daarom is er bij het rangschikken van de leidingen, naast de energieverliezen over de route, ook rekening gehouden met de hoeveelheid aangesloten oppervlak die niet meer tot afstroming kan komen naar een externe overstort. Bij de voorbeelden in deze samenvatting is uitgegaan van een sorteervolgorde waarbij eerst is uitgegaan van de hoeveelheid oppervlak welke niet meer tot afstroming kan komen en als tweede de hoeveelheid benodigde energie. De methode kan ook worden uitgevoerd voor een situatie onder droogweerstandigheden. In dit geval wordt de 'goedkoopste' route niet bepaald richting de externe overstorten maar richting het gemaal.

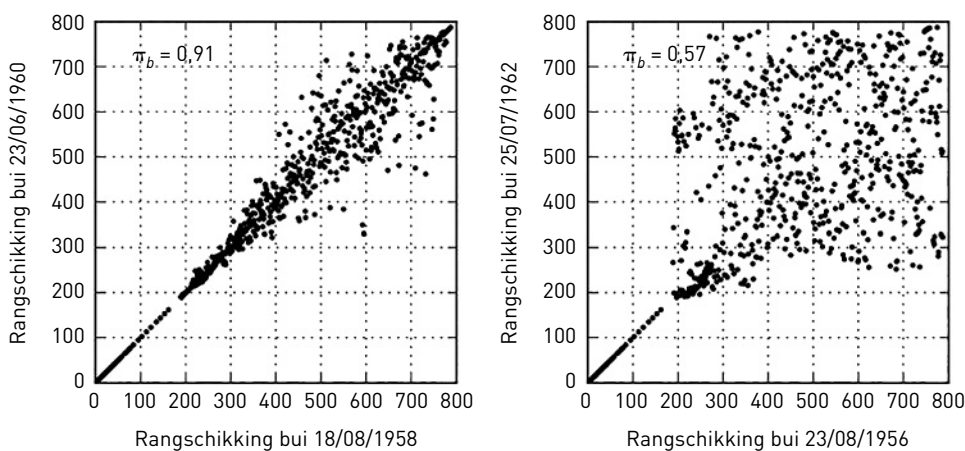
4.3 Pilots en resultaten Tuindorp en Loenen

De grafenmethode is toegepast op de rioolsystemen van Tuindorp en Loenen (zie paragraaf 2.1). De uitkomsten zijn voor beide systemen vergeleken met een conventionele methode waarbij langdurige hydraulische berekeningen zijn gebruikt.

Bij de grafenmethode is de structuur van het rioolstelsel het uitgangspunt. Omdat er een constant debiet wordt aangehouden, blijft een deel van de hydraulica buiten beschouwing. Dat levert veel tijdswinst op. Er treden daardoor wel verschillen op tussen beide methodes en daarom is een vergelijking gemaakt. Om de gevoeligheid van de methode voor verschillen in neerslagbelasting op het systeem te onderzoeken, zijn berekeningen uitgevoerd met:

- tien ontwerpneerslaggebeurtenissen zoals deze in de voormalige Leidraad Riolerings zijn opgenomen;
- een aantal stationaire neerslagintensiteiten variërend van 10 tot 100 l/s.ha;
- dertien neerslaggebeurtenissen uit de meerjarenreeks 1955-1964 geregistreerd in De Bilt.

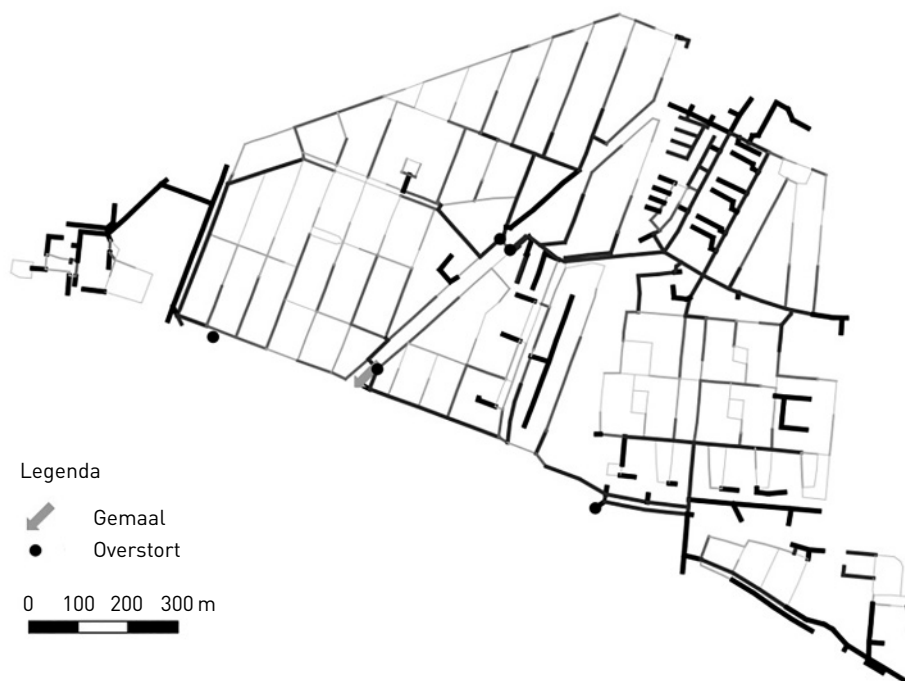
In dit onderzoek zijn de uitkomsten van de grafenmethode met behulp van de Kendall rank correlation coëfficiënt vergeleken met de conventionele methode. Deze coëfficiënt is geschikt om datasets met elkaar te vergelijken. Bij een grotere correlatie tussen twee datasets zijn er meer rioolleidingen die in beide datasets dezelfde prioriteit hebben (staan in de rangschikking op dezelfde plaats). In Loenen varieert de correlatie bij belasting van het rioolstelsel met genoemde neerslaggebeurtenissen tussen de 0,77 en 0,92. Voor Tuindorp is dat tussen 0,57 en 0,91. In figuur 4.2 worden deze voor Tuindorp grafisch weergegeven. Op basis hiervan stellen wij dat de grafentheorie circa 30-40% van de meest kritische strengen van een rioolstelsel kan identificeren en dat één enkele simulatie daar al voldoende voor is. Dankzij die sterk beperkte rekentijd kunnen we nu voor het eerst ook grote omvangrijke netwerken analyseren. Dat was vroeger praktisch onhaalbaar vanwege de enorme hoeveelheid tijd die dat zou kosten. Met de grafenmethode is een 400 tot 5000 keer kortere rekentijd haalbaar vergeleken met conventionele methodes.



Figuur 4.2 Vergelijking van de rangschikking van rioolleidingen op basis van invloed op het hydraulisch functioneren binnen een rioolstelsel voor Tuindorp, met zowel links als rechts de rangschikking als uitkomst van de berekening voor twee neerslaggebeurtenissen uit de meerjarenreeks 1955-1964 (De Bilt). Links de hoogst bereikte correlatie en rechts de laagste. Hieruit is op te maken dat in ieder geval circa 30-40% van de meest kritieke rioolleidingen in een rioolstelsel kunnen worden geïdentificeerd met de grafenmethode

Als voorbeeld laat figuur 4.3 de grafische rangschikking zien van de rioolleidingen in Tuindorp op basis van de grafenmethode. Hier is te zien dat de rioolleidingen die bij het verwijderen tot gevolg hebben dat een deel van het systeem niet meer tot afstroming kan komen, hoger in de rangschikking staan. Dit komt doordat bij het rangschikken van de rioolleidingen de grootte van het oppervlak dat niet meer tot afstroming kan komen het meeste gewicht heeft gekregen. Dit leidt immers tot water op straat. Ook de routes richting de externe overstorten staan hoger in de rangschikking. Uiteraard is het mogelijk om andere uitgangspunten te hanteren voor het rangschikken van de leidingen.

Figuur 4.3 Overzicht van de rangschikking van de rioolleidingen in Tuindorp op basis van de grafenmethode. Hoe donkerder de leiding, des te belangrijker ofwel kritieker voor het hydraulisch functioneren en dus hoger in de rangschikking



4.4 Conclusies grafenmethode voor identificeren belangrijke locaties

Rioolstelsels zijn netwerken waarin elk afzonderlijk object een bijdrage levert aan het hydraulisch functioneren. In vertakte rioolsystemen is het meestal duidelijk welke rioolleidingen belangrijker zijn in relatie tot het hydraulisch functioneren. In vermaasde systemen is dit veel complexer.

Met de grafenmethode kan worden onderzocht hoe belangrijk een individuele leiding is voor de hydraulische prestaties van het systeem als geheel. Door de structuur van het rioolstelsel en een constant debiet als uitgangspunt te nemen, wordt de rekentijd enorm gereduceerd. Hierdoor wordt het mogelijk om omvangrijke netwerken te analyseren, die tot op heden om praktische redenen buiten het bereik van de gangbare methoden vielen. De belangrijkste strengen in een rioolstelsel worden met één enkele berekening geïdentificeerd. Bij de grafenmethode blijft, in vergelijking met traditionele methodes, een deel van de hydraulica buiten beschouwing. De uitkomsten van de analyses in dit hoofdstuk geven aan dat de 30-40% strengen die het belangrijkste zijn voor het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel door toepassing van de grafentheorie kunnen worden gevonden.

Het toepassen van de grafenmethode geeft op een snelle manier inzicht in welke de meest kritische rioolleidingen van een rioolstelsel zijn. Dit is belangrijke en waardevolle informatie voor het ontwerpen en inrichten van bijvoorbeeld een meetnet in de riolering of het bepalen van een strategie voor reiniging en inspectie.

5 Gezondheidsrisico's bij meer water op straat als gevolg van onderhoudstoestand

Blootstelling aan water op straat vanuit de gemengde riolering vormt een gezondheidsrisico voor mensen. Dit komt door de aanwezigheid van ziekteverwekkende organismen in dit water (*De Man et al.*, 2014). Een slechte onderhoudstoestand kan leiden tot meer en vaker water op straat (zie hoofdstuk 2), wat de kans op infecties vergroot. In dit hoofdstuk is nader ingegaan op de gevolgen hiervan voor de kans op infectie in de wijken Tuindorp en Loenen (zie paragraaf 2.1).

De gemiddelde gebiedsbrede infectiekans voor beide wijken is berekend en vergeleken met de referentiesituatie (systeem zonder vervuiling). De in figuur 5.1. weergegeven procedure is hiervoor gevolgd. Een gedetailleerde beschrijving van het bepalen van de kwantitatieve invloed van een onderhoudstoestand op water op straat staat in hoofdstuk 2. De berekening van frequenties van water op straat op basis van Monte Carlo-simulaties en wat dat betekent voor de infectiekans van mensen leest u hierna. De basis voor het berekenen van de kans op infecties wordt gevormd door het in *De Man et al.* (2014) gekwantificeerde risico op infectie voor water op straat uit gemengde riolering.

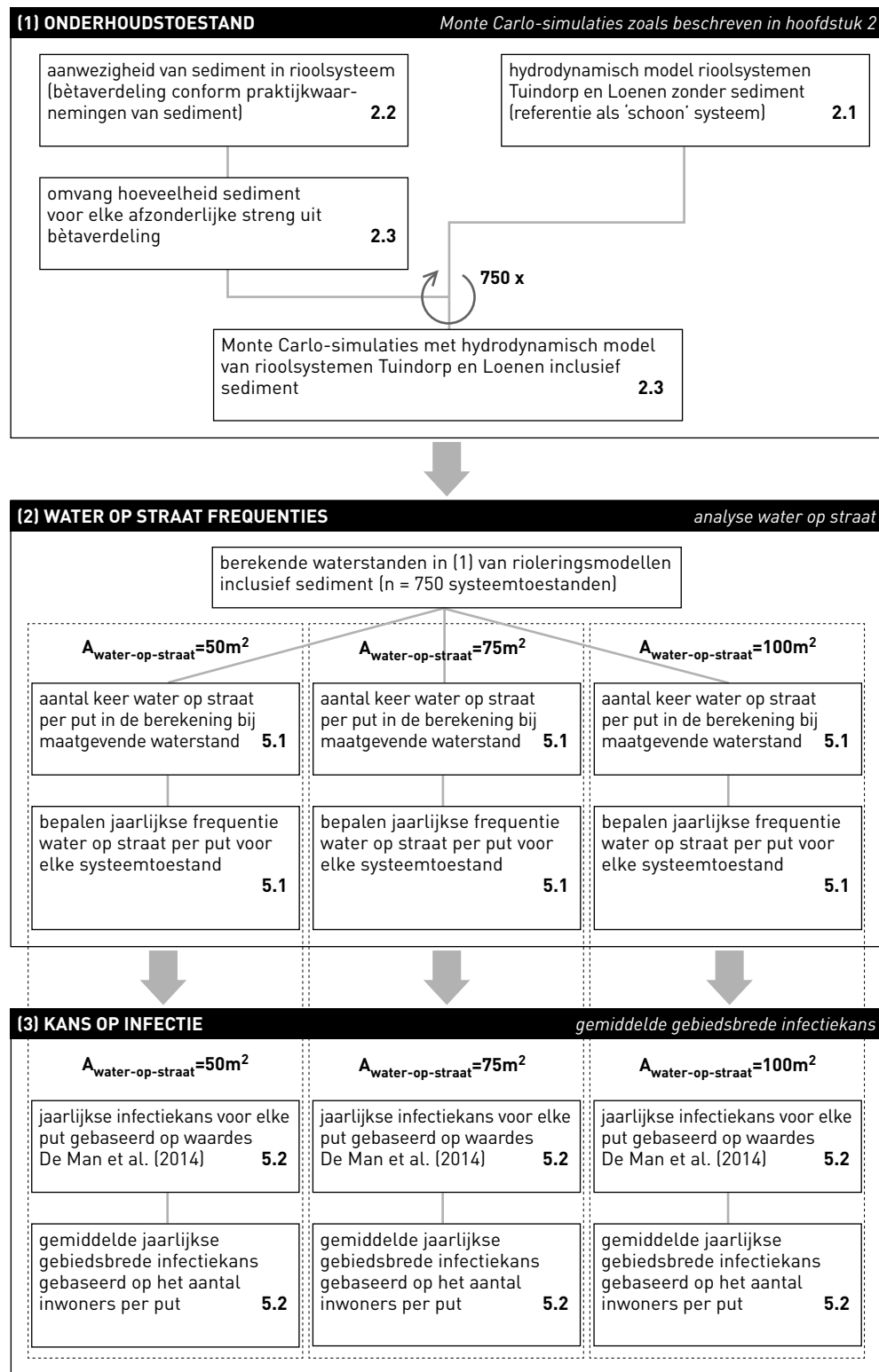
5.1 Kwantificering gezondheidsrisico's in relatie tot onderhoudstoestand

Om uiteindelijk per gebied te komen tot een gemiddelde jaarlijkse infectiekans, is eerst inzicht nodig in het aantal keren dat er water op straat optreedt. Het in *De Man et al.* (2014) gekwantificeerde risico op infectie door water op straat is gebaseerd op monsternames van water op straat van minimaal 100 m². Daarom is in dit onderzoek de gevoeligheid van de uitkomsten onderzocht voor drie verschillende oppervlaktes van water op straat: vanaf 25 m², vanaf 50 m² en vanaf 100 m². Voor elke put is berekend hoe vaak er in de Monte Carlo-simulaties water op straat optreedt. Dit is voor elke afzonderlijke systeemtoestand (in totaal 750 stuks) berekend. Vervolgens is per put voor elke systeemtoestand de jaarlijkse frequentie van water op straat bepaald. Dit is mogelijk omdat er in de Monte Carlo-simulaties gebruik is gemaakt van een tienjarige neerslagreeks als belasting op het systeem (zie hoofdstuk 2).

Modelvalidatie water op straat

Voor de modelvalidatie is een vergelijking gemaakt tussen meldingen van water op straat en de in de hydraulische berekeningen waargenomen locaties met water op straat met een geregistreerde neerslaggebeurtenis op 4 november 2013. Deze neerslaggebeurtenis is gekozen omdat het rioolstelsel in Tuindorp gedurende deze periode het meest geschikt is om te vergelijken met theoretische berekeningen. Het rioolstelsel is in 2012 geheel gereinigd en een deel van de aangetroffen gebreken (waaronder wortelingroei en afzettingen) is verwijderd. Geregistreerde meldingen bij de gemeente, aangevuld met interviews met bewoners, werden vergeleken met de modelresultaten. De meeste locaties waar in de praktijk water op straat is waargenomen komen overeen met de modelresultaten.

Figuur 5.1 Overzicht proces voor het berekenen van de gemiddelde jaarlijkse gebiedsbrede infectiekans. De nummering refereert naar de bijbehorende paragrafen in deze samenvatting



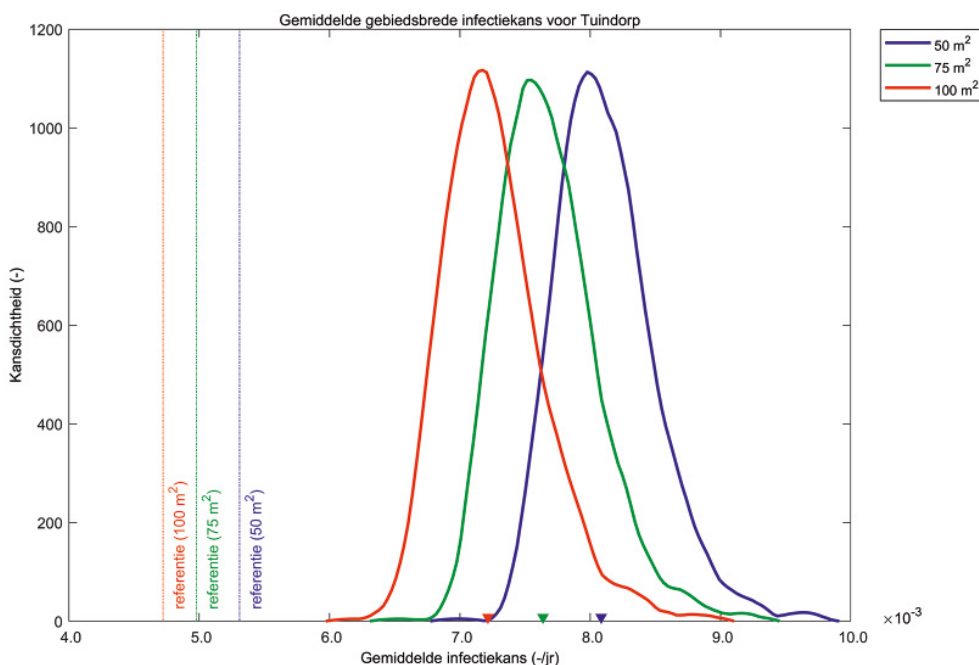
De Man et al. (2014) bepaalden de kans op infectie per blootstellingsgebeurtenis voor verschillende ziekteverwekkende organismen. In dit onderzoek is niet gekeken naar de kans op infectie per gebeurtenis, maar naar de kans per jaar. Dit betekent dat de kans per gebeurtenis moet worden omgezet naar een kans per jaar. In de Monte Carlo-simulaties moet dus worden bepaald welke neerslaggebeurtenissen uit de tienjarige neerslagreeks, die water op straat tot gevolg hebben, ook leiden tot infectie. Omdat de kans op infectie per gebeurtenis bekend is, kan voor de set neerslaggebeurtenissen in de meerjarenreeks worden bepaald welk aantal gebeurtenissen leidt tot infectie en welk aantal niet leidt tot infectie. In combinatie met de berekende frequentie van water op straat is vervolgens de jaarlijkse kans op infectie per put berekend. De gemiddelde jaarlijkse kans op infectie volgt uit een gewogen gemiddelde gebaseerd op het aantal aangesloten inwoners per put.

5.2 Gemiddelde kans op infectie wijken Tuindorp en Loenen

Voor de beide gebieden Tuindorp en Loenen (zie paragraaf 2.1) is de gemiddelde jaarlijkse gebiedsbrede infectiekans berekend volgens de procedure in figuur 5.1. Dit is gedaan voor water op straat met een minimale omvang van 50 m², 75 m² en 100 m². In de figuren 5.2 en 5.3 staan de berekende gemiddelde gebiedsbrede infectiekansen voor Tuindorp en Loenen ten opzichte van de referentiesituatie. Onder de referentie verstaan we hier het rioolstelsel zonder vervuiling. Om de infectiekans van de referentie te berekenen is een éénmalige simulatie uitgevoerd waarbij het rioolstelsel is belast met een tienjarige neerslagreeks. De hierbij behorende kans op infectie is in figuur 5.2 weergegeven als een verticale lijn. Om de invloed van verschillende operationele systeemtoestanden op water op straat te bepalen zijn 750 afzonderlijke systeemtoestanden doorgerekend met de tienjarige neerslagreeks als belasting. In dit geval zijn er 750 verschillende uitkomsten met bijbehorende kans op infectie. Door al deze infectiekansen in een grafiek uit te zetten krijgen we een kansdichtheidskromme zoals u ziet in de figuren 5.2 en 5.3.

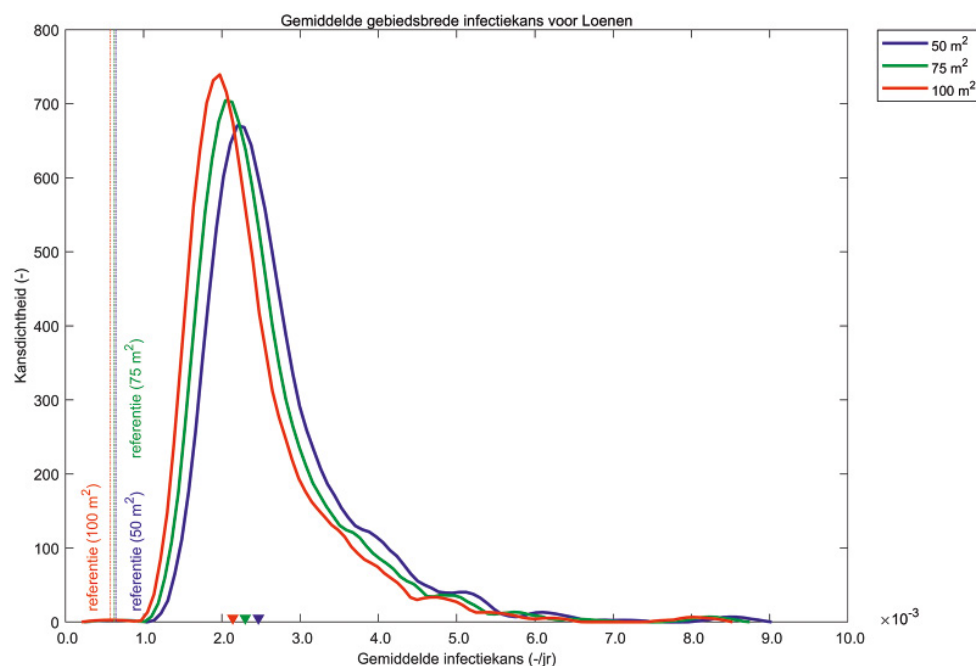
Het algemene beeld voor het 'vlakke' Tuindorp met het vermaasde rioolstelsel is dat de gemiddelde infectiekans van de wijk toeneemt als gevolg van vervuiling (figuur 5.2). In vergelijking met een rioolstelsel zonder vervuiling wordt de kans op infectie in een rioolstelsel met vervuiling ongeveer 1,5 keer groter (op basis van de mediane waarde van de verdeling). Zie als voorbeeld water op straat met een omvang vanaf 100 m² in figuur 5.2. De kans op infectie bij een systeem zonder vervuiling is circa 0,0047 keer per jaar. Als we de onderhoudstoestand in beschouwing nemen en kijken naar de mediaan van de verdeling, is de kans op infectie circa 0,0072 keer per jaar. Voor het licht hellende Loenen met het vertakte rioolstelsel is te zien dat de mediaan van de gemiddelde jaarlijkse infectiekans ongeveer 4 keer groter is in het systeem met vervuiling dan in het systeem zonder vervuiling.

Merk daarbij op dat water op straat ruimtelijk verdeeld is over de wijken. Dit geldt dus ook voor de kans op infectie in de wijken. In Tuindorp bijvoorbeeld zijn vooral de oostzijde en noordwest kant gevoelig voor water op straat als gevolg van de onderhoudstoestand. In de figuren 5.2 en 5.3 ziet u de gemiddelde gebiedsbrede jaarlijkse kans op infectie in de wijken Tuindorp en Loenen. In feite is de kans op infectie dus afhankelijk van de locatie in de wijk.



Figuur 5.2 Gebiedsbrede gemiddelde jaarlijkse infectiekansen in de wijk Tuindorp

Figuur 5.3 Gebiedsbrede gemiddelde jaarlijkse infectiekans in de wijk Loenen



5.3 Conclusie gezondheidsrisico's bij toename water op straat

In een gemengd rioolstelsel zijn ziekteverwekkende organismen aanwezig. Als er water op straat staat vormt contact met dit water een risico voor de volksgezondheid. Omdat de staat van onderhoud van een rioolstelsel invloed heeft op de frequentie en omvang van water op straat, draagt de operationele onderhoudstoestand van een gemengd rioolstelsel bij aan de kans om geïnfecteerd te raken.

Dit onderzoek gaat nader in op de gevolgen van de onderhoudstoestand van een rioolstelsel voor de kans op infectie in de wijken Tuindorp en Loenen. De gemiddelde gebiedsbrede jaarlijkse infectiekans is berekend. De conclusie voor beide wijken op basis van de uitkomsten is dat door vervuiling van een rioolstelsel zowel de frequentie van water op straat als het volume water op straat aanzienlijk worden vergroot en dat als gevolg daarvan de gemiddelde gebiedsbrede jaarlijkse infectiekans in beide wijken toeneemt. De invloed van de onderhoudstoestand op infectiekansen hangt af van de kenmerken van het rioolstelsel. De mediaan van de kans op infectie van alle in beschouwing genomen mogelijke onderhoudstoestanden is in Tuindorp een factor 1,5 groter in vergelijking met het rioolstelsel zonder vervuiling. Voor Loenen is de toename een factor 4.

6 Conclusies, aanbevelingen en toepassing in de praktijk

Rioolstelsels zijn ondergrondse infrastructurele netwerken die bestaan uit leidingen, putten en overige voorzieningen (o.a. gemalen en overstorten). Ze dienen voor het inzamelen en transporteren van afval- en hemelwater. Goed functionerende rioolstelsels zijn essentieel voor een gezond leefklimaat. In Nederland wordt jaarlijks zo'n 1,5 miljard euro uitgegeven om onze rioolsystemen op een minimaal gewenst service- en prestatieniveau te houden. Hiervoor is onderhoud van rioolstelsels noodzakelijk. Daarom hebben we inzicht nodig in de relatie tussen onderhoud en functioneren van de riolering en moeten keuzes worden gemaakt.

Om een beeld te krijgen van de (onderhouds)toestand van een rioolstelsel, voeren gemeenten normaal gesproken rioolinspecties uit, zo nodig gevolgd door reiniging. Deze werkzaamheden gebeuren in de huidige praktijk meestal met een vaste frequentie of naar aanleiding van incidenten. Hydraulische berekeningen en praktijkmetingen in de riolering dragen bij aan het inzicht in het functioneren van rioolsystemen. In de huidige praktijk is er onvoldoende bekend over de invloed van de toestand van afzonderlijke onderdelen van een rioolstelsel op de hydraulische prestaties ervan.

Een slechte onderhoudstoestand kan leiden tot meer water op straat. Daarom is meer kennis nodig, vooral omdat blootstelling aan water op straat vanuit een gemengd rioolstelsel vanwege ziekteverwekkende organismen een gezondheidsrisico voor mensen vormt.

In dit onderzoek is de invloed van de operationele onderhoudstoestand van een rioolstelsel op het hydraulisch functioneren ervan gekwantificeerd. Om de noodzaak van beheermaatregelen als reiniging en inspectie te bepalen, is een 'hydraulische vingerafdruk' op basis van modelkalibratie gebruikt. Om voor deze maatregelen de meest belangrijke locaties in een rioolstelsel te bepalen, is de grafenmethode geïntroduceerd. Naast het monitoren van de hydraulische capaciteit op de meest belangrijke locaties, levert de grafenmethode ook informatie op voor het bepalen van een strategie voor reiniging en inspectie.

6.1 Conclusies

Met Monte Carlo-simulaties is voor twee rioolstelsels het effect van de onderhoudstoestand van de riolering op het hydraulisch functioneren ervan onderzocht. Dit is gedaan voor de wijk Tuindorp in de gemeente Utrecht en de wijk Loenen in de gemeente Apeldoorn. De statistische karakteristieken van de gebreken en sediment zijn gebaseerd op veldinventarisaties en zijn gebruikt als basis voor de gemaakte modelberekeningen. De resultaten laten zien dat de aanwezigheid van gebreken en sediment, en daarmee de onderhoudstoestand, een significant effect heeft op de frequentie waarmee hydraulische overbelasting plaatsvindt. Het gaat hierbij om de bescherming tegen 'natte voeten'. De conclusie uit dit onderzoek is dat de frequentie van water op straat kan oplopen van eenmaal per twee jaar naar éénmaal per jaar als er te weinig onderhoud wordt gepleegd.

In de huidige praktijk moet een rioolbeheerder voor de onderhoudstoestand van de riolering vertrouwen op inspectiegegevens die met een frequentie van één keer per tien jaar of zelfs minder vaak beschikbaar komen. Het hydraulisch bewaken van een rioolsysteem, of alleen de meest belangrijke delen daarvan, levert hoogfrequente gegevens op over het hydraulisch functioneren over langere periodes. De rioolbeheerder heeft dan ook informatie over het hydraulisch functioneren zonder inspecties of tussen periodieke inspecties in. Het hydraulisch monitoren van een systeem en het maken van een 'hydraulische vingerafdruk' geeft informatie over het (veranderende) systeemgedrag. Dit onderzoek bewijst dat modelkalibratie wijzigingen in de hydraulische eigenschappen van een rioolsysteem kan aantonen en dat het kan worden gebruikt om het beheer van riolen, en in het bijzonder reiniging en inspectie, te optimaliseren. De residuen (het verschil tussen model en meting), en meer specifiek de combinatie van hun absolute waarden, statistische eigenschappen en correlaties tussen residuen op verschillende locaties, zijn zeer sterke indicatoren voor het optreden van systeemverandering.

Welke leidingen in een rioolstelsel vanuit hydraulisch oogpunt het meest belangrijk zijn, is op voorhand niet altijd te zeggen. Zeker bij grote vermaasde rioolstelsels is dit lastig. Hoe belangrijk een individuele leiding is voor de hydraulische prestaties van het hele systeem kan worden onderzocht met de grafenmethode. Deze methode werkt niet met tijdrovende iteratieve hydraulische berekeningen, maar neemt de structuur van het netwerk als uitgangspunt. Door de sterk beperkte rekentijd is het nu mogelijk om daarmee ook voor omvangrijke netwerken, waarbij dit tot nu toe niet kon, de meest belangrijke riolen te identificeren. Met de grafenmethode kunnen de 30-40% strengen worden onderscheiden die het meest belangrijk zijn voor het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel. Dit is belangrijke informatie voor het ontwerpen en inrichten van bijvoorbeeld een meetnet riolering of het invullen van een strategie voor reiniging en inspectie.

Vanwege de aanwezigheid van ziekteverwekkende organismen, vormt blootstelling aan water op straat vanuit de gemengde riolering een gezondheidsrisico voor mensen. Een slechte onderhoudstoestand leidt tot meer water op straat, wat de kans op infecties vergroot. De toename van de infectiekans als gevolg van de onderhoudstoestand is voor de wijken Tuindorp en Loenen berekend. De conclusie voor beide wijken is dat vervuiling van een rioolstelsel zowel de frequentie van water op straat als het volume water op straat aanzienlijk vergroot. Daardoor neemt de gemiddelde gebiedsbrede infectiekans in beide wijken toe.

6.2 Aanbevelingen en gebruik in de praktijk

Het is in Nederland gebruikelijk om riolen binnen een gemeente ongeveer iedere tien jaar te reinigen en te inspecteren. De hydraulische conditie van een rioolstelsel kan echter in een veel kortere periode veranderen dan de structurele conditie. Daarom is het gewenst om frequenter over informatie over het hydraulisch functioneren van een rioolstelsel te kunnen beschikken. De aanbeveling is daarom om de hydraulisch belangrijkste locaties in een rioolsysteem te bepalen en nieuwe meetnetten in rioolstelsels op basis van deze informatie in te richten en/of bestaande meetnetten op 'slimme' locaties uit te breiden. Voor het kiezen van deze locaties kan gebruik gemaakt worden van de grafenmethode. Omdat rioolstelsels tegenwoordig steeds vaker zijn voorzien van meetapparatuur, is het niet altijd noodzakelijk om nieuwe meetnetten te installeren om gebruik te kunnen maken van de in hoofdstuk 3 gepresenteerde kalibratiemethode. Uiteraard is de methode ook toepasbaar in kleinere systemen, delen van een rioolstelsel of belangrijke riooltracés. Ook de meetdata die in bestaande operationele meetnetten worden verzameld, kunnen worden gebruikt. Op deze wijze is het mogelijk hoogfrequent informatie te verzamelen over het hydraulisch functioneren en deze informatie te gebruiken om het beheer van riolen en in het bijzonder reiniging en inspectie te optimaliseren.

Voor rioolsystemen zonder meetapparatuur wordt aanbevolen de meest belangrijke delen van het systeem voor de hydraulica inzichtelijk te maken (grafenmethode) en deze delen frequenter dan eens per tien jaar te inspecteren en/of te reinigen. Naast visuele camera-inspecties, komen hiervoor ook andere inspectiemethoden in aanmerking, zoals de manhole zoomcamera en de SewerBatt™.

Dit onderzoek richtte zich op het invullen van een noodzakelijke voorwaarde voor 'risicogestuurd beheer', namelijk inzicht in de relatie tussen de toestand van de infrastructuur en het functioneren ervan. Er is een methode ontwikkeld om met behulp van modelkalibratie inzicht te krijgen in veranderend systeemgedrag in de riolering. De veiligheid voor water op straat, die in het ontwerp normaliter ligt op een herhalingsperiode van 2 jaar, kan in de praktijk terugvallen naar 1 jaar. Een belangrijk gevolg hiervan is dat het contactrisico met rioolwater in de praktijk groter is dan aanvankelijk gedacht. Dit leidt tot de aanbeveling dat gemeenten, op basis van 'risicogestuurd beheer', de nadruk meer zouden moeten leggen op risico's en prestaties dan op kostenbesparing.

Dankwoord

Dit promotieonderzoek kwam tot stand met steun van het Kennisprogramma Urban Drainage. De betrokken partijen zijn: ARCADIS, Deltares, Evides, Gemeente Almere, Gemeente Arnhem, Gemeente Breda, Gemeente 's-Gravenhage, Gemeentewerken Rotterdam, Gemeente Utrecht, GMB Rioleringstechniek, KWR Watercycle Research Institute, Royal HaskoningDHV, Stichting RIONED, STOWA, Sweco, Tauw, vandervalk+degroot, Waterschap De Dommel, Waternet en Witteveen+Bos.

Speciale dank gaat uit naar de gemeente Utrecht voor de extra financiële ondersteuning. Daarmee werd het mogelijk om meerdere malen camera-inspecties uit te voeren en gedurende lange tijd een meetnet in te richten en te onderhouden in het rioolstelsel van de woonkern Tuindorp. Daarnaast gaat extra dank uit naar Hans Korving en Didrik Meijer voor hun essentiële bijdrage aan de statistische analyses en de grafenmethode en naar de beide promotoren Jeroen Langeveld en François Clemens.

Marco van Bijnen

Literatuur

- Ashley, R.M., Bertrand-Krajewski, J.-L., Hvitved-Jacobsen, T., and Verbanck, M. (2004). *Solids in Sewers*. IWA, London. Scientific and Technical Report, No. 14.
- Clemens, F. H. L. R. (2001). *Hydrodynamic models in urban drainage: Application and calibration*. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- De Man, H., Van den Berg, H.H.J.L., Leenen, E.J.T.M., Schijven, J.F., Schets, F.M., Van der Vliet, J.C. Van Knapen, and F. De Roda Husman, A.M. (2014). *Quantitative assessment of infection risk from exposure to waterborne pathogens in urban floodwater*. Water Research, 48, 90-99.
- Dijkstra, E.W. (1959). *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische Mathematik, 1: 269–271.
- Korving, H. (2004). *Probabilistic assessment of the performance of combined sewer systems*. PhD thesis. Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- Saegrov, S. (2006). *CARE-S. Computer aided rehabilitation of sewer and storm water networks*. IWA Publishing, London.
- Schellart, A. (2007). *Analysis of uncertainty in the sewer sediment transport predictions used for sewer management purposes*. PhD thesis. The University of Sheffield, Sheffield, UK.
- Stanić, N., Clemens, F.H.L.R. and Langeveld, J.G. (2017). *Estimation of Hydraulic Roughness of Concrete Sewer Pipes by Laser Scanning*. Journal of Hydraulic Engineering, 143(2): 1-12, doi://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001223.
- Van Bijnen, M. and Korving, H. (2008). *Application and results of automatic validation of sewer monitoring data*. In: Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
- Van Luijtelea, H. and Rebergen, E. W. (1997). *Guidelines for hydrodynamic calculations on urban drainage in the Netherlands: Backgrounds and examples*. Water Science and Technology, 36(8-9): 253–258.
- Van Mameren, H.J. and Clemens, F.H.L.R. (1997). *Dutch guidelines for hydrodynamic design, overview and principles*. Water Science and Technology, 36(8-9): 247-252.

Wetenschappelijke publicaties die uit het onderzoek zijn voortgekomen

Peer-reviewed wetenschappelijke artikelen

- Van Bijnen, M., Korving, J.L., and Clemens, F.H.L.R. (2012). *Impact of sewer condition on urban flooding: an uncertainty analysis based on field observations and Monte Carlo simulations on full hydrodynamic models*. Water Science and Technology, 65(12): 2219-2227, <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2012.134>.
- Van Bijnen, M., Korving, J.L., Langeveld, J.G., and Clemens, F.H.L.R. (2016). *Calibration of hydrodynamic model-driven sewer maintenance*. Structure and Infrastructure Engineering, 13(9): 1167-1185. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2016.1247287>.
- Meijer, D., Van Bijnen, M., Langeveld, J., Korving, H., Post, P., Clemens, F. (2018) *Identifying Critical Elements in Sewer Networks Using Graph-Theory*. Water, 10(2), 136, doi:10.3390/w10020136.
- Van Bijnen, M., Korving, J.L., Langeveld, J.G., and Clemens, F.H.L.R. (2018). *Quantitative assessment of impacts of sewer condition on health risk*. Water, 10(3), 245, doi:10.3390/w10030245.

Conferentieartikelen

- Van Bijnen, M. and Korving, H. (2008). *Application and results of automatic validation of sewer monitoring data*. In: Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, Scotland, UK.
- Van Bijnen, M., Korving, H., and Clemens F. (2011). *Impact of sewer condition on urban flooding: a sensitivity analysis based on Monte Carlo simulations on full hydrodynamic models*. In: Proceedings 12th International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre, Brazil.
- Van Bijnen, M., Korving, H., and Clemens F. (2012). *Impact of sewer condition on urban flooding: a comparison between simulated and measured system behaviour*. In: Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage Modelling. Belgrade, Serbia.

Nederlandstalige publicaties

- Korving, H. en Van Bijnen, M. (2007). *Datavalidatie als onderdeel van een goed en effectief rioleringsbeheer*. Rioleringswetenschap, 7(28): 15-29.
- Van Bijnen, M., Korving, H., en Clemens F. (2011). *Invloed toestand van de riolering op 'water op straat': een onzekerheidsanalyse gebaseerd op praktijkwaarnemingen en Monte Carlo simulatie met een hydrodynamisch model*. WT-Afvalwater, 12(2): 155-165.

STOWA en Stichting RIONED in het kort

Stichting RIONED is de koepelorganisatie voor de riolering en het stedelijk waterbeheer in Nederland. In RIONED participeren alle partijen die bij de rioleringszorg betrokken zijn: overheden (gemeenten, waterschappen, rijk en provincies), bedrijven (leveranciers, adviesbureaus, inspectiebedrijven en aannemers) en onderwijsinstellingen. De belangrijkste taak van Stichting RIONED is het beschikbaar stellen van kennis aan de vakwereld. Dit doet RIONED door onderzoek, het bundelen van bestaande kennis en het op vele manieren informeren en bij elkaar brengen van professionals.

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.

© 2019 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

François Clemens (hoogleraar Riolering TU Delft)

Jeroen Langeveld (directeur Kennisprogramma Urban Drainage TU Delft)

auteurs

Marco van Bijnen (M. van Bijnen Advies)

omslagfoto

GAW

vormgeving

Jeroen Brugman, gaw ontwerp+communicatie b.v., Wageningen

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

rapportnummer

2019-18

isbn/ean

978 90 73645 70 7

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *'The impact of sewer condition on the performance of sewer systems'* van Marco van Bijnen. Marco ontwikkelde een 'hydraulische vingerafdruk' met informatie over veranderingen in het systeemgedrag. Die informatie kunt u gebruiken voor optimalisatie van het beheer. Het onderzoek laat zien dat door achterstallig onderhoud de veiligheid voor water op straat in de praktijk kan verschuiven van eens per twee naar eens per jaar. Daardoor is ook het risico op contact met rioolwater in de praktijk groter dan beoogd. Het proefschrift beveelt aan om met risicogestuurd beheer de nadruk meer te leggen op de risico's en de prestaties dan op besparing van de kosten.