

DE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT OP RIOOLWATERZUIVERINGS- INRICHTINGEN



RAPPORT

2018

69

DE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN
FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT OP
RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN

RAPPORT

2018

69



WATERSCHAP
vechtstromen



Waterschap
Rivierenland



waternet
waterschap amstel gooi en vecht
gemeente amsterdam



hoogheemraadschap
**Hollands
Noorderkwartier**



Waterschap
De Dommel

ISBN 978.90.5773.829.6



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEUR Menno Chang (Movares)
Jan-Maarten Verbree (Nelen & Schuurmans)
Hielke van den Berg (Tauw)
Berend Reitsma (Tauw)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Anouk Koelen (Waterschap Vechtstromen)
Ronald Koolen (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Marc Vermeulen (Waterschap Rivierenland)
Stefan Weijers (Waterschap De Dommel)
Cora Uijterlinde (STOWA)
George Zoutberg (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2018-69
ISBN 978.90.5773.829.6

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

Energiebesparing op de rwzi door egalisatie van de DWA aanvoer levert nauwelijks energie-besparing op maar kan wel duurzaamheidswinst opleveren.

De energietransitie is volop in beweging. Ook voor de waterschappen is er een grote uitdaging om energie te besparen, te investeren in duurzame initiatieven en een bijdrage te leveren aan de landelijke ambities. De vraag is altijd: kan het beter, duurzamer, efficiënter en goedkoper? Hoewel het energiegebruik van de waterschappen op landelijke schaal maar beperkt is, zijn de rwzi's met hun beluchting toch relevant als intensieve verbruikers. Kan daarin nog worden geoptimaliseerd?

Uit de verkenningen blijkt dat wijzigingen in de DWA aanvoer, zoals bufferen over een etmaal, omdraaien dag-nacht, flexibel veranderen zuurstofsetpoints of intermitterend voeden en beluchten (bij gelijkblijvende effluentkwaliteit), bijna geen energiebesparing opleveren. Vaak resulteren deze juist in een geringe toename van het energieverbruik (effecten op lachgas-emissies zijn niet bekend). Op basis van ervaringen in andere sectoren, kan gesteld worden dat de mogelijke besparingen in kosten voor het waterschap door het toepassen van flexibel energiemangement beperkt zijn. De daadwerkelijke besparingen hangen ook sterk af van de huidige (langdurige) prijsafspraken waarvoor energie is ingekocht. Uit dit rapport blijkt, dat afhankelijk van het toekomstige klimaatbeleid in Nederland, flexibel energie-management op rwzi's buiten het werkveld van de waterschappen wel kan leiden tot een overall toename in duurzaamheid. Hierbij is de voorspelbaarheid van de DWA aanvoeren op rwzi's van groot belang. Het is daarom zinvol om met het oog op de toekomst te investeren in het vergroten van de voorspelbaarheid van de aanvoer op en van de energievraag van rwzi's.

Dit onderzoek is onderdeel van het onderzoeksprogramma Energietransitie van STOWA. Naast onderzoek naar flexibel energiemangement op de rwzi's wordt er ook gekeken in hoeverre flexibel energiemangement in het waterbeheer kan worden ingezet: Slim malen met boezem- en poldergemalen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Het doel van deze definitiestudie ‘De (on)mogelijkheden van flexibel energiemangement op rioolwaterzuiveringsinrichtingen’ is om vast te stellen of het beluchttingsregime van rwzi’s bij behoud van de effluentkwaliteit zodanig kan worden aangepast dat energie wordt bespaard, dat (in)direct CO₂ kan worden bespaard of dat bij goedkopere tarieven kan worden belucht en daarmee op geld kan worden bespaard. Dit was ingegeven door de mogelijkheden die er op dit gebied bleken te zijn in het watersysteem (timing en voorspelbaarheid gemalen). In de definitiefase van het project heeft dit geleid tot de volgende concrete deelverkenningen:

1. Potentiële energiebesparing door alternatieve scenario’s voor de luchtinbreng
2. Flexsturing op het DWA debiet om dit zo gelijkmatig mogelijk aan te voeren (egalisatie)
3. Kostenbesparing door voorspelbaarheid energievraag rwzi’s
4. Reductie CO₂ emissies door ‘vraagsturing’

Ad 1. Kan het beluchttingsregime van rwzi’s bij behoud van de effluentkwaliteit zodanig worden aangepast dat energie en/of kosten kunnen worden bespaard? In de scenariostudie is gekozen voor de rwzi Katwoude met puntbeluchters¹ en is ‘fictief’ met bellenbeluchting via HSA modelberekeningen het effect op het energieverbruik vastgesteld met als doel te onderzoeken of er energiebesparing mogelijk is. Wijzigingen in de aanvoer, bufferen over een etmaal, omdraaien dag-nacht, flexibel veranderen zuurstofsetpoints of intermitterend voeden en beluchten, leveren (bijna) geen energiebesparing op, maar resulteren vaak in een (geringe) toename van het energieverbruik. Directe CO₂ emissiereducties door het anders bedrijven van de zuivering lijken dus niet haalbaar. Het aanpassen van het beluchttingsregime levert geen besparing op energieverbruik. Het heeft alleen zin om de aanvoer te egaliseren of intermitterend te beluchten als er andere drijfveren zijn om dat te doen.

Ad 2. De mogelijkheid is onderzocht om sturing van het DWA debiet toe te passen op de rwzi door Model Predictive Control. Uit de statistische analyse bleek dat het te voorspellen DWA debiet dat op de rwzi afkomt het beste gebaseerd kan worden op zowel het uur als de maand. Daarnaast is gekeken naar de mogelijkheid om de DWA aanvoer te sturen met behulp van een MPC model. Hiervoor is een eenvoudige doelfunctie genomen, namelijk een vlakke aanvoer. Het is gelukt om zo’n model te realiseren en toe te passen om een vlakke aanvoer te krijgen richting de rwzi. Het resultaat is dat hiervoor bij de rwzi Katwoude een aanvoerbuffer van 2.400 m³ groot genoeg is om het debiet zo vlak mogelijk te krijgen. Als dit volume beschikbaar is in het stelsel of in de bestaande rwzi aanwezig is, valt toepassing te overwegen. Nieuwbouw van een dergelijke buffer zal qua kosten niet gauw opwegen tegen de relatief kleine kostenbesparingen die door buffering over een etmaal worden voorzien. Samengevat lijkt MPC mogelijkheden te bieden om te bepalen wat er nodig is om de DWA aanvoer zo vlak mogelijk te krijgen. Uit de resultaten in dit rapport blijkt niet dat een vlakkere DWA-aanvoer voor directe energiebesparing zorgt.

Ad 3. Voorspelbaar gedrag lijkt financiële waarde te hebben. Om hier zicht op te krijgen zijn interviews afgenomen bij Eneco en E. D. Mij, een energieleverancier en programma verantwoordelijke partij voor de zakelijke markt. Om de waarde te verzilveren, zal gebruik gemaakt moeten worden van een flexibel energiecontract, waarbij geen vaste prijs meer geldt, maar

1 Deze locatie was ook geschikt als potentiële testlocatie op praktijkschaal. Deze praktijktesten zijn uiteindelijk niet door gegaan wegens onvoldoende perspectief, zie hoofdstuk 7.

de prijs fluctueert door de tijd. Hierbij ligt de verantwoordelijkheid om de energie afname te laten aansluiten bij de een dag eerder opgestelde prognose bij de waterschappen. Een goede voorspelling verkleint het risico van ongewenste kosten, maar de kosten blijven variabel. Uit andere sectoren blijkt dat een kostenreductie van 5-15 % ten opzichte van de handelswaarde van elektriciteit haalbaar lijkt, maar daarbij moet wel rekening worden gehouden met (investerings)kosten om deze reductie te realiseren. Dus het totale voordeel zal uiteindelijk kleiner zijn.

Ad 4. Directe CO₂ emissiereducties door het afvlakken van de DWA aanvoer en toepassen van een ander (flexibel) beluchtingsregime lijken niet zeer kansrijk. De vraag is dan in hoeverre indirecte CO₂ emissiereducties te bereiken zijn door toepassing van vraagsturing. Hierbij gaat het om het afstemmen van het gebruik op momenten van duurzame overproductie. De kansen liggen niet in het aftoppen van de piekvraag, maar in het concentreren van de eigen energievraag op die momenten dat er landelijk gezien overaanbod is (daluren). Rwwi's die zich willen voorbereiden op een fluctuerende en duurzamere elektriciteitsvoorziening, moeten dan de zuurstofsetpoints tijdelijk verhogen op momenten van duurzaam overaanbod met lage prijzen. Dit zal/kan leiden tot CO₂ emissiereducties op landelijke (Europese) schaal.

In de discussies van de verkenningen die hiervoor beschreven zijn, komt naar voren dat er diverse mogelijkheden zijn om iets te veranderen aan de DWA aanvoer en flexibel om te gaan met het beluchtingsregime (met gelijkblijvende effluenteisen). Dit levert echter geen significante energie-besparing op. De potentiële kostenbesparingen die kunnen volgen uit het voorspellen/sturen van het elektriciteitsgebruik van de beluchting, zijn binnen dit onderzoek niet in beeld gebracht. Ervaringen uit andere sectoren wijzen op een besparing van 5-15 % op de elektriciteitskosten. Het weloverwogen afstemmen van de zuurstoftoevoer op overschotten van duurzame elektriciteit zal op termijn leiden tot indirecte CO₂ emissiereducties. Deze CO₂ emissiereductie is niet specifiek voor de rwwi, maar landelijk of Europees. Afhankelijk van de beluchtingsinstallatie kan dit wel leiden tot een beperkte toename van het elektriciteitsgebruik van de rwwi zelf. Of deze werkwijze significant bijdraagt aan de verduurzaming van het elektriciteitsgebruik is afhankelijk van de ontwikkeling van de elektriciteitsmarkten de komende jaren.

Take home message. Uit de verkenningen blijkt dat wijzigingen in de DWA aanvoer, zoals bufferen over een etmaal, omdraaien dag-nacht, flexibel veranderen zuurstofsetpoints of intermitterend voeden en beluchten (bij gelijkblijvende effluentkwaliteit), bijna geen energiebesparing opleveren. Vaak resulteren deze juist in een geringe toename van het energieverbruik (effecten op lachgasemissies zijn niet bekend). Op basis van ervaringen in andere sectoren, kan gesteld worden dat de mogelijke besparingen in kosten voor het waterschap door het toepassen van flexibel energiemanagement beperkt zijn. De daadwerkelijke besparingen hangen ook sterk af van de huidige (langdurige) prijsafspraken waarvoor energie is ingekocht. Uit dit rapport blijkt, dat afhankelijk van het toekomstige klimaatbeleid in Nederland, flexibel energie-management op rwwi's buiten de waterschapsgrenzen wel kan leiden tot een overall toename in duurzaamheid. Hierbij is de voorspelbaarheid van de DWA aanvoeren op rwwi's van groot belang. Het is daarom zinvol om met het oog op de toekomst te investeren in het vergroten van de voorspelbaarheid van de aanvoer op en van de energievraag van rwwi's.

AFKORTINGENLIJST

Alfafactor	Correctiefactor zuurstofoverdracht van het medium
APX-markt	Amsterdam Power EXchange markt
Betafactor	Zie zuurstofdeficiet
BZV	Biologisch Zuurstof Verbruik
Curtailement	Het tijdelijk beperken van duurzame elektriciteitsproductie
Day-ahead market	Handelsplatform voor levering van elektriciteit de volgende dag
Demand response	Zie vraagsturing
DWA	Droog Weer Aanvoer
Feed-forward Control	Sturing gebaseerd op van te voren bepaalde regels hoe het systeem moet reageren op een actie
GW	Gigawatt
HSA model	Statisch rekenmodel voor actiefslibsysteemen voor N en P
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt uur
N-Kj	Kjeldahl-stikstof
MJA-3	Meerjarenaafspraken Energie efficiëntie (MJA3)
Model Predictive Control	Sturing gebaseerd op dynamische modellen om te voorspellen welke actie nodig is om een bepaald doel met het systeem te bereiken
MPC	Zie Model Predictive Control
Must run	Opwekkingseenheden van elektriciteit die niet (snel) kunnen worden uitgezet (kerncentrales en soms kolencentrales)
MW	Megawatt
MWh	Megawatt uur
Onbalansmarkt	Door TenneT gecontroleerde elektriciteitsmarkt waarop vraag en aanbod op de tijdschaal van 15 minuten worden gebalanceerd
OWT	Ontwerp en Terugrekentool (HSA model)
Real Time Control	Overkoepelende term voor sturing die gebaseerd is op actuele metingen en daaraan een sturingsalgoritme
RTC	Zie Real Time Control
RWA	Regen Weer Aanvoer
Rwzi	Rioolwaterzuiveringsinrichting
Solver	De software die het optimalisatie probleem oplost met betrekking tot een sturingsdoel
Sturingsalgoritme	Een verzameling (reken)regels die beschrijft hoe een sturingsvraagstuk opgelost wordt
Vraagsturing	Sturing van het energiegebruik o.b.v. externe (prijs)signalen
WKK	Warmtekrachtkoppeling
Zuurstofdeficiet	Correctiefactor zuurstofoverdracht voor temperatuur en O ₂ -gehalte

DE STOWA IN HET KORT

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

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

DE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT OP RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	AFKORTINGENLIJST	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	BESCHRIJVING PROCES ZUURSTOFINBRENG RWZI'S	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Achtergronden relatie beluchting rwzi en energiemarkt	3
2.3	Casuslocatie rwzi Katwoude	4
2.4	Energie-efficiëntie zuurstofinbreng	5
3	SCENARIO'S ZUURSTOFINBRENG	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Scenario's beluchting die invloed hebben op het energieverbruik	7
3.3	Zuurstofinbreng scenario's rwzi Katwoude	9
3.4	Energieverbruik O ₂ inbreng scenario's rwzi Katwoude	9
3.5	Bevindingen en discussie scenarioberekeningen	13
4	FLEXSTURING OP HET DWA DEBIET	15
4.1	Inleiding	15
4.2	Sturingsmodellen en -algoritmen voor de DWA aanvoer	15
4.3	Analyse op input gegevens	16
4.3.1	Gebruikte gegevens	16
4.3.2	Bepaling significante invloeden voor DWA	17
4.4	Sturingsalgoritme	21
4.4.1	Variaties op het basismodel	21
4.4.2	Uitkomsten RTC-tools modellering	21
4.5	Conclusies en aanbevelingen	23

5	KOSTEN BESPAREN DOOR VOORSPELBAARHEID ENERGIEVERBRUIK RWZI'S	24
5.1	Aanleiding	24
5.2	Beschrijving vraag en aanbod energiemarkt	24
5.3	Gesprek Eneco	26
5.4	Gesprek E.D. Mij.	27
5.5	Conclusie	27
6	REDUCTIE CO₂ EMISSIES DOOR VRAAGSTURING ENERGIE	29
6.1	Inleiding	29
6.2	Ontwikkeling centrale en decentrale elektriciteitsproductie	30
6.3	Vraagsturing en CO ₂ emissiereductie	30
6.3.1	Geen duurzame overproductie: 2017	31
6.3.2	Duurzame overproductie: 2020+	31
6.4	Vraagsturing en day ahead markt	32
6.5	Vraagsturing en onbalansmarkt	33
6.6	Bevindingen ten aanzien van rwzi's	34
7	DISCUSSIE VERKENNINGEN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT	36
7.1	Potentiele energiebesparing door alternatieve scenario's voor de luchtinbreng	36
7.2	Flexsturing op het DWA debiet om dit zo gelijkmatig mogelijk aan te voeren (egalisatie)	37
7.3	Kostenbesparing door voorspelbaarheid energievraag rwzi's	37
7.4	Reductie CO ₂ emissies door 'vraagsturing'	37
7.5	Synthese verkenningen, conclusies en aanbevelingen	38
BIJLAGE 1	Factsheet rwzi Katwoude en HSA model	40
BIJLAGE 2	Achtergronden beluchttingsberekening	44
BIJLAGE 3	Scenario's zuurstofvraag per uur	47
BIJLAGE 4	Scenario's energieverbruik per uur	49
BIJLAGE 5	Scenario's energieverbruik per dag	52
BIJLAGE 6	Uitkomsten lineair regressiemodel	53

1

INLEIDING

Het grootste deel van de energievraag op een rioolwaterzuiveringsinrichting (verder te noemen rwzi) wordt veroorzaakt door de beluchting. De beluchtingsintensiteit en energievraag hangen sterk samen met de momentane aanvoer van afvalwater. Op het eerste gezicht is hier qua energieverbruik, energiekosten of gebruik van duurzame energie niet veel aan te optimaliseren: het afvalwater komt en moet momentaan worden gezuiverd.

In het watersysteem is gebleken dat via slim inschakelen en uitschakelen van gemalen een (financiële) optimalisatie in energieverbruik en -kosten mogelijk is. Belangrijk daarbij is de voorspelbaarheid van de inzet van gemalen. De aanvoer van een rwzi is (gedeeltelijk) voorspelbaar. Zijn er voor rwzi's wellicht ook kansen voor energiebesparing en/of CO₂ emissiereductie en/of kostenreductie in de bedrijfsvoering? Met andere woorden: 'flexibel energie management' op een rwzi, levert het wat op?

Hierbij kan men denken aan afvalwater bufferen in het stelsel of op de rwzi en zo gelijkmatig mogelijk behandelen op de rwzi óf juist het meeste behandelen gedurende de dalperioden qua energievraag óf zuurstofsetpoints 'omgekeerd evenredig' laten variëren met de aanvoer en energieprijzen (of beschikbaarheid van duurzame energie). De mogelijkheden die er liggen voor het optimaliseren van het gebruik van de huidige infrastructuur voor het transport van afvalwater richting de rwzi, is ook genoemd in Stowa onderzoek 'Rek in afvalwatersystemen'². Hierin is het afvlakken van de DWA-aanvoer richting de rwzi één van de mogelijkheden die kans biedt voor optimalisatie. Naast deze mogelijkheden kan er gebruik gemaakt worden van de voorspelbaarheid van de DWA aanvoer en dus de mogelijkheid met de 'Hourly real time electricity prices in de Day Ahead' energiecontracten of de onbalansmarkt om op energiekosten te besparen. In verschillende (STOWA) onderzoeken³ wordt daar al over geschreven en zijn indicatieve berekeningen en modelleringen uitgevoerd. Belangrijke randvoorwaarde voor de waterschappen is dat de effluentkwaliteit niet mag verslechteren.

Dit STOWA rapport geeft een verslaglegging van een aantal verkenningen die zijn uitgevoerd om de reeds uitgevoerde studies verder te verdiepen. In eerste instantie was het doel om op basis van de uitkomsten een praktijkonderzoek op de rwzi Katwoude als testlocatie te starten. Dat praktijkonderzoek is er uiteindelijk niet gekomen, wegens onvoldoende perspectief⁴. De uitkomsten van de verkenningen worden in de volgende hoofdstukken beschreven. In hoofdstuk 2 wordt het proces van de zuurstofinbreng en de casuslocatie van het gekozen systeem (de rwzi Katwoude) beschreven. In hoofdstuk 3 volgen berekeningen van de potentiële energiebesparingen van een aantal verschillende beluchtings-scenario's. In hoofdstuk 4 wordt met behulp van Model Predictive Control ingegaan op de mogelijkheid de DWA afvalwaterstroom van de rwzi Katwoude in een etmaal te bufferen. In hoofdstuk 5 volgt een verslag-

² Rek in afvalwatersystemen; Hulpmiddel voor verkennen ruimte voor optimalisatie; 30 oktober 2018

³ STOWA 2012-28 LR4, STOWA 2013-36 LR, Waternet – kansen flexibele waterzuiveringen 20160126, KB130001 demand respons een opportuniteit voor Aquafin,

⁴ Deze conclusie volgt uiteindelijk uit de bevindingen in dit rapport. In hoofdstuk 7 wordt dit verder uitgewerkt.

legging van gesprekken met energiemaatschappijen om vast te stellen hoeveel waarde zij hechten aan voorspelbaarheid en hoeveel financieel bespaard kan worden. In hoofdstuk 6 wordt bekeken of 'vraagsturing' van de energievraag van de rwzi's ook een reductie van de CO₂ emissie kan opleveren. In hoofdstuk 7 volgt tot slot een discussie met uiteindelijk een synthese van de verkenningen.

2

BESCHRIJVING PROCES ZUURSTOFINBRENG RWZI'S

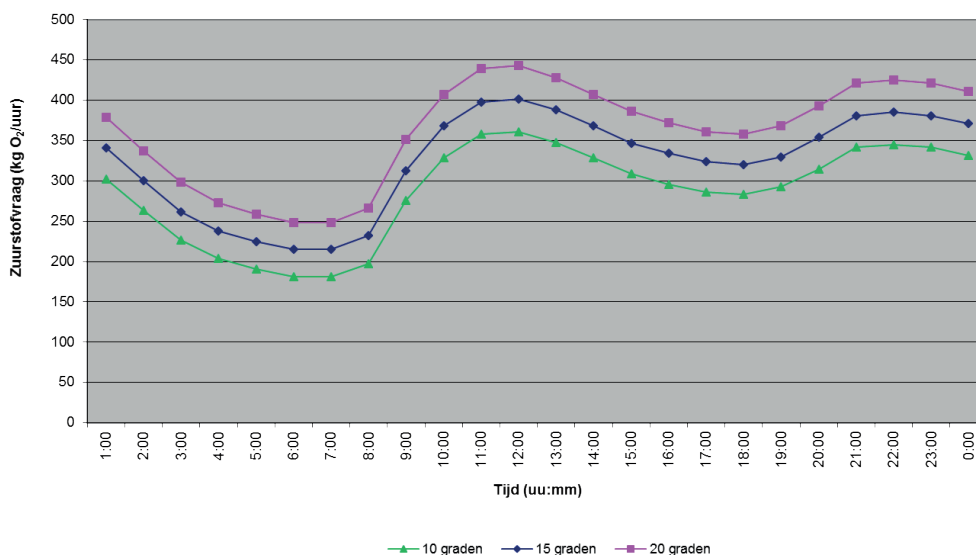
2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt het proces van de zuurstofinbreng op rwzi's beschreven en de relatie tot verschillen in het energieverbruik. In paragraaf 2.2 wordt in algemene zin uitgelegd, hoe de O_2 vraag/inbreng op een rwzi per etmaal verloopt en hoe de relatie kan worden gelegd met de energiemarkt. In paragraaf 2.3 wordt de casuslocatie rwzi Katwoude beschreven (met een factsheet in bijlage 1). In paragraaf 2.4 volgt een beschouwing over de energie-efficiëntie van de zuurstofinbreng systemen op rwzi's.

2.2 ACHTERGRONDEN RELATIE BELUCHTING RWZI EN ENERGIEMARKT

Bij de afbraakprocessen in de rwzi wordt veel lucht ingebracht, wat zorgt voor circa 50-75 % van de totale energievraag. Hiermee worden de in het actieve slib aanwezige bacteriën in staat gesteld de in het afvalwater aanwezige verontreinigingen af te breken en te adsorberen. Daarbij ontstaat weer nieuw slib, wat door bezinking uit het afvalwater wordt afgescheiden. In figuur 2.1 is als voorbeeld van een rwzi bij DWA de O_2 vraag in een etmaal per uur bij verschillende temperaturen weergegeven.

FIGUUR 2.1

BENODIGDE O_2 INBRENG PER UUR VAN EEN RWZI ONDER DWA CONDITIES (TEMPERATUURSAFHANKELIJK; ZUURSTOFSETPOINT 2,0 MG O_2 /L)

Deze zuurstofvraag kan worden beïnvloed door egalisatie/buffering van de aanvoer, aanpassing van de zuurstofsetpoints, intermitterende beluchting (aan-uit bedrijven). De vraag is of hiermee energie kan worden bespaard. Normaliter is de O_2 en/of NH_4 en NO_3 regeling bedoeld

voor een optimale omzetting en zo gunstig mogelijke N-totaal in het effluent. In plaats van de 'zuurstof' regeling kan ook gedacht worden aan een zogenaamde 'energie-regeling', waarbij juist een minimaal energieverbruik maatgevend is. Toepassing van een dergelijke energie-regeling is alleen toepasbaar bij een DWA situatie, bij een regenweer aanvoer (RWA) vervalt de energieregeling. Daarnaast is de vraag of deze aanpassingen effect kunnen hebben op de kosten voor het elektriciteitsverbruik door afstemming/synchronisatie met piek en dal tarieven. Als het dus mogelijk is de energievraag te verhogen in de daluren en te verlagen in de piekuren, is er een kostenbesparing in beeld.

Door de toename van duurzaam opgewekte energie (wind en zon) is de verwachting dat de prijs van energie in de nabije toekomst nog sterker zal gaan fluctueren dan nu al het geval is. In Duitsland krijgt de gebruiker momenteel al geld toe wanneer deze energie afneemt op momenten dat er teveel energie geproduceerd wordt. Met het oog op de aanstaande ontwikkelingen in de energiemarkt (flexibele energiecontracten, 'demand response' of vraagsturing) kan het slim regelen van de beluchting van rwzi's naar verwachting kostenbesparingen opleveren. Daarnaast is het interessant te bekijken of het kan bijdragen aan het mogelijk maken van een overgang naar duurzame energiebronnen zoals wind- en zonne-energie.

2.3 CASUSLOCATIE RWZI KATWOUDE

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier heeft de rwzi Katwoude beschikbaar gesteld voor mogelijke toekomstige praktijktesten. Daarom zijn de verkenningen vooraf uitgevoerd met deze rwzi in gedachten. In bijlage 1 is de factsheet van de rwzi Katwoude weergegeven, zie figuur 2.2. Ook zijn in de bijlage de ontwerp-parameters gegeven die gebruikt zijn om het HSA rekenmodel (OWT 3.0) te kalibreren en om verschillende scenario's door te rekenen. Toepassing energieregeling is alleen toepasbaar bij een DWA profiel, bij een regenweer aanvoer (RWA) profiel vervalt de energieregeling.

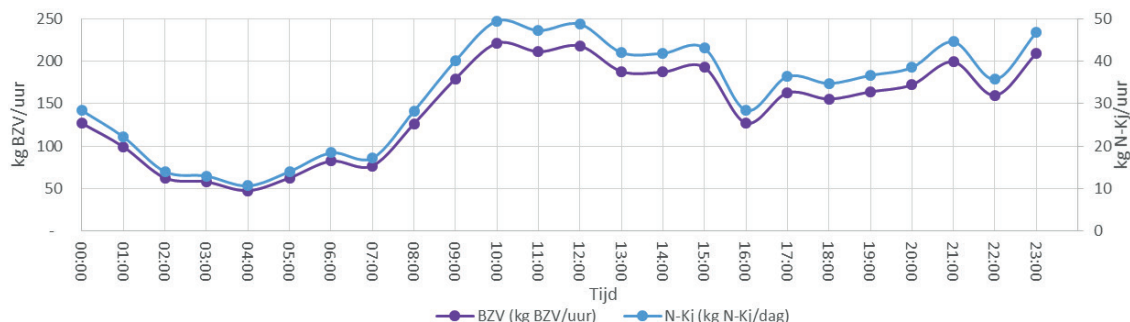
FIGUUR 2.2

OVERZICHT LOCATIE RWZI KATWOUDE (LUCHTFOTO 2016)



De combinatie van het hydraulisch DWA profiel en de gemiddelde influentconcentraties resulteren in vervuilingsvrachten per component die in één uur aangevoerd worden. Als voorbeeld zijn de vervuilingsvrachten voor BZV en N-Kj bij het Katwoude DWA profiel weergegeven in figuur 2.3.

FIGUUR 2.3 AANVOERVRACTEN VAN BZV EN N-KJ PER UUR (KG/UUR) BIJ DWA PATROON VAN DE RWZI KATWOUDE



Deze vrachten hebben een directe relatie met de zuurstofvraag en dus ook met de energievraag. Dit profiel is het basis uitgangspunt voor de scenario berekeningen in hoofdstuk 3.

De effluentkwaliteit van de rwzi mag niet verslechteren. De rwzi Katwoude wordt gestuurd op een laag zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l. Daardoor is het jaargemiddelde NH₄-N gehalte in 2016 relatief hoog (6 mg/l). Dit is niet representatief voor veel andere waterschappen die juist sturen op een laag NH₄-N gehalte van 1,0 mg O₂/l door middel van een relatief hoog zuurstofsetpoint van 2 mg O₂/l. De bevindingen moeten dan ook relatief (in verhouding) beschouwd worden.

2.4 ENERGIE-EFFICIËNTIE ZUURSTOFINBRENG

De energievraag van de beluchting is direct gekoppeld aan de zuurstofvraag met daarbij een aantal factoren die (soms) te beïnvloeden zijn.

1. De temperaturen en de zuurstofsetpoints/gehalten
2. De energie-efficiëntie van het type beluchtingssysteem
3. De (lucht)belasting van de beluchtingssystemen
4. Variaties in de aanvoer

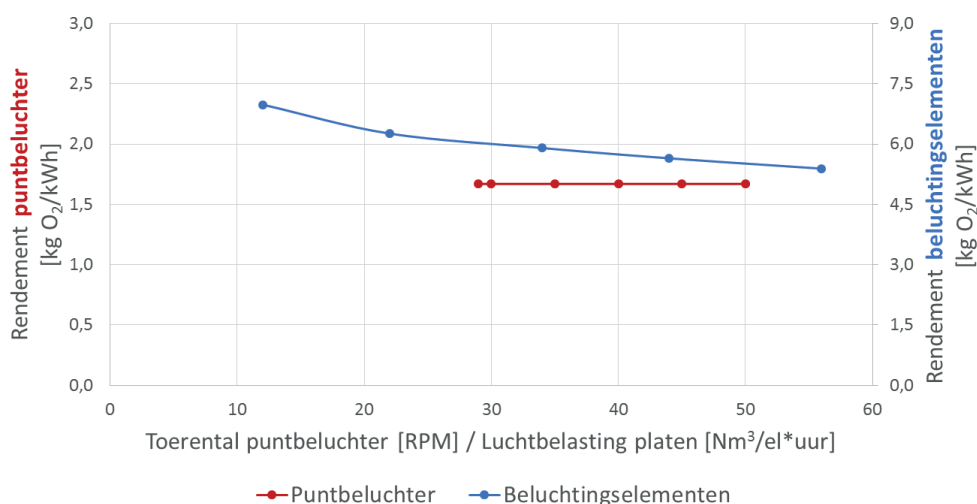
Ad 1. In bijlage 2 is de structuur van de beluchtingsberekening toegelicht met uitleg van het effect van de temperatuur, het medium en het zuurstofgehalte. De temperatuur en het medium worden in deze studie beschouwd als een systeem dat vastligt. Het zuurstofgehalte (setpoints) kan (binnen bepaalde grenzen) worden gevarieerd.

Ad 2. De energie-efficiëntie van de zuurstofinbreng (kg O₂/kWh) verschilt per beluchtingssysteem maar ook per fabrikant en type. Bij puntbeluchters hangt de hoeveelheid ingebrachte zuurstof per kWh af van het toerental (RPM) en indien van toepassing van de indompeldiepte. Bij beluchtings-elementen (platen of schotels) hangt de hoeveelheid ingebracht zuurstof per kWh af van de lucht-toevoer per oppervlak beluchtingselement (Nm³/m²*h). Beluchtingsplaten kunnen circa drie maal zoveel zuurstof inbrengen als puntbeluchters. Puntbeluchters verzorgen echter gelijktijdig voortstuwing van het water als zuurstofinbreng. De voortstuwing (à 3 W/m³) van het water moet voor een goede vergelijking tussen de twee beluchtingssystemen in de beschouwing meege-nomen worden, zie ook figuur 2.6. Omdat

het in deze studie het niet gaat om een vergelijking tussen de beluchtingssystemen, worden verschillen wel in beeld gebracht, maar niet verder opgenomen als conclusie van deze studie. Dat er flinke verschillen zijn in energie-efficiëntie tussen verschillende beluchtingssystemen is bekend. Het gaat er nu om of er uitgaande van een gegeven situatie energieoptimalisatie mogelijk is.

Ad 3. In figuur 2.4 is de energie-efficiëntie voor puntbeluchting en bellenbeluchting met platen weergegeven. Puntbeluchters kunnen door het toerental te verhogen meer zuurstof inbrengen ($\text{kg O}_2/\text{uur}$). Hierdoor neemt het energieverbruik echter ook toe. Netto neemt de efficiency van de zuurstofinbreng iets toe, maar dit is niet significant. Bij de modellering is voor de rwzi Katwoude een vast inbrengrendement aangehouden van $1,67 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$, op basis van specificatie beluchting rwzi Katwoude (de relatie met het toerental is niet bekend). Bij de scenario's met bellenbeluchtingselementen is voor een vast aantal elementen gekozen en deze zijn allen in bedrijf (geen aan/afschakeling van pakketten). Van bellenbeluchtingselementen (platen) is ruim voldoende leveranciersinformatie beschikbaar om bij verschillende belastingen de efficiency te kunnen berekenen. Door de luchthoeveelheid die via de platenbeluchtingselementen wordt ingebracht te verhogen, neemt de zuurstofinbreng ($\text{kg O}_2/\text{uur}$) toe. Echter, bij een toenemende luchtbelasting zal de belddiameter toenemen en verslechtert het inbrengrendement, evenals de energie-efficiëntie van de zuurstofinbreng en dus de energievraag.

FIGUUR 2.4

ENERGIE-EFFICIENTIE ZUURSTOFINBRENG PUNT- EN BELLENBELUCHTING ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$)

Aan de hand van de belasting van het beluchtingssysteem wordt voor de verschillende scenario's het energieverbruik bepaald.

Ad 4. Gedurende de dag wijzigt het aanvoerdebiet en daarmee ook de benodigde zuurstof ten behoeve van de omzetting. Het energieverbruik varieert daarmee ook gedurende de dag. Aangezien de puntbeluchter vrijwel geen efficiencyverschil kent bij een hogere dan wel lagere belasting, zal bij aanpassingen/afvlakken van de aanvoer de energie-inbreng gedurende de dag gelijk blijven. Voor de bellenbeluchting ligt dit anders. Daar is wel een efficiencyverschil, omdat de elementen gemiddeld anders belast worden, zie verder hoofdstuk 3.

3

SCENARIO'S ZUURSTOFINBRENG

3.1 INLEIDING

Zoals in paragraaf 2.4 is aangegeven, varieert de zuurstofvraag in een rwzi per uur van de dag en lijkt er beïnvloeding van het energieverbruik mogelijk door het variëren van de aanvoer, de zuurstofsetpoints, intermitterende aanvoer en beluchting. Er zijn diverse scenario's mogelijk, deze worden beschreven in paragraaf 3.2. In paragraaf 3.3 wordt de zuurstofvraag van enkele scenario's als voorbeeld gegeven. In paragraaf 3.4 staan de verschillende energieverbruiken van de scenario's vermeld, met in paragraaf 3.5 de bevindingen en de conclusies.

3.2 SCENARIO'S BELUCHTING DIE INVLOED HEBBEN OP HET ENERGIEVERBRUIK

In tabel 3.1 staan (in principe) 16 verschillende scenario's beschreven die kunnen worden toegepast en die invloed hebben op de zuurstofinbreng, waarbij de effluentkwaliteit (grosso modo) gelijk blijft. De gehalten N-Kj ($\text{NH}_4\text{-N}$) en $\text{NO}_3\text{-N}$ kunnen ten opzichte van elkaar wel variëren. Bij de rwzi Katwoude is door het lage zuurstofsetpoint $\text{NH}_4\text{-N}$ relatief hoog en $\text{NO}_3\text{-N}$ relatief laag. Bij het verhogen van het zuurstofsetpoint zullen deze dus verschuiven ($\text{NH}_4\text{-N}$ iets omlaag en $\text{NO}_3\text{-N}$ iets omhoog). Indien de methodiek wordt toegepast op andere rwzi's in Nederland (zoals BCFS, mUCT systemen), waarbij juist met hogere zuurstofsetpoint wordt gewerkt, kan deze verschuiving van $\text{NO}_3\text{-N}$ naar $\text{NH}_4\text{-N}$ ongewenst zijn.

Scenario 1a tot en met 3a betreft de toepassing van puntbeluchters, scenario 5a tot en met 6c betreft dezelfde scenario's voor bellenbeluchting met platen (fictief, want de rwzi Katwoude is uitgerust met puntbeluchters, zie paragraaf 2.3). Scenario 4 is vervallen wegens de complexiteit van de berekening en de beperkte meerwaarde.

Bij de scenario's 1a, 1b, 1c en 5a, 5b en 5c wordt het zuurstofsetpoint gevarieerd. Bij scenario 1d en 5d worden voor dag en nacht andere zuurstofsetpoint gehanteerd, overeenkomend met wisselende stroomprijzen (zuurstofsetpoint nacht hoog en zuurstofsetpoint dag laag, dan wordt het slib over een etmaal toch goed opgefrist).

Bij de scenario's 2a, 2b, 2c en 6a, 6b en 6c wordt de aanvoer volledig geëgaliseerd over een etmaal, door bufferen in het stelsel of in een (aparte) buffer op de rwzi. Er wordt dan in de nacht meer DWA behandeld dan overdag. Bij de scenario's 2b en 2c en 6b en 6c wordt om het uur intermitterend gevoed en belucht. Bij de scenario's 2c en 6c worden ook nog de zuurstofsetpoint gevarieerd. Bij scenario 3a word DWA dag en nacht omgewisseld. In bijlage 2 is berekend dat intermitterende beluchting maximaal om de 15-20 minuten moet schakelen. Bij de model-berekeningen is uitgegaan van schakelen om het uur, om de modelberekeningen te vereenvoudigen. Of er een effect is, wordt daarmee wel zichtbaar.

TABEL 3.1

KENMERKEN SCENARIO'S MODELLERING ENERGIEVERBRUIK RWZI KATWOUDE

Scenario	Type beluchting	Aanvoerprofiel	Zuurstofsetpoint (mg O ₂ /l)
Scenario 1			
1.a	Puntbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel	1,0
1.b	Puntbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel	0,5
1.c	Puntbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel	2,0
1.d	Puntbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel, zuurstofsetpoint dag (07:00 - 18:00) laag, zuurstofsetpoint nacht (19:00 - 06:00) hoog	0,5 - 2,0
Scenario 2			
2.a	Puntbeluchting	Afgevlakt DWA aanvoerprofiel*	0,5
2.b	Puntbeluchting	Afgevlakt DWA aanvoerprofiel, intermitterend beluchten en voeden	0,5
2.c	Puntbeluchting	Afgevlakt DWA aanvoerprofiel, intermitterend zuurstofsetpoint wisselend om het uur	0,5 - 2,0
Scenario 3			
3.a	Puntbeluchting	Gespiegeld DWA aanvoerprofiel (dag-nacht omgedraaid)	0,5
Scenario 4			
4.a	Puntbeluchting** (Scenario vervallen)	Standaard DWA aanvoerprofiel, intermitterend beluchten en voeden (Scenario vervallen)	0,5 (Scenario vervallen)
Scenario 5			
5.a	Bellenbeluchting***	Standaard DWA aanvoerprofiel	1,0
5.b	Bellenbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel	0,5
5.c	Bellenbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel	2,0
5.d	Bellenbeluchting	Standaard DWA aanvoerprofiel, zuurstofsetpoint dag (07:00 - 18:00) laag, zuurstofsetpoint nacht (19:00 - 06:00) hoog	0,5 - 2,0
Scenario 6			
6.a	Bellenbeluchting	Afgevlakt DWA aanvoerprofiel	0,5
6.b	Bellenbeluchting	Afgevlakt DWA aanvoerprofiel, intermitterend beluchten en voeden, zuurstofsetpoint 0,5	0,5
6.c	Bellenbeluchting	Afgevlakt DWA aanvoerprofiel, intermitterend zuurstofsetpoint wisselend om het uur	0,5 - 2,0

* Afgevlakt aanvoerprofiel betekent: uitsmeren over een etmaal door bufferen ergens in de aanvoer.

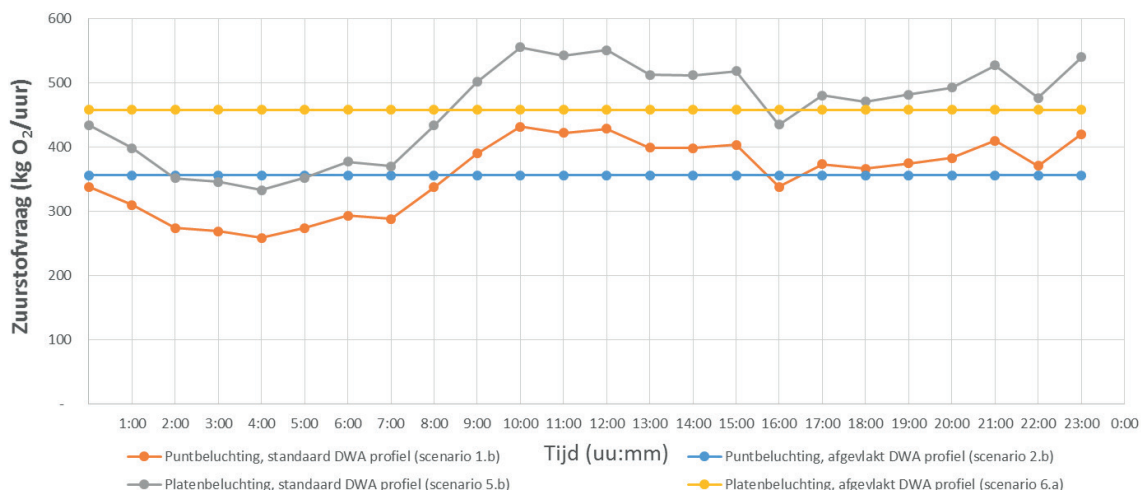
** Niet doorgerekend in verband met complexiteit berekening en de beperkte meerwaarde.

*** Er is uitgegaan van beluchttingsplaten om te vergelijken met puntbeluchters.

3.3 ZUURSTOFINBRENG SCENARIO'S RWZI KATWOUDE

Figuur 3.1 geeft als voorbeeld de zuurstofinbreng voor een viertal scenario's weer. Voor alle vier de scenario's is het zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l van de rwzi Katwoude gehanteerd. Voor alle scenario's is de zuurstofvraag opgenomen in bijlage 3.

FIGUUR 3.1 ZUURSTOFVRAAG (KG O₂/UUR) PER SCENARIO VOOR PUNTBELUCHTING (SCENARIO 1.B EN 2.A - ALFAFACTOR 0,9) EN BELLENBELUCHTING (SCENARIO 5.B EN 6.A ALFAFACTOR 0,7) BIJ EEN ZUURSTOFSETPOINT VAN 0,5 MG O₂/L

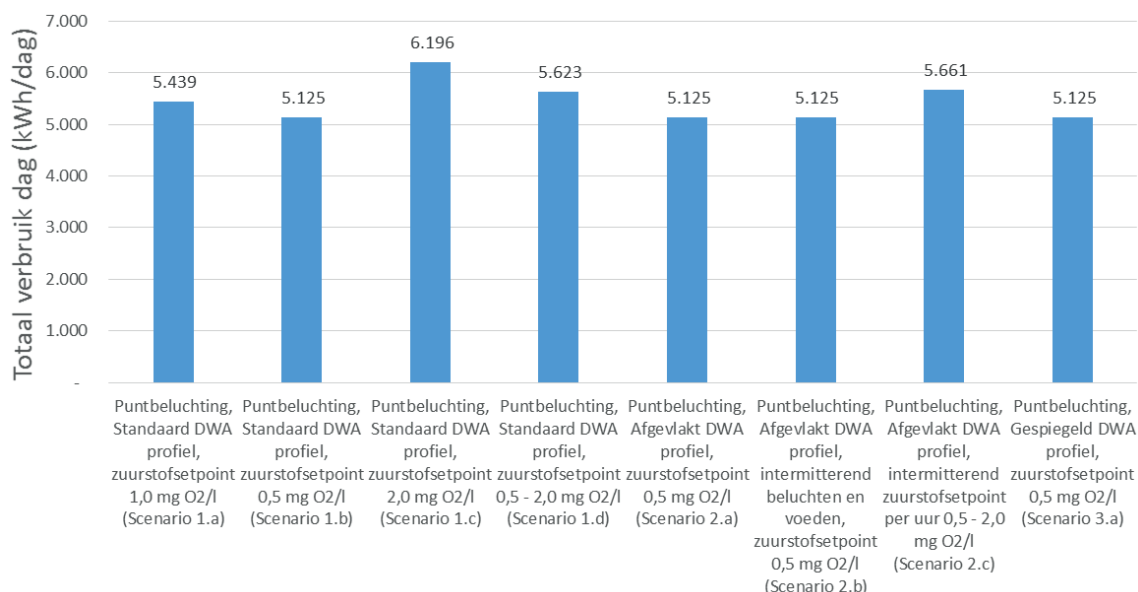


In figuur 3.1 is te zien dat bij een standaard DWA aanvoerpatroon (scenario 1.b en 5.b) de zuurstofvraag varieert tussen de 250 en 550 kg O₂/h. Bij een afgevlakte DWA aanvoer, scenario 2.a en 6.a, bedraagt de zuurstofvraag respectievelijk 351 en 458 kg O₂/h. De zuurstofvraag ligt hoger voor de systemen met belLENbeluchting. Dit heeft te maken met de lager alfafactor (0,7 in plaats van 0,9).

3.4 ENERGIEVERBRUIK O₂ INBRENG SCENARIO'S RWZI KATWOUDE

Op basis van de zuurstofvraag, zuurstofgehalte en inbreng efficiency van de beluchtingssystemen kan de energievraag op de rwzi worden berekend. Dit is voor alle in paragraaf 3.2 benoemde scenario's uitgevoerd. In bijlage 4 is het verloop van het energieverbruik per uur voor alle scenario's weergegeven. In de figuren 3.2 en 3.3 is het energieverbruik voor de scenario's uitgerust met puntbeluchting respectievelijk belLENbeluchting weergegeven.

FIGUUR 3.2 ENERGIEVERBRUIK PER DAG (KWH/DAG) VOOR SCENARIO'S UITGERUST MET PUNTBELUCHTING

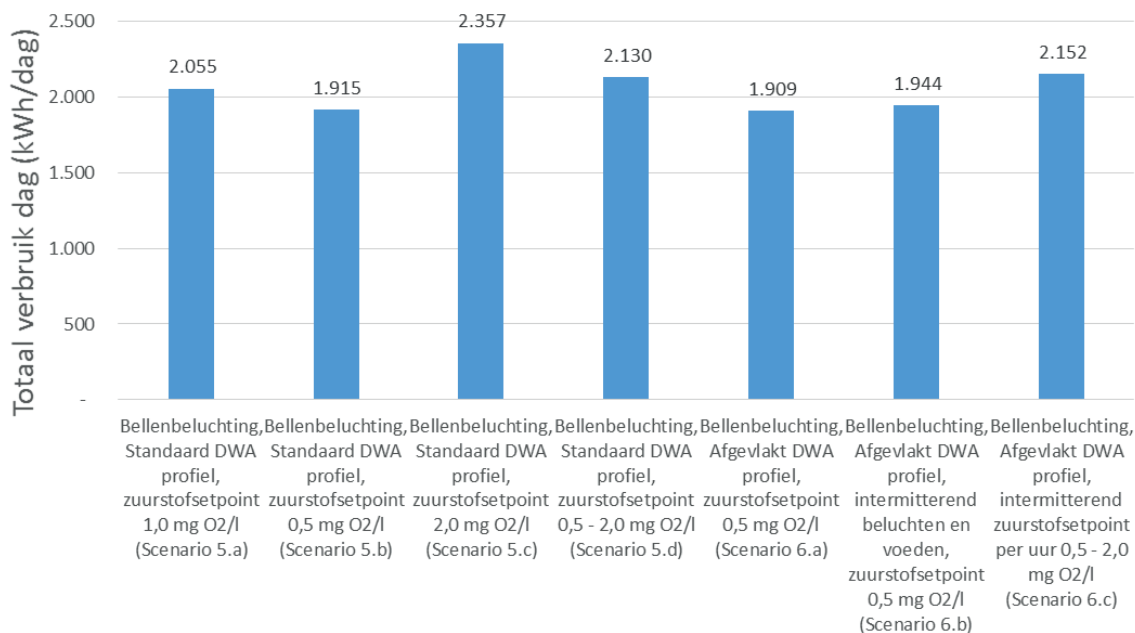


Op basis van figuur 3.2 kunnen de volgende conclusies worden getrokken met betrekking tot het energieverbruik van verschillende scenario's bij puntbeluchting:

- Er zijn voor puntbeluchters energetisch gezien geen verschillen tussen de scenario's met een gelijkwaardige zuurstofconcentratie van 0,5 mg O₂/l (1.b, 2.a, 2.b en 3.a). Dit wordt veroorzaakt door een gelijkblijvend zuurstofinbrengrendement bij verschillende toerentallen en de gelijkblijvende totale te behandelen vracht
- Een hoger zuurstofsetpoint gedurende een dagdeel of de gehele dag resulteert in een hoger energieverbruik. Dit vanwege onder andere de stijgende betafactor bij een hogere zuurstofconcentratie
- Het spiegelen van het DWA profiel over een dag en nacht (scenario 3.a) heeft energetisch gezien geen verschil met een standaard DWA profiel (scenario 1.b). Dit door een gelijkblijvend zuurstofinbrengrendement bij verschillende toerentallen en de gelijkblijvende totale dag-vracht

Aangezien de rwzi Katwoude draait op een minimaal zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l is er in deze scenario's geen energiebesparing mogelijk. Andere rwzi's in Nederland hebben vaak een hoger zuurstofsetpoint: 1,5 of 2,0 mg O₂/l. Daarbij is wel besparing mogelijk. Rwzi Katwoude draait daarbij op een relatief hoog NH₄-N gehalte in het effluent (6,0 mg NH₄-N/l). Bij andere waterschappen wordt vaak de keuze gemaakt om het NH₄-N gehalte zo laag mogelijk te houden en dus het zuurstofsetpoint hoog. Dit wordt ingegeven door de eisen van voor het ontvangende oppervlaktewater en de garantie op een goede slibkwaliteit (weinig draadvormers). De speelruimte is dus beperkt.

FIGUUR 3.3 ENERGIEVERBRUIK PER DAG (KWH/DAG) VOOR SCENARIO'S UITGERUST MET BELLENBELUCHTING



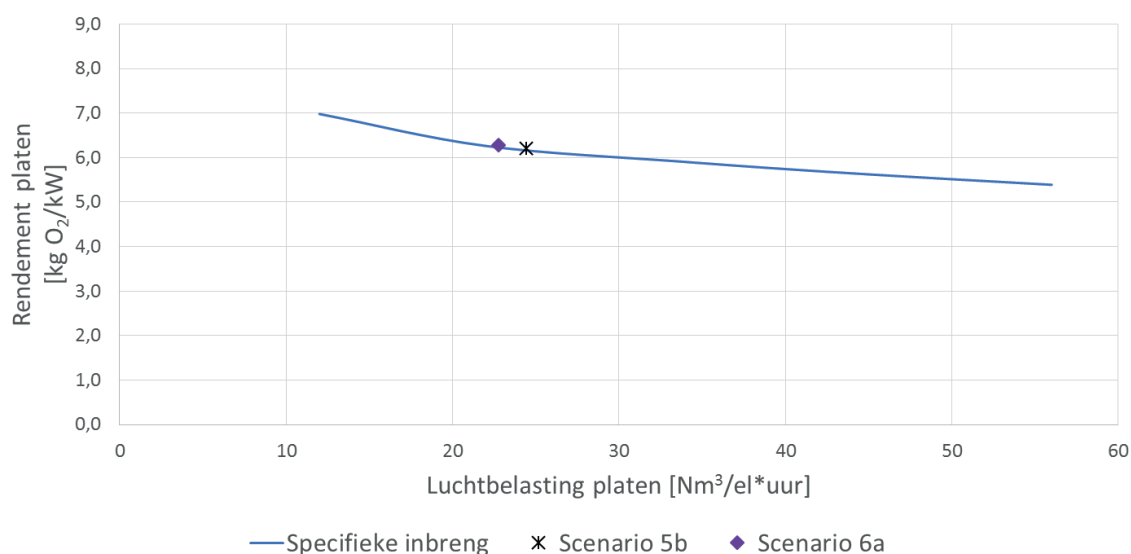
Op basis van figuur 3.3 kunnen de volgende conclusies worden getrokken met betrekking tot het energieverbruik van verschillende scenario's bij belLENbeluchting:

- Bij een standaard DWA aanvoer (scenario 5.b) fluctueert de aanvoer en daarmee de luchtbelasting van de platen. Over de hele dag gezien is de luchtbelasting hoger ten opzichte van het volledig afvlakken van de DWA aanvoer (scenario 6.a). Hierdoor ligt het energiegebruik voor scenario 5.b dan ook (iets) hoger dan in scenario 6.a, zie voor een toelichting figuur 3.4
- Intermitterend beluchten (scenario 6.b) is voor belLENbeluchting energetisch gezien niet gunstig ten opzichte van een constante beluchting (scenario 6.a). Dit doordat in een kortere periode de benodigde zuurstof moet worden ingebracht. De luchtbelasting is daardoor hoger en het zuurstofinbrengrendement lager

In figuur 3.4 is voor de scenario's 5b en 6a de (gewogen) gemiddelde elementbelasting weergegeven. In beide scenario's is het zuurstofsetpoint ingesteld op 0,5 mg O₂/l⁵. In scenario 5.b wordt het standaard DWA aanvoerprofiel gevolgd. In scenario 6.a is het afgevlakte DWA aanvoerprofiel weergegeven. Scenario 6.a de laagste luchtbelasting over de platen. Scenario 5.b heeft door toepassing van het standaard DWA profiel niet een gelijkmatige aanvoer. Om de wisselingen op te vangen dient er bij piekaanvoer meer zuurstof ingebracht te worden, over een gehele dag gezien, zorgt dit voor een hogere belasting van de platen. Deze hogere belasting zorgt ervoor dat er (iets) meer energie nodig is per kilogram in te brengen zuurstof.

5 Het zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l wordt toegepast bij rwzi Katwoude. Dit is de ondergrens waar een rwzi op kan draaien. Lagere zuurstofsetpoints kunnen resulteren in verstoringen van de microbiologie en daarmee de stabiliteit en effluentkwaliteit van de rwzi.

FIGUUR 3.4 ELEMENTENBELASTING (NM³/ELEMENT*UUR) VERSUS RENDEMENT (KG O₂/KWH) BELLENBELUCHTING BIJ EEN ZUURSTOFSETPOINT VAN 0,5 MG O₂/L



In tabel 3.2 zijn alle uitkomsten samengevat en hierbij is voor zowel punt- als belLENbeluchting de uitkomst van elk scenario vergeleken met de basisscenario's.

Deze basisscenario's bestaan uit het standaard DWA profiel en een zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l bij de puntbeluchters van rwzi Katwoude en uit een fictieve belLENbeluchting met hetzelfde standaard DWA profiel en het zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l. De verschillen tussen punt en belLENbeluchting zijn evident, maar niet van belang voor deze studie.

TABEL 3.2 SAMENVATTING RESULTATEN VAN DE SCENARIO'S TEN OPZICHTE VAN DE BASISSCENARIO'S (EEN NEGATIEVE BESPARING BETEKENT MEER VERBRUIK).

Scenario	Energieverbruik (kWh/dag)	Energiebesparing t.o.v. basis-scenario (%)
Puntbeluchting		
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 1.b)	5.125	basisscenario
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 1,0 mg O ₂ /l (Scenario 1.a)	5.439	-6,1
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 2,0 mg O ₂ /l (Scenario 1.c)	6.196	-20,9
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 (dag) - 2,0 (nacht) mg O ₂ /l (Scenario 1.d)	5.623	-9,7
Afgevlakt DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 2.a)	5.125	0,0
Afgevlakt DWA profiel, intermitterend beluchten en voeden, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 2.b)	5.125	0,0
Afgevlakt DWA profiel, intermitterend zuurstofsetpoint per uur 0,5 - 2,0 mg O ₂ /l (Scenario 2.c)	5.661	-10,5
Gespiegeld DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 3.a)	5.125	0,0
Bellenbeluchting		
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 5.b)	1.915	basisscenario
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 1,0 mg O ₂ /l (Scenario 5.a)	2.055	-7,4
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 2,0 mg O ₂ /l (Scenario 5.c)	2.357	-23,1
Standaard DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 (dag) - 2,0 (nacht) mg O ₂ /l (Scenario 5.d)	2.130	-11,3
Afgevlakt DWA profiel, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 6.a)	1.909	0,3
Afgevlakt DWA profiel, intermitterend beluchten en voeden, zuurstofsetpoint 0,5 mg O ₂ /l (Scenario 6.b)	1.944	-1,5
Afgevlakt DWA profiel, intermitterend zuurstofsetpoint per uur 0,5 - 2,0 mg O ₂ /l (Scenario 6.c)	2.152	-12,4

Op basis van de in tabel 3.2 weergegeven vergelijking van de resultaten, blijkt:

- Dat door het lage zuurstofsetpoint (0,5 mg O₂/l) waarop rwzi Katwoude bedreven wordt, het setpoint niet verder omlaag kan. Verhogen van het zuurstofsetpoint veroorzaakt een hoger energieverbruik. In het specifieke geval van rwzi Katwoude is er geen energiebesparing te realiseren door verlaging van het zuurstofsetpoint. Voor rwzi's in Nederland die op een hoger zuurstofsetpoint werken (1,5 - 2,0 mg O₂/l), kan verlagen van het zuurstofsetpoint gedurende de dag of een dagdeel wel energiebesparing opleveren. Dit geldt voor zowel rwzi's die zijn uitgerust met puntbeluchting als met bellenbeluchting;
- Het omdraaien van het DWA patroon in de dag en nacht levert geen energiebesparing op. Het totale energieverbruik over een dag blijft gelijk aan die bij een standaard DWA patroon;
- Het bufferen van het DWA en deze egaliseren over een etmaal levert bij puntbeluchting geen energiebesparing op. Dit komt omdat op basis van de algemene kennis is aangenomen dat het rendement van de puntbeluchter niet wordt beïnvloed door het toerental (voor de rwzi Katwoude zijn geen gegevens voorhanden). Bij bellenbeluchting treedt een minimale energiebesparing op (van 0,3 %). Dit komt door de lagere luchtbelasting van de elementen. Door de lagere luchtbelasting is het zuurstofinbrengrendement hoger en neemt het energie-verbruik per ingebrachte kilogram zuurstof af;
- Het bufferen van het DWA en deze egaliseren over een etmaal in combinatie met intermitterend voeden en beluchten, resulteert bij toepassing van puntbeluchters niet tot een energiebesparing, bij toepassing van bellenbeluchting (door het hogere O₂ deficit) juist tot een hoger energieverbruik.

3.5 BEVINDINGEN EN DISCUSSIE SCENARIOBEREKENINGEN

Op basis van de scenarioberekeningen is het volgende geconstateerd:

1. Het energierendement van puntbeluchters varieert (bijna) niet met het toerental (met de belasting dus);
2. Bij bellenbeluchting (fictief) van de rwzi Katwoude is wel een effect van de belasting zichtbaar, omdat bij lagere elementbelasting de inbreng efficiëntie hoger is;
3. Uiteraard is het energieverbruik van bellenbeluchting fors lager dan van puntbeluchting, maar dat is algemeen bekend en geen onderdeel van deze studie;
4. Wijzigingen in de aanvoer, dag-nacht omdraaien, of intermitterend voeden en beluchten, leveren geen energiebesparing maar leveren juist een toename van het energieverbruik op. Bufferen over een etmaal heeft voor bellenbeluchting een gering energievoordeel;
5. Het verhogen van het zuurstofsetpoint van 0,5 mg O₂/l (van de rwzi Katwoude) naar 1,0 en 2,0 mg O₂/l levert een forse toename van het energieverbruik op, tot wel 20 %. Dit zuurstofsetpoint van de rwzi Katwoude is een minimale waarde waarmee rwzi's worden bedreven. Elders in Nederland, waar BCFS en mUCT systemen worden toegepast, opereren deze rwzi's meestal op een zuurstofsetpoint van 2,0 mg O₂/l om een goede slibkwaliteit en lage NH₄-N te garanderen. Deze rwzi's kunnen met een verlaging van het zuurstofsetpoint naar 1,5 of 1,0 mg O₂/l zeker procenten (tot 5-10 %) energie besparen op de beluchting. Dat kan invloed hebben op de slibkwaliteit (zie paragraaf 7.1) en zal waarschijnlijk ook leiden tot een (iets) hoger NH₄-N gehalte (maar lager NO₃-N gehalte).

Indien bij het toepassen van een ander beluchttingsregime met lagere tarieven gewerkt kan worden, moet het energieverbruik in ieder geval niet of weinig toenemen. Los van de zuurstofsetpoint discussie is het egaliseren van de aanvoer over een etmaal dus een goede moge-

lijkheid. Het omdraaien van dag-nacht is ook mogelijk, maar de zuurstofsetpoints moeten dan dus wel gelijk blijven, om geen negatief effect te hebben. Intermitterend voeden en beluchten per kwartier is alleen bekeken in combinatie met egalisatie over het etmaal. Deze oplossing is ook mogelijk als daarmee een voordeel op de energieprijis kan worden verkregen. Op het energieverbruik is er geen besparing.

4

FLEXSTURING OP HET DWA DEBIET

4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de mogelijkheid om flexsturing op het DWA debiet operationeel toe te passen op de rwzi Katwoude. Hierbij wordt gekeken naar het voorspellen van de aanvoer en het toepassen van sturingsmechanismen.

Het onderzoek kijkt naar de bruikbaarheid van de data en niet naar de technische haalbaarheid voor aansluiting van de systemen.

4.2 STURINGSMODELLEN EN -ALGORITMEN VOOR DE DWA AANVOER

Zoals in paragraaf 2.4 Ad 4 is aangegeven, heeft het egaliseren/afvlakken van de DWA aanvoer invloed op het energieverbruik. In deze studie is met een modelmatige benadering bekeken welke buffering/egalisatie mogelijk/nodig is om de DWA aanvoer maximaal over een etmaal uit te smeren.

De workflow voor sturing in processen bestaat grofweg uit drie delen, zie figuur 4.1. In deze studie is een verkenning gedaan naar de eerste twee delen.

FIGUUR 4.1

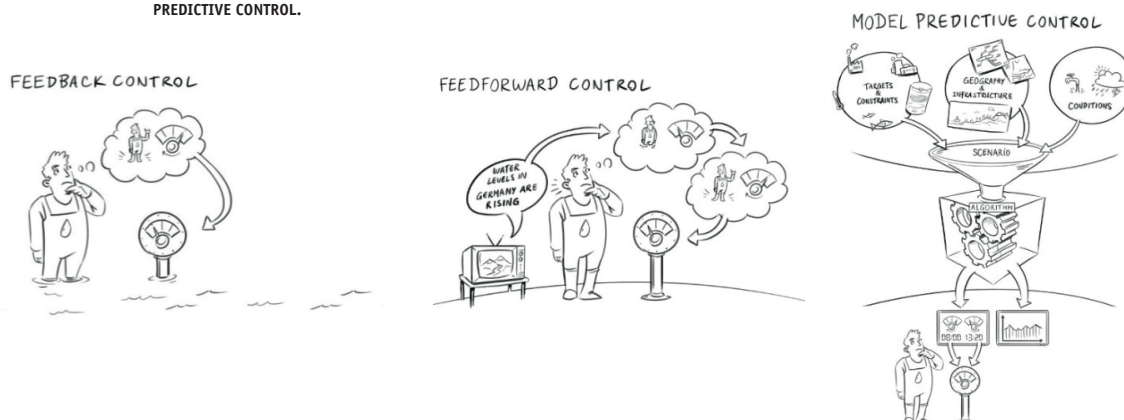
HET STURINGSPROCES IN EEN BLOKKENSHEMA. IN DEZE STUDIE WORDT ALLEEN NAAR DE EERSTE TWEE BLOKKEN GEKEKEN



De inputgegevens kunnen bestaan uit historische, actuele en voorspelde informatie. Typisch voor historische en actuele gegevens zijn metingen van debieten, waterstanden, temperatuur, stoffen-gehalte, enz. Voor voorspelde informatie zijn weersvoorspellingen (neerslag, temperatuur), Droog Weer Afvoer (DWA) en energie-aanbod en energieprijzen belangrijke bronnen.

Met behulp van het sturingsalgoritme is een strategie bepaald die ingezet moet worden om het beoogde doel te halen. Deze output kan een nieuw aan- of afslagpeil voor een gemaal zijn, een toerental of wat ook maar nodig is om het systeem anders te sturen. Een belangrijk element bij de implementatie van sturing is dat er vaak een verschil zit tussen wat het algoritme uitlevert aan data en wat de sturingsobjecten nodig hebben. Voor het sturingsalgoritme kan een driedeling gemaakt worden, zie figuur 4.2.

FIGUUR 4.2 DE WERKING VAN VERSCHILLENDE STURINGSMETHODIEKEN GEÏLLUSTREERD: 1) FEEDBACK CONTROL, 2) FEEDFORWARD CONTROL EN 3) MODEL PREDICTIVE CONTROL.



1. **Feedback Control** is een sturingsmethodiek waarbij actuele waarden vergeleken worden met een doel. Een voorbeeld hiervan is het handhaven van een waterpeil, waarbij het actuele waterpeil wordt vergeleken met het gewenste waterpeil. Op basis van het verschil wordt een actie in gang gezet (bijvoorbeeld gemaal aan/uit)
2. Een andere methode is **Feedforward**, waarbij de actuele informatie wordt gebruikt om de afwijking ten opzichte van de gewenste waarde zo klein mogelijk te houden. Zo kan bij een verwachte waterstandverhoging (vanuit een ander gebied/systeem) direct actie worden genomen om een bepaald peil te handhaven
3. Tenslotte is er de **Model Predictive Control (MPC)** waarbij het complete systeemgedrag meege-nomen wordt om één of meer doelen te handhaven. Hiervoor is een model nodig voor de omgeving om het gedrag te kunnen bepalen. Dit model bevat randvoorwaarden en doelen die op een wiskundige manier zijn opgeschreven. Vervolgens bepaalt een solver de beste oplossing die het hoogste scoort op de genoemde doelen

4.3 ANALYSE OP INPUT GEGEVENS

In dit onderzoek naar de mogelijkheden van sturing is allereerst gekeken naar de inputgegevens. Dit is de basis om tot een goede sturing te komen. Als deze data onbruikbaar of slecht van kwaliteit zijn, komen er geen goede sturingsacties uit. In discussie met de projectgroep is naar voren gekomen dat het flexibel sturen van de rwzi alleen in droge perioden gebruikt kan worden. Als er teveel neerslag is, moet de rwzi draaien en is er geen mogelijkheid om daarin flexibel te opereren. Daarom is de focus gelegd op het voorspellen van DWA. Dit is de belangrijkste input voor het sturingsmodel.

4.3.1 GEBRUIKTE GEGEVENS

Voor de analyse zijn debietmetingen van de rioolgemalen gebruikt die afvoeren richting rwzi Katwoude. De gegevens komen uit de periode januari 2015 tot 1 juli 2017 en bevatten uurwaarden, waarbij elke waarde het gemiddelde van het uur representeert. Voor een eerste controle van de compleetheit van de data is gekeken of de som van de debieten van de gemalen gelijk is aan het influent op de rwzi. Deze controle was goed om uit te voeren, want hierdoor bleek dat de eerste dataset niet compleet was. Het instantane gemeten debiet op het hele uur was aangeleverd in plaats van het gemiddelde.

4.3.2 BEPALING SIGNIFICANTE INVLOEDEN VOOR DWA

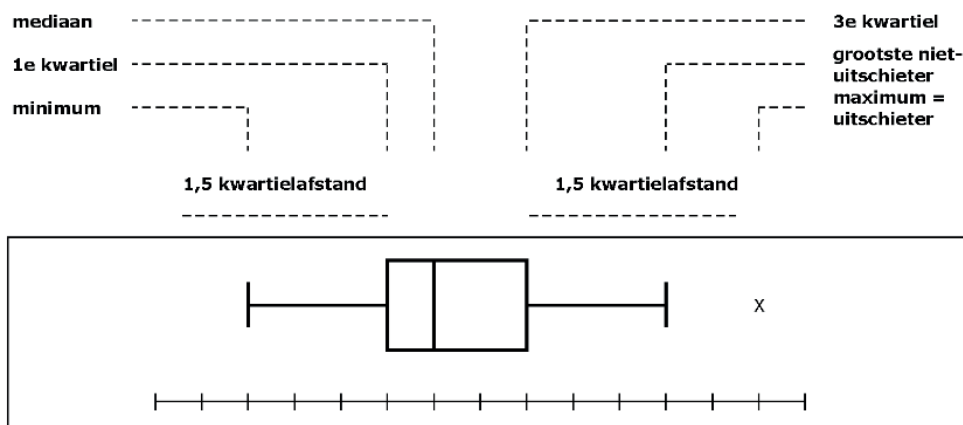
Samen met Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier is bekeken wat significant van invloed zou kunnen zijn om het DWA goed te voorspellen. Naar voren kwamen het uur van de dag (om 02:00 uur 's nachts, wordt ander gedrag verwacht dan om 09:00 's ochtends), de dag (op een weekenddag wordt ander gedrag verwacht dan op een dag door de week) en de maand (in zomermaanden waar meer toerisme is, wordt ander gedrag verwacht dan andere maanden). Om dit te onderzoeken is een statistische analyse uitgevoerd op de data. Hierbij is de reeks eerst gefilterd op droge dagen. Om de droge dagen te bepalen is voor de hele reeks een voortschrijdende som van de neerslag bepaald van de afgelopen 24 uur. Als dit meer is dan 1 mm, is de waarde er uitgefilterd. Hierdoor blijven alleen de droge momenten over.

De variatie in de reeksen kan het beste gevisualiseerd worden met een boxplot. Deze zijn gemaakt door de data te bekijken per maand, uur van de dag en dag van de week. In figuur 4.3 is een korte visuele uitleg van de boxplot gegeven. In figuur 4.4 tot figuur 4.6 zijn de uitkomsten van de analyse als boxplots weergegeven.

Uit de boxplots komen gelijk wat zaken naar voren die interessant zijn voor verder onderzoek. Zo blijken de dagen van de week nagenoeg gelijke boxplots te hebben en kan geconcludeerd worden dat de dag geen significante invloed heeft op het DWA-patroon. Voor de maanden en met name de uren is er wel verschil te zien (zoals verwacht). Deze uitkomsten leiden tot de vervolgvraag of het DWA-patroon beter voorspeld kan worden door ook rekening te houden met de maanden in plaats van alleen met de uren. Dit is onderzocht door een (multi) lineair regressie-model te maken om zo de mate van samenhang tussen een aantal variabelen te bepalen. De uitkomsten hiervan in staan in Bijlage 6.

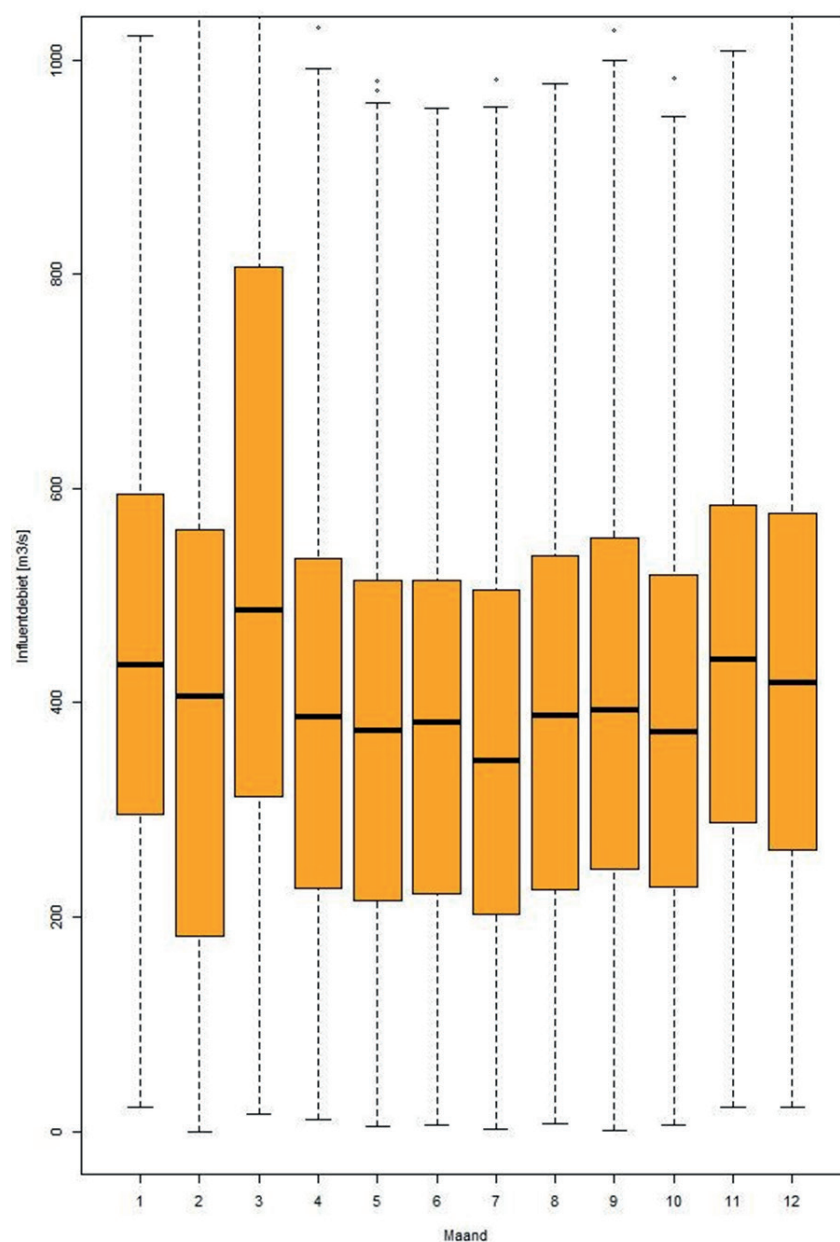
FIGUUR 4.3

UITLEG BOXPLOTS FIGUREN 4.4, 4.5 EN 4.6



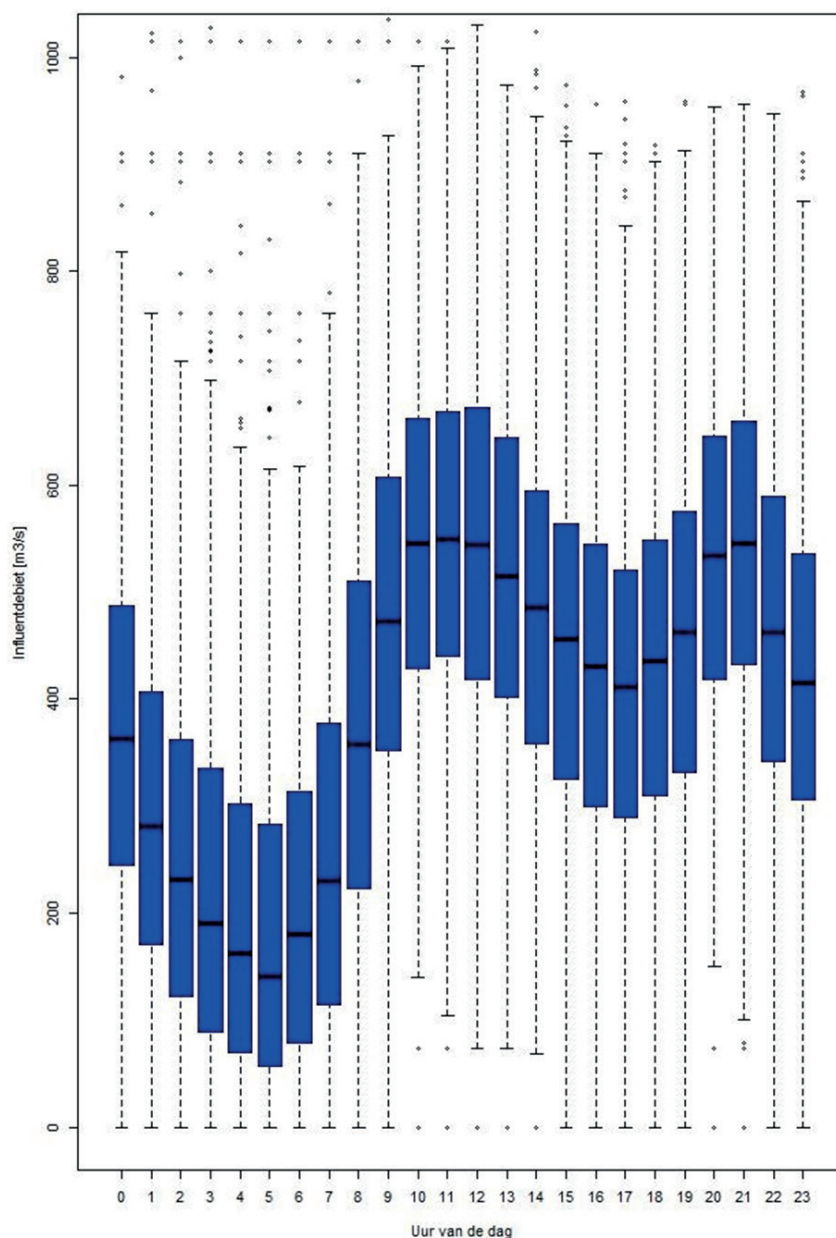
FIGUUR 4.4

BOXPLOT VOOR DE INVLOED VAN DE MAAND OP HET DWA, GEBASEERD OP GEMIDDELTE UURWAARDEN VAN DROGE DAGEN IN DE PERIODE
JANUARI 2015 TOT EN MET JUNI 2017



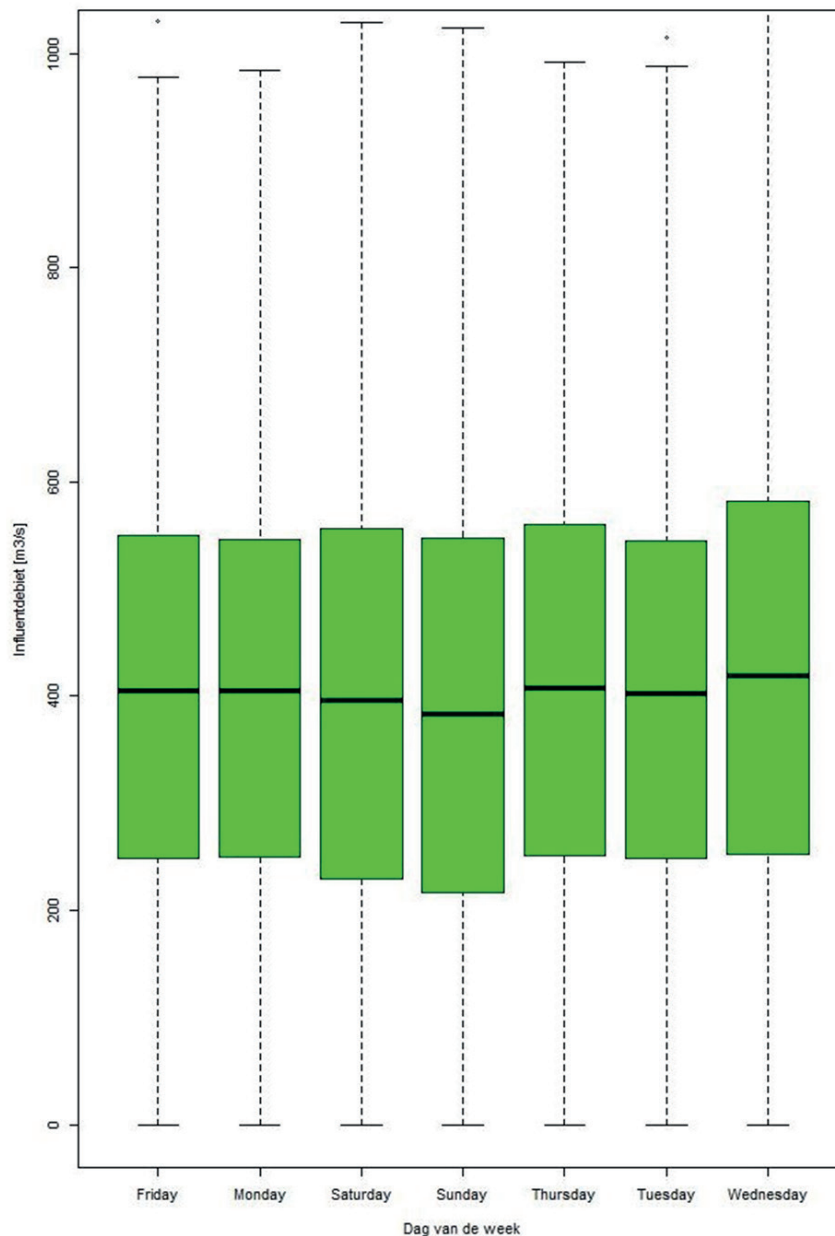
FIGUUR 4.5

BOXPLOT VOOR DE INVLOED VAN HET UUR VAN DE DAG OP HET DWA, GEBASEERD OP GEMIDDELTE UURWAARDEN VAN DROGE DAGEN IN DE PERIODE JANUARI 2015 TOT EN MET JUNI 2017



FIGUUR 4.6

BOXPLOT VOOR DE INVLOED VAN DE DAG OP HET DWA, GEBASEERD OP GEMIDDELTE UURWAARDEN VAN DROGE DAGEN IN DE PERIODE JANUARI 2015 TOT EN MET JUNI 2017



De bepaling van de lineaire regressie tussen het influent en het uur van de dag levert een R^2 op van 0,35. Dit betekent dat de totale variatie van het influent voor 35 % verklaard kan worden op basis van het uur van de dag. Als hetzelfde wordt gedaan op basis van zowel het uur van de dag als de maand, levert dat een R^2 op van 0,42. Dit betekent dat 42 % van de variatie in influent debiet verklaard kan worden op basis van de combinatie van uur en maand. Het meenemen van de maanden in het lineair regressie model voor het voorspellen van de DWA voor Katwoude kan dus zeker tot een verbetering leiden. In deze fase van het project biedt dit echter geen meerwaarde.

4.4 STURINGSALGORITME

Het doel van het onderzoek naar een sturingsalgoritme is ten eerste om vast te stellen of de beschikbare inputgegevens bruikbaar zijn om te sturen en/of de sturingssoftware zo in te regelen is dat het doel bereikt kan worden. Binnen het project zijn meerdere ideeën geopperd om de sturing van de rwzi te regelen (dag-nacht omwisselen, intermitterende regeling per kwartier, volledig flexibel op de energieprijs). Om te kijken of sturing met een MPC-model werkt, is gekozen om een eenvoudig systeem te modelleren. Het doel is om zo gelijkmatig mogelijk het vuile water aan de rwzi te leveren, waarbij het water vanuit een buffer wordt ingelaten.

Voor de modellering is gebruik gemaakt van RTC-tools. Dit is een softwarepakket dat door Deltares is ontwikkeld en nog steeds wordt doorontwikkeld. De software is gefocust op Model Predictive Control, waarbij een model wordt gemaakt, randvoorwaarden worden gesteld en een doelfunctie wordt opgesteld. Vervolgens probeert de solver de beste mogelijke oplossing te vinden die voldoet aan de randvoorwaarden en het beste het doel realiseert.

Het RTC-tools model is opgesteld waarbij de aanlevering in een buffer komt en van daaruit weer wordt doorgepompt naar de rwzi. Het gemeten influentdebiet is in het model gebruikt als het debiet wat de buffer instroomt. De aanvoer vanuit de buffer naar rwzi wordt geoptimaliseerd. Er wordt niet gedefinieerd wat de buffer is, dit kan in principe een bak zijn, maar ook berging in het riool zelf. De randvoorwaarden voor het probleem zijn dat de hoeveelheid water in de buffer niet negatief mag worden (de buffer kan geen water ergens van onttrekken) en niet groter dan de maximumcapaciteit (anders stroomt de buffer over). Als doel is gesteld dat het water zo gelijkmatig mogelijk naar de rwzi moet worden gestuurd, oftewel dat het verschil in aanvoer wordt geminimaliseerd.

4.4.1 VARIATIES OP HET BASISMODEL

De verwachting is dat de buffergrootte veel invloed heeft op het bereiken van het gestelde doel, een gelijkmatige aanvoer richting de rwzi. Daarom is onderzocht voor verschillende buffergroottes hoe het doel bereikt kan worden. De keuzes van de buffergroottes is als volgt bepaald. Eerst is gekeken naar de gemiddelde DWA-aanvoer van de rwzi per uur, wat voor de rwzi Katwoude overeenkomt met 400 m³ per uur. Vervolgens is een uur als stapgrootte genomen, zodat bij 2 uur er sprake is van een buffer die gemiddeld 2 uur zou moeten kunnen opvangen en dus 800 m³ groot is. Dit is gedaan voor een reeks van 0 (geen buffer) tot en met 12 (buffer voor gemiddeld 12 uur aan influentdebiet).

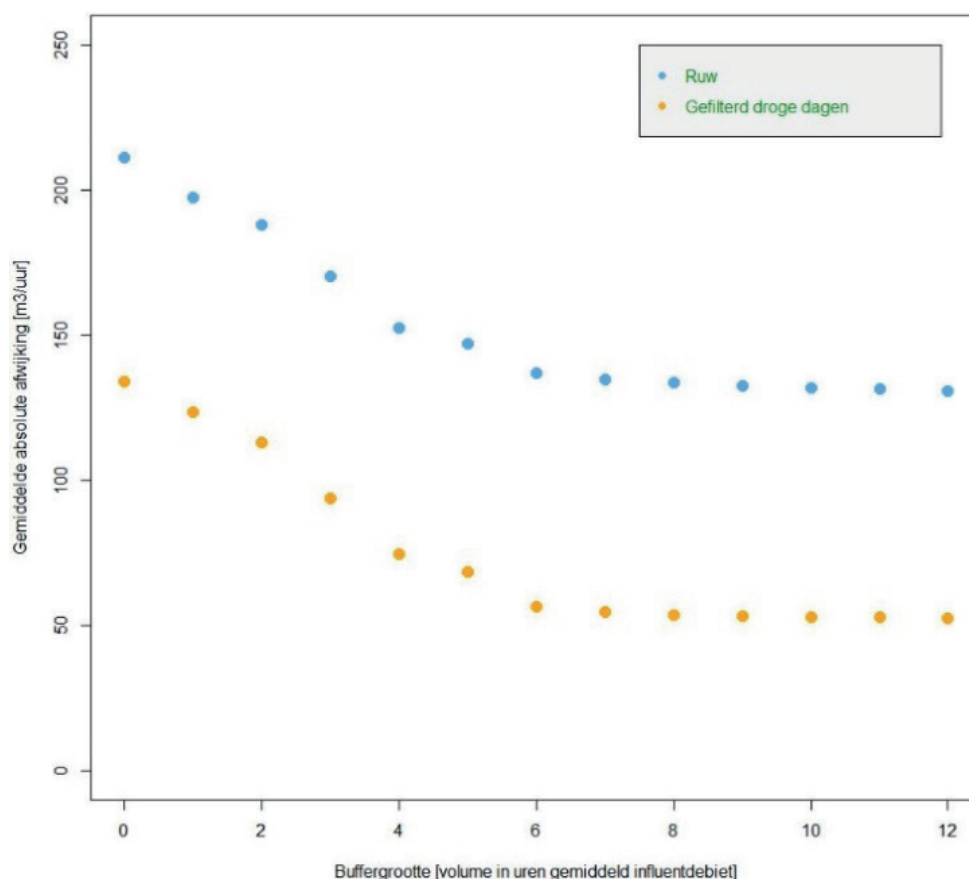
4.4.2 UITKOMSTEN RTC-TOOLS MODELLERING

Voor elke buffergrootte is het RTC-tools model uitgevoerd en tot een oplossing gekomen. De solver heeft niet altijd het optimum gevonden voor sturing, maar wel een 'acceptabele' uitkomst. Dat wil ongeveer zeggen dat de solver niet 100 % zeker weet dat het gegeven sturingsadvies het allerbeste is, maar wel dat het sturingsadvies zeker geadviseerd kan worden.

De berekeningen zijn zowel uitgevoerd voor de ruwe dataset waarin natte en droge dagen zitten en de gefilterde dataset met alleen droge dagen. De uitkomsten staan in figuur 4.7.

FIGUUR 4.7

DE RESULTATEN VAN MEERDERE MODELRUNS OM DE IDEALE BUFFERGROOTTE TE BEPALEN OM DE AANVOER NAAR DE RWZI ZO STABIEL MOGELIJK TE KRIJGEN MET MPC-STURING

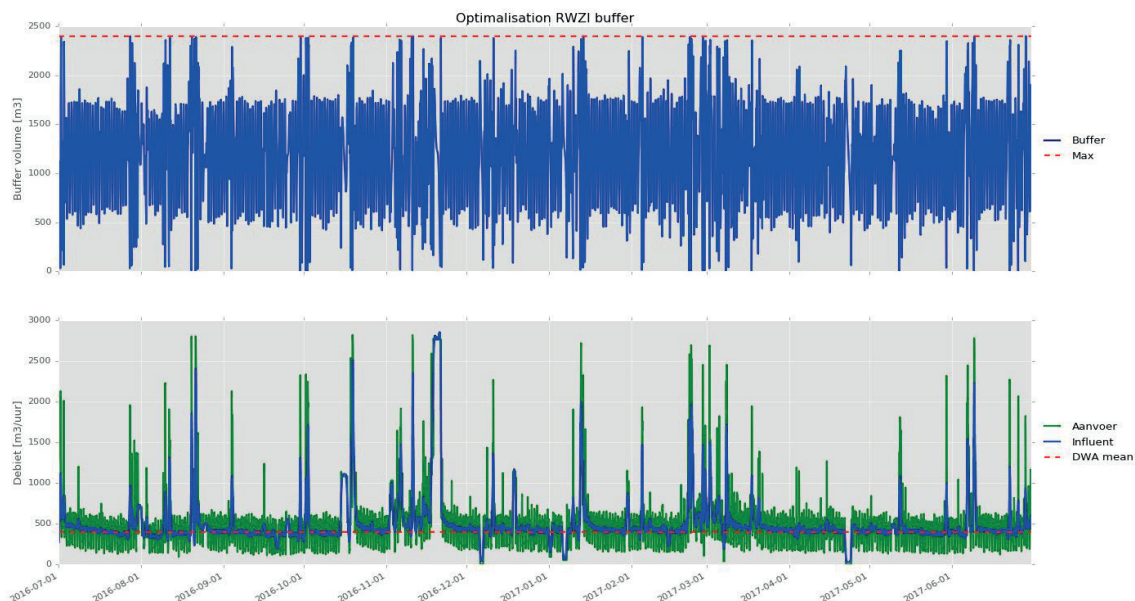


De uitleg van de grafiek is als volgt. De horizontale as beschrijft de buffergrootte in volume uren van gemiddeld influentdebiet. Het gemiddelde is voor Katwoude 400 m^3 per uur en dus is de buffer achtereenvolgens 0, 400, 800, 1.200 m^3 , etc. groot. De verticale as beschrijft de gemiddelde absolute afwijking in m^3/uur ten opzichte van het gemiddelde debiet. Dus welke gemiddelde absolute afwijking is er ten opzichte van de 400 m^3 (die nu als maatstaf genomen is). Als dit 400 m^3 zou zijn betekent het dat er continu vlak gestuurd is vanuit de buffer naar de rwzi. Een waarde van 100 m^3 betekent dat er gemiddeld per uur een afwijking van 100 m^3 is ten opzichte van het doel om 400 m^3 te sturen naar de rwzi.

Uit de grafiek kan worden opgemaakt dat vanaf buffergroottes waar meer dan 6 uur aan gemiddeld influentdebiet kan worden opgevangen de aansturing niet vlakker wordt. Dus een buffer van meer dan 2.400 m^3 zal geen toegevoegde waarde hebben als dit sturingsalgoritme wordt ingezet. Als de buffer als bak wordt gecreëerd is een bak van ongeveer $28 \times 28 \times 3$ meter nodig. De specifieke uitkomsten van de optimalisatie bij een buffer om 6 uur op te kunnen vangen ziet er uit als in figuur 4.8.

De bovenste grafiek geeft het volume in de buffer weer en de onderste grafiek de aanvoer vanuit het stelsel (groen) en de influent die nu gedefinieerd is als de aanvoer vanuit de buffer naar de rwzi (blauw). Zoals verwacht loopt de buffer vol op de momenten dat er veel aanvoer is. Daarnaast is waarneembaar dat even voordat er veel aanvoer komt de buffer geleegd wordt. Dit zorgt wel tijdelijk voor een hoger influent, maar gemiddeld levert dit een betere aanvoer op. Dat is duidelijk in de onderste grafiek te zien: de pieken in de blauwe lijn zijn veel minder hoog en blauwe lijn in zijn geheel loopt veel stabielere dan de groene lijn.

FIGUUR 4.8 DE RESULTATEN VAN DE MODELRUN MET EEN BUFFER DIE 6 UUR AAN GEMIDDELTE AANVOER KAN OPVANGEN



4.5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Dit hoofdstuk heeft zich gefocust op de mogelijkheid om sturing toe te passen op de zuivering door Model Predictive Control. Hierbij is gekeken naar zowel de inputgegevens als het model. Uit de statische analyse bleek dat de te voorspellen DWA die op de zuivering afkomt het beste gebaseerd kan worden op zowel het uur als de maand. Nog steeds zal het model er regelmatig naast zitten, maar het is beter in staat DWA te voorspellen dan wanneer alleen het uur als voorspeller gebruikt wordt.

Daarnaast is gekeken naar de mogelijkheid om de rwzi te sturen met behulp van een model. Hiervoor is een eenvoudige doelfunctie genomen, namelijk een vlakke aanvoer. Het is gelukt om zo'n model te realiseren en toe te passen om vlakke aanvoer te krijgen richting de rwzi. Een bijkomend resultaat is dat hiervoor bij Katwoude een buffer van 2.400 m³ groot genoeg is. Meer bufferen heeft geen meer effect op de mate van vlakheid in de aanvoer.

Samengevat lijkt MPC mogelijkheden te bieden om te bepalen wat er nodig is om de DWA aanvoer zo vlak mogelijk te krijgen. Opgemerkt dient te worden dat uit de resultaten in hoofdstuk 3 niet blijkt dat een vlakkere DWA-aanvoer voor directe energiebesparing zorgt.

5

KOSTEN BESPAREN DOOR VOORSPELBAARHEID ENERGIEVERBRUIK RWZI'S

5.1 AANLEIDING

Uit de voorgaande hoofdstukken is gebleken dat energiebesparing niet direct mogelijk lijkt, maar wel dat de inzet en het energieverbruik van de rwzi's voorspelbaar en ook enigszins stuurbaar is. Heeft deze voorspelbaarheid en stuurbaarheid van het energieverbruik van de rwzi's financiële waarde voor de energieleveranciers? Om dat verder te verkennen zijn interviews afgenomen bij Eneco (de energieleverancier van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier) en bij E.D. Mij. In dit hoofdstuk wordt daarvan de verslaglegging weergegeven, nadat eerst in paragraaf 5.2 de vraag en aanbod van de energiemarkt wordt uitgelegd.

5.2 BESCHRIJVING VRAAG EN AANBOD ENERGIEMARKT

Naast de mogelijkheden van energiebesparing door een efficiëntere benutting en egalisatie en afstemmen van de vraag op de tariefschommelingen, ontstaan er ook kansen door de voorspelbaarheid in de energievraag van een rwzi.

Voor het goed begrijpen van de potentiële waarde van een voorspelbare elektriciteitsvraag is een korte beschrijving van de energiemarkt nodig. De elektriciteitsmarkt kenmerkt zich door vraag en aanbod. Er vindt handel plaats en er is bijsturing nodig onder regie van TenneT. Elektriciteitsgebruikers kopen elektriciteit in die zij verwachten te gaan afnemen en aanbieders van elektriciteit leveren dit op het afgesproken moment. Gebruikt een afnemer meer of minder elektriciteit dan kan dit kort van tevoren nog aangepast worden door extra in te kopen of te verkopen. Vindt er een onverwachte gebeurtenis plaats, bijvoorbeeld door uitval van een grote elektriciteitscentrale, dan loopt het elektriciteitsnet uit balans. Met andere woorden, vraag en aanbod zijn dan niet meer op elkaar afgestemd. De landelijke netbeheerder TenneT heeft dan instrumenten om het net weer in balans te krijgen.

Elke partij die is aangesloten op het openbare elektriciteitsnet in Nederland moet op kwartierbasis aan TenneT aangeven hoeveel energie zij verwacht af te nemen of aan te bieden voor de volgende dag. Dit mag door de partij worden uitbesteed aan een Programma Verantwoordelijke die dan de verantwoordelijkheid draagt voor het programma. Vaak nemen energieleveranciers deze taak op zich voor hun klanten. Het doel van het uitwisselen van deze programma's is om de balans op het elektriciteitsnet te handhaven. Deze verantwoordelijkheid ligt bij TenneT voor het Nederlandse netwerk.

De Programma Verantwoordelijke kan energie zelf in- of verkopen. Dat kan via de Amsterdam Power Exchange (APX)-markt, onderling tussen twee partijen, zelf energie intern inkopen van een eigen energiecentrale of uit het buitenland. Als er afgeweken wordt van de voorspelde

energie afname of invoeding (beschreven in het 'programma'), worden er extra kosten door TenneT gemaakt. Deze kosten worden in rekening gebracht bij de veroorzakers van deze onbalans. Hiervoor is er een onbalansprijs voor het afnemen bij TenneT en het invoeden bij TenneT. Dit gebeurt op basis van een kwartier.

Door de onbalans kunnen de energieprijzen fluctueren: als er meer energie aanbod is dan vraag, zullen de prijzen dalen en als er meer vraag dan aanbod is, zullen de prijzen stijgen. Dit met het doel om de onbalans zo snel mogelijk te herstellen. Door het eigen gebruik aan te passen door hierop in te spelen kan dus geld worden verdiend. Er zijn twee elektriciteitsmarkten waar de bedrijfsvoering zich op kan oriënteren: de day ahead markt (APX markt) en de onbalansmarkt:

DAY-AHEAD MARKT (APX MARKT)

Tot één dag vooruit kan elektriciteit worden verhandeld op de day ahead markt. Deze markt functioneert via een veilingstelsel. Tot 12.00 uur op de dag voorafgaand aan de feitelijke levering kunnen aanbieders hun biedingen inleggen. Hierna worden vraag en aanbod op elkaar afgestemd en worden de marktprijzen voor de volgende dag bepaald, gedifferentieerd per uur. De handel vindt anoniem plaats en de elektriciteit wordt verhandeld in blokken van één uur.

ONBALANSMARKT

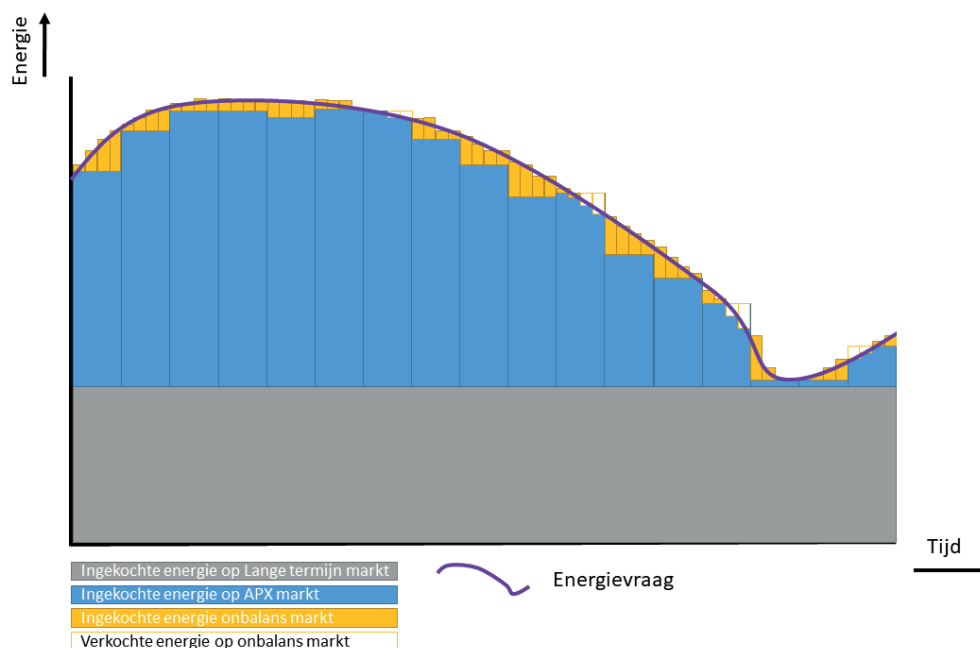
Primair reservevermogen is gereserveerde capaciteit die door TenneT ingezet wordt bij het ontstaan van een afwijking in de netfrequentie - die normaal 50 Hz is - om de frequentie weer in balans te krijgen. Dit vermogen (nu nog vooral grote centrales) heeft TenneT van tevoren gecontracteerd bij verschillende aanbieders die dat vermogen vervolgens beschikbaar houden.

Indien binnen 15 minuten het net niet in balans is en de verstoring in de elektriciteitsvoorziening dus langer duurt heeft TenneT de beschikking over secundaire reserve: de onbalansmarkt. Partijen kunnen voor het aanbieden van secundaire reserve een contract afsluiten met TenneT of zelf vrijwillige biedingen plaatsen op de biedladder van TenneT. Ook kunnen partijen afwijken van een vooraf opgegeven energieprogramma. Er wordt dan gesproken van passieve onbalans.

In figuur 5.1 is de energievraag en de afstemming daarop van de verschillende hierboven beschreven markten voor het verhandelen van energie weergegeven. Hierin zijn de verschillende tijdframes zichtbaar: de lange termijn markt, de APX (Day ahead per uur) markt en de onbalansmarkt (per 15 minuten).

FIGUUR 5.1

ONDERVERDELING ENERGIEMARKT INCLUSIEF ONDERVERDELING OVER DE TIJD



5.3 GESPREK ENECO

Eneco zorgt onder meer voor het opwekken en leveren van duurzame energie die komt van wind-parken, warmte, biomassa en zon. Dit doet zij onder andere voor een ruim aantal waterschappen in Nederland. Samen met dochteronderneming AgroEnergy is zij ook ontwikkelaar van de applicatie BiedOptimaal waarmee energie kan worden ingekocht op de APX-markt.

Voor de onvoorspelbaarheid in energieafname wordt een risicotoeslag opgenomen om dit af te dekken. Deze bedraagt ongeveer 5 % tot 10 % van de kosten. Als de energievraag beter aansluit op wat er van tevoren is ingekocht, kunnen hier kosten worden bespaard. Dit zal nooit exact kunnen, al is het alleen al omdat op de APX-markt per uur ingekocht moet worden en machines niet per uur schakelen. Dus zelfs in de beste situatie zullen onbalanskosten moeten worden afgerekend. Dit vindt plaats op kwartierbasis.

In de huidige energiecontracten wordt vaak alles in één groot perceel ingekocht. In deze contracten zijn al vaste prijsafspraken gemaakt, waardoor inspelen op de APX-markt geen effect heeft. Eneco beveelt daarom de waterschappen aan om meerdere energie contracten uit te vragen, zowel voor de vaste inkooprijzen als voor de flexibele inkoop van energie.

Om de energie afname zo goed mogelijk aan te laten sluiten bij de voorspellingen, is de mogelijkheid te kunnen bufferen in het rioolstelsel wenselijk (zie hoofdstuk 4). Hiermee zijn er (beperkte) mogelijkheden om het water te sturen om zo controle te hebben over het energieverbruik van de rwzi.

In het gesprek geeft Eneco ook aan dat het aanbieden van een volledig afgevlakt patroon de grootste kostenbesparing kan opleveren. Dit komt door het grote verschil in de prijzen door de dag heen. Hiervoor is op sommige locaties echter wel een grote buffertank nodig. Gekeken zou moeten worden of deze investering genoeg besparing oplevert.

Voor de voorspellingen is software nodig die per uur voorspelt wat het energieverbruik zal zijn. Hiervoor zijn meerdere informatiebronnen nodig, waaronder:

- Voor regendagen:
 - Weersvoorspellingen
 - Afstroming van regenwater naar het riool
 - Verblijftijd in riool
 - Eventuele mogelijkheden voor bufferen in het riool
- Voor droge dagen:
 - Historische data
 - Uurpatronen
 - Seizoenspatronen
- Meenemen specifieke elementen
 - Vakanties en bijzondere momenten

5.4 GESPREK E.D. MIJ.

E.D. Mij is energieleverancier en programma verantwoordelijke partij voor de zakelijke markt. Zij heeft geen eigen opwekking, maar koopt energie in via verschillende energiemarkten en levert die aan de zakelijke markt. De focus van het bedrijf ligt op het maken en gebruiken van een voorspel-ling om energie op goedkope momenten in te kopen en te leveren. Het bedrijf heeft geen eigen opwekking en een niet-traditioneel verkoopmodel. E.D. Mij levert alleen energie die ingekocht is op de handelsmarkten en levert de opbrengsten hiervan direct terug aan de klant. De kosten voor deze dienst worden niet via de energieprijs afgehandeld, maar via vaste servicekosten die volgens een apart dienstverleningscontract worden afgesloten. Alle winst en verlies die ontstaat uit de handel wordt teruggeleverd aan de klant.

E.D. Mij geeft aan dat het voorspellend vermogen waarde heeft. Dit voorspellend vermogen stelt bedrijven in staat te bepalen wanneer de bedrijven op welke markt energie moet (ver)kopen. Vanwege een ander verkoopmodel is niet direct te benoemen hoeveel waarde dit zou kunnen opleveren.

5.5 CONCLUSIE

Uit beide gesprekken blijkt dat voorspeld gedrag financiële waarde lijkt te hebben. Afhankelijk van het huidige energiecontract kan de waarde veel of weinig zijn. Dit heeft onder andere te maken met of het meerjarige contract is afgesloten tegen een relatief hoge of lage prijs ten opzichte van de actuele energieprijzen. Om de waarde te verzilveren zal gebruik gemaakt moeten worden van een flexibel energie contract, waarbij geen vaste prijs meer geldt, maar de prijs fluctueert door de tijd. Hierbij ligt de verantwoordelijkheid om de energie afname te laten aansluiten bij de een dag eerder opgestelde prognose bij de waterschappen. Een goede voorspelling verkleint het risico van ongewenste kosten, maar de kosten blijven variabel. De bestuurders van de waterschappen zullen moeten besluiten of dit acceptabel is. Uit andere sectoren blijkt dat een kostenreductie van 5-15 % ten opzichte van de handelswaarde van elektriciteit haalbaar lijkt. Dit is echter een brede marktindicatie en niet specifiek voor afvalwaterzuivering. De potentiële besparing per rwzi is onbekend.

Naast de financiële waarde heeft de voorspelbaarheid van het energiegebruik ook andere waarde. Zo levert het inzicht op in de werking van het systeem, kan er gestuurd worden op energiezuinigheid (in termen van duurzaamheid in plaats van financiën) en kan er extra

informatie worden geboden aan energieleveranciers om vraag en aanbod meer in balans te krijgen.

Rekenvoorbeeld: Hoeveel is een besparing van 10% op de handelswaarde van elektriciteit? Stel: een waterschap heeft jaarlijks een elektriciteitsgebruik voor zuivering van 50 miljoen kWh (50 GWh) tegen kosten van EUR 0,07 cent per kWh. De kosten hiervan zijn EUR 3,5 miljoen. De helft van dit energiegebruik is toe te wijzen aan beluchting. Een besparing van 10 % hierop komt overeen met EUR 175.000,00 per jaar.

6

REDUCTIE CO₂ EMISSIES DOOR VRAAGSTURING ENERGIE

6.1 INLEIDING

In hoofdstuk 3 is gebleken dat met het aanpassen van het beluchtingsregime op de rwzi nauwelijks energie te besparen is. Sommige scenario's echter, zoals intermitterend beluchten verbruiken ook niet veel meer energie.

Ten aanzien van vraagsturing (zie kader) biedt bovenstaande kansen. Immers, het blijkt mogelijk om intermitterend te opereren met een minimaal verlies aan efficiency. Mogelijk kunnen de indirecte CO₂ emissie effecten hiervan dit beperkte verlies compenseren. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat een beperkte toename van het energiegebruik binnen het waterschap te rechtvaardigen is, als dit op landelijke of Europese schaal leidt tot minder CO₂ emissies. Dit kan bijvoorbeeld wanneer er landelijk in totaal minder fossiele energie wordt gebruikt, door op de juiste momenten lokaal iets meer duurzame energie te gebruiken. 'Nu lokaal iets meer duurzame energie gebruiken, om landelijk straks minder fossiele energie nodig te hebben.'

INTERMEZZO. 'DEMAND RESPONSE = VRAAGSTURING'

Bij vraagsturing wordt het moment van energieverbruik afgestemd op energieprijzen. De energieprijzen schommelen op de markt, met vraagsturing verplaatsen energieverbruikers het verbruik naar die momenten dat de energieprijs het laagste is. Vraagsturing zal in de komende tijd alleen maar meer geld waard worden. Met het vergroten van het aandeel zonne- en windenergie zullen de prijzen heftiger gaan variëren. Wanneer er veel zon en wind is, ontstaat er een overschot en dalen de prijzen. Op dit moment is het een goed idee om de vraag te verplaatsen. Omdat een energieleverancier niet kan garanderen dat een klant in de goedkope momenten energie verbruikt, zal deze de kosten van de dure momenten doorrekenen aan de klant. Met vraagsturing, wordt de vraag naar goedkopere momenten gestuurd. Daarom kan een leverancier die vraagsturing toepast een goedkopere kWh tarief aanbieden.

<https://senfal.com/2017/03/17/vraagsturing-senfal-legt-het-uit/>

Maar wat zijn nu de huidige en voorziene CO₂ emissie effecten van een dergelijke bedrijfsvoering? In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens geschetst:

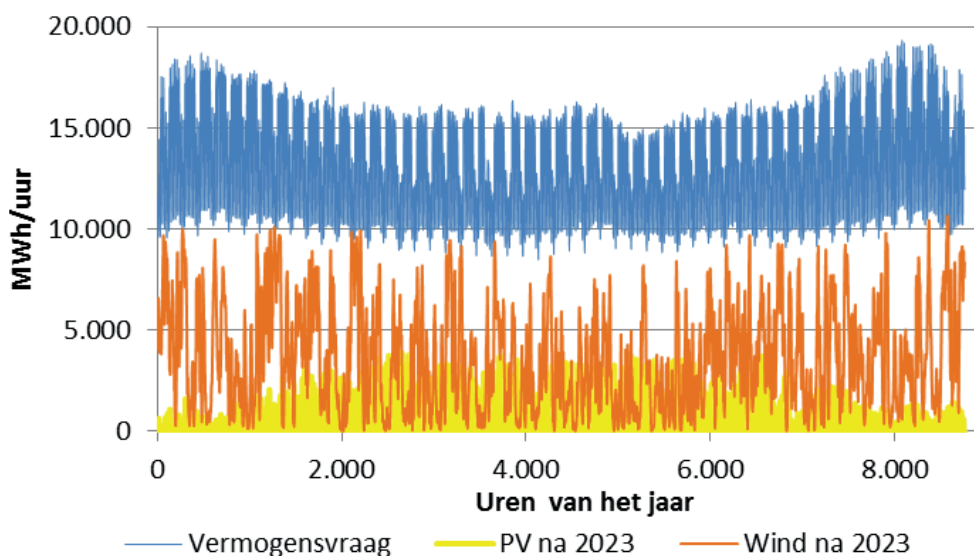
- Hoe ontwikkelt de centrale en decentrale elektriciteitsproductie zich?
- Wanneer leidt vraagsturing tot CO₂ emissiereducties?
- Wat voor effect heeft vraagsturing op de day ahead markt?
- Wat voor effect heeft vraagsturing op de onbalansmarkt?
- Wat betekent dit voor flexibel energiemangement op de rwzi?

6.2 ONTWIKKELING CENTRALE EN DECENTRALE ELEKTRICITEITSPRODUCTIE

Elektriciteitsproductie in Nederland wordt in 2017 gedomineerd door centrale productie op basis van kolen en gas. Elektriciteitsproductie op basis van deze brandstoffen leidt naast de productie van elektriciteit en warmte ook tot de productie van het broeikasgas CO₂. Naast deze stuurbare of constante elektriciteitsbronnen neemt het vermogen van zogenaamde intermitterende bronnen zoals windturbines en zonnepanelen in Nederland sterk toe. Zo is in het SER Energieakkoord⁶ de ambitie geformuleerd dat er eind 2023 een totaal geïnstalleerd vermogen aan windenergie staat van 6.000 MW op land en 4.450 MW op zee. Daarnaast wordt er in 2023 6 GW aan geïnstalleerd PV vermogen verwacht.

Op basis van historische informatie uit Duitsland⁷ en Denemarken⁸ over de elektriciteitsproductie per uur uit wind en zon is een scenario opgesteld voor deze productie in Nederland. Hierbij is uitgegaan van het te verwachten opgestelde vermogen van wind en zon eind 2023, aangegeven als 'na 2023'. Onderstaande figuur toont die mogelijke windproductie per uur (oranje), evenals opwekking uit zon-PV (geel). Tevens weergegeven is de verwachte vermogensvraag (blauw)⁹.

FIGUUR 6.1 VOORZIENE ELEKTRICITEITSPRODUCTIE PER UUR UIT WIND EN ZON, EVENALS DE VERMOGENSVRAAG IN NEDERLAND IN 2023



Ten aanzien van het opgestelde vermogen fossiele opwekking wordt binnen de Nationale Energieverkenning 2016 geen duidelijke trendbreuk voorzien. Tot 2035 is sprake van een sterke afname van gasgestookte decentrale eenheden en een geleidelijke afname van kolen. Het vermogen van de centraal gestuurde gaseenheden blijft ongeveer gelijk. Door het wegvallen van productiecapaciteit in de ons omringende landen wordt Nederland van een importeur van elektriciteit (1,5 GW in 2016) per 2023 een netto exporteur (0,3 GW in 2023).

6.3 VRAAGSTURING EN CO₂ EMISSIEREDUCTIE

In hoeverre kan vraagsturing bijdragen aan het verminderen van de CO₂ uitstoot? In deze paragraaf wordt inzichtelijk gemaakt hoe vraagsturing kan bijdragen aan het maximaliseren van de duurzame energieproductie ten koste van fossiele productie.

6 SER (2013). Energieakkoord voor duurzame groei

7 Amprion.net, TenneTtso.de, 50Hertz.com, TransnetBW.de

8 Energinet.dk

9 TenneT.eu, Nationale Energie Verkenning 2016

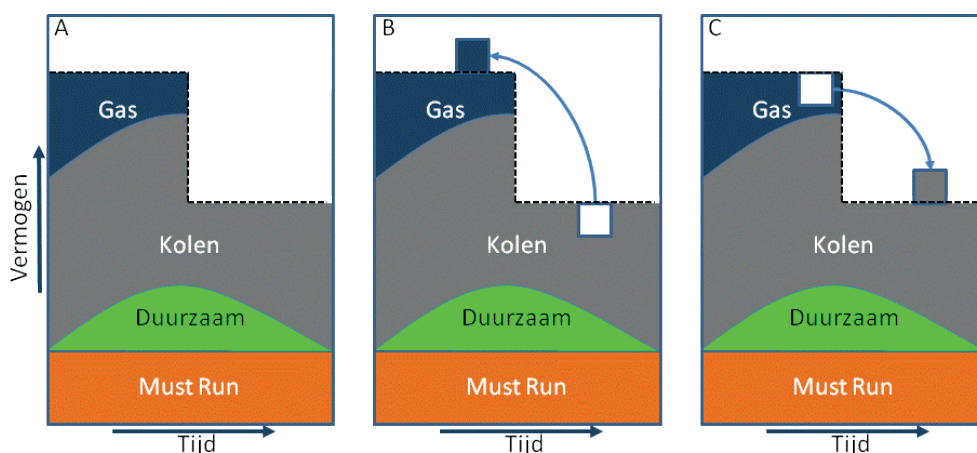
6.3.1 GEEN DUURZAME OVERPRODUCTIE: 2017

In 2017 is de duurzame opwekking in Nederland nog zo gering dat er bijna geen sprake is van momenten waarop elektriciteitsproductie uit wind of zon daadwerkelijk wordt beperkt (dit wordt ook wel curtailment genoemd). De situatie doet zich dan ook bijna niet voor dat er sprake is van het verschuiven van fossiel gebruik naar duurzaam aanbod dat anders verloren zou gaan.

Een andere mogelijkheid is het schuiven tussen vraag die ingevuld wordt door elektriciteit uit kolen en vraag die ingevuld wordt door elektriciteit uit gas. Dit wordt in onderstaande figuren geïllustreerd. Hierin is zichtbaar:

1. Horizontaal uitgezet de tijd, verticaal uitgezet het vermogen (vraag en aanbod)
2. De vermogensvraag is weergegeven met een zwarte stippellijn. In dit voorbeeld is deze eerst hoog en halverwege neemt de vermogensvraag af
3. Verschillende vormen van opwekking, zoals duurzame opwekking, kolen, gas en Must Run

FIGUUR 6.2 ILLUSTRATIES VRAAGSTURING ZONDER OVERPRODUCTIE DUURZAME ENERGIE



In de voorbeelden A, B en C zijn drie situaties beschreven:

- A. In voorbeeld A wordt de vermogensvraag aan het begin ingevuld door alle genoemde opwekking. Zo is te zien hoe aan het begin de toename van duurzaam ten koste gaat van de inzet van gas. Halverwege neemt de vermogensvraag af, hetgeen dan ten koste gaat van alle gasinzet en een deel van de koleninzet. Duurzaam en Must Run ondervinden hier geen hinder van
- B. Hier wordt een blok energie eerder afgenomen dan oorspronkelijk gepland was. Het resultaat hiervan is dat inzet van kolen wordt gewijzigd in inzet van gas. Dit leidt tot een lagere CO₂ emissie, en tot een hogere prijs
- C. In dit voorbeeld vindt het omgekeerde plaats. Een blok energie wordt later afgenomen dan gepland. Er wordt minder gas ingezet en meer kolen. Dit vindt plaats tegen een lagere prijs en er wordt meer CO₂ uitgestoten
- D. Voor een situatie waarin er geen sprake is van overproductie door duurzame energie kan men stellen dat vraagsturing op basis van prijs met name leidt tot stimulering van kolen ten koste van gas, en daarmee tot een toename van de CO₂ emissies

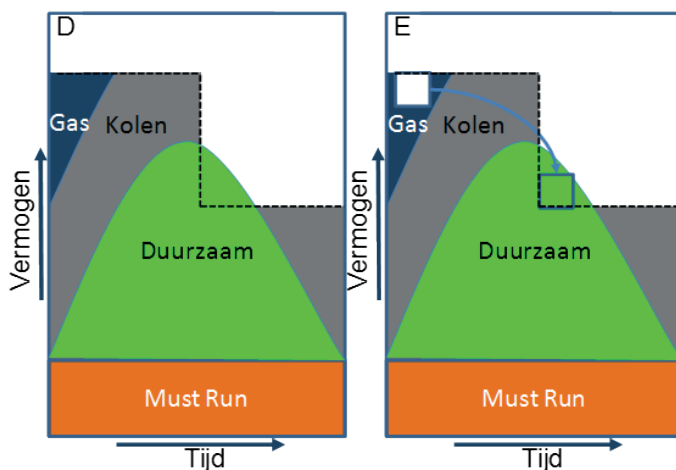
6.3.2 DUURZAME OVERPRODUCTIE: 2020+

Zodra er meer elektriciteit geproduceerd wordt dan kan worden afgenomen, moeten bronnen afschakelen. Dit betekent voor windenergie dat windturbines uit de wind worden gedraaid en voor zonnepanelen dat de omvormers worden afgeschakeld. Om deze duurzame energie niet verloren te laten gaan, kan vraagsturing een belangrijke bijdrage leveren. Immers: als het mogelijk is om vraag te verschuiven van momenten waarin fossiel wordt geproduceerd naar

momenten van duurzame overproductie, dan worden er CO₂ emissies gereduceerd vergelijkbaar met de vermeden productie uit kolen of gas. Onderstaande figuur illustreert dat.

- E. In situatie D is er een zo sterke toename van duurzame energie dat eerst de productie van gas wordt gereduceerd en vervolgens ook deels de productie van kolen. Dan neemt plotseling de vraag af, en is er sprake van overproductie van duurzame elektriciteit: kolenproductie schakelt af voor zover mogelijk en ook wind en zon-PV moeten afschakelen
- F. In situatie E wordt dit door vraagsturing deels voorkomen. Hier wordt een stuk vraag uitgesteld, waardoor duurzame elektriciteit die anders verloren zou gaan toch benut wordt ten koste van productie op basis van gas.

FIGUUR 6.3 ILLUSTRATIES VRAAGSTURING BIJ OVERPRODUCTIE DOOR DUURZAME ENERGIE.

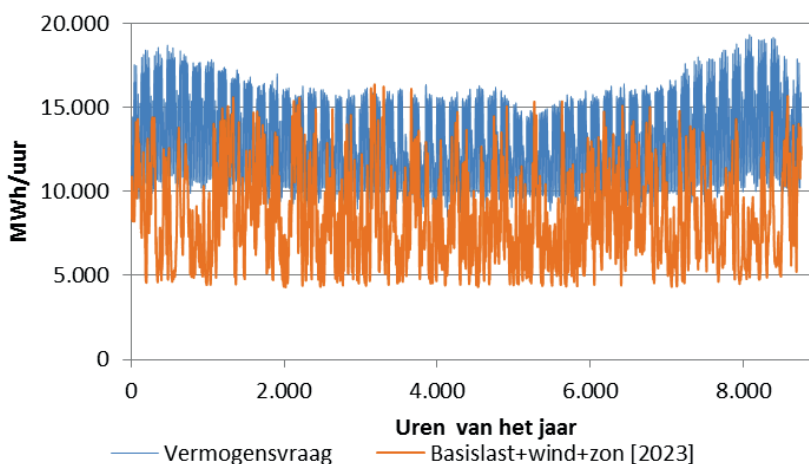


6.4 VRAAGSTURING EN DAY AHEAD MARKT

Om te bepalen hoe sterk het effect van CO₂ emissiereductie door vraagsturing kan zijn, zijn twee sterk vereenvoudigde scenario's opgesteld voor na 2020 en na 2023. Hierbij is er onder meer vanuit gegaan dat in 2023 de in het SER Energieakkoord beoogde 10,5 GW aan wind-energie gerealiseerd is, evenals een vermogen van 6 GW aan zon-PV.

Vervolgens is gezocht naar die momenten waarop vraagsturing kan inspelen op overproductie door duurzame energie. Vraagsturing kan dan bijdragen aan het voorkomen van afschakelen van wind en zon. In onderstaande figuur staat de opgetelde productie van de basis-last plus wind en zon na 2023 weergegeven. Goed zichtbaar zijn zowel het minimaal te leveren basis-vermogen van bijna 5 GW als de momenten waarop het aanbod de vraag overtreft.

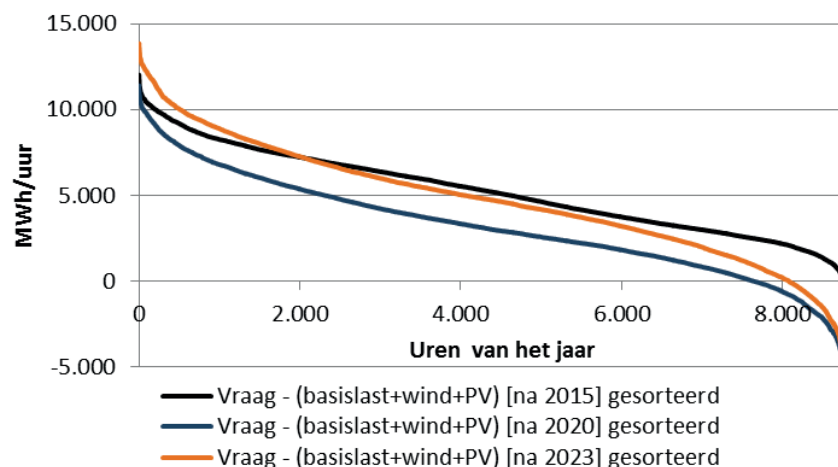
FIGUUR 6.4 VRAAG EN MINIMAAL AANBOD VERMOGEN NEDERLAND, BASISLAST IS MUST RUN + 25% KOLENVERMOGEN + IMPORTSALDO [2023].



Om te zien in hoeverre vraagsturing tot CO₂ emissiereductie kan leiden, is bepaald hoe vaak er sprake is van overproductie. Hiervoor is het verschil tussen vraag (blauw) en aanbod (oranje) bepaald, en is dit vervolgens gesorteerd op waarde van hoog naar laag.

FIGUUR 6.5

MOMENTEN VAN OVERPRODUCTIE (GRIJS) NA 2015, 2020 EN 2023, BASISLAST IS MUST RUN + 25% KOLENVERMOGEN + IMPORTSALDO



Op basis van deze figuur kan het volgende gesteld worden:

1. Na 2015 (zwart) is er bijna geen sprake van overproductie. Duurzame energie hoeft niet te worden afgeschakeld om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Flexibel inkopen tegen de laagste prijs stimuleert opwekking uit kolen ten opzichte van gas;
2. Na 2020 (blauw) zijn er meer momenten van overproductie. Mede door de toenemende import is er 13 % van de tijd overproductie en wordt duurzame energie afgeschakeld;
3. Na 2023 (oranje, de horizon van het SER Energieakkoord) zijn deze momenten er ook maar minder. Nederland is dan van importeur van elektriciteit een netto exporteur geworden en dat heeft invloed op overproductie. Vraagsturing kan nu 8 % van de tijd leiden tot de vervanging van fossiele elektriciteit door duurzame elektriciteit.

Op basis hiervan kan geconcludeerd worden: de duurzaamheid van vraagsturing is sterk afhankelijk van de internationale elektriciteitsmarkten (import/export). Binnen het gehanteerde scenario kan de elektriciteitsvraag die kan worden verschoven naar de goedkoopste 10% van de day ahead markt, leiden tot een vervanging van fossiele elektriciteit door duurzaam opgewekte elektriciteit. Het meest waarschijnlijk is dat hiermee een met gas opgewekte kWh wordt vervangen door een door wind of zon opgewekte kWh, hetgeen leidt tot het vermijden van 0,4 kg CO₂ uitstoot per kWh.

6.5 VRAAGSTURING EN ONBALANSMARKT

Op de onbalansmarkt zijn andere mechanismen werkzaam dan op de day ahead markt. De onbalansmarkt richt zich op het balanceren van vraag-aanbod verschillen op een tijdschaal van 15 minuten. Hiervoor heeft TenneT een vermogen van 340 MW gecontracteerd. De contractpartners hiervoor zijn partijen met een veelzijdig productieportfolio zoals Nuon, Essent, Engie en Uniper. Deze zogenaamde actieve (gecontracteerde) balanshandhaving wordt vooral geleverd door vermogensvariaties van draaiende eenheden.

Naast deze actieve balanshandhaving wordt er op basis van prijssignalen ook bijgedragen aan de balanshandhaving door niet-gecontracteerde partijen: het zogenaamd passief balanceren. Op dit moment dragen met name de tuinders hier aan bij.

EXTREEM HOGE ONBALANSPRIJZEN

Bij extreem hoge prijzen schakelen centrales maximaal bij om aan de vraag te kunnen voldoen. In de regel neemt de efficiency van een centrale toe naarmate het te leveren vermogen hoger is. Boven een bepaalde vermogensvraag is er niet opeens sprake van een sterke afname van de efficiency. Wel neemt de belasting van de diverse onderdelen in de centrale zo sterk toe dat er sprake is van extra slijtage: extra kosten.

EXTREEM LAGE ONBALANSPRIJZEN

In het geval van extreem lage onbalansprijzen kunnen centrales extreem snel terugregelen. Dit gaat veelal gepaard met het dumpen van energie: het afblazen van stoom. Indien dit kan worden voorkomen met vraagsturing is er sprake van een significante CO₂ emissiereductie.

6.6 BEVINDINGEN TEN AANZIEN VAN RWZI'S

Tabel 6.1 vat de belangrijkste bevindingen ten aanzien van CO₂ emissiereductie en vraagsturing nog eens samen.

Voor rwzi's betekent dit het volgende:

1. Vraagsturing kan in het algemeen alleen leiden tot extra CO₂ emissiereducties indien er overproductie is van duurzame energie. In andere gevallen leidt peak shaving (vermijden hoge prijzen) in de regel tot het stimuleren van kolenstroom (hogere CO₂ uitstoot) of heeft een verwaarloosbaar CO₂ effect (onbalansmarkt);
2. Het afstemmen van de bedrijfsvoering op de laagste prijsmomenten van de day ahead markt leidt na 2020 voor ongeveer 10 % van de tijd tot CO₂ emissiereducties. Praktisch betekent dit dat geadviseerd wordt de rwzi in ieder geval de 10 % goedkoopste uren per dag in bedrijf te hebben;
3. Het afstemmen van de bedrijfsvoering op de laagste prijsmomenten van de onbalansmarkt leidt nu tot CO₂ emissiereducties: er wordt voorkomen dat centrales energie (stoom) dumpen. Praktisch betekent dit dat aangeraden wordt om op een rwzi bij prijzen van (inschatting) -50 €/MWh gedurende dat kwartier de beluchting flink te verhogen. De resulterende inefficiëntie wordt zowel financieel (negatieve stroomprijs) als wat betreft (indirecte) CO₂ emissies ruimschoots gecompenseerd. Dit kan alleen binnen bepaalde grenzen om de effluentkwaliteit niet negatief te beïnvloeden.

TABEL 6.1

OVERZICHT VRAAGSTURING EN CO₂ EMISSIEREDUCTIE

Scenario	Day ahead markt [APX, 40-50 TWh]	Onbalans [TenneT, ± 0,20-0,25 TWh]
Zeer hoge prijzen →	Verschuiven inzet gas → kolen	Verschuiven fossiele opwekking + lagere slijtage → beperkt CO ₂ effect
Vraag verschuiven naar ander moment	Toename CO ₂ uitstoot	
Hogere prijzen →	Verschuiven inzet gas → kolen	Verschuiven fossiele opwekking →
Vraag verschuiven naar ander moment	Toename CO ₂ uitstoot	beperkt CO ₂ effect
Lagere prijzen → Vraag concentreren in dit moment	Maximaliseren opwekking door kolen Toename CO ₂ uitstoot	Verschuiven fossiele opwekking → beperkt CO ₂ effect
Zeer lage prijzen → Vraag concentreren in dit moment	Nu: maximaliseren opwekking kolen <u>2020-2023: maximaliseren</u> <u>wind+zon => minder fossiel</u>	Vermijden energiedump centrale <u>2020-2023: maximaliseren</u> <u>wind => minder fossiel</u>

Rwzi's die zich willen voorbereiden op een fluctuerende en duurzamere elektriciteitsvoorziening, moeten dan ook de volgende overwegingen meenemen:

- Het tijdelijk verhogen van het zuurstofsetpoint op momenten van duurzaam overaanbod (lage prijzen), en vervolgens dit zuurstofsetpoint weer verlagen om uit te komen op het 'normale' werk-niveau, zal leiden tot CO₂ emissiereducties op landelijke (Europese) schaal. De exacte emissiereducties worden bepaald door ontwikkelingen op de elektriciteitsmarkten (opgesteld duurzaam/fossiel opwekvermogen, import/export, et cetera);
- Binnen het domein van de rwzi kan deze praktijk leiden tot een (beperkte) verhoging van het directe elektriciteitsgebruik. Immers: fluctueren met de zuurstof inbreng is soms iets minder efficiënt dan een constante toevoer verzorgen. Aandachtspunt hierbij betreft uiteraard lopende verplichtingen in het kader van energie efficiency (MJA-3);
- Dergelijke procesfluctuaties dienen te worden ingeregeld binnen de randvoorwaarde van het voorkomen van een achteruitgang in effluentkwaliteit;
- Waterschappen die hiermee ervaring willen opdoen wordt aangeraden om in eerste instantie gedurende de nacht onder DWA condities hiermee te experimenteren.

7

DISCUSSIE VERKENNINGEN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT

Voor uitvoering van de verkenningen ‘De (on)mogelijkheden van flexibel energiemangement op rioolwaterzuiveringsinrichtingen’ leken er voor de beluchting op een rwzi kansen te zijn om op energie en kosten te besparen en een bijdrage aan het klimaatakkoord te leveren. Dit was ingegeven door de mogelijkheden die er op dit gebied bleken te zijn in het watersysteem (timing en voorspelbaarheid gemalen). Qua potentiële testlocatie was er gekozen voor de rwzi Katwoude, van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, één van de initiatiefnemers. In de definitiefase van het project heeft dit geleid tot de volgende concrete deelverkenningen:

1. Potentiële energiebesparing door alternatieve scenario's voor de luchtinbreng;
2. Flexsturing op het DWA debiet om dit zo gelijkmatig mogelijk aan te voeren (egalisatie);
3. Kostenbesparing door voorspelbaarheid energievraag rwzi's;
4. Reductie CO₂ emissies door ‘vraagsturing’.

In dit hoofdstuk vindt de discussie plaats per deelverkenning en wordt geëindigd met een synthese van deze verkenningen.

7.1 POTENTIELE ENERGIEBESPARING DOOR ALTERNATIEVE SCENARIO'S VOOR DE LUCHTINBRENG

Kan het beluchtingsregime van rwzi's bij behoud van de effluentkwaliteit zodanig worden aangepast dat op energie en/of kosten kan worden bespaard? Uit onze analyses blijkt dat wijzigingen in de aanvoer, bufferen over een etmaal, omdraaien dag-nacht, flexibel veranderen zuurstofsetpoints of intermitterend voeden en beluchten, bijna geen energiebesparing opleveren maar vaak resulteren in een (geringe) toename van het energieverbruik. Bij het modelsysteem de rwzi Katwoude wordt in de beluchte zone gewerkt met een laag zuurstofgehalte van 0,5 mg O₂/l en een bijbehorend relatief hoog NH₄-N gehalte van 6 mg/l. Het zuurstofgehalte kan daarbij alleen maar verhoogd worden en dat geeft een hoger energieverbruik.

Elders in Nederland wordt over het algemeen in de beluchte zones van de rwzi met hogere zuurstofconcentraties gewerkt. Bijvoorbeeld bij BCFS en mUCT systemen wordt vaak gewerkt met een zuurstofgehalten van 1,5-2,0 mg O₂/l. De achterliggende redenen hiervoor zijn; een goede slibkwaliteit (Stowa 2001-02; ‘Beheersing van licht slib bij de behandeling van stedelijk afvalwater met biologische nutriëntenverwijdering’) en een lage NH₄-N concentratie in het effluent (en de eisen van het ontvangende oppervlaktewater). Deze rwzi's kunnen met een verlaging van het zuurstofgehalte (naar 1,5 of 1,0 mg O₂/l) zeker procenten (tot 5-10 %) energie op de beluchting besparen. De keuze hiervoor is vaak een voorkeur van de desbetreffende waterschappen en is niet het directe doel van deze studie gericht op flexibel energiemangement.

Indien bij het toepassen van een ander beluchttingsregime met lagere tarieven gewerkt kan worden, moet het energieverbruik in ieder geval niet of weinig toenemen. Los van de zuurstofsetpoint discussie is het egaliseren van de aanvoer over een etmaal een mogelijkheid. Het omdraaien van dag-nacht is ook mogelijk, maar de zuurstofsetpoints moeten dan wel gelijk blijven, om geen negatief effect te hebben. Intermitterend voeden en beluchten per kwartier is alleen bekeken in combinatie met egalisatie over het etmaal. Deze oplossing is ook mogelijk als daarmee een voordeel op de tarieven kan worden verkregen.

Het aanpassen van het beluchttingsregime levert dus geen besparing op energieverbruik. Het heeft alleen zin om de aanvoer te egaliseren of intermitterend te beluchten als er andere drijfveren zijn om dat te doen, zie de volgende paragrafen en de synthese in paragraaf 7.5.

7.2 FLEXSTURING OP HET DWA DEBIET OM DIT ZO GELIJKMATIG MOGELIJK AAN TE VOEREN (EGALISATIE)

De mogelijkheid is onderzocht om sturing van het DWA debiet toe te passen op de rwzi door Model Predictive Control. Uit de statistische analyse bleek dat het te voorspellen DWA debiet dat op de rwzi afkomt het beste gebaseerd kan worden op zowel het uur als de maand. Daarnaast is gekeken naar de mogelijkheid om de DWA aanvoer te sturen met behulp van een MPC model. Hiervoor is een eenvoudige doelfunctie genomen, namelijk een vlakke aanvoer. Het is gelukt om zo'n model te realiseren en toe te passen om een vlakke aanvoer te krijgen richting de rwzi.

Het resultaat is dat hiervoor bij de rwzi Katwoude een aanvoerbuffer van 2.400 m³ groot genoeg is om het debiet zo vlak mogelijk te krijgen. Als dit volume beschikbaar is in het stelsel of in de bestaande rwzi aanwezig is, valt toepassing te overwegen. Nieuwbouw van een dergelijke buffer zal qua kosten niet gauw opwegen tegen de relatief kleine kosten besparingen die door buffering over een etmaal worden voorzien (paragraaf 7.1).

7.3 KOSTENBESPARING DOOR VOORSPELBAARHEID ENERGIEVRAAG RWZI'S

Voorspelbaar gedrag lijkt financiële waarde te hebben. Om de waarde te verzilveren zal gebruik gemaakt moeten worden van een flexibel energie contract, waarbij geen vaste prijs meer geldt, maar de prijs fluctueert door de tijd. Hierbij ligt de verantwoordelijkheid om de energie afname te laten aansluiten bij de een dag eerder opgestelde prognose bij de waterschappen. Een goede voorspelling verkleint het risico van ongewenste kosten, maar de kosten blijven variabel. Uit andere sectoren blijkt dat een kostenreductie van 5-15 % ten opzichte van de handelswaarde van elektriciteit haalbaar lijkt. Dit is echter een brede marktindicatie en niet specifiek voor een rwzi. De potentiële besparing per rwzi is onbekend.

7.4 REDUCTIE CO₂ EMISSIES DOOR 'VRAAGSTURING'

Directe CO₂ emissiereducties door afvlakken DWA aanvoer en toepassen van een ander (flexibel) beluchttingsregime lijken niet zeer kansrijk, zie voorgaande paragrafen. De vraag blijft dan in hoeverre indirecte CO₂ emissiereducties te bereiken zijn door toepassing van vraagsturing. Hierbij gaat het om het afstemmen van het gebruik op momenten van duurzame overproductie. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat een beperkte toename van het energiegebruik binnen het waterschap te rechtvaardigen is, als dit op landelijke of Europese schaal leidt tot minder CO₂ emissies. Dit kan bijvoorbeeld wanneer er landelijk in totaal

minder fossiele energie wordt gebruikt, door op de juiste momenten lokaal iets meer duurzame energie te gebruiken. ‘We gebruiken nu lokaal iets meer duurzame energie, om landelijk straks minder fossiele energie nodig te hebben.’

De kansen liggen niet in het aftoppen van de piekvraag, maar juist in het concentreren van de eigen energievraag op die momenten dat er landelijk gezien overaanbod is (daluren). In paragraaf 7.2 is aangegeven dat intermitterend beluchten kan worden toegepast zonder dat het (veel) meer energie kost. Rwzi's die zich willen voorbereiden op een fluctuerende en duurzame elektriciteitsvoorziening, dienen dan ook de volgende overwegingen mee te nemen:

- Het tijdelijk verhogen van het zuurstofsetpoint op momenten van duurzaam overaanbod (lage prijzen), en vervolgens dit zuurstofsetpoint weer verlagen om uit te komen op het ‘normale’ werkniveau, zal leiden tot CO₂ emissiereducties op landelijke (Europese) schaal. De exacte emissiereducties worden bepaald door ontwikkelingen op de elektriciteitsmarkten (opgesteld duurzaam/fossiel opwekvermogen, import/export, et cetera)
- Binnen het domein van de rwzi kan deze praktijk leiden tot een (beperkte) verhoging van het directe elektriciteitsgebruik. Immers: fluctueren met de zuurstof inbreng is soms iets minder efficiënt dan een constante toevoer verzorgen. Aandachtspunt hierbij betreft uiteraard lopende verplichtingen in het kader van energie efficiency
- Dergelijke procesfluctuaties dienen te worden ingeregeld binnen de randvoorwaarde van een constante effluent kwaliteit
- Waterschappen die hiermee ervaring willen opdoen wordt aangeraden om in eerste instantie gedurende de nacht onder DWA condities hiermee te experimenteren

7.5 SYNTHESE VERKENNINGEN, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In de discussies van de verkenningen die hiervoor beschreven zijn, komt naar voren dat er diverse mogelijkheden zijn om iets te veranderen aan de DWA aanvoer en flexibel om te gaan met het beluchtingsregime (met gelijkblijvende effluenteisen). Dit levert echter geen significante energie-besparing op.

De potentiële kostenbesparingen die kunnen volgen uit het voorspellen/sturen van het elektriciteitsgebruik van de beluchting zijn binnen dit onderzoek niet in beeld gebracht. Ervaringen uit andere sectoren wijzen op een besparing van 5 – 15 % op de elektriciteitskosten maar daarbij moet wel rekening worden gehouden met kosten om deze reductie te realiseren. Dus het totale voordeel zal uiteindelijk kleiner zijn. Het weloverwogen afstemmen van de zuurstoftoevoer op overschotten van duurzame elektriciteit zal op termijn leiden tot indirecte CO₂ emissiereducties buiten het waterschap (landelijk of Europees). Afhankelijk van de beluchtingsinstallatie kan dit wel leiden tot een beperkte toename van het elektriciteitsgebruik van de rwzi's zelf. Of en wanneer deze werkwijze significant bijdraagt aan de verduurzaming van het elektriciteitsgebruik is afhankelijk van de ontwikkeling van de elektriciteitsmarkten de komende jaren.

In tabel 7.1 zijn de bevindingen in tabelvorm samengevat.

TABEL 7.1 SAMENVATTING BEVINDINGEN 'DE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN FLEXIBEL ENERGIEMANAGEMENT OP RIJOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN' 1) ANDER BELUCHTINGSREGIME 2) FLEX STURING DWA DEBIET 3) VOORSPELBAARHEID ENERGIEVRAAG EN 4) VRAAGSTURING

	Emissie CO ₂		Kosten	
	Waterschap	Nederland	Waterschap	Nederland
Ander beluchtingsregime	0	0	0	0
Flex sturing DWA debiet	0	0	0	0
Voorspelbaarheid energievraag	0	0	0/+	0/+
Vraagsturing	0	+	0	0

Take home message. Uit de verkenningen blijkt dat wijzigingen in de DWA aanvoer, zoals bufferen over een etmaal, omdraaien dag-nacht, flexibel veranderen zuurstofsetpoints of intermitterend voeden en beluchten (bij gelijkblijvende effluentkwaliteit), bijna geen energiebesparing opleveren maar vaak resulteren in een geringe toename van het energieverbruik (effecten op lachgasemissies zijn niet bekend). Op basis van ervaringen in andere sectoren, kan gesteld worden dat de mogelijke besparingen in kosten voor het waterschap door het toepassen van flexibel energiemangement beperkt zijn. De daadwerkelijke besparingen hangen ook sterk af van de huidige (langdurige) prijsafspraken waarvoor energie is ingekocht.

Uit dit rapport blijkt, dat afhankelijk van het toekomstige klimaatbeleid in Nederland, flexibel energie-management op rwzi's buiten de waterschapsgrenzen wel kan leiden tot een overall toename in duurzaamheid. Hierbij is de voorspelbaarheid van de DWA aanvoeren op rwzi's van groot belang. Het is daarom zinvol om met het oog op de toekomst te investeren in het vergroten van de voorspelbaarheid van de aanvoer op en van de energievraag van rwzi's.

BIJLAGE 1

FACTSHEET RWZI KATWOUDE EN HSA MODEL

Een overzichtsfoto van de rwzi Katwoude is weergegeven in figuur A1.

FIGUUR A1 OVERZICHT LOCATIE RWZI KATWOUDE (LUCHTFOTO 2016)



De ontwerpgegevens van rwzi Katwoude staan benoemd in tabel .

TABEL A1 ONTWERPGEGEVENS RWZI KATWOUDE

Benaming	Eenheid	Waarde
Biologische capaciteit (à 136 g TZV/d)	i.e.	96.300
Hydraulische capaciteit (RWA)	m ³ /uur	3.250
Waterdiepte	m	5,0
Anoxisch selector volume	m ³	270
Vast anoxisch volume	m ³	1.760
Simultaan anoxisch volume	m ³	5.840
Totaal anoxisch volume	m ³	7.870
Aeroob volume	m ³	10.000
Totaal volume	m ³	17.870

De rwzi Katwoude is uitgerust met een drietal puntbeluchters. Het inbrengrendement van de geïnstalleerde puntbeluchters als functie van het toerental is binnen HHNK niet bekend. De leverancier heeft ook na herhaaldelijke verzoeken geen informatie aangeleverd. Daarmee is de curve van het inbrengrendement bij diverse toerentallen bij een vaste indompeldiepte niet te bepalen. Op basis van gegevens van andere puntbeluchters lijkt er weinig invloed van het toerental te zijn. Voor deze studie is voor de puntbeluchters over het werkbereik een vast inbrengrendement (kg O₂/kWh) toegepast.

Deze puntbeluchters worden aangestuurd op basis van een zuurstofsetpoint. De gegevens van het beluchtingssysteem en de zuurstofsetpoints zijn vermeld in tabel A2.

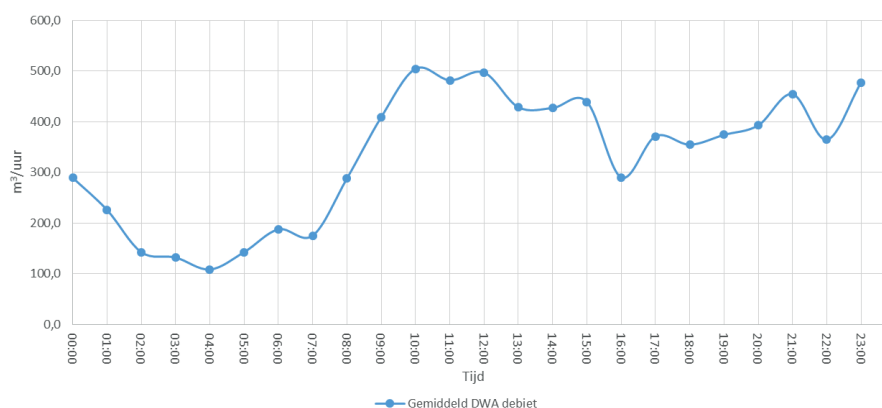
TABEL A2

TYPE EN REGELING PUNTBELUCHTERS RWZI KATWOUDE

Benaming	Eenheid	Waarde
Type beluchting		
Type beluchting	-	Puntbeluchting
Producent beluchters	-	Spaans Babcock B-3500
Capaciteit beluchter	kg O ₂ /uur	220
Vermogen beluchter	kW	132
Aantal beluchters	-	3
Inbrengrendement	kg O ₂ /kWh	1,67
Indompeldiepte instelbaar	-	Vast
Beluchtingsregeling		
Zuurstofsetpoint minimaal	mg O ₂ /liter	0,01
Zuurstofsetpoint maximaal	mg O ₂ /liter	1,20
Zuurstofsetpoint aanpassing stapgrote	mg O ₂ /liter	0,20
Toegepast streef zuurstofsetpoint	mg O ₂ /liter	0,5
Cyclustijd stapgrootte	minuten	5

Rwzi Katwoude ontvangt zijn influent via een tweetal persleidingen die het afvalwater aanvoeren uit de kernen Edam/Volendam en Monnickendam. Het DWA profiel is weergegeven in figuur A2.

FIGUUR A2

GEMIDDELD DWA DEBIET (M³/UUR) RWZI KATWOUDE MET EEN TOTAAL DAGDEBIET VAN 7.956 M³/DAG

Op basis van de influentdagvracht (jaarrapportage 2016) en het totale DWA dagdebiet van 7.956 m³ per dag (periode 22-05-16 tot en met 28-05-16) zijn de influentconcentraties bepaald. Deze influent concentraties zijn weergegeven in tabel A3. De vermelde gegevens zijn toegepast bij de modellering van de diverse scenario's.

TABEL A3

DWA INFLUENTVRACHTEN EN CONCENTRATIES OP DE RWZI KATWOUDE 2016

Parameter	Influent dagvracht (kg/dag)	DWA influent concentraties (mg/l)
Chemisch zuurstof verbruik (CZV)	7.239	910
Biologisch zuurstof verbruik (BZV)	3.489	439
Zwevende stof (ZS)*	3.489	439
Stikstof Kjeldahl (N-Kj)	780	98
Stikstof totaal (N-totaal)	780	98
Fosfaat totaal (P-totaal)	111	14

* In verband met een niet kloppende zwevende stof vracht in de aangeleverde gegevens is de verhouding ZS/BZV gelijk gesteld aan $ZS/BZV = 1$ om de juiste slibproductie te krijgen.

De effluentconcentraties (jaar 2016) zijn weergegeven in tabel A4. Bij de rwzi Katwoude is door het lage zuurstofsetpoint NH_4 -N relatief hoog en NO_3 -N relatief laag.

TABEL A4

EFFLUENTCONCENTRATIES VAN DE RWZI KATWOUDE (JAAR 2016)

Parameter	Effluentconcentraties (mg/l)
CZV	38
BZV	2,9
ZS	5,6
N-Kj	7,3
NH_4 -N	6,0
N-totaal	8,3
P-totaal	1,0

Deze gegevens zijn toegepast bij de kalibratie van het HSA-model, dat is toegepast voor het doorrekenen van de scenario's.

HSA MODELLERING

Het toegepaste HSA-model is gekalibreerd aan de huidige situatie van de rwzi Katwoude. In tabel A5. staan de kalibratieparameters die ook zijn toegepast bij het doorrekenen van de verschillende scenario's. Er is uitgegaan van een temperatuur van 20 °C, omdat het beluchtingssysteem door-gaans op deze temperatuur wordt berekend.

TABEL A5

PARAMETERS HSA MODEL NA KALIBRATIE RWZI KATWOUDE

Parameter	Eenheid	Waarde
Standaard		
Temperatuur	°C	20
SVI	ml/g	120
Chemicaliëndosering	-	FeSO ₄
Dosering	Mol Me/mol P	0,70
Slibgehalte	kg ds/m ³	3,69
Slibbelasting	kg BZV / kg ds * d	0,056
Maximale recirculatieverhouding	-	5,0
Slibgehalte	kg / m ³	3,52
Alfa-factor puntbeluchting	-	0,9
Alfa-factor bellenbeluchting	-	0,7
Netto slibaanwas	kg ds / d	2.900
Stikstofvracht spuislib	kg N / d	71,5
Slibleeftijd	dagen	21,7
Specifieke endogene ademhaling	kg O ₂ / kg ds * d	0,34
Coëfficiënt endogene respiratie	kg O ₂ / kg ds * d	0,070
Bellenbeluchting		
Aantal beluchttingsplaten	-	128
Druk ingaande lucht	bar	1,013
Druk over het membraan	bar	0,050
Druk over leiding en membraan	bar	0,550
Druk uitgaande lucht	bar	1,563

BIJLAGE 2

ACHTERGRONDEN

BELUCHTINGSBEREKENING

OPBOUW ZUURSTOFVRAAG

De zuurstofvraag van een rwzi bestaat uit:

- Omzetting van CZV/BZV
- Omzetting van ammonium
- Slibademhaling/-respiratie
- (minus) omzetting van nitraat (NO_3) naar stikstofgas

Bij rwzi's met voordennitrificatie, zoals op rwzi Katwoude, wordt het nitraatrijke water via een recirculatie in contact gebracht met BZV. Nitraat is hier vrijwel altijd in overmaat aanwezig. In de voordennitrificatie wordt een groot gedeelte van het BZV afgebroken en/of gebruikt voor de slibgroei. Grofweg kan gesteld worden dat er geen BZV overblijft na de voordennitrificatie. Vaak is dit ook opgenomen in de pompregeling voor de aansturing van de retourstromen. Bij hoge BZV-vrachten en een hoge slibbelasting kan BZV doorslaan en moet dit worden weg geoxideerd. In Nederland is echter vaak sprake van laagbelaste systemen en zal er dus geen BZV doorslaan.

Voor de zuurstofvraag kan dus alleen gekeken worden naar ammoniumomzetting en slibademhaling/-respiratie. De laatste daarvan is een zuurstofvragende component die onafhankelijk is van de voedingswijze (dit betreft trage processen). In totaal bestaat de zuurstofvraag van de rwzi Katwoude uit circa 60 % voor de slibademhaling/-respiratie en 40 % voor de stikstofomzetting. *Aanpassing in de wijze waarop de voeding plaatsvindt (de scenario's), heeft dus alleen een effect op die 40 % van de zuurstofvraag.*

De benodigde luchtinbreng wordt naast de aanvoervrachten ook bepaald door:

1. Het medium met eventuele versturende (oppervlakte actieve) stoffen die zich daarin bevinden (alfafactor)
2. De zuurstofconcentratie, het zuurstofsetpoint en de afvalwatertemperatuur (zuurstofdeficiet óf betafactor)

Beide factoren worden hieronder in meer detail toegelicht.

ALFAFACTOR

De zuurstofoverdracht wordt belemmerd door opgeloste stoffen in het medium (oppervlakte actieve stoffen). In vuilwater moet in relatie tot reinwater meer zuurstof worden ingebracht om eenzelfde zuurstofconcentratie te kunnen bereiken. Bij het ontwerp van een installatie wordt hier rekening mee gehouden en wordt dit de alfafactor genoemd. De alfafactor voor punt- en bellenbeluchting verschilt. Dit heeft te maken met de wijze waarop de zuurstofinbreng plaatsvindt. Voor een puntbeluchter wordt doorgaans een alfafactor van 0,9 aangehouden (weinig correctie). Bij bellenbeluchting bedraagt de alfafactor 0,7 (veel

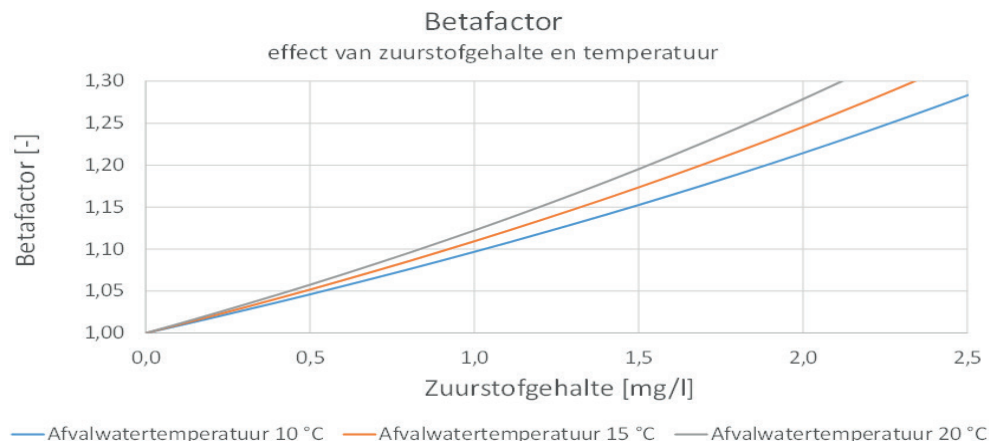
correctie). Dit wil zeggen dat bij bellenbe-luchting meer gecorrigeerd moet worden dan bij puntbeluchting.

BETAFCTOR

De ‘drijvende kracht’ voor de zuurstofoverdracht is kleiner naarmate het zuurstofconcentratie in het water hoger is. Om het vaste zuurstofsetpoint op peil te houden, moet deze belemmering dus worden gecompenseerd. Bij het ontwerp van een beluchtingsinstallatie wordt dit de betafactor genoemd (ook wel bekend als zuurstofdeficiet). De betafactor is in figuur A3 als functie van de zuurstofconcentratie weergegeven.

FIGUUR A3

BETAFCTOR (-) EN HET EFFECT VAN DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG O₂/L) EN (AFVAL)WATERTEMPERatuur (°C)



In deze figuur is te zien dat de betafactor:

1. Afneemt naarmate de zuurstofconcentratie lager ligt
2. Toeneemt bij een hogere afvaltemperatuur

Bij een (afval)watertemperatuur van 20 °C en een zuurstofconcentratie van 2,0 mg O₂/l is de betafactor 1,28. Dit betekent dat er 28 % meer lucht moet worden ingebracht om het zuurstofgehalte op peil te houden. Door een lager zuurstofsetpoint te kiezen bijvoorbeeld 1,5 mg O₂/l hoeft in principe minder lucht in te worden gebracht, namelijk 19 % in plaats van 28 %. Dit heeft uiteindelijk effect op het toerental van de puntbeluchter (geen efficiency verschil, wel minder kWh) of op de elementbelasting (efficiencyverbetering en minder kWh).

INTERMITTERENDE BELUCHTING

Wanneer er geen voeding plaatsvindt, kan overwogen worden om ook de zuurstofinbreng te stoppen. Zoals eerder genoemd blijft de slibademhaling/-respiratie doorgaan. Enige vorm van aanwezig zuurstof (O₂ en NO₃) zal dan worden aangesproken en hierdoor nemen deze concentraties af. Dit kan tot een zekere tijd. Wanneer er geen zuurstof en/of nitraat meer aanwezig is (anaerobe condities), zal het opgeslagen fosfaat in het slib weer in oplossing komen. Dit levert een verslechtering van de effluentkwaliteit op en is niet wenselijk. De beluchting stoppen kan dus gedurende korte tijd. Hieronder is voor rwzi Katwoude de berekening opgenomen voor het bereiken van anaerobe condities na stopzetting van de beluchting.

De berekeningen met intermitterende beluchting en aanvoer zijn in de scenarioberekeningen uitgevoerd op urenbasis, net als bij de andere scenario's. Daarmee hoefden de minste aanpassingen aan het model plaats te vinden. Dit is voldoende voor het in beeld brengen van de effecten. In werkelijkheid moet, zoals hierboven aangegeven, geschakeld worden (aan/uit) om het kwartier tot 20 minuten.

TABEL A6 TIJDSDUUR VOORDAT O₂ EN NO₃-N OP ZIJN EN DE BELUCHTING WEER AAN MOET.

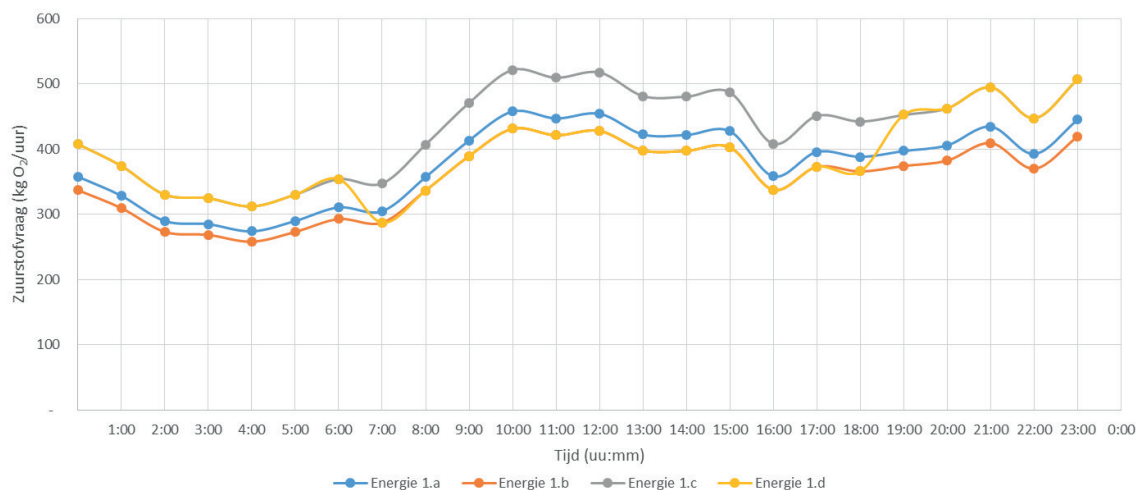
Zuurstofgehalte in beluchte zones:	0,5 mg O ₂ /l
Nitraat gehalte in effluent (gem. in AT):	1 mg NO ₃ -N/l - per afgebroken mg NO ₃ -N/l komt 2,86 mg O ₂ /l vrij
Volume beluchte tank	10.000 m ³ *
Totaal volume AT:	17.870 m ³
Opgelost zuurstof:	3 kg O ₂
Nitraat:	51 kg O ₂
Totaal zuurstof:	54 kg O ₂
Slibademhaling/-respiratie:	185 kg O ₂ /h
Tijd tot AT volledig zuurstofloos is:	17 á 18 minuten

* De beluchte zone is in de praktijk niet volledig belucht. Hiervoor is aangenomen dat 60 - 65 % van de beluchte zone een concentratie heeft van 0,5 mg O₂/l.

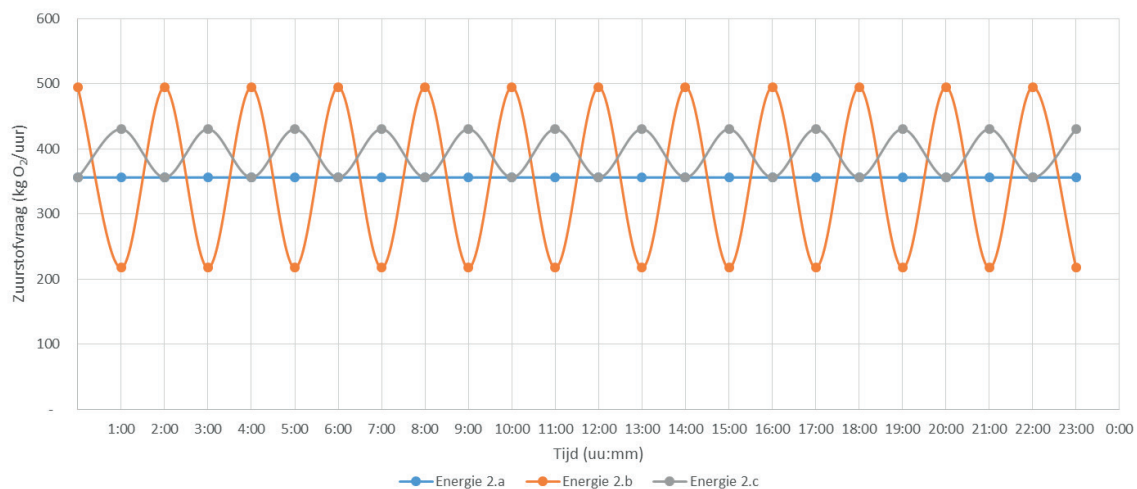
BIJLAGE 3

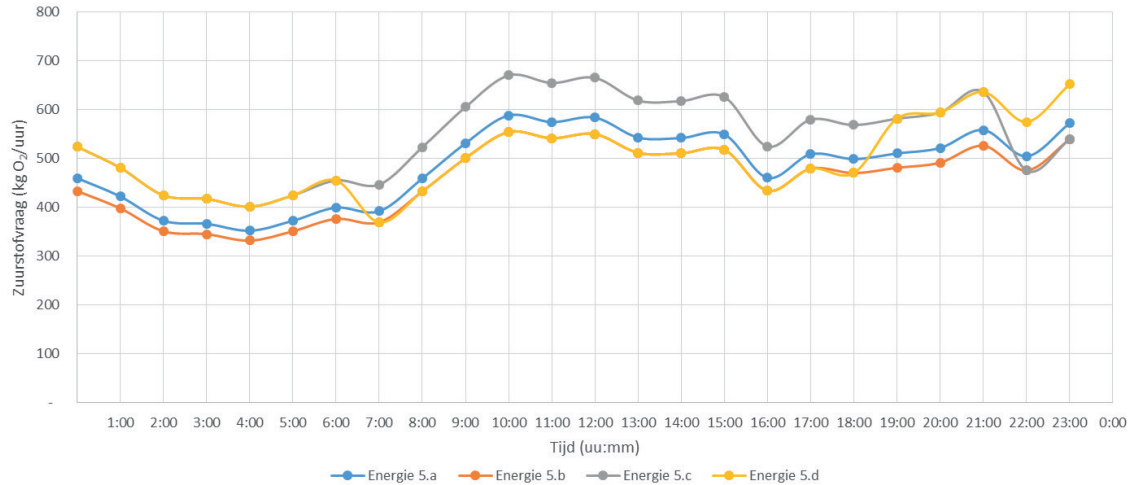
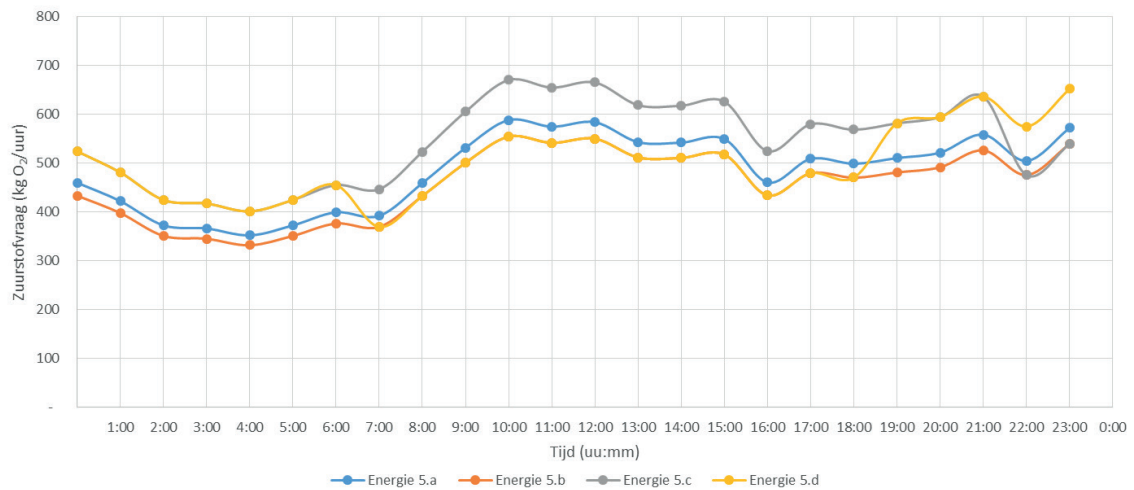
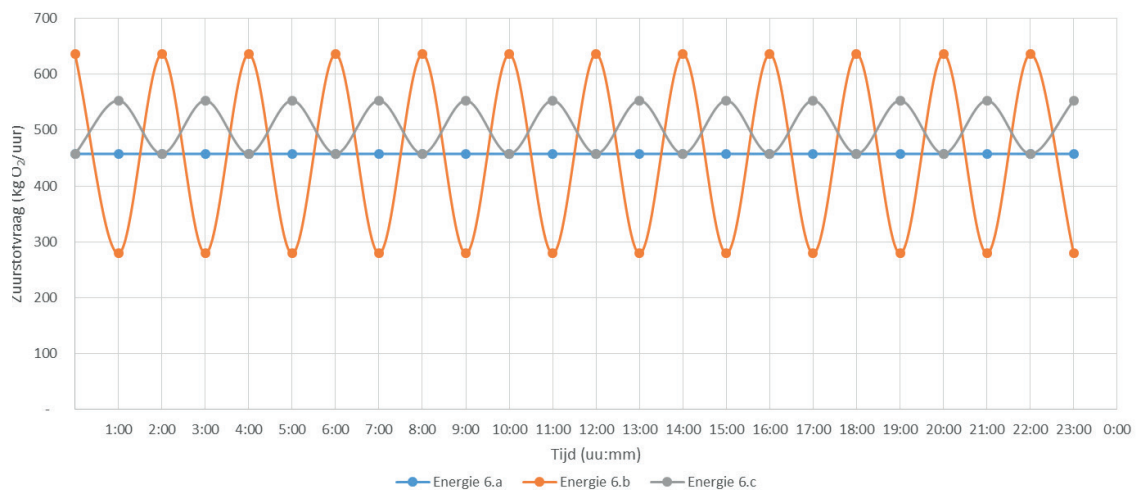
SCENARIO'S ZUURSTOFVRAAG PER UUR

FIGUUR B1 VERLOOP ZUURSTOFVRAAG PER UUR, SCENARIO 1, PUNTBELUCHTING, STANDAARD DWA PROFIEL, ALFAFACTOR 0,9



FIGUUR B2 VERLOOP ZUURSTOFVRAAG PER UUR, SCENARIO 2, PUNTBELUCHTING, AFGEVLAKT DWA PROFIEL, ALFAFACTOR 0,9

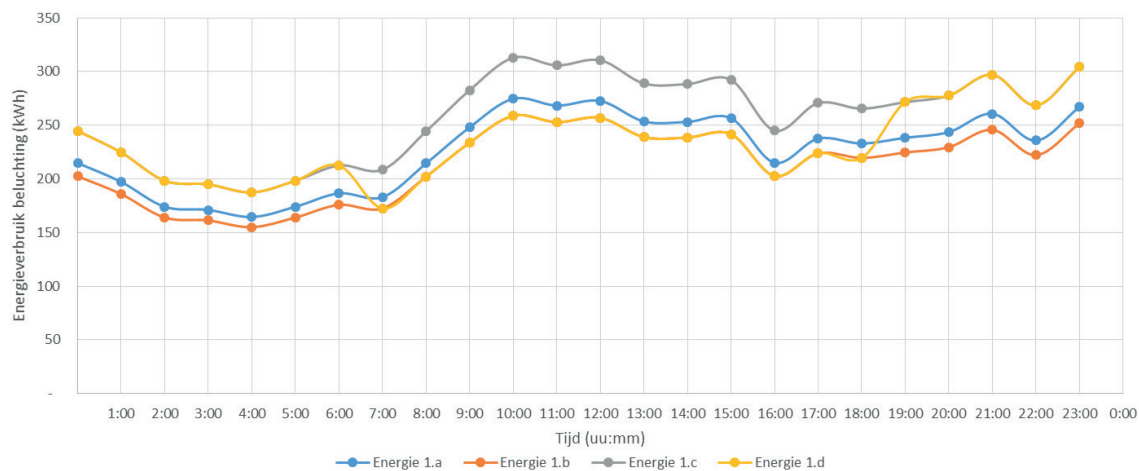


FIGUUR B3 VERLOOP ZUURSTOFVRAAG PER UUR, SCENARIO 3, PUNTBELUCHTING, GESPIEGELS DWA PROFIEL, ALFAFACTOR 0,9**FIGUUR B4** VERLOOP ZUURSTOFVRAAG PER UUR, SCENARIO 5, BELLENBELUCHTING, STANDAARD DWA PROFIEL, ALFAFACTOR 0,7**FIGUUR B5** VERLOOP ZUURSTOFVRAAG PER UUR, SCENARIO 6, BELLENBELUCHTING, AFGEVLAKT DWA PROFIEL, ALFAFACTOR 0,7

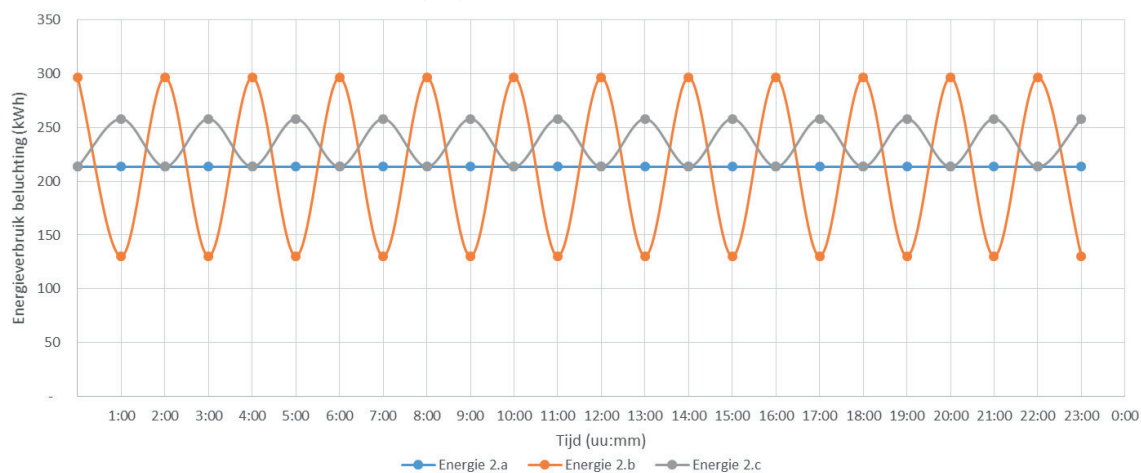
BIJLAGE 4

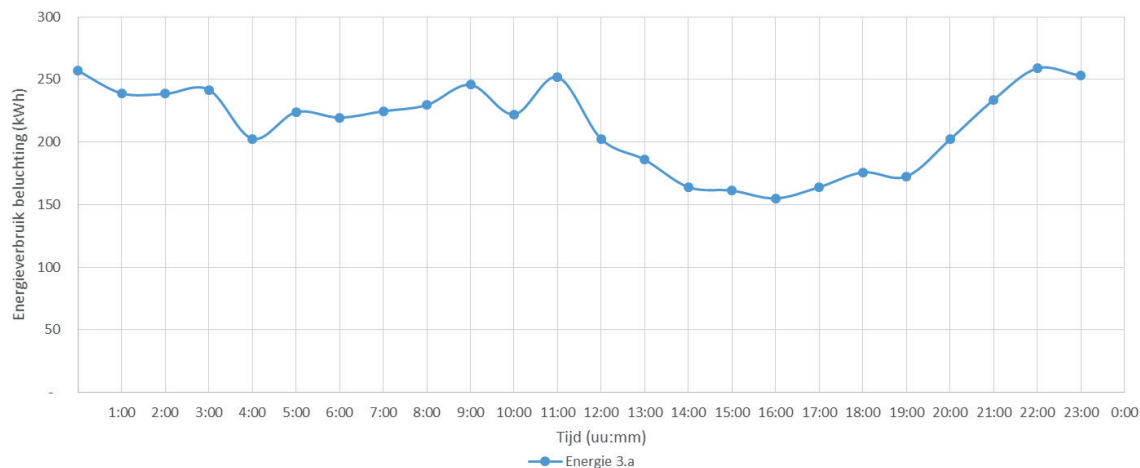
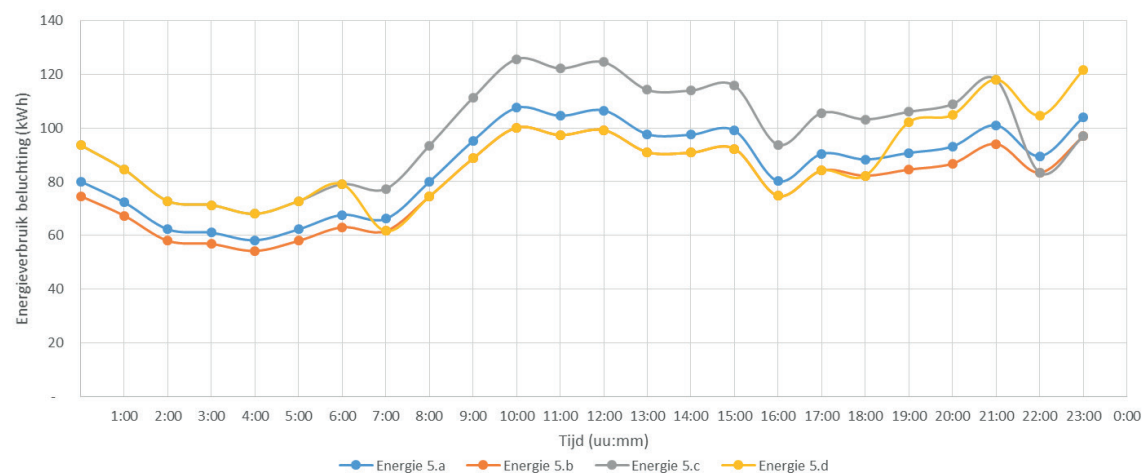
SCENARIO'S ENERGIEVERBRUIK PER UUR

FIGUUR B6 VERLOOP ENERGIEVERBRUIK PER UUR (KWH), SCENARIO 1, PUNTBELUCHTING, STANDAARD DWA PROFIEL

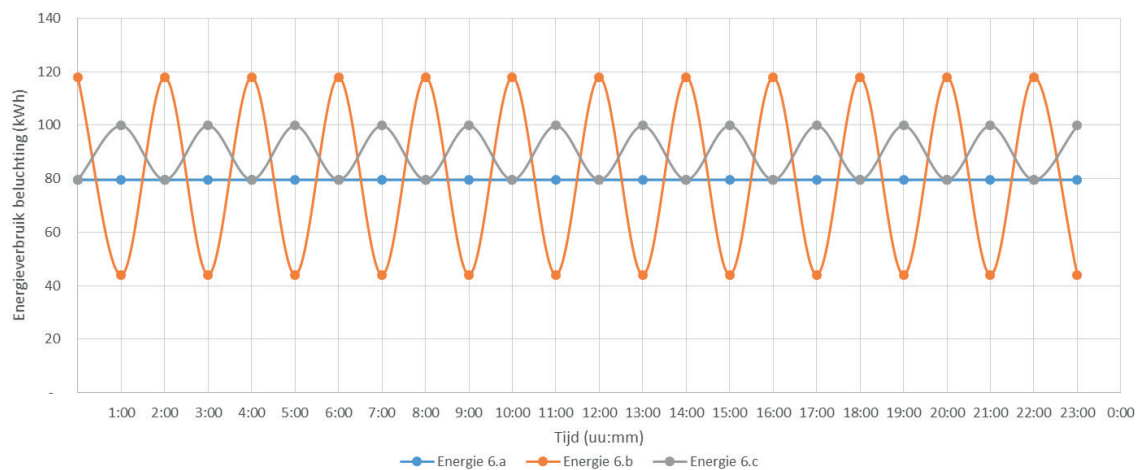


FIGUUR B7 VERLOOP ENERGIEVERBRUIK PER UUR (KWH), SCENARIO 2, PUNTBELUCHTING, AFGEVLAKT DWA PROFIEL



FIGUUR B8 VERLOOP ENERGIEVERBRUIK PER UUR (KWH), SCENARIO 3, PUNTBELUCHTING, GESPIEGELD DWA PROFIEL**FIGUUR B9** VERLOOP ENERGIEVERBRUIK PER UUR (KWH), SCENARIO 5, BELLENBELUCHTING, STANDAARD DWA PROFIEL

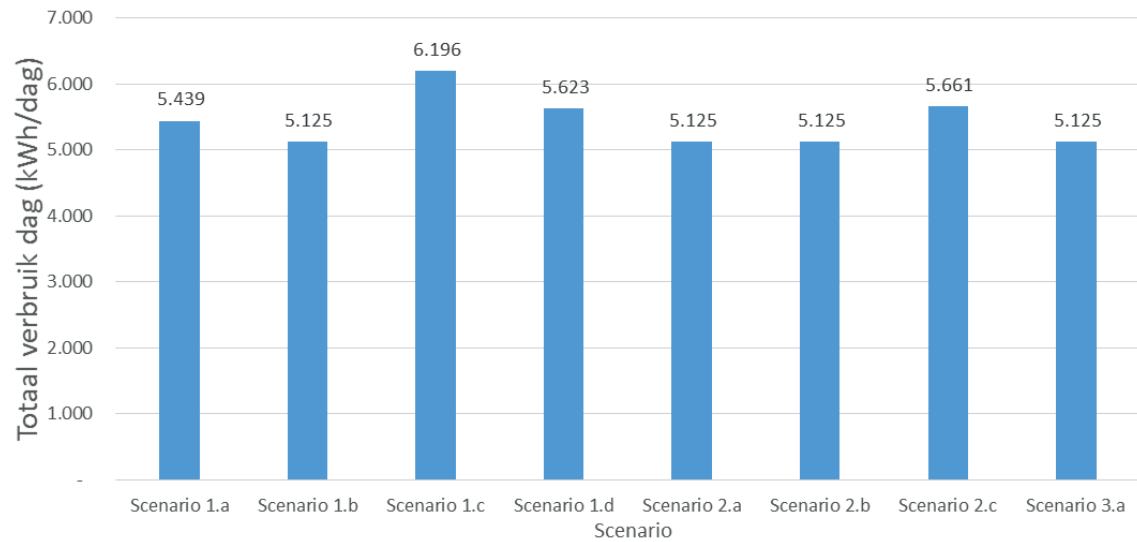
FIGUUR B10 VERLOOP ENERGIEVERBRUIK PER UUR (KWH), SCENARIO 6, BELLENBELUCHTING, AFGEVLAKT DWA PROFIEL



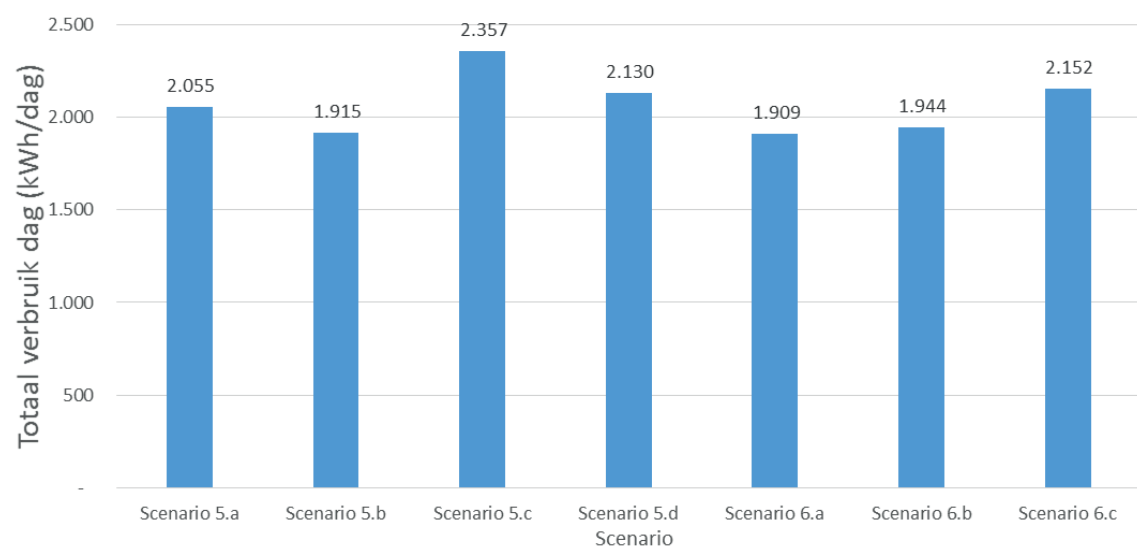
BIJLAGE 5

SCENARIO'S ENERGIEVERBRUIK PER DAG

FIGUUR B11 ENERGIEVERBRUIK TOTAAL PER DAG (KWH/DAG), SCENARIO'S UITGERUST MET PUNTBELUCHTING



FIGUUR B12 ENERGIEVERBRUIK TOTAAL PER DAG (KWH/DAG), SCENARIO'S UITGERUST MET BELLENBELUCHTING



BIJLAGE 6

UITKOMSTEN LINEAIR REGRESSIEMODEL

Lineair regressie model en uitkomsten voor DWA op basis van uur van de dag

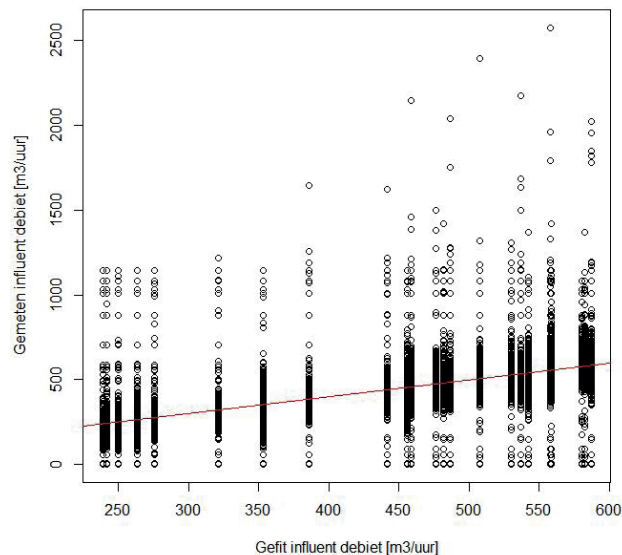
```
Call:
lm(formula = Value ~ Hour, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-586.92  -63.98  -23.24   30.38  2019.29

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  385.980     6.582   58.643 < 2e-16 ***
Hour1        -64.916     9.304   -6.977 3.15e-12 ***
Hour2       -110.359     9.300  -11.866 < 2e-16 ***
Hour3       -136.506     9.273  -14.721 < 2e-16 ***
Hour4       -144.308     9.296  -15.523 < 2e-16 ***
Hour5       -147.336     9.292  -15.855 < 2e-16 ***
Hour6       -122.918     9.277  -13.250 < 2e-16 ***
Hour7        -33.122     9.285   -3.567 0.000362 ***
Hour8         69.865     9.285    7.525 5.60e-14 ***
Hour9        156.586     9.304   16.830 < 2e-16 ***
Hour10       194.468     9.296   20.919 < 2e-16 ***
Hour11       196.114     9.285   21.122 < 2e-16 ***
Hour12       172.241     9.296   18.528 < 2e-16 ***
Hour13       143.893     9.292   15.485 < 2e-16 ***
Hour14       121.279     9.308   13.029 < 2e-16 ***
Hour15        90.534     9.312    9.722 < 2e-16 ***
Hour16        72.829     9.328    7.808 6.23e-15 ***
Hour17        72.665     9.340    7.780 7.75e-15 ***
Hour18        95.936     9.348   10.263 < 2e-16 ***
Hour19       171.727     9.324   18.418 < 2e-16 ***
Hour20       200.945     9.332   21.533 < 2e-16 ***
Hour21       150.596     9.308   16.179 < 2e-16 ***
Hour22       100.200     9.308   10.765 < 2e-16 ***
Hour23        55.913     9.316    6.002 2.00e-09 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 160 on 14180 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3487,    Adjusted R-squared:  0.3476
F-statistic: 330.1 on 23 and 14180 DF,  p-value: < 2.2e-16

R2 = 0.3486904
Correlatie is 0.5905001
```



Lineair regressie model en uitkomsten voor DWA op basis van uur van de dag en maand

```

Call:
lm(formula = Value ~ Month + Hour, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-671.12  -59.40  -12.27   39.77  2017.27

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  427.631     7.494   57.064 < 2e-16 ***
Month2       -74.889     6.247  -11.987 < 2e-16 ***
Month3        88.302     5.816   15.181 < 2e-16 ***
Month4       -69.755     5.884  -11.854 < 2e-16 ***
Month5       -82.292     5.798  -14.193 < 2e-16 ***
Month6       -76.961     5.820  -13.224 < 2e-16 ***
Month7       -84.722     6.587  -12.863 < 2e-16 ***
Month8       -71.179     6.511  -10.932 < 2e-16 ***
Month9       -39.557     6.434   -6.148 8.05e-10 ***
Month10      -54.155     6.260   -8.651 < 2e-16 ***
Month11     -17.397     7.654   -2.273 0.023046 *
Month12     -22.506     6.457   -3.485 0.000493 ***
Hour1        -65.350     8.796   -7.430 1.15e-13 ***
Hour2       -109.475     8.792  -12.452 < 2e-16 ***
Hour3       -136.376     8.766  -15.557 < 2e-16 ***
Hour4       -144.308     8.788  -16.420 < 2e-16 ***
Hour5       -147.672     8.785  -16.810 < 2e-16 ***
Hour6       -123.347     8.770  -14.065 < 2e-16 ***
Hour7        -34.077     8.777   -3.882 0.000104 ***
Hour8         68.772     8.777    7.835 5.02e-15 ***
Hour9        155.576     8.796   17.688 < 2e-16 ***
Hour10       193.243     8.789   21.988 < 2e-16 ***
Hour11       195.184     8.777   22.237 < 2e-16 ***
Hour12       171.384     8.788   19.501 < 2e-16 ***
Hour13       143.167     8.785   16.297 < 2e-16 ***
Hour14       120.691     8.800   13.716 < 2e-16 ***
Hour15        90.503     8.803   10.281 < 2e-16 ***
Hour16        72.503     8.818    8.222 < 2e-16 ***
Hour17        72.639     8.830    8.227 < 2e-16 ***
Hour18        96.061     8.837   10.870 < 2e-16 ***
Hour19       171.659     8.815   19.475 < 2e-16 ***
Hour20       200.423     8.822   22.719 < 2e-16 ***
Hour21       150.134     8.799   17.062 < 2e-16 ***
Hour22       100.304     8.799   11.399 < 2e-16 ***
Hour23         56.236     8.807    6.385 1.76e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 151.3 on 14169 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4184,    Adjusted R-squared:  0.417
F-statistic: 299.8 on 34 and 14169 DF,  p-value: < 2.2e-16
-----
R2 = 0.4184
Correlatie tussen fit en gemeten (R): 0.647

```

