



Riool- en drinkwaternetwerken bestaan uit een groot aantal verbindingen. De meest kritieke elementen dragen het sterkst bij aan de netwerkprestaties. Als een rioleringsbeheerder weet wat de belangrijkste verbindingen zijn, kan de beheerder deze informatie gebruiken om het rioleringsbeheer te optimaliseren. Met de grafentheoriemethode is het mogelijk de 30-40% meest kritieke leidingen te identificeren voor het functioneren van een rioolstelsel. In tegenstelling tot andere methoden is de grafentheoriemethode te gebruiken voor het volledige netwerk én gekoppelde netwerken. De benodigde rekenkracht en daarmee ook rektijd is veel kleiner dan bij het gebruik van hydrodynamische modellen. Daarnaast zijn bij de grafentheoriemethode de resultaten niet afhankelijk van de toegepaste neerslaggebeurtenis. Dit is bij het gebruik van hydrodynamische modellen wel het geval.

ISBN/EAN 978-90-73645-78-3

Samenvatting proefschrift Didrik Meijer

Graaf-gebaseerde identificatie van kritieke elementen in de stedelijke waterinfrastructuur

Samenvatting proefschrift Didrik Meijer

Graaf-gebaseerde
identificatie van
kritieke elementen
in de stedelijke
waterinfrastructuur

Voorwoord

De stedelijkwaterbeheerders willen hun waterinfrastructuur optimaliseren en zo effectief mogelijk beheren. Hiervoor is het belangrijk de kritieke elementen in het rioolnetwerk te bepalen.

Didrik Meijer doet dit met behulp van de grafentheoriemethode. Hij houdt hierbij rekening met het volledige netwerk en gekoppelde netwerken.

Met de grafentheoriemethode is het mogelijk de 30-40% meest kritieke leidingen te identificeren voor het functioneren van een rioolstelsel. U kunt deze methode gebruiken voor:

1. het ontwikkelen van reinigings- en inspectiestrategieën;
2. het ontwikkelen van monitoringsstrategieën;
3. het robuuster maken van netwerken (gemengde stelsels, hemelwaterstelsels) door aanpassing van de netwerkstructuur of geometrie;
4. impactanalyses van hydraulisch falen van systemen door de resultaten van de op graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode (Graph-Based Weakest Link Method [GBWLM]) te combineren met GIS-analyses.

Een samenvatting van zijn proefschrift 'Graaf-gebaseerde identificatie van kritieke elementen in de stedelijke waterinfrastructuur' leest u in dit boekje. In het volledige (Engelstalige) proefschrift leest u alle details. Het proefschrift vindt u via www.repository.tudelft.nl en de titel (Graph-based identification of critical elements in urban water infrastructure) van het proefschrift.

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

Veel leesplezier en inspiratie!

Hilde Niezen, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA
Februari 2023

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en aanleiding	7
1.2	Leeswijzer	7
2	Methodes om de belangrijkste elementen in drie typen netwerken te bepalen	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Belangrijkste elementen bepalen met hydrodynamische modellen	8
2.3	De beschrijving van netwerken met grafen	9
2.4	Methodes om de mate van belangrijkheid van elementen in netwerken te bepalen	12
2.4.1	<i> Methode om de mate van belangrijkheid van leidingen in netwerken die onder druk staan te bepalen</i>	<i> 12</i>
2.4.2	<i> Methode om de mate van belangrijkheid van leidingen in vrijvervalnetwerken te bepalen</i>	<i> 13</i>
2.5	Methode om de mate van belangrijkheid van groepen van elementen in een stedelijk waternetwerk te bepalen	15
2.5.1	<i> Neerslagbelasting op de systemen</i>	<i> 16</i>
2.5.2	<i> De schematisatie van de deelsystemen</i>	<i> 17</i>
2.5.3	<i> Gelineariseerde hydrodynamica in de graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode</i>	<i> 18</i>
2.6	Overzicht ontwikkelde methodes	19
2.7	Casestudies	19
2.7.1	<i> Casestudies voor drinkwaternetten</i>	<i> 19</i>
2.7.2	<i> Casestudies voor gemengde en hemelwaterriolering</i>	<i> 20</i>
2.7.3	<i> Casestudie voor stedelijkwatersystemen</i>	<i> 21</i>
3	Resultaten	22
3.1	Inleiding	22
3.2	De belangrijkste leidingen in het drinkwaternetwerk van Tuindorp	22
3.3	De belangrijkste leidingen in het rioolstelsel van Tuindorp	23
3.4	De belangrijkste elementen in het stedelijkwatersysteem van Almere	23
4	Mogelijke toepassingsmogelijkheden	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Het ontwikkelen van reinigings- en inspectiestrategieën	25
4.3	Het bepalen van meetlocaties	26
4.4	Versterken van de robuustheid en wegnemen van bottlenecks	26
4.5	De bovengrondse gevolgen (impact) van het falen van ondergrondse netwerken	26
4.6	De toepassing van de ontwikkelde methodes op andere type netwerken	27
5	Conclusies en aanbevelingen	28
6	Referenties	29
	Colofon	30

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding

De prestaties van rioleringsnetwerken staan onder druk. Dit komt door:

- toenemende belasting op de netwerken door verstedelijking, bevolkingsgroei en klimaatverandering;
- verslechtering van de netwerken door veroudering en te weinig onderhoud.

Goed beheer van rioleringsnetwerken is essentieel om de riolering ook in de toekomst goed te laten functioneren. De budgetten voor het onderhoud en de vervanging van riolering zijn gelimiteerd. De rioleringsbeheerders moeten besluiten wanneer welke maatregelen worden uitgevoerd. Niet alle netwerkverbindingen (leidingen) zijn even belangrijk voor de prestaties van een netwerk. De meest kritieke elementen dragen het sterkst bij aan de netwerkprestaties. Als een rioleringsbeheerder weet wat de belangrijkste (meest kritieke) verbindingen zijn, kan de beheerder deze informatie gebruiken om het rioleringsbeheer te optimaliseren.

Er bestaan al verschillende methoden om de mate van belangrijkheid van elementen in riool- en drinkwaternetwerken te bepalen, namelijk:

- Methodes op basis van stromingskarakteristieken. Deze methodes zijn vooral geschikt voor vertakte netwerken.
- Methodes op basis van hydrodynamische modellering: Deze methodes kosten relatief veel rekenkracht.
- Methodes op basis van netwerkanalyse. Deze methodes zijn gericht op het hoofdsysteem en niet op de haarvaten van het systeem.

Om de kritieke elementen in netwerken te bepalen heeft Didrik Meijer de grafentheorie-methodes ontwikkeld. Met deze methodes kunnen beheerders van riool- en drinkwaternetwerken de belangrijkste elementen in hun netwerken identificeren. Vervolgens kunnen zij deze informatie gebruiken om hun onderhouds- en vervangingswerkzaamheden te optimaliseren. De methodes heeft hij ontwikkeld voor en getoetst op 3 typen netwerken:

- Netwerken die door middel van druk water transporteren (drinkwaternetwerken).
- Netwerken die onder vrijverval water afvoeren (gemengde riolering, vuilwater riolering en hemelwater riolering).
- Stedelijkwatersystemen bestaande uit verschillende netwerken met kolken, hemelwaterriolering en oppervlaktewater.

1.2 Leeswijzer

De grafentheorie-methodes voor de verschillende netwerken beschrijft Didrik in hoofdstuk 2. Enkele voorbeelden van de resultaten van de analyses met deze methodes staan in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 leest u hoe de methodes in de praktijk kunnen worden gebruikt en in hoofdstuk 5 staan de belangrijkste conclusies van het onderzoek.

2 Methodes om de belangrijkste elementen in drie typen netwerken te bepalen

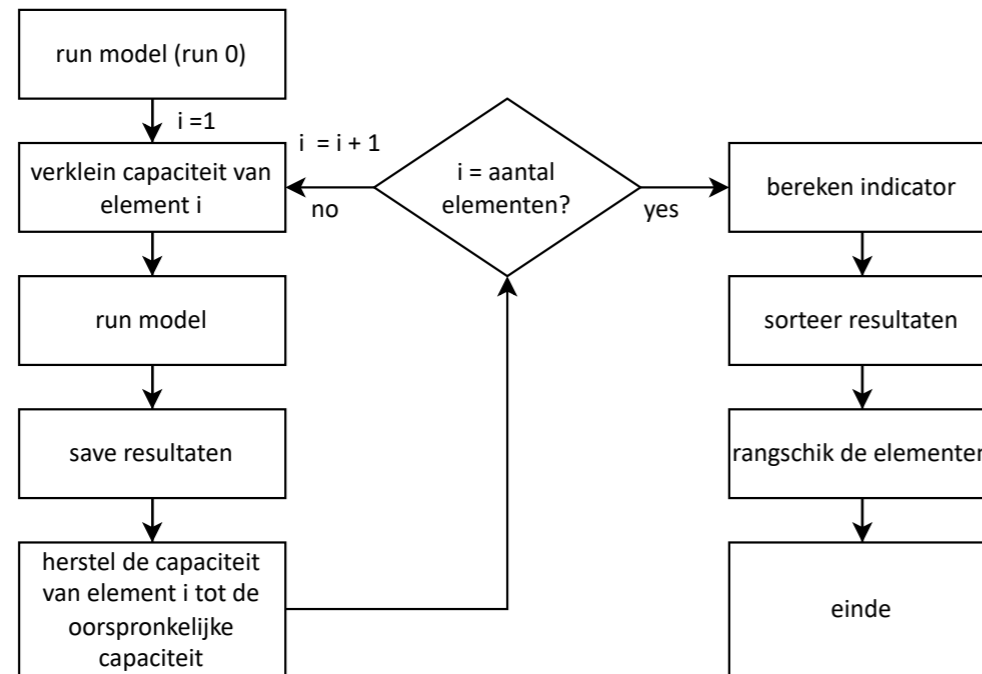
2.1 Inleiding

In dit onderzoek zijn methodes ontwikkeld om de belangrijkste (groepen van) elementen te bepalen voor drie verschillende typen netwerken: vrijvervalsysteem, druksystemen en stedelijke watersystemen. De drie methodes zijn allemaal gebaseerd op de grafentheorie. De resultaten van de drie methodes zijn vergeleken met de resultaten van bestaande methodes gebaseerd op hydrodynamische modellen. In paragraaf 2.2 leest u hoe u de belangrijkste netwerkelementen kunt bepalen op basis van hydrodynamische modellen. In paragraaf 2.3 vindt u een uitleg van de grafentheorie. Paragraaf 2.4 presenteert de grafentheoriemethode voor druksystemen en vrijvervalsysteem en paragraaf 2.5 de op de graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode voor het analyseren van stedelijke watersystemen. Een overzicht van de drie methodes is opgenomen in paragraaf 2.6. De gebruikte casestudies staan in paragraaf 2.7.

2.2 Belangrijkste elementen bepalen met hydrodynamische modellen

Een algemeen toepasbare methode om de mate van belangrijkheid van elementen in netwerken te bepalen is weergegeven in figuur 2.1.

Figuur 2.1
Proces om de mate van belangrijkheid te bepalen met de hydrodynamic model-based weakest link method.



Deze methode is gebaseerd op de Achilles Approach (Mair et al., 2012; Möderl et al., 2009) en de percolatietheorie (Broadbent & Hammersley, 1957; Sahimi, 1994; Stauffer & Aharony, 1991; Stockmayer, 1944). De Achilles Approach gebruikt hydrodynamisch modellen om kwetsbare locaties in (water)netwerken te bepalen. Deze methode heet HBWLM (Hydrodynamic model Based Weakest Link Method [Hydrodynamisch model gebaseerde zwaksteschakelmethode]).

Met de HBWLM wordt de capaciteit van netwerkverbindingen (leidingen, overstorten) één voor één verminderd en wordt het effect op de prestaties van het netwerk bepaald met een hydrodynamisch model. De uitkomsten van de simulaties worden vergeleken met de uitkomsten van het oorspronkelijke model waarin alle elementen hun volledige capaciteit hebben. Het aantal simulaties is gelijk aan het aantal elementen plus één. Een indicator (bv. aantal putten waarbij water op straat wordt berekend, het volume water op straat of waterpeil) voor de netwerkprestaties wordt gebruikt om de elementen te rangschikken. Het meest kritieke element is het element dat leidt tot de slechtste netwerkprestatie als de capaciteit van dit element wordt verminderd.

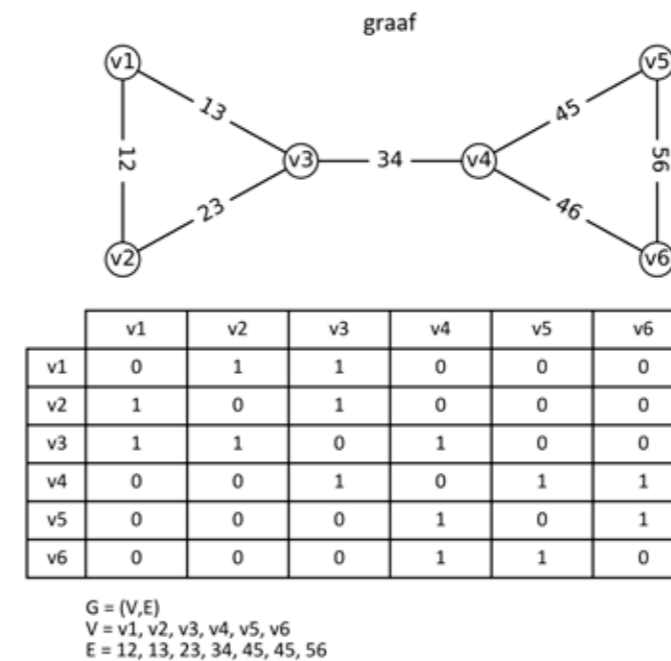
De HBWLM is gebruikt als referentie voor de casestudies (zie paragraaf 2.7). Aan de hand van deze methode kunnen we namelijk de mate van belangrijkheid van alle elementen in het netwerk bepalen op basis van de prestaties van het netwerk. De methode is geschikt voor verschillende netwerktypen (riolering, drinkwater en oppervlaktewater) en faalmechanismes (verstoppingen, lekkages, capaciteitsafname).

2.3 De beschrijving van netwerken met grafen

Dit onderzoek gebruikt de grafentheorie om methodes te ontwikkelen om de mate van belangrijkheid van elementen in netwerken te bepalen. De grafentheorie is toegepast om de hydrodynamische modellen van de HBWLM te vervangen door 'stroompadenanalyses'. Hierdoor is het niet langer nodig om niet-lineaire vergelijkingen op te lossen met hydrodynamische modellen en is er minder rekenkracht nodig en werkt de methode daardoor sneller.

Wat is de grafentheorie?

De grafentheorie is een wiskundige theorie en wordt veel gebruikt bij bijvoorbeeld routeproblemen, logistieke problemen en optimalisatie van stromingsproblemen. Leonhard Euler legde de basis van de grafentheorie in 1736 met het Königsberg brugprobleem (Harju, 2012). Een graaf $G = (V, E)$ is een verzameling V van hoekpunten (knoepunten) en een verzameling E van ribben (verbindingen) gevormd door paren van knooppunten (König, 1936) (zie figuur 2.2).



Figuur 2.2 Een netwerk voorgesteld als een graaf. Bovenaan staat een netwerk bestaande uit knooppunten v1 tot en met v6 (verzameling V) en een aantal verbindingen (verzameling E). Dit netwerk kan ook worden beschreven als een matrix. Knooppunt v3 is bijvoorbeeld verbonden met de knooppunten v1, v2 en v4, wat wordt voorgesteld door een 1 in de matrix.

Netwerken zoals waterleidingnetwerken, rioleringsnetwerken en elektriciteitsnetwerken zijn typische voorbeelden van grafen die bestaan uit verbindingen (leidingen of kabels) en knooppunten (bijvoorbeeld rioolputten). In hydrodynamische modellen worden grafen gebruikt om de structuur van een netwerk weer te geven.

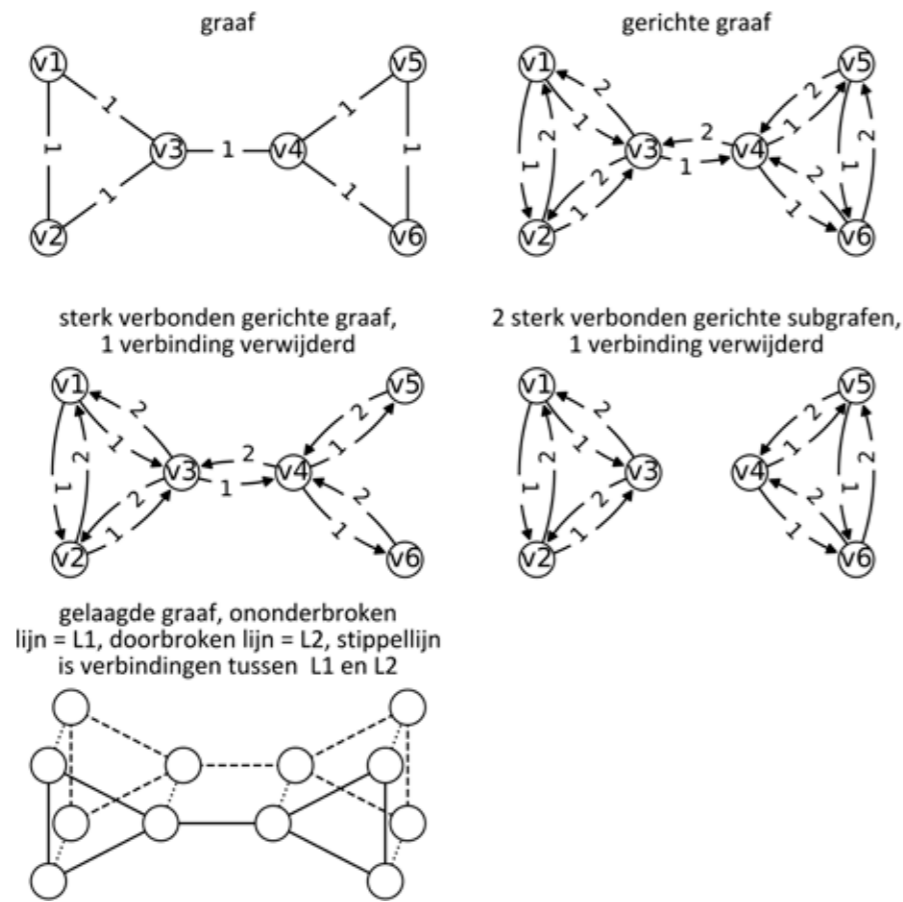
Een pad in een graaf tussen een bronknooppunt en een doelknooppunt is een route tussen deze knooppunten zonder dat een knooppunt meer dan een keer voorkomt. Elke verbinding kan een gewicht, kosten of boete hebben. De term kosten wordt het meest gebruikt en wordt ook in deze samenvatting gebruikt. Dit zijn dus niet de kosten in de zin van aanleg of beheerkosten maar de kosten voor het gebruik van een pad bijvoorbeeld als tijd, afstand of benodigde energie.

Kosten zijn een maat voor het bepalen van de kortste of goedkoopste paden. Voor watersystemen wordt de hoeveelheid energie die nodig is om het water te transporteren (verschil in energiehogte) als optimalisatiecriterium gebruikt. Voor de graaf in figuur 2.3 bestaat een pad van v1 naar v6 uit achtereenvolgens de knooppunten v1, v2, v3, v4, v5, v6 (kosten = 5) en het kortste pad van v1 naar v6 is v1, v3, v4, v6 (kosten = 3). Er zijn verschillende soorten grafen. De graaf linksboven in figuur 2.3 is een graaf waarvoor geldt dat v1, v2 gelijk is aan v2, v1. Deze graaf kan worden gebruikt als de kosten van tegengestelde stroomrichtingen in een leiding gelijk zijn; in dit voorbeeld zijn de kosten 1.

Een gerichte graaf wordt gevormd door knooppunten die met elkaar verbonden zijn door gerichte verbindingen. In een gerichte graaf is de verbinding v1, v2 ongelijk aan v2, v1 terwijl in een (ongerichte) graaf v1, v2 gelijk is aan v2, v1 (zie figuur 2.3, gerichte graaf). Een gerichte graaf kan worden gebruikt wanneer de kosten van tegengestelde stroomrichtingen verschillend zijn. In dit voorbeeld zijn de kosten van de positieve richting 1 en die in de negatieve richting 2. Wanneer alle knooppunten in een gerichte graaf in twee richtingen met elkaar zijn verbonden, spreekt men van een sterk verbonden graaf (zie figuur 2.3 gerichte graaf). Het verwijderen van een verbinding kan resulteren in één of meer sterk verbonden grafen. De graaf midden-links in figuur 2.3 toont de situatie waarin de verbinding v5, v6 en v6, v5 is verwijderd, en het resultaat blijft een sterk verbonden graaf. De graaf midden-rechts in figuur 2.3 toont de situatie waarin de verbinding v3, v4 en v4, v3 is verwijderd, en het resultaat twee verbonden gerichte subgrafen zijn.

Een gelaagde graaf bestaat uit een netwerk en een of meer kopieën van dit netwerk (laag-1 = (gerichte) graaf-1, laag-2 = (gerichte) graaf-2, etc). De lagen zijn met elkaar verbonden op de knopen. Elk knooppunt van laag-1 is verbonden met zijn kopie in laag-2. Voor de verbinding tussen twee knooppunten van verschillende lagen kunnen één of twee (gerichte) verbindingen worden gebruikt (zie de graaf linksonder in figuur 2.3).

Figuur 2.3
Basisprincipes van de grafentheorie. De getallen langs de verbindingen geven de kosten van de verbindingen aan. Alle figuren stellen hetzelfde netwerk voor. De figuur linksboven toont een graaf waarin v1, v2 = v2, v1; De figuur rechtsboven toont een graaf waarin v1, v2 ≠ v2, v1; De graaf links midden toont een sterk verbonden graaf nadat een verbinding is verwijderd; De graaf rechts midden toont twee sterk verbonden gerichte subgrafen nadat een verbinding is verwijderd. De figuur linksonder toont een gelaagde graaf.

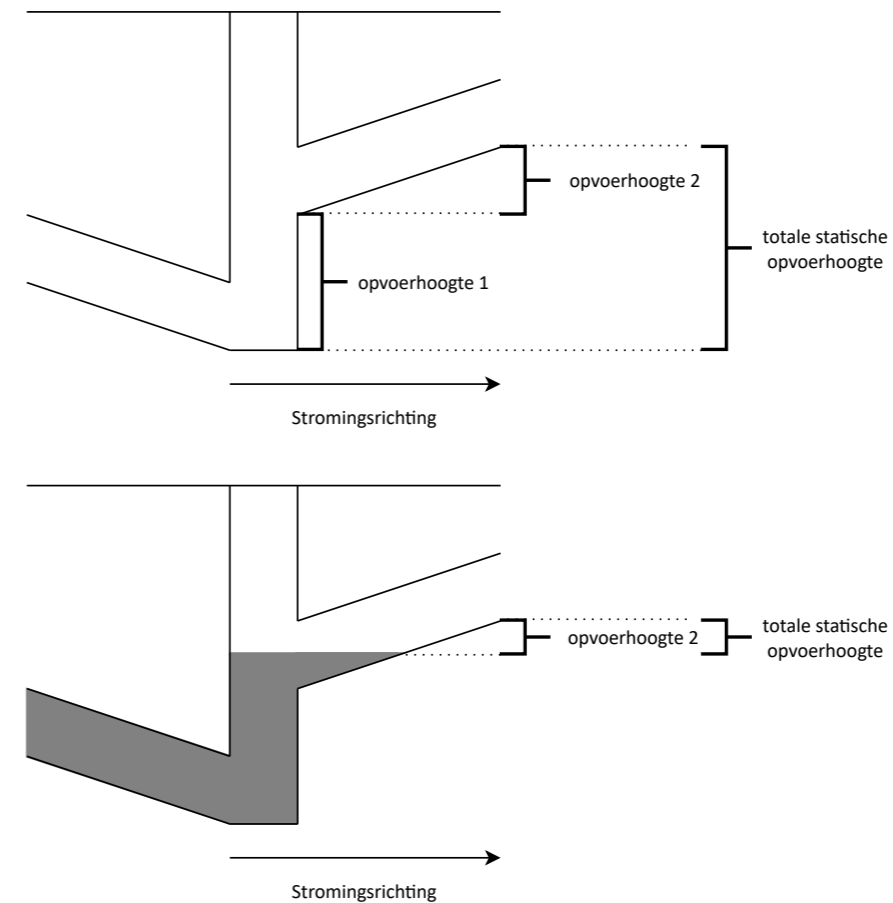


De kosten van de verbindingen zijn in dit onderzoek afgeleid van het verschil in energiehogte. Het verschil in energiehogte is de hoeveelheid energie die nodig is om water te transporteren van punt A naar punt B. Het verschil in energiehogte bestaat uit twee delen. Het eerste deel is de statische opvoerhoogte. Dit is de hoeveelheid energie die nodig is om het water op te voeren. De hoeveelheid energie is gelijk aan het verschil in waterpeil tussen punt A en punt B. Het tweede deel is de dynamische opvoerhoogte. Dit is de hoeveelheid energie die nodig is om het water van punt A naar punt B te laten stromen. De dynamische opvoerhoogte is afhankelijk van de eigenschappen van de vloeistof, de afmetingen van de leiding en de hydraulische eigenschappen. Het dynamisch verschil in energiehogte wordt beschreven als

$$\Delta H = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Hierin is ξ een weerstandsfactor (-), v de snelheid (m/s) en g de zwaartekrachtversnelling (m/s^2).

In een door zwaartekracht aangedreven systeem bestaat de opvoerhoogte uit een dynamisch deel en twee statische delen (zie figuur 2.4). Het eerste statische deel (statische opvoerhoogte 1 in figuur 2.4) is het hoogteverschil tussen het waterniveau in het aansluitpunt of put stroomopwaarts van de leiding en de binnenonderkant buis van de stroomafwaarts gelegen leiding. Als het waterniveau in een put stroomopwaarts van de buis hoger is dan het niveau van de bovenstroomse binnenonderkant buis is deze waarde nul. De tweede statische component is het hoogteverschil tussen het bovenstroomse en benedenstroomse niveau van de leiding zelf (statische opvoerhoogte 2 in figuur 2.4). Als het waterniveau hoger is dan de bovenstroomse binnenonderkant buis, is deze waarde nul. Als de benedenstroomse binnenonderkant buis lager is dan de bovenstroomse, is de waarde ook nul.



Figuur 2.4
Statische opvoerhoogte voor een leeg (boven) en deels gevuld systeem (onder).

2.4 Methodes om de mate van belangrijkheid van elementen in netwerken te bepalen

De grafentheoriemethode (GTM) is een methode om de mate van belangrijkheid van elementen in druksystemen en vrijvervalsysteem te bepalen. Het proces is vergelijkbaar met dat van de HBWLM, maar de hydrodynamische berekeningen van de HBWLM zijn vervangen door stroompadenanalyses op basis van grafentheorie. Hierdoor kunnen we de mate van belangrijkheid van elementen bepalen met minder rekenwerk. De GTM analyseert de gehele netwerkstructuur en bepaalt de gevolgen van het falen van elk element voor de prestaties van het gehele netwerk.

Bij toepassing van de GTM moet deze worden afgestemd op de netwerkenmerken en het faalmechanisme. De belangrijkste verschillen tussen een druksysteem en een vrijvervalsysteem zijn:

- Een drinkwaternetwerk is een systeem dat onder druk staat. Drinkwaterpompstations houden een overdruk in stand om het risico van verontreiniging door grondwater te voorkomen. Rioleringsnetwerken bestaan uit vrijvervalnetwerken (transport op basis van zwaartekracht) en persleidingssystemen (systemen die onder druk staan). Het is in Nederland gebruikelijk dat water wordt verzameld in vrijvervalsysteem en door de zwaartekracht wordt getransporteerd naar gemalen of riooloverstorten. De gemalen transporteren het afvalwater in druksystemen naar afvalwaterzuiveringsinrichtingen.
- In een drinkwaternetwerk bepaalt de watervraag de stroming door het netwerk. In een rioolnetwerk bepaalt het wateraanbod (afvloeiend regenwater of afvalwater) de stroming door het netwerk. Dit houdt in dat het water in een drinkwaternetwerk van een beperkt aantal punten naar veel aansluitpunten stroomt. In een rioolnetwerk is dit precies omgekeerd (van veel punten naar weinig punten).
- Voor het bepalen van de mate van belangrijkheid van leidingen in de riolering wordt volledig verlies van transportcapaciteit (verstopping of volledige structurele instorting) gebruikt als faalmechanisme voor leidingen. Bij een drinkwaternetwerk wordt een drukval als gevolg van lekkage of een leidingbreuk beschouwd als het dominante faalmechanisme.

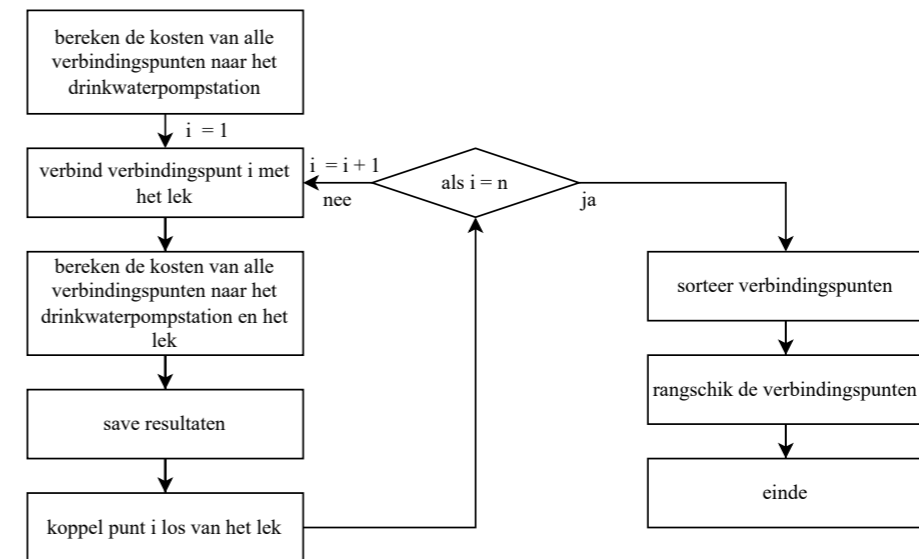
2.4.1 Methode om de mate van belangrijkheid van leidingen in netwerken die onder druk staan te bepalen

De grafentheoriemethode voor druksystemen kunt u gebruiken om te bepalen waar lekken de grootste invloed hebben op de prestaties van drinkwaternetten. De meest kritieke locatie is de locatie die leidt tot de grootste afname van de netwerkprestaties. Lekken zijn toegepast op alle punten waar twee of meer verbindingen samenkomen (verbindingpunten). De elementen die op deze locatie samenkomen worden beschouwd als de meest kritieke elementen.

De impact van een lek is afhankelijk van:

- De locatie van het lek ten opzichte van het drinkwaterpompstation.
- De positie van het lek in het netwerk ten opzichte van andere verbindingpunten in het netwerk.

De locatie van het lek en de positie van het lek in het netwerk zijn gebaseerd op een kortste paden analyse van het verbindingspunt naar de locatie van het lek en naar het drinkwaterpompstation. De kortste paden worden bepaald met het Dijkstra-algoritme (Dijkstra, 1959). Het 'kortste pad' is het pad met de 'minste hydraulische weerstand'. Als de kosten laag zijn, ligt de bron (verbindingspunt) dicht bij het doel (drinkwaterpompstation of lek). Als de kosten hoog zijn, ligt het verbindingspunt ver van het doel. In het geval van meerdere drinkwaterpompstation worden de kosten van alle knooppunten naar alle drinkwaterpompstation bepaald en voor elk knooppunt worden de kosten naar de dichtstbijzijnde drinkwaterpompstation gebruikt als kortste pad. Figuur 2.5 presenteert de GTM voor druk (water) en specifiek voor de situatie waarin de GTM wordt toegepast op een drinkwaternet.



Figuur 2.5
Proces om de mate van belangrijkheid te bepalen met de Grafentheoriemethode voor drinkwaternetten.

Het drinkwaternetwerk is geschematiseerd als een graaf. Elke verbinding (afsluiter, leiding) is geschematiseerd als verbinding. De kosten van de verbindingen zijn afgeleid van het dynamische verschil in energiehogte (zie paragraaf 2.3). De dynamische energiehogte van de elementen hangt af van de toegepaste afvoer. De toegepaste afvoer heeft geen invloed op het resultaat van de GTM zolang de afvoer groter is dan $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

De verbindingpunten worden gerangschikt van het hoogst getelde aantal verbindingpunten (het belangrijkste) tot het laagste aantal verbindingpunten (minst belangrijk). De mate van belangrijkheid van de elementen van het drinkwaternetwerk wordt eerst vergeleken voor alle aansluitpunten en vervolgens alleen voor de aansluitpunten met watergebruikers.

2.4.2 Methode om de mate van belangrijkheid van leidingen in vrijvervalnetwerken te bepalen

De grafentheoriemethode kan worden gebruikt om te bepalen waar verstoppingen in het netwerk de grootste invloed hebben op de prestaties van gemengde rioolsystemen, vuilwaterriolering en hemelwaterriolering. Het meest kritieke element is het element dat leidt tot de grootste afname van de prestaties van het netwerk. Een verstopping wordt gesimuleerd door een leiding uit het netwerk te verwijderen.

Een blokkade leidt tot een afname van de transportcapaciteit van het netwerk. De gevolgen van de verstopping voor het functioneren van het netwerk zijn afhankelijk van:

- de eigenschappen van de geblokkeerde leiding.
- de positie van de blokkade in het netwerk.
- de omleidingsmogelijkheden in het netwerk (deze ontbreken in volledig vertakte netwerken en zijn sterk aanwezig in vermaasde netwerken).

Met de GTM kunnen we de afname van de transportcapaciteit als gevolg van een blokkade toetsen op basis van de toename van de transportkosten. De transportkosten zijn gebaseerd op de kortste paden van alle knooppunten naar de dichtstbijzijnde lozingspunt. Bij droog weer is het gemaal het lozingspunt. Tijdens neerslag zijn het gemaal en de overstorten of uitstroompunten de lozingspunten. Omdat de transportkosten worden gebruikt zijn de uitkomsten van de methode niet afhankelijk van een gekozen neerslaggebeurtenis. De transportkosten worden als volgt berekend:

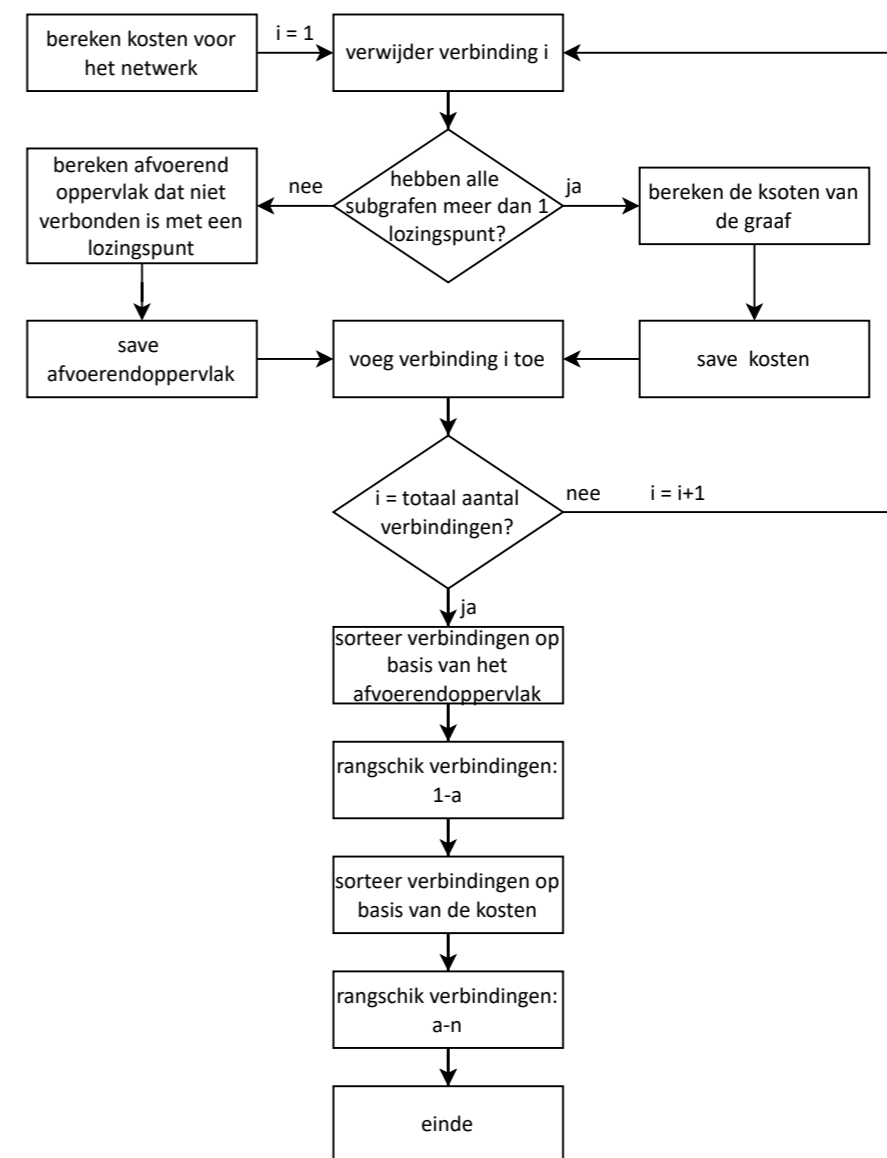
$$C_{\text{graaf}} = \sum_{i=1}^n C_{i-\text{outfall}} * A_i \quad (2.2)$$

Hierin is C_{graaf} de totale transportkosten van het netwerk, n het aantal putten in het netwerk, $C_{i-\text{outfall}}$ de kosten van de kortste weg van put i naar het dichtstbijzijnde lozingspunt en A_i het afvoerend oppervlak van put i .

Het rioleringsnetwerk is geschematiseerd als een gerichte graaf. Elke put is een knooppunt en elke leiding een verbinding. Tussen elk knooppuntenpaar zijn twee verbindingen gebruikt, elk met zijn eigen kosten. De kosten van de verbindingen zijn afgeleid van de energiehoogte (statisch en dynamisch) in de verbinding (zie 2.3). Hierdoor kan onderscheid gemaakt worden in de kosten van een positieve en negatieve stroomrichting (zie figuur 2.3, gerichte graaf). Dit is nodig omdat een verstopping van een leiding kan leiden tot een omgekeerde stroming.

Nadat de totale kosten van de volledige graaf zijn berekend, wordt een verbinding tussen een paar knooppunten verwijderd om een blokkade van de leiding te simuleren (zie de middelste afbeeldingen in figuur 2.3). Dit houdt in dat de verbindingen v_x, v_y en v_y, v_x worden verwijderd. Wanneer alle knooppunten verbonden zijn, blijft de nieuwe graaf een sterk verbonden gerichte graaf (zie figuur 2.3, midden-links). Anders is het resultaat twee sterk verbonden gerichte subgrafen (zie figuur 2.3, midden-rechts). Twee situaties zijn mogelijk. In de eerste bevatten alle (sub)grafen ten minste één lozingspunt (doelknoop). In de tweede situatie bevat slechts één van de subgrafen ten minste één lozingspunt. In de eerste situatie worden de totale kosten van de (sub)grafen bepaald. Als de tweede situatie zich voordoet, wordt het afvoerend oppervlak van de knooppunten die niet met een lozingspunt zijn verbonden opgeteld.

Het resultaat is een lijst van verwijderde verbindingen met de totale kosten of het afvoerend oppervlak dat niet meer verbonden is met een lozingspunt. Wanneer een deel van het netwerk niet langer verbonden is met een lozingspunt vanwege een geblokkeerde afvoerleiding, zal water op straat optreden zodra de berging in de leidingen gevuld is. De ernst van de blokkade hangt af van de omvang van het gebied dat niet meer verbonden is met een lozingspunt. De geblokkeerde leidingen die leiden tot 'niet aangesloten knooppunten' worden gerangschikt op basis van het afvoerend oppervlak dat op deze knooppunten is aangesloten. De verwijderde verbindingen worden gesorteerd. Eerst op basis van de hoeveelheid afvoerend oppervlak dat niet met een lozingspunt is verbonden (van een grote naar een kleine hoeveelheid afvoerend oppervlak). Vervolgens op basis van de totale kosten van de graaf (van hoge naar lage kosten). De verwijderde verbindingen worden gerangschikt op volgorde van belangrijkheid. Het toegepaste proces is weergegeven in figuur 2.6.



Figuur 2.6
Proces om de mate van belangrijkheid van leidingen in een vrijvalstelsel te bepalen met grafentheorie-methode.

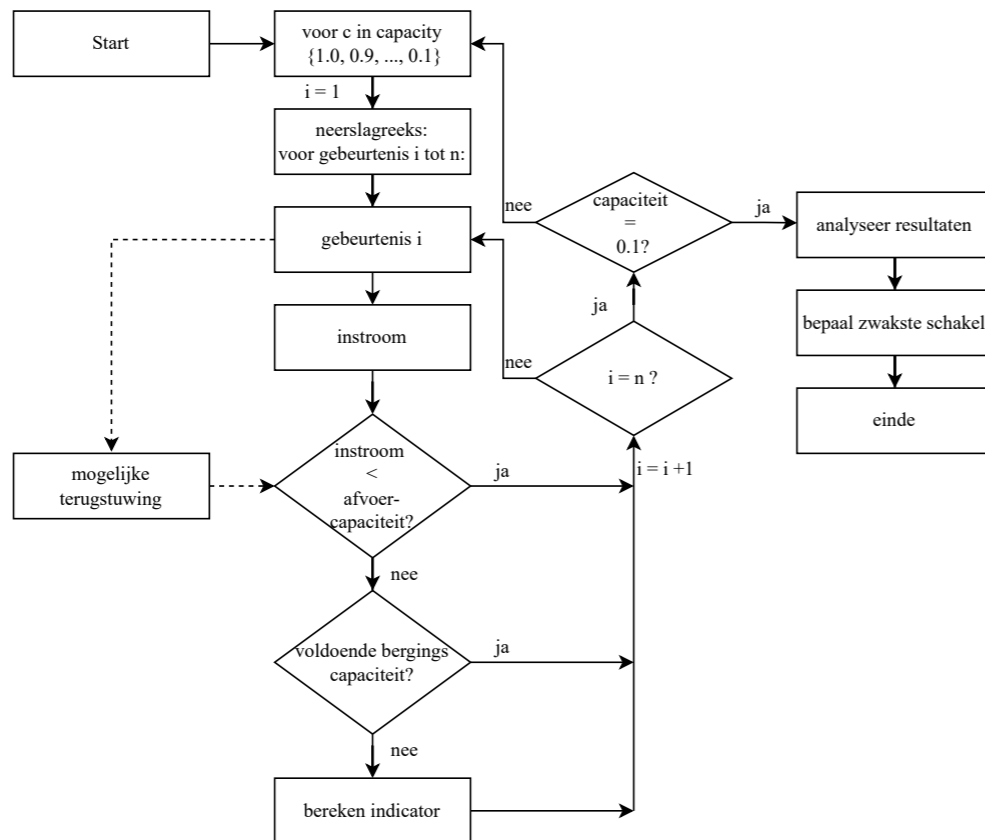
2.5 Methode om de mate van belangrijkheid van groepen van elementen in een stedelijk waternetwerk te bepalen

De Graph-Based Weakest Link Method (graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode, GBWLM) is ontwikkeld voor de analyse van de mate van belangrijkheid van (groepen) elementen in stedelijke watersystemen. De methode kan worden gebruikt om te bepalen welk (element van welk) deelsysteem de grootste invloed heeft op de systeemprestaties wanneer de capaciteit van het deelsysteem afneemt of wanneer de belasting van het systeem toeneemt. De systeemprestaties worden beoordeeld op basis van de overstromingsfrequentie en de omvang van het overstroomde gebied.

Het effect op de systeemprestaties hangt af van het effect van de wijziging van de capaciteit of de belasting op het deelsysteem, maar ook van de interactie tussen de deelsystemen. Zij reageren verschillend op veranderingen in de belasting of capaciteit omdat de deelsystemen zijn ontworpen op basis van verschillende bergings- en afvoernormen. Daarom is een analyse met een neerslagreeks nodig om de prestaties van het systeem onder verschillende omstandigheden te analyseren. De GBWLM is ontwikkeld om stedelijke waternetwerken te analyseren op drie niveaus van deelsystemen: kolken, (hemelwater)riolen en oppervlaktewatersystemen, met neerslagreeksen van meerdere decennia.

De GBWLM is gebaseerd op de HBWLM (zie paragraaf 2.2). De hydrodynamische modellen zijn vervangen door waterbalansen en stroompadenanalyse. Het functioneren van stedelijke watersystemen is afhankelijk van de beschikbare afvoer- en bergingscapaciteit. Voor de analyse van de stromen door het netwerk wordt het minimumkostenstroomalgoritme (Hagberg et al., 2008) gebruikt. Het stroomschema van de GBWLM is weergegeven in figuur 2.7.

Figuur 2.7
Overzicht van de Graph-Based weakest link method toegepast op stedelijke watersystemen.



2.5.1 Neerslagbelasting op de systemen

In de GBWLM wordt gebruik gemaakt van een meerjarige neerslagreeks die is onderverdeeld in onderling onafhankelijke gebeurtenissen. Gebeurtenissen zijn onafhankelijk als de begin- en eindtoestand in het bestudeerde systeem identiek zijn. De karakteristieke reactietijden van de kolken en de riolering worden bepaald en gebruikt om de reeks op te delen in afzonderlijke onafhankelijke gebeurtenissen. Het stedelijkwatersysteem is doorgerekend met de gehele neerslagreeks en er is geanalyseerd of bij de gebeurtenissen water op straat optreedt.

De kritische neerslagbelasting van de deelsystemen hangt af van hun primaire functie (berging of afvoer). De leidende functies (in vlakke gebieden) zijn de volgende:

- Kolken: overschrijding van de afvoercapaciteit (neerslagintensiteit).
- Riolering: overschrijding van de afvoercapaciteit (neerslagintensiteit).
- Oppervlaktewatersystemen: overschrijding van de bergingscapaciteit (neerslaghoeveelheid).

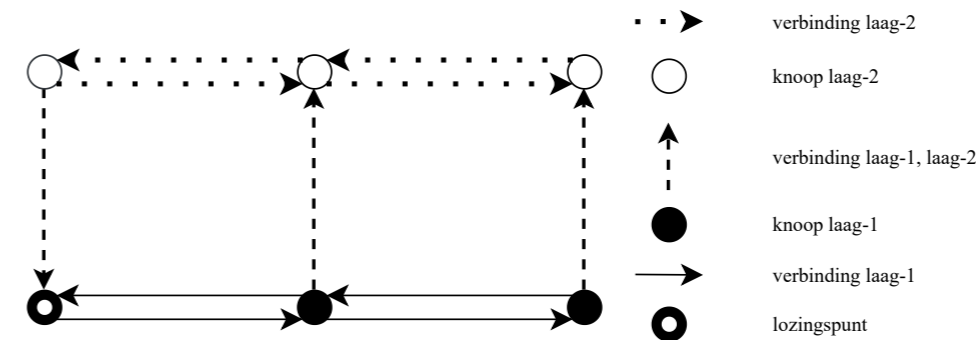
De in- en uitstroom van de deelsystemen zijn afhankelijk van elkaar. De maximale afvoercapaciteit van kolken is van invloed op de maximale instroom van de regenwaterriolen. Bovendien resulteert de cumulatieve uitstroom van het hemelwaterriool in een cumulatieve instroom van het oppervlaktewatersysteem.

2.5.2 De schematisatie van de deelsystemen

Het ontwerp van de deelsystemen in de GBWLM kan worden afgestemd op de kenmerken van de systemen en de primaire functies. De kolken worden geschematiseerd als een reservoir met uitstroom. De riolen en oppervlaktewatersystemen worden beschreven als gerichte grafen. In de rioolgrafen stellen de knooppunten de putten voor en de verbindingen de leidingen. In oppervlaktewatergrafen komen de knooppunten overeen met de waterlopen tussen twee structuren, en de verbindingen met de kunstwerken (stuwen, doorlaten, gemalen).

Voor een oppervlaktewatersysteem wordt een kopie van gerichte graaf-1 gemaakt (gerichte graaf-2). In combinatie vormen de twee gerichte grafen een gelaagde graaf (laag-1 = gerichte graaf-1, laag-2 = gerichte graaf-2; zie figuur 2.8). Laag-2 wordt gebruikt als bypass om het water af te voeren indien de capaciteit van laag-1 onvoldoende is. De bypass wordt gebruikt om ervoor te zorgen dat het gebruikte algoritme altijd een oplossing bereikt. De lagen zijn verbonden op de knooppunten. Elk knooppunt van laag-1 is verbonden met zijn kopie in laag-2. Op de uitstroomlocatie(s) van het netwerk is de richting van de verbinding tussen de lagen van laag-2 naar laag-1. Op de andere knooppunten is de richting tussen de lagen van laag-1 naar laag-2.

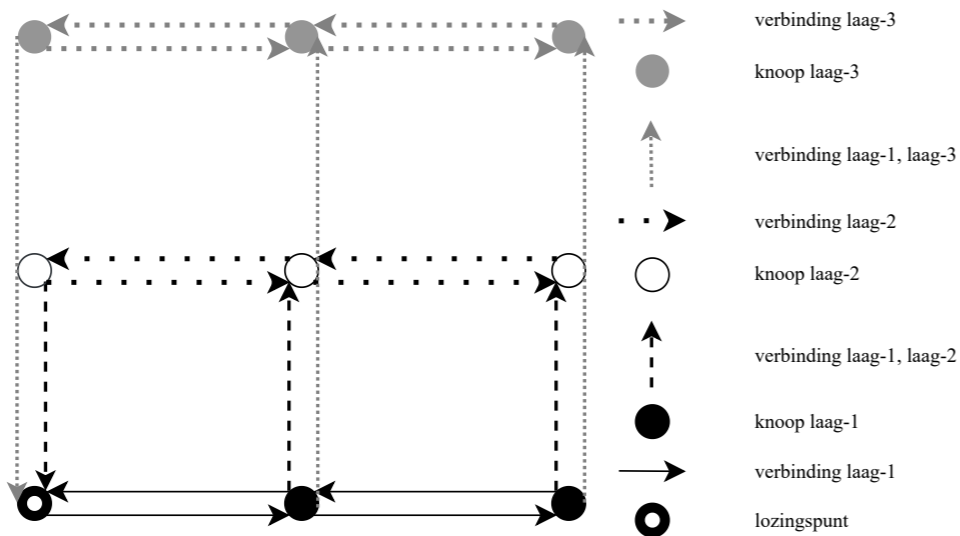
Voor het oppervlaktewatersysteem wordt op elk knooppunt een waterbalans gebruikt voor de berging van het water dat niet via de kunstwerken kan worden afgevoerd. De beschikbare berging wordt bepaald voor de waterlopen tussen twee kunstwerken.



Figuur 2.8
Overzicht van de verbindingen in de oppervlaktewater-component van de graph-based weakest link method. Laag-1 stelt de structuur van het netwerk voor, waarin de knooppunten waterlopen voorstellen. De verbindingen komen overeen met de kunstwerken. Laag-2 wordt gebruikt wanneer de capaciteit van laag-1 wordt overschreden en wijst op een stijgend waterpeil in het oppervlaktewatersysteem.

Voor een gemengd- of hemelwaterriool worden twee kopieën van de gerichte graaf-1 gemaakt (gerichte graaf-2 en gerichte graaf-3). In laag-1 stellen de knooppunten de putten voor en de verbindingen de leidingen van de hemelwater- of gemengde riolering. Elk knooppunt van laag-1 is gekoppeld aan de kopie van dit knooppunt in laag-2 (verbinding L1-L2) en laag-3 (verbinding L1-L3). Op de uitstroomlocaties worden de knooppunten van de lagen verbonden met een verbinding in tegengestelde richting (verbinding L2-L1 en verbinding L3-L1 in plaats van verbinding L1-L2 en verbinding L1-L3). Laag-2 wordt gebruikt om het water af te voeren wanneer de capaciteit van laag-1 onvoldoende is. Laag-3 wordt gebruikt als bypass om het water af te voeren wanneer de capaciteit van laag-1 en de verbindingen L1-L2 onvoldoende zijn (zie figuur 2.9). Het gebruik van drie lagen maakt het mogelijk de capaciteit van de verbinding L1-L2 te beperken en toch altijd via laag-3 tot een oplossing van het gebruikte algoritme te komen.

Figuur 2.9
 Overzicht van de verbindingen in de hemelwater- of gemengde rioolcomponent van de graph-based weakest link method. Laag-1 vertegenwoordigt de structuur van de netwerken waarin de knooppunten de putten voorstellen. De verbindingen komen overeen met de leidingen en kunstwerken. Laag-2 wordt gebruikt wanneer de capaciteit van laag-1 wordt overschreden en wijst op water op straat. Laag-3 is een bypass wanneer de capaciteit van de verbindingen tussen laag-1 en laag-2 wordt overschreden die er voor zorgt dat er altijd een oplossing kan worden berekend.



2.5.3 Gelineariseerde hydrodynamica in de graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode

De hydrodynamica wordt gelineariseerd om de capaciteit van de leidingen en de kosten van de verbindingen tussen de lagen van de graaf te bepalen. De kwadratische hydraulische gradiëntvergelijking (vergelijking 2.3) is vereenvoudigd tot een lineair verband (vergelijking 2.4). Op basis van de maximaal beschikbare hydraulische gradiënt wordt de maximale capaciteit van elke leiding berekend (vergelijking 2.3). α_{lineair} wordt voor elke leiding bepaald door de afvoer (tussen nul en de maximale leidingcapaciteit) en de maximaal beschikbare hydraulische gradiënt te lineariseren met vergelijking 2.4:

$$I = \alpha_{\text{kwadratisch}} Q^2 \quad 2.3$$

$$I = \alpha_{\text{lineair}} |Q| \quad 2.4$$

waarin I de hydraulische gradiënt is (-), Q de afvoer (m³/s), $\alpha_{\text{kwadratisch}}$ een kwadratische hydraulische parameter (s²/m⁶) en α_{lineair} een lineaire hydraulische parameter (s/m³).

Het proces van linearisatie in de GBWLM bestaat uit de volgende stappen:

- Bereken de kosten van de leidingen op basis van de energiehoogte.
- Bereken het beschikbare hydraulische verhang.
- Bereken de maximale leidingcapaciteit met vergelijking 2.3.
- Bereken α_{lineair} met vergelijking 2.4.
- Bepaal het afvoerend oppervlak dat via een leiding afwatert.
- Bepaal de kosten tussen aansluitingen voor laag-1 en laag-2 op basis van de waking.

2.6 Overzicht ontwikkelde methodes

In tabel 2.1 en in tabel 2.2. zijn de belangrijkste kenmerken van de ontwikkelde methodes samengevat.

	Systemen onder druk	Vrij verval systemen
Faalmechanisme	Lek	Verstopping
Resultaat	Rangschikken van de elementen	Rangschikken van de elementen
Netwerk schematisatie	(ongericte) Graaf	Gerichte graaf
Kosten van de verbindingen	Dynamische energiehoogte	Statische en dynamische energiehoogte
Capaciteit van de verbindingen	Niet van toepassing	Niet van toepassing
Evaluatie methode	Kosten aan lek versus kosten aan pompstations	Niet aangesloten knooppunt en kosten naar uitroempunten

Tabel 2.1
 Kenmerken van de grafentheorie methode voor druksystemen en zwaartekrachtssystemen

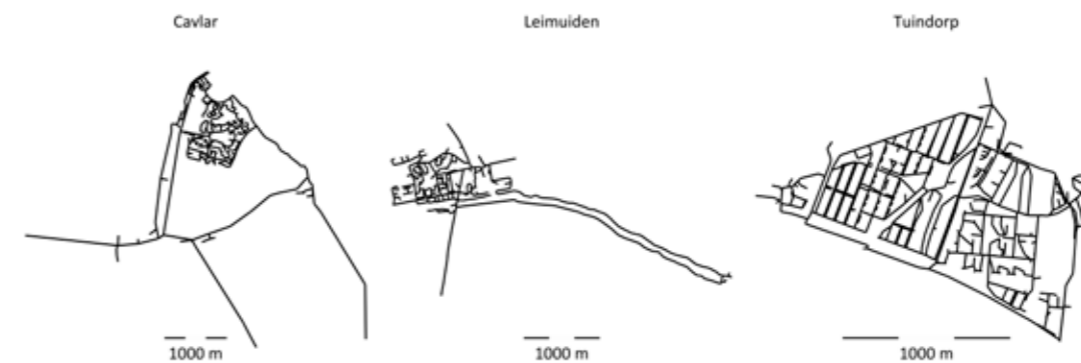
	kolken	riolering	oppervlaktewater
Faalmechanisme	Capaciteitsvermindering	Capaciteitsvermindering	Capaciteitsvermindering
Resultaat	Overstroomd gebied en overstroomingsfrequentie	Overstroomd gebied en overstroomingsfrequentie	Overstroomd gebied en overstroomingsfrequentie
Netwerk schematisatie	Niet van toepassing	Gerichte graaf met drie lagen	Gerichte graaf met twee lagen
Kosten van de verbindingen	Niet van toepassing	Statische en dynamische energiehoogte	Statische en dynamische energiehoogte
Capaciteit van de verbindingen	Niet van toepassing	Gelineariseerde hydraulica	Gelineariseerde hydraulica
Evaluatie methode	Instream vs capaciteit	Stroming tussen de lagen van de graaf	Stroming tussen de lagen van de graaf en waterbalans

Tabel 2.2
 Kenmerken van de op Graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode voor stedelijke watersystemen bestaande uit kolken, hemelwater- of gecombineerde rioolstelsels en oppervlaktewater.

2.7 Casestudies

2.7.1 Casestudies voor drinkwaternetten

Voor een demonstratie en een vergelijkende analyse van het GTM voor druksystemen met de HBWLM zijn drie drinkwaternetten gebruikt als casestudies: Cavlar, Leimuiden en Tuindorp Utrecht. De structuur van de netwerken is weergegeven in figuur 2.10. Het Cavlarnetwerk is een onderzoeksnetwerk voor het testen van berekeningen. Het Leimuidennetwerk is gebruikt in andere onderzoeken en het Tuindorpnnetwerk komt overeen met het gebied van de rioleringscase.



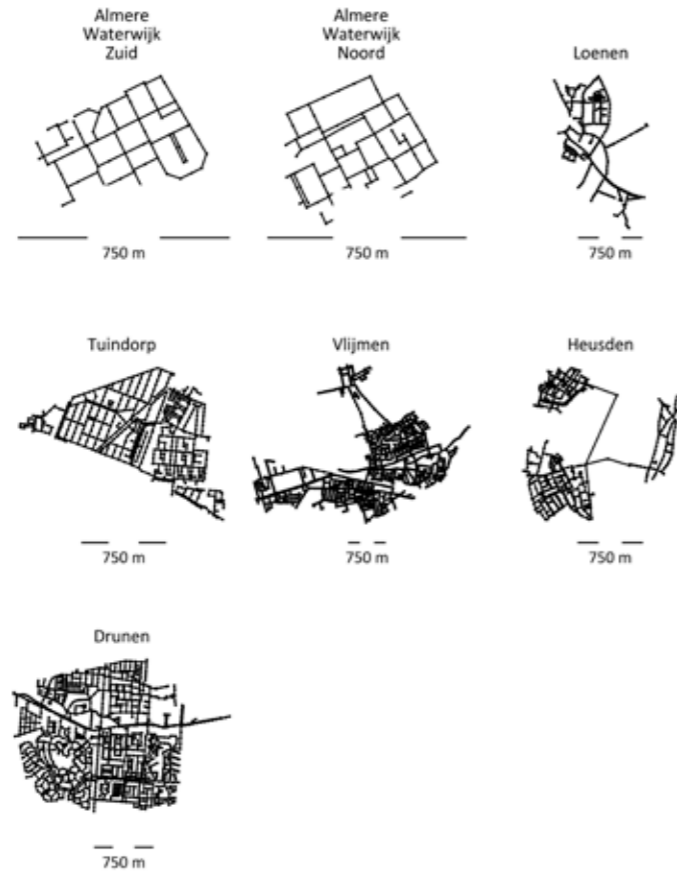
Figuur 2.10
 De structuur van de drinkwaternetten

2.7.2 Casestudies voor gemengde en hemelwaterriolering

Voor een demonstratie en een vergelijkende analyse van de GTM voor vrijvervalsystemen met de HBWLM zijn zeven rioolstelsels gebruikt als casestudie (zie figuur 2.11):

- De rioolstelsels van Loenen en Tuindorp in Utrecht zijn het uitgebreidst onderzocht met de GTM voor vrijverval systemen.
- De hemelwaterriolering van Waterwijk-Zuid en Waterwijk-Noord in Almere zijn gebruikt voor de Graph-Based Weakest Link Method (GBWLM).
- De rioolstelsels van Vlijmen, Heusden en Drunen zijn gebruikt als aanvullende analyse en om een parameter te ontwikkelen die gebruikt kan worden om vooraf te bepalen of de GBWLM succesvol kan worden toegepast.

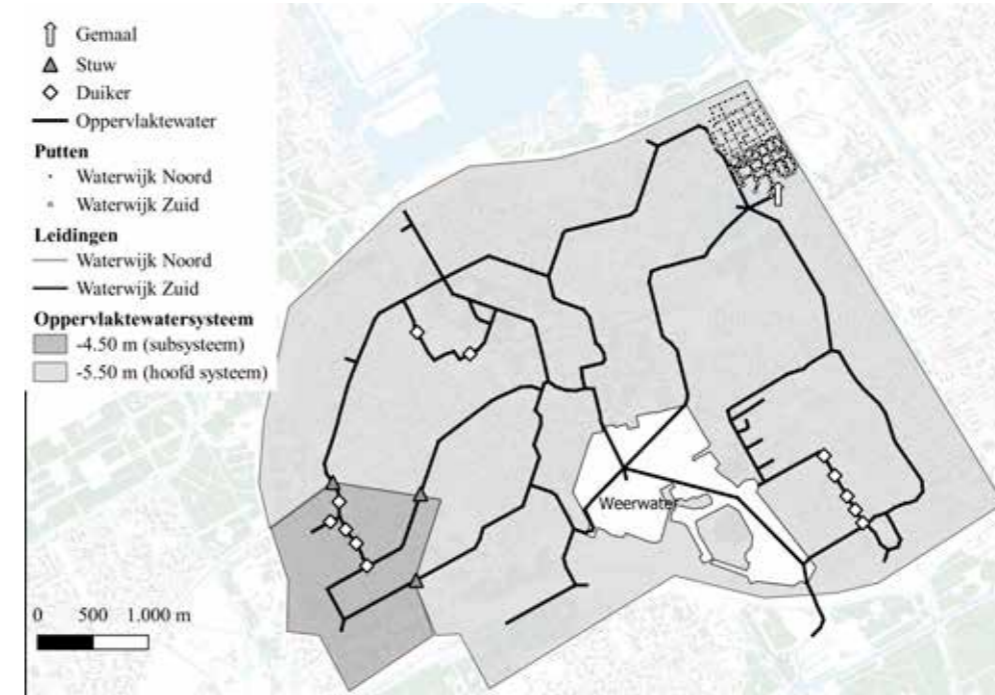
Figuur 2.11
Structuur (putten en leidingen) van de zeven geanalyseerde rioolstelsels



2.7.3 Casestudie voor stedelijkwatersystemen

Een deel van het stedelijkwatersysteem van Almere is gebruikt als casestudie voor de GBWLM. De casestudie richtte zich op het oppervlaktewatersysteem in Almere Centrum (zie figuur 2.12) en de regenwaterwingebieden Waterwijk Noord en Waterwijk Zuid, gelegen in het noordoostelijke deel van het gebied (zie figuur 2.11). Het gemaal dat water loost op een groter regionaal oppervlaktewatersysteem ligt net ten zuiden van Waterwijk Zuid. Het 'Weerwater' is een recreatieplas (1,5 km²) in het midden van het oppervlaktewatersysteem. Door de bergingscapaciteit heeft het een dempend effect op schommelingen in het oppervlaktewaterpeil.

Figuur 2.12
Het stedelijk watersysteem van Almere



3 Resultaten

3.1 Inleiding

De resultaten van de in dit onderzoek ontwikkelde grafentheoriemethodes (GTM) en de graaf-gebaseerde zwaksteschakelmethode (GBWLM) zijn vergeleken met de resultaten van de bestaande Hydrodynamisch model gebaseerde zwaksteschakelmethode (HBWLM). In het onderzoek is aangetoond dat de resultaten van de GTM en de GBWLM voldoende overeenkomen met de HBWLM om voor de uitgevoerde case studies de mate van belangrijkheid van de elementen in de netwerken te kunnen bepalen. Dit hoofdstuk presenteert enkele van de resultaten als inspiratie voor hoe de ontwikkelde methodes toegepast kunnen worden.

3.2 De belangrijkste leidingen in het drinkwaternetwerk van Tuindorp

De potentieel meest kritieke leklocaties in het drinkwaternetwerk van Tuindorp zijn bepaald met de HBWLM en de GTM voor systemen die onder druk staan. De 'belangrijkste' verbindingpunten die bepaald zijn met de twee methodes laten een soortgelijk patroon zien (zie figuur 3.1). Voor het functioneren van het systeem zijn de elementen die verbonden zijn met deze verbindingpunten belangrijker dan de verbindingpunten zelf. De verbindingpunten geven een patroon in het netwerk dat kan worden gebruikt om de belangrijkste verbindingen in het netwerk te selecteren.

Figuur 3.1
Overzicht van de 25% belangrijkste (zwarte stippen) van het waterdistributienetwerk van Tuindorp op basis van de hydrodynamische modelgebaseerde zwaksteschakelmethode (boven) en de Grafentheoriemethode (onder). Deze verbindingpunten vormen een duidelijk patroon in het netwerk, dat kan worden gebruikt om de belangrijkste elementen van het netwerk te selecteren.



3.3 De belangrijkste leidingen in het rioolstelsel van Tuindorp

De grafentheoriemethode voor vrijvervalsysteem en de HBWLM zijn gebruikt om de meest belangrijke leidingen voor het functioneren van de riolering van Tuindorp te bepalen. De uitkomsten van de HBWLM zijn sterk afhankelijk van de neerslaggebeurtenis die wordt gebruikt. Het effect van een verstopping hangt af van de beschikbare overcapaciteit van het systeem. Als een systeem bij een bepaalde belasting een zekere overcapaciteit heeft, kan een verminderde capaciteit van de leidingen ver van een lozingspunt in het bovenstroomse deel van het netwerk leiden tot meer punten met water op straat dan een verminderde capaciteit van een hoofdtransportleiding met omleidingsmogelijkheden dicht bij een lozingspunt. Indien daarentegen de belasting van het gehele systeem kritiek is, zal een verminderde capaciteit van de hoofdtransportleidingen dicht bij een lozingspunt een groter effect hebben op het aantal water op straat locaties dan een verminderde capaciteit van leidingen in het bovenstroomse deel van het netwerk.

Bij de grafentheoriemethode worden leidingen die bij verstopping er toe leiden dat een deel van het netwerk niet kan afvoeren naar het gemaal of een overstort als het meest kritiek geclassificeerd. Hierdoor worden ook veel eindstrengen als kritiek bestempeld. Andere belangrijke leidingen zijn de leidingen in de richting van de overstorten zie figuur 3.2.



Figuur 3.2
Mate van belangrijkheid van de leidingen in Tuindorp. De rode lijnen zijn de belangrijkste leidingen en de groene lijnen zijn de minst belangrijke leidingen.

3.4 De belangrijkste elementen in het stedelijkwatersysteem van Almere

De water op straatfrequentie en -omvang zijn gebruikt om het effect van de capaciteitsvermindering van het stedelijkwatersysteem van Almere te analyseren. De water op straatfrequentie en -omvang zijn bepaald voor verschillende capaciteitsreducties van de drie geanalyseerde deelsystemen: kolken, hemelwaterriolering en oppervlaktewater. De resultaten van Waterwijk-Noord zijn weergegeven in een staafdiagram (figuur 3.3). Op de horizontale as staat de capaciteitsvermindering (%). Op de verticale as de overstromingsfrequentie (aantal per jaar). De grijstint van de balk geeft de overstromingsomvang aan (overstroomd gebied als percentage van het totale verharde oppervlak).

De resultaten voor het oppervlaktewatersysteem in figuur 3.3 tonen de toename van de water op straatsituatie in vergelijking met de situatie waarin alle drie de deelsystemen hun volledige capaciteit hebben. De totale water op straatomvang is dus de som van de overstroming in het regenwaterriool bij 0% capaciteitsvermindering en de overstroming door het oppervlaktewatersysteem.

Kolken

Als de volledige capaciteit van de kolken beschikbaar is, wordt de capaciteit 0-2 keer per jaar overschreden. De water op straatfrequentie en -omvang nemen toe als de capaciteit afneemt. Zolang de capaciteitsvermindering onder de 30-40% ligt, is de water op straatomvang en-frequentie relatief beperkt. Dit betekent dat de overcapaciteit voor de meeste kolken circa 30% is.

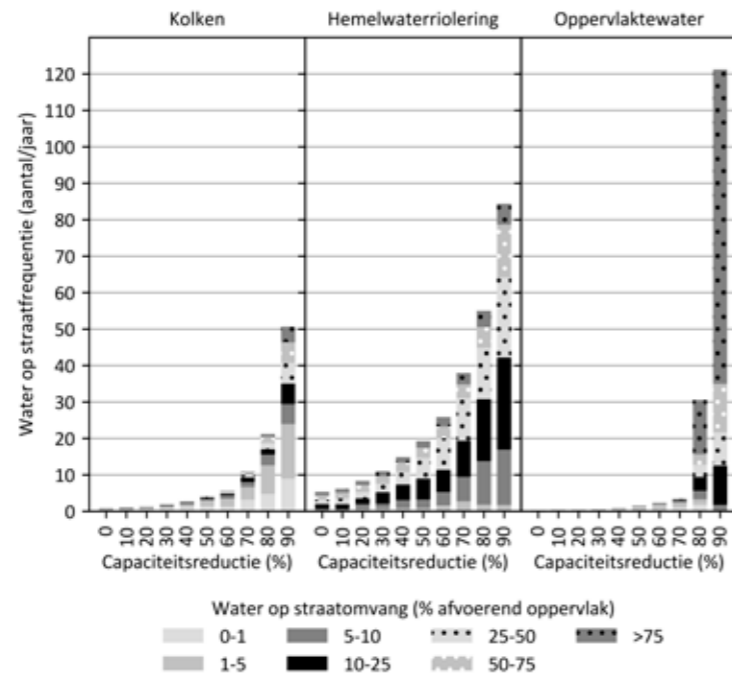
Hemelwaterriolering

Zonder capaciteitsvermindering is de berekende water op straatfrequentie in Waterwijk Noord vijf keer per jaar. In werkelijkheid zal deze lager zijn omdat er geen gebruik is gemaakt van een inloopmodel. In Waterwijk-Noord neemt de frequentie van alle overstromingscategorieën toe als de capaciteit afneemt.

Oppervlaktewater

Het effect van een capaciteitsvermindering van het oppervlaktewater is relatief beperkt als de capaciteitsvermindering onder de 70% ligt. Wanneer de capaciteitsvermindering groter is, neemt zowel de water op straatfrequentie als -omvang sterk toe. Het oppervlaktewater-systeem is 'robuust' doordat het Weerwater voor relatief veel bergingscapaciteit zorgt.

Figuur 3.3
Overzicht van de overstromingsfrequentie per jaar voor de verschillende beschikbare capaciteiten van kolken, stormriolen en oppervlaktewater in Waterwijk Noord. Bij volledige capaciteit is de overstromingsfrequentie van de kolken minder dan 1 keer per jaar, de overstromingsfrequentie van het stormriool 5 keer per jaar en de overstromingsfrequentie van het oppervlaktewater minder dan 1 keer per jaar.



Door klimaatverandering is de verwachting dat de neerslagintensiteiten van neerslaggebeurtenissen met terugkeerperioden van 0,5-1000 jaar en een duur van 10 minuten tot 12 uur toenemen met 17,1-21,3% (Beersma et al., 2019). Het effect op water op straat van een toename van de belasting met 20% komt ongeveer overeen met een afname van de capaciteit met 20%. Figuur 3.3 laat zien dat een dergelijke capaciteitsvermindering nauwelijks effect heeft op de overstromingsfrequentie en -omvang veroorzaakt door kolken en oppervlaktewater. Voor de hemelwaterriolering kan dit echter leiden tot een toename met 50% van de overstromingsfrequentie en een toename van de omvang van het overstromende gebied.

4 Toepassingsmogelijkheden

4.1 Inleiding

De in dit onderzoek ontwikkelde methodes geven inzicht in welke leidingen meer en welke leidingen minder belangrijk zijn voor het functioneren van een netwerk. Dit inzicht is geen doel op zich, maar kan op verschillende manieren toegepast worden in het beheer van een netwerk. In dit hoofdstuk staat een aantal toepassingsmogelijkheden waarbij de informatie over de mate van belangrijkheid van een leiding gebruikt kan worden:

- Het ontwikkelen van reinigings- en inspectiestrategieën.
- Het ontwikkelen van monitoringsstrategieën.
- Het robuuster maken van netwerken (gemengde stelsels, hemelwaterstelsels) door aanpassing van de netwerkstructuur of geometrie.
- Impactanalyses van hydraulisch falen van systemen door de resultaten van de op graaf-gebaseerde gebaseerde zwaksteschakelmethode (GBWLM) te combineren met GIS-analyses.
- Toepassing van de grafentheoriemethode en GBWLM op andere netwerken.

Een deel van deze voorbeelden is al in praktijk toegepast en een deel nog niet.

4.2 Het ontwikkelen van reinigings- en inspectiestrategieën

In een aantal gemeenten is de grafentheoriemethode (GTM) gebruikt om een reinigings- en inspectiestrategie te ontwikkelen voor de riolering. De leidingen die belangrijk zijn voor het functioneren van de riolering worden vaker gereinigd en geïnspecteerd dan de minder belangrijke leidingen. Het doel is om met evenveel of minder inspanning een betere performance van de riolering te bereiken.

Het ontwikkelen van de strategie bestaat uit drie stappen:

1. Het bepalen van de mate van belangrijkheid van volledig geblokkeerde leidingen onder zowel droge als natte weersomstandigheden.
2. Het bepalen van de mate van belangrijkheid van deels geblokkeerde leidingen onder zowel droge als natte weersomstandigheden.
3. Het combineren van de informatie uit de stappen een en twee tot reinigings- en inspectietracés.

Voor zowel natte als droge weersomstandigheden is de mate van belangrijkheid van de leidingen bepaald met de GTM zoals beschreven in paragraaf 2.4.2. Dit is gedaan door zowel een stroompadenanalyse uit te voeren voor de tracés naar de gemalen als naar de overstorten/uitstroompunten.

Dit is ook gedaan voor deels geblokkeerde leidingen. De gedeeltelijke verstopping is gesimuleerd door het toevoegen van een weerstandsfactor aan de geblokkeerde leiding in plaats van het verwijderen van deze leiding uit de graaf. De uitkomsten zijn voor de geteste rioelstelsels plausibel, maar er is meer onderzoek nodig naar de beste manier om deze factor te bepalen. Twee opties zijn getest:

1. Herberekening van de energiehogte op basis van de dimensies van een leiding die voor 50% verstopt is.
2. Toevoegen van een constante weerstandsfactor aan elke leiding.

Een derde, niet geteste, optie is het verhogen van de kosten van de leidingen met een bepaald percentage.

De resultaten van de volledig en gedeeltelijk geblokkeerde leidingen zijn voor de twee weersomstandigheden handmatig geanalyseerd door ze te combineren in een GIS-systeem. De resultaten zijn geverifieerd op basis van de praktijkervaringen van de gemeenten. De 25-30% meest kritieke leidingen worden vaker gereinigd dan de overige leidingen. Er zijn reinigingsroutes gedefinieerd zodat aansluitende tracés efficiënt gereinigd en geïnspecteerd kunnen worden.

4.3 Het bepalen van meetlocaties

De resultaten van de grafentheoriemethode zijn ook gebruikt om een monitoringsnetwerk te ontwerpen om de 'hydraulische vingerafdrukmethode' (van Bijnen et al., 2017) toe te passen. Bij deze methode wordt de onderhoudstoestand van de riolering gemonitord op basis van een periodieke herkalibratie van een rioleringsmodel.

De resultaten van de GTM kunnen op twee manieren worden gebruikt:

- Meetpunten kunnen op basis van de GTM in de meest kritieke leidingen worden geplaatst. Dit omdat veranderingen in debieten en waterstanden een relatief groot deel van het netwerk zullen beïnvloeden.
- Het selecteren van de meetpunten met de meest frequente of grootste verschillen in de resultaten van de GTM. Deze punten zijn het meest gevoelig voor veranderingen in het netwerk en mogelijk goede voorspellers van veranderingen in de onderhoudstoestand. Er is meer onderzoek nodig om een besluit te nemen over de beste aanpak.

4.4 Versterken van de robuustheid en wegnemen van bottlenecks

De GTM en GBWLM kunnen worden gebruikt om kritieke elementen, zwakste schakels en knelpunten in (vermaasde) netwerken op te sporen. Wanneer deze bekend zijn, kan de netwerkstructuur of -geometrie worden aangepast om deze knelpunten te verminderen of weg te nemen en zo de robuustheid van de netwerken te vergroten.

De robuustheid van netwerken kan vergroot worden door de netwerkstructuur of -geometrie aan te passen. Knelpunten doen zich soms voor op plaatsen waar waterstromen samenkomen en de capaciteit van de benedenstroomse leiding niet is afgestemd op de gezamenlijke capaciteit van de bovenstroomse leidingen. Een ander veel voorkomend knelpunt is de situatie waarin bij een verstopping de 'omstroomkosten' hoog zijn, of waarin er geen omstroomroute aanwezig is (vertakte delen van netwerken).

Nadat de knelpunten zijn geïdentificeerd, kunnen verbeteringsmaatregelen worden ontworpen. Vervolgens kunnen deze maatregelen met de GTM of GBWLM getest worden om te controleren of de robuustheid is toegenomen en de knelpunten zijn weggenomen.

4.5 De bovengrondse gevolgen (impact) van het falen van ondergrondse netwerken

De mate van belangrijkheid van een leiding kan ook worden gecombineerd met de gevolgen van falen. Falen van ondergrondse (water)netwerken heeft gevolgen voor de dienstverlening (aan- en afvoer van water) en voor de omgeving (gezondheidsrisico's, wateroverlast, geblokkeerde wegen, schade aan infrastructuur). De mate van belangrijkheid kan daarom worden gebruikt als basis voor risicogestuurd beheer.

Mekel (2020) heeft de uitkomsten van de GTM en de GBWLM gebruikt om de impact van verstoppingen en leidingbreuken in de rioolstelsels en breuken in het waterdistributienetwerk van de regio Tuindorp te evalueren en om na te gaan of de mate van belangrijkheid van elementen verandert bij het gebruik van andere 'impactcriteria'.

De resultaten van de GBWLM zijn gecombineerd met een 2D-maaiveldmodel. Voor elke leiding waar een verstopping tot een of meer water op straatlocaties leidde, is een 2D-simulatie uitgevoerd. Gedurende een beperkte periode is een constante afvoer aan het 2D-model toegevoegd. Met behulp van een GIS-analyse werd de impact van de overstroming bepaald. De resultaten werden vergeleken met de uitkomsten van de GTM.

In de GTM zijn de leidingen die na een verstopping niet meer met een lozingspunt verbonden zijn, als meest kritiek gerangschikt. Daarna volgen de leidingen die, als ze geblokkeerd zijn, tot hoge extra transportkosten leiden. Mekel (2020) laat zien dat voor vlakke gebieden zoals Tuindorp het aantal water op straatlocaties een belangrijke factor is die de impact van een verstopping kenmerkt. In vlakke gebieden wordt het water slechts over korte afstanden getransporteerd. Daarom is er een correlatie tussen het aantal overstromingslocaties en de omvang van de overstroming. In hellende gebieden zal het water over grotere afstanden stromen en is deze correlatie waarschijnlijk veel zwakker of helemaal niet aanwezig.

4.6 De toepassing van de ontwikkelde methodes op andere type netwerken

De GTM is getest op drinkwaternetten en rioolstelsels en de GBWLM op een stedelijke watersysteem. Maar er zijn mogelijk meer netwerken waarop deze methoden kunnen worden toegepast, zoals stadsverwarming, andere systemen die onder druk staat en oppervlaktewaternetwerken. Er is meer onderzoek nodig om de toepasbaarheid van de beschreven methodes en de kenmerken waaraan deze netwerken moeten voldoen om de methodes met succes te kunnen toepassen, te verifiëren.

5 Conclusies en aanbevelingen

Afvalwater- en drinkwaternetwerken bestaan uit een groot aantal verbindingen. De meest kritieke elementen dragen het sterkst bij aan de netwerkprestaties. De bijdrage is afhankelijk van de kenmerken van de verbinding, de positie van de verbinding in het netwerk en de omstroommogelijkheden (bypass) in het netwerk in geval van (gedeeltelijk) falen van de verbinding. Als een rioleringsbeheerder weet wat de belangrijkste (meest kritieke) verbindingen zijn kan de beheerder deze informatie gebruiken om het rioleringsbeheer te optimaliseren.

Met de grafentheoriemethode is het mogelijk de 30-40% meest kritieke leidingen te identificeren voor het functioneren van een rioolstelsel. Zo zijn leidingen op te delen in groepen met een bepaalde mate van belangrijkheid. Netwerkbeheerders kunnen deze informatie gebruiken om onderhouds- of herstelwerkzaamheden te prioriteren. In tegenstelling tot andere methodes is de grafentheoriemethode te gebruiken voor het volledige netwerk én gekoppelde netwerken. De benodigde rekenkracht en daarmee ook rektijd is veel kleiner dan bij het gebruik van hydrodynamische modellen. Daarnaast zijn bij de grafentheoriemethode de resultaten niet afhankelijk van de toegepaste neerslaggegevens wat bij het gebruik van hydrodynamische modellen wel het geval is.

Daarnaast is de Graph-Based Weakest Link Method GBWLM niet alleen ontwikkeld om de mate van belangrijkheid van elementen in stedelijke watersystemen in kaart te brengen maar ook om de impact van een verandering in de systeemcapaciteit of -belasting te bepalen. Met de GBWLM kunnen stedelijke watersystemen bestaande uit deelsystemen zoals kolken, riolering en oppervlaktewater worden geanalyseerd met meerjarige neerslagreeksen. De gecombineerde analyse van systemen is noodzakelijk omdat de deelsystemen zeer verschillende bergings- en afvoercapaciteiten hebben. Daardoor kunnen de systemen verschillend reageren op veranderingen in de belasting ten gevolge van klimaatverandering of verstedelijking.

De grafentheoriemethode (GTM) en de Graph-Based Weakest Link Method (GBWLM) zijn nu voornamelijk toegepast op een beperkt aantal case studies. In dit onderzoek is aangetoond dat de resultaten van de grafentheoriemethode (GTM) en de Graph-Based Weakest Link Method (GBWLM) voldoende overeenkomen met de hydrodynamische modellen om de belangrijkheid van de elementen in de netwerken te kunnen bepalen. In het onderzoek is een parameter ontwikkeld om te toetsen of de GTM en de GBWLM succesvol op een netwerk toegepast kunnen worden. Meer casestudies zijn nodig om deze parameter verder aan te scherpen.

Toepassingsmogelijkheden van deze methode zijn:

1. Het ontwikkelen van reinigings- en inspectiestrategieën.
2. Het ontwikkelen van monitoringsstrategieën.
3. Het robuuster maken van netwerken (gemengde stelsels, hemelwaterstelsels) door aanpassing van de netwerkstructuur of geometrie.
4. Impactanalyses van hydraulisch falen van systemen door de resultaten van de op graaf gebaseerde zwaksteschakelmethode (GBWLM) te combineren met GIS-analyses.
5. Toepassing van de grafentheoriemethode en GBWLM op andere netwerken.

6 Referenties

- Beersma, J., Hakvoort, H., Jilderda, R., Overeem, A., & Versteeg, R. (2019). *Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019* [Rainfall statistics and series for water management 2019] (STOWA Report No. 2019-19). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202019/STOWA%202019-19%20neerslagstatistiek.pdf>
- Broadbent, S. R., & Hammersley, J. M. (1957). Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 53(3), 629–641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Harju, T. (2012). Lecture notes on graph theory. University of Turku. <https://users.utu.fi/harju/graphtheory/graphtheory.pdf>
- König, D. (1936). *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen: Kombinatorische Topologie der Streckenkomplexe* [Theory of finite and infinite graphs: Combinatorial topology of line complexes]. AMS Chelsea Publishing.
- Hagberg, A. A., Schult, D. A., & Swart, P. J. (2008). Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In G. Varoquaux, T. Vaught, & J. Millman (Eds.), *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)* (pp. 11–15).
- Mair, M., Sitzenfrie, R., Kleidorfer, M., Möderl, M., & Rauch, W. (2012). GIS-based applications of sensitivity analysis for sewer models. *Water Science & Technology*, 65(7), 1215–1222. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.954>
- Möderl, M., Kleidorfer, M., Sitzenfrie, R., & Rauch, W. (2009). Identifying weak points of urban drainage systems by means of VulNetUD. *Water Science & Technology*, 60(10), 2507–2513. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.664>
- Mekel, C. (2020). Hidden danger [Master thesis]. TU Delft Civil Engineering and Geosciences.
- NetworkX Developers. (n.d.). *min_cost_flow*. NetworkX. https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.flow.min_cost_flow.html
- Sahimi, M. (1994). *Applications of percolation theory*. Taylor & Francis.
- Stauffer, D., & Aharony, A. (1991). *Introduction to percolation theory* (Rev. 2nd ed.). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781315274386>
- Stockmayer, W. H. (1944). Theory of molecular size distribution and gel formation in branched polymers: II. General cross linking. *The Journal of Chemical Physics*, 12(4), 125–131. <https://doi.org/10.1063/1.1723922>
- van Bijnen, M., Korving, H., Langeveld, J., & Clemens, F. (2017). Calibration of hydrodynamic model-driven sewer maintenance. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(9), 1167–1185. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1247287>

STOWA en Stichting RIONED in het kort

Stichting RIONED is de koepelorganisatie voor de riolering en het stedelijkwaterbeheer 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.

Dankwoord

Het hier gepresenteerde promotieonderzoek is tot stand gekomen met de steun en inzet van de partners in het Kennisprogramma Urban Drainage (in alfabetische volgorde): 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.

© 2023 Stichting RIONED en STOWA

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

Disclaimer

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

promotoren

Prof. dr. ir. F.H.L.R. Clemens (Technische Universiteit Delft)

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

auteur

Ir. D. Meijer (Deltares)

omslagfoto

GAW ontwerp+communicatie b.v., Wageningen

vormgeving

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

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

rapportnummer

2023-07

isbn/ean

978-90-73645-78-3