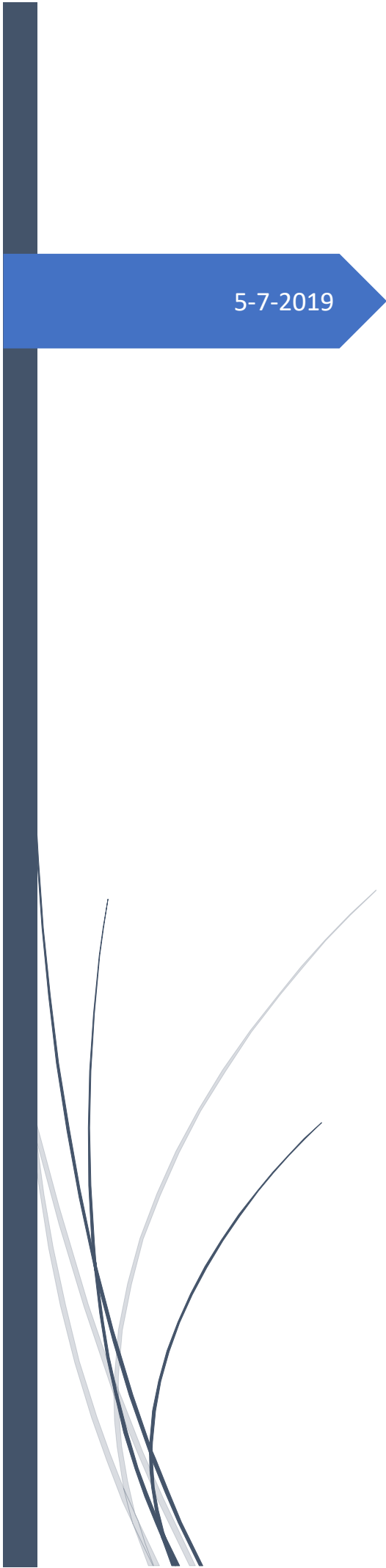


A thick dark blue vertical bar runs down the left side of the page. A blue arrow-shaped graphic points to the right, containing the date. In the bottom left corner, there are several thin, curved lines in dark blue and light grey.

5-7-2019

Het effect van samenloop op het energieverbruik bij parallel geschakelde rioolgemalen

Een optimalisatiestudie naar de pompregimes van rioolgemalen

Simon Muurman

S1864777

Versie 1

Colofon

Titel	Optimalisatiestudie rioolgemalen
Ondertitel	Onderzoek naar de potentiële energiebesparing door samenloop van rioolgemalen te beperken.
Datum	05-07-2019
Periode	15-04-2019 tot 28-06-2019
In opdracht van	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK)
Ten behoeve van	Bachelor eindopdracht Civiele Techniek

Contactgegevens

Student

Naam	Simon Muurman
Studentnummer	S1864777
Telefoonnummer	+31 683327288
Mailadres	s.d.muurman@student.utwente.nl

Begeleider HHNK

Naam	Rob van Cronenberg
Telefoonnummer	+31 651582543
Mailadres	r.vancronenberg@hnnk.nl

Begeleider Universiteit Twente

Naam	Koen Reef
Telefoonnummer	+31 534895325
Mailadres	k.r.g.reef@utwente.nl

Tweede beoordelaar Universiteit Twente

Naam	Marc van den Berg
Telefoonnummer	+31 534898944
Mailadres	m.c.vandenberg@utwente.nl

Voorwoord

Voor u ligt mijn Bachelor Eindopdracht getiteld "Het effect van samenloop op het energieverbruik bij parallel geschakelde rioolgemalen". In dit onderzoek wordt inzichtelijk gemaakt wat het effect is van samenloop en hoe de pompregimes geoptimaliseerd kunnen worden om energie te besparen. Deze studie heb ik in de periode van april tot en met juni 2019 uitgevoerd bij het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). In deze tijd ben ik veel te weten gekomen over de werking van de rioolgemalen en heb ik bewondering gekregen voor de diversiteit en complexiteit van het rioleringsstelsel.

In het bijzonder wil ik graag Rob van Cronenberg bedanken die mij namens HHNK heeft begeleid en altijd direct aan de gang wilde met vragen die ik had. Ook wil ik Koen Reef, mijn begeleider vanuit de Universiteit Twente, bedanken voor de begeleiding bij de verslaglegging. Daarnaast heb ik veel gehad aan de inhoudelijke feedback van zowel Rudy Petiet als Robin Bos.

Veel leesplezier gewenst,

Simon Muurman

Heerhugowaard, 5 juli 2019

Samenvatting

Het rioleringsstelsel is een complex systeem dat bestaat uit rioolgemalen en persleidingen. De rioolgemalen pompen het afvalwater door de persleiding naar het volgende rioolgemaal of naar een rioolwaterzuivering. Rioolgemalen kunnen ook op dezelfde persleiding zijn aangesloten waardoor het afvalwater van twee of meerdere rioolgemalen in één persleiding gecombineerd wordt. Het is dan mogelijk dat deze gemalen tegelijk aanstaan waardoor de druk in de persleiding hoog op loopt. Dit wordt samenloop genoemd. Het huidige pompregime van de gemalen kijkt enkel naar de waterhoogte in de bijbehorende kelder van dat gemaal om te bepalen of dat gemaal moet gaan pompen. Dit zorgt ervoor dat er onnodig samenloop kan optreden waardoor er mogelijk meer energie wordt gebruikt dan nodig is om het afvalwater te transporteren.

Het doel van dit onderzoek is om meer inzicht te krijgen in hoe vaak samenloop optreedt, wat het effect is op het energieverbruik van de pompen wanneer samenloop optreedt en hoe samenloop voorkomen kan worden.

Allereerst is gevonden dat elk gemaal, elke rioleringsstreng en daarmee elke zuiveringskring uniek is. Dit zorgt ervoor dat er geen algemeen antwoord te geven valt op de vraag hoe vaak samenloop optreedt of wat het effect van samenloop is. Dit hangt namelijk af van factoren die bij elk gemaal anders zijn. Voor het optreden van samenloop is voornamelijk de complexiteit van de streng en de draaiuren van de parallel geschakelde gemalen bepalend; hoe meer gemalen parallel geschakeld zijn hoe groter de kans dat er meer dan één tegelijk aan staat. Dit geldt ook voor de draaiuren van de gemalen; hoe meer draaiuren twee gemalen hebben, hoe groter de kans dat ze tegelijk in bedrijf zijn.

Uit een uitgevoerd experiment blijkt dat bij twee onderzochte gemalen 20% meer energie wordt gebruikt om het afvalwater te transporteren in tijden van samenloop ten opzichte van enkelloop. Dit is een significant verschil. Echter, dit resultaat is niet representatief voor andere gemalen. Zo kan de persdruk bij andere gemalen meer fluctueren omdat de ontwerpcapaciteit van de persleiding eerder wordt bereikt of juist amper fluctueren omdat de persleiding in droogweerafvoer (DWA) juist niet op capaciteit wordt gebruikt. Per gemaal en per streng zal daarom individueel het effect van samenloop moeten worden geëvalueerd.

De resultaten van het experiment duiden op een significant effect op het opgenomen vermogen van gemalen wanneer samenloop optreedt. Om samenloop te voorkomen zijn twee alternatieve pompregimes beschreven. De eerste focust op het stimuleren van pompen wanneer de persleiding nauwelijks belast is. Het tweede alternatief richt zich op het afkappen van het pompen wanneer de persleiding op capaciteit wordt gebruikt. De effecten van deze alternatieve pompregimes zijn niet getest en zullen wederom verschillen per gemaal. Het advies is daarom om een gemaal te selecteren waar meerdere andere gemalen mee parallel geschakeld zijn, de bedrijfstijd van al deze gemalen zorgt voor regelmatig optreden van samenloop en de drukmeting fluctueert. Vervolgens kunnen bij het betreffende gemaal één of beide alternatieve regelingen worden geïmplementeerd om het effect op het energieverbruik te monitoren. Met de resultaten van dit experiment kan dan worden bepaald of het lonend is om dit experiment uit te breiden naar meerdere gemalen om zo te bezuinigen op de benodigde pompenergie.

Gevonden is dat het aandeel pompenergie relatief klein is in vergelijking met de totaal benodigde energie om afvalwater te zuiveren. Met een aangenomen energiebesparing van 7% bij parallel geschakelde rioolgemalen zou bij zuiveringskring Den Helder potentieel 10 megawattuur bespaart kunnen worden over 2018. Energetisch is dit interessant maar in vergelijking met het totale verbruikte energie om het afvalwater te zuiveren bij zuiveringskring Den Helder is dit slechts 0.7%. Het is aan HHNK om te bepalen of het lonend is om het aanbevolen experiment uit te voeren.

Lijst met figuren

Figuur 1.1: Pompsysteem in serie (links) en in parallel (rechts) (Bron: Engineering ToolBox, 2004)	7
Figuur 1.2: De streng Zandloper-Julianadorp-Blauwe Keet (Bron: HHNK)	8
Figuur 1.3: De streng Zandloper-Julianadorp-Blauwe Keet schematisch	8
Figuur 1.4: Schematische weergave van waterpeilen in de kelder van een rioolgemaal	9
Figuur 2.1: Schematische weergave van rioolgemalen en persleidingen van zuiveringskring Wieringen (links boven), Den Helder (rechts boven) en Geestmerambacht (onder) (Bron: HHNK)	13
Figuur 2.2: Debietmeting (y-as [m ³ /h]) over de tijd (x-as) voor de gemalen Tripkouw (boven) en Warmenhuizen (onder) uit WinCCOA (Bron: HHNK)	15
Figuur 2.3: Q-H kromme van Pompcurve (Rood) tegen systeemcurve (Groen) uitgezet (Bron: HHNK, Wanda)	18
Figuur 2.4: Door samenloop neemt de frictie in een systeem toe. Een pomp kan hier op manier 1 op reageren (links) of op manier 2 (rechts)	19
Figuur 3.1: Meting uit WinCCOA (Willemsweg), een pomp die ongeveer 8 minuten heeft gedraaid gemeten in zes intervallen van twee minuten (Bron: HHNK, WinCCOA)	21
Figuur 3.2: Persdrukmeting (Bruin) en Debietmeting (Rood) van rioolgemaal Willemsweg (Bron: HHNK, WinCCOA)	22
Figuur 3.3: Persdrukmeting (Bruin) en Debietmeting (Rood) van rioolgemaal Willemsweg (Bron: HHNK, WinCCOA)	25
Figuur 4.1: Activity diagram van geoptimaliseerde pompregime Scheldestromen	30
Figuur 4.2: Twee mogelijkheden na het verlagen van het inslagpeil	31
Figuur 4.3: Twee mogelijkheden bij instellen nieuw Uitschakel level	32
Figuur 8.1: Rioleringsstelsel zuiveringskring Wieringen (Bron: HHNK)	40
Figuur 8.2: Rioleringsstelsel zuiveringskring Den Helder (Bron: HHNK)	41
Figuur 8.3: Rioleringsstelsel zuiveringskring Geestmerambacht (Bron: HHNK)	41
Figuur 8.4: Kansen op gelijktijdigheid in systeem met drie parallel geschakelde gemalen	42
Figuur 8.5: Output Matlab model 'Kansen'	43
Figuur 8.6: Matlab Script "Kans op samenloop"	44
Figuur 8.7: Aantal uur dat De Zandloper en Julianadorp onder de normafvoer presteren vanaf 01/01/2019 tot en met 29/05/2019 (Bron: HHNK)	45
Figuur 8.8: Definitie van zuigpeil, perspeil, statische opvoerhoogte en dynamische opvoerhoogte (Bron: (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010))	46
Figuur 8.9: Vereenvoudigd zijaanzicht van de kelder van rioolgemaal Blauwe Keet (Bron: HHNK)	47

Lijst met tabellen

Tabel 2.1: Invloed van aantal parallel geschakelde gemalen op de kans op samenloop	16
Tabel 3.1: Resultaten experiment energieverbruik	24
Tabel 8.1: kWh meetgegevens van rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder (deel 1) ..	48
Tabel 8.2: kWh meetgegevens van rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder (deel 2) ..	48
Tabel 8.3: kWh meetgegevens van de parallel geschakelde rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder en RWZI Den Helder	49
Tabel 8.4: Energiekosten Rioolgemaal De Zandloper en Julianadorp over 2018	50

1 Inhoudsopgave

Colofon	1
Contactgegevens	1
Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
Lijst met figuren.....	4
Lijst met tabellen	4
Verklarende woordenlijst.....	6
1. Inleiding	7
1.1 Aanleiding.....	7
1.2 Achtergrondinformatie.....	7
1.3 Probleemcontext	10
1.4 Onderzoeksdoel.....	11
1.5 Hoofdpijnen van de methode.....	12
1.6 Afbakening onderzoek.....	12
2 Theorie.....	13
2.1 Theorie optreden van samenloop.....	13
2.2 Theorie effect van samenloop.....	17
3 Samenloop in de praktijk.....	21
3.1 Praktijk optreden van samenloop	21
3.2 Praktijk effect van samenloop.....	23
4 Optimaliseren pompregimes	27
4.1 Ontwerpeisen pompregime	27
4.2 Alternatieve pompregimes.....	29
5 Discussie	35
6 Conclusie en aanbevelingen	37
6.1 Conclusie	37
6.2 Aanbevelingen.....	38
7 Bibliografie.....	39
8 Bijlages.....	40
8.1 Bijlage A.1	40
8.2 Bijlage B.1	42
8.3 Bijlage B.2	45
8.4 Bijlage B.3	46
8.5 Bijlage B.4	48

Verklarende woordenlijst

Gemeentelijk stelsel	Het netwerk van rioolleidingen dat het afvalwater initieel verzamelt en transporteert naar een rioolgemaal. Wanneer dit door middel van zwaartekracht gebeurt wordt er ook wel gesproken van een vrij verval stelsel.
Rioolgemaal/Gemaal	Een plek waar het afvalwater samenkomt. Dit kan toe worden gevoerd door het gemeentelijke stelsel of vanaf een ander gemaal. In het rioolgemaal zijn vaak twee pompen (of meer) geïnstalleerd die alternerend in werking treden. Deze pompen het afvalwater in een persleiding richting een ander gemaal of een rioolwaterzuiveringsinstallatie.
Persleiding	Een leiding waar water door middel van druk doorheen wordt getransporteerd. Een persleiding is altijd gevuld met water.
Inprikker	Een gemaal in eigendom en beheer van gemeente, met aansluitovereenkomst van het waterschap. Meestal heeft een inprikker een kleinere capaciteit dan een gemaal.
Kelder	Een tijdelijke afvalwateropslag behorend bij een gemaal. Hier komt het afvalwater binnen.
Inslag	Wanneer het water in de kelder het inslagpeil heeft bereikt zal een pomp in het gemaal aan gaan.
Uitslag	Wanneer het water in de kelder onder uitslagpeil staat zal de pomp in het gemaal uit gaan.
Setpoint	Wanneer het waterpeil boven het inslagpeil en boven het setpoint is, zal de pomp in het gemaal naar een vast debiet toewerken. Op deze manier wordt het debiet van een gemaal afgestemd op de watertoevoer.
Streng / Tak	Een deel van het stelsel bestaande uit een persleiding met één of meerdere gemalen.
Stelsel	Een verzamelnaam voor het netwerk aan persleidingen en gemalen behorend bij een rioolwaterzuiveringsinstallatie.
RWZI	Afkorting voor een rioolwaterzuiveringsinstallatie.
Samenloop	Wanneer meerdere in parallel geschakelde gemalen op hetzelfde moment in bedrijf zijn.
Enkelloop	Wanneer bij een tak met meerdere gemalen (parallel geschakeld) slechts één van deze gemalen op dat moment in werking is.
Stroomfrequentie	De frequentie van de wisselstroom.
Frequentieomvormer	Een frequentieomvormer (FO) kan de frequentie van de stroom aanpassen om zo het vermogen en het debiet van de pomp te altereren.
DWA	Droogweerafvoer. De situatie waarbij er sprake is van droog weer.
RWA	Regenwaterafvoer. De situatie waarbij sprake is van regen en dus een verhoogde afvalwatertoevoer.

1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek omschreven. In paragraaf 1.1 wordt de aanleiding van dit onderzoek beschreven waarna in paragraaf 1.2 de achtergrondinformatie behorend bij de studie wordt gegeven. In paragraaf 1.3 staat vervolgens de probleem context waarna de doelstelling gepaard met de onderzoeksvragen in paragraaf 1.4 uiteen worden gezet. Als laatst worden de onderzoeksmethode in paragraaf 1.5 toegelicht waarna de grenzen van het onderzoek worden beschreven in paragraaf 1.6.

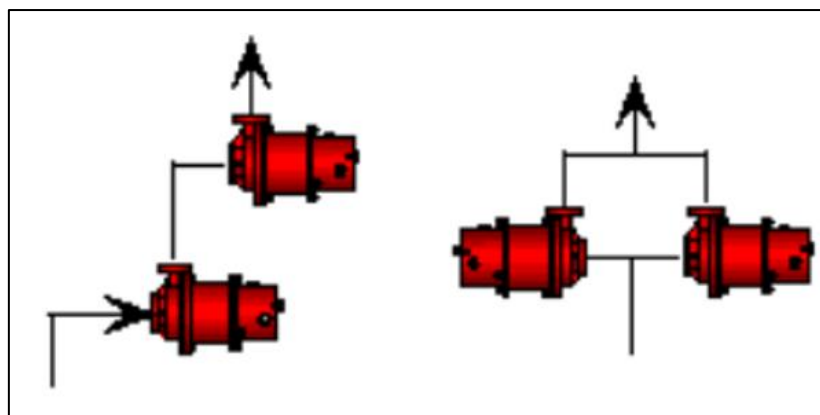
1.1 Aanleiding

In 2015 is er bij waterschap Scheldestromen een onderzoek uitgevoerd naar de aansturing van rioolgemalen. Het doel van dit onderzoek was om het gelijktijdig pompen van parallel geschakelde rioolgemalen (ook wel samenloop genoemd) te beperken. Zij wisten, door de aansturing van parallel geschakelde rioolgemalen te optimaliseren, op jaarbasis 7% aan pompenergie te besparen (Scheldestromen, DWA-Regeling rioolgemalen, 2015). Om deze reden wil het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) meer inzicht krijgen in het effect van samenloop bij hun rioolgemalen en wat de mogelijke optimalisatie is op dit gebied.

1.2 Achtergrondinformatie

Het rioleringsstelsel is een complex systeem van leidingen en rioolgemalen dat het huishoudelijk afvalwater, het bedrijfsafvalwater en mogelijk het regenwater uit een gebied naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) transporteert. Het rioleringsstelsel valt in drie delen te onderscheiden; de gemeentelijke 'vrij verval' stelsels, de gemeentelijke inpijpers en de rioolgemalen en de persleidingen. Al het afvalwater van huishoudens en regenwater wordt in het gemeentelijke vrij vervalstelsel verzameld waarna het door middel van zwaartekracht richting een rioolgemaal stroomt. Bij een rioolgemaal wordt het afvalwater in een kelder verzameld en vervolgens door middel van een pomp in een persleiding gepompt. Deze persleiding kan leiden naar de RWZI of opnieuw naar de kelder van het volgende gemaal. Uiteindelijk komt het hele stelsel samen bij de RWZI.

In deze studie wordt gefocust op de connectie tussen de rioolgemalen en persleidingen. Er zijn twee manieren waarop gemalen met elkaar verbonden kunnen zijn; in serie of in parallel. In serie wordt de uitstroom van een pomp de instroom van de tweede pomp terwijl in parallel de uitstroom van de pompen gecombineerd wordt. In Figuur 1.1 is een schematische weergave van beide opstellingen gegeven.



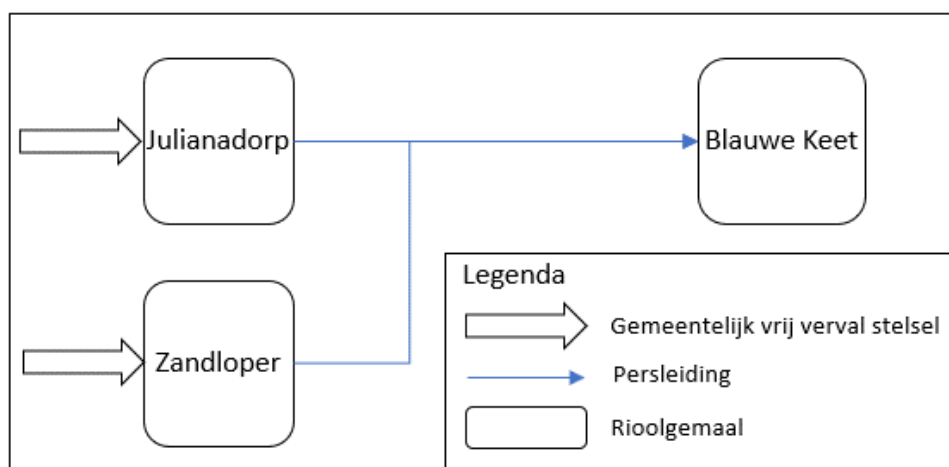
Figuur 1.1: Pompsysteem in serie (links) en in parallel (rechts) (Bron: Engineering ToolBox, 2004)

Beide configuraties worden toegepast om het afvalwater van de rioolgemaalkelders naar de RWZI te transporteren. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 1.2. Hier is een deel van het rioolstelsel horend bij de RWZI van Den Helder weergegeven.



Figuur 1.2: De streng Zandloper-Julianadorp-Blauwe Keet (Bron: HHNK)

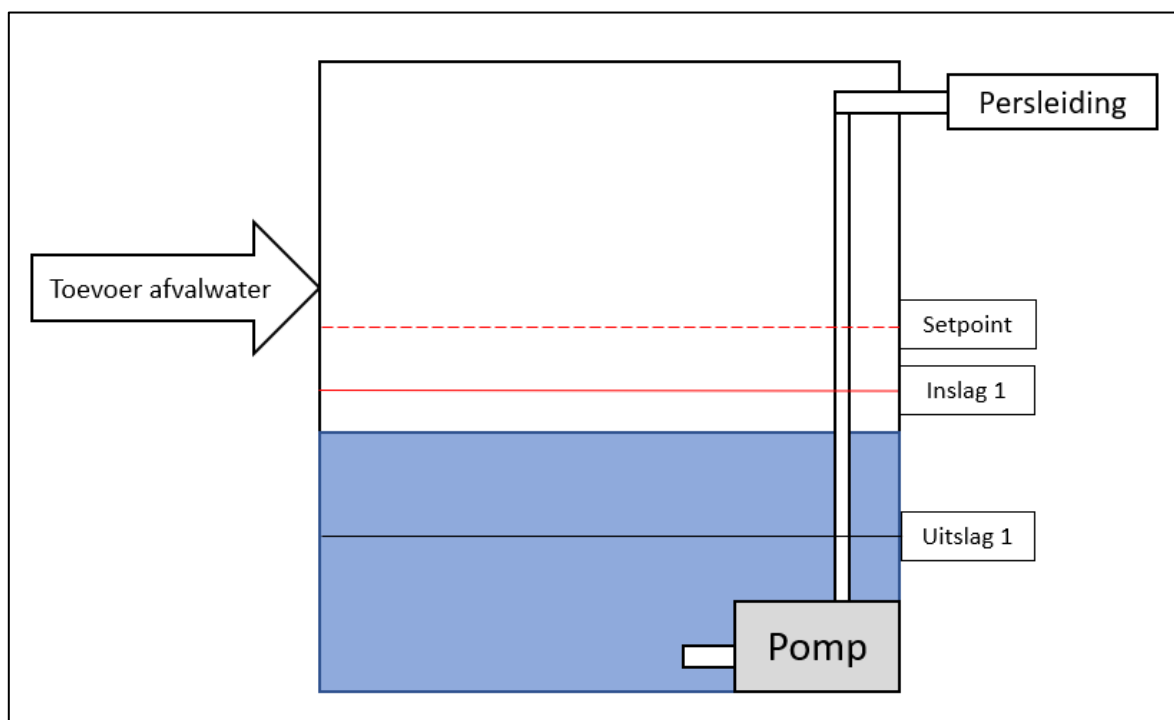
In de streng Zandloper-Julianadorp-Blauwe Keet (Figuur 1.2) wordt de parallelle pomp configuratie van Figuur 1.1 toegepast. Dit is beter inzichtelijk gemaakt in de schematische weergave in Figuur 1.3. De persleiding begint bij het gemaal de Zandloper, waarna rioolgemaal Julianadorp ook afvalwater in dezelfde persleiding pomp. De persleiding eindigt bij Blauwe Keet waar de uitstroom van de persleiding in de kelder van Blauwe Keet terecht komt. Dit betekent dat de Zandloper en Julianadorp parallel zijn geschakeld. In dit geval is Blauwe Keet niet in serie geschakeld omdat de persleiding niet direct op de volgende pomp staat aangesloten maar in de kelder eindigt. Indien de persleiding direct is aangesloten op de volgende pomp wordt er gesproken van een in serie geschakeld systeem. Dit wordt ook wel een boostergemaal genoemd.



Figuur 1.3: De streng Zandloper-Julianadorp-Blauwe Keet schematisch

De rioolgemaal wordt aangestuurd met behulp van procesautomatisering. Dit houdt in dat het continue proces van het wegpompen van afvalwater uit de kelders van de gemalen door computerprogramma's geregeld wordt. Zoals eerder genoemd wordt het afvalwater eerst geaccumuleerd in de kelder van een rioolgemaal voordat het wordt weggepompt. Momenteel wordt door de procesautomatisering enkel het waterpeil in de kelder in acht genomen in de bepaling of het gemaal aan moet of niet.

In het huidige automatiseringsprofiel zijn in de kelders van alle gemalen over het algemeen vijf ingestelde waterpijlen te onderscheiden. Echter, in droogweerafvoer (DWA), waar dit onderzoek zich op focust (zie paragraaf 1.6), zijn in de meeste gevallen enkel drie waterpeilen van toepassing; inslag 1, setpoint en uitslag 1. Wanneer het waterpeil in de kelder 'inslag 1' bereikt zal een pomp bij het gemaal aan gaan op een vooraf ingesteld vermogen. Indien het waterpeil boven inslag 1 én boven het setpoint is zal de pomp meer vermogen leveren om een ingesteld debiet te halen. In beide situaties zal de pomp uitgeschakeld worden op het moment dat het waterpeil onder 'uitslag 1' is gezakt (Petiet, 2019).



Figuur 1.4: Schematische weergave van waterpeilen in de kelder van een rioolgemaal

In Figuur 1.4 is een overzicht van de waterpeilen in een kelder weergegeven. Hier is het setpoint boven het eerste inslagpeil ingesteld. Dit hoeft echter niet het geval te zijn aangezien regelmatig het setpoint ook gelijk wordt gesteld met het eerste inslagpeil, of zelfs onder inslag 1 staan, wat ervoor zorgt dat de pompen in het gemaal altijd naar het ingestelde debiet zullen sturen wanneer deze aan staan.

Met het huidige profiel evalueren de gemalen enkel het waterpeil in hun eigen kelder en wordt daarvanuit bepaald of het gemaal al dan niet moet gaan pompen. Dit kan er echter voor zorgen dat meerdere gemalen tegelijk aan staan terwijl dat niet nodig is wat een verhoogd energieverbruik met zich meebrengt (zie paragraaf 1.3).

1.3 Probleemcontext

In dit onderzoek wordt het rioleringsstelsel binnen het beheersgebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) bestudeerd. De gemalen die deel uitmaken van dit stelsel worden aangestuurd volgens het automatiseringsprofiel beschreven in paragraaf 1.2 Achtergrond informatie. De veronderstelling is dat dit pompregime in combinatie met parallel geschakelde gemalen meer energie verbruikt dan nodig om het afvalwater te transporteren.

Wanneer meerdere parallel geschakelde gemalen tegelijk in bedrijf zijn zal er in de gedeelde persleiding een hoger debiet stromen. Een hoger debiet door een leiding met dezelfde doorsnede zal een hogere druk in de persleiding veroorzaken. Deze hogere persdruk zal moeten worden overwonnen door de pomp waardoor het voor deze pomp meer energie kost om hetzelfde debiet door de persleiding te pompen wanneer andere parallel geschakelde gemalen ook aan het pompen zijn (in meer detail uitgelegd in paragraaf 2.2).

In het huidige automatiseringsprofiel nemen de gemalen niet de status van de parallel geschakelde gemalen mee in de bepaling of het gemaal moet gaan pompen. Dit kan er toe leiden dat meerdere parallel geschakelde gemalen tegelijk in bedrijf zijn (samenloop) wat dus een hogere energieconsumptie per verpompt debiet veroorzaakt. In droogweersituaties hoeven de pompen niet constant te draaien om het afvalwater te verpompen dus is de veronderstelling dat het voordeliger is om de gemalen zo aan te sturen dat ze afwisselend in werking treden.

Een bijkomend nadeel van het huidige pompregime is dat de watertoevoer naar de RWZI grillig kan verlopen omdat het ene moment meerdere gemalen in werking kunnen zijn terwijl op een ander moment een stuk minder watertoevoer is.

1.4 Onderzoeksdoel

Het doel van dit onderzoek is om inzichtelijk te krijgen wat de mogelijkheden zijn op het gebied van energiebesparing betreffend de samenloop van parallel geschakelde gemalen in droogweerafvoer. De theorie beschreven in de probleem context laat zien dat een toename in het debiet een verhoogd energiegebruik veroorzaakt. Echter, in de praktijk zijn er meerdere factoren van invloed zoals de opstartenergie van een pomp of het waterpeil in de kelder.

In dit onderzoek kunnen twee delen worden onderscheiden. In het eerste deel zal worden gekeken wat het effect is van samenloop bij parallel geschakelde gemalen. Dit effect valt te kwantificeren door te bepalen hoe vaak samenloop optreedt gepaard met de invloed op het energieverbruik van het systeem wanneer samenloop optreedt.

Het tweede gedeelte van het onderzoek focust op de mogelijkheden om het pompregime te optimaliseren. Als uit de eerste fase blijkt dat samenloop een groot effect heeft op het opgenomen vermogen, is het voordelig om de rioolgemalen alternerend in bedrijf te laten treden. Dit moet echter wel haalbaar zijn. In de kelder van de desbetreffende gemalen moet bijvoorbeeld genoeg ruimte zijn om afvalwater tijdelijk op te slaan zodat het wegpompen ervan voor korte duur uitgesteld kan worden. Daarnaast is het van belang dat er mogelijkheid is om een gecompliceerder pompregime te implementeren. Wanneer het niet mogelijk of gewenst is om enkele regels code toe te voegen om het automatiseringsprofiel aan te passen zijn de oplossingen ook beperkt.

Om het onderzoeksdoel te behalen zijn twee hoofdvragen opgesteld. Beide hoofdvragen hebben twee subvragen die de hoofdvragen ondersteunen:

- *Wat is de impact van samenloop op het energieverbruik van een parallel geschakeld rioolgemalensysteem?*
 - Hoe vaak komt samenloop voor?
 - Wat is de invloed van samenloop op het energieverbruik van een pomp?
- *Hoe kan het pompregime van de rioolgemalen worden geoptimaliseerd zodat het energieverbruik wordt beperkt bij het wegpompen van afvalwater?*
 - Wat zijn de exacte eisen voor een rioolgemaal betreft het wegpompen van afvalwater?
 - Wat zijn mogelijke alternatieven voor het automatiseringsprofiel van rioolgemalen en wat is het effect hiervan?

1.5 Hoofdpijnen van de methode

Om antwoorden te geven op de gestelde onderzoeksvragen wordt er gebruik gemaakt van enkele onderzoeksmethode. In deze paragraaf staan voor de subvragen de onderzoeksmethodes uitgeschreven.

Hoe vaak komt samenloop voor?

Om deze vraag te beantwoorden is voornamelijk gekeken naar de theorie welke factoren invloed hebben op het effect van samenloop. Deze theorie is tot stand gekomen door middel van literatuurstudie en door te overleggen met experts op het gebied. Daarnaast is elektronisch data (instellingen en meetgegevens van de gemalen) bestudeerd om tot een antwoord te komen.

Wat is de invloed van samenloop op het energieverbruik van een pomp?

Achter deze vraag zit in eerste instantie vooral fysische theorie die met behulp van literatuurstudie is verzameld. Daarnaast is elektronisch en in de praktijk data verzameld en geanalyseerd. De elektronische data bestaat voornamelijk uit de instellingen en meetgegevens van de gemalen. In de praktijk is een experiment uitgevoerd en de resultaten geëvalueerd om het effect van samenloop te kwantificeren.

Wat zijn de exacte eisen voor een rioolgemaal betreft het wegpompen van afvalwater?

De informatie benodigd om deze vraag te beantwoorden is geworven uit literatuurstudie en interviews met experts. Ook zijn de instellingen van de rioolgemalen geëvalueerd om te achterhalen wat de ontwerpeisen van deze gemalen zijn.

Wat zijn mogelijke alternatieven voor het automatiseringsprofiel van rioolgemalen en wat is het effect hiervan?

De mogelijke alternatieven zijn tot stand gekomen met behulp van literatuurstudie en het overleggen met experts. Daarnaast zijn de optredende effecten ook bepaald met behulp van literatuurstudie.

1.6 Afbakening onderzoek

In dit onderzoek staat de samenloop van gemalen centraal. Aangezien tijdens regenwaterafvoer (RWA) de gemalen constant in bedrijf moeten zijn om de afvalwatertoevoer weg te pompen is er geen mogelijkheid om samenloop te voorkomen (Cronenberg, 2019). Vanwege dit feit zal dit onderzoek alleen focussen op de gemalen in de DWA.

Naast de factoren die komen kijken bij samenloop zijn er nog meer mogelijkheden om energie te besparen. Denk hierbij aan het optimaliseren van het debiet van een pomp zelf om het maximale rendement van de pomp te behalen of het aanpassen van de waterpeilen in de kelder om de opvoerhoogte te verminderen. Ook zou kunnen worden onderzocht bij welk debiet de verhouding tussen het debiet en het opgenomen vermogen optimaal is. Al deze factoren worden echter in dit onderzoek uitgesloten. Dit onderzoek focust enkel op de effecten van samenloop met de instellingen van de gemalen zoals deze nu zijn gesteld. Houdt er rekening mee dat er hier een verschil wordt gemaakt tussen een studie naar het optimale debiet en een scenario analyse. Hoewel beide op elkaar lijken en focussen op de effecten van wrijving is er wel degelijk een verschil tussen de twee. Met een scenario wordt bijvoorbeeld bedoeld of een gemaal in enkelloop of in samenloop aan het pompen is. In deze scenario's wordt dus niks aan de debietinstellingen van de gemalen zelf geoptimaliseerd.

2 Theorie

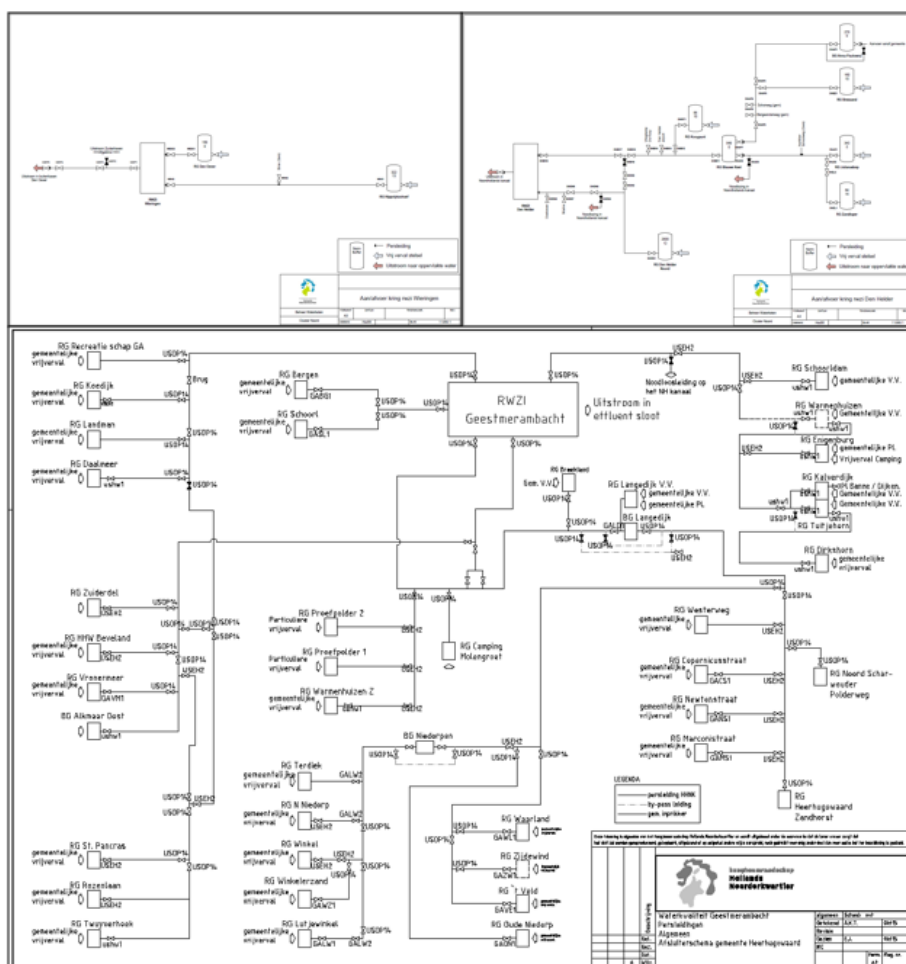
In dit onderzoek staat samenloop van parallel geschakelde rioolgemalen centraal. Om een totaalbeeld van samenloop te krijgen zijn er twee kanten te onderscheiden; hoe vaak samenloop optreedt en wat het effect is wanneer samenloop optreedt. In dit hoofdstuk wordt zowel de theorie achter het optreden van samenloop als het optredende effect gegeven. Hier wordt vooral uiteengezet welke factoren van invloed zijn op het optreden van samenloop en waarom er een hoger stroomverbruik is wanneer samenloop optreedt.

2.1 Theorie optreden van samenloop

Om inzicht te krijgen wat het totale effect is van gemalen die tegelijk in bedrijf zijn is het in eerste instantie belangrijk om te onderzoeken hoe vaak dit fenomeen voorkomt. Deze paragraaf zal zich richten op de theorie over hoe vaak samenloop optreedt.

Invloedsfactoren

Het rioleringsstelsel is enorm divers en kan variëren van een simpel systeem tot een complex netwerk. In Figuur 2.1 worden de stelsels behorend bij zuiveringskring Wieringen, Den Helder en Geestmerambacht weergegeven om een beeld te schetsen van de verscheidenheid. In Bijlage A.1 zijn de figuren groter weergegeven.



Figuur 2.1: Schematische weergave van rioolgemalen en persleidingen van zuiveringskring Wieringen (links boven), Den Helder (rechts boven) en Geestmerambacht (onder) (Bron: HHNK)

Uit Figuur 2.1 valt af te leiden dat de opbouw van het stelsel erg verschillend kan zijn. Logischerwijs valt te verwachten dat in een complexer netwerk, waar op eenzelfde persleiding meer gemalen parallel geschakeld, samenloop vaker optreedt. Naast deze opbouw van het stelsel zijn er echter ook nog andere factoren van invloed. De voornaamste factoren die in DWA invloed hebben op het optreden van samenloop zijn:

- De bedrijfstijdverdeling
- Het aantal draaiuren van de gemalen die parallel geschakeld zijn
- Het aantal gemalen dat parallel geschakeld staat op een streng

Bedrijfstijdverdeling

Met de bedrijfstijdverdeling wordt bedoeld in welke periode(s) van de dag een gemaal operationeel is. Wanneer twee gemalen beide de helft van de dag aan staan is te verwachten dat deze twee regelmatig tegelijkertijd pompen. Wanneer het ene gemaal echter de eerste helft van de dag in werking is en het tweede gemaal de tweede helft van de dag zal uiteindelijk geen enkele samenloop optreden. Het is daarom van belang om te weten hoe de draaiuren over een dag verdeeld zijn.

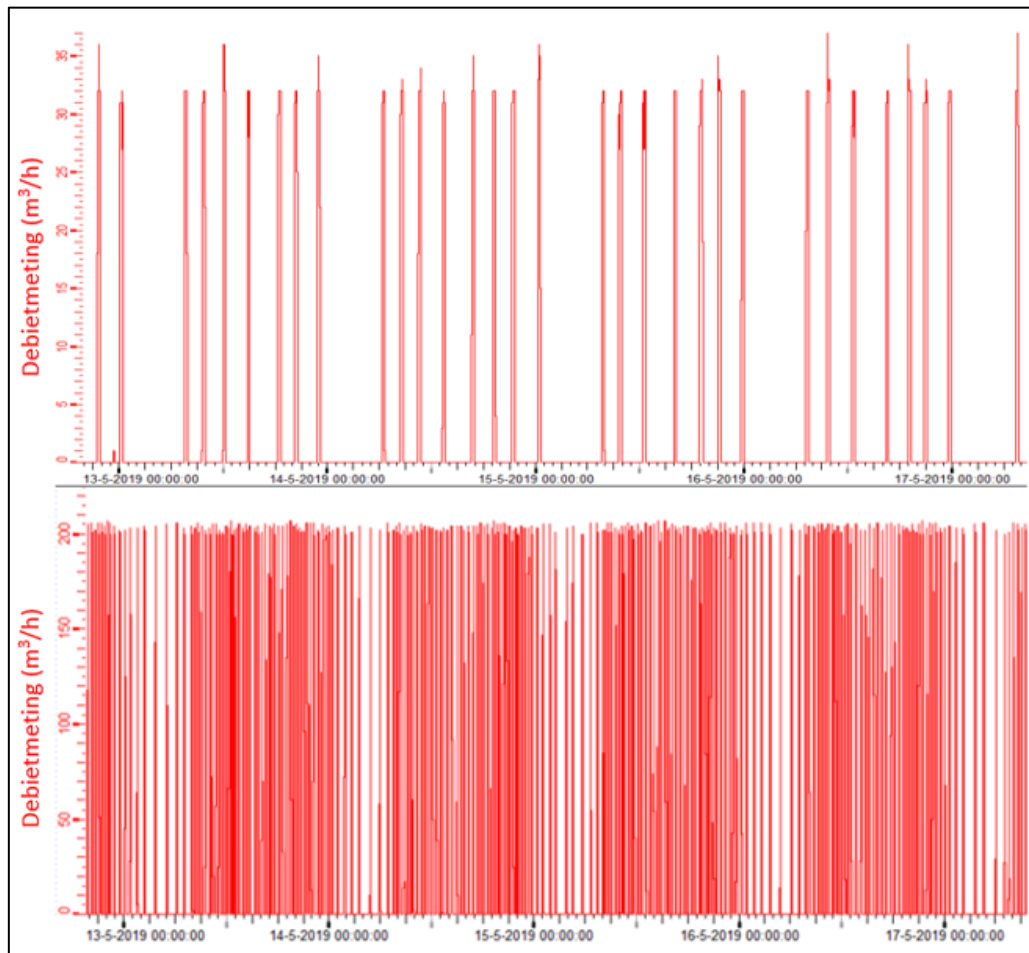
Het afvalwater bestaat uit het regenwater en (huishoudelijk) afvalwater (Rioned, sd). Aangezien in dit onderzoek RWA niet wordt meegenomen blijft enkel het afvalwater van huishoudens of bedrijven over als watertoevoer. Doordat de huishoudens elke dag ongeveer hetzelfde ritme volgen vanwege vaste werk- en slaaptijden, is de verdeling van de draaiuren van de gemalen de meest identieke factor voor alle gemalen. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 2.2. Hier is een gemaal met een relatief lage capaciteit (range y-as) en een relatief laag aantal draaiuren (dichtheid van de metingen) vergeleken met een gemaal met een hoge capaciteit en aantal draaiuren. Ook al verschillen deze twee gemalen qua eigenschappen, zijn de verdelingen van de bedrijfstijden nagenoeg gelijk.

Draaiuren

Naast de bedrijfstijdverdeling is het aantal uur dat de gemalen aan staan in deze periode ook een belangrijke factor. Wanneer twee gemalen vergelijkbaar met Tripkouw (Figuur 2.2 boven) parallel geschakeld zijn, is te verwachten dat de kans dat deze gemalen gelijktijdig aan staan relatief klein omdat dit gemaal relatief weinig aan staat. Dit valt af te leiden aan de tijd die tussen de debietmetingen zit. Indien daarentegen twee gemalen vergelijkbaar met Warmenhuizen (Figuur 2.2 onder) op dezelfde persleiding zijn aangesloten is de kans dat deze twee samenlopen een stuk groter.

In de ideale situatie zouden alle gemalen het hele jaar door hetzelfde aantal draaiuren hebben. Dit zou betekenen dat de pompen perfect zijn ontworpen voor de benodigde afvoer en dat de watertoevoer constant is. In de praktijk is dit echter vaak niet het geval.

De kwantiteit van het huishoudelijk afvalwater kan over een jaar ook verschillen. Denk hierbij aan seizoensgebonden accommodaties zoals bungalowparken waar in het hoogseizoen het afvalwater vele malen meer is dan in het laagseizoen. Zo had het gemaal 'De Zandloper' gelegen bij een bungalowpark in Julianadorp in week 29 van 2018 (midden Juli) een totaal verpompt volume van 3345m³ terwijl dat in week 47 (eind November) slechts 746m³ bedroeg (HHNK).



Figuur 2.2: Debietmeting (y-as [m³/h]) over de tijd (x-as) voor de gemalen Tripkouw (boven) en Warmenhuizen (onder) uit WinCCOA (Bron: HHNK)

De capaciteiten van een gemaal worden ontworpen op de kritische situatie. Een pomp moet de meest belastende toestand aan kunnen omdat anders het systeem overstroomd in deze gevallen. Wanneer er veel verschil is tussen RWA en DWA, en het gemaal op RWA is ontworpen, zal het gemaal in DWA onder zijn ontwerpcapaciteit presteren en dus relatief minder draaiuren hebben. Verschillen in de watertoevoer, hetzij door het verschil tussen RWA en DWA hetzij door seizoen trends, kunnen de draaiuren van een gemalen fluctueren.

De draaiuren van een gemaal kunnen ook variëren ten toedoen van foutieve stromingen. Met foutieve stromingen wordt water bedoeld dat in het rioleringsstelsel terechtkomt dat geen RWA of DWA is. In geval van overbelasting van het rioleringsstelsel is er vaak een zogenoemde overstort ontworpen. Hier kan in extreme situaties overtollig water geloosd worden zodat het stelsel zelf niet overstroomt. Dit overtollige afvalwater wordt dan op het open water geloosd. Echter wanneer het waterpeil van het oppervlaktewater hoog staat kan het voor komen dat er oppervlaktewater het rioleringsstelsel instroomt via de overstort. Daarnaast kan het voor komen dat een rioleringsbuis 'lek' raakt waardoor grondwater ook het rioleringsstelsel kan infiltreren. Deze foutieve stromen hebben ook invloed op het aantal draaiuren en zijn moeilijk op te anticiperen (Bos, 2019).

Streng

Tot nu toe zijn vooral eigenschappen van individuele gemalen besproken. Hoewel deze eigenschappen van invloed zijn op de mate van samenloop is de meest significante factor nog niet besproken; het aantal gemalen op een streng. Vanzelfsprekend is dat hoe meer gemalen op dezelfde persleiding staan aangesloten, hoe groter de kans is dat meer dan één gemaal tegelijk in bedrijf is. Om hier een beeld van te geven is een statistische berekening gemaakt voor verschillende configuraties van pompen. Voor deze berekening is aangenomen dat elk gemaal gemiddeld 40 uur per week in bedrijf is en dat alle bedrijfsuren binnen 18 uur op een dag vallen om de verdeling van de bedrijfstijden na te bootsen. Dit is geen exacte berekening is maar een voorbeeld om een indruk te geven van de invloed die het aantal gemalen heeft op het voor komen van samenloop. Voor deze berekening zijn echter wel realistische aannames gedaan. Hoe de resultaten tot stand zijn gekomen is in de berekening in Bijlage B.1 toegevoegd. De resultaten zijn in Tabel 2.1 weergegeven. Hier is in de eerste kolom weergegeven per aantal parallel geschakelde gemalen gegeven hoe vaak er statistisch gezien in ieder geval één gemaal in bedrijf is ($P(A \text{ of } B)$). De tweede kolom representeert het percentage van de tijd dat, indien er in ieder geval 1 gemaal aan staat in het systeem, er meer dan 1 aan staat (percentage meer dan 1 gemaal aan/percentage minimaal 1 aan $\frac{P(A \text{ en } B)}{P(A \text{ of } B)}$). Uit Tabel 2.1 valt af te leiden dat het aandeel samenloop aanzienlijk toeneemt naarmate er meer gemalen op dezelfde streng zijn aangesloten.

Tabel 2.1: Invloed van aantal parallel geschakelde gemalen op de kans op samenloop

Aantal gemalen parallel geschakeld	$P(A \text{ of } B)$	$\frac{P(A \text{ en } B)}{P(A \text{ of } B)}$
2	53.4%	18.9%
3	68.2%	34.9%
4	78.3%	48.4%
5	85.2%	59.6%
6	89.9%	68.6%
7	93.1%	75.9%

2.2 Theorie effect van samenloop

In de paragraaf 2.1 is de theorie achter het optreden van samenloop uiteengezet. Zoals eerder genoemd zijn er twee aspecten; het optreden van samenloop en het optredende effect wanneer samenloop voorkomt. Deze paragraaf zal dieper ingaan op het optredende effect wanneer samenloop voorkomt.

Fysische achtergrond

De energie in een pompsysteem is altijd in balans. Deze energiebalans bestaat uit twee delen; de geleverde energie door de pomp en energie benodigd om het afvalwater te transporteren. Deze benodigde energie om het afvalwater te transporteren is weer in twee delen onder te verdelen; de statische opvoerhoogte en de dynamische opvoerhoogte. De opvoerhoogte van een pomp staat voor de maximale waterhoogte die de pomp kan bereiken wanneer deze rechtstreeks tegen de zwaartekracht in pompt (Global Pumps, sd). Deze geleverde opvoerhoogte in een pompsysteem wordt gebruikt om een drukverschil, stroomsnelheidsverschil, hoogteverschil of wrijvingsweerstand te overwinnen (*Vergelijking 2*). Het totale te overwinnen verschil in druk, stroomsnelheid en hoogte in een pompsysteem wordt de statische opvoerhoogte genoemd. De energie benodigd om de wrijvingsweerstand te overwinnen wordt de dynamische opvoerhoogte genoemd (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010). De systeembalans bestaat dus uit het volgende:

- De geleverde energie door de pomp.
- De weerstanden van het pompsysteem:
 - Statische opvoerhoogte.
 - Dynamische opvoerhoogte.

In een pompsysteem wordt energie geproduceerd door de pomp. Deze pomp realiseert met behulp van elektrisch vermogen een bepaald debiet dat de statische- en dynamische opvoerhoogte van het systeem overkomt (*Vergelijking 1* (Bortoni, Almeida, & Viana, 2008)). Deze geleverde pompenergie wordt gebruikt om een bepaald debiet over een weerstand te transporteren. De formule voor de opvoerhoogte is gegeven in *Vergelijking 2* (Tukker & Kooij, Bijlagen, 2010).

$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_m \cdot \eta_p}$	Vergelijking 1
P = Opgenomen vermogen (W), ρ = dichtheid vloeistof (kg/m ³), g = gravitatie constante (m/s ²), Q = Debiet (m ³ /s), H = Head (m), η_m = motor efficiëntie (-), η_p = Pomp efficiëntie (-)	
$H = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta H_{1,2}$	Vergelijking 2
H = Opvoerhoogte (m), p = druk (N/m ²), ρ = dichtheid vloeistof (kg/m ³), g = gravitatie constante (m/s ²), v = Snelheid van vloeistof (m/s), z = Hoogteverschil (m) $\Delta H_{1,2}$ = Wrijvingsverliezen in leiding tussen punt 1 en 2 (m),	

De componenten van de opvoerhoogte uit *Vergelijking 2* zijn dus onder te verdelen in de statische opvoerhoogte en de dynamische opvoerhoogte. Onder statische opvoerhoogte valt dan de te overwinnen druk, het verschil in stroomsnelheid en het hoogteverschil. De dynamische opvoerhoogte wordt gevormd door de wrijvingsverliezen die optreden wanneer er daadwerkelijk water door de

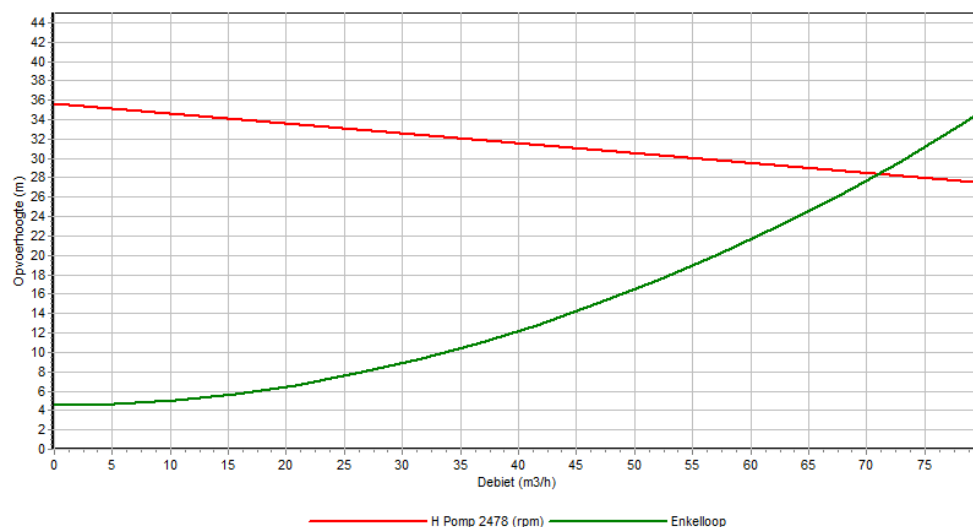
leiding stroomt. De dynamische opvoerhoogte is te beschrijven volgens *Vergelijking 3* (Tukker & Kooij, Bijlagen, 2010):

$\Delta H_{1,2} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	Vergelijking 3
$\Delta H_{1,2}$ = Wrijvingsverlies (m), λ = Wrijvingscoëfficiënt (-), L = Leidinglengte (m), v = Stroomsnelheid (m/s), D = Diameter (m), g = gravitatie constante (m/s ²)	

Wanneer bij een pomp een bepaald vermogen wordt geleverd wordt deze energie dus omgezet in energie voor het debiet en energie om de weerstand in het systeem te overbruggen. Hoe groter het debiet is dat de pomp dan verpompt, hoe minder energie er over is om de weerstand i.e. opvoerhoogte te overwinnen. Deze verhouding kan in een figuur worden geplott en wordt de pompcurve genoemd.

De weerstand in een systeem bestaat uit de statische opvoerhoogte en de dynamische opvoerhoogte i.e. de wrijvingsverliezen. Wanneer door een leiding een hoger debiet wordt gepompt en de leidingdoorsnede gelijk blijft zal logischerwijs de stroomsnelheid in de leiding groter worden. Uit *Vergelijking 3* blijkt dat een verhoogde stroomsnelheid door een leiding een verhoogde wrijvingsweerstand veroorzaakt. Ook deze verhouding van debiet en opvoerhoogte kan in een figuur geplott worden en wordt de systeemcurve genoemd.

Voor rioolgemaal De Zandloper is de pompcurve tegen de systeemcurve uitgezet in Figuur 2.3. Een figuur waar deze informatie in wordt weergegeven wordt een Q-H kromme genoemd. Uit deze figuur valt te herleiden dat het systeem in balans is bij een debiet van 71m³/h omdat hier beide curves elkaar snijden.

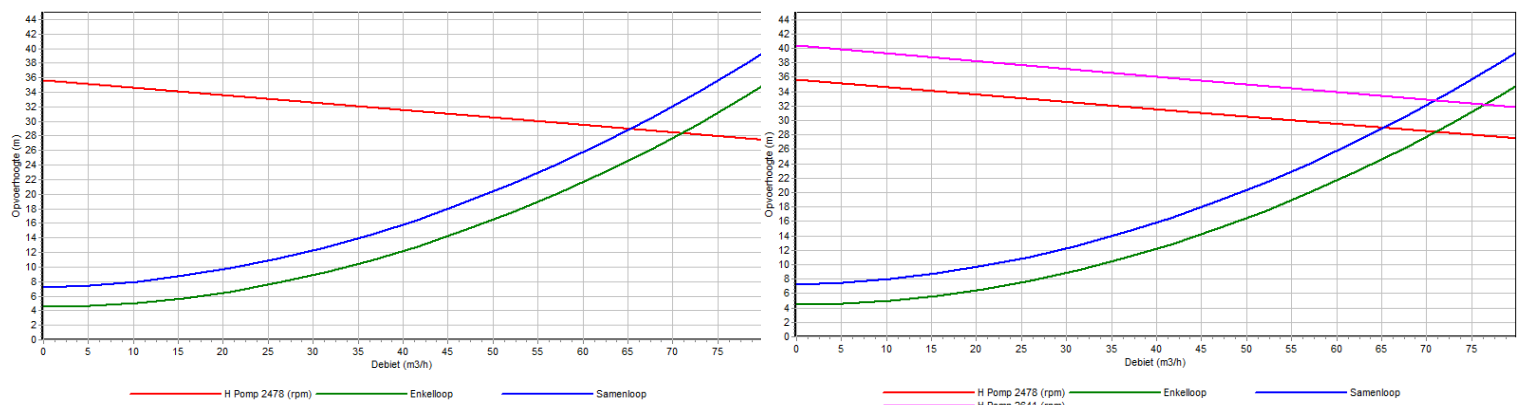


Figuur 2.3: Q-H kromme van Pompcurve (Rood) tegen systeemcurve (Groen) uitgezet (Bron: HHNK, Wanda)

Indien er in plaats van enkelloop samenloop optreedt zal de systeemcurve van een systeem veranderen. Omdat er meer debiet door dezelfde leiding stroomt door toedoen van een ander gemaal zal de frictie in de leiding toenemen (*Vergelijking 3*). Een pomp kan hier op meerdere manieren op reageren waarvan er twee het meest voor komen bij rioolgemaal:

1. Dezelfde energie blijven genereren en een nieuw evenwicht laten plaatsvinden.
2. Meer energie genereren om hetzelfde debiet te blijven verwerken.

In Nederland wordt stroom geleverd met een frequentie van 50 Hertz (Worldstandards, 2019). Wanneer een frequentieomvormer op de pomp is geïnstalleerd kan de frequentie van de stroom worden aangepast om zo ervoor te zorgen dat de pomp meer of minder vermogen pompt. Een voorbeeld van beide manieren van reageren is in Figuur 2.4 weergegeven. Hier is te zien dat op manier 1 (links) een nieuw evenwicht wordt gevonden omdat de weerstand toeneemt en de pompenergie gelijk blijft. Hierdoor zakt het debiet af van 71m³/h naar 65m³/h. De pomp kan ook het toerental opschroeven van 2478 rpm naar 2641 rpm wat ervoor zorgt dat bij de toegenomen weerstand het debiet gelijk blijft. Hierdoor zal echter de opgenomen energie van de pomp ook toenemen.



Figuur 2.4: Door samenloop neemt de frictie in een systeem toe. Een pomp kan hier op manier 1 op reageren (links) of op manier 2 (rechts) (Bron: HHNK, Wanda)

Of bij een rioolgemaal manier 1 of manier 2 zal worden toegepast is afhankelijk van de inslagpeil- en setpoint instellingen van het gemaal. De manier waarop het inslagpeil en setpoint werkt is toegelicht in de Achtergrondinformatie.

Relatie buisdiameter en wrijving

Hierboven is uitgelegd hoe samenloop ervoor zorgt dat er meer energie zal worden verbruikt door de pompen dan in enkelloop. Dit is voornamelijk afhankelijk van de dynamische opvoerhoogte die groter wordt door de toenemende wrijvingsweerstand. Deze wrijvingsweerstand is omschreven in *Vergelijking 3* en kan met behulp van de formule $v^2 = (\frac{4Q}{\pi D^2})^2$ worden omgeschreven tot *Vergelijking 4* (Tukker & Kooij, Bijlagen, 2010).

$\Delta H_{1,2} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{(\frac{4Q}{\pi D^2})^2}{2g} = \frac{8\lambda L Q^2}{g^2 D^5}$	Vergelijking 4
$\Delta H_{1,2}$ = Wrijvingsverlies (m), λ = Wrijvingscoëfficiënt (-), Q = Debiet (m ³ /h) L = Leidinglengte (m), v = Stroomsnelheid (m/s), D = Diameter (m), g = gravitatie constante (m/s ²)	

Uit *Vergelijking 4* blijkt dat de leidinglengte, het debiet en de diameter van de leiding de variabelen zijn van de optredende wrijvingsweerstand. Hier valt ook uit te halen dat de dynamische opvoerhoogte tot de vijfde macht invers afhankelijk is van de diameter van de persleiding. De diameter van de persleiding is dus een belangrijke factor voor de optredende drukken.

De diameter van de persleiding is deels afhankelijk van de achterliggende gemeentelijke stelsel. Het gemeentelijke vrij verval stelsel kan een gemengd stelsel of een gescheiden stelsel zijn. In een gemengd stelsel wordt zowel het hemelwater als het afvalwater naar een rioolgemaal getransporteerd terwijl in een gescheiden stelsel enkel het afvalwater naar een gemaal gaat (Rioned, (Verbeterd) Gescheiden riool, sd). Indien er in het gemeentelijke stelsel sprake is van een gecombineerd stelsel is de incidentele RWA de piektoevoer. Aangezien het stelsel op het maximale ontwerpdebiet wordt gedimensioneerd is RWA dus maatgevend voor het ontwerp van de persleiding ook al komt DWA 80% van de tijd voor (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010). Dit betekent dat in DWA, wanneer de afvalwatertoevoer minder is dan in RWA, de persleiding niet tegen ontwerpcapaciteiten wordt gebruikt. Wanneer er daarentegen sprake is van een gescheiden gemeentelijk stelsel zal de persleiding worden ontworpen op DWA situatie aangezien er geen RWA scenario is. Dit zorgt ervoor dat de persleiding vaker op ontwerpcapaciteit gebruikt wordt.

Het feit dat een 10% kleinere diameter een 70% toename in wrijvingsweerstand geeft (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010), gecombineerd met de beredenering dat bij een gescheiden stelsel de persleiding kleiner wordt ontworpen, zorgt ervoor dat bij een gescheiden gemeentelijk stelsel de drukken in de persleiding hoger zullen oplopen in DWA.

3 Samenloop in de praktijk

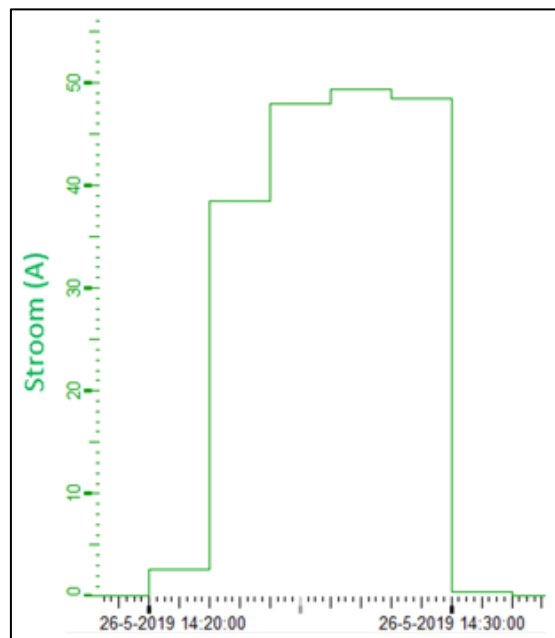
In het vorige hoofdstuk is de achterliggende theorie van samenloop besproken. Dit hoofdstuk zal dieper ingaan op hoe samenloop in de praktijk kan worden gemeten. Wederom wordt samenloop onderverdeeld in hoe vaak het optreedt in paragraaf 3.1 en het optredende effect wanneer samenloop voor komt in paragraaf 3.2.

3.1 Praktijk optreden van samenloop

In paragraaf 2.1 is uiteengezet welke factoren meespelen in het optreden van samenloop. In grote lijnen valt met deze informatie te bepalen of bij een stel parallel geschakelde gemalen gelijktijdig pompen vaak of juist heel weinig optreedt. Om nauwkeuriger te weten hoe vaak samenloop optreedt zullen de meetgegevens van de gemalen geanalyseerd moeten worden.

Metten

Op dit moment worden de gegevens van alle gemalen gemeten en gemonitord in het programma WinCCOA. Deze data bevat onder andere de debietmetingen van de gemalen en de opgenomen stroom in ampère. Wanneer een pomp stroom opneemt betekent dit logischerwijs dat deze in bedrijf is. Op deze manier zou de data geëxporteerd kunnen worden om zo in een dataverwerkingsprogramma een analyse uit te voeren om te bepalen hoe vaak een stel gemalen tegelijk in werking zijn geweest. Echter, een probleem hierbij is dat de data wordt gemeten in intervallen van twee minuten. Daarnaast is door middel van het bestuderen van deze metingen bevonden dat een groot aandeel van de gemalen over het algemeen rond de tien minuten nodig heeft om bijbehorende kelder leeg te pompen. In het meest extreme geval beslaat een periode van rond de tien minuten dan zeven intervallen. Hierdoor is dan 40% van de meting onnauwkeurig doordat maar een deel van de tijd in het interval het gemaal ook echt in werking was. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 3.1. Dit fenomeen maakt dat een data analyse met de huidige data dusdanig onnauwkeurig is dat deze niet kan worden gebruikt in het bepalen van het optreden van samenloop.

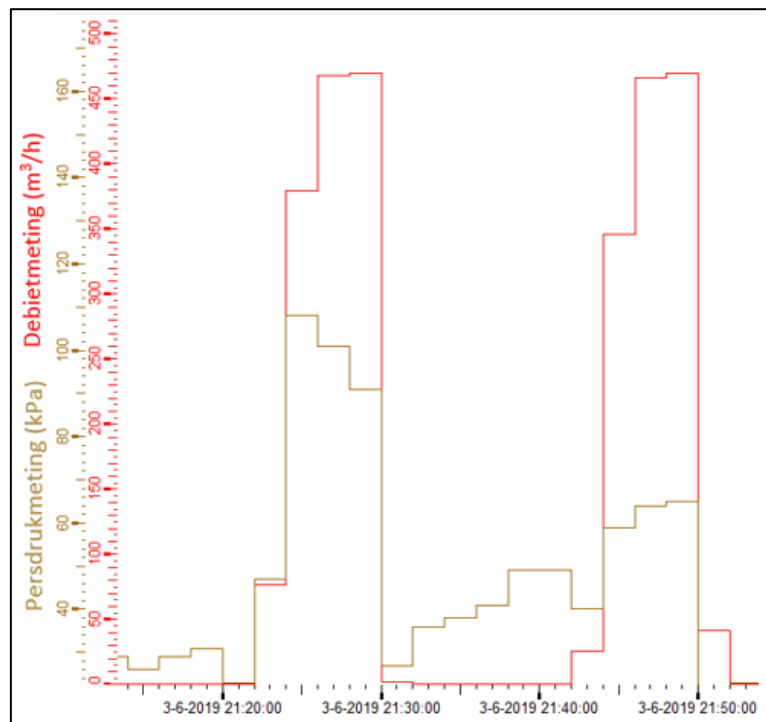


Figuur 3.1: Meting uit WinCCOA (Willemsweg), een pomp die ongeveer 8 minuten heeft gedraaid gemeten in zes intervallen van twee minuten (Bron: HHNK, WinCCOA)

Indicator

Ook al is met de huidige tijdsintervallen niet nauwkeurig te bepalen hoe vaak samenloop optreedt bij een gemaal is er wel een indicator die gebruikt kan worden om een indicatie te krijgen of de mate van optreden van samenloop significant is.

Wanneer het debiet in de gedeelde persleiding (stroomsnelheid vermenigvuldigd met de doorsnede van de persleiding) toeneemt ten toedoen van samenloop zal de dynamische opvoerhoogte (de wrijvingsweerstand) ook toenemen (*Vergelijking 3*). Hierdoor is aan het begin van de persleiding een hogere persdruk vereist van de pomp om het afvalwater door de persleiding te pompen (*Vergelijking 2*). Wanneer er een drukmeter aanwezig is bij een gemaal kan deze als indicator worden gebruikt voor het effect van samenloop. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 3.2. Hier is de persdrukmeting en de debietmeting van twee periodes van het rioolgemaal Willemsweg weergegeven. Zoals te zien is in beide periodes de debietmeting nagenoeg gelijk. Echter, de persdrukmeting is erg verschillend waardoor kan worden aangenomen dat in de eerste periode meerdere parallel geschakelde gemalen in werking waren dan in de tweede periode. Hierdoor kan de persdrukmeting worden gebruikt als een indicator voor hoe vaak samenloop optreedt. Hoe vaker de persrukmeting fluctueert, hoe vaker samenloop optreedt.



Figuur 3.2: Persdrukmeting (Bruin) en Debietmeting (Rood) van rioolgemaal Willemsweg (Bron: HHNK, WinCCOA)

In deze paragraaf 2.2 is toegelicht dat een pomp op meerdere manieren kan reageren in geval van samenloop; door de stroomfrequentie, en zo het vermogen, te verhogen om hetzelfde debiet te blijven realiseren of door een nieuw evenwicht te vinden bij de verhoogde wrijvingsweerstand. In het tweede geval zal het debiet afnemen en kan de debietmeting dus ook worden gebruikt als een indicator van samenloop.

3.2 Praktijk effect van samenloop

Naast de mate van optreden van samenloop is de invloed ook van belang om het effect te kwantificeren. In deze paragraaf zal worden besproken welk effect samenloop heeft op de energieconsumptie van pompen.

Experiment

Om te kwantificeren in welke mate de effecten optreden zoals beschreven in de theorie is er een experiment uitgevoerd. Hierbij is bij de rioolgemaal in het veld afgelezen wat de momentane energieopname is onder verschillende omstandigheden. Deze meting van opgenomen vermogen wordt namelijk niet bijgehouden in WinCCOA.

Bij dit experiment is gekeken naar de streng Zandloper-Julianadorp. Deze streng is gekozen om te onderzoeken omdat hier enkel twee gemalen parallel geschakeld zijn. Doordat dit een relatief eenvoudige tak is zijn er slechts 3 scenario's die van toepassing zijn voor het experiment. Hierdoor kunnen de verschillen in de scenario's goed met elkaar vergeleken worden om zo de effecten van de scenario's te analyseren. De schematische weergave van de opbouw van dit systeem is gegeven in Figuur 1.3 en in Figuur 8.2 in Bijlage A.1.

Het doel van dit experiment is om het verschil in stroomverbruik te kwantificeren wanneer beide gemalen in enkelloop en in samenloop pompen. Hierbij worden de debietinstellingen gebruikt zoals deze huidig zijn ingesteld bij de gemalen. Ook worden de huidige instellingen van het inslagpeil en setpoint gelijk gehouden bij de gemalen

Verwacht wordt dat bij Julianadorp het debiet in enkelloop en samenloop gelijk blijft maar dat het opgenomen vermogen in kW zal toenemen in geval van samenloop. Bij de Zandloper wordt echter verwacht dat het opgenomen vermogen gelijk blijft en het debiet in samenloop ten opzichte van enkelloop zal afnemen. Dit is omdat het setpoint bij Julianadorp onder het inslagpeil is ingesteld en dus op manier 2 zal reageren (paragraaf 2.2 en Figuur 2.4). Bij gemaal De Zandloper is het setpoint boven inslagpeil ingesteld en zal in DWA dus op manier 1 reageren.

Werkwijze

Om dit experiment zo nauwkeurig en valide mogelijk te laten verlopen zijn enkele maatregelen genomen. Allereerst komt de persleiding van Zandloper en Julianadorp uit in de kelder van rioolgemaal Blauwe Keet. Het waterpeil in de kelder van Blauwe Keet fluctueert waardoor de statische opvoerhoogte ook verandert. Om de statische opvoerhoogte constant te houden is voor de duur van dit experiment het waterpeil in de Kelder van Blauwe keet onder de uitstroom van de persleiding gehouden. Voor een meer gedetailleerde uitleg hiervan zie Bijlage B.3.

Daarnaast is nagegaan of de pompen van de betreffende gemalen functioneren zoals deze zouden moeten functioneren. Dit is bevestigd volgens de meetgegevens van de pompen (Bijlage B.2).

Om het experiment uit te voeren zal tijdens de duur van het experiment contact worden gehouden met de regiekamer. De regiekamer is geautoriseerd om de gemalen handmatig te regelen waardoor de drie scenario's die bestudeerd worden kunnen worden gerealiseerd. Elk scenario wordt in werking gezet en gewacht tot de metingen stabiel zijn geworden. De scenario's waar het om gaat zijn:

- Julianadorp aan, zandloper uit
- Julianadorp aan, zandloper aan
- Julianadorp uit, zandloper aan

Resultaten

Het experiment brengt resultaten voort die in Tabel 3.1 zijn weergegeven.

Tabel 3.1: Resultaten experiment energieverbruik

Julianadorp (Aan)	Zandloper uit		Zandloper aan		Procentuele verandering
	16-05-2019 08:44		16-05-2019 08:51		
	Debiet	226	225	m3/h	-0,44
	Ampère	28	29,8	A	6,43
	Frequentie	33,6	36,1	Hz	7,44
	Vermogen	8	9,6	kW	20
Zandloper (Aan)	Julianadorp uit		Julianadorp aan		Procentuele verandering
	16-05-2019 09:21		16-05-2019 09:23		
	Debiet	70	57	m3/h	-18,57
	Ampère	16,6	16,3	A	-1,81
	Frequentie	30,8	30,7	Hz	-0,32
	Vermogen	4,9	4,8	kW	-2,04
	Druk	83	102	kPa	22,89

Uit deze resultaten valt te concluderen dat het debiet in enkelloop en samenloop gelijk blijft voor Julianadorp en het opgenomen vermogen met 20% toeneemt wanneer Zandloper ook aan staat. Voor de Zandloper geldt dat het debiet met 18.6% afneemt wanneer Julianadorp aan staat ten opzichte van enkelloop. Dit betekent dat de Zandloper in samenloop er 18.6% langer over doet om hetzelfde volume te verpompen. Met een niet veranderend vermogen betekent dit ook een 18.6% hoger energieverbruik in samenloop. Hiermee is de verwachting bevestigd. Wat vooral opvalt is dat Julianadorp 20% meer energie verbruikt om hetzelfde debiet te verpompen ook al heeft de zandloper een relatief laag debiet tegenover Julianadorp.

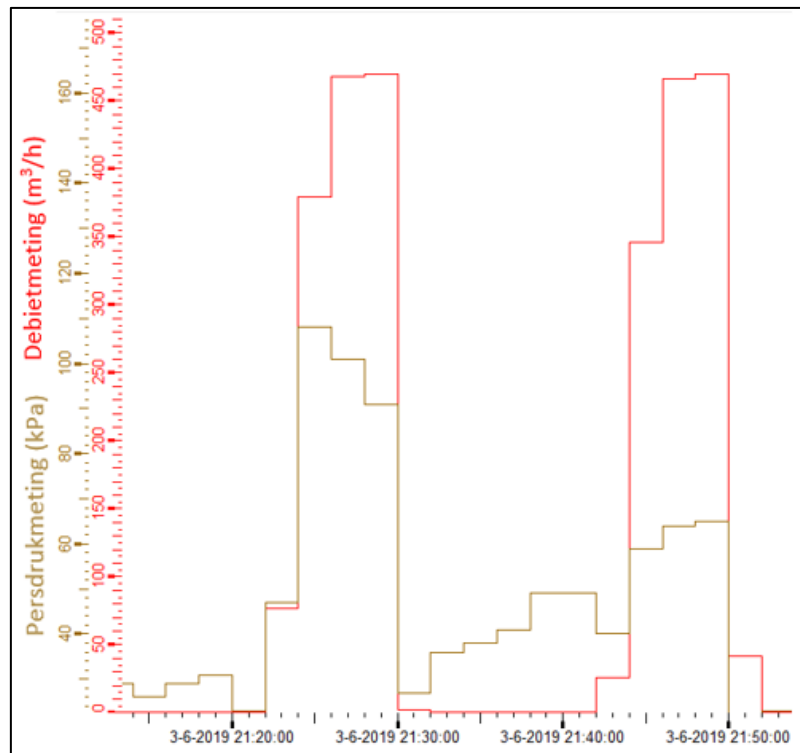
Wat opvalt is dat bij de Zandloper het vermogen afneemt in samenloop terwijl de stroomfrequentie nagenoeg gelijk blijft. Dit kan als verklaring hebben dat bij eenzelfde stroomfrequentie de pomp minder toeren kan maken in samenloop door de extra druk op de schoepen van de pomp. Hierdoor zal de pomp stroom in ampère opnemen (Buijs, 2019). Ook kan dit verschil worden veroorzaakt door de rendementskromme van de pomp (Petiet, 2019).

Een factor die van invloed kan zijn op het energieverbruik maar niet is geregeld tijdens het experiment is de gemeentelijke inprikker. Dit is een klein gemaal beheerd door de gemeente welke ook water in de persleiding pompt. Deze kon tijdens het experiment niet uit worden gezet en de historische gegevens zijn niet in bezit bij HHNK. Echter, dit gemaal produceert een debiet van 5.1m³/h wanneer deze in bedrijf is (Wal, 2019). Omdat dit een klein aandeel is tegenover de debieten van Zandloper en Julianadorp kan er van uit worden gegaan dat dit de resultaten niet significant heeft beïnvloed.

Indicatoren

Uit het experiment blijkt dat samenloop wel degelijk invloed heeft op de prestatie van een gemaal. Echter, deze prestatie wordt niet gemonitord aangezien het verbruikte vermogen niet wordt opgeslagen en dit ook niet te herleiden valt uit de opgenomen stroom in ampère aangezien de stroomfrequentie niet vast staat. Toch is het gewenst om een indicator te hebben om te bepalen bij welke gemalen samenloop veel invloed heeft.

In de paragraaf 3.1 is de drukmeting al benoemd als een indicator voor hoe vaak samenloop optreedt. Hier werd gesteld dat hoe vaker de druk fluctueert bij eenzelfde debiet, er kan worden aangenomen dat samenloop vaker optreedt. De drukmeting kan daarentegen ook worden gebruikt als indicator voor het optredende effect in geval van samenloop. In Figuur 3.3 is nogmaals de persdrukmeting van rioolgemaal Willemsweg gegeven. Hier zijn wederom twee pompcyclussen weergegeven met hetzelfde debiet en een andere drukmeting. Voor het optredende effect in geval van samenloop wordt er in plaats van hoe vaak de druk fluctueert gekeken naar de mate van drukfluctuatie. Hoe groter het verschil in drukmeting bij eenzelfde debiet, hoe groter het effect op het energieverbruik van de pomp.



Figuur 3.3: Persdrukmeting (Bruin) en Debietmeting (Rood) van rioolgemaal Willemsweg (Bron: HHNK, WinCCOA)

Subconclusie

Elke tak van een rioleringsstelsel is op maat gemaakt voor de situatie. Dit zorgt ervoor dat elk stelsel uniek is. Hierdoor is er geen uitspraak te doen over hoe vaak samenloop in het algemeen voorkomt, dit zal per tak of stelsel individueel bepaald moeten worden. Voor een streng zou gemeten kunnen worden hoe vaak meerdere gemalen tegelijk aan hebben gestaan. Om dit echter nauwkeurig te analyseren zullen de meetintervallen voor een bepaalde tijd kleiner gezet moeten worden zodat de onnauwkeurigheid minder wordt.

Het effect van samenloop valt ook niet bepalen uit de historische data omdat de kWh metingen niet worden opgeslagen. Om het effect van samenloop op het energieverbruik van de pompen te bepalen kan een experiment worden uitgevoerd waarbij in het veld wordt gekeken naar het momentaan opgenomen vermogen van de pomp. Op deze manier is er een experiment uitgevoerd waaruit blijkt dat bij rioolgemaal de Zandloper en Julianadorp respectievelijk 18% en 20% meer energie wordt verbruikt wanneer samenloop optreedt. Ook al zijn deze gemalen niet representatief voor alle andere gemalen valt hieruit te concluderen dat samenloop een significant effect kan hebben.

Een meetgegeven dat momenteel wel wordt opgeslagen in de historische data is de drukmeting (indien er bij het gemaal een drukmeter is geïnstalleerd). Deze persdrukmetingen kunnen als indicator worden gebruikt voor zowel het optreden van samenloop als het optredende effect wanneer er sprake is van samenloop.

4 Optimaliseren pompregimes

In het vorige hoofdstuk is gekeken naar het fenomeen samenloop op zich. Daarbij zijn de factoren uiteengezet die het optreden van samenloop beïnvloeden en er is een experiment uitgevoerd om het effect van gelijktijdig pompen in kaart te brengen. Dit hoofdstuk zal focussen op de mogelijkheden om de pompregimes aan te passen om zo samenloop te verminderen en energie te besparen. In de eerste paragraaf wordt onderzocht waar een pompregime aan moet voldoen. Vervolgens wordt in paragraaf twee gekeken naar mogelijke alternatieven en de effecten van deze alternatieven.

4.1 Ontwerpeisen pompregime

Voordat er alternaties ontworpen en geïmplementeerd worden van het pompregime is het van belang om te weten waar het pompregime aan moet voldoen. Zo zijn er zowel eisen aan de stroomsnelheden in de persleiding als aan het waterpeil in de kelder van een gemaal.

Waterpeilen

Voor het inslag- en uitslagpeil zijn er bepaalde richtlijnen. Aangezien het gemeentelijk stelsel niet onder beheer van het Hoogheemraadschap valt, wordt er bij voorkeur niet geborgen in het vrij verval stelsel. Om deze reden is het inslagpeil meestal ingesteld op de onderkant van de buis met de afvalwatertoevoer.

Naast het inslagpeil is het uitslagpeil ook van belang. Lucht of gas in de persleiding zorgt voor een afname van de capaciteit en prestatie van een gemaal. Om deze reden moet worden voorkomen dat de pomp naast water ook lucht opzuigt (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010).

Een pomp kan nat of droog opgesteld zijn. In natte opstelling is de pomp zelf geheel in het water geplaatst terwijl bij een droge opstelling enkel de inlaat van de pomp het water bereikt. In droge opstelling is de pomp zelf buiten de kelder geïnstalleerd. Bij een natte opstelling wordt als vuistregel aangehouden dat de minimale onderdompeldiepte van de pomp (de pomp compleet onder water) als uitslagpeil wordt aangehouden. Bij een droge opstelling wordt vaak de bovenkant van de inlaat van de pomp als richtlijn gebruikt. Op deze manier kan luchtaanzuiging worden voorkomen (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010).

Frequentieomvormer

Om de prestatie van het gemaal te kunnen beïnvloeden is er bij een pomp over het algemeen een frequentieomvormer (FO) aangesloten. Een FO kan de stroomfrequentie aanpassen zodat er meer of minder vermogen aan de pomp geleverd wordt. De frequentieomvormer wordt ook gebruikt om de persleiding op gang te brengen. Wanneer het water in de persleiding stil staat moet het debiet eerst op gang worden gebracht. De frequentieomvormer zal daarom niet in één keer naar het ingestelde debiet regelen maar dit zal geleidelijk gebeuren. Ook aan het einde van de cyclus wordt de pomp niet abrupt uitgezet maar zal worden afgebouwd om waterslag te beperken.

Een bijkomende eis ten toedoen van een FO is dat er een maximum aantal starts per uur is. Dit aantal ligt echter rond de 10 tot 20 starts per uur wat vaak meer dan genoeg is (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010).

Stroomsnelheid

In het afvalwater zitten vaste deeltjes welke kunnen sedimenteren en zo het systeem kunnen vervuilen. Om verstoppingen zowel in de persleiding als in de pomp te voorkomen is daarom een minimale stroomsnelheid vereist zodat de deeltjes geen kans krijgen om te sedimenteren. Voor een zelfreinigend effect in de persleiding wordt een minimale stroomsnelheid van 0.5 m/s gehanteerd.

Zoals eerder besproken heeft de stroomsnelheid een positief kwadratisch verband met de wrijvingsweerstand. Uit energetisch oogpunt is daarom ook een richtlijn voor de maximum stroomsnelheid van 1.0 á 1.5 m/s standaard bij persleidingen (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010).

Overzichtelijkheid

Belangrijk is dat je overzicht houdt over je stelsels. Daarbij hoort dat de bestuurders weten waarom het gemaal zich op een bepaalde manier gedraagt. Een groot pluspunt van de huidige regeling is de overzichtelijkheid en voorspelbaarheid. Wanneer een gemaal inslagpeil heeft bereikt gaat deze aan zonder verder aan enige stellingen te hoeven voldoen. Als je het overzicht verliest kan je moeilijk bepalen of een gemalen defect is of dat deze zo hoort te werken.

4.2 Alternatieve pompregimes

In hoofdstuk 1 in de probleemcontext is beschreven hoe het automatiseringsprofiel van de gemalen op dit moment is ingesteld. Vervolgens is in hoofdstuk 2 en 3 besproken wat dit met zich meebrengt. In deze paragraaf zal worden gekeken naar manieren om samenloop te verminderen door het automatiseringsprofiel aan te passen.

In de ideale situatie is het debiet door een gezamenlijke persleiding constant. Dit zou betekenen dat de afvalwaterafvoer compleet verdeeld is over de tijd waardoor er geen pieken zijn in de wrijvingsweerstand. Op deze manier zou het energieverbruik geoptimaliseerd kunnen worden.

Randvoorwaarden

Een gemaal heeft instellingen en eisen omtrent het minimum debiet en de normaafvoer welke bepalen hoe het gemaal werkt indien deze aanstaat. In meerdere onderzoeken is bewezen dat het aanpassen van de snelheid van de pomp (VSD variable speed driven) een energiebesparing kan betekenen (Viholainen, et al., 2012) (Ruuskanen, 2007). Echter, het overgrote gedeelte van de gemalen binnen het beheersgebied van HHNK heeft al een frequentieomvormer die het vermogen (en dus snelheid) van een pomp varieert.

Daarnaast is in de afbakening van het onderzoek gesteld dat dit een scenario analyse is. Hierom zal ook bij het optimaliseren van het pompregime gefocust worden om het grootste deel van de tijd het optimale scenario te realiseren en niet om de scenario's in zichzelf aan te passen.

Systeem

In het huidige systeem worden de meetgegevens van de gemalen tijdelijk opgeslagen bij de gemalen zelf. Deze gemalen hebben een beperkte opslagcapaciteit waardoor ze regelmatig de data naar WinCCOA uitwisselen. Afhankelijk van de hoeveelheid data die gemeten wordt, wordt de data frequenter uitgewisseld. Wanneer acht uur aan data gemeten wordt in intervallen van twee minuten is hiervoor minder opslag nodig dan wanneer elke tien seconde een meting wordt gedaan. In de standaard situatie wordt er gemeten in intervallen van twee minuten waardoor de gemalen driemaal daags hun data uitwisselen met WinCCOA.

In WinCCOA kunnen de instellingen van een gemaal worden aangepast welke worden overgenomen door het gemaal. Vervolgens wordt de situatie bij het gemaal lokaal geëvalueerd en op basis van de overgenomen instellingen wordt bepaald of het gemaal al dan niet in werking moet treden en op welke manier. Dit is een vorm van een lokaal aangestuurd systeem.

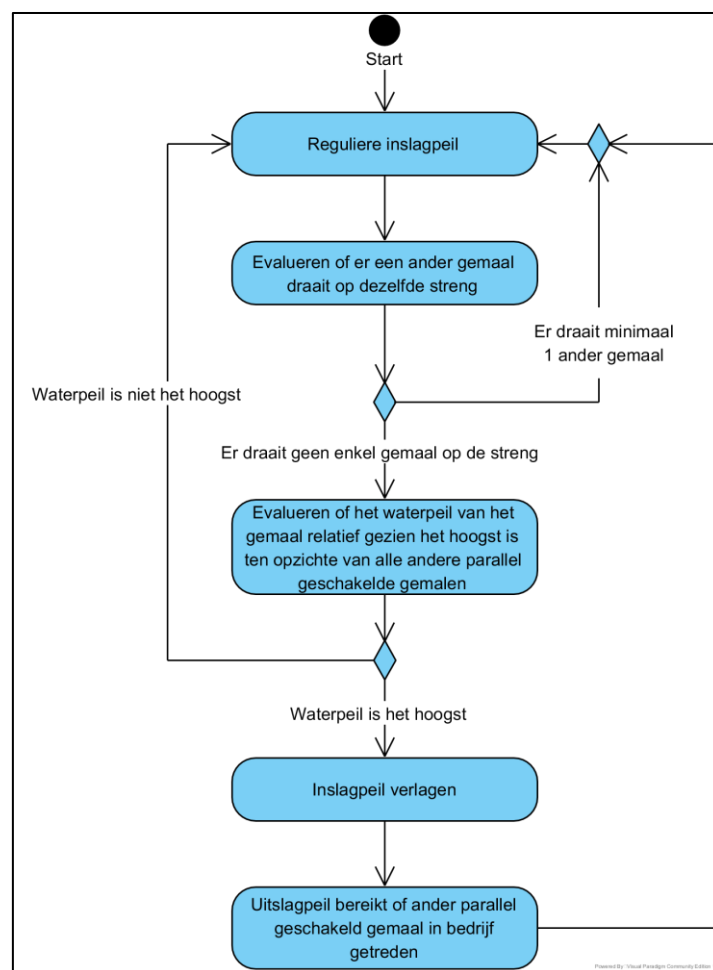
Daartegenover zouden de gemalen ook centraal aangestuurd kunnen worden. In dit geval zou dat betekenen dat alle meetgegevens van de gemalen direct naar WinCCOA worden opgestuurd waardoor WinCCOA real time evalueert wat er moet gebeuren en dit weer naar de gemalen communiceert. In de tijd dat dit programma is ontworpen is ervoor gekozen om het systeem niet centraal aan te sturen om het programma niet over te belasten en om minder data uit te hoeven wisselen.

Eerder onderzoek

Bij waterschap Scheldestromen is een dergelijke scenario optimalisatiestudie uitgevoerd en gedocumenteerd in “Tussenrapportage I-48 optimaliseren DWA-Regeling rioolgemalen” (Scheldestromen, DWA-Regeling rioolgemalen, 2015). Hier werd constant voor elk gemaal op een streng gekeken:

- Of er in ieder geval één ander parallel geschakeld gemaal draait in het stelsel;
- Of het waterpeil van het betreffende gemaal relatief gezien het dichtst bij het inslagpeil is ten opzichte van de parallel geschakelde gemalen.

Indien er geen ander gemaal op dat moment in bedrijf is, en van alle parallel geschakelde gemalen ligt het waterpeil van het betreffende gemaal het dichtst bij inslagpeil, wordt het inslagpeil van dit gemaal verlaagd tot precies tussen inslagpeil en uitslagpeil. Dit zorgt ervoor dat het gemaal, waar het waterpeil relatief gezien het hoogst is, aan gaat indien er geen ander gemaal draait op dat moment. Dit gebeurt echter enkel op het moment dat de kelder ook redelijk gevuld is waarmee wordt voorkomen dat het gemaal slechts voor een kleine hoeveelheid afvalwater aan staat. Voor verduidelijking is in Figuur 4.1 een activity diagram toegevoegd die stappen aangeeft die voor elk gemaal worden doorlopen. Uit het onderzoek van Scheldestromen blijkt dat er in vertakte stelsels met deze regeling circa 10% procent aan energie kan worden bespaard op droge dagen. Op jaarbasis gecombineerd met RWA komt dit neer op ongeveer 7% (Scheldestromen, DWA-Regeling rioolgemalen, 2015).



Figuur 4.1: Activity diagram van geoptimaliseerde pompregime Scheldestromen

Het verschil met de manier waarop waterschap Scheldestromen werkt is dat bij HHNK niet real time de statussen van alle gemalen in één punt wordt verzameld. Hierdoor kan niet automatisch worden bepaald hoeveel gemalen in bedrijf zijn op een tijdstip. Ook kan er om deze reden niet geautomatiseerd geëvalueerd worden in welke kelder van alle gemalen het waterpeil relatief het hoogst is. Om deze reden valt eenzelfde of een vergelijkbare regeling als bij Scheldestromen is geïmplementeerd niet toe te passen op de rioolgemalen in het beheersgebied van HHNK.

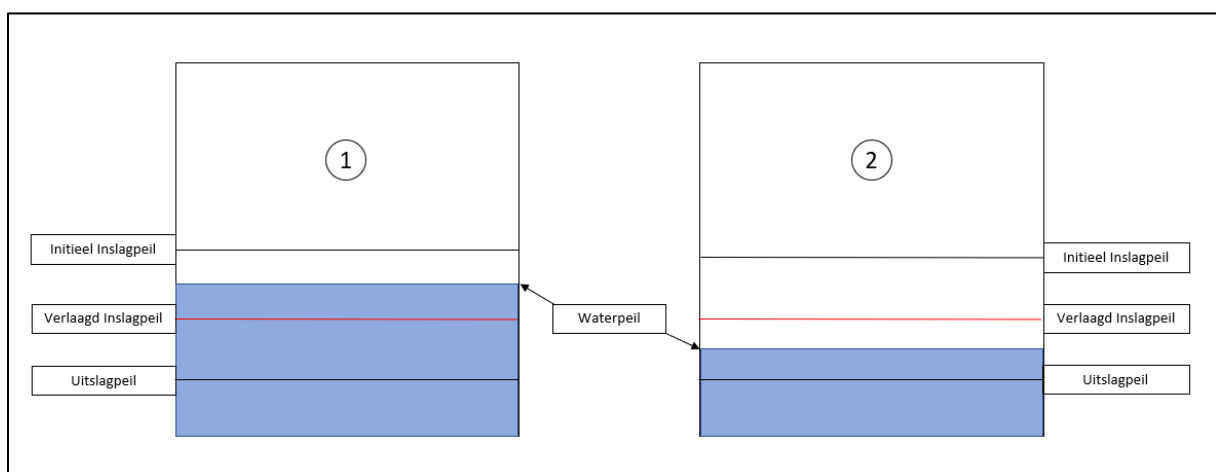
Mogelijkheden

Zoals hierboven beschreven zorgt de manier waarop het automatiseringssysteem is ontworpen voor enkele beperkingen in de mogelijke pompregimes. Doordat de data van meerdere gemalen niet real time op een centraal punt aanwezig is kan een stelsel niet in zijn geheel worden geëvalueerd. Alternatieve automatiseringsprofielen zullen dus, net als het huidige systeem, enkel afhankelijk kunnen zijn van de gegevens die lokaal bij de gemalen gemeten worden. In paragraaf 2.2 zijn twee indicatoren toegelicht die op samenloop duiden; de drukmeting en de debietmeting. Het verpompte debiet wordt bij alle gemalen gemeten terwijl bij ongeveer een derde van de gemalen een drukmeter is geïnstalleerd. Aan de hand van deze metingen kan lokaal bij een gemaal alsnog bepaald worden in hoeverre de gezamenlijke persleiding belast is en kan daarmee rekening worden gehouden in het pompregime.

Pompen stimuleren

De visie die bij Scheldestromen is toegepast is om het wegpompen van het afvalwater te vervroegen indien de persleiding licht of niet belast is. Deze visie kan alsnog gebruikt worden ook al is niet alle data van de andere parallel geschakelde gemalen beschikbaar. De drukmeting bij een gemaal kan, zoals toegelicht in paragraaf 2.2, een indicator zijn voor samenloop en dus ook voor enkelloop.

Wanneer er bij een gemaal wordt gemeten dat er op dat moment enkel de statische opvoerhoogte aan druk is in het systeem, betekent dat dat er geen andere gemalen aan staan. Op basis van deze conclusie kan vervolgens het inslagpeil worden verlaagd zodat het gemaal begint te pompen indien het waterpeil na de verlaging boven het inslagpeil ligt. Dit is verduidelijkt in Figuur 4.2. Om te voorkomen dat het gemaal slechts voor een kleine hoeveelheid afvalwater in werking treedt wordt het inslagpeil slechts beperkt verlaagd. In optie 1 van Figuur 4.2 zal het gemaal wel aan gaan terwijl het gemaal in optie 2 uit blijft ook al is er geen ander gemaal op de persleiding aan het pompen.



Figuur 4.2: Twee mogelijkheden na het verlagen van het inslagpeil

Hoge druk of laag debiet beperken

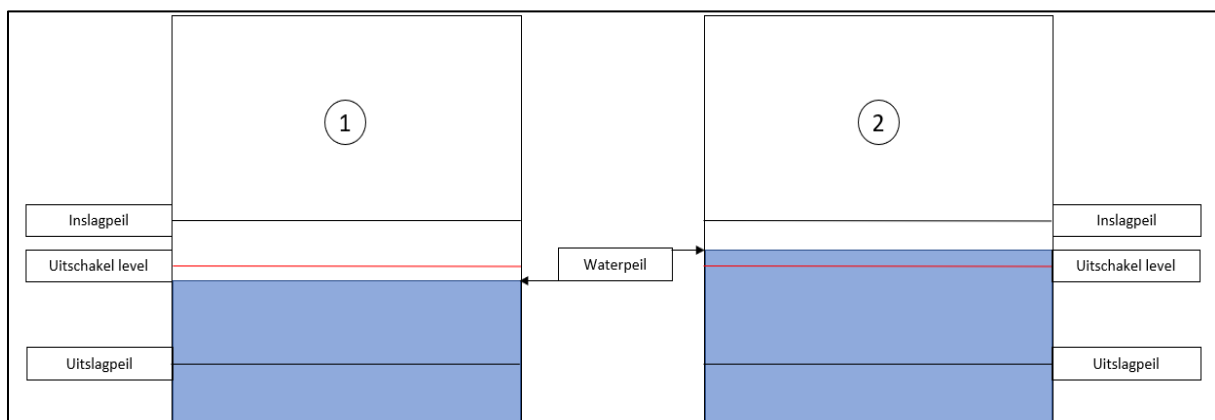
Naast de visie die is toegepast bij Scheldestromen, om de gemalen aan te zetten op het moment dat het gunstig is, kan daarentegen kan ook worden gehandeld op het moment dat een gemaal aan staat wanneer het juist ongunstig is om te pompen. Zo kan een gemaal in tijden van hoge belasting van de persleiding op een lager vermogen worden ingesteld of zelfs worden uitgeschakeld. Dit moet er echter niet toe leiden dat het gemeentelijke stelsel gevuld wordt of dat er zelfs overstort plaatsvindt.

Zoals besproken in paragraaf 2.2 kan een gemaal in samenloop reageren door meer vermogen te leveren waardoor de druk opbouwt of een nieuw evenwicht laten plaatsvinden bij een verlaagd debiet. Wanneer lokaal bij een gemaal voor één van de twee indicatoren een waarde wordt gemeten die duidt op samenloop, kan ervoor worden gekozen om het gemaal uit te zetten mits dit geen significante negatieve effecten met zich meebrengt. Hierdoor wordt voorkomen dat er tegen hoge drukken wordt ingepompt terwijl dit niet nodig is.

Hiervoor is al genoemd dat lang niet alle gemalen een drukmeter hebben ingebouwd. Hierdoor wordt het lastig om aan de hand van de optredende drukken te handelen. Echter, in het overgrote deel van gevallen is er een frequentieomvormer op de pomp aangesloten die het vermogen, en daarmee de prestatie, van de pomp bepaald. Deze frequentieomvormer geeft de stroomsterkte en de frequentie van de stroom als output. De frequentie van de stroomtoevoer van de pomp kan dan ook worden gebruikt als indicator van hoeveel opvoerhoogte de pomp levert. In verhouding met het momentaan verpompte debiet kan worden ingeschat of er een hoge of een lage druk heerst in het systeem.

Een gemaal staat niet zonder reden aan. Het doel is om het water weg te pompen indien de kelder voor een te groot deel gevuld is. Om deze reden kan het gemaal niet zomaar worden uitgeschakeld op het moment dat er samenloop optreedt. Er zullen daarom randvoorwaarden moeten worden opgesteld. Zo moet worden voorkomen dat het gemeentelijk stelsel gevuld wordt. Hierom moet in alle gevallen gelden dat het gemaal niet uit gaat indien het waterpeil zich boven het inslagpeil bevindt.

Wanneer het waterlevel zich net onder inslagpeil bevindt brengt het nadelen met zich mee om ook dan het gemaal direct uit te zetten. Wanneer het waterlevel net onder inslagpeil is en het gemaal uit gaat zal het niet lang duren voor het waterlevel weer inslagpeil heeft bereikt. Dit zal zorgen voor een flinke toename in inschakelingen van het gemaal. Daarnaast zal de kans groot zijn dat de druk in het systeem nog steeds hoog is als er tussen uitschakelen en inschakelen vrij weinig tijd zit. Hierom zal er een nieuw level moeten worden ingesteld welke wordt aangehouden of het gemaal uit gaat of niet bij een indicatie van samenloop. Ter verduidelijking is Figuur 4.3 toegevoegd. Hierbij zal in situatie 1 het gemaal wel uit gaan wanneer er samenloop wordt gedetecteerd terwijl bij eenzelfde druk in het systeem in situatie 2 het gemaal door blijft pompen.



Figuur 4.3: Twee mogelijkheden bij instellen nieuw Uitschakel level

Effecten

Ook al zijn de beschreven alternatieve pompregimes niet geëxperimenteerd in dit onderzoek, zijn er enkele effecten die te verwachten zijn wanneer een van deze alternatieve regelingen wordt geïmplementeerd.

Energiebesparing

Allereerst wordt verwacht dat het enigszins contoleren van de momenten waarop een gemaal pompt ervoor zorgt dat het wegpompen van afvalwater op gunstigere momenten gebeurt. Doordat (extreme) samenloop hiermee wordt vermeden kost het minder energie om hetzelfde volume weg te pompen. Deze energiebesparing zal in grootste mate optreden bij het betreffende gemaal maar zal ook te onderscheiden zijn bij de parallel geschakelde gemalen. Deze parallel geschakelde gemalen zullen minder vaak in samenloop zijn met het gemaal waar de alternatieve regeling is geïmplementeerd en dus over het algemeen pompen op een minder belaste persleiding.

Gelijkmatigere toevoer

Zoals besproken wordt in de alternatieve pompregimes de last van het wegpompen van afvalwater zoveel mogelijk verdeeld over de tijd. Hierdoor zal de persleiding constanter gemiddeld belast worden wat een gelijkmatigere toevoer naar de RWZI of het volgende gemaal met zich mee brengt. Aangezien zowel het proces bij een rioolwaterzuiveringsinstallatie als bij een gemaal een continu proces is, is een gelijkmatigere afvalwateraanvoer voordeliger omdat het voorspelbaarder en makkelijker op te anticiperen is.

Minder hoge pieken in druk

In een persleiding waar meerdere gemalen op staan aangesloten kan de druk erg variëren. Bij een hogere wrijvingsweerstand is immers ene hogere persdruk nodig om het water te transporteren. Wanneer het pompen van de gemalen zoveel mogelijk wordt uitgesmeerd over de tijd zullen er in DWA minder vaak meerdere gemalen tegelijkertijd aan staan. Dit resulteert in minder pieken in de wrijvingsweerstand en dus minder pieken in de druk. Een (te) hoge druk in een persleiding kan de persleiding beschadigen. Minder extreme pieken in de optredende drukken is dus een bijkomend voordeel.

Meer inschakelingen/ kortere looptijden

De bedachte alternatieve regelingen zijn er op uit om alvast wat water weg te pompen wanneer de persleiding licht of niet belast is of om het gemaal uit te zetten wanneer er hoge druk heerst. In beide gevallen resulteert dit er in dat de gemalen vaker in en uit worden geschakeld en, wanneer ze aan staan, voor een kortere periode in bedrijf zijn.

Een gemaal heeft in het begin van de pompcyclus een hoger energieverbruik omdat de pomp moet opstarten en het water in de persleiding in beweging moet worden gebracht. Teveel inschakelingen kan er dus voor zorgen dat er juist meer energie wordt verbruikt. Door de druk waarbij het gemaal uit gaat, het niveau van het verlaagd inslagpeil of het uitschakel level te variëren kan het aantal inschakelingen beïnvloed worden. Door bijvoorbeeld de druk waarbij het gemaal uit gaat te verhogen zal het gemaal minder vaak uit gaan wat voor minder frequente opstartenergie zorgt. Daarentegen zal het gemaal wel vaker tegen hogere drukken in pompen waardoor minder energie wordt bespaart. Voor het optimale resultaat zal er een optimum moeten worden gevonden tussen het aantal inschakelingen en de energiebesparing door het voorkomen van samenloop.

Slijtage

Het vaker in- en uitschakelen van een pomp kan er voor zorgen dat slijtage sneller optreedt.

Bezinking

In paragraaf 3.1 is gesteld dat er een eis is aan de stroomsnelheid van het afvalwater. In het afvalwater zitten vuildeeltjes die kunnen bezinken en daarmee het systeem kunnen laten verstopen. Om een zelfreinigend vermogen te hebben is gesteld dat de minimale stroomsnelheid door de persleiding 0.5 m/s is.

Wanneer er samenloop optreedt is het debiet door de leiding hoger omdat meer gemalen hun afvalwater wegpompen. Aangezien de doorsnede van de persleiding niet verandert is logischerwijs de stroomsnelheid door de persleiding ook hoger. Doordat het streven in de alternatieve pompregimes is om samenloop te reduceren zullen er ook minder hoge stroomsnelheden voor komen waardoor de persleiding minder wordt “schoongespoeld”. Wanneer er echter aan de eis wordt voldaan dat er minimaal een stroomsnelheid van 0.5 m/s geldt in het systeem zal er in theorie geen probleem ten toedoen van bezinking optreden.

Subconclusie

Het automatiseringssysteem is niet centraal aangestuurd. Dit is op dit moment ook niet mogelijk omdat de gezamenlijke gegevens van alle gemalen niet real time in WinCCOA (of op een andere locatie) aanwezig zijn. Omdat de gemalen lokaal worden aangestuurd, en niet beschikken over de status van de andere gemalen, kan er geen pompregime worden gemaakt voor een gehele rioleringsstreng. Wel zijn er bij een gemaal lokaal meetgegevens die kunnen onderscheiden of het systeem licht of juist zwaar wordt belast. Aan de hand van deze indicatoren kan voor een gemaal een aangepaste regeling worden ontworpen die de gunstige momenten om te pompen identificeert of juist de pomp uit zet op momenten van samenloop.

De effecten van deze regelingen zijn in dit onderzoek niet onderzocht maar kunnen wel worden voorspeld. De mate van de effecten zullen, onder andere afhankelijk van de factoren beschreven in paragraaf 2.1, verschillen per gemaal en per streng. Om exact in kaart te brengen wat de effecten van deze regimes zijn zullen ze geëxperimenteerd moeten worden.

5 Discussie

Tijdens het uitvoeren van dit onderzoek is tegen enkele noemenswaardige vindingen aangelopen die in dit hoofdstuk worden besproken.

kWh meting

Bij een gemaal worden een aantal gegevens gemeten om bij te houden in welke staat het gemaal verkeerd. Denk hierbij aan metingen van het debiet, het (water)niveau, de stroomsterkte, de persdruk en de stroomfrequentie. Deze gegevens zijn vooral van belang bij het bepalen of er storingen of alarmen zijn. Met deze gegevens kan echter nog relatief weinig worden gezegd over het hydraulisch functioneren van het systeem. “Simpel kijken naar debiet of putstand is niet voldoende” (Kooij & Pothof, 2013). Om beter geïnformeerd te zijn over het presteren van de rioolgemalen zijn er prestatie-indicatoren (PI's) of kritische prestatie-indicatoren (KPI's). Eén van deze PI's is het zogenoemde specifieke energieverbruik. Met het specifieke energieverbruik wordt de hoeveelheid energie verstaan benodigd om een kuub water te verpompen in kWh/m³. Wanneer het energieverbruik en het volume worden gedeeld door 1 uur wordt dezelfde PI verkregen maar dan in vermogen (P) en debiet (Q) (Kooij & Pothof, 2013).

Opvallend is dat het vermogen van een pomp niet één van de meetgegevens is in WinCCOA. Meestal zou het opgenomen vermogen te herleiden vallen uit de ampèremeting en het voltage maar doordat de frequentie van de stroom wordt omgevormd door de frequentieomvormer staat de stroomspanning niet vast. Het vermogen van een pomp wordt daarentegen wel lokaal gemeten (bij nieuwe frequentieomvormers) en om dit in WinCCOA te krijgen is “een extra aansluiting nodig in de besturingskasten, samen met een aanpassing in de software” aldus elektrotechnicus Ike Buijs.

Centraal aangestuurd

In de paragraaf 4.2 is besproken hoe het rioleringsstelsel wordt aangestuurd. Hier werd geconcludeerd dat het systeem niet centraal maar lokaal is aangestuurd. Vervolgens zijn er alternatieve pompregimes bedacht die doorgaan op deze lokale regeling. Ondanks dat er al een onderzoek is uitgevoerd bij waterschap Scheldestromen die aantoont dat de door hen ontworpen regeling een energiebesparing van 7 procent op jaarbasis kan betekenen. Dit rijst de vraag: “waarom geen centrale regeling implementeren bij HHNK?”.

Deze vraag kan vrij snel worden beantwoord. Waterschap Scheldestromen heeft 156 rioolgemalen in het systeem terwijl HHNK er 286 heeft⁽¹⁾ (Scheldestromen, Kengetallen waterschap, sd) (HHNK, HHNK in cijfers, 2017). Omdat HHNK twee maal zoveel gemalen heeft kan WinCCOA het niet aan om constant real time alle gegevens van de gemalen bij te houden aldus technisch adviseur Ruud van Langen.

Aandeel Pompenergie

In dit onderzoek staat samenloop centraal. Er is onderzocht welke factoren meespelen, wat voor effect het heeft en hoe dit mogelijk te voorkomen valt. Dit is volledig gefocust op het optreden en de karakteristieken van dit onderwerp. Om het in perspectief te brengen wordt ook gekeken naar het aandeel kWh dat wordt gebruikt voor het verpompen van afvalwater ten opzicht van het zuiveren ervan.

In Bijlage B.4 zijn de kWh meetgegevens van zuiveringskring Den Helder gegeven verkregen uit het dataprogramma 'Z-info' in de periode van 01/07/2018 – 01/06/2019. Hieruit blijkt dat de rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder 282.552 kWh hebben verbruikt over het afgelopen jaar. Echter, een deel van deze gemalen is parallel geschakeld en komt uit op 151.881 kWh. Bij de RWZI Den Helder werd in dezelfde periode 1.152.116 kWh verbruikt. Het aandeel van de parallel geschakelde rioolgemalen bedraagt dan 11.6% van het gehele stroomverbruik voor het zuiveren van het afvalwater.

In het geval dat er op jaarbasis, net als bij Scheldestromen, 7% kan worden bespaart, betekent dit een totale energiebesparing van 10.578 kWh in zuiveringskring Den Helder. Dit komt neer op €1058 en bedraagt 0.73% van de totale kosten om het afvalwater te zuiveren bij zuiveringskring Den Helder (Bijlage B.4).

Ook al is het energetisch interessant om 7% energie te besparen op de pompenergie, is het de vraag HHNK er financieel ook belang bij heeft om voor een 0.7% van het totale energieverbruik het systeem te veranderen.

Deze berekening is echter een schatting en gebaseerd op aannames. Zoals al besproken is elk gemaal, elke tak, elke streng en elke zuiveringskring anders. Denk hierbij aan onder ander het oppervlakte van het zuiveringsgebied. Wanneer een zuiveringskring erg uitgestrekt is moet het afvalwater over grotere afstanden worden getransporteerd. Bij een uitgestrekt gebied zal het aandeel energie van de gemalen, ten opzichte van de energie om het afvalwater te zuiveren, groter zijn. Daarnaast speelt de complexiteit van het rioleringsnetwerk ook een rol. Hoe meer gemalen parallel geschakeld zijn, hoe groter het effect van samenloop in het systeem.

(1) Telling van gemalen van HHNK komt uit 2017. HHNK neemt regelmatig gemalen over van de gemeente aldus Hijco van der Wal. Op dit moment zal het aantal gemalen in beheersgebied van HHNK eerder 300+ zijn

6 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal in de eerste paragraaf een conclusie worden gegeven van het onderzoek waarna in de tweede paragraaf een aanbeveling wordt gedaan voor zowel een vervolgonderzoek als voor HHNK zelf.

6.1 Conclusie

In dit onderzoek staat het gelijktijdig pompen van parallel geschakelde gemalen (ook wel samenloop genoemd) centraal. Hierbij is gekeken naar welke factoren meespelen in het optreden van samenloop en wat de invloed van samenloop is op het energieverbruik van de rioolgemalen. Daarnaast zijn twee alternatieve regelingen besproken waarvan verwacht wordt dat deze samenloop, en dus energieverbruik van de rioolgemalen, beperken.

In dit onderzoek werden twee hoofdvragen gesteld:

- *Wat is de impact van samenloop op het energieverbruik van een parallel geschakeld rioolgemalensysteem?*
- *Hoe kan het pompregime van de rioolgemalen worden aangepast zodat het energieverbruik wordt beperkt bij het wegpompen van afvalwater?*

De impact van samenloop is ontbonden in de frequentie van optreden enerzijds en de invloed wanneer het optreedt anderzijds. Zowel voor de frequentie van optreden als voor het optredende effect zijn er factoren die meespelen. Deze factoren kunnen die bij elk gemaal of elke streng verschillen. Hierdoor zijn er voor beide onderwerpen geen concrete algemene antwoorden te geven. Wel kunnen de factoren worden omschreven zodat hier rekening mee kan worden gehouden in de bepaling of samenloop een groot effect heeft in een streng.

Er zijn drie factoren beschreven die de frequentie van samenloop beïnvloeden; de bedrijfstijdverdeling, de draaiuren van de parallel geschakelde gemalen en het aantal gemalen op een streng. De bedrijfstijdverdeling is de meest identieke factoren tussen de gemalen omdat voor de gemalen hetzelfde dag patroon optreedt. Het aantal draaiuren van de parallel geschakelde gemalen en de complexiteit van de streng is overal verschillend. Om deze reden zal een rioleringstak op zichzelf moeten worden onderzocht op het optreden van samenloop en valt er niet een algemene uitspraak te doen die geldt voor alle strengen.

Om het effect van samenloop te kwantificeren is een experiment uitgevoerd bij twee parallel geschakelde gemalen. Hierbij is gevonden dat in geval van samenloop deze gemalen rond de 20% meer energie verbruiken dan wanneer deze in enkelloop draaien. Echter, het effect van samenloop is ook afhankelijk van factoren. Denk hierbij aan het achterliggende gemeentelijke stelsel. Indien het gemeentelijke stelsel een gescheiden stelsel is wordt de persleiding op droogweerafvoer (DWA) ontworpen en lopen de drukken in DWA hoger op. Wel zijn er indicatoren bij de gemalen waar uit valt af te leiden of samenloop een grote invloed heeft. Wanneer er een drukmeter is geïnstalleerd kan bij een gemaal worden afgelezen of de druk fluctueert. Samenloop zorgt namelijk voor een verhoogde wrijvingsweerstand in de persleiding en dus is er een hogere initiële druk nodig van de pomp om het afvalwater te transporteren. Een fluctuerende druk duidt dus op samenloop en hoe groter de drukverschillen, hoe groter de impact van samenloop op het energieverbruik. Ook kan de debietmeting of de stroomfrequentie van een gemaal op dezelfde manier worden geanalyseerd.

Om energie te besparen door samenloop van gemalen te beperken is gekeken naar alternatieve pompregimes. Doordat de meetgegevens van de gemalen niet real time worden verzameld kan er geen automatiseringsprofiel worden gemaakt die een streng in zijn geheel evalueert. Wel kan er lokaal bij een gemaal worden bepaald of het gunstig of ongunstig is om te pompen zodat daar op gereageerd kan worden. Hieruit zijn twee visies te halen; pompen wanneer de persleiding licht tot niet belast is of stoppen met pompen wanneer er samenloop optreedt. Voor beide visies is een alternatief pompregime bedacht die lokaal de staat van de persleiding evalueert en deze evaluatie meeneemt in de bepaling of een gemaal in werking moet of juist niet. De effecten van deze pompregimes zullen, mede afhankelijk van de hiervoor benoemde factoren, per gemaal verschillen.

Als laatste is, deels gebaseerd op meetgegevens en deels op aannames, gekeken naar de potentiële energiebesparing. Hieruit blijkt dat de pompenergie slechts een deel is van de totale benodigde energie om afvalwater te zuiveren. Daarnaast zijn niet alle pompen parallel geschakeld en fluctueert de druk ook niet bij alle pompen evenveel. Ook al is het energetisch interessant om te onderzoeken hoeveel energie er bespaart kan worden door het pompregime aan te passen is het de vraag of het fiscaal ook gunstig is.

6.2 Aanbevelingen

In dit onderzoek is al een experiment uitgevoerd waaruit blijkt dat samenloop een grote impact kan hebben op het energieverbruik van een pomp wanneer samenloop optreedt. Het effect is echter niet overal gelijk omdat zowel het optreden van samenloop als het effect wanneer samenloop optreedt van een aantal factoren afhankelijk is die per gemaal en per streng verschillen.

Er is beschreven hoe voor een gemaal geïdentificeerd kan worden of samenloop vaak optreedt. Dit valt voornamelijk af te leiden aan de complexiteit van de streng en de draaiuren van de berokken gemalen. Ook zijn er indicatoren waar uit valt af te leiden of samenloop een grote invloed heeft. Zo kan er, afhankelijk van de mate van fluctuerende druk, worden bepaald of samenloop een grote impact heeft op het opgenomen vermogen van een pomp. Daarnaast zijn er twee regelingen bedacht die naast de huidige regeling geïmplementeerd kunnen worden om samenloop te beperken. Het advies is daarom om op basis van de beschreven factoren en indicatoren een streng te zoeken waar veel potentiële besparing in zit en bij een gemaal op deze streng één van (of beide) alternatieve regelingen te implementeren. Op basis van de resultaten van dit experiment kan dan worden bepaald of het lonend is om deze regelingen bij meerdere gemalen te implementeren.

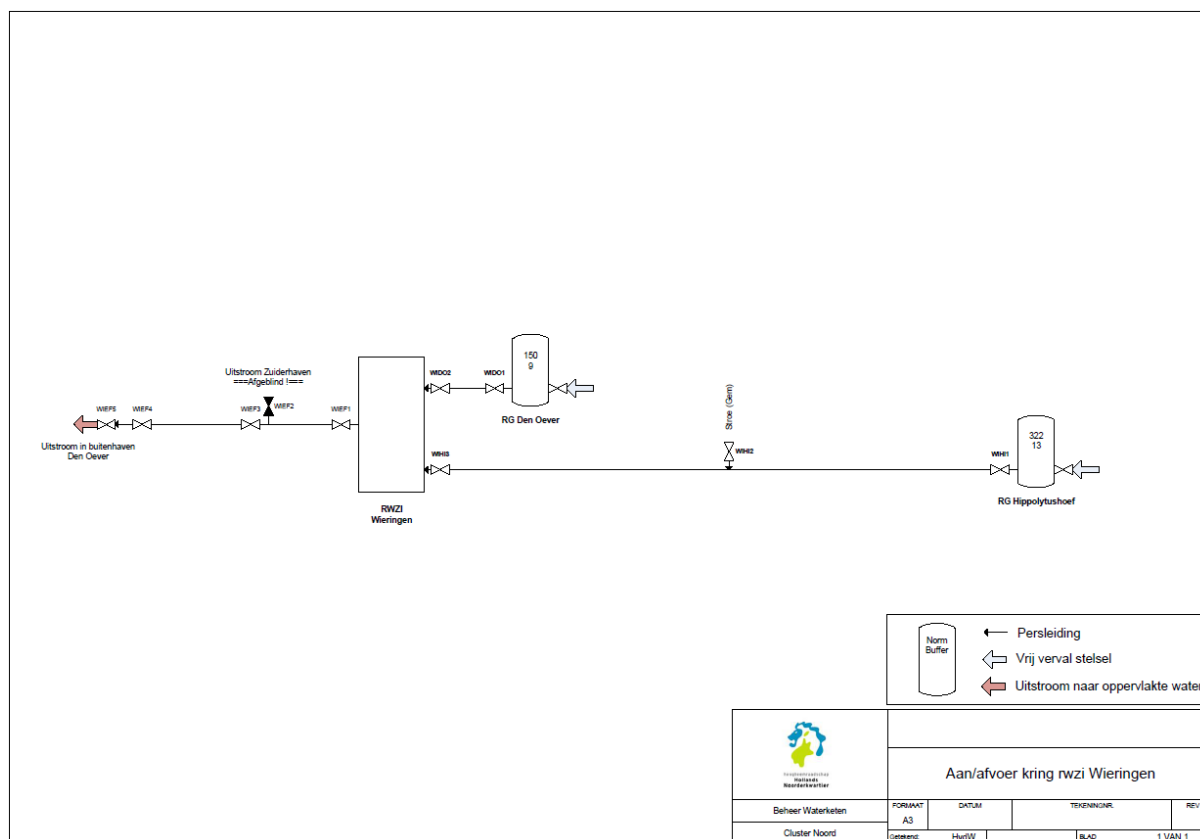
Zoals kort genoemd wordt in WinCCOA niet het opgenomen vermogen in kW gemeten. Het opgenomen vermogen valt ook niet te herleiden omdat het voltage niet constant is en ook niet wordt gemeten. Echter, het opgenomen vermogen is een belangrijke indicator als het gaat om duurzaamheid. Met dit gegeven kan bijvoorbeeld het specifiek energieverbruik (kW/m^3) worden bepaald welke kan worden gebruikt om de prestatie van een gemaal te evalueren. Ook kunnen alternatieve regelingen makkelijker ontworpen worden wanneer dit gegeven wel bekend is omdat dan de fluctuatie in energieverbruik direct kan worden gelezen in plaats van dat daar een indicator voor nodig is. Het advies is dus om het opgenomen vermogen bij de huidige meetgegevens te voegen en in WinCCOA in de trends op te nemen.

7 Bibliografie

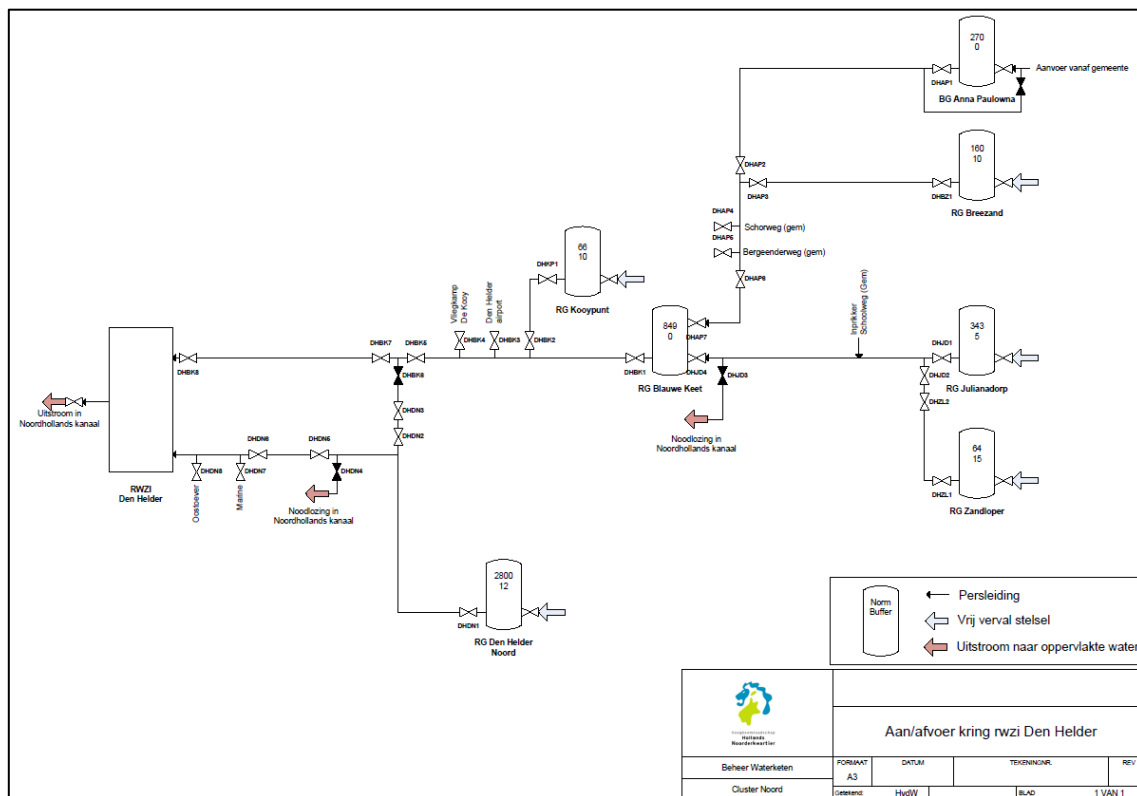
- Bortoni, E. d., Almeida, R. A., & Viana, A. N. (2008). Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Springer Science+Business Media*.
- Bos, R. (2019). Aantal draaiuren van een rioolgemaal. (S. Muurman, Interviewer)
- Buijs, I. (2019). Werking van electriciteit bij pompen. (S. Muurman, Interviewer)
- Cronenberg, R. v. (2019). Scope of the research. (S. Muurman, Interviewer)
- Engineering ToolBox*. (2004). Opgehaald van Pumps in parallel or Serial: https://www.engineeringtoolbox.com/pumps-parallel-serial-d_636.html
- Global Pumps*. (sd). Opgehaald van What is Pump Head and Shut-off Head?: <https://www.globalpumps.com.au/head>
- Hardeburg, M. (sd). Statistics chapter 4 - Probability and counting rules. In M. Hardeburg. Grove city area school district.
- HHNK. (2017). *HHNK in cijfers*. Opgehaald van https://www.hhnk.nl/portaal/hhnk-in-cijfers_41229/
- HHNK. (sd). *Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier*.
- Kooij, K., & Pothof, I. (2013). *Prestatie-indicatoren voor afvalwaterpersleidingssystemen*. Opgehaald van <https://docplayer.nl/923969-Prestatie-indicatoren-voor-afvalwaterpersleidingssystemen.html>
- Petiet, R. (2019). Werking van het automatiseringsprofiel. (S. Muurman, Interviewer)
- Rioned. (sd). *(Verbeterd) Gescheiden riool*. Opgehaald van <https://www.riool.info/-/verbeterd-gescheiden-riool>
- Rioned. (sd). *Riolering en water*. Opgehaald van Rioned: <https://www.riool.info/riolering-en-water>
- Ruuskanen, A. (2007). *Optimization of energy consumption in wastewater pumping*. Helsinki.
- Scheldestromen, W. (2015). DWA-Regeling rioolgemalen. *Tussenrapportage I-48 optimaliseren DWA-Regeling rioolgemalen*. Waterschap scheldestromen.
- Scheldestromen, W. (sd). *Kengetallen waterschap*. Opgehaald van <https://scheldestromen.nl/kengetallen-waterschap>
- Tukker, M., & Kooij, K. (2010). *Bijlagen*. Opgehaald van Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwaterpersleidingen: <http://waterenenergie.stowa.nl/Upload/Bijlagen%20CAPWAT%20Handboek%20Juni2010.pdf>
- Tukker, M., & Kooij, K. (2010). *CAPWAT Handboek*. Opgehaald van Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwaterpersleidingen: <http://m.stowa.nl/Upload/agenda/CAPWAT%20Handboek%20Juni2010.pdf>
- Viholainen, J., Tamminen, J., Ahonen, T., Ahola, J., Vakkilainen, E., & Soukka, R. (2012). Energy-efficient control strategy for variable speed-driven parallel pumping systems. Dordrecht: Springer Science+Business Media.
- Wal, H. v. (2019). Capaciteit Gemeentelijke inrikker. (S. Muurman, Interviewer)
- Worldstandards*. (2019). Opgehaald van <https://www.worldstandards.eu/nl/elektriciteit/landenoverzicht-stekkers-voltage/>

8 Bijlages

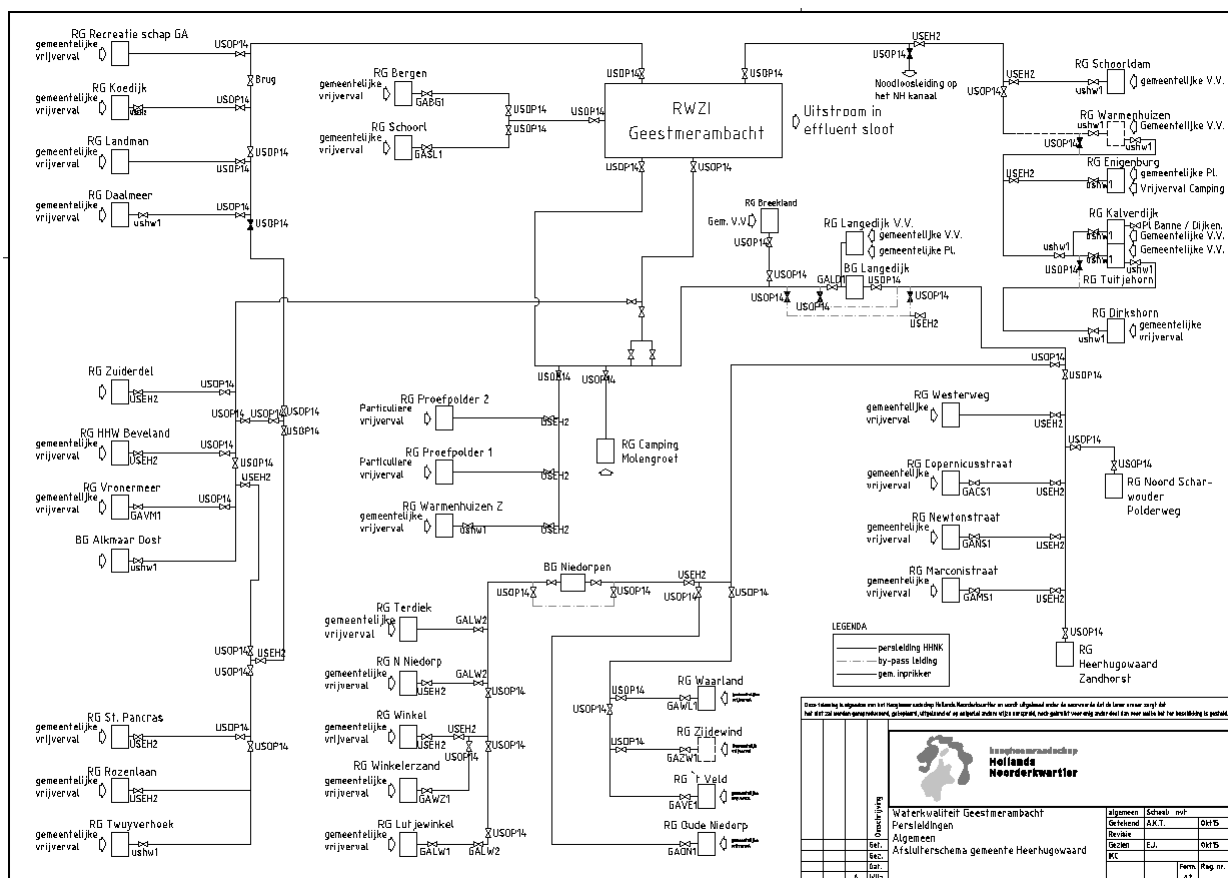
8.1 Bijlage A.1



Figuur 8.1: Rioleringsstelsel zuiveringskring Wieringen (Bron: HHNK)



Figuur 8.2: Rioleringsstelsel zuiveringskring Den Helder (Bron: HHNK)



Figuur 8.3: Rioleringsstelsel zuiveringskring Geestmerambacht (Bron: HHNK)

8.2 Bijlage B.1

In deze bijlage zal worden toegelicht hoe de gegevens van Tabel 2.1 tot stand zijn gekomen.

Allereerst is het van belang om te melden dat het gaat om de kansen dat gemalen tegelijk aan staan. Deze gebeurtenissen zijn 'inclusive' of 'not-exclusive' wat betekent dat de gebeurtenis dat een gemaal aan staat niet uitsluit dat een ander gemaal ook aan kan staan. Dit is het tegenovergestelde van 'exclusive' wat bijvoorbeeld de kans beschrijft van het opgooien van een muntje. Het is óf kop óf munt. Bij de gemalen kan in een enkele meting dus meerdere gebeurtenissen plaatsvinden.

Voor 'not-exclusive events' A en B geldt dat minimaal één van de twee evenementen optreedt de volgende formule (Hardeburg):

$$P(A \text{ of } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ en } B)$$

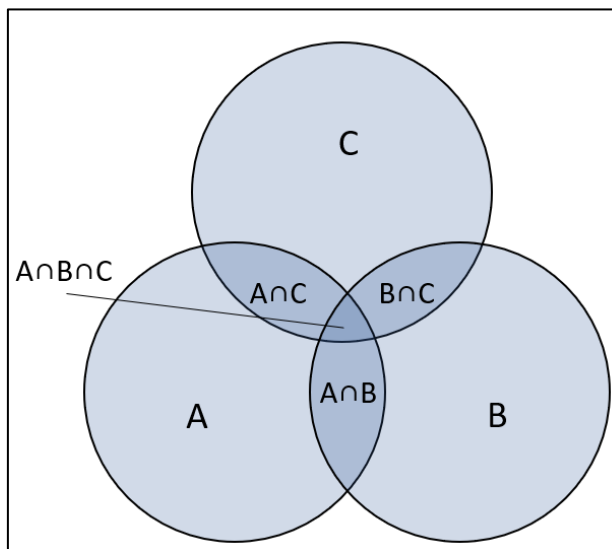
$$P(A \text{ en } B) = P(A) * P(B)$$

In het geval dat de betrokken gemalen standaard 40 uur per week draaien en wordt aangenomen dat er 18 bedrijfsuren zijn per dag, is de kans op A en de kans op B beide $40/(7*18) = 0.317$.

Dit betekent dat wanneer twee gemalen parallel geschakeld zijn de kans dat er minimaal één van de twee aan staat gelijk is aan: $0.317 + 0.317 - 0.317 * 0.317 = 0.534 \dots = 53.4\%$

De kans dat A en B tegelijk gebeuren is dan gelijk aan $0.317 * 0.317 = 0.100 \dots = 10\%$

Het aandeel van de tijd dat er minimaal twee gemalen aan staan ten opzichte van de tijd dat er in ieder geval één gemaal aan staat is dan $\frac{P(A \text{ en } B)}{P(A \text{ of } B)} = \frac{0.100\dots}{0.534\dots} = 0.189 = 18.9\%$



Figuur 8.4: Kansen op gelijktijdigheid in systeem met drie parallel geschakelde gemalen

In een systeem met 3 gemalen wordt het ingewikkelder. Om het totale oppervlakte van A, B en C te bepalen is de zelf beredeneerde formule gebruikt afgeleid uit Figuur 8.4. Dit representeert de kans dat minimaal één gemaal in werking is.

$$P(A \text{ of } B \text{ of } C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \text{ en } B) - P(A \text{ en } C) - P(B \text{ en } C) + P(A \text{ en } B \text{ en } C)$$

$$P(A \text{ of } B \text{ of } C) = 0.317 * 3 - 0.317 * 0.317 * 3 + 0.317 * 0.317 * 0.317 = 0.682 \dots = 68.2\%$$

De kans dat minimaal twee gemalen in werking zijn is gelijk aan:

$$P(A \text{ en } B \text{ of } A \text{ en } C \text{ of } B \text{ en } C) = P(A \text{ en } B) + P(A \text{ en } C) + P(B \text{ en } C) - 2 * P(A \text{ en } B \text{ en } C)$$

$$P(A \text{ en } B \text{ of } A \text{ en } C \text{ of } B \text{ en } C) = 0.317 * 0.317 * 3 - 0.317 * 0.317 * 0.317 * 2 = 0.238 \dots = 23.8\%$$

$$\frac{P(A \text{ en } B \text{ of } A \text{ en } C \text{ of } B \text{ en } C)}{P(A \text{ of } B \text{ of } C)} = \frac{0.238 \dots}{0.682 \dots} = 0.349 \dots = 34.9\%$$

Voor een scenario met 4 gemalen wordt de berekening erg complex, daarom is in Matlab een script geschreven om deze kansen te berekenen voor de configuraties met vier tot en met zeven parallel geschakelde gemalen en kunnen de handberekende scenario's gebruikt worden om het script te valideren. Het Matlab script is gegeven in Figuur 8.6. De output van dit model is weergegeven in Figuur 8.5. De eerste waarden zijn 0 omdat het scenario met maar één gemaal niet gesimuleerd wordt. De waardes in kolom twee en drie komen overeen met de berekende waardes waardoor wordt aangenomen dat het script valide is. Vervolgens representeert kolom 4 van Figuur 8.5 de waardes in rij 3 van Tabel 2.1 en kolom 5 van Figuur 8.5 de waardes in rij 4 van Tabel 2.1 et cetera.

vec_aan =						
0	0.5341	0.6820	0.7831	0.8518	0.8989	0.9310
vec_perc =						
0	0.1887	0.3495	0.4844	0.5956	0.6861	0.7586

Figuur 8.5: Output Matlab model 'Kansen'

```

%% kans op samenloop
clear all, clc
format compact
gemalen = 7;           % tot en met 7 parallel geschakelde gemalen
draaiuren = 40;        % aantal draaiuren per week. Voor alle gemalen
identiek
weekuren = 126;        % aantal bedrijfsuren per week om trend na te
bootsen
fractie = draaiuren/weekuren; % kans dat een gemaal op een
tijdstip aan staat

vec_aan = zeros(1,gemalen); %vector om minimaal 1 gemaal aan
metingen op te slaan
vec_perc = zeros(1,gemalen); %vector om minimaal 2 gemalen aan
metingen op te slaan
for y = 2:gemalen           % van een systeem met 2 parallel
geschakelde gemalen tot en met ingestelde maximum
    aan = 0;                % teller per systeem voor minimaal 1 gemaal
in bedrijf
    samenloop = 0;          % teller per systeem voor minimaal 2
gemalen in bedrijf

    for i = 1:100000000 % per systeem 100 miljoen metingen
        vec = zeros(1,gemalen); %lege vector aanmaken die elke meting
bijhoudt welke gemalen in bedrijf zijn (binair)
        for x = 1:y % alle gemalen in het systeem langs lopen op de
tijdstap
            r = rand(1); %een onafhankelijke random waarde geven
            vec(x) = r<fractie; %is random waarde kleiner dan kans dat
gemaal in bedrijf is wordt opgeslagen dat deze in bedrijf is
        end
        if sum(vec) > 0 % als minimaal 1 gemaal in bedrijf in meting
            aan = aan +1; % teller omhoog
            if sum(vec)>1 %% als minimaal 2 gemalen in bedrijf in
meting
                samenloop = samenloop +1; % teller omhoog
            end
        end
    end
    vec_aan(y) = aan/i % alle metingen voor een systeem gedaan
percentage minimaal 1 gemaal aan
    vec_perc(y) = samenloop/aan % minimaal 2 gemalen aan / minimaal
1 gemaal aan
end

```

Figuur 8.6: Matlab Script "Kans op samenloop"

8.3 Bijlage B.2

In deze bijlage zal worden toegelicht hoe tot de conclusie is gekomen dat de gemalen betrokken bij het experiment nog naar wens werken.

Voor een gemaal wordt met de gemeente afgesproken wat de afname capaciteit moet zijn. Dit houdt in hoeveel afvalwater het gemaal moet kunnen verpompen om ervoor te zorgen dat het gemeentelijke stelsel niet overstroomt. Dit afgesproken debiet hoeft alleen behaald te worden als er sprake is van RWA en het waterlevel in de kelder van het gemaal "Hoogwater" heeft bereikt.

Om bij te houden of een gemaal nog aan deze ontwerpeis voldoet wordt het aantal uur bijgehouden dat het gemaal wél dit debiet moet verpompen maar onder deze norm presteert. Dit overzicht is voor de gemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder vanaf 01/01/2019 tot en met 29/05/2019 (figuur geeft aan 31/12/2019 maar overzicht is op 29 mei opgevraagd) weergegeven in Figuur 8.7. hieruit valt af te leiden dat Zandloper in deze periode niet onder de norm heeft gepresteerd en dat Julianadorp slechts 0.2 uur onder de norm presteert. Aangezien beide gemalen in vijf maanden tijd minimaal onder de norm hebben gepresteerd kan ervan uit worden gegaan dat de gemalen naar wens presteren.

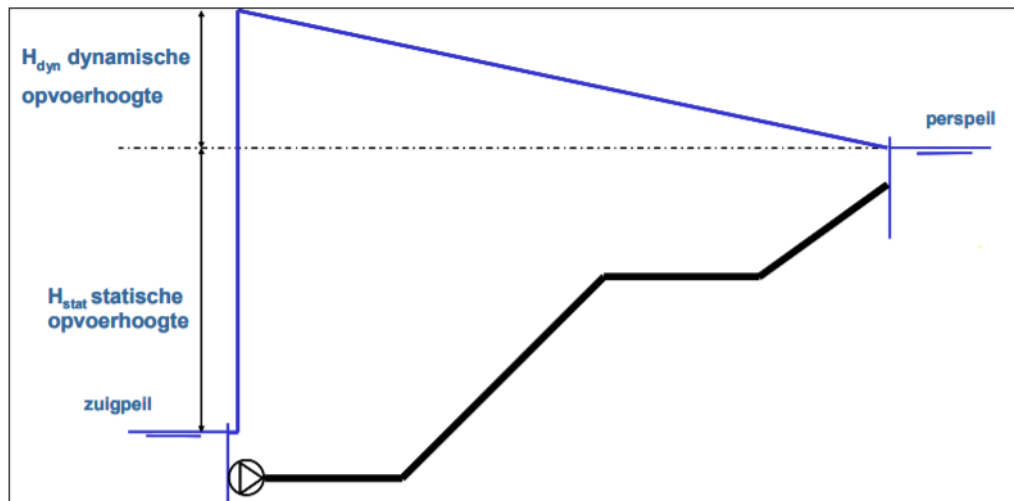
Jaarrapportage		Kring DenHelder		Kies jaar:	
Periode:	01-01-2019	-	31-12-2019		
Rioolgemaal	FTT5 Debiet [m³]	LT1 Hoogwater [uur]	Aantal HW [x]	RG1 Niet inzetb. [uur]	Onder normaal [uur]
Anna_Paulowna	241252			4.5	0.0
Blauwe_keet	813776	0.4	7	0.0	0.0
Breezand	144799	0.0	0	6.8	12.7
Den_Helder_Noord	1666774	0.0	0	4.2	7.3
Julianadorp	369932	0.0	0	5.8	0.2
Kooypunt	18848	0.0	0	5.7	0.0
Zandloper	45591	0.0	0	7.5	0.0

Figuur 8.7: Aantal uur dat De Zandloper en Julianadorp onder de normaafvoer presteren vanaf 01/01/2019 tot en met 29/05/2019 (Bron: HHNK)

8.4 Bijlage B.3

In deze bijlage zal worden toegelicht hoe de statische opvoerhoogte van een pompsysteem kan veranderen door het waterpeil in de kelder van het gemaal waar een persleiding op aansluit.

De statische opvoerhoogte is het verschil in hoogte tussen het waterpeil in de kelder waar het afvalwater uit gepompt wordt en het waterpeil waar het water naar toe gepompt wordt (zie Figuur 8.8).

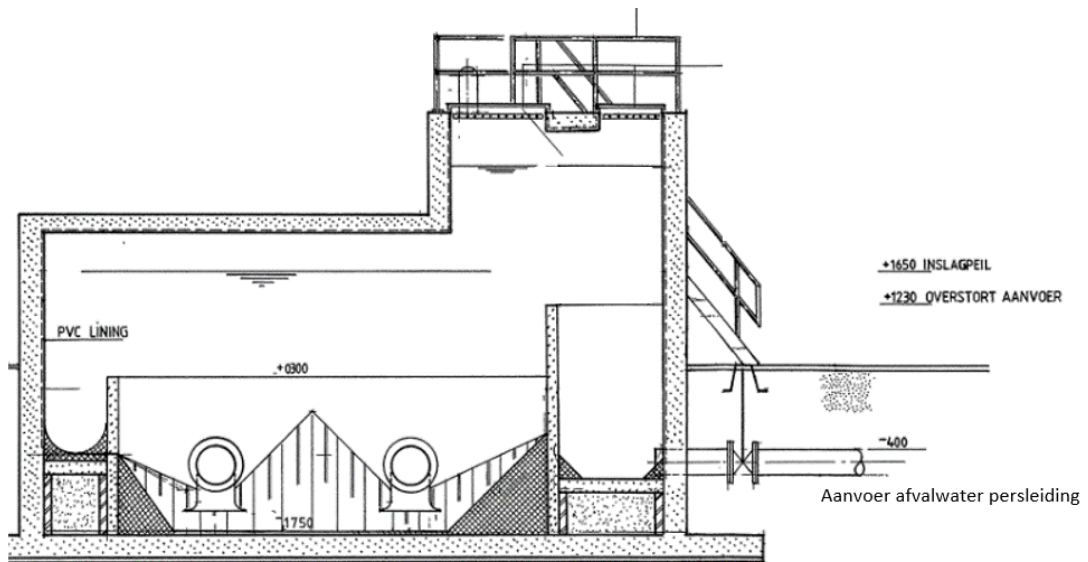


Figuur 8.8: Definitie van zuigpeil, perspeil, statische opvoerhoogte en dynamische opvoerhoogte (Bron: (Tukker & Kooij, CAPWAT Handboek, 2010))

Wanneer het waterpeil in een van de twee kelders verandert, verandert ook de statische opvoerhoogte wat deels de weerstand representeert (*Vergelijking 2*). Het doel van de pomp is om het afvalwater uit zijn eigen kelder te pompen waardoor er weinig kan worden gedaan aan het fluctuerende zuigpeil.

Om ervoor te zorgen dat er altijd water in de persleiding blijft is er een overstort geïnstalleerd. Het afvalwater uit de persleiding komt dan in een apart compartiment in de kelder van het volgende gemaal. Wanneer een pomp die op de persleiding aansluit in werking treedt zal het afvalwater over de rand van dit compartiment lopen en op deze manier de kelder vullen. Hoe deze situatie is in de kelder van Blauwe Keet, waar de persleiding op uit komt die in connectie staat met de Zandloper en Julianadorp, is weergegeven in Figuur 8.9.

Hier komt aan de rechterkant de persleiding uit in een apart compartiment in de kelder. Dit compartiment zal zich vullen en vervolgens altijd vol staan omdat de pompen van Blauwe Keet dit compartiment niet leegpompen. Dit compartiment zorgt ervoor dat het perspeil altijd minimaal op +1,23 mNAP staat. Ook valt er uit Figuur 8.9 op te maken dat het inslagpeil op +1,65 mNAP is ingesteld (en in werkelijkheid in WinCCOA op +1,850 mNAP). Hierdoor kan het perspeil oplopen wanneer het waterlevel in de kelder boven de overstort aanvoer rand komt. Wanneer het perspeil oploopt zal ook de statische opvoerhoogte groter worden aangezien het hoogteverschil toeneemt.



Figuur 8.9: Vereenvoudigd zij aanzicht van de kelder van rioolgemaal Blauwe Keet (Bron: HHNK)

8.5 Bijlage B.4

In deze bijlage zal worden gekeken naar de energiegegevens van de gemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder in de periode van 01/07/2018 – 01/06/2019. Allereerst in volgende tabellen de meetgegevens van de kWh meters van de gemalen opgehaald uit Z-info (Bron: HHNK).

Tabel 8.1: kWh meetgegevens van rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder (deel 1)

Tijdstip vanaf	Anna Paulowna (kWh)	Blauwe Keet (kWh)	Breezand (kWh)	De Zandloper (kWh)
1-7-2018 00:00	502	3.398	1.752	1.455
1-8-2018 00:00	1.133	4.547	2.138	1.698
1-9-2018 00:00	544	3.469	2.195	1.053
1-10-2018 00:00	422	2.967	1.876	875
1-11-2018 00:00	340	2.838	1.629	448
1-12-2018 00:00	1.975	6.064	4.135	1.018
1-1-2019 00:00	687	4.115	2.460	570
1-2-2019 00:00	958	3.972	2.492	555
1-3-2019 00:00	2.336	6.839	4.122	1.100
1-4-2019 00:00	872	3.668	2.152	981
1-5-2019 00:00	844	3.779	2.551	734
1-6-2019 00:00	1.839	6.627	3.801	1.247
Totaal	12.452	52.283	31.303	11.734

Tabel 8.2: kWh meetgegevens van rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder (deel 2)

Tijdstip vanaf	Den Helder-Noord (kWh)	Julianadorp (kWh)	Kooypunt (kWh)	Totaal rioolgemalen
1-7-2018 00:00	7.785	3.089	197	18.178
1-8-2018 00:00	10.630	3.388	235	23.768
1-9-2018 00:00	8.000	3.113	197	18.571
1-10-2018 00:00	8.461	2.921	194	17.716
1-11-2018 00:00	8.742	2.867	230	17.094
1-12-2018 00:00	16.507	4.117	619	34.435
1-1-2019 00:00	10.933	3.351	331	22.448
1-2-2019 00:00	10.596	3.296	458	22.326
1-3-2019 00:00	17.136	4.480	410	36.422
1-4-2019 00:00	9.033	3.161	198	20.065
1-5-2019 00:00	8.190	3.114	168	19.380
1-6-2019 00:00	14.658	3.627	350	32.148
Totaal	130.671	40.524	3587	282.552

In Bijlage A.1 in Figuur 8.2 is het rioleringsstelsel van Den Helder schematisch weergegeven. Hieruit valt af te leiden dat alle gemalen, behalve 'Den Helder Noord', in paren parallel geschakeld zijn. Bij 'Den Helder Noord' valt er geen energie te besparen door samenloop te voorkomen omdat er in eerste instantie geen samenloop optreedt.

Wanneer Den Helder Noord niet wordt meegenomen in de berekening wordt er voor de parallel geschakelde gemalen uitgegaan van een totaal van 151.881 kWh (Tabel 7.3). In verhouding met het energieverbruik van de RWZI uit Tabel 7.3 is dit 11.6% van het totale energieverbruik benodigd om het afvalwater te zuiveren ($\frac{151.881}{151.881+1.152.116} * 100$).

Indien er van uit wordt gegaan dat er net als bij de real time control regeling van Scheldestromen op jaarbasis 7% aan energie kan worden bespaard voor de parallel geschakelde rioolgemalen betekent dit een winst van $151.118 * 0.07 = 10.578 \text{ kWh}$.

Een 10.578kWh besparing met een gemiddelde kosten per kWh van ongeveer €0,10 (zie Tabel 7.4 Bron: HHNK) levert €1058 op.

Een besparing van 10.578kWh is over het totale energieverbruik om afvalwater te zuiveren in zuiveringskring Den Helder een besparing van $\frac{10.578}{282.552+1.152.116} * 100 = 0.73\%$.

Tabel 8.3: kWh meetgegevens van de parallel geschakelde rioolgemalen behorend bij zuiveringskring Den Helder en RWZI Den Helder

Tijdstip vanaf	Totaal kWh rioolgemalen	Den Helder-Noord (kWh)	Totaal kWh parallel geschakelde rioolgemalen	Rwzi Den Helder Electra Hoofdmeter (kWh)
1-7-2018 00:00	18.178	7.785	10.393	135.420
1-8-2018 00:00	23.768	10.630	13.138	145.597
1-9-2018 00:00	18.571	8.000	10.571	100.201
1-10-2018 00:00	17.716	8.461	9.255	94.742
1-11-2018 00:00	17.094	8.742	8.352	110.510
1-12-2018 00:00	34.435	16.507	17.928	87.752
1-1-2019 00:00	22.448	10.933	11.515	102.702
1-2-2019 00:00	22.326	10.596	11.730	106.431
1-3-2019 00:00	36.422	17.136	19.286	89.112
1-4-2019 00:00	20.065	9.033	11.033	81.888
1-5-2019 00:00	19.380	8.190	11.190	68.840
1-6-2019 00:00	32.148	14.658	17.490	28.921
Totaal	282.552	130.671	151.881	1.152.116

Tabel 8.4: Energiekosten Rioolgemaal De Zandloper en Julianadorp over 2018

Tijdstip vanaf	De Zandloper Electra hoofdmeter (kWh)	Julianadorp Electra hoofdmeter (kWh)
1-1-2018 00:00	1.530	5.255
1-2-2018 00:00	589	3.063
1-3-2018 00:00	776	3.288
1-4-2018 00:00	1.166	3.951
1-5-2018 00:00	1.349	3.422
1-6-2018 00:00	1.037	2.996
1-7-2018 00:00	1.455	3.089
1-8-2018 00:00	1.698	3.388
1-9-2018 00:00	1.053	3.113
1-10-2018 00:00	875	2.921
1-11-2018 00:00	448	2.867
1-12-2018 00:00	1.018	4.117
Totaal 2018	12.994	41.470
€/kWh (all-in gem. hoog/laag tarief)	€ 0,0987	€ 0,1077
Totaal energiekosten	€ 1.282,47	€ 4.466,28