

Prestatie-indicatoren voor afvalwaterpersleidingssystemen



Prestatie-indicatoren voor afvalwaterpersleidingssystemen

Kees Kooij, Ivo Pothof

1203636-000

Titel
Prestatie-indicatoren voor afvalwaterpersleidingssystemen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Stowa	1203636-000	1203636-000-HYE-0018	30

Trefwoorden
Afvalwatertransport, leidinghydraulica, asset management, CAPWAT, energie-efficiency, operationeel beheer.

Samenvatting
De waterschappen hebben in 2008 het MJA3 convenant ondertekend (Meerjaren-Afspraak Energie-Efficiëntie) over een energie-efficiency verbetering van 2% per jaar. Bovendien streven de waterschappen permanent naar meer transparantie en efficiency in het operationeel beheer van het afvalwatertransport. Hiervoor is actueel inzicht in het functioneren van de rioalgemalen en transportleidingen onontbeerlijk. De huidige SCADA systemen bieden onvoldoende mogelijkheden om prestatie-indicatoren af te leiden uit reguliere meetdata, omdat enerzijds de juiste referentiedata ontbreken en anderzijds het filteren van de meetdata afgestemd moet worden op de dynamica in het specifieke systeem.

De prestatie-indicatoren, die geschikt zijn voor het operationeel beheer van persleidingen, worden in deze rapportage beschreven, alsmede het toepassingsbereik, de invloed van de log-frequentie en andere aandachtspunten.

Referenties
Stowa opdracht 433.131 CPS.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	jan. 2013	Kees Kooij		Ruud Lemmens		Daniel Rudolph	
		Ivo Pothof					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Meerjaren-Afspraak Energie-efficiency	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Structuur van rapport	2
2 Noodzaak prestatie indicator	3
3 Definities	5
4 Indeling Prestatie-indicatoren	7
4.1 Overzicht	7
4.2 Draaiuren per periode	9
4.3 Specifieke draaiuren	10
4.4 Capaciteit	10
4.5 Benodigd toerental bij ontwerpdebiet	11
4.6 Pomp- en gemaalkarakteristiek	11
4.7 Pomprendement	12
4.8 Weerstandsfactor, systeemkarakteristiek	12
4.9 Equivalente wandruwheid	14
4.10 Specifiek energieverbruik	15
5 Verwerking en interpretatie	17
5.1 Tijdschalen en filtering van meetdata	17
5.2 Systeem afhankelijkheden	19
5.2.1 Continue monitoring van vertakte systemen	19
5.2.2 Vereenvoudigde monitoring van vertakte systemen mbv centrale sturing	20
5.3 Wijze van verwerking	22
5.4 Externe factoren	22
Bijlage(n)	
A Keuze van performance indicator	A-1

1 Inleiding

1.1 Meerjaren-Afspraak Energie-efficiency

De waterschappen hebben in 2008 het MJA3 convenant ondertekend (Meerjaren-Afspraak Energie-Efficiëntie) over een energie-efficiency verbetering van 2% per jaar. Het energieverbruik voor rioolgemaal is echter stijgende vanwege de groeiende transportafstanden. Bij HHNK bijvoorbeeld wordt 32% van het totale energieverbruik verbruikt door de rioolgemaal (10%) en poldergemaal (22%). Tijdens het CAPWAT onderzoek is de luchtbelproblematiek geschat op een extra energieverlies van minimaal 19 miljoen kWh, oftewel 10000 ton CO₂ of het elektriciteitsverbruik van 5500 huishoudens. Uit een groot aantal veldmetingen is gebleken dat het energieverlies ten gevolge van luchtbelleten ongeveer 30% bedraagt. Een en ander betekent dat verbetering van de energie-efficiency van het afvalwatertransport een relevante bijdrage levert aan de realisatie van de MJA3 doelstellingen.

De energie-efficiency, de betrouwbaarheid en het functioneren van het afvalwatertransport kan op een aantal manieren verbeterd worden:

- 1 Toepassen van aanbevelingen uit het CAPWAT Handboek 'Hydraulisch ontwerp en beheer van afvalwaterpersleidingen'.
- 2 Monitoring van de energie-efficiency en prestatie van het rioolgemaal en de persleidingen
- 3 Energie-zuinige regelconcepten tijdens DWA.
- 4 Regelingen optimaliseren
- 5 Goede ontluchting van persleidingen
- 6 Rekenmodel luchttransport in WANDA

Onderwerp 1 wordt al breed opgepakt door de sector. De kennisdagen, die Deltares en Stowa hebben georganiseerd, hebben 120 deelnemers getrokken. Aan de mini-cursussen bij RIONED over ontwerp en beheer van persleidingen hebben in 2010 129 personen deelgenomen. Deelnemers waren steeds afkomstig uit de gehele sector (waterschap, gemeente, toeleverancier, ingenieursbureaus).

Onderwerpen 3 t/m 5 komen op een ander moment aan bod.

1.2 Doelstelling

De monitoring-behoefte van de waterschappen (onderwerp 2) is gericht op het handhaven van de hydraulische capaciteit van de persleidingen, verbetering van de energie-efficiency en het minimaliseren van het energieverbruik. Op basis van het gedrag tijdens DWA wil men kunnen vaststellen of de benodigde capaciteit nog gehaald kan worden tijdens RWA. Bovendien wordt de beheerder steeds vaker gevraagd om het energieverbruik te verbeteren of te monitoren. Omdat de persstelsels steeds groter worden, zijn geautomatiseerde analysetechnieken nodig om uit reguliere metingen prestatie-indicatoren te destilleren. Deze analysetechnieken zijn nog niet beschikbaar. De bestaande kengetallen uit de zuiveringsbenchmark zijn niet ontwikkeld voor het operationeel beheer en zijn onbruikbaar als prestatie-indicator voor het beheer van de afzonderlijke afvalwatertransportsystemen, omdat de bestaande kengetallen gebaseerd zijn op jaartotalen of jaargemiddelde cijfers.

De prestatie-indicatoren, die geschikt zijn voor het operationeel beheer van persleidingen, worden in deze rapportage beschreven, alsmede het toepassingsbereik, de invloed van de log-frequentie en andere aandachtspunten. Het streven is om deze rapportage voldoende compleet te maken zodat dat beheerders van afvalwatertransportsystemen (AWTS'en) en leveranciers van SCADA systemen de prestatie-indicatoren kunnen inbouwen in bestaande SCADA systemen, waarmee de regulier verzamelde meetdata vertaald wordt naar bruikbare informatie over de actuele prestatie van een AWTS. Daarnaast wordt het mogelijk eenduidige data analyses te gaan uitvoeren.

1.3 Structuur van rapport

Deze rapportage is als volgt opgebouwd. De noodzaak van prestatie-indicatoren is in hoofdstuk 1 al kort aangegeven, maar hoofdstuk 2 gaat dieper in op de noodzaak van verschillende prestatie-indicatoren en geeft aan hoe prestatie-indicatoren in de praktijk gebruikt kunnen worden. Hoofdstuk 3 bevat een overzicht van relevante definities om spraakverwarring te voorkomen. Hoofdstuk 4 bevat het overzicht van prestatie-indicatoren voor de verschillende onderdelen van een afvalwatertransportsysteem en voor het systeem als geheel. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van aandachtspunten voor de verwerking en het gebruik van prestatie-indicatoren.

In bijlage 1 is een uitwerking gegeven voor diverse prestatie-indicatoren aan de hand van een eenvoudig transportsysteem

2 Noodzaak prestatie indicator

Veel rioolgemaal en zijn tegenwoordig aangesloten op een monitoringssysteem, waarbij data gelogd worden en het gemaal op afstand bediend wordt. Gangbare benamingen voor dergelijke systemen zijn:

- BOA: Beheer Op Afstand
- RTC: Real-time Control

De primaire taak van deze systemen is die van storings- en alarmmelding. Geen storing of alarm betekent voor de beheerder een goed functionerend rioolgemaal. Dit zegt echter niets over het hydraulisch functioneren van het systeem.

Een AWTS wordt ontworpen om een bepaald debiet te transporteren met een bepaalde energie. In de loop van de tijd kan de werking van het systeem hiervan gaan afwijken. In een ideale situatie weet de beheerder deze afwijking tijdig op te merken en maatregelen te nemen. Echter de praktijk is anders. Het goed functioneren wordt veelal afgemeten aan de capaciteit of nog eenvoudiger "ik houd mijn put wel droog".

Gemaal uitgerust met een debietregeling zullen dit debiet altijd kunnen halen zolang het maximale pomptoeental niet overschreden wordt. Dat dit gepaard gaat met extra vermogen is nu nog niet waarneembaar. Kortom: simpel kijken naar debiet of putstand is niet voldoende. De beheerder is veelal onvoldoende geïnformeerd over de ontwerp prestaties van het rioolgemaal of transportsysteem.

Vandaar de behoefte om het begrip "prestatienorm" of "prestatie-indicator" (PI) te introduceren.

Er zijn verschillende PI's mogelijk. Enerzijds hangt dit af van welke meetdata betrokken wordt in de verwerking, anderzijds op welk onderdeel de PI betrekking heeft zoals het totale systeem, de persleiding of het rioolgemaal.

De PI geeft de capaciteitstoestand aan van het systeem of onderdeel van het systeem (rioolgemaal of persleiding). De frequentie waarmee de PI bepaald wordt is afhankelijk welke PI men registreert en hoe (automatisch of handmatig). Een trending in de tijd brengt verandering van deze toestand in beeld.

Via een periodieke rapportage (bijv trendlijnen) wordt de beheerder geïnformeerd over de toestand van het systeem.

Indien de PI een bepaalde grenswaarde onderschrijft wordt dit direct kenbaar gemaakt naar de beheerder. Hierbij valt te denken aan een indicator op het SCADA systeem. Plotselinge extreme verandering kunnen duiden op een calamiteit.

3 Definities

Allereerst worden de begrippen Monitoring en Prestatie-indicator gedefinieerd.

Monitoring: periodieke analyse van meetdata mbt het functioneren van (onderdelen van) het transportsysteem. De analyse kan handmatig of automatisch uitgevoerd worden.

Prestatie Indicator (of performance indicator) (**PI**): De Prestatie Indicator (PI) wordt in dit document gedefinieerd als een verhouding van twee kengetallen: het referentie-kengetal K_{ref} en het actuele kengetal K_{act} . Het actuele kengetal is gebaseerd op in de tijd verzamelde meetdata, waarmee de prestatie van een specifiek persleidingsysteem weergegeven wordt. Elke kengetal heeft een referentiewaarde, die bepaald is in het ontwerp met theoretische modellen of bij ingebruikstelling door middel van een referentiemeting (ook wel nulmeting genoemd). De prestatie indicator is een verhouding tussen de actuele waarde en de referentiewaarde. De verhouding wordt zodanig berekend dat verminderd functioneren tot een $PI < 100\%$ leidt.

Afnemend kental K_{act} bij slechtere prestatie:

$$PI = \frac{K_{act}}{K_{ref}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Toenemend kental K_{act} bij slechtere prestatie:

$$PI = \frac{K_{ref}}{K_{act}} \times 100\% \quad (3.2)$$

De capaciteit is bijvoorbeeld een kengetal dat afneemt bij mindere prestaties, waarvoor vergelijking (3.1) gebruikt wordt. Het aantal draaiuren en het energieverbruik zijn kengetallen die toenemen bij verminderde prestaties; dan is vergelijking (3.2) nodig.

Een kengetal moet in de tijd gemiddeld kunnen worden. De primaire functie van de PI is om de prestatie van het betreffende systeem te trenden in de tijd. Bij onder- of overschrijding van een bepaalde grenswaarde moet een actie in gang gezet worden om de prestatie weer op een beter niveau te krijgen.

Verskillende systemen met PI's gebaseerd op dezelfde kengetalverhouding kunnen onderling vergeleken worden en kan er een (gewogen) gemiddelde bepaald worden. Deze PI's kunnen per regio/gemeente/waterschap/beheerder vergeleken worden¹.

Elk systeem kan één of meerdere kengetallen hebben om de operationele doelen te karakteriseren. Voorbeelden van kengetallen zijn:

- draaiuren per periode (dag, week, maand, jaar) volgens verg. (3.2)
- Wandruwheid k-waarde volgens verg. (3.2)
- benodigd toerental voor ontwerpdebiet volgens verg. (3.2)
- specifiek energieverbruik (kWh/m^3 , gemiddeld over een dag/week/maand/jaar), volgens verg. (3.2)
- capaciteit volgens verg. (3.1) ,

¹ Indien binnen een organisatie overeenstemming bestaat over de referentiewaarden, dan kunnen afdelingen/regiobeheerders beloond worden voor verbetering van een PI ter stimulering van de betrokkenheid bij het functioneren van de transportsystemen.

4 Indeling Prestatie-indicatoren

4.1 Overzicht

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de diverse meetsignalen die voor kunnen komen bij monitoring van een rioolgemaal. De kolom "eenheid" is opgesplitst in de SI-eenheid (noodzakelijk bij verwerking) en in de praktijk gangbaar gebruikte eenheid.

Tabel 4.1 : Gangbare meetsignalen in rioolgemaal

Meetsignaal	Afkorting	Eenheid	
		SI	Praktijk
Pomp status (aan/uit)	S_p	-	-
Draaitijd per pomp	T_p	s	Uur
Debiet door leiding	Q	m^3/s	m^3/h
Verpompt volume door leiding	V	m^3	m^3
Zuigpeil in kelder	H_z	m NAP	m NAP
Zuigdruk pomp	P_z	Pa	bar
Persdruk pomp	P_{pg}	Pa	kPa mwk
Perspeil ontvangstput	H_p	m NAP	m NAP
Toerental pomp	n	rad/s	Omw/min
Elektrisch vermogen per pomp	P	W	kW
Stroomverbruik per pomp	I	A	A
Energieverbruik_rioolgemaal	E	J	kWh

De draaitijd per pomp kan ontleend worden aan de pompstatus. Het verpompt volume is het geïntegreerde debietsignaal.

In de tabel is onderscheid gemaakt tussen zuigpeil kelder en zuigdruk pomp. Bij natopgestelde pompen zijn deze direct relateerbaar aan elkaar volgens onderstaande relatie:

$$P_z = \rho g (H_z - z_{pomp}) \quad (4.1)$$

Waarin:

P_z druk [Pa] (= $[N/m^2]$)

ρ dichtheid [kg/m^3]

H_z niveau in kelder [m NAP]

z_{pomp} hoogteligging van hartlijn pomp [m NAP]

In een rioolgemaal met droogopgestelde pompen is de zuigdruk de druk ter plaatse van de zuigflensaansluiting. Tussen deze locatie en de zuigkelder is sprake van enig energieverlies afhankelijk van de leidingconfiguratie en kan dus niet zonder meer gelijk aan elkaar gesteld worden.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van mogelijke PI,'s en de daarbij vereiste meetsignalen (aangegeven met 'X') . Uitgangspunt is dat de meetsignalen via een monitoringsysteem digitaal opgeslagen worden, waardoor geautomatiseerde verwerking mogelijk is.

Tabel 4.2 : Prestatie-indicatoren en meetsignalen

Par	PI type	meetsignalen												
		S _p	T _p	Q	V	H _z	P _z	P _p	H _p	n	P	I	E	
4.2	draaiuren per periode (vergelijking 3.2)		X											
4.3	Specifieke draaiuren (3.2)		X		X									
4.4	Capaciteit (3.1)	x		X		X				X				
4.5	benodigd toerental voor ontwerpdebiet (3.2)	X		X						X				
4.6	Pompkarakteristiek (3.1)	X		X		X		X		X				
4.7	Pomprendement (3.1)	X		X		X		X		X	X			
4.8	weerstandsfactor C (3.2)	X		X				X	X					
4.9	Wandruwheid k-waarde (3.2)	X		X				X	X					
4.10	specifiek energieverbruik (3.2)	X			X			X					X	
		X		X		(X)	X	X				X		
		X		X		(X)	X	X						

De PI kan betrekking hebben op het transportsysteem (rioolgemaal en persleiding) of het rioolgemaal en de persleiding afzonderlijk.

Met twee drukmetingen over een bepaalde sectie is direct het energieverlies te bepalen. De locatie van de drukopnemers is dan ook bepalend op welk deel van het systeem de PI betrekking heeft (voor die PI gevallen waarin het energieverlies een rol speelt). Voor een PI van het gehele rioolgemaal zal de persdrukopnemer aan het begin van de uitgaande leiding (muurdoorvoer) dienen te zitten. Voor een PI van alleen de pomp moet de opnemer direct achter de pomp gelokaliseerd zijn. Het leidingwerk benedenstrooms inclusief terugslagklep wordt dan tot het systeem gerekend.

De druk aan het einde van de persleiding wordt meestal niet geregistreerd maar is veelal duidelijk gedefinieerd door de hoogte van een uitstroompunt c.q. ontvangstput (aangeduid met H_p). Als een rioolgemaal het water naar de kelder van een volgend rioolgemaal pomp, dan kan dit kelderpeil gebruikt worden; deze informatie is dan niet lokaal, maar wel globaal beschikbaar, indien dit meetsignaal naar een centrale server verstuurd wordt.

De mate van informatieontleding is afhankelijk van de beschikbare meetsignalen.

In Tabel 4.3 is voor toenemende meetcomplexiteit aangegeven op welke onderdelen de PI betrekking heeft.

Tabel 4.3 : Prestatie-indicatoren per component van een AWTS

PI	systeem	gemaal	persleiding	Complexiteit gemaal
draaiuren per periode	√			laag  hoog
Specifieke draaiuren	√			
capaciteit,	√			
benodigd toerental voor ontwerpdebiet	√			
Pompkarakteristiek		√		
Pompndement		√		
weerstandsfactor C		√	√	
Wandruwheid k-waarde			√	
specifiek energieverbruik	√			

4.2 Draaiuren per periode

Voor kleine gemalen met vast-toerental pompen kunnen de draaiuren van de pomp per periode (bijv. dag, week) gebruikt worden als eenvoudig te bepalen kengetal. Het voordeel van dit kengetal is dat de draaiuren van de pomp over het algemeen bijgehouden worden voor onderhoudsdoeleinden. Verdere instrumentatie is daarom niet nodig (in de praktijk is andere instrumentatie vaak niet aanwezig in kleinere gemalen).

Met een vast tijdsinterval wordt per pomp het aantal draaiuren bepaald:

$$K_{draaiuren_Pi} = T(t_2) - T(t_1) \quad (4.2)$$

Met: $K_{draaiuren_Pi}$ = draaiuren per verstreken periode per pomp
 $T(t_i)$ = totale draaitijd t/m periode i

Bij een meer-pompopstelling wordt tevens het totaal aantal draaiuren van het rioolgemaal bepaald:

$$K_{draaiuren_gemaal} = \sum K_{draaiuren_Pi} \quad (4.3)$$

In het ontwerptraject kan op basis van de te verwachten aanvoer en de geïnstalleerde pompcapaciteit een schatting van het aantal draaiuren bepaald worden. Dit type kengetal is geschikt voor eenvoudige gemalen waar alleen sprake is van DWA afvoer (gescheiden stelsels). Ervan uitgaande dat het rioolgemaal is uitgerust met een 1+1 pompopstelling en pompen alternerend in bedrijf komen, zal het aantal draaiuren per periode per pomp min of meer gelijk moeten zijn aan elkaar. Een onderlinge afwijking duidt op een probleem aan één van de pompen.

Een stijging van het aantal draaiuren van de gehele installatie geeft een lagere PI. Deze PI geeft geen enkele indicatie waar de oorzaak van het probleem ligt. Een toename van het aantal draaiuren kan aan de aanvoerkant liggen, maar ook aan een lucht- of sedimentophoping in de persleiding of slijtage van de pomp.

Deze indicator kan dus alleen gebruikt worden om vast te stellen dat er een probleem is, niet om het probleem te analyseren.

4.3 Specifieke draaiuren

Bij dit kengetal wordt gekeken naar het benodigd aantal draaiuren per verpompt volume. Dit kengetal is met name geschikt voor vast-toerental pompen. Bij dit kengetal wordt de invloed van variërende aanvoer, zoals onderkend bij het kengetal “draaiuren per periode”, geëlimineerd. Daarom is dit kengetal niet alleen geschikt voor DWA stelsels, maar ook voor gemengde stelsels.

Het referentie kengetal wordt per pomp bepaald volgens:

$$K_{\text{draaiuren/m}^3\text{-Pi}} = \frac{T(t_2) - T(t_1)}{V(t_2) - V(t_1)} \quad (4.4)$$

Met: $K_{\text{draaiuren/m}^3\text{-Pi}}$ = draaiuren per verstreken periode per pomp
 $T(t_i)$ = totale draaitijd t/m periode i
 $V(t_i)$ = totale verpompt volume t/m periode i

Bij gemalen waar sprake is van meerpompsbedrijf moet onderscheid gemaakt worden in de kengetalbepaling voor elke afzonderlijke pomp in 1-pomps bedrijf en meer-pompsbedrijf.

De PI –waarde wordt bepaald voor elke combinatie van in bedrijf zijnde pompen. In gemalen met 2 pompen, die ook in meerpompsbedrijf kunnen draaien, moeten er dus drie verschillende PI-waarden bijgehouden worden: P1, P2 en P1/2. In gemalen met 3 pompen zijn 7 verschillende PI-waarden nodig: P1, P2, P3, P1/2, P1/3, P2/3 en P1/2/3. In het algemeen zijn er met n pompen in theorie $2^n - 1$ combinaties mogelijk.

Bij onderlinge afwijking wordt informatie verkregen over de status van de pomp.

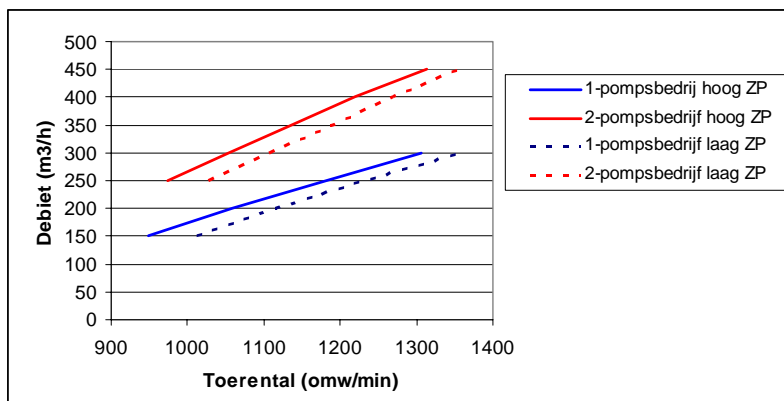
4.4 Capaciteit

De (transport)capaciteit is het debiet gerelateerd aan de pompinzet en het zuigpeil. Onder pompinzet wordt verstaan het aantal in bedrijf zijnde pompen en het toerental waarop ze draaien. Indien de zuigpeilvariatie klein is ten opzichte van de pompopvoerhoogte (concreet kleiner dan 10%), dan kan de afhankelijkheid van het zuigpeil genegeerd worden.

Dit kengetal is geschikt voor gemalen met vasttoerental en toerengeregelde pompen.

Het verband tussen de capaciteit en pompinzet S_p wordt in de ontwerpfase of bij ingebruikname bepaald en vastgelegd in functies of een rekenmodel.

$$K_{\text{transport}} = f(S_p, n, H_z) \quad (4.5)$$



De referentiec capaciteit wordt dus bepaald op basis van actuele waarden voor S_p , n en H_z . Voor de bepaling van de PI wordt bij de actuele pompinzet de referentiec capaciteit bepaald en ten opzichte van de actuele capaciteit weergegeven.

$$PI_{transportcapaciteit} = \frac{Q_{actueel}}{f(S_p, n, H_z)_{actueel}} \quad (4.6)$$

Bij het ontbreken van een debietmeter kan deze PI bij eenvoudige gemalen bepaald worden door het afpompen van een schijf water. De nauwkeurigheid van deze methode is sterk afhankelijk van het systeem en de wijze van uitvoering. Belangrijk is dat er pas een meting verricht kan worden als het systeem enige tijd op gang is. Praktische zaken als voldoende berging, voldoende lange meettijd dienen vooraf geanalyseerd te worden om vast te stellen of de methode wel praktisch uitvoerbaar is. De meetprocedure moet in een meetprotocol afgestemd op het specifieke systeem worden vastgelegd.

De benodigde meetdata wordt meestal continu gemeten en met een bepaalde frequentie opgeslagen. De PI kan pas bepaald worden als de pompinzet lang genoeg constant is gebleven. Kort na het starten van een pomp lopen er drukgolven door het leidingsysteem, wordt een eventueel aanwezige windketel gevuld en is het debiet niet constant. De meetdata moet dus op een zinnige manier gefilterd worden, zodat de gestabiliseerde data overblijft voor de bepaling van prestatie-indicatoren. De aandachtspunten, die betrekking hebben op filtering van meetdata, worden besproken in paragraaf 5.1.

4.5 Benodigd toerental bij ontwerpdebiet

Dit kengetal is geschikt voor gemalen uitgerust met een toerenregeling, regelend op debiet. In het ontwerp of bij ingebruikname kan worden vastgesteld welk toerental benodigd is om een bepaald debiet te leveren. Dit verband wordt vastgelegd in een functie of een rekenmodel.

$$K_{n_ref} = f(Q_{set}, H_z, S_p) \quad (4.7)$$

Voor de bepaling van de PI wordt bij het actuele debiet, zuigpeil en pompstatus de referentiewaarde van het kengetal bepaald en ten opzichte van het actuele toerental weergegeven.

$$PI_n = \frac{K_{n_ref}(Q_{actueel})}{n_{actueel}} \quad (4.8)$$

4.6 Pomp- en gemaalkarakteristiek

Indien naast zuigpeil, debiet en pomptoerental ook een persdruk in het rioolgemaal gemeten wordt, kan een kengetal gedefinieerd worden dat aangeeft hoe goed de pompen op hun karakteristiek draaien. De gemeten persdruk P_{pg} moet eerst vertaald worden naar een drukhoogte t.o.v. het referentievlak (m NAP) H_{pg} m.b.v. vergelijking (4.1). De netto opvoerhoogte over het rioolgemaal wordt nu berekend als $H_{pg} - H_z$. Deze netto opvoerhoogte is een functie van het gemaaldebiet en het pomptoerental. De pompopvoerhoogte is iets groter dan de gemaalopvoerhoogte vanwege de lokale verliezen in het rioolgemaal.

$$\Delta H_{pomp}(n, Q) = H_{pg}(n, Q) - H_z + C_g Q^2 \quad (4.9)$$

waarin C_g de lokale verliezen in het rioolgemaal representeert.

In de referentie-situatie (hydraulisch model of ref.meting i.c.m. proefstand pompkarakteristiek) is de pompopvoerhoogte bekend bij elke combinatie van toerental en gemaaldebiet. Dit is de referentie-opvoerhoogte die vergeleken wordt met de gemeten opvoerhoogte.

$$PI_{pomp} = \frac{\Delta H_{pomp,act}}{\Delta H_{pomp,ref}(n, Q)} \quad (4.10)$$

Voor deze PI is het bovendien inzichtelijk om de combinatie van gemeten debiet en rioolgemaal- of pompopvoerhoogte grafisch uit te zetten. Voor toerengeregelde pompen kunnen dan de affiniteitsregels gebruikt worden om de werkpunten te vertalen naar fictieve werkpunten bij het nominale toerental, zodat alle punten op een nominale pomp/gemaalkarakteristiek samenvallen bij een goed functionerend rioolgemaal.

Ook voor deze kengetallen gelden de opmerkingen mbt tijdschalen en filtering van meetdata in paragraaf 5.1.

4.7 Pomprenement

Met dezelfde meetsignalen als voor de pompkarakteristiek en meetdata van het opgenomen vermogen kan ook het pomprenement bepaald worden en vergeleken worden met het maximaal haalbare pomprenement.

$$K_{\eta} = \frac{\rho g (Q \Delta H)_{actueel}}{P_{elec} \eta_{motor} \eta_{FO}} \quad (4.11)$$

$$PI_{\eta} = \frac{K_{\eta}}{\eta_{max}}$$

Waarin:

P_{elec}	=	Elektrisch vermogen afgegeven aan FO en motor	[W]
η_{FO}	=	Rendement van de frequentie-omvormer (FO)	[-]
η_{motor}	=	Rendement van de motor	[-]
η_{max}	=	Maximaal rendement van de pomp	[-]
ρ	=	Dichtheid	[kg/m ³]
g	=	Gravitatieversnelling	[m/s ²]
Q	=	Debiet	[m ³ /s]
ΔH	=	Opvoerhoogte pomp verkregen via verg. (4.9)	[m]

4.8 Weerstandsfactor, systeemkarakteristiek

In persleidingen geldt dat het energieverlies over een bepaald traject bij benadering evenredig is met het debiet in het kwadraat. Het energieverlies wordt berekend uit het verschil tussen de drukhoogte in het rioolgemaal H_{pg} en het vaste of gemeten perspeil H_p .

$$\Delta H = H_{pg} - H_p = C_{act} Q^2 \quad (4.12)$$

Door het meten van twee drukken en het debiet kan de actuele weerstandscoefficient C met de referentie C vergeleken worden, rekening houdend met wrijvingsverliezen (Darcy-Weisbach) en lokale verliezen:

$$C_{ref} = \frac{8\lambda L}{\pi^2 g D^5} + \frac{\sum \xi_i}{2gA^2} \quad (4.13)$$

De wrijvingscoëfficiënt λ is niet echt constant, maar is afhankelijk van het Reynoldsgetal waardoor deze een klein beetje varieert (uitgaande dat er sprake is van turbulente stroming).

Als deze variatie klein is (volgt uit ontwerp) kan de verhouding van actuele C en referentie C gebruikt worden als PI; de PI kan ook alleen bepaald worden als het Reynoldsgetal voldoende groot is.

$$PI_C = \frac{C_{ref}}{C_{act}(Q, H_{pg}, H_p)} \quad (4.14)$$

Dit kengetal kan ook toegepast worden op individuele componenten in het systeem zoals een terugslagklep of pomp. Voor kleinere leidingen kan de Reynolds-invloed op de verliescoëfficiënt C vrij groot zijn over het relevante bereik van debieten. In dat geval moet een meer generieke weerstandskarakteristiek gebruikt worden. Een willekeurige weerstandskarakteristiek van een luchtvrij systeem in de referentiesituatie kan beschreven worden met een variant op vergelijking (4.12):

$$\Delta H = H_{pg} - H_p = C_1 Q^2 + C_2 Q \quad (4.15)$$

Dus bij elke gemeten weerstand ΔH_{act} kan (met de wortelformule) het bijbehorende referentiedebiet bepaald worden.

$$Q_{ref}(H_{pg}, H_p) = -\frac{C_2}{2C_1} + \frac{\sqrt{C_2^2 + 4C_1(H_{pg} - H_p)}}{2C_1} \quad (4.16)$$

De PI bestaat dan weer uit de debietverhouding tussen het gemeten debiet en het referentiedebiet.

$$PI_{Q_s} = \frac{Q_{actueel}}{Q_{ref}(H_{pg}, H_p)} \quad (4.17)$$

Ook voor deze PI's is het bovendien inzichtelijk om combinaties van gemeten debiet en leidingverlies grafisch uit te zetten in een weerstandskarakteristiek en deze te vergelijken met de referentiekarakteristiek. Een trending is in dergelijke grafieken weer minder duidelijk aan te geven.

Een PI voor de leiding kan ook nog uitgedrukt worden als een verhouding van leidingverliezen. Het leidingverlies in de referentiesituatie ΔH_{ref} kan gemodelleerd worden met vergelijking (4.15). Bij elk gemeten debiet en persdruk van het rioolgemaal wordt de PI als volgt berekend:

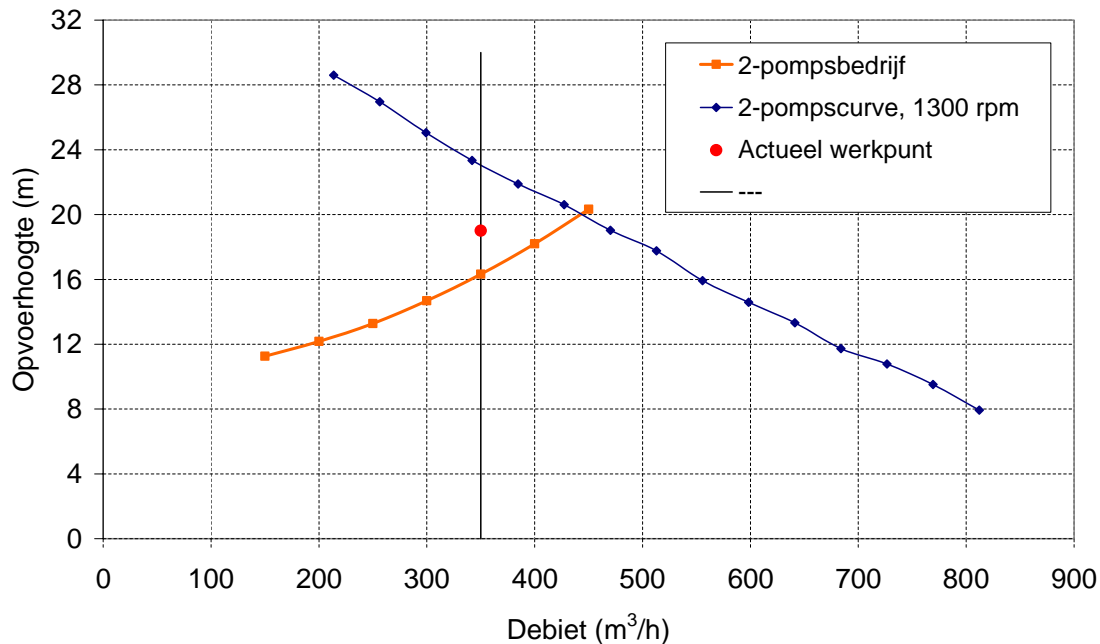
$$PI_{\Delta H_{leiding}} = \frac{\Delta H_{ref}(Q, H_p)}{H_{pg,act} - H_p} \quad (4.18)$$

De meting van persdruk en zuigpeil kunnen tenslotte ook nog gebruikt worden om de pompvoerhoogte te bepalen en te vergelijken met de pompkromme. De pompvoerhoogte wordt afgeleid via vergelijking (4.9), waarmee een PI voor het rioolgemaal wordt berekend volgens:

$$PI_{\Delta H_{pomp}} = \frac{\Delta H_{pg,act}(H_z, H_{pg})}{\Delta H_{pg,ref}(n, Q)} \quad (4.19)$$

De laatste twee performance indicatoren kunnen grafisch weergegeven worden in een Q-H diagram. In het voorbeeld in Figuur 4.1 zou het theoretische werkpunt liggen bij 20 m

opvoerhoogte en 440 m³/h. Het verschil tussen het gemeten actuele werkpunt (rode bol in Figuur 4.1) en de systeemkarakteristiek betekent dat er extra weerstand in de leiding zit. Een verschil tussen de pompcurve en de het gemeten werkpunt toont aan dat de pomp minder efficiënt draait (door bijvoorbeeld schade aan de waaier of een matige aanstroming).



Figuur 4.1 Werkpunt, pompkromme en systeemkarakteristiek in Q-H diagram

Een voordeel van de laatste twee performance indicatoren ((4.18) en (4.19)) is de directe relatie met de energie-efficiency, omdat het energieverbruik evenredig oploopt met de pompopvoerhoogte; zie hiervoor hoofdstuk 4.10.

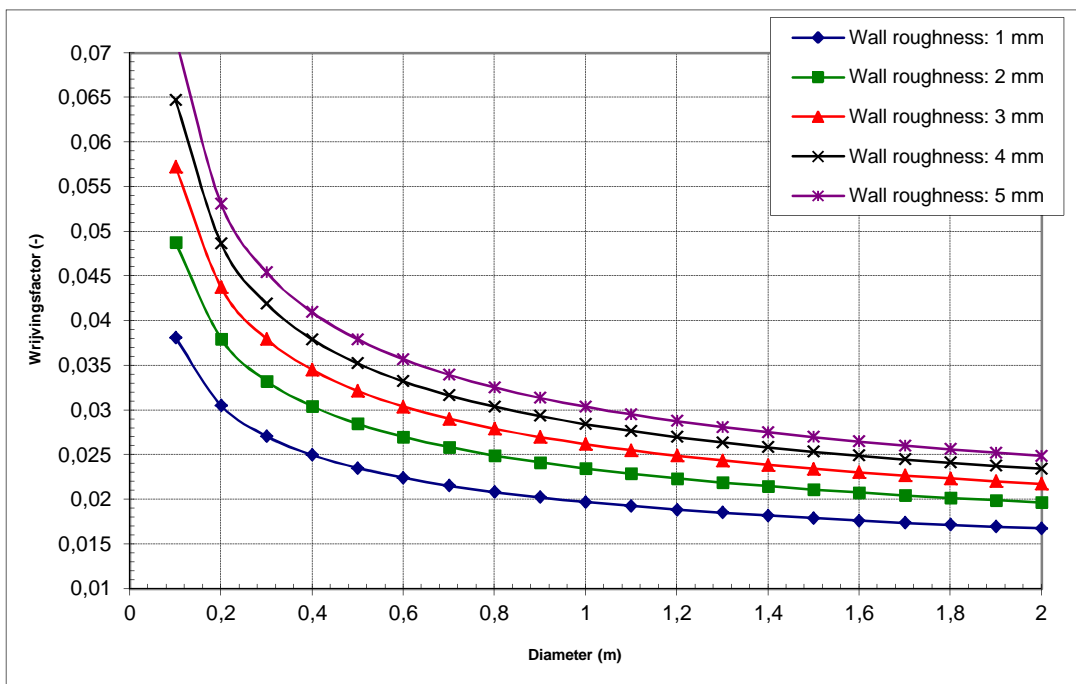
4.9 Equivalente wandruwheid

De equivalente wandruwheid k is een kengetal voor de persleiding en is een verdere uitwerking van de weerstandsfactor. De equivalente wandruwheid lijkt een eenvoudig en gemakkelijk te hanteren kengetal omdat iedereen zich er iets bij voor kan stellen. Echter deze k -waarde is een rekengrootheid afhankelijk van de wrijvingsfactor λ , diameter D en het Reynoldsgetal Re volgens:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right) \quad (4.20)$$

Het probleem met de wandruwheid is dat grote leidingen bevoordeeld worden: Figuur 4.2 laat het verband tussen de Darcy-Weisbach wrijvingsfactor en de leidingdiameter zien (bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s).

Voorbeeld: Een wandruwheid van 5 mm in een Ø1500 mm leiding geeft een gelijke weerstandscoefficiënt λ als een wandruwheid van 1 mm in een Ø300 mm leiding.



Figuur 4.2 Wrijvingsfactor als functie van de leidingdiameter voor verschillende wandruwheden

De wandruwheid alleen zegt dus niets over de toestand van een leiding als de diameter niet bekend is. In de praktijk kunnen er kleine variaties in de diameter zijn door aangroei, scaling en slijmlagen op de leidingwand.

Dit kengetal kan dus niet worden verschaald naar andere leidingdiameters en levert dus problemen in systemen met verschillende diameters. Echter, de wandruwheid kan wel worden vergeleken met leidingen met zelfde diameter maar andere leidinglengtes. De wandruwheid is niet gevoelig voor de statische opvoerhoogte.

4.10 Specifiek energieverbruik

Onder het specifiek energieverbruik verstaan we de hoeveelheid energie benodigd om 1 m³ water te transporteren.

Hetzelfde kengetal is op verschillende manieren te bepalen.

$$K = \frac{E \text{ [kWh]}}{V \text{ [m}^3\text{]}} \quad (4.21)$$

Delen we beide termen door 1 uur dan krijgen we een identiek kengetal maar nu uitgedrukt in vermogen P en debiet Q:

$$K_{s.e.} = \frac{P \text{ [kW]}}{Q \text{ [m}^3\text{/h]}} \quad (4.22)$$

Toepassen van een formule voor het vermogen laat zien dat dit kengetal hoofdzakelijk door de opvoerhoogte bepaald wordt:

$$K_{s.e.} = \frac{P_{hydr}}{Q \times \eta_{pomp} \times \eta_{elek}} = \frac{\rho g \Delta H}{\eta_{pomp} \times \eta_{elek}} \quad (4.23)$$

Waarin:

P_{elek}	=	Elektrisch vermogen	[W]
P_{hydr}	=	Hydraulisch vermogen	[W]
η_{pomp}	=	Rendement van de pomp	[-]
η_{motor}	=	Rendement van de motor	[-]
ρ	=	Dichtheid	[kg/m ³]
g	=	Gravitatieversnelling	[m/s ²]
Q	=	Debiet	[m ³ /s]
ΔH	=	Opvoerhoogte pomp	[m]
$K_{s.e.}$	=	Kental specifiek energieverbruik	[kWh/m ³]

Het elektrische vermogen is direct te berekenen uit het stroomverbruik en het voltage. Vaak wordt alleen het stroomverbruik van de pomp geregistreerd, omdat de spanning als constant wordt beschouwd.

$$P_{elek} = U \cdot I \quad (4.24)$$

Waarin:

U	=	Spanning	[V]
I	=	Stroom	[A]

Het energieverbruik van het rioolgemaal wordt automatisch bijgehouden door de energieleverancier waardoor vergelijking (4.24) in de praktijk eenvoudiger toe te passen is. Echter deze registratie behelst het totale energieverbruik van het rioolgemaal, dus inclusief verlichting en koeling. Voor correct gebruik van vergelijking (4.24) zou dus een correctie toegepast moeten worden.

Betrekken we het kengetal uitsluitend op het hydraulisch vermogen, dan volgt voor de PI specifiek energieverbruik:

$$PI = \frac{K_{s.e.,ref}}{K_{s.e.,act}} = \frac{\left(\frac{P}{Q}\right)_{ref}}{\left(\frac{P}{Q}\right)_{act}} = \frac{\Delta H_{ref}}{\Delta H_{act}} \quad (4.25)$$

Dit kengetal kan op verschillende tijdschalen geëvalueerd worden. Bij samengestelde persleidingstelsels kan de afleveringsdruk behoorlijk variëren door al dan niet in werking zijn van andere gemalen. Om de juiste PI waarde te kunnen bepalen, moet bij de actuele toestand de referentiewaarde bekend zijn. De actuele toestand van andere gemalen in hetzelfde stelsel moet dus ook geregistreerd worden. In hoofdstuk 5.2 worden de aandachtspunten voor vertakte systemen verder uitgewerkt.

Korte tijdschaal (orde minuten)

Dit kengetal is niet constant, maar afhankelijk van het debiet, statische opvoerhoogte en het aantal in bedrijf zijnde pompen. Bij het bepalen van de juiste PI-waarde moet derhalve de juiste referentiewaarde gehanteerd worden die hoort bij dezelfde actuele toestand om de momentane PI te bepalen.

Lange tijdschaal (weken – maanden)

Voor de ontwikkeling van het specifieke vermogen op langere termijn moet een referentiewaarde uit historische data gebruikt worden. Met zo'n vaste referentiewaarde wordt zichtbaar of de gemiddelde opvoerhoogte in tijd verandert. Een aanpassing in de regeling (bijv. gemalen zo min mogelijk gelijktijdig laten draaien) kan dan tot uitdrukking komen in een lagere gemiddelde opvoerhoogte, waardoor de PI stijgt.

5 Verwerking en interpretatie

Bij het verwerken en interpreteren van elke PI speelt een aantal aspecten een rol:

- Tijdschaal
- Systeem afhankelijkheden
- Wijze van verwerking
- Neerslag

Een PI kan het meest betrouwbaar bepaald worden bij een zo hoog mogelijk toerental of het maximaal toelaatbare debiet. Hiervoor zijn meerdere redenen: Ten eerste zijn de pompkrommes het meest betrouwbaar bij het nominale toerental. Verschaling naar lagere toerentallen wordt volgens de affiniteitsregels zonder rendementsverlies gedaan, terwijl in de praktijk het rendement wel wat daalt bij lagere toerentallen. Ten tweede zijn energieverliezen t.g.v. luchtbellen het best waarneembaar bij hoge stroomsnelheden. Ten derde zijn meetonzekerheden relatief het kleinst bij hoge debieten, persdrukken, etc. Tenslotte is de situatie met een hoog pompdebiet het meest representatief voor de capaciteit van het systeem.

5.1 Tijdschalen en filtering van meetdata

De informatie dichtheid van een PI bepaalt op welke tijdschaal de PI informatie geeft. Bij een lage informatiedichtheid, zoals het totaal aantal draaiuren per dag zal de historische reeks vele malen langer moeten zijn. Dit kengetal op dagbasis biedt weinig tot geen informatie. Echter deze PI geeft over een lange periode (maanden) wel informatie over het systeem.

Relevante tijdschalen zijn:

- Tijdschaal van dynamica, t_d .
- Tijdschaal waarop meetdata opgeslagen wordt en beschikbaar is, t_m

De tijdschaal van de dynamica in een goed functionerend systeem wordt bepaald door de looptijd van drukgolven. De looptijd van een enkele leiding is als volgt gedefinieerd:

$$t_d = \frac{2L}{c} \quad (5.1)$$

Waarin L de totale leidinglengte (m) en c de voortplantingssnelheid van drukgolven (m/s).

In vertakte systemen wordt de looptijd voor een specifiek rioolgemaal bepaald door een combinatie van looptijden van afzonderlijke leidingen en deels door de debietverdeling. Een indicatie wordt verkregen door de looptijd te baseren op de langste leidingstreng in het systeem (i.e. de totale lengte van de hoofdleiding) en de gemiddelde voortplantingssnelheid in de langste leidingstreng. De looptijd voor gemalen nabij de zuivering (of uitstroompunt) kan aanmerkelijk korter zijn. Een nauwkeuriger bepaling van de looptijd kan berekend worden door een pompstartscenario met een waterslagmodel uit te voeren en de periode van drukschommeling aan de perszijde te bepalen P_p . De looptijd is dan de helft van de periode van de drukschommeling.

$$t_d = 0.5P_p \quad (5.2)$$

Het systeem zit bij benadering in een stationaire toestand als alle gemeten signalen gedurende een stabilisatietijd T_s gelijk aan $10 \cdot t_d$ "min of meer constant" zijn gebleven.

$$T_s = 10t_d \quad (5.3)$$

De data gedurende de eerste $10 \cdot t_d$ zijn nog niet bruikbaar als "stationaire" data. De meetdata na de stabilisatietijd zijn bruikbaar voor de bepaling van performance indicatoren.

De term "Min of meer constant" kan op diverse manieren gekwantificeerd worden:

- alle meetpunten liggen binnen een bandbreedte van $\pm 5\%$ van een gemiddelde van minimaal 5 waarnemingen. Hierbij zou minimaal elke minuut data opgeslagen moeten worden ($t_m \leq 1$ min.)
- Zuigpeil ligt binnen een bandbreedte van $\pm 5\%$ van de pompopvoerhoogte.
- De standaarddeviatie van een reeks van minimaal 5 opeenvolgende waarnemingen is kleiner dan 2.5%. Hiermee ligt 95% van de meetdata binnen de bandbreedte van $\pm 5\%$, uitgaande van normaal verdeelde spreiding in de meetdata.

De te hanteren criteria voor stationaire meetdata zijn systeem-afhankelijk. Er kunnen redenen zijn om scherpere of ruimere criteria te hanteren. Gemeente Rotterdam heeft historische data van enkele grotere en kleinere gemalen geanalyseerd; rapportage in afstudeerwerk van Gieljam Schutgens van faculteit CiTG, TU Delft. De veranderingen die werden toegelaten in 5 opeenvolgende minuten zijn:

- ± 10 cm afwijking in het waterniveau van de pompkelder,
- $\pm 5\%$ afwijking in debiet,
- $\pm 5\%$ afwijking in druk in de leiding en
- $\pm 5\%$ afwijking in toerentallen.

De benedenstroomse randvoorwaarde voor het waterniveau is in alle situaties als een vast gegeven verondersteld. Een voldoende groot percentage van de meetdata voldeed aan deze criteria, zodat veel inzicht is verkregen in het functioneren van de gemalen in Rotterdam. Een artikel wordt binnenkort gepubliceerd in WT Afvalwater.

De analyse-mogelijkheden voor PI's zijn onlosmakelijk verbonden met de tijdschaal t_m waarop de meetdata wordt opgeslagen. Een absoluut minimum voor de periode waarmee de meetdata geanalyseerd kan worden is 5 datapunten; dus een periode van $5 \cdot t_m$. Als bijvoorbeeld geaccumuleerde meetdata op weekbasis worden opgeslagen, dan kan pas om de vijf weken een afwijking van de trend geconstateerd worden. Hieronder staat een aantal aandachtspunten bij verschillende waarden voor t_m .

Tijdschaal meetdata, t_m	Aandachtspunten
$t_m \approx 1s$	Deze tijdschaal zou minimaal nodig zijn om de dynamica in de persleiding redelijk te kunnen volgen. Op deze tijdschaal kan het start- en stopgedrag van pompen gevolgd worden, waarmee de aanwezigheid van luchtbellens aangetoond kan worden. Reguliere monitoring systemen zullen niet zo'n kleine tijdschaal gebruiken. Het tijdelijk kunnen overschakelen op een dergelijke kleine tijdschaal (vooral voor persdrukmetingen en evt. pomptoerentallen) is nuttig om de oorzaak van PI afwijkingen te kunnen

	onderzoeken.
$t_m \approx 1 \text{ min}$	Op deze tijdschaal worden pompen aan- en uitgeschakeld. Een tijdschaal van 20 s tot 1 minuut wordt aanbevolen voor reguliere monitoringsystemen, omdat elke pompstart dan een voldoende aantal datapunten bevat. Het systeemgedrag kan vervolgens quasi-stationair gevolgd worden, rekening houdend met de stabilisatietijd.
$t_m \gg 1 \text{ min}$	Op een tijdschaal van 5 minuten of langer kan de status van de pompen (AAN/UIT) niet meer volledig gevolgd worden. Alleen situaties, die langer duren dan een periode van minimaal $5 \cdot t_m$ kunnen vergeleken worden met stationaire referentiesituaties. De meetdata bevatten geaccumuleerde data, inclusief alle dynamische effecten. De referentie-kengetallen kunnen dan eigenlijk alleen uit historische data gehaald worden, omdat de geaccumuleerde data door een groot aantal externe factoren beïnvloed wordt, zoals neerslag, dagpatroon van de aanvoer, etc..

5.2 Systeem afhankelijkheden

De complexiteit van het persleiding systeem bepaalt ook de complexiteit van de analyse.

De performance indicatoren karakteriseren de prestatie van een (deel van een) afvalwaterpersleidingsysteem in stationaire omstandigheden, omdat we geïnteresseerd zijn in de extra energieverliezen en de haalbare capaciteit van het (deel)systeem. Aangezien afvalwaterpersleidingen dynamische systemen zijn, waarin de dynamica zorgt voor relatief grote fluctuaties op de stationaire situatie, moet eerst vastgesteld worden of een stationaire situatie voldoende benaderd is. Vooralsnog gaan we er daarom van uit dat alle dynamica niet betrouwbaar uit de dynamische meetdata gefilterd kan worden, waardoor methodes nodig zijn om vast te stellen of een stationaire situatie voldoende benaderd is. Dit hangt samen met de tijdschalen van het systeem en de meetfrequentie.

Bij een rioolgemaal met een enkelvoudige persleiding kunnen de diverse PI's recht toe recht aan bepaald worden, rekening houdend met de tijdschalen. Bij systemen met inprickers beïnvloedt de toestand van de andere gemalen de kengetallen. Voor de juiste interpretatie moeten deze afhankelijkheden verdisconteerd worden.

5.2.1 Continue monitoring van vertakte systemen

Als er voldoende rekening gehouden is met het uitdempen van drukgolven (zie par. 5.1), dan nog is het een lastige klus om Performance Indicatoren geautomatiseerd uit een SCADA systeem te destilleren. In deze paragraaf wordt de aanpak kort beschreven om te laten zien waar de complexiteit in zit en welke randvoorwaarden essentieel zijn. De verwachting is dat de monitoring veel eenvoudiger en betrouwbaarder opgezet kan worden door actief in te grijpen in het systeem t.b.v. de PI's (centrale sturing gebruiken); die aanpak zal dan ook verder uitgewerkt worden.

Een PI wordt verkregen met de volgende stappen:

- 1 Toets of de meetdata stationair is.
- 2 Bereken het actuele kengetal uit de meetdata.
- 3 Bereken het referentie-kengetal voor de actuele toestand van het systeem.
- 4 Bereken de PI uit de verhouding van het actuele en referentie kengetal.

Elk van deze stappen wordt hieronder toegelicht.

5.2.1.1 Stationaire meetdata en actuele kengetal

Een noodzakelijke voorwaarde voor een stationair signaal is dat alle gemalen (en regelkleppen) gedurende een bepaalde tijd hun toerental bijna constant moeten houden. Dit zal in de praktijk betekenen dat gemalen gedurende deze tijd aan of uit moet blijven staan. Voor systemen met een maximale lengte van 5 km en PVC leidingen bedraagt deze tijdsperiode al 4 minuten. Er zijn twee situaties waarin de toestand mogelijk lang genoeg constant blijft:

- 1 In een gescheiden stelsel of tijdens DWA in de nachtelijke uren, als het leegpompen van een kelder lang genoeg duurt en alle overige gemalen dan toevallig uit staan.
- 2 Tijdens de ochtend- en/of avondpiek mag verwacht worden dat de meeste gemalen wel eens gelijktijdig in bedrijf zijn.

Als de meetdata onvoldoende stationair zijn, kan de PI niet betrouwbaar bepaald worden. Als de meetdata als stationair beoordeeld worden en alle signalen voor het actuele kengetal zijn aanwezig (geen storingsen), dan worden geen problemen voorzien voor de bepaling van het actuele kengetal uit de meetdata.

5.2.1.2 Referentie-kengetal en PI

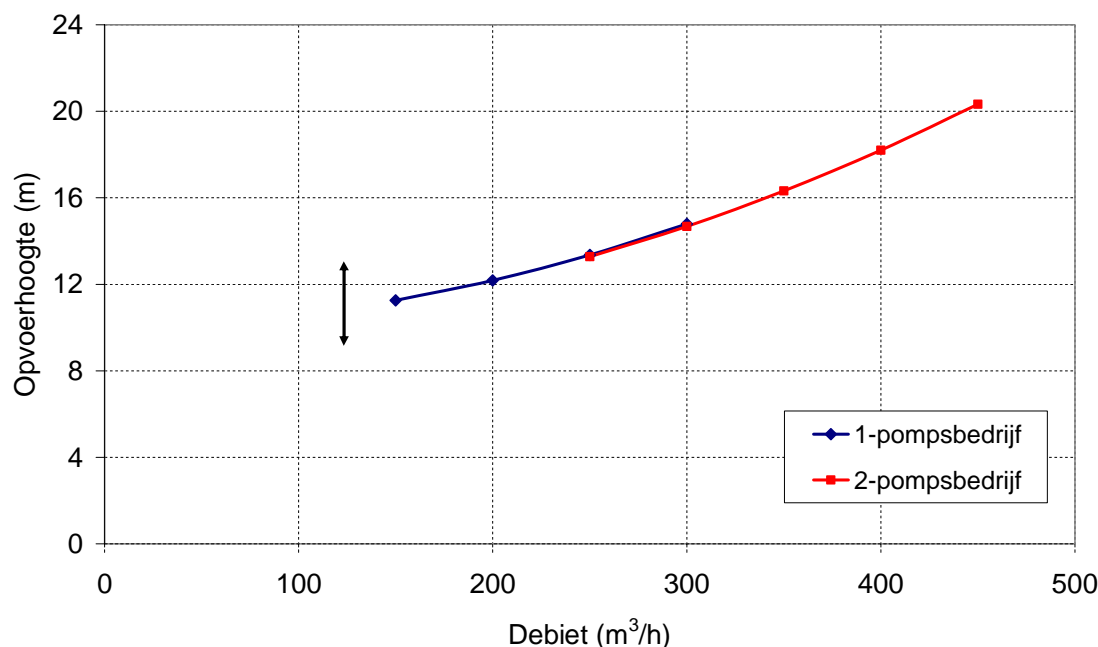
Een tweede probleem zit in de bepaling van het referentie-kengetal. Het referentie-kengetal hangt namelijk af van de toestand van alle actieve componenten in het vertakte systeem. De toestand wordt bepaald door de pomptoerentallen van de gemalen en eventueel de stand van regelkleppen. De toerentalen en regelkleppen bepalen, samen met kelderpeilen en eventueel perspeilen de debietverdeling, opvoerhoogtes en persdrukken. Een monitoring-systeem moet op zijn minst een stationair hydraulisch model bevatten waarmee de stationaire debiet- en drukverdeling berekend kan worden. Met zo'n model kan dan het referentie-kengetal berekend worden.

Als situatie 2) tijdens de piekuren zich vrijwel dagelijks en voldoende lang voordoet, dan is dit wel een prima situatie voor bepaling van PI's. Het totale debiet is immers groot, wat de betrouwbaarheid van de PI's ten goede komt. Deze situatie zou eventueel tijdens de piekuren langer gehandhaafd kunnen worden door de inslagpeilen tijdens de piekuren te verhogen, zodat de gemalen langer moeten draaien om de kelders leeg te pompen.

5.2.2 Vereenvoudigde monitoring van vertakte systemen m.b.v. centrale sturing

Een aantal van de geschetste problemen om betrouwbare data te verzamelen kan verholpen worden door actief in te grijpen in het systeem. Dit ingrijpen zal de kwaliteit van de monitoring-data aanmerkelijk verbeteren. Door sturing hoeft een PI alleen onder vaste omstandigheden bepaald te worden. De sturing wordt zodanig aangepast dat steeds 1 rioolgemaal tegelijk draait. Dat ene rioolgemaal moet dan lang genoeg draaien om een stationaire situatie te bereiken, zodat de PI's bepaald kunnen worden.

Door één rioolgemaal tegelijk te laten draaien varieert het debiet van het rioolgemaal langs één systeemkarakteristiek, die alleen nog in hoogte kan variëren met de gemeten variatie in de statische opvoerhoogte (zie Figuur 5.1).



Figuur 5.1: Systeemkarakteristiek en het effect van de statische opvoerhoogte (zwarte pijl)

Praktische invulling

Het actief sturen van gemalen moet bij voorkeur 's nachts geautomatiseerd uitgevoerd worden, omdat dan de aanvoer klein is en de gemalen toch al een groot deel van de tijd stilstaan.

Stel dat we de PI's van rioolgemaal A in een vertakt AWTS willen bepalen. De sturing kan geheel ingevuld worden door de inslagpeilen aan te passen en de rest van de lokale regelingen ongemoeid te laten. Dan wordt eerst het inslagpeil van rioolgemaal A verhoogd tot het niveau waarop het bergingsvolume voldoende is om een stationaire situatie te bereiken. Indien het bergingsvolume te klein is om het maximaal toelaatbare debiet gedurende de stabilisatietijd te leveren, kan overwogen worden om de actieve monitoring uit te voeren bij een lager debiet; dit gaat dan wel ten koste van een toenemende onzekerheid in de PI. Vlak voordat het verhoogde inslagpeil bij rioolgemaal A bereikt wordt, worden de inslagpeilen van de overige gemalen verhoogd zodat deze gemalen tijdelijk geen debiet meer leveren. Zodra de PI's van rioolgemaal A bepaald zijn, worden de inslagpeilen weer teruggezet naar hun normale waarden, zodat alle kelders weer leeggepompt kunnen worden.

Op basis van de nachtelijke aanvoer per rioolgemaal kan direct bepaald worden of andere gemalen zullen inschakelen nadat hun inslagpeil verhoogd is en voordat de stabilisatietijd voor rioolgemaal A is verstreken. Een belangrijk aandachtspunt voor gemengde stelsels is dat er geen neerslag verwacht wordt tijdens de actieve monitoring. Deze info kan uit KNMI voorspellingen (6 uur vooruit) automatisch afgeleid worden. Een actieve monitoring zou ook handmatig geactiveerd kunnen worden o.b.v. actuele weerberichten.

In een meer generieke aanpak voor een systeem met een groot aantal gemalen kan de sturing ook aangepast worden zodat steeds een vast groepje gemalen gelijktijdig draait. Dan is er nog steeds sprake van een vaste systeemkarakteristiek voor elk van de gemalen.

5.3 Wijze van verwerking

Centrale data-opslag is zeer wenselijk voor monitoring van het hydraulisch functioneren. Zeker voor vertakte systemen is centrale data-opslag noodzakelijk. Een belangrijk aandachtspunt is de opgeslagen tijd van elk van de meetsignalen. Het centrale systeem moet de tijd dicteren en regelmatig doorgeven aan de instrumenten die het tijdstip van de meting opslaan. Interne klokken van instrumenten verlopen vaak, wat na enkele maanden tot onbruikbare data leidt als hieraan geen aandacht wordt besteed.

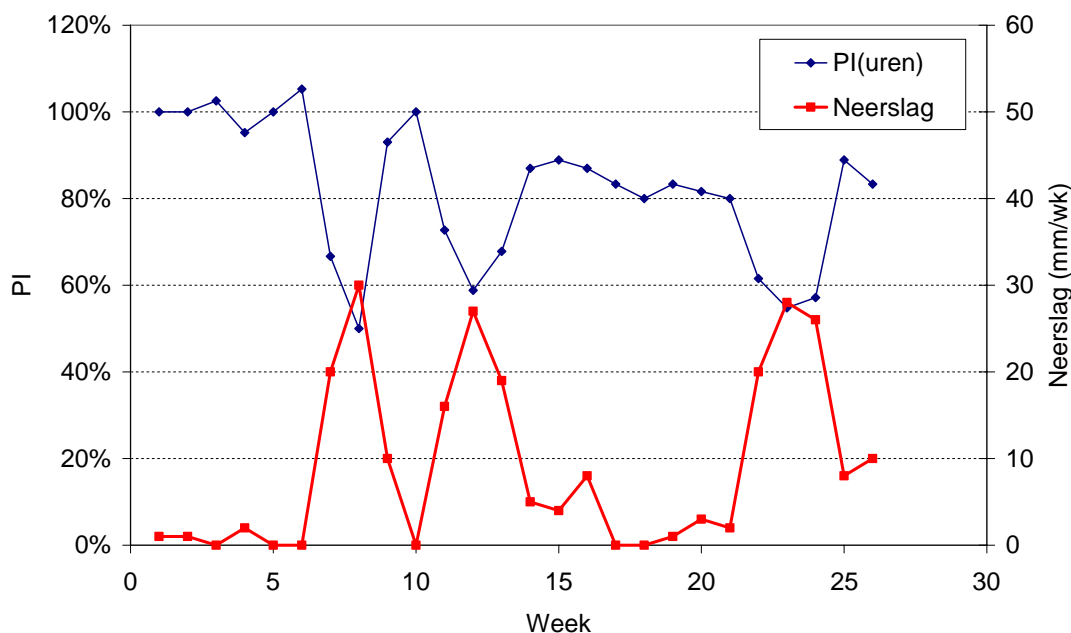
Afwijkingen, die groter zijn dan een criteriumwaarde, moeten teruggekoppeld worden naar de operator. Die moet vervolgens de achterliggende data kunnen inzien om de oorzaak van het verminderde functioneren te kunnen onderzoeken.

5.4 Externe factoren

Afhankelijk van de gekozen PI kan een correlatie met externe factoren optreden, zoals de hoeveelheid gevallen neerslag in het verzorgingsgebied of grondwaterstanden (in combinatie met lekkende riolering). Dit is vooral van toepassing op persleidingsystemen die het water van gemengde rioolstelsels afvoeren (en verbeterd gescheiden stelsels).

Het onderstaande voorbeeld illustreert dit.

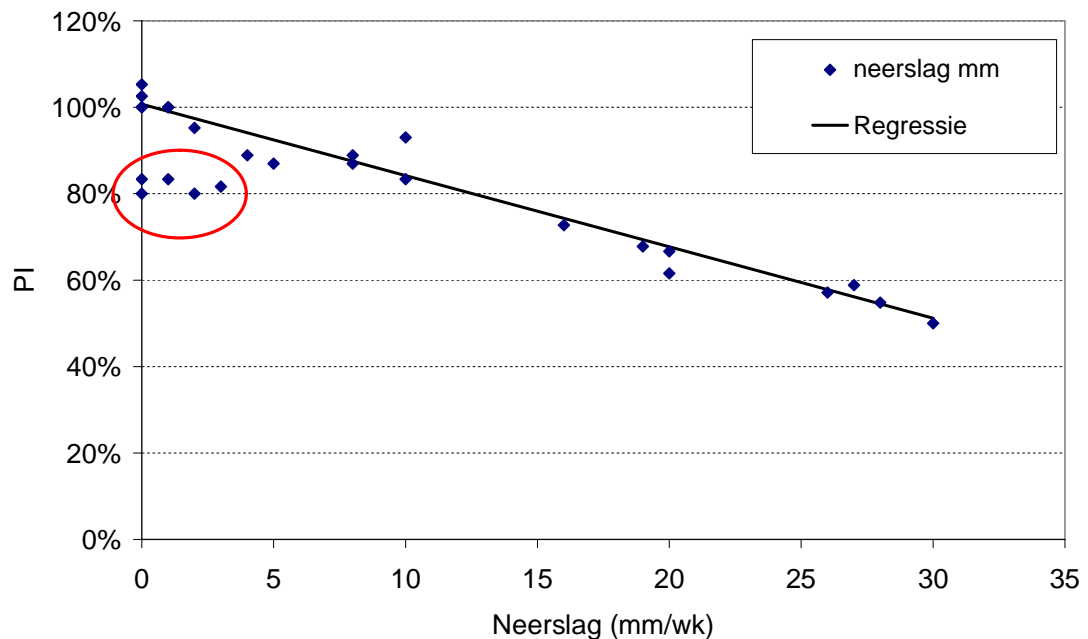
Figuur 5.2 toont de PI gebaseerd op draaiuren. De referentiewaarde is hierbij 40 uur/week.



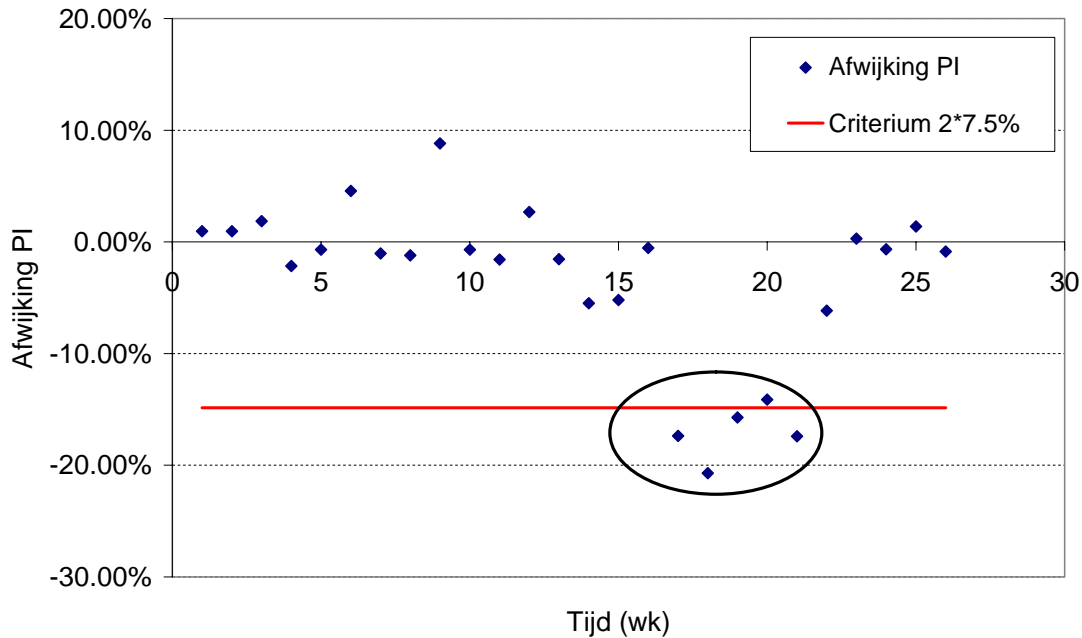
Figuur 5.2: Voorbeeld data van een PI o.b.v. draaiuren en de gemeten neerslag

Met de gegevens van de neerslaghoeveelheden is nu te constateren dat vanaf week 15 een verandering in het systeem is opgetreden omdat de PI lager is zonder dat er sprake is van neerslag.

Dit verband wordt direct zichtbaar via de wolk van punten indien de correlatie van PI en neerslag tegen elkaar wordt uitgezet. De regressielijn kan afgeleid worden uit goed gecontroleerde referentie-metingen (historische data en/of modeldata), zodat een abnormale afwijking van de referentie-lijn makkelijk gedetecteerd kan worden. De afwijking kan grafisch gedetecteerd worden als de PI en de neerslag tegen elkaar uitgezet worden, zoals weergegeven in Figuur 5.3. Het nadeel van deze weergave is dat informatie over de tijd niet meer zichtbaar is. Dit kan ondervangen worden door het verschil tussen de actuele PI en de verwachte PI (de regressie-lijn) in de tijd uit te zetten. Als de afwijking groter wordt dan twee keer de standaarddeviatie van de regressie-lijn ($2 * 7.5\%$ in dit voorbeeld) dan kan een waarschuwing gegenereerd worden; zie Figuur 5.4. Deze figuur laat ook meteen zien dat er sprake is geweest van een tijdelijke daling van de PI; er zijn bijvoorbeeld werkzaamheden aan de riolering geweest, waardoor dit rioolgemaal tussen week 17 en 22 een groter volume te verwerken heeft gehad.



Figuur 5.3: Verwachte correlatie tussen neerslag en een PI obv het aantal draaiuren.



Figuur 5.4: Afwijking van de PI t.o.v. de verwachte correlatie tussen neerslag en PI.

Voor elke PI zijn correlatie-factoren aan te wijzen, waarmee een verband verwacht mag worden, dat op dezelfde wijze geanalyseerd kan worden als in bovenstaand voorbeeld.

Tabel 5.1 : Prestatie-indicatoren en correlatie- factoren

Prestatie-indicator	Correlatie-factoren
draaiuren per periode	Neerslag, grondwaterstand, voor en na (RTC)-maatregelen
Specifieke draaiuren	Voor en na (RTC)-maatregelen
Capaciteit,	Totaal debiet van stelsel
benodigd toerental voor ontwerpdebiet	Debiet
Pompkarakteristiek	Pomptoerental, Debiet
Pomprendement	Pomptoerental, Debiet
weerstandsfactor C	Debiet
Wandruwheid k-waarde	Debiet
specifiek energieverbruik	Debiet

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De meetdata, die nu regulier ingewonnen worden op en rond rioolgemaal, worden uitsluitend gebruikt voor de sturing van rioolgemaal en storingsmeldingen. Deze meetdata bevatten een schat aan informatie die nu onbenut blijft. In dit rapport worden intelligente data-filtering-technieken uitgewerkt, zodat de meetdata omgezet kunnen worden in prestatie-indicatoren. Dit rapport geeft verder een beschrijving van deze prestatie-indicatoren (PI's) die het hydraulisch functioneren van afvalwatertransportsystemen karakteriseren. Prestatie-monitoring met behulp van prestatie-indicatoren is een essentieel onderdeel van het beheer van de afvalwaterpersleidingsystemen. Prestatie-monitoring ondersteunt een groot aantal activiteiten:

1. Toetsing van ontwerpuitgangspunten
2. Vroegtijdig onderkennen van capaciteitsproblemen
3. Identificeren van oorzaken van capaciteitsproblemen
4. Pomproblemen vroegtijdig onderkennen
5. Overgang van periodiek naar toestandsafhankelijk onderhoud
6. Kwantificeren van de effecten van slimme, globale regelingen
7. Reductie van het energieverbruik
8. Implementatie van robuuste sturing

6.2 Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling om de praktische toepassing van het gebruik van deze prestatie-indicatoren in enkele pilots te toetsen. Na aantoonbare verbeteringen in het beheer van afvalwaterpersleidingsystemen – lagere onderhoudskosten, minder energieverbruik, beter hydraulisch functioneren – zal het gebruik van prestatie-indicatoren breed geïntroduceerd worden.

A Keuze van performance indicator

Ter illustratie is een aantal voorbeelden uitgewerkt voor het kiezen van een geschikt referentie kengetal, waarmee trending van de PI in beeld wordt gebracht.

Voorbeeld 1:

rioolgemaal: 1 vasttoerental pomp met ontwerp capaciteit van 250 m³/h
(gescheiden rioolstelsel, alleen DWA aanvoer)
Ontvangstkelder: opp 10 m², verschil tussen inslag en uitslag peil 1 m.
persleiding: ø350 mm, lengte 2200 m
halverwege zit een 10 m diepe boring met lengte van 200 m.

De volgende gegevens worden gemonitord:

- zuigpeil
- persdruk achter pomp
- debiet
- elektrisch vermogen
- verpompt volume
- draaiuren

We beschouwen een dagpatroon waarbij de aanvoer vanuit het riool constant wordt verondersteld en 100 m³/h bedraagt.

De referentiewaarde (week 0) is gebaseerd op een leiding, die enige tijd in gebruik is met een k-waarde van 0.25 mm (ontwerpwaarde uit CAPWAT Handboek)

In de tijd treden er veranderingen op in het systeem. We beschouwen 2 situaties in week 4 en week 8:

situatie 1 (4 weken na in gebruik name) :

de persleiding is egaal licht vervuild overeenkomend met een theoretische k-waarde van 0.5 mm en een kleine luchtbel in de zinker met een hoogte van 1 m. Het complete verlies over de leiding omgerekend naar een gemiddelde k-waarde geeft k=0.9 mm

situatie 2 (8 weken na in gebruik name):

de persleiding is egaal licht vervuild (k-waarde = 0.5 mm) en in de boring zit een luchtbel met een hoogte van 5 m. Het complete verlies over de leiding omgerekend naar een gemiddelde k-waarde geeft k=4.8 mm

Voor dit systeem gaan we de prestatie indicatoren bepalen op basis van de volgende kengetallen:

- draaiuren
- specifieke draaiuren
- capaciteit
- pompkarakteristiek
- weerstandsfactor
- k-waarde
- specifieke energie (E/V)
- Specifieke energie (variant PQ)

De beschikbare (verwerkte) meetgegevens zijn:

	Opvoerhoogte (m)	debiet (m ³ /h)	Elek. vermogen (kW)	uren in bedrijf/dag (uur)	energie- verbruik/dag (kWh)	verpompt dag volume (m ³)
referentie	16.82	359.7	21.97	7.2	152.3	2406
Toestand week 4	18.06	341.1	21.90	7.7	159.6	2405
Toestand week 8	20.69	305.7	21.63	8.85	177	2410

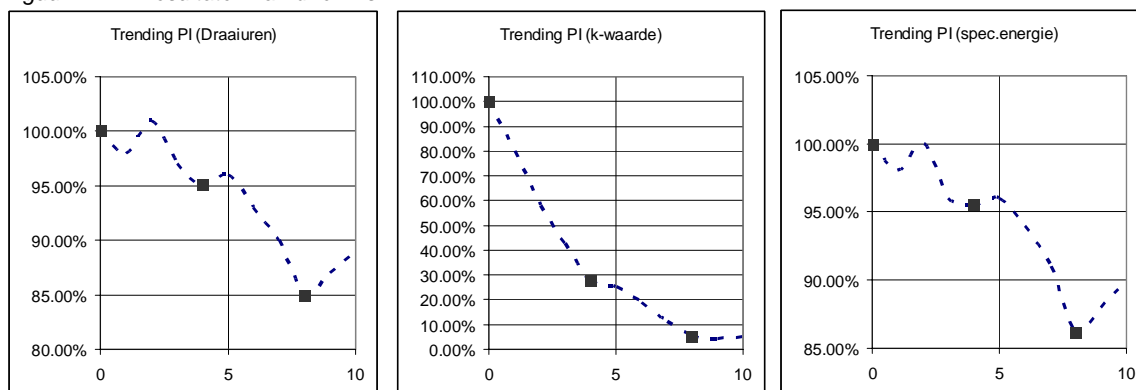
De prestatie indicator voor de diverse kengetallen zijn:

	PI (draaiuren) (%)	PI (spec. draaiuren) (%)	PI (transportcap) (%)	Pi (gemaal) (%)	PI (C-factor) (%)	PI (k-waarde) (%)
referentie	100	100	100	100	100.0%	100
Toestand week 4	95.0	95.2	94.8	100	79.6%	17.8
Toestand week 8	85	85.1	85.0	100	53.3%	5.2

	PI (spec.energie) E/V (%)	PI (spec.energie) P/Q (%)
referentie	100	100
Toestand week 4	95.5	88.3
Toestand week 8	86.2	69.1

Duidelijk is te zien dat er grote verschillen zijn in PI uitkomst afhankelijk van het type kengetal. Het grote verschil in de laatste 2 energie PI's komt door de verschillende tijdschaal. Het "E/V" kengetal is gebaseerd op een dagtotaal; het "P/Q" kengetal is een momentane waarde. Aangezien in dit simulatievoorbeeld niet met een vervuilde pomp is gerekend, blijft de PI van het rioolgemaal op 100%. Voor elk kengetal dient een bandbreedte gespecificeerd te worden wat toelaatbaar is. Een wekelijks management rapportage voor 3 verschillende PI kengetallen (draaiuren), (k-waarde en specifieke energie) zou er dan als volgt uit zien:

Figuur A.1 : Resultaten van drie PI's



Voorbeeld 2: (grotendeels identiek aan voorbeeld 1)

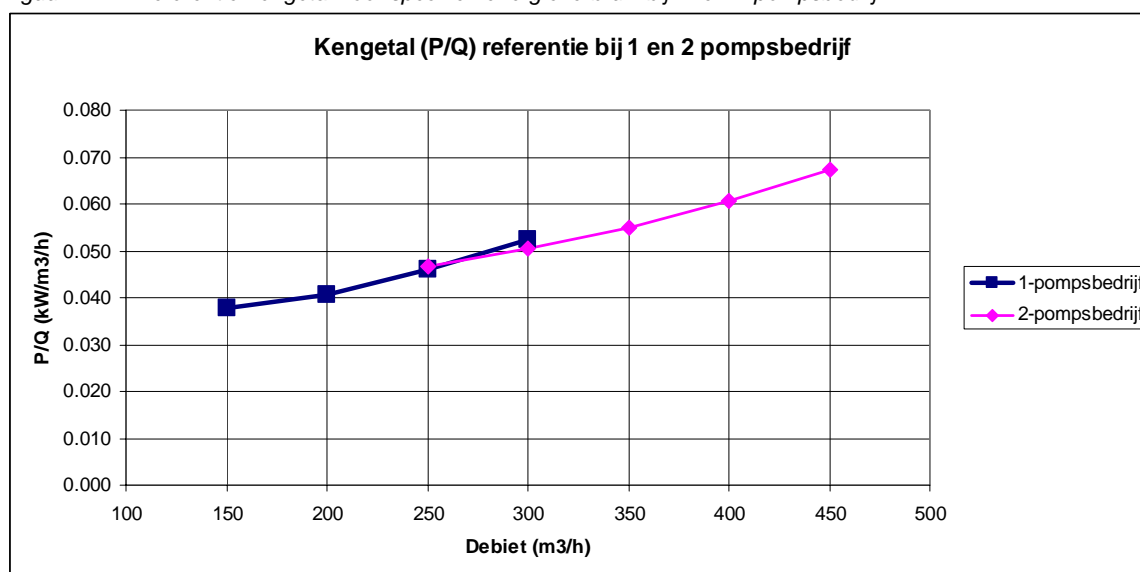
Dit voorbeeld is grotendeels identiek aan voorbeeld 1 met dit verschil dat er nu 2 toerengeregelde pompen staan. In dit voorbeeld wordt geïllustreerd dat het gehanteerde kengetal debiet afhankelijk is.

rioolgemaal: 2 toerengeregelde pompen, 1-pomps bedrijf in DWA (tot 300 m³/h) en 2-pomps bedrijf in RWA situatie (vanaf 300 m³/h)
 Ontvangstkelder: opp 10 m², verschil tussen inslag en uitslag peil 1 m.
 persleiding: ø350 mm, lengte 2200 m
 halverwege zit een 10 m diepe boring met lengte van 200 m

We beschouwen wederom dezelfde situatie als geschetst in voorbeeld 1.

Omdat de pompen toerengeregeld zijn hoort bij elke debiet een andere opvoerhoogte en vermogen. Daardoor kan een kengetal gebaseerd op deze factoren behoorlijk variëren terwijl de systeemconditie niet wezenlijk verandert. Uitgaand van een luchtbelvrij systeem is voor het beschouwde systeem het kengetal Q/P geplot voor 1- en 2-pomps bedrijf als functie van debiet. Indien een luchtbel aanwezig is in een zinker kan de weerstandstoename behoorlijk veranderen met het debiet.

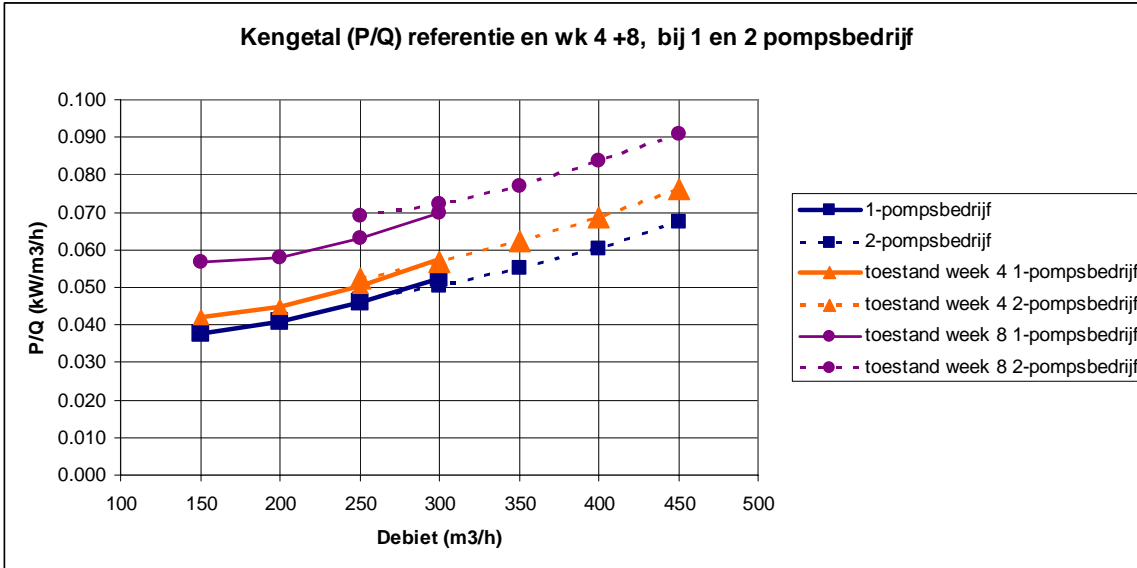
Figuur A.2 : Referentie-kengetal voor specifiek energieverbruik bij 1- en 2-pompsbedrijf



Voor de PI bepaling moet dus de bij hetzelfde debiet behorende referentiewaarde gebruikt worden. Op dagbasis kan een gemiddelde PI gebruikt worden voor de management informatie.

Onderstaand grafiek geeft een voorbeeld van de actuele Q/P verhouding aan voor verschillende debieten en pompbedrijf voor de drie toestanden (week 0, 4 en 8).

Figuur A.3 : Referentie-kengetal voor specifiek energieverbruik na 4 en 8 weken



Ook het kengetal "benodigde toerental" is afhankelijk van debiet en pompbedrijf.

Voor de management rapportage wordt bijvoorbeeld het daggemiddelde genomen. In onderstaand figuur is de trending van 2 PI-waarden (P/Q en benodigd toerental) weergegeven met een aangegeven ondergrens wanneer de systeemtoestand niet meer toelaatbaar wordt geacht. Actie van de beheerder is dan een vereiste.

Figuur A.4 : PI's voor specifiek energieverbruik na 4 en 8 weken

