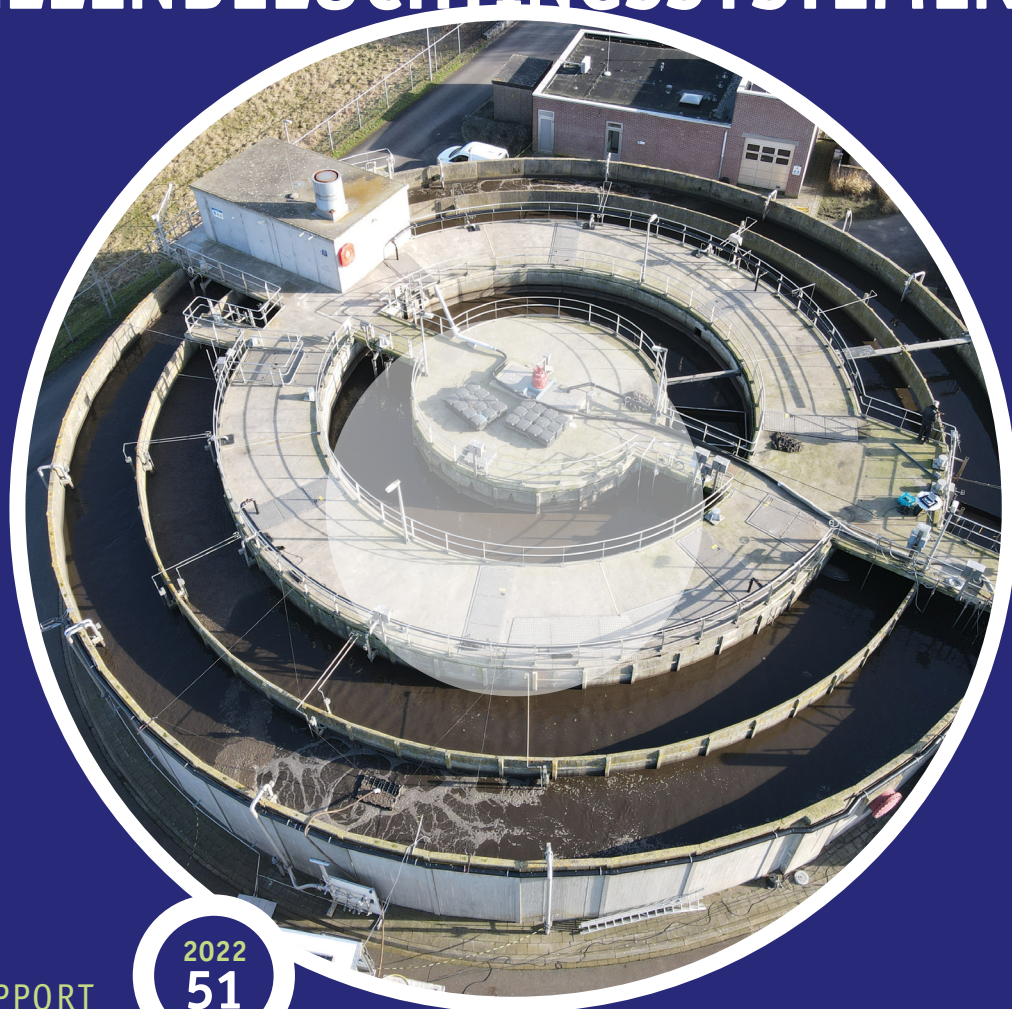


BENUTTING ZUIVERE ZUURSTOF UIT DUURZAME WATERSTOFPRODUCTIE IN RWZI'S MET FIJNE- BELLENBELUCHTINGSSYSTEMEN



RAPPORT

2022
51

BENUTTING ZUIVERE ZUURSTOF UIT DUURZAME WATERSTOFPRODUCTIE
IN RWZI'S MET FIJNE-BELLENBELUCHTINGSYSTEMEN
PILOT- EN PRAKTIJKMETINGEN RWZI HESSENPOORT

RAPPORT

2022

51



ISBN 978.90.5773.006.1



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

AUTEURS Tony Flaming, Waterschap Drents Overijsselse Delta
Lance Nieukoop, TAUW
Rob van der Lans, TU Delft
Berend Reitsma, TAUW
Andries Visser, D. ten Hove Consultancy B.V.

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Alexander Hendriks, Waterschap Rijn en IJssel
Mark Janssen, Waterschap de Dommel
Hans Kuipers, Waterschap Zuiderzeeland
Michel Masseus, Waterschap Drents Overijsselse Delta
Jeremy Versteegh, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Cora Uijterlinde, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2022-51
ISBN 978.90.5773.006.1

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

Zuivere zuurstof dat vrij komt bij duurzame waterstofproductie kan een forse besparing geven van beluchtingsenergie op rioolwaterzuiveringsinstallaties.

Zowel de vraag als het aanbod van groene stroom nemen in Nederland in sterke mate toe. Dit zet het elektriciteitsnet onder grote druk. Plannen voor zonne- en windparken stranden steeds vaker door krapte op het stroomnet. Door op of nabij een rwzi de “overtollige” stroom om te zetten in de “waardevolle energiedrager” waterstof wordt deze stroom niet verspild, maar verward voor diverse toepassingen. Voor elke kg waterstof geproduceerd uit elektrolyse van water komt acht kg zuivere zuurstof (PO) vrij. Dit is een restproduct voor de waterstofproducent maar een waardevol product voor het waterschap. De geproduceerde zuurstof die onder druk vrijkomt kan rechtstreeks naar de beluchting van de actief-slibtanks. Ook kan de restwarmte worden gebruikt voor het duurzaam opwarmen van een slibgisting of gebouwen in de directe omgeving van de rwzi.

De aanleiding voor het onderhavige STOWA onderzoek is de onbekendheid met toepassing van zuivere zuurstof in aanwezige fijne belenbeluchtingssystemen, specifiek ontworpen voor gebruik met buitenlucht. De meeste rwzi's in Nederland gebruiken dit type beluchting. Het onderzoek richtte zich op het gebruik van zuivere zuurstof in een separaat deel van het beluchtingssysteem, met als doel net zo veel zuurstof in het water te brengen als dat de gehele installatie met buitenlucht zou doen. In het onderhavige STOWA onderzoek zijn die vragen onderzocht en beantwoord.

Met deze toepassing wordt een forse bijdrage geleverd aan de energietransitie doordat de groei van duurzame energie uit zon en wind door kan gaan ondanks ons krappe stroomnet, zonder dat energie wordt verspild én dat voor de rwzi's fors op beluchtingsenergie kan worden bespaard én (waar van toepassing) meer groen gas kan worden uitgeleverd.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

AANLEIDING

Zowel de vraag als het aanbod van groene stroom nemen in sterke mate toe. Dit zet het Nederlandse elektriciteitsnet onder grote druk. Plannen voor zonne- en windparken stranden steeds vaker door krapte op het stroomnet. Een nog groter probleem is dat zonne- en windparken soms de stroom niet kwijt kunnen bij pieken in de productie. Ook gebeurt het dat bedrijven zich niet kunnen vestigen omdat er geen ruimte is op het net voor een nieuwe aansluiting. Het Waterschap Drents Overijsselse Delta (WDODelta) doet onderzoek naar energiebesparing en ook naar het bijdragen aan oplossingen van deze zogeheten netcongestie. Realisatie van deze beide doelen is mogelijk door op of nabij een rwzi locatie stroom om te zetten in waterstof met een electrolyser. Daarom heeft het bestuur van WDODelta op 22 september jl besloten om in samenwerking met H₂-Go en Equans een electrolyser voor waterstofproductie op de RWZI Hessenpoort te plaatsen. Doel is om groene waterstof te maken én energie te besparen op het afvalwaterzuiveringsproces. Het project ontvangt hiervoor financiële steun van STOWA en van Interreg REACT-EU.

SYNERGIE WATERSTOFPRODUCTIE EN RWZI'S

Voor elke kg waterstof geproduceerd uit elektrolyse van water komt 8 kg zuurstof (O₂) vrij. Dit is een restproduct voor de waterstofproducent maar een waardevol product voor het waterschap. De geproduceerde zuurstof kan rechtstreeks naar de beluchting van de actief-slibtanks. De zuurstof staat al onder druk, dat wil zeggen dat de beluchtingscompressoren uit kunnen. Een besparing tot een maximum van 100% op de beluchtingsenergie is hierdoor mogelijk. Bij waterstofproductie komt ook veel warmte vrij. Deze restwarmte is eveneens nuttig, bijvoorbeeld voor het duurzaam opwarmen van een slibgisting of gebouwen in de directe omgeving van de rwzi. Deze sterke synergie levert een positieve bijdrage aan de opwekking van duurzame waterstof. Verhoudingsgewijs is aan de warmtevraag van een rwzi met gisting veel eerder voldaan dan aan de zuurstofvraag. Dit geldt bij gebruik van fijne-bellenbeluchting voor het inbrengen van pure zuurstof (PO). Er zijn ook technieken die de PO efficiënter in kunnen brengen, deze zijn in deze studie buiten beschouwing gelaten, omdat het een veel ingrijpender ombouw van de beluchtingsinstallatie vraagt.

ONDERZOEK

De aanleiding voor het onderhavige STOWA onderzoek is de onbekendheid met toepassing van PO in fijne belenbeluchtingssystemen, specifiek ontworpen voor gebruik met buitenlucht. De meeste rwzi's in Nederland gebruiken dit type beluchting. WDODelta heeft daarom op de RWZI Hessenpoort de mogelijkheden onderzocht om tegen minimale kosten en op eenvoudige en veilige wijze PO in plaats van buitenlucht te benutten voor de beluchting. Het onderzoek richtte zich op het gebruik van PO in een separaat deel van het beluchtings-systeem, met als doel net zo veel zuurstof in het water te brengen als dat de gehele installatie met buitenlucht zou doen. Dit is veilig en robuust en maakt het mogelijk om het overgebleven deel van het beluchtingssysteem nog te kunnen benutten voor beluchting met buitenlucht. In deze hybride variant staan beide beluchtingssystemen naast elkaar. Handhaving is nodig als back-up of ondersteunende voorziening in geval de PO beluchting tekortschiet of uitvalt. Naast de toepassing op de RWZI Hessenpoort is gekeken naar toepassing op andere rwzi's. Hiervoor is een deskstudie uitgevoerd.

DOEL EN OPZET PRAKTIJKONDERZOEK

Doel van het onderzoek was het vaststellen van de inbreng efficiëntie van PO en het meten van de lachgasemissie (N_2O) en pH effecten bij gebruik van PO. Ook de invloed op menging is meegenomen. De PO beluchting is onderzocht in een testkolom op locatie, om het zuiveringsproces zoveel mogelijk te simuleren en slib en afvalwater van de rwzi te kunnen gebruiken. Op de RWZI Hessenpoort zijn vervolgens testen met PO en het fijne-bellenbeluchtingssysteem uitgevoerd. De zuurstofopname is met 4 testen (ad- en desorptietesten) vastgesteld, waarbij er geen aanvoer van rioolwater meer was. In 2 testen van eveneens enkele uren (duurproeven) met aanvoer van rioolwater, zijn de overige aspecten zoals lachgasvorming en effecten op de pH onderzocht.

RESULTATEN PRAKTIJKONDERZOEK

Zuurstofoverdracht en mengeffecten

Het onderzoek met de kolom- en ringproeven heeft laten zien dat het goed mogelijk is om reeds geïnstalleerde beluchtingselementen, bedoeld voor fijne-bellenbeluchting met buitenlucht, te gebruiken voor beluchting met PO. In theorie is 4,8 maal minder gasvolume nodig aan PO door het hogere zuurstofpercentage (buitenlucht bevat 21% O_2 en PO 100 %; $100/21=4,8$). Bij de kolomproeven met drinkwater en met slibwater is deze factor bevestigd. Bij de ringproeven is een bandbreedte gevonden van 3,6 tot 4,4 maal minder aan PO gasvolume voor eenzelfde hoeveelheid inbreng aan O_2 in de waterfase dan met gebruik van buitenlucht. Dat is lager dan verwacht. Een nadere verkenning naar de verschillen heeft opgeleverd dat de omloopsnelheden in de actief-slibtank van de RWZI Hessenpoort lager zijn dan de gangbare richtlijnen voor een voldoende menging en zuurstofoverdracht. De verschillende gasdoorzetten in de ringproef hebben effect gehad op de omloopsnelheid en op de menging. Het kan niet worden uitgesloten dat dit een effect heeft gehad op de zuurstofoverdracht. Dit zou de lagere verhoudingsfactoren PO versus buitenlucht van de ringproef (3,6 - 4,4) ten opzichte van de theorie (4,8) en de kolomproeven kunnen verklaren. Gegeven de hogere oplosbaarheid van PO en de relatief lage O_2 gehalten van het zuiveringsproces, neemt het benodigde gasvolume nog verder af bij gebruik van PO in een rwzi. In totaal is voor het zuiveringsproces circa 5,4 maal minder gasvolume nodig in vergelijking met het gebruik van buitenlucht.

pH Effect

Met betrekking tot de effecten op de CO_2 ophoping en pH verlaging als gevolg, is nog weinig informatie van een langere duur beschikbaar. Uit de testen lijken de effecten op de pH tot nu toe beperkt en bovendien goed beheersbaar door kortdurend met buitenlucht te beluchten.

Lachgasemissies (N_2O)

Ten aanzien van de N_2O emissies zijn deze net als bij lucht gekoppeld aan schakelmomenten waarbij het zuurstofgehalte fluctueert. Onder een stabiel zuurstofgehalte zijn ook met PO weinig tot geen lachgasemissies waargenomen. Een test van enkele maanden zal hier nog meer zekerheid in kunnen geven. Feit is dat er met gebruik van PO veel minder doorzet van gas door de waterfase is, dus minder strippen van N_2O van water naar de gasfase en in theorie dus minder N_2O emissie direct uit de actief-slibtank naar de luchtfase.

OMBOUW BUITENLUCHT RWZI NAAR H₂-O₂ RWZI

PO Buffer

Na de electrolyser kan een strategische buffer voor PO (onder druk) worden toegepast. Deze buffer kan de pieken en dalen in de vraag (benodigde inbreng) en productie van zuurstof opvangen. In dat geval kan de zuurstofproductie gebaseerd worden op het daggemiddelde. Hierdoor is voor de productie uit de electrolyser slechts 1,5 tot 2 maal de hoeveelheid zuurstof nodig ten opzichte van de ontwerp OC voor lucht. Indien geen buffer wordt toegepast, is óf een grotere electrolyser nodig óf wordt het tekort aan PO tijdens pieken geaccepteerd en wordt de O₂ vraag aangevuld met de bestaande compressoren.

Regeling

De bestaande O₂ regeling voldoet om de laatste regelafsluiters direct vóór de pakketten aan te sturen. Bij een kleiner aantal toegepaste pakketten dan bij buitenlucht zal het zuurstofsetpoint ter plaatse opnieuw bekeken moeten worden om te zorgen dat door de zuurstofgradiënt in de AT een voldoende hoge fractie belucht slib aanwezig is. Dit is maatwerk.

Menging

In de actief-slibtanks moet voldoende menging aanwezig zijn. Door de veel lagere benodigde gastoevoer bij PO verandert de menging. Het hangt af van het soort systeem of daar nog aparte voorzieningen voor nodig zijn. Deze rapportage gaat uit van een UCT-configuratie, waarbij in de beluchte tanks voortstuwars aanwezig zijn. Dat zou ruim voldoende moeten zijn. Het is wel van belang om te controleren of deze menging in de praktijk echt voldoende is.

BUSINESS CASE

Uit de verkennende kostenramingen is gebleken dat de schaalgrootte veel invloed heeft. Stel dat de electrolyser buiten de kostenstroom van het waterschap valt en zuurstof kosteloos wordt geleverd, verdienen de “PO maatregelen” zich bij een rwzi van de grootte van 25.000 inwonerequivalenten (i.e.) terug bij een stroomprijs van groter dan 24 cent/kWh. Bij een rwzi van 100.000 i.e. is dat al het geval bij 10 cent/kWh. Op grote rwzi's waar de warmte effectief kan worden benut, is er sowieso een positief saldo en is er zelfs een zeer korte terugverdientijd van enkele jaren in beeld. Dit is vooral door de benutting van warmte en daardoor de potentie tot het leveren van meer groen gas (met de bijbehorende inkomsten). Indien de totale kosten van PO maatregelen op de rwzi én de electrolyser worden beschouwd, kan het bij de gekozen tarief van H₂ alleen uit bij zeer lage stroomprijzen (3 tot 5 cent/kWh). Hoe groter de schaal hoe kansrijker. De aanwezigheid en benutting van restwarmte om meer groen gas te maken, heeft ook een positief effect op de stroomprijs. In tegenstelling tot de break-even stroomprijs in de alinea hierboven, moet voor de haalbaarheid van de elektrolyse de stroomprijs voor een business case juist onder deze waarde liggen. Het maken van H₂ kan dus alleen uit als óf de prijs van H₂ sterk stijgt (dan neemt ook de haalbare stroomprijs toe) óf de stroom tegen (zeer) lage prijs wordt ingekocht.

Dat betekent dat de synergie van een electrolyser op de rwzi alleen werkt als het waterschap een besparing op dure inkoop van stroom voor de beluchting kan vermijden en de H₂ ondernemer gelijktijdig goedkope stroom weet te benutten voor H₂-productie. Bij de financiële afwegingen moet worden meegewogen dat de kansrijkheid van waterstof vaak gekoppeld wordt aan een overschotten aan duurzame stroom door de toegenomen beschikbaarheid en schommelingen in vraag en aanbod én daarbij de op veel plaatsen in Nederland aanwezige

netcongestie, waardoor de duurzame stroom sowieso niet aan het net geleverd kan worden. In dat geval zijn de momentane stroomprijzen laag of zelfs negatief. Dan wordt voorkomen dat duurzame stroom verloren gaat en kan de waarde worden vastgelegd in waterstof.

REDUCTIE CO₂ VOETAFDRUK

Qua reductie van de CO₂ voetafdruk heeft de synergie van de electrolyser op de rwzi diverse voordelen en kansen. Het energieverbruik van de rwzi neemt fors af en er is een potentie tot het leveren van meer groen gas, wat benut kan worden voor transport of voor de bebouwde omgeving. Daarnaast lijkt er een relatie te zijn tussen de N₂O emissie en de gasdoorzet. Doordat de gasdoorzet een factor 5,4 lager kan zijn, is potentieel de N₂O emissie door minder strippen een factor 5,4 keer lager, met een groot effect op de CO₂ voetafdruk. Bovendien gaan de electrolyzers als Smart Energy Hub een waardevolle energiedrager maken uit (overschotten van) duurzame stroom die onder andere door netcongestie anders niet benut kunnen worden.

AANBEVELINGEN

Gegeven het voornemen van WDOdelta om op de RWZI Hessenpoort een duurttest te gaan doen van minimaal 5 jaar, verdient het aanbeveling om op die locatie verder onderzoek te doen. Dit om een duidelijker beeld te krijgen van de effecten van PO begassing op pH en lachgasemissies.

Bij de ombouw van de buitenluchtbeluchting naar PO begassing is het van belang om kritisch te kijken naar de menging en te zorgen dat de beluchtungs- en begassingsconfiguratie zo optimaal mogelijk is. Een verkennende CFD studie heeft hier al duidelijke handvatten voor gegeven.

Om de synergie tussen de waterstofproductie en rwzi's nog verder te vergroten, verdient het aanbeveling om op de RWZI Hessenpoort de mogelijkheden te onderzoeken om in plaats van drinkwater gezuiverd effluent als bron voor de waterstofproductie te benutten.

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.

BENUTTING ZUIVERE ZUURSTOF UIT DUURZAME WATERSTOFPRODUCTIE IN RWZI'S MET FIJNE- BELLENBELUCHTINGSSYSTEMEN

PILOT- EN PRAKTIJKMETINGEN RWZI HESSENPOORT

INHOUD

1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	2
1.3	Afbakening	2
1.4	Opzet van het onderzoek	2
1.5	Leeswijzer	3
2	THEORETISCHE ACHTERGRONDEN BELUCHTING MET PO	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Verschil bepalen OC voor PO versus lucht	4
2.2.1	Zuurstofvraag PO versus lucht	4
2.2.2	Piekfactor PO versus lucht	4
2.2.3	Deficietfactor PO versus lucht	5
2.2.4	Alfactor PO versus lucht	5
2.2.5	Conclusies verschil OC PO en buitenlucht	5
2.3	Verschil in gasdebieten PO versus lucht	5
2.4	Vertaalslag naar totaal verschil inbreng PO versus buitenlucht	6
2.5	Ontwerpkeuzen voor ombouw naar PO	6
2.5.1	Invloed van de elementbelasting	6
2.5.2	Invloed van een strategische PO buffer	7
3	MATERIALEN EN METHODEN	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Principe OC metingen en bepalen alfa-factor	9
3.3	Kolomproeven	10
3.3.1	Absorptietesten (met lucht en PO begassing)	10
3.3.2	Desorptietesten (alleen lucht begassing)	11
3.3.3	Continu meting met PO	12
3.4	Ringproeven	13
3.4.1	Vorbereiding ringproeven	13
3.4.2	Opstelling ringproeven	14
3.4.3	Uitvoering ringproeven	14
3.4.4	Metingen CO ₂ , pH en N ₂ O	15
3.4.5	Snelheidsmetingen	16

4	BESCHRIJVING EN DISCUSSIE MEETRESULTATEN	17
4.1	Inleiding	17
4.2	Kolomproeven	17
4.3	Ringproeven	18
4.4	Bevindingen kolom- en ringproeven	19
4.5	Nabeschouwing invloed omloopsnelheid ringproeven	19
5	UITGANGSPUNTEN VOOR PRAKTIJKCASES	22
5.1	Inleiding	22
5.2	Samenvatting theorie en bevindingen kolom- en ringproeven	22
5.3	Afbakening toepassing PO uit de electrolyser	23
5.4	Afstemmen van de PO capaciteiten electrolyser en rwzi	23
5.5	Specs electrolyser met H ₂ , O ₂ , warmte en gebruikt water	24
5.6	Beschikbare restwarmte voor de sliblijn	24
6	SCHETSONTWERP BENUTTING PO VOOR EEN RWZI VAN 25.000 I.E. EN 100.000 I.E.	25
6.1	Inleiding	25
6.2	Schematisch PFD en Lay-out	25
6.3	Uitgangspunten schetsontwerpen	27
6.4	Werktuigbouwkundige beschrijving aanpassingen rwzi PO deel	29
6.5	Elektrische installatie PO deel	30
6.6	Procesautomatisering PO deel	30
6.7	Ontwerp strategische buffer PO	30
6.8	De electrolyser van Equans/H ₂ -GO	32
7	KOSTEN	33
7.1	Inleiding	33
7.2	Uitgangspunten	33
7.3	Bouwkosten en stichtingskosten	34
7.4	Jaarlijkse kosten, opbrengsten en break-even point rwzi deel	35
7.5	Doorkijk kosten totaal maatregelen rwzi én electrolyser	36
8	DUURZAAMHEID	38
8.1	Besparen op elektrische energie beluchting	38
8.2	Meer duurzaam groen gas uitleveren	38
8.3	Emissies broeikasgassen	39
8.4	De electrolyser op de rwzi (Smart Energy Hub)	39
9	POTENTIE VOOR UITROL VAN HET CONCEPT OP RWZI'S	40
10	DISCUSSIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	42
10.1	Discussie	42
10.2	Conclusies	44
10.3	Aanbevelingen	45
BIJLAGE 1	TECHNOLOGISCHE BEREKENINGEN	46
BIJLAGE 2	RESULTATEN KOLOMPROEVEN	48
BIJLAGE 3	LOGBOEK EN RESULTATEN RINGPROEVEN	52
BIJLAGE 4	RESULTATEN LACHGASMETINGEN RINGPROEVEN	60
BIJLAGE 5	THEORETISCHE BESCHOUWING EFFECT PO EN LUCHT OP K _L A	63
BIJLAGE 6	ONTWERPUITGANGSPUNTEN EN KOSTENRAMINGEN	68

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

In Nederland worden in het kader van het klimaatakkoord grote stappen gezet in de verduurzaming van onze energievraag door de opwekking van groene stroom uit zon en wind. Echter door het grotere en grilliger wordende aanbod van groene stroom staat het Nederlandse elektriciteitsnet onder grote druk. Nu al zijn de pieken en dalen in de opwekking van zonnestroom en windenergie niet meer op te vangen en staan door deze zogenaamde netcongestie windmolens soms noodgedwongen stil en stagneren nieuwe projecten. Ook de waterschappen die door opwekking van groene stroom energieneutraal willen worden, gaan door de netcongestie tegen problemen aanlopen.

Op dit moment wordt er door de unie van waterschappen met een aantal waterschappen, waaronder Waterschap Drents Overijsselse Delta (WDOdelta) gekeken naar de inzet van rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) als 'smart energie hub', waarbij de rwzi's een rol gaan spelen in de regionale afstemming van vraag en aanbod van elektriciteit. Rwzi's nemen niet alleen veel energie af, ze wekken het ook op in de vorm van bijvoorbeeld zonne-energie en biogas/groen gas, en ze kunnen het bufferen/-opslaan (STOWA 2020-38¹). Een interessante oplossing om op een rwzi de netcongestie op te lossen, is het plaatsen van een electrolyser op de rwzi en (een deel van) deze groene stroom om te zetten in groene waterstof en zuurstof. Per MW aan elektrisch vermogen wordt er circa 18 kg H₂/h en 140 kg O₂/h geproduceerd met een energie-rendement van circa 60 %. Het restant van de energie wordt met name omgezet in warmte. Deze waterstof kan worden gebufferd en later worden gebruikt als duurzame en waardevolle energiedrager. Waterstofproducenten zijn enthousiast over de kansen van samenwerking.

Daarbij komt naar voren dat er daarnaast op een rwzi een goede synergie mogelijk is: de geproduceerde zuurstof kan worden gebruikt voor de beluchting in de waterlijn en de warmte kan worden benut voor het duurzaam opwarmen van de sliblijn. Daarmee zijn de nadelen van het lage rendement van de waterstofproductie minder een knelpunt als deze restproducten ook kunnen worden benut. De vorming van warmte én de productie van zuivere zuurstof is dan een voordeel in plaats van een verliespost.

Toepassen van zuivere zuurstof in actief-slibsystemen wordt doorgaans alleen toegepast in industrie met speciale zuurstofinbrengsystemen. Er is weinig tot geen kennis over de mogelijkheden om zuurstof in te brengen in fijne-bellenbeluchtingssystemen, zoals de meeste rwzi's in Nederland die hebben. Om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de bestaande rwzi configuraties, is het wenselijk om deze beluchtingssystemen zo goed mogelijk te benutten. Om die reden is het onderhavige STOWA onderzoek gestart, om vast te stellen hoe goed bestaande beluchtingssystemen zuivere zuurstof kunnen inbrengen. Bij het huidige STOWA onderzoek is dit door WDOdelta getest op pilot- en praktijkschaal op de RWZI Hessenpoort en worden in dit rapport de resultaten besproken.

1 STOWA 2020-38 Oa Lithium-ion batterijen, elektrische voertuigen, waterstof, methaan, aquifer en/of tank thermal energy storage.

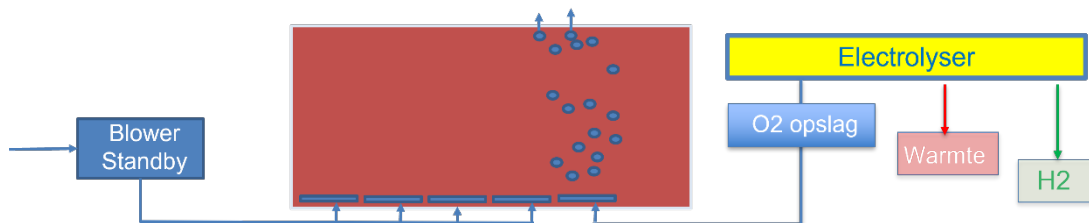
1.2 DOEL

Het doel van dit onderzoek is het verkennen van de mogelijkheid om bestaande fijne-bellenbeluchtingssystemen toe te passen met zuivere zuurstof (verder te noemen: PO = Pure Oxygen). Daarbij is van belang de verhouding in hoeveelheid PO ten opzichte van lucht vast te stellen. Daarmee hangt samen de hoeveelheid beluchtingselementen, het inbrengrendement van de PO in de bestaande beluchtingssystemen en daarmee hoeveel energiebesparing er mogelijk is. Omdat de geproduceerde zuurstof al onder druk staat door het elektrolyse proces, zijn de besparingsopties groot. Daarnaast moet worden onderzocht: het effect op de N₂O emissies en de verandering in zuurgraad, eventuele veiligheidsrisico's, dimensioneringsgrondslagen, kosten en de mogelijkheid tot uitrol op andere rwzi's in Nederland.

1.3 AFBAKENING

Dit onderzoek richt zich enkel op direct gebruik van PO, er wordt niet gekeken naar verrijking van de compressorlucht met zuivere zuurstof. Dit onderzoek beschrijft de mogelijkheden om de PO van de electrolyser naar een strategische opslag te leiden en vandaar direct naar de beluchtingselementen. Omdat de PO onder druk geproduceerd wordt in de electrolysers, is het gebruik van compressoren in principe niet langer nodig. Met PO is maar een klein deel van beluchtingselementen nodig om alle benodigde zuurstof voor het zuiveringsproces in te brengen. De overgebleven beluchtingselementen dienen samen met de compressoren als een ondersteunende back-up voorziening. Het gaat hierbij om een hybride zuurstofvoorziening, zie Figuur 1.1.

FIGUUR 1.1 HYBRIDE ZUURSTOFVOORZIENING, PO OP EEN DEEL VAN DE BELUCHTINGSELEMENTEN GECOMBINEERD MET DE BESTAANDE COMPRESSOREN OP DE REST VAN DE BELUCHTINGSELEMENTEN



1.4 OPZET VAN HET ONDERZOEK

In Tabel 1.1 is een overzicht gegeven van de opzet van het onderzoek met de te onderzoeken parameters in de verschillende deelonderzoeken. Daarbij is gestart met een theoretische verkenning. Vervolgens zijn de uitkomsten daarvan gecheckt met pilotschaal kolomproeven en daarna op praktijkschaal in de RWZI Hessenpoort: de Ringproef. Tenslotte is met schetsontwerp en kostencalculaties vastgesteld wat het break-even point is van de toepassing van PO voor de beluchting in fijne-bellenbeluchtingssystemen.

TABEL 1.1 OPZET VAN HET ONDERZOEK MET DEELONDERZOEKEN

Te onderzoeken parameters	Theoretische verkenning	Kolom proeven	Ringproef adsorptie	Ringproef desorptie	Ringproef duurtesten	Kosten calculaties
Verhouding PO versus buitenlucht	X	X	X	X	-	-
Alfa factor	-	X	X	X	-	-
pH effect	-	X	-	-	X	-
N ₂ O emissies	-	X	-	-	X	-
Zuurstofoverdracht PO	-	X	X	-	-	-
Zuurstofoverdracht buitenlucht	-	X	-	X	-	-
Mengeffecten	-	-	-	-	X	-
Break-even kosten	-	-	-	-	-	X

1.5 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 bespreekt de theorie achter het verschil in inbrengen van buitenlucht en PO, waarna in hoofdstuk 3 gekeken wordt naar de benodigde materialen en methoden voor de pilot- en praktijkonderzoeken. Hoofdstuk 4 bespreekt de resultaten van de pilotproeven en van de ringproeven. Hoofdstuk 5 geeft de dimensioneringsgrondslagen weer, waarna hoofdstuk 6 een schetsontwerp voor 25.000 inwonerequivalenten (i.e.) en 100.000 i.e. beschrijft. In hoofdstuk 7 worden de geschatte kosten gepresenteerd. Hoofdstuk 8 gaat in op het aspect duurzaamheid, met in hoofdstuk 9 een korte beschouwing hoe voor een rwzi de potentie van het concept kan worden bepaald. Tenslotte volgen in hoofdstuk 10 de discussie, conclusies en aanbevelingen.

2

THEORETISCHE ACHTERGRONDEN BELUCHTING MET PO

2.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft in kort bestek de theoretische achtergronden van de verschillen tussen de zuurstofinbreng met PO en met lucht. Hierbij is als basis gebruik gemaakt van STOWA 2009-15² en volgt dit hoofdstuk de gebruikelijke ontwerpmethodiek van de beluchting. Eerst van het bepalen van de benodigde zuurstofinbreng vanuit de zuurstofvraag van de biologie. Dat is de Oxygenation Capacity (OC) in kg O₂/h (paragraaf 2.2), vervolgens volgt de vertaalslag naar luchtdebiet (gasdebiet) in paragraaf 2.3 en 2.4. Bij elke stap wordt besproken of er een verschil tussen PO en buitenlucht aanwezig is c.q. wordt verwacht. Tenslotte in paragraaf 2.5 volgt een beschouwing over de ontwerpkeuzen ten aanzien van de belasting van de (bestaande) beluchtingselementen en de relatie met het O₂-inbrengrendement en het opslaan van PO in een strategische buffer.

2.2 VERSCHIL BEPALEN OC VOOR PO VERSUS LUCHT

De OC is de hoeveelheid zuurstof uitgerekend in kg O₂ per uur die nodig is om aan maximale zuurstofvraag van het zuiveringsproces te kunnen voldoen. De OC is afhankelijk van:

- de gemiddelde zuurstofvraag van het actiefslib: O₂-vraag (kg O₂/h)
- de piekfactor van de zuurstofvraag door schommelingen in de aanvoer, maximale RWA na een droge periode: p
- het effect van het gewenste zuurstofgehalte in het zuiveringsproces ten opzichte van de zuurstofverzadigingswaarde, uitgedrukt als de deficietfactor: d
- de invloed van de samenstelling van het afvalwater en van het slibgehalte, uitgedrukt in de alfactor: α

$$OC = \frac{p \times d \times O_2(\text{vraag})}{\alpha}$$

2.2.1 ZUURSTOFVRAAG PO VERSUS LUCHT

De zuurstofvraag van de biologie wordt bepaald door de biologische processen van BZV afbraak, N-Kj omzetting in NO_x en denitrificatie van de NO_x naar N₂ en het endogene gebruik van de aanwezige biomassa. De biomassa gedraagt zich (in ieder geval bij de gebruikelijke O₂ concentraties) bij PO en lucht niet anders. Er is geen verschil in zuurstofvraag tussen PO en lucht.

2.2.2 PIEKFACTOR PO VERSUS LUCHT

De piekfactor hangt af van het aanvoerstelsel. Tegenwoordig wordt vaak een “overall” piekfactor van 1,5 gebruikt. Er is in principe geen verschil tussen PO en lucht. Echter indien voor PO een buffer (onder druk) wordt toegepast, kan deze buffer schommelingen opvangen en kan met geen of met een lagere piekfactor worden volstaan, zie ook paragraaf 2.5.2 voor een voorbeeldberekening.

2 STOWA 2009-15: Handreiking OC-meting in de praktijk

2.2.3 DEFICIETFACTOR PO VERSUS LUCHT

De deficietfactor d zegt dat de benodigde zuurstofinbreng hoger is wanneer het gewenste zuurstofgehalte dichter bij de maximale oplosbaarheid van zuurstof ligt:

$$d = \frac{C_s}{(C_s - C_a)}$$

C_s = maximale oplosbaarheid zuurstof bij de maximale temperatuur van het systeem (mg/l)

C_a = gewenst zuurstofsetpoint (mg/l)

Soms wordt de deficietfactor ook de β factor (STOWA 1999 24) genoemd, maar dat lijkt niet in overeenstemming met internationale literatuur. Deze factor is temperatuurafhankelijk. Voor lucht is de maximale oplosbaarheid doorgaans tussen 9 en 11 mg/l, voor PO is dit tussen de 45 en 55 mg/l. Omdat het O_2 setpoint in de biologie doorgaans bij 2 mg/l ligt, is deze factor bij lucht circa 1,25. Bij PO is deze met een setpoint van 4,5 mg/l³ circa 1,1. Er zit dus een verschil tussen van 1,25/1,1 = 1,14 waarbij PO efficiënter in water wordt ingebracht dan lucht.

2.2.4 ALFAFACTOR PO VERSUS LUCHT

De α -factor representeert het verschil aan inbreng efficiëntie van zuurstof tussen vuil water en drinkwater. Deze factor hangt af van het afvalwater, het slibgehalte en het type beluchting (oppervlaktebeluchting of belLENbeluchting). Voor elementen met belLENbeluchting in normaal actief slib met stedelijk afvalwater wordt meestal een waarde van 0,7 gehanteerd. Theoretisch is er geen reden, dat dit voor lucht en PO verschillend zal zijn.

2.2.5 CONCLUSIES VERSCHIL OC PO EN BUITENLUCHT

Concluderend kan gesteld worden dat alleen het deficiet een verschil maakt in de OC. De zuurstofvraag van de biologie en het medium hebben geen invloed. De benodigde OC voor PO is door de hogere verzadigingwaarde van PO in water circa 1,14 maal lager (1,25/1,1) dan bij lucht. De piekfactor kan bij PO eventueel afgevlakt worden bij toepassen van een strategische buffer, zie daarvoor paragraaf 2.5.2.

2.3 VERSCHIL IN GASDEBIETEN PO VERSUS LUCHT

Op het moment dat de OC wordt vertaald naar een beluchtingssysteem en hoeveelheden lucht of gas wordt gesproken over de OC onder standaard condities, ook wel de SOTR⁴ genoemd. Als de benodigde SOTR (kg O_2 /h) voor een systeem bekend is, wordt doorgaans het benodigde lucht- ofwel gasdebiet (Nm³/h) bepaald. Bij de toepassing van PO komt de vraag op of er een verschil zit in de overdracht van zuurstof naar water uit lucht of uit pure zuurstof.

Bij de bepaling van het (genormaliseerde) lucht- ofwel gasdebiet Q (Nm³/h), wordt gebruik gemaakt van de stijghoogte van de belLEN h (m) en de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit SSOTR (g O_2 /Nm³.m stijghoogte):

$$Q = \frac{SOTR}{h \times SSOTR}$$

- 3 Het O_2 -setpoint bij PO moet hoger zijn dan 2 mg/l bij lucht, circa 4,5 mg/l, zie bijlage 1, omdat de mengzone korter is en de afstand tussen beluchtingselementen langer. Daarmee is het mogelijk om in een voldoende grote fractie actiefslib beluchte condities te hebben.
- 4 SOTR = Standard Oxygen Transfer Rate is de snelheid waarop de zuurstofoverdracht plaatsvindt in kg/h in drinkwater bij 20°C en een zuurstofgehalte van 0 mg/l

Die SSOTR geeft aan hoe efficiënt de overdracht van O₂ plaatsvindt. In bijlage 5 is vanuit de theorie én praktijk (hoofdstuk 4) afgeleid dat voor een specifiek (beluchtings)systeem de SSOTR een constante factor is maal de O₂ verzadigingswaarde in het water (zie voor alle tussenformules bijlage 5 en onderstaande voetnoot ⁵):

$$SSOTR = \frac{SOTR}{h \times Q} = \frac{k_L a \times V \times C_{s,20}}{h \times Q} = \text{constante} \times C_s$$

Hierin is de k_La de stofoverdrachtscoëfficiënt (in h⁻¹), V het volume (in m³) en C_{s,20} de verzadigingswaarde van lucht respectievelijk PO onder standaardcondities. De k_La beschrijft de snelheid waarmee zuurstof door een beloppervlak wordt overgedragen. Deze coëfficiënt is een combinatie van de stofoverdrachtscoëfficiënt k_L (m/s) en het grensvlakoppervlak van de bel a (m²/m³).

De factor in O₂ overdracht tussen PO en buitenlucht is:

$$\text{Factor} \left(\frac{PO}{lucht} \right) = \frac{SSOTR(PO)}{SSOTR(buitenlucht)} = \frac{\text{constante} \times C_{s,20,PO}}{\text{constante} \times C_{s,20,buitenlucht}} = \frac{43,94}{9,206} = 4,77$$

Er is de zuurstofoverdracht dus geen verschil tussen het “medium” lucht en zuurstof. Hiermee kan dus worden vastgesteld dat er 4,77 maal minder gasdebiet nodig is bij PO dan bij lucht.

2.4 VERTAALSLAG NAAR TOTAAL VERSCHIL INBRENG PO VERSUS BUITENLUCHT

Uit de paragrafen 2.2 en 2.3 blijkt dus, dat los van de piekfactor door schommelingen in de aanvoer, de OC met PO kleiner is en er ook evenredig minder gasvolume nodig is door het hogere zuurstofgehalte in water/slib. In totaal levert dit 1,14 maal minder aan OC en 4,77 maal minder aan gasvolume, totaal is er dus 1,14 x 4,77 = 5,4 maal minder gasvolume nodig bij PO ten opzichte van buitenlucht.

2.5 ONTWERPKEUZEN VOOR OMBOUW NAAR PO

Het veel lagere benodigde gasdebiet biedt twee mogelijkheden: verhoging van het O₂ inbrengrendement door de elementbelasting van de aanwezige beluchtingselementen te verlagen, of het gebruiken van minder beluchtingselementen. Een tweede belangrijk verschil tussen PO en buitenlucht beluchting is de mogelijkheid voor de buffering van de PO.

2.5.1 INVLOED VAN DE ELEMENTBELASTING

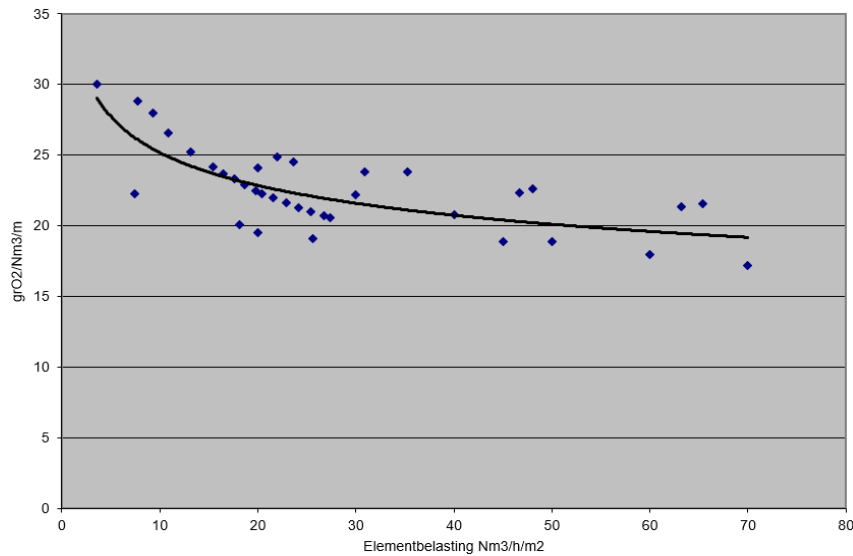
Bij een ombouw van buitenlucht naar PO kunnen de beluchtingselementen een factor 5,4 lager worden belast en kan een hoger O₂ inbrengrendement worden bereikt. Andersom kan er worden beredeneerd dat er 5,4 maal minder beluchtingselementen nodig zullen zijn om op dezelfde inbreng efficiëntie te komen.

In Figuur 2.1 is een voorbeeld gegeven van de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit (SSOTR in g O₂/Nm³.m) voor buitenlucht bij een stijghoogte van de belLEN van 4 m diepe tank als functie van de m² elementbelasting van lucht (in Nm³/m².h). Hoe lager belast het membraanoppervlak, hoe efficiënter de O₂ kan worden ingebracht. Bij toepassing van PO is de SSOTR van paragraaf 2.3 circa 4,77 maal hoger.

5 De SOTR = V × k_La₂₀ × C_{s,20} / 1.000, hierin is V het watervolume in m³, k_La₂₀ de zuurstofoverdrachtscoëfficiënt in 1/h voor reinwater bij temperatuur T = 20 °C en C_{s,20} de zuurstofverzadigingswaarde in mg O₂/l bij standaardomstandigheden (T = 20 °C en p = 1.013 hPa) zie ook bijlage 5

FIGUUR 2.1

VOORBEELD SPECIFIEKE O₂-INBRENGCAPACITEIT (SSOTR) VOOR BUITENLUCHT BIJ EEN BELLENSTIJGHOOGTE VAN 4 M ALS FUNCTIE VAN DE M² ELEMENTBELASTING BIJ GELIJKBLIJVEND VLOEROPPERVLAK (BRON: LEVERANCIERSINFORMATIE VAN VERSCHILLENDE TYPEN ELEMENTEN VAN EEN SPECIFIEK PROJECT DOOR TAUW SAMENGEVOEGD IN ÉÉN FIGUUR)



In bijlage 5 is verder uitgelegd dat het O₂-inbrengrendement SOTE in % bepaald wordt door de SSOTR, het O₂-gehalte in PO of in buitenlucht en de stijghoogte van de belLEN h.

$$SOTE = \frac{SSOTR}{10 \times \rho} \times h$$

Uitgaande van de O₂-gehalten in buitenlucht en PO van $\rho_{\text{lucht}} = 0,299 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_{\text{PO}} = 1,43 \text{ kg/m}^3$ variëren bij het voorbeeld uit Figuur 2.1 met 4 m stijghoogte de O₂ inbrengrendementen van circa 28 % (bij een elementbelasting van 40 Nm³/m².h) tot 35 % (bij een elementbelasting van 10 Nm³/m².h)⁶. Dat geldt dus zowel voor buitenlucht als voor PO.

Bij gebruik PO is het door het lagere gasdebiet dus mogelijk om te kiezen voor een fors lagere belasting van alle elementen. Of er is te kiezen voor een beperkt aantal elementen met dezelfde elementbelasting als buitenlucht en de overige elementen beschikbaar te houden voor buitenlucht op momenten dat de hoeveelheid PO beperkt is. Dit kan nodig zijn voor het handhaven van het hybride systeem.

In deze rapportage wordt uitgegaan van de hybride situatie en wordt een O₂ inbrengrendement gehanteerd van 28 %. De overige PO wordt niet opgenomen en verdwijnt naar de buitenlucht.

2.5.2 INVLOED VAN EEN STRATEGISCHE PO BUFFER

Door toepassen van een strategische buffer (van 30 bar⁷) tussen de electrolyser en de actief-slibtanks kan vraag en aanbod beter op elkaar afgestemd worden. Dat is vooral van belang bij een relatief kleine electrolyser in vergelijking met de rwzi. Als er een beperkt PO aanbod is, kan met een buffer een grotere deel van de tijd in aanbod van PO worden voorzien en is er op de rwzi minder buitenlucht nodig. Daarmee kan dus meer energie worden bespaard.

⁶ Dat is $21 \text{ g O}_2/\text{Nm}^3.\text{m} / (10 \times 0,299 \text{ kg/m}^3) \times 4 \text{ m} = 28\%$ bij een elementbelasting van 40 Nm³/m².h en $26 \text{ g O}_2/\text{Nm}^3.\text{m} / (10 \times 0,299 \text{ kg/m}^3) \times 4 \text{ m} = 35\%$ bij een elementbelasting van 10 Nm³/m².h.

⁷ Voor H₂ wordt vaak uitgegaan van een strategische buffer met een druk van 500 bar, wat een compacte buffer oplevert. Voor PO is verder comprimeren dan de 30 bar van het elektrolyseproces zelf niet aan de orde, omdat daarmee het voordeel van energiebesparing van de compressoren weer tenietgedaan wordt.

Bij een grote electrolyser ten opzichte van de rwzi, is er altijd voldoende PO aanwezig en is een buffer niet nodig.

Om een idee te krijgen van de grootteorde zijn in het onderstaande een paar verkennende berekeningen uitgevoerd, zie Tabel 2.1 voor een rekenvoorbeeld. Stel dat er een strategische buffer aanwezig is, dan kan de zuurstofproductie uit de electrolyser ontworpen worden op een (dag)gemiddelde O_2 inbreng. Daarmee kunnen dag-nacht ritme en RWA pieken worden opgevangen. Bij het ontwerpen van de strategische opslag moet met deze variaties rekening gehouden worden.

Zonder strategische buffer moet er dus 3,1 keer meer PO uit de electrolyser beschikbaar zijn om bij het werkelijke rendement van 28% voldoende O_2 in te brengen. Echter indien een voldoende grote strategische opslag aanwezig is, vervallen de piekfactoren voor de electrolyser en is in de praktijk ten opzichte van de lucht ontwerp OC van de installatie qua O_2 productiecapaciteit maximaal een factor 2,1 nodig.

Indien geen of een kleine strategische buffer aanwezig is, is toepassen van een grotere electrolyser nodig. Meer voor de hand ligt een aanvulling met de bestaande compressoren bij piekaanvoeren. De energiebesparing op de beluchting is dan geen 100%. Als voorzien kan worden in het grootste deel van de O_2 -vraag bij DWA aanvoer, moet rekening worden gehouden met een besparing (grootteorde) van minimaal 75%.

TABEL 2.1 VOORBEELD VAN DE HOEVEELHEID EXTRA TE MAKEN PO TEN OPZICHTE VAN DE ONTWERP OC MET BUITENLUCHT VOOR O_2 INBRENGRENDEMENTEN VAN 28 EN 35 % MET EN ZONDER STRATEGISCHE O_2 -BUFFER

Parameter	Eenheid	Lucht	PO 1		PO 2			
			Zonder O_2 buffer	PO 2	PO 1	PO 2		
O_2 -vraag biologie	kg O_2 /h	100	100		100			
Piekfactor	-	1,5	1,5		1,0			
Alfa factor	-	0,7	0,7		0,7			
Verzadigingswaarde O_2	mg/l	10	50		50			
O_2 -setpoint	mg/l	2,0	4,5		4,5			
O_2 -deficietfactor	-	1,25	1,10		1,10			
Ontwerp OC max inbreng	kg O_2 /h	268	235	235	157	157		
Diepte	m	4	4		4			
Inbrengrendement	%	28%	28%	35%	28%	35%		
O_2 -gehalte	kg/Nm ³	0,286	1,400	1,400	1,400	1,400		
Gasdebiet	Nm ³ /h	3.348	601	481	401	321		
Gemiddelde benodigde O_2 -productie	kg O_2 /h		842	673	561	449		
Factor ten opzichte van ontwerp OC lucht			3,1	-	2,5	2,1	-	1,7

3

MATERIALEN EN METHODEN

3.1 INLEIDING

Bij het uitvoeren van de proeven is de focus gelegd op het analyseren van de OC en alfa-factor en het meten van de eventuele verzuring en lachgasemissies. In de volgende paragrafen wordt beschreven volgens welke methodiek de metingen zijn uitgevoerd. Paragraaf 3.2 beschrijft de principes voor het meten van de OC en het bepalen van de alfa-factor. De beschrijving van de pilottesten met de kolom, verder te noemen kolomproeven, staan in paragraaf 3.3. De praktijktesten in de buitenring van de actief-slibtank van RWZI Hessenpoort, verder te noemen de ringproeven, staan in paragraaf 3.4.

De vertaalslag van de ontwerpcriteria (OC) van de praktijksituatie (zuurstofvraag) en elementbelasting van de RWZI Hessenpoort naar de kolomproeven en de ringproeven, is terug te vinden in bijlage 1.

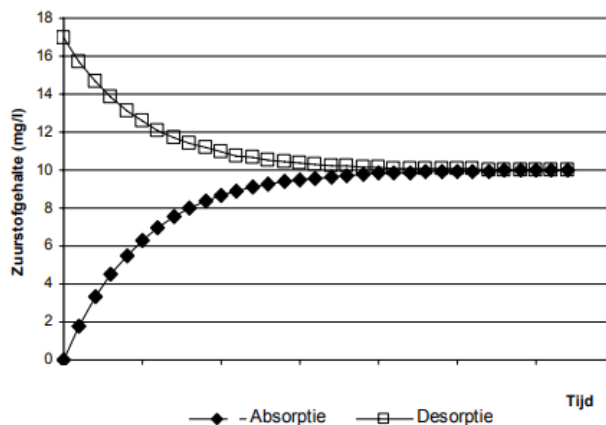
3.2 PRINCIPE OC METINGEN EN BEPALEN ALFA-FACTOR

De zuurstofmetingen zijn uitgevoerd zoals omschreven in de Duitse standaard DWA-M 209⁸. De berekeningen zijn uitgevoerd met het Excel model van STOWA 2009 15 “Handreiking OC-meting in de praktijk”.

Principe absorptie-desorptiemethode

De absorptie-desorptiemethode wordt uitgevoerd in een testbassin vanuit een toestand van zuurstofloosheid (absorptie-meting), of van oververzadiging (desorptie-meting). Tijdens de metingen wordt belucht totdat de zuurstofconcentratie constant blijft. Het theoretische verloop van de zuurstofconcentratie tijdens een absorptie-desorptie meting is weergegeven in Figuur 3.1.

FIGUUR 3.1 THEORETISCH VERLOOP ZUURSTOFCONCENTRATIE TIJDENS METINGEN ABSORPTIE-DESORPTIEMETHODE



⁸ “Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungs-einrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm” (Meting van de zuurstoftoevoer van beluchttingsinstallatie in aërietanks in zuiver water en in slibhoudend water)

In de praktijk liggen de gemeten zuurstofconcentraties nooit exact op een kromme, zoals in bovenstaande figuur, maar zal deze spreiding vertonen. Deze spreiding geeft een indicatie van de betrouwbaarheid van de meting, waardoor eventuele systematische fouten in metingen worden uitgelicht. De meting wordt uitgevoerd totdat de schijnbare verzadigingswaarde is bereikt. Dit is het geval wanneer de zuurstofconcentratie niet meer verandert.

De schijnbare O_2 verzadiging is altijd lager dan de verzadiging in reinwater zonder slib. Het verschil tussen de schijnbare en de werkelijke verzadigingswaarde wordt veroorzaakt door het zoutgehalte (klein effect) én door het endogene zuurstofverbruik van het slib.

PRINCIPE ALFA-BEPALING

Er is in slibwater getest en om de resultaten naar 'standaardcondities' te vertalen zijn aanvullende alfa-factormetingen uitgevoerd. Deze metingen zijn uitgevoerd in een kolom, zie paragraaf 3.3. De kolom is geijkt met drinkwater en op locatie gevuld met water uit de buitenring. Er zijn zowel absorptie-, desorptie- alsmede afgasmetingen uitgevoerd. Het verschil in zuurstofopname van het water uit de buitenring in vergelijking met drinkwater is de alfa-factor.

3.3 KOLOMPROEVEN

De metingen zijn uitgevoerd in een kunststof kolom met een diameter van 400 mm en een waterhoogte min of meer identiek aan het beluchtingscircuit van RWZI Hessenpoort. De kolom is voorzien van een 7" fijnbellenmembraan met blower. In de kolom zijn absorptie-, desorptie- en duurmetingen uitgevoerd.

Voor de bepaling van de prestatie van het beluchtingssysteem in de kolom onder standaardcondities is de kolom geijkt met drinkwater.

3.3.1 ABSORPTIETESTEN (MET LUCHT EN PO BEGASSING)

Vorbereiding

- De kolom is gevuld met water, voor en na de testen wordt de waterhoogte gemeten.
- De kolom is voorzien van een recirculatiepomp om de doorstroom condities bij de drinkwater testen gelijk te houden als de duurmtesten.
- Voor het meten van het zuurstofgehalte worden twee zuurstofelektroden toegepast, evenredig verdeelt over de tank en tankdiepte. Alle elektroden zijn uitgerust met een temperatuursensor.
- Voorafgaande aan de eerste test wordt het water tot aan de verzadigingswaarde belucht (alleen met lucht begassing) en worden de elektrodes gekalibreerd.
- Voor het zuurstofloos maken van het water wordt gebruik gemaakt van stikstofgas (N_2).
- Voor het zuurstofloos maken wordt de beluchting uitgezet en wordt het stikstofgas toegeleid.
- Nadat het water "zuurstofloos" (DWA-M 209⁸ bijlage B = actuele zuurstofconcentratie $C_t \leq 1,0$ mg/l) is geworden wordt de stikstof begassing gestopt en de beluchting wordt aangezet op de gewenste capaciteit.

Zuurstofinbreng meting

- Bij beluchting met lucht wordt de blower hiervoor op "hand bedrijf" op het gewenste luchtdebiet ingesteld.
- Bij beluchting met PO wordt de drukregelaar hiervoor op het gewenste PO debiet ingesteld.

- Gedurende de test wordt de toename van het zuurstofgehalte in het water (per 10 seconden), de atmosferische druk, de watertemperatuur en de geleidbaarheid gemeten.
- Het luchtdebiet van de blower en het PO debiet wordt gemeten (per 10 seconden) in Nm^3/h volgens DIN 1343 (0 °C, en 1013 hPa).

3.3.2 DESORPTIETESTEN (ALLEEN LUCHT BEGASSING)

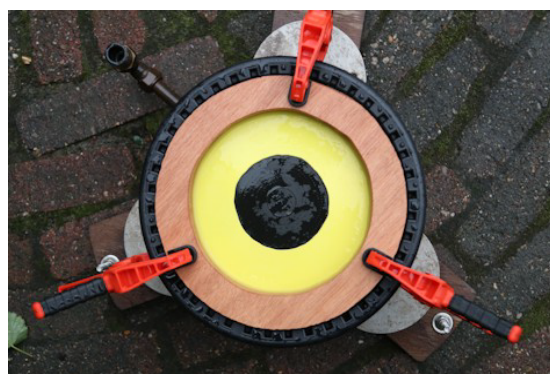
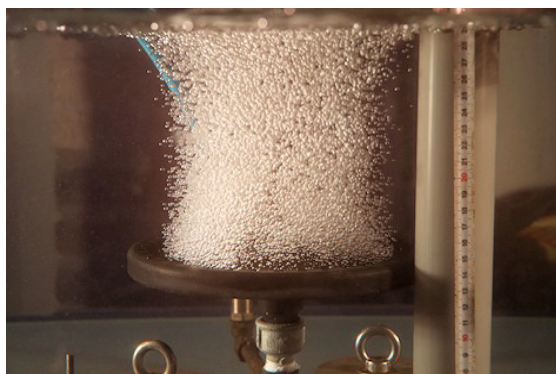
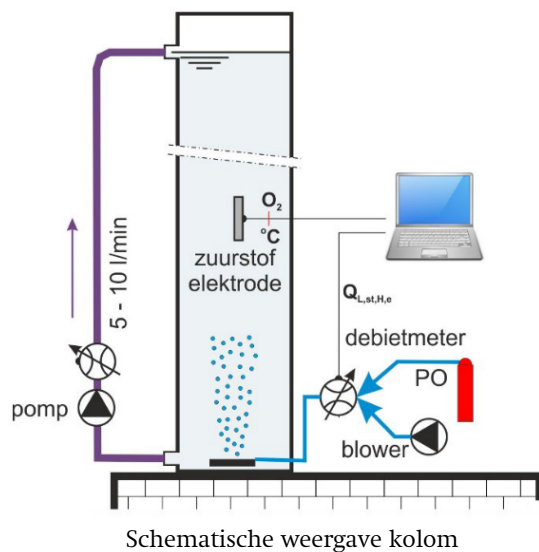
Vorbereiding: zie absorptietesten

Zuurstofinbreng meting

- Door middel van PO beluchting wordt het zuurstofgehalte tot boven de verzadigingswaarde van lucht gebracht (> 20 mg/l).
- De blower wordt op "hand bedrijf" op het gewenste luchtdebiet ingeregeld.
- Gedurende de test wordt de afname van het zuurstofgehalte in het water (per 10 seconden), de atmosferische druk, de watertemperatuur en de geleidbaarheid gemeten.
- Het luchtdebiet van de blower wordt gemeten (per 10 seconden) in Nm^3/h volgens DIN 1343 (0 °C, en 1013 hPa).

Voor de opstelling van de kolom t.b.v. absorptie- en desorptiemetingen zie figuur 3.2.

FIGUUR 3.2 WEERGAVE VAN DE OPSTELLING VOOR DE KOLOMPROEVEN MET DE DRINKWATERTESTEN



3.3.3 CONTINUMETING MET PO

Vorbereiding

- De kolom wordt éénmalig gevuld met water uit de ring, voor en na de testen is de waterhoogte gemeten.
- De kolom wordt uitgevoerd met een recirculatiepomp om het slib in suspensie te houden.
- Voor het meten van het zuurstofgehalte worden twee zuurstofelektroden toegepast, evenredig verdeelt over de tank en tankdiepte. Alle elektroden zijn uitgerust met een temperatuursensor.
- In de kolom worden een pH en een N₂O sensor aangebracht.
- De kolom wordt voorzien van een drijvende kap waarmee de uittredende lucht (afgas) voor verdere analyse wordt afgevangen.

Voor de opstelling van de kolom t.b.v. de duurtesten zie Figuur 3.3.

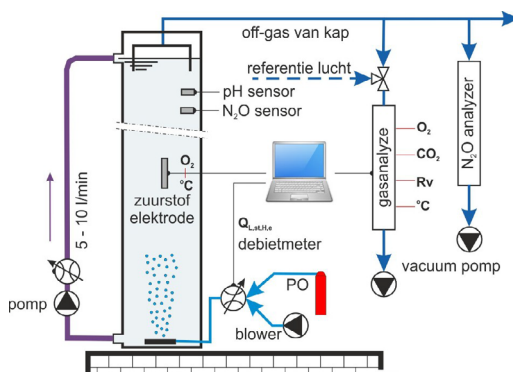
FIGUUR 3.3 WEERGAVE VAN DE OPSTELLING VOOR DE KOLOMPROEVEN MET DE SLIBWATERTESTEN OP LOCATIE RWZI HESSENPOORT



Opstelling kolom slibwatertest



Meetapparatuur kolom slibwatertest



Kolomopstelling met N₂O metingen in vloeistof en gas

Duurtesten

- Het PO debiet wordt handmatig geregeld zodat het zuurstofgehalte in de kolom tussen de ca. 1 en 2,5 mg/l wordt gehouden.

Tijdens de duurtesten zijn de volgende grootheden gemeten:

- zuurstofgehalte water
- temperatuur water
- CO₂ gehalte in- en afgang lucht
- pH
- N₂O – lachgasconcentratie in zowel vloeistof- alsmede luchtfase

3.4 RINGPROEVEN

In de volgende paragrafen wordt besproken hoe de ringproeven zijn voorbereid, onder andere hoe de installatie is omgebouwd om inbreng van PO mogelijk te maken. Vervolgens worden de verschillende fasen van de ringproeven uiteengezet.

3.4.1 VOORBEREIDING RINGPROEVEN

De voorbereiding en ombouw voor de ringproeven bestond onder andere uit de volgende onderdelen, zoals ook weergegeven in Figuur 3.4:

- Reiniging pakketten met beluchtingselementen ring die voor de PO beluchting gebruikt gaan worden. Naast reiniging ook visuele inspectie op gebreken aan de schotels
- afkoppelen van de buitenlucht
- opbouw PO beluchtingsinstallatie
- aansluiting bedieningspaneel PO beluchting

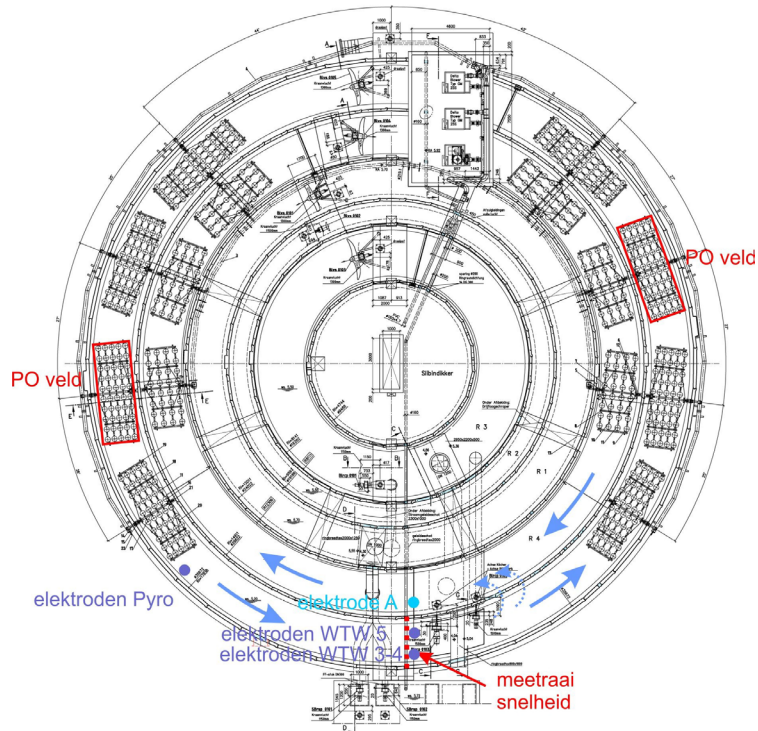
FIGUUR 3.4 A) REINIGING BELUCHTINGSELEMENTEN (LINKSBOVEN), B) AFKOPPELEN BUITENLUCHT (RECHTSBOVEN), C) AANSLUITING BEDIENINGSPANEEL PO BELUCHTING, D) OPBOUW PO BELUCHTINGSINSTALLATIE (RECHTSONDER)



3.4.2 OPSTELLING RINGPROEVEN

In Figuur 3.5 is een bovenaanzicht van de opstelling van de ringproeven gegeven, met de locaties van de beluchtingspakketten met PO, de meetraai voor de snelheidsmeting en de locaties van de vijf O₂-elektroden.

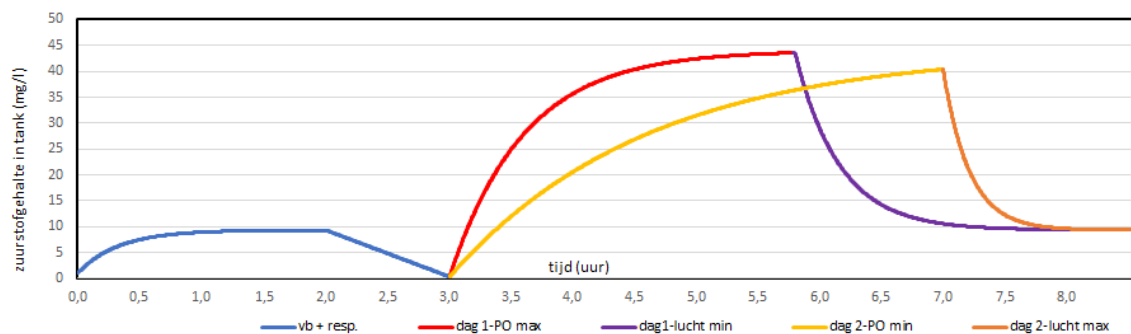
FIGUUR 3.5 BOVENAANZICHT OPSTELLING RINGPROEVEN MET LOCATIES PO VELDEN, MEETRAAI SNELHEID EN DE LOCATIES VAN DE VIJF O₂ ELEKTRODEN



3.4.3 UITVOERING RINGPROEVEN

In Figuur 3.6 is het verwachte verloop van de OC metingen weergegeven. Eerst is de meting voorbereid door beluchting om alle afbreekbare stoffen te reduceren en een constant endogeen zuurstofverbruik te krijgen. Per OC meting is eerst belucht met hoog debiet PO en vervolgens laag debiet lucht en daarna op dag 2 eerst laag debiet PO en vervolgens hoog debiet lucht. Zoals te zien in onderstaande figuur resulteert dit in een tweetal OC metingen van dezelfde doorlooptijd.

FIGUUR 3.6 VERWACHT VERLOOP VAN DE OC METINGEN TIJDENS DE RINGPROEVEN (2 METINGEN PER DAG)



Voor de ringproeven is de volgende testprocedure aangehouden:

VOORBEREIDING (BLAUWE LIJN)

- Tijdens de voorbereiding en de meting zijn de aanvoer, retourslib en recirculatie in de beluchtingstank gestopt
- Voor en na de testen is de waterhoogte gemeten
- Voor het meten van het zuurstofgehalte zijn vijf zuurstofelektroden geïnstalleerd
- Om de invloed van oxideerbare organische verbindingen (CZV, totaal stikstof en verder oppervlakte actieve stoffen) te verminderen wordt het water langdurig belucht waarbij het aanwezige slib in de endogene fase terecht komt en de zuurstofvraag op elke plek in de AT en op elke tijdstip tijdens de OC metingen niet meer verandert
- Ter controle van een min of meer constante zuurstofopname ten gevolge van de endogene ademhaling is het verloop van de afname van het zuurstofgehalte gemeten
- Ter controle van eventuele wateruitwisseling door de niet afgesloten openingen tussen binnen- en buitenring is in de binnenring tevens de zuurstofconcentratie gemeten.

TOEVOER PO (RODE EN GELE LIJNEN)

- Nadat het endogene zuurstofverbruik stabiel is geworden en het O₂ gehalte (bijna) nul is de PO toevoer op het gewenste gasdebiet aangezet
- Gedurende de test is de watertemperatuur en de toename van het zuurstofgehalte in het water gemeten en elke 30 seconden gelogd
- Op het moment dat het O₂ gehalte bij de verzadigingswaarde met PO in de buurt komt (zichtbaar door afvlakking van de curve), is de toevoer uitgeschakeld
- Het toegepaste gasdebiet is berekend en gecorrigeerd op basis van het gemeten gasdebiet, de druk en de temperatuur.

TOEVOER LUCHT (PAARSE EN ORANJE LIJNEN)

- Direct volgend op de PO test zijn de buitenlucht compressoren ingesteld op het gewenste luchtdebiet om de desorptiemeting op te starten
- Gedurende de test is de watertemperatuur en de afname van het zuurstofgehalte in het water gemeten en elke 30 seconden gelogd
- Het afgenomen vermogen van de compressor is afgelezen in de compressorruimte (niet op de schakelkast)
- Wegens het ontbreken van een debietmeter op de compressoren is het luchtdebiet berekend op basis van de technische specificaties van de compressoren. De overbrengverhouding van de tandwielkast is gecontroleerd door leverancier Aerzen.

3.4.4 METINGEN CO₂, PH EN N₂O

Tijdens de OC metingen in de buitenring zijn tegelijkertijd de volgende parameters gemeten:

- pH – zuurgraad
- N₂O – lachgasconcentratie in zowel vloeistof- (door WDODelta) als in de luchtfase (door DNV)

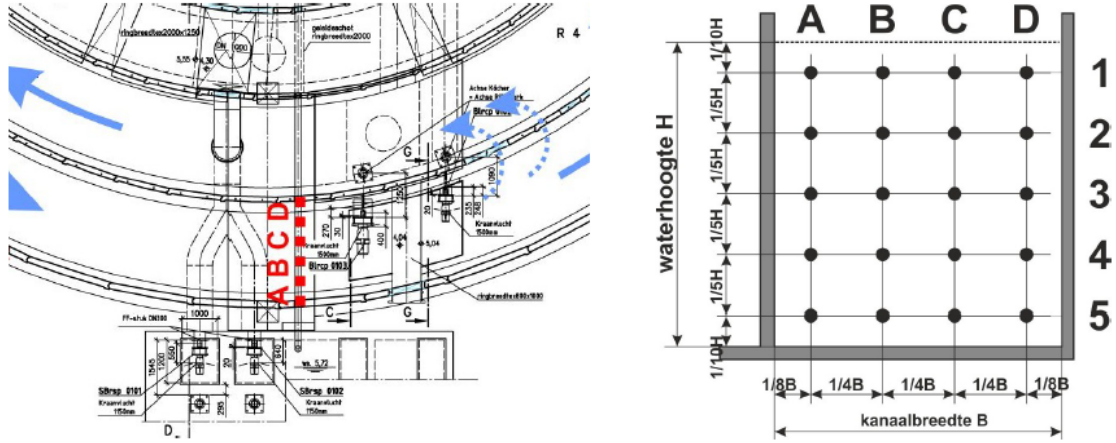
Tijdens de continu metingen is door middel van een drijvende kap boven één van de beluchtingssecties afgas afgevangen en geanalyseerd op:

- CO₂ gehalte in- en afgas lucht
- pH – zuurgraad
- N₂O – lachgasconcentratie in zowel vloeistof- (door WDODelta) als in de luchtfase (door DNV)

3.4.5 SNELHEIDSMETINGEN

De stroomsnelheid is in de dwarsdoorsnede van het kanaal in 20 gelijkmatig over de meetraai verdeelde punten gemeten waarbij gedurende 1 minuut in het meetpunt de snelheid is gemeten. De gemiddelde stroomsnelheid is het rekenkundige gemiddelde van het aantal meetpunten. De stromingssensor is vrijhangend met geleidevaan aan een ketting op elk meetpunt gehangen. De locatie en verdeling van de meetraai is aangegeven in Figuur 3.7.

FIGUUR 3.7 LOCATIE EN INDELING MEETRAAI VOOR DE SNELHEIDSMETINGEN



4

BESCHRIJVING EN DISCUSSIE

MEETRESULTATEN

4.1 INLEIDING

De volgende paragrafen bespreken de resultaten met in paragraaf 4.2 de resultaten van de kolomproeven en in paragraaf 4.3 de resultaten van de ringproeven. De belangrijkste bevindingen van deze pilot- en praktijktesten met discussie staan in paragraaf 4.4 met in paragraaf 4.5 een nabeschuiving over de invloed van de omloopsnelheid bij de ringproeven.

4.2 KOLOMPROEVEN

Als eerste is in de kolom getest met drinkwater zowel voor lucht als voor PO. De samengevatte resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4.1. De test is uitgevoerd met de standaard beluchtingsschotel (175 mm) en met een schotel waarbij het oppervlak is verkleind (68 mm), zie ook Figuur 3.2. De lucht en PO debieten zijn zoveel mogelijk gelijk aan elkaar gehouden.

De specifieke luchtinbreng (SSOTR) ligt bij het 68 mm element lager bij een lager luchtdebiet, terwijl de verwachting is dat dit juist hoger zou liggen, zie Figuur 2.1 De vermoedelijke oorzaak hiervan is de zeer lage bezettingsgraad (m^2 element oppervlak ten opzichte van het totale vloeroppervlak) van ~3% waardoor er een hele lage menging aanwezig is. Daar het een vergelijkend onderzoek betreft, zijn de resultaten met het 68 mm element onderling wel goed vergelijkbaar.

In de vergelijking tussen de SSOTR (specifieke zuurstofinbrengcapaciteit in $\text{g O}_2/\text{Nm}^3.\text{m}$) van lucht en PO in drinkwater zit gemiddeld een factor 4,7 tot 4,8.

De resultaten van de kolomproeven met actiefslib op locatie zijn ook weergegeven in Tabel 4.1. Deze testen zijn alleen uitgevoerd met het standaard 175 mm element. De lucht- en PO-belasting zijn zoveel mogelijk gelijk aan elkaar gehouden. Hierbij is gecorrigeerd voor de (gemeten) alfa factoren. In de vergelijking tussen de SSOTR (specifieke zuurstofinbrengcapaciteit in $\text{gram O}_2/\text{Nm}^3.\text{m}$) van lucht en PO in slibwater zit gemiddeld ook een factor van 4,7.

TABEL 4.1 SPECIFIEKE ZUURSTOFINBRENGCAPACITEIT VAN DE KOLOMPROEVEN MET PO EN LUCHT IN DRINKWATER EN ACTIEFSLIB

Ratio	Element diameter (mm)	Belasting element (Nm ³ /h.el)	Alfa factor PO (-)	Alfa factor lucht (-)	SSOTR PO (g O ₂ /-Nm ³ .m)	SSOTR lucht (g O ₂ /-Nm ³ .m)	Ratio SSOTR PO/Lucht (-)	Gemiddelde ratio (-)
Kolomproeven drinkwater	68	0,2	1,00	1,00	93	20	4,6	4,8
		0,25			111	23	4,9	
	175	0,9	1,00	1,00	114	25	4,6	4,8
		1,2			112	24	4,7	
		1,5			110	22	5,0	
Kolomproeven actiefslib	175	1,0	0,69	0,44	113	25	4,6	4,7
		1,3	0,50	0,46	111	23	4,7	

Uit de kolomproeven met drinkwater en actiefslib volgt dus dat beluchten met PO ten opzichte van omgevingslucht met hetzelfde lucht- respectievelijk PO-debiet resulteert in een 4,7 – 4,8 maal hogere zuurstofinbreng.

In Tabel 4.2 is het zuurstofinbrengrendement (SSOTE in %) van de kolomproeven opgenomen.

TABEL 4.2 ZUURSTOFINBRENGRENDEMENTEN VAN DE KOLOMPROEVEN MET PO EN LUCHT IN DRINKWATER EN ACTIEFSLIB

Inbrengrendement	Element diameter (mm)	Belasting element (Nm ³ /h.el)	Alfa factor PO (-)	Alfa factor lucht (-)	SSOTE PO %	SSOTE lucht %
Kolomproeven drinkwater	68	0,2	1,00	1,00	29	31
		0,25			35	35
	175	0,9	1,00	1,00	36	38
		1,2			35	35
		1,5			35	32
Kolomproeven actiefslib	175	1,0	0,69	0,44	36	37
		1,3	0,50	0,46	35	35

Zoals in bijlage 2 te zien is, heeft beluchten met PO geen substantiële invloed op de CO₂ uitstoot. Bij kortstondige beluchting met PO is er ook weinig invloed op pH. Bij langdurige beluchting met PO daalt de pH in een tijdsbestek van 3 uur van 6,35 naar 6,22. Ten aanzien van N₂O is geen bruikbare informatie verkregen.

4.3 RINGPROEVEN

Een samenvatting van de resultaten van de OC metingen van de ringproef is weergegeven in Tabel 4.3.

TABEL 4.3 SPECIFIEKE ZUURSTOFINBRENGCAPACITEIT (SSOTR) VAN DE RINGPROEF MET PO EN LUCHT IN ACTIEFSLIB

	Belasting elementen (Nm ³ /h.el)	Alfa factor PO (-)	Alfa factor lucht (-)	SSOTR PO (g O ₂ /-Nm ³ .m)	SSOTR lucht (g O ₂ /-Nm ³ .m)	Ratio SSOTR PO/Lucht (-)
Ringproeven actiefslib	1,0	0,69	0,74	96	22	4,4
	3,3	0,74	0,69	56	15	3,6

Bij gelijkblijvende zuurstofinbreng (kg O₂/h) is bij “laag” debiet (~1,0 Nm³/h per element) een factor 4,4 minder PO (Nm³/h) dan lucht nodig, bij “hoog” debiet (~3,3 Nm³/h per element) is dit een factor 3,6. Dit is lager dan bij de kolomproeven.

In Tabel 4.4 is de zuurstofinbreng efficiëntie (SSOTE in %) van de ringproeven opgenomen. De relatief lage SSOTE voor PO bij de hoge belasting valt op en komt overeen met de hierboven genoemde relatief lage PO/lucht factor, zie verder de paragrafen 4.4 en 4.5 voor een mogelijke verklaring.

TABEL 4.4 ZUURSTOFINBRENGRENDEMENTEN VAN DE RINGPROEVEN VAN PO EN LUCHT IN ACTIEFSLIB

	Belasting elementen (Nm ³ /h.el)	Alfa factor PO (-)	Alfa factor lucht (-)	SSOTE PO %	SSOTE lucht %
Ringproeven actiefslib	1,0	0,69	0,74	30	32
	3,3	0,74	0,69	17	23

Voor de grafische resultaten van de pH, CO₂ en N₂O metingen wordt verwezen naar Bijlage 3 en 4. De pH daalt 0,1 tot 0,2 binnen enkele uren met PO beluchting. Dat herstelt weer bij beluchten met buitenlucht. De proef was echter te kort om het pH effect volledig te onderzoeken. Het is de vraag wat er gebeurt bij een langere duur van PO beluchting en vanaf welke pH er een negatieve invloed merkbaar is.

N₂O emissies lijken vooral samen te hangen met discontinuïteiten, zoals het in of uit schakelen van de PO. Dat is hetzelfde beeld dat doorgaans ook bij buitenlucht zichtbaar is. Tijdens een stabiele procesvoering zijn weinig tot geen lachgasemissies waargenomen.

4.4 BEVINDINGEN KOLOM- EN RINGPROEVEN

Uit de OC metingen met de kolom- en ringproeven blijkt er een bandbreedte in de inbreng van PO qua gasvolume ten opzichte van het luchtvolume tussen de 3,6 en 4,8. Dit ligt in dezelfde range met wat theoretisch wordt verwacht (factor 4,77). Bij lage elementbelasting wordt een relatief hoge zuurstofoverdracht waargenomen bij beluchting met PO, bij een hogere belasting zakt de zuurstofoverdracht wat in. Ook het zuurstofinbrengrendement blijkt onder deze omstandigheden lager. Mogelijk is dit veroorzaakt door de lage omloopsnelheid in de RWZI Hessenpoort, waardoor de spiral flow een significant effect kan hebben (verschillend voor PO en buitenlucht), zie voor een nabeschuiving daarover paragraaf 4.5.

De pH daalt geleidelijk na enkele uren beluchting met PO. Dit effect bleek relatief snel omkeerbaar door weer lucht in te brengen. De proef was echter te kort om hier conclusies aan te verbinden. Lachgaspieken kwamen voor tijdens schakelmomenten in het proces.

4.5 NABESCHOUWING INVLOED OMLOOPSNELHEID RINGPROEVEN

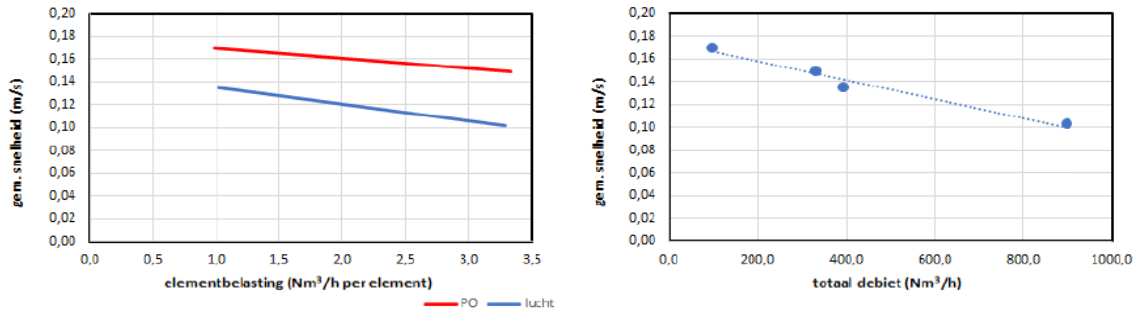
De resultaten van de snelheidsmetingen bij de ringproeven zijn weergegeven in Tabel 4.5 en Figuur 4.1. Deze snelheden zijn laag in vergelijking met de gebruikelijke snelheden in omloopssystemen van doorgaans 0,3 m/s.

Parallel aan de metingen is een CFD modellering uitgevoerd, om de stromingen in de AT meer in detail in beeld te brengen, zie Figuur 4.2. In deze figuur zijn de snelheden in kleur én de stromingsrichtingen te zien.

TABEL 4.5 RESULTATEN SNELHEIDSMETINGEN RINGPROEF

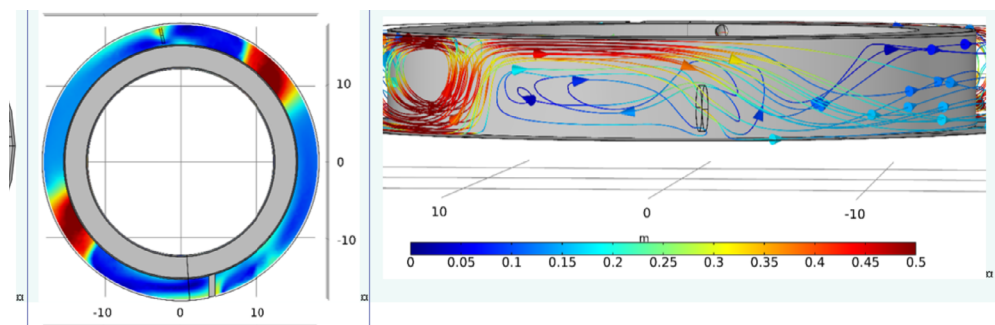
Meting	Medium	Debiet lucht/PO (Nm ³ /h)	Elementbelasting (Nm ³ /h/element)	Omloopsnelheid (m/sec)
1	PO	333	3,3	0,149
2	Lucht	308	1,0	0,135
3	PO	99	1,0	0,169
4	Lucht	987	3,3	0,102

FIGUUR 4.1 WEERGAVE OMLOOPSNELHEID VERSUS ELEMENTBELASTING (LINKS), VERSUS TOTAAL LUCHT- EN PO DEBIET (RECHTS)



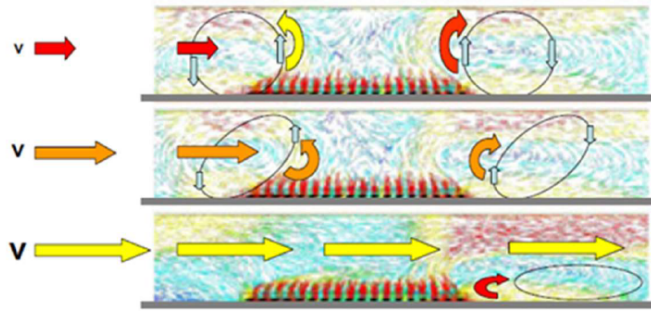
Linksboven in de linker figuur in Figuur 4.2 is de omgeving rond de voortstuwer op halve hoogte in de tank blauw, hetgeen wijst op lage snelheden. In de rechterfiguur is te zien, dat het beluchtingspakket het water omhoog stuwt en dat het zorgt voor een ongunstige aanstroming van de voortstuwer. Het lijkt erop dat de voortstuwer “moeite” heeft om het actiefslib rond te pompen. In een doorsnede van de AT (gemeten in een verticaal vlak door de AT, onderin, vlak bij de overlaat) is de snelheid < 0,15 m/s.

FIGUUR 4.2 WEERGAVE BEELD VAN DE CFD MODELLERING MET BOVENAANZICHT (MIDDEN HOOGTE TANK) EN ZIJAAANZICHT ROND DE VOORTSTUWER (DE KIJKHOEK IS VAN LINKSBOVEN NAAR BENEDEN, STROMINGSRICHTING TEGEN DE KLOK IN). DE LIJNEN IN DE RECHTER FIGUUR GEVEN DE MEEST WAARSCHIJNLIJKE ROUTE VAN HET INKOMENDE WATER UIT DE WISSELTANK (DUS GEEN UNIFORME VERDELING VAN DE STROMINGSLIJNEN).



Door de lage stroomsnelheden, wordt de “spiral flow” aan voor en achterzijde van het beluchtingsveld (rood in Figuur 4.2) onvoldoende doorbroken, zie ook Figuur 4.3. Door de keuze van het 3^e veld als PO veld ontstaat bij luchtbeluchting een “gat” tussen de andere beluchtingsvelden, dit heeft ook weer een negatieve invloed bij de beluchting met lucht (niet zichtbaar in Figuur 4.2).

FIGUUR 4.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN "SPIRAL FLOW", BIJ LAGE OMLOOPSNELHEDEN HEEFT ZUURSTOF EEN HOGE STIJGSELHEID, RESULTEREND IN LAGE ZUURSTOFOVERDRACHT. HOGERE OMLOOPSNELHEDEN DOORBREKEN DE SPIRAL FLOW (BRON STOWA 2006 19)



Door de hiervoor beschreven effecten van de beperkte omloopsnelheid en dus ook beperkte menging, kan niet worden uitgesloten dat de verschillende manieren van beluchten en begassen effect hebben gehad op de zuurstofoverdracht. Deze effecten zijn mogelijk verschillend geweest voor de PO- en luchttesten. Enerzijds door de lagere gasflow van PO wordt de omloopsnelheid minder gehinderd, anderzijds ontstaat er ook minder opwerveling en daardoor een minder intensieve menging en een lagere zuurstofoverdracht. Bij lucht is dit effect weer anders geweest. Dat zou de reden kunnen zijn geweest van de lage PO/lucht factor.

5

UITGANGSPUNTEN VOOR PRAKTIJKCASES

5.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten beschreven om een bestaande rwzi in de praktijk om te bouwen met de kennis die in de voorgaande hoofdstukken is opgedaan, waarbij een deel van de beluchting plaatsvindt met PO (onder druk) en aanvullend met lucht uit de bestaande compressoren.

In paragraaf 5.2 worden de bevindingen uit de vorige hoofdstukken die van belang zijn voor de vertaling naar de praktijk samengevat. In paragraaf 5.3 staat de afbakening in de samenwerking met derden, waarvan in deze studie vanuit wordt gegaan. Paragraaf 5.4 gaat in op de afstemming van de benodigde O₂-inbreng in de rwzi, de productie van PO en eventuele buffers. In paragraaf 5.5 staan de specs van de electrolyser waar in de onderhavige studie mee is gerekend. Tenslotte wordt paragraaf 5.6 kort ingegaan op de kansen voor de benutting van de vrijkomende warmte.

5.2 SAMENVATTING THEORIE EN BEVINDINGEN KOLOM- EN RINGPROEVEN

De theoretische verkenningen en de onderzoeken in de kolom en in de buitenring van de rwzi hebben geleid tot de volgende inzichten:

- De zuurstofdeficietwaarde voor PO is gunstiger dan voor lucht. Uitgaande van een O₂- setpoint van 4,5 mg O₂/l met PO is de deficietfactor 1,1. Bij buitenlucht en het veel gebruikte O₂-setpoint van 2,0 mg O₂/l is de deficiet 1,25. Het voordeel voor PO is een factor $1,25/1,1 = 1,14$
- De alfa factoren voor PO en buitenlucht zijn gelijk
- PO bevat in hetzelfde volume/gasdebit een factor 4,8 meer zuurstof dan buitenlucht en omdat er geen verschil aanwezig is in stofoverdracht tussen PO en lucht in water is het te gebruiken gasvolume PO ook een factor 4,8 kleiner dan gasvolume buitenlucht
- Voor de begassing met PO versus buitenlucht in vuilwater, is daarmee een factor 5,4 minder gasvolume nodig ($4,77 \times 1,14 = 5,4$) om dezelfde hoeveelheid zuurstof in de biologie in te brengen
- Voor een vergelijkbare zuurstofinbreng met PO in plaats van buitenlucht is dus circa 18% (1:5,4) van het aantal beluchtingselementen nodig. De lucht-, of beter gezegd, de “gasbelasting” van de beluchtings- of beter gezegd, de “begassingsselementen”, is met PO dan hetzelfde als met buitenlucht
- Door het reële O₂-inbrengrendement van PO in het actiefslib van circa 28 % is dus bijna 4 keer zoveel geproduceerde PO nodig als in de biologie ingebracht moet worden. Bij een in verhouding tot de rwzi kleine electrolyser kan, bij toepassing van een strategische buffer onder 30 bar druk, in een groter deel van de O₂ vraag worden voorzien. Daarmee wordt bepaald welk deel van de energievraag zal vervallen en wat nog steeds nodig is voor de toepassing van de bestaande compressoren tijdens piekaanvoer (piek DWA en RWA)
- Vooralnog wordt er voor de schetsontwerpen in dit rapport bij de berekeningen uitgegaan van een O₂ productie dat voor de rwzi “etmaalgemiddeld” nodig is. Daarmee wordt in het grootste deel van de benodigde O₂ inbreng bij DWA voorzien. Bij pieken (piek DWA en RWA) schakelen de huidige compressoren bij.

5.3 AFBAKENING TOEPASSING PO UIT DE ELECTROLYSER

Bij het onderhavige project op de RWZI Hessenpoort gaat het in principe om het ter beschikking stellen van het rwzi terrein aan derden (H₂Go) voor een electrolyser die past bij het beschikbare vermogen op die locatie en de plannen van deze ondernemers. Het waterschap stelt de grond ter beschikking. De stroom wordt door derden duurzaam ingekocht, de O₂ wordt onder druk kosteloos aan het waterschap ter beschikking gesteld voor het eigen proces van de rwzi. De H₂ wordt uitgeleverd aan derden. De vrijkomende warmte kan op de RWZI Hessenpoort dienen voor de verwarming van het bedrijfsgebouw. Er blijft dan nog een surplus aan warmte over, dat in een latere fase naar de omgeving afgezet zou kunnen worden. Het volgende hoofdstuk verkent de mogelijkheden voor benutting van de restwarmte op een rwzi van 100.000 i.e. met een sliblijn met slibvergisting en verwerking van extern slib. De warmte is hier volledig toe te passen.

Naast de kennis rondom de toepassing van PO die is opgebouwd in de vorige hoofdstukken, is voor de beschouwingen over en kosten van het schetsontwerp van een electrolyser expertise opgevraagd bij de experts van H₂Go en Equans. In bijlage 6 zijn de ontwerpwaarden en kosten van de unit operations vermeld. TAUW heeft deze unit operations 'geschaald' en samen met de aanpassingen op de rwzi voor PO inbreng gedimensioneerd en op kosten gezet, zie hoofdstukken 6 en 7.

5.4 AFSTEMMEN VAN DE PO CAPACITEITEN ELECTROLYSER EN RWZI

Een belangrijk punt voor het verkennen van praktijkcases is de afstemming van de grootte van de electrolyser aan de O₂ behoefte op de rwzi. Wel of niet toepassen van een strategische PO buffer is daarbij een keuze die onder andere gemaakt moet worden op basis van de bouwkosten en een reële energieprijs.

Stap 1 voor de benutting van de PO is het fysiek scheiden van het beluchtingssysteem in een PO deel en een buitenluchtdeel. Dit betreft het aanpassen van het leidingwerk, kleppen en de regeling. De kosten voor deze aanpassingen betalen zich terug uit de energiebesparing op de beluchting. Met dit gegeven is de minimale grootte van de benodigde hoeveelheid PO en bijbehorende electrolyser te bepalen.

Uitgangspunt is het minimaliseren van de O₂ vraag met de bestaande compressoren en een maximale benutting van de PO aanvoer. In het meest ideale geval is de electrolyser zo groot dat de volledige O₂ vraag is afgedekt. Er is dan een overschot aan O₂ en er is geen buffer nodig. Is de electrolyser kleiner omdat er bijvoorbeeld onvoldoende elektrisch vermogen op het rwzi terrein beschikbaar is, of omdat een H₂-investeerder niet groter wil of kan, dan komt opslag van PO in beeld. Dit is het geval in het geval op RWZI Hessenpoort, waar op de korte termijn⁹ onvoldoende vermogen beschikbaar is. Een buffer vergroot de benutting van de geproduceerde PO.

De grootte van deze buffer (bij de gekozen druk) kent een omslagpunt waarbij de kosten van de opslag niet meer opwegen tegen de baten van de vermeden beluchtingsenergie met de buiten-luchtcompressoren. De keuze tussen een hybride beluchtingssysteem, waarbij PO vooral de DWA behoefte afdekt en de compressoren nog regelmatig bijspringen, of een volledig op PO draaiende rwzi hangt dus af van:

- de grootte van de electrolyser
- de baten van het vermijden van inschakelen van de beluchtingscompressoren
- de kosten van de opslag van PO

⁹ Voor de langere termijn wordt gekeken naar oplossingen om dit vermogen te vergroten, onder andere door het opwekken van meer duurzame stroom

5.5 SPECS ELECTROLYSER MET H₂, O₂, WARMTE EN GEBRUIKT WATER

In bijlage 6 staan de specs van de unit operations van H₂-Go en Equans. Samengevat zijn in de onderhavige studie de volgende uitgangspunten gebruikt:

- Een electrolyser met een vermogen van 1,3 MW produceert 182 kg O₂/h en 23 kg H₂/h.
- Het rendement van stroom op H₂ in energie-eenheden is 60%. De overige 40% wordt omgezet in warmte. Voor deze studie is uitgangspunt dat 50% van de warmte (van 80 °C) wordt benut (aannname TAUW¹⁰)
- De gassen worden geproduceerd onder een druk van 30 bar
- Op de RWZI Hessenpoort komt waarschijnlijk geen H₂-tankstation. Het voornemen is om de waterstof op te slaan in tubes tot een druk van maximaal 500 bar. Deze tubes zijn opgesteld op een speciale mobiele waterstoftrailer (smartcontainer). Binnen de inrichting zullen twee waterstoftrailers aanwezig zijn met ieder 64 tubes¹¹. Per waterstoftrailer wordt maximaal 950 kg waterstof opgeslagen. De smartcontainers gaan naar een tankstation elders op het bedrijventerrein Hessenpoort
- Zuurstof wordt niet verder gecompriëerd. Het wordt direct via reduceerkleppen aan de beluchtingselementen toegevoerd of eerst (voor een deel) opgeslagen in een strategische buffer met een druk van 30 bar.
- Als waterbron wordt drinkwater gebruikt, wat nog verder met een membraansysteem in kwaliteit wordt opgewerkt tot demiwater. De bovengenoemde electrolyser van 1,3 MW heeft een waterconsumptie van 205 kg/h, ofwel 0,205 m³/h. Dat is per dag circa 5 m³ en per jaar circa 1.800 m³ drinkwater. Bij een demi-installatie ontstaat er doorgaans een deelstroom van 30 % brijn met de aanwezige zouten uit het drinkwater. De totale waterinname moet dan zijn 7,5 m³/d, waarvan 5 m³/d als grondstof wordt gebruikt en 2,5 m³/d op de rwzi wordt geloosd als brijn. Deze hoeveelheden zijn dusdanig klein, dat hiermee ten aanzien van de drinkwateraansluiting of de lozing van het brijn geen specifieke aandacht nodig is. Toepassing van effluent als bron voor waterstofproductie gaat deel uitmaken van het voorgenomen vervolgonderzoek.

5.6 BESCHIKBARE RESTWARMTE VOOR DE SLIBLIJN

- Indicatieve berekeningen laten zien, dat bij een electrolyser die wordt ontworpen op de benodigde O₂ inbreng op de rwzi, er een overschot aan warmte beschikbaar is voor de sliblijn. Voor verwarming van de onderdelen van de sliblijn, zoals de gisting, deelstroomreactor en de bedrijfsgebouwen is meer dan voldoende warmte beschikbaar.
- Bij het uitleveren van groen gas zonder de toepassing van omgevingswarmte wordt ca. 50% van het geproduceerde biogas gebruikt om de sliblijn en toebehoren op te warmen. Door de beschikbaarheid van restwarmte van de electrolyser, kan in principe 100 % van het biogas als groen gas worden uitgeleverd. Toepassing van aquathermie uit effluent om de sliblijn op te warmen, kan net als de beluchting, ook in een hybride variant. Warmte die van de electrolyser afkomt, vervangt dan de warmte uit effluent zodat de warmtepompen uit kunnen. Deze case is voor de RWZI Echten een interessante optie. WDOdelta verwacht in 2025 daar een groen gas installatie met aquathermie op te leveren.

10 Mede gebaseerd op informatie uit de thesis van F.S. Le Coultre, Utilisation of Heat Released During the Production of Green Hydrogen Using Alkaline Electrolysis (TU Delft 2022)

11 Het maximale gewicht van één van de tubes is 14,7 kg (0,30 m³) waterstof.

6

SCHETSONTWERP BENUTTING PO VOOR EEN RWZI VAN 25.000 I.E. EN 100.000 I.E.

6.1 INLEIDING

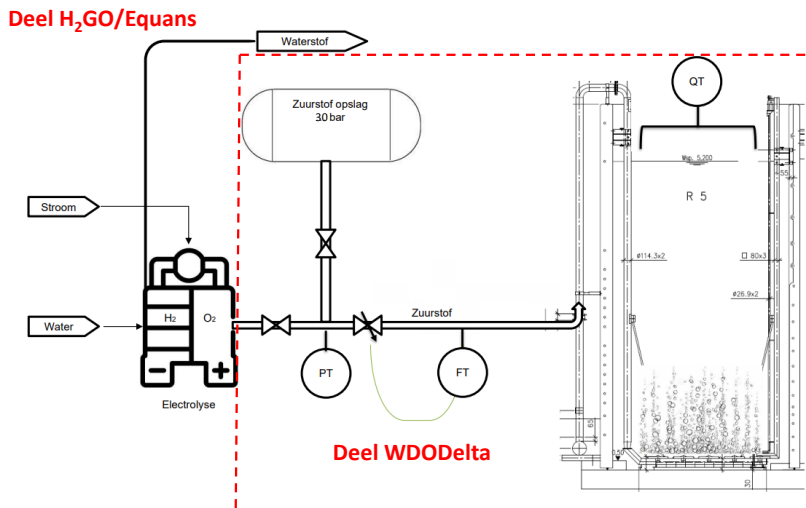
Dit hoofdstuk beschrijft voor een 'kleine' en een 'grotere' rwzi een schetsontwerp van het hybride PO en buitenlucht rwzi concept. Het gaat om een volbelaste mUCT rwzi met een capaciteit van 25.000 i.e. zonder voorbezinktank en sliblijn en om een volbelaste mUCT rwzi van 100.000 i.e. met voorbezinking en volledige sliblijn, inclusief 100.000 i.e. extern slib. De capaciteit van de electrolyzers is afgestemd op de daggemiddelde benodigde zuurstofinbreng met een O_2 -inbrengrendement van 28%. De huidige RWZI Hessenpoort is in dit perspectief niet goed vergelijkbaar, omdat deze rwzi circa 50% belast is en daarom kan volstaan met een kleinere electrolyser.

De schetsontwerpen zijn bepaald op basis van de (algemene) dimensioneringsgrondslagen die zijn afgeleid uit de kolom en ringproeven, zie hoofdstuk 5, kennis van H_2 -Go en Equans en expert judgement van WDOdelta en TAUW.

6.2 SCHEMATISCH PFD EN LAY-OUT

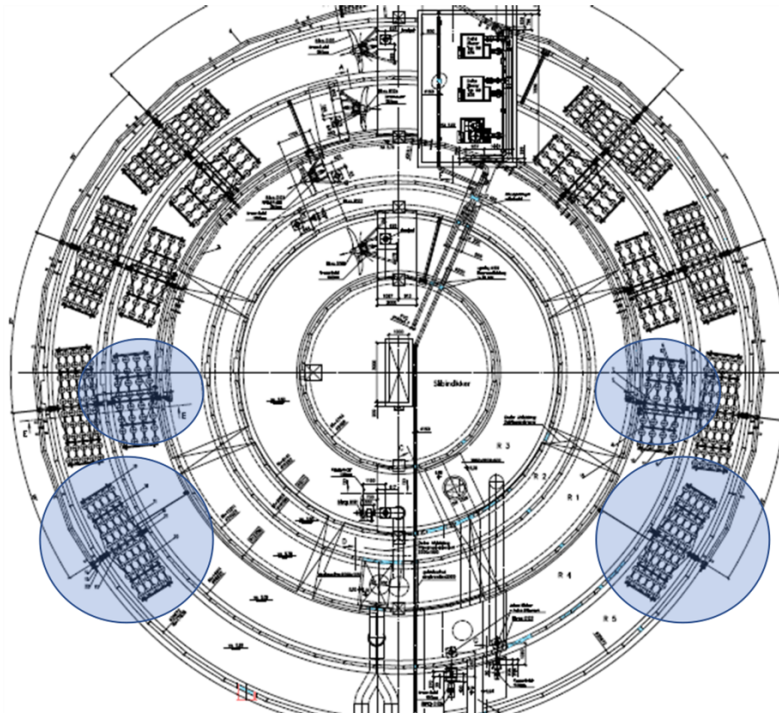
In Figuur 6.1 is schematisch in een PFD weergegeven hoe het schetsontwerp er uitziet. Links van de rode stippellijn de electrolyser met strategische opslag H_2 , met de ontwerp specs (rendementen, in- en uitgaande stromen) en kostenkennis van Equans en H_2 -Go. Deze is geschaald en bewerkt door TAUW. De electrolyser en toebehoren zijn in deze rapportage niet in detail gespecificeerd, maar als black-box beschouwd. Rechts van de demarcatielijn het deel van WDOdelta met de aanpassingen op de rwzi, waarbij de onderdelen zijn ontworpen en op kosten gezet door TAUW.

FIGUUR 6.1 SCHEMATISCH PFD ELECTROLYSER EN ACTIEF-SLIBTANK, MET DEMARCATIE ONTWERPDELEN



In Figuur 6.2 is voor een 25.000 i.e. rwzi (met als voorbeeld de RWZI Hessenpoort) weergegeven hoe in de buitenring twee velden en in de facultatieve beluchtingstank (FCT) twee velden kunnen worden toegepast als PO velden. De overige velden worden gebruikt door de bestaande compressoren. Deze configuratie geeft bij de voortstuwing de minste verstoring van het 'virtuele pomphuis' en geeft daarmee de hoogste omloopsnelheid. Dit bleek specifiek voor RWZI Hessenpoort een aandachtspunt, maar is daarmee nog geen generiek uitgangspunt. Een aanbeveling is om de meest optimale configuratie vast te stellen met behulp van een CFD studie op maat.

FIGUUR 6.2 VOORBEELD RWZI HESSENPOORT, WAARBIJ TWEE VELDEN IN DE BUITENRING EN IN DE FCT WORDEN TOEGEPAST ALS PO VELDEN (DE BLAUW OMCIRKELDE VELDEN IS DE AANBEVOLEN CONFIGURATIE OP BASIS VAN EEN CFD STUDIE VAN TAUW)



De luchtleidingen aan weerszijde van de AT worden losgekoppeld en daar worden vervolgens de zuurstofleidingen aan verbonden, zie Figuur 6.3.

FIGUUR 6.3 AANGEKOPPELDE O₂ LEIDINGEN AAN DE BESTAANDE LUCHTLEIDINGEN EN LEIDINGWERK GEKOPPELD AAN DE PO BUFFER MET REDUCEERVENTIELEN EN VEILIGHEIDSKLEPPEN



Aangekoppelde O₂ leidingen



Leidingwerk aan de PO buffer met reduceerventielen en veiligheidskleppen

6.3 UITGANGSPUNTEN SCHETSONTWERPEN

De ontwerpuitgangspunten staan in bijlage 6. In deze studie is uitgegaan van de daggemiddelde zuurstofinbreng (op basis van ontwerp OC van 244 kg O₂/h van de RWZI Hessenpoort), zie Tabel 6.1.

TABEL 6.1 BEREKENING DAGGEMIDDELTE O₂ INBRENG OP BASIS VAN ONTWERP OC RWZI HESSENPOORT (25.000 I.E.)

Parameter	Eenheid	Waarde
Daggemiddelde zuurstofvraag slib	kg O ₂ /d	2.557
O ₂ -gehalte bij de 2 pakketten	mg/l	4,5
O ₂ -deficiëtfactor	-	1,1
Alfa factor	-	0,7
Daggemiddelde O ₂ -inbreng	kg O ₂ /h	169

Deze daggemiddelde hoeveelheid O₂ moet worden ingebracht met PO. Hierbij moet nog rekening worden gehouden met het zuurstofinbrengrendement. Circa 18 % van de beluchtingselementen zijn nodig voor hetzelfde inbrengrendement als met lucht. Voor RWZI Hessenpoort is het rendement dan 28 %. De hoeveelheid PO die dan moet worden geleverd is dan een factor 3,1. Bij toepassen van een buffer kan met minder worden volstaan, zie ook Tabel 2.1 voor een rekenvoorbeeld. In bijlage 6 is ook gerekend met een O₂-inbrengrendement van 35 %.

Bij bellenbeluchting is deze efficiëntie niet veel hoger te krijgen¹². In Tabel 6.2 is voor een rwzi van 25.000 i.e. berekend hoeveel PO uit de electrolyser nodig is bij 28 % rendement. Ook is berekend hoeveel H₂ hiermee wordt opgewekt, hoeveel vermogen en elektriciteit nodig is en hoeveel restwarmte (maximaal) wordt verwacht. De hoeveelheid drinkwater als grondstof is dus 5.291+661 = 5.952 m³/jaar, dat is circa 16 m³/d. De geloosde hoeveelheid brijn is dan 8 m³/d met een totale drinkwaterinname van 16+8 = 24 m³/d. Het DWA debiet van een rwzi van 25.000 ie is circa 3.000 m³/d. De verdunning van de brijn is dusdanig dat het geen risico vormt voor de waterkwaliteit.

¹² Bij de PO oppervlaktebeluchtingssystemen, zoals Ventoxal en Turboxal zijn wel hogere rendementen, tot 70-80 % mogelijk, door het intensievere PO/water contact.

TABEL 6.2 BEREKENING VAN DE BENODIGDE HOEVEELHEID PO UIT DE ELECTROLYSER VOOR EEN O₂-INBRENGRENDEMENT VAN 28%, INCLUSIEF DE HOEVEELHEDEN H₂, VERMOGENS EN DE POTENTIËLE RESTWARMTE VOOR EEN RWZI VAN 25.000 I.E.

	Rwzi	25.000	i.e.
O ₂ vraag slib		2.557	kg O ₂ /d *
Alfa factor		0,7	
Deficiet PO		1,1	
Piekfactor		1,0	
Daggemiddelde O ₂ inbreng PO		169	kg O ₂ /h
Rendement O ₂ inbreng PO		28%	
Te produceren PO electrolyser		604	kg O ₂ /h
		5.291	ton O ₂ /jaar
Hoeveelheid H ₂		75	kg H ₂ /h
		661	ton H ₂ /jaar
Vermogen electrolyser		4,2	MW
Elektriciteitsverbruik		36,8	GWh/jaar
Rendementverlies		14,8	GWh/jaar
Te benutten warmte (aanname)		50,0	%
Effectief te benutten warmte		26,6	TJ/jaar

* Bepaald uit ontwerp RZWI Hessenpoort

In Tabel 6.3 is voor een rwzi van 100.000 i.e. met voorbezinking en slibverwerking, inclusief 100.000 i.e. extra extern slib berekend hoeveel PO uit de electrolyser nodig is voor een inbrengrendement van 28%. Ook is berekend hoeveel H₂ hiermee wordt opgewekt, hoeveel vermogen en elektriciteit nodig is en hoeveel potentieel te benutten restwarmte wordt verwacht. Er is ingeschat wat er aan warmte nodig is om de sliblijn van 200.000 i.e. te verwarmen (op basis van ervaringen van andere projecten). De hoeveelheid drinkwater als grondstof is dus 17.759 + 2.220 = 19.979 m³/jaar, dat is circa 55 m³/d. De geloosde hoeveelheid brijn is dan 27 m³/d met een totale drinkwaterinname van 55 + 27 = 82 m³/d. Het DWA debiet van een rwzi van 100.000 i.e. is circa 12.000 m³/d. De verdunning van de brijn is dusdanig dat het geen risico vormt voor de waterkwaliteit.

TABEL 6.3

BEREKENING VAN DE BENODIGDE HOEVEELHEID PO UIT DE ELECTROLYSER VOOR EEN O₂-INBRENGRENDMENT VAN 28 %, INCLUSIEF DE HOEVEELHEDEN H₂, VERMOGENS EN HET POTENTIËLE WARMTEOVERSCHOT VOOR EEN RWZI VAN 100.000 I.E. MET VOORBEZINKING EN SLIBVERWERKING MET 100.000 I.E. EXTRA SLIB

Met VBT + SGT	Rwzi	100.000	i.e.	
O ₂ vraag slib		8.592	kg O ₂ /d	*
Alfa factor		0,7		
Deficiet PO		1,1		
Piekfactor		1,0		
Daggemiddelde O ₂ inbreng		568	kg O ₂ /h	
Rendement O ₂ inbreng PO		28%		
Te produceren PO electrolyser		2.027	kg O ₂ /h	
		17.759	ton O ₂ /jaar	
Hoeveelheid H ₂		253	kg H ₂ /h	
		2.220	ton H ₂ /jaar	
Vermogen elektrolyser		14,1	MW	
Elektriciteitsverbruik		123,7	GWh/jaar	
Rendementverlies		49,7	GWh/jaar	
Te benutten warmte (aanname)		50	%	
Effectief te benutten warmte		89,4	TJ/jaar	
Slib verwerken totaal		200.000	ie	
Nodig aan warmtevermogen		1.000	kW	obv RWZI Echten
		8.760	MWh/jaar	
		31,5	TJ/jaar	
Hoeveelheid gas				
200.000	slib i.e.	1.600.000	Nm ³ /jaar	biogas
CV ketel		50%	biogas gaat naar verwarming	
		520.000	extra groen gas uit te leveren	
		1,0	EUR per Nm ³ opbrengsten	
Aquathermie	COP	4		
Bespaard elektrisch vermogen		2.190	MWh/jaar	

*Bepaald obv 4 maal O₂ vraag rwzi 25.000 ie maal 84 % effect voorbezinking

Bij een rwzi van 25.000 i.e. met een nitrificatietank en een facultatieve tank is per tank een flowregelpunt nodig.. Daarnaast zijn er twee open-dicht inbrengpunten per tank (2 per nitrificatie en 2 per wisseltank). Bij een rwzi van 100.000 i.e. is uitgegaan van twee straten van 50.000 i.e. en ook 2 flowregelpunten met 2 (open/ dicht) doseerpunten per nitrificatie en wisseltank. De aansturing van de PO regelafsluiters vindt plaats met dezelfde bestaande O₂ regeling die op de rwzi aanwezig is op basis van O₂ setpoints.

6.4 WERKTUIGBOUWKUNDIGE BESCHRIJVING AANPASSINGEN RWZI PO DEEL

Uitgewerkt zijn twee varianten:

- Een installatie met een enkelvoudige beluchtingstank met een nitrificatie- en een facultatieve tank voor een rwzi van 25.000 i.e. Het maximale totale zuurstofverbruik is 604 kg/h waarbij 2/3 naar het nitrificatietank gaat en 1/3 naar de wisseltank
- Een installatie voor twee beluchtingstanks met elk een nitrificatie- en een facultatieve tank voor een rwzi van 100.000 i.e. Het maximale totale zuurstofverbruik is 2.027 kg/h voor beide tanks met een verdeling 2/3 nitrificatie en 1/3 wissel

Overige uitgangspunten:

- Zuurstof debiet regelbaar van 20 tot 100 %
- De druk in de opslagtank is 30 bar

Het PO doserende deel bestaat in hoofdzaak uit de volgende componenten:

- Roestvaststalen leidingwerk vanaf de opslagtank tot en met de aansluitingen op de bestaande hoofdleidingen van de beluchtinstallatie. Elk compartiment (nitrificatie- en wisseltank) wordt voorzien van een aansluiting
- Handmatige stopafsluiters in elke aansluiting
- Elektrisch bediende stop afsluiters in elke aansluiting
- Een elektrisch bediende of een mechanisch bediende drukreducerklep die de druk van 30 naar 5 bar reduceert, of nog lager voor een betere benutting van de buffer
- Elektrisch bediende debietregelklep met lineaire karakteristiek in elke aansluiting
- Een debietmeter in elke aansluiting met transmitter
- Druktransmitters
- Isolatie en tracing van het leidingwerk en appendages (ter voorkoming van ijsvorming op de regelkleppen)

Alle componenten worden speciaal geselecteerd voor gebruik van zuurstof (geen materialen die een te lage zelfontbrandingstemperatuur hebben).

Zie verder bijlage 6 voor de dimensioneren van leidingen en drukreducerkleppen voor beide capaciteiten van 25.000 i.e. en van 100.000 i.e.

6.5 ELEKTRISCHE INSTALLATIE PO DEEL

De componenten die elektrisch moeten worden aangesloten zijn:

- Druktransmitter voor bewaking van de druk na de drukreducerklep
- Debietregelkleppen
- Debietmetingen
- Stopafsluiters
- Tracing

6.6 PROCESAUTOMATISERING PO DEEL

In de procesautomatisering van de rwzi worden de volgende regelingen, bewakingen en visualisaties opgenomen:

- Regeling van de klepstand van de debietregelklep op basis van een gegeven debiet setpoint.
- Regeling die op basis van de gemeten waarde van de zuurstof in de tanks een debiet setpoint genereert.
- Bewaking van de regeldruk na de drukreducerder
- Bewaking van de minimale en maximale flow per tank mbv de debietmeting
- Visualisatie van regelklepstanden, drukken en debieten

6.7 ONTWERP STRATEGISCHE BUFFER PO

Een strategische PO buffer vergroot de benutting van de PO en verkleint de benodigde aanvullende buitenluchtbeluchting. Dat brengt echter wel extra kosten met zich mee en het hangt van de stroomprijs af of dit uit kan. In Figuur 6.4 is een voorbeeld van een horizontale PO buffer afgebeeld. In dit rapport is uitgegaan van een maximale grootte van 3 m³ per stuk. Er

zijn dan dus per locatie meer PO buffers nodig. De kosten nemen evenredig aan het aantal buffers toe (geen schaalvoordeel).

FIGUUR 6.4 MOGELIJK VOORBEELD PO BUFFER(S)



In potentie is het mogelijk om PO bij een lagere druk dan 30 bar op te slaan. Het volume van de buffer of het aantal buffers kan dan groter worden. In tabel 6.4 zijn de resultaten van een korte inventarisatie aan drukopslag weergegeven. Het lijkt er op dat de kosten per m³ en per bar druk vergelijkbaar zijn. Het heeft dus geen zin om met een lagere druk op te slaan.

TABEL 6.4 PO BUFFERS VAN VERSCHILLENDE DRUKKEN, VOLUMINA EN KOSTEN

Druk (bar)	30	7	7	12	12
Inhoud (m ³)	3	5	4	2,5	5
Dia (m)	0,8	1,2	1	1,1	1,45
Lengte (m)	6	4,4	4	2,5	3
Prijs (EUR)	20.000	7.800	6.500	6.600	14.000
Spec prijs (EUR/m ³ /bar)	222	223	232	220	233

In Tabel 6.5 is het effect weergegeven van de strategische buffer op de benutting van de gevormde PO. Hierbij is er van uitgegaan dat de etmaalgemiddelde hoeveelheid PO doorgaans in 16 uur wordt geconsumeerd. Er kan dan dus voor 74 % in de DWA behoefte worden voorzien. Door toepassen van een strategische buffer gaat dat percentage omhoog, zie tabel 6.5. In rood is aangegeven wat op dit moment een goede keus lijkt om verder uit te werken in de kosten.

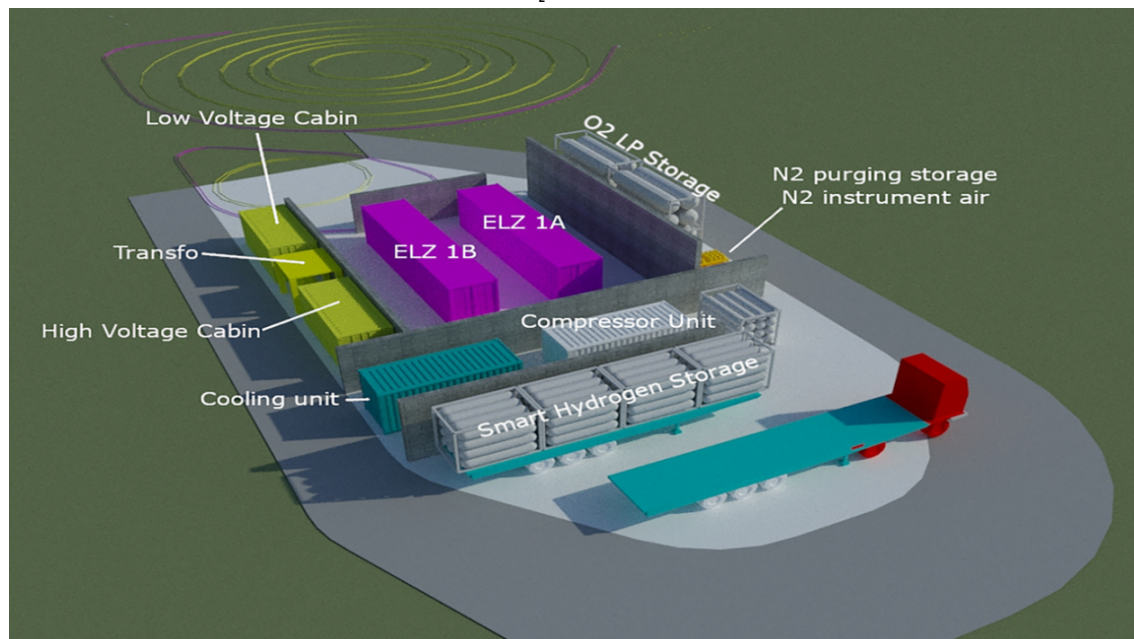
TABEL 6.5 EFFECT STRATEGISCHE BUFFER VAN 30 BAR OP DE PO BENUTTING (ROOD IS VOORKEUR)

Parameter		25.000 i.e.	100.000 i.e.
Capaciteit electrolyser	kg PO/h	604	2.029
Zuurstofinbrengrendement	%	28%	28%
Daggemiddelde O ₂ inbreng	kg O ₂ /h	169	568
O ₂ vraag DWA overdag (in 16 h)		228	766
Percentage waarin wordt voorzien	%	74%	74%
Percentage bij strategische buffer			
Grootte strategische buffer (30 bar)			
13 m ³	500 kg O ₂	78%	75%
25 m ³	1.000 kg O ₂	82%	76%
50 m ³	2.000 kg O ₂	89%	79%
75 m ³	3.000 kg O ₂	97%	81%
100 m ³	4.000 kg O ₂	100%	83%
150 m ³	6.000 kg O ₂	100%	88%
200 m ³	8.000 kg O ₂	100%	92%
250 m ³	10.000 kg O ₂	100%	97%
301 m ³	12.000 kg O ₂	100%	101%

6.8 DE ELECTROLYSER VAN EQUANS/H₂-GO

Dit is een package unit (black box), zie Figuur 6.5. In paragraaf 5.5 staat welke specificaties het systeem heeft. In deze rapportage wordt dit niet verder besproken.

FIGUUR 6.5 OPSTELLING ELECTROLYSER (ELZ) UNITS (BRON H₂-GO)



Naast de electrolyser unit(s) zijn er nog strategische buffers nodig voor de opslag van H₂ onder een druk van 500 bar. Daar horen ook compressoren bij. Voor de inertisering van de waterstof- en de zuurstofleidingen is een N₂-purging installatie aanwezig, inclusief stikstofgasvoorraad. In bijlage 6 staan punten uit de mondeling verkregen informatie opgenomen, inclusief een globale inschatting van de kosten. Deze worden verder besproken in hoofdstuk 7.

7

KOSTEN

7.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar kosten. Zoals in hoofdstuk 6 is aangegeven, wordt in eerste instantie gekeken naar de kosten van de aanpassingen aan een rwzi van 25.000 i.e. en van 100.000 i.e. om de geproduceerde PO op de bestaande beluchtingselementen te benutten¹³. Ook het effect van een strategische buffer voor PO van 25 m³ respectievelijk 75 m³ op de kosten en het break-even point komt aan de orde. Daarnaast geeft dit hoofdstuk ook een doorkijk naar de totale kosten met een electrolyser van een bepaalde capaciteit gecombineerd met de benodigde maatregelen op de rwzi.

Wegens de geopolitieke situatie tijdens het schrijven van dit rapport, zijn er grote schommelingen in prijzen voor staal en elektriciteit én in de opbrengsten van bijvoorbeeld groen gas en waterstof. Voor de kostenramingen voor de stichtingskosten zijn de kosten aangehouden die van vóór 2022 gelden. Met betrekking tot de prijzen van elektriciteit en opbrengsten van groen gas en waterstof zijn wel verschillende tarieven gehanteerd om de gevoeligheid in beeld te brengen, ook omdat verwacht wordt dat de tarieven niet snel weer zullen dalen.

Bij de kostenraming is net als bij de schetsontwerpen die beschreven staan in hoofdstuk 6 uitgegaan van twee capaciteiten, een rwzi van 25.000 i.e., zoals de RWZI Hessenpoort op ontwerpcapaciteit en een rwzi van 100.000 i.e. De 100.000 i.e. rwzi heeft een voorbezinking, sliblijn met gisting en verwerking van 100.000 i.e. extra aan extern slib.. Er is uitgegaan van een inbrengefficiëntie met betrekking tot PO van 28 %, waarbij circa 18 % van de beluchtingselementen wordt benut.

7.2 UITGANGSPUNTEN

In Tabel 7.1 zijn de uitgangspunten voor de jaarlijkse kosten/TCO bepaling opgenomen. Voor de uitgangspunten voor de bouwkosten en stichtingskosten wordt verwezen naar bijlage 6.

¹³ Stel dat voor volledig nieuwe rwzi PO beschikbaar zou zijn, dan ligt het voor de hand om de O₂ inbreng met andere systemen met een hoger inbrengrendement te overwegen. In dat geval zal de (hele) inrichting van de actief-slibtanks tegen het licht gehouden moeten worden. Een dergelijke studie valt buiten het kader van het huidige project.

TABEL 7.1 UITGANGSPUNTEN VOOR BEPALEN JAARLIJKSE KOSTEN/TCO (MET MIN-MAX WAARDEN)

Onderdeel jaarlijkse kosten				
Rentepercentage voor kapitaallasten	2,10%			
Afschrijvingstermijn civiel	30	jaar	Annuiteit civiel	0,045
Afschrijvingstermijn WTB	15	jaar	Annuiteit WTB	0,078
Afschrijvingstermijn E, I + PA	10	jaar	Annuiteit E, I + PA	0,112
Onderhoudskosten civiel	0,5%	van de bouwkosten excl BTW		
Onderhoudskosten W, E, I + PA	3,0%	van de bouwkosten excl BTW		
Personeelskosten EUR	100.000	per fte per jaar		
Kosten stroom EUR	0,02	1,00 EUR per kWh incl alles en BTW		
CO ₂ heffing	100	EUR/ton CO ₂		
Schatting energieverbruik beluchting	15	kWh/ie.jaar		
Opbrengst H ₂ gas aan de pomp	8,5	20,0 EUR/kg		
Opbrengst H ₂ gas vóór de pomp	4,0	14,0 EUR/kg		
Opbrengsten groen gas	1,0	2,0 EUR/Nm ³		

7.3 BOUWKOSTEN EN STICHTINGSKOSTEN

De berekening van de bouw- en stichtingskosten voor de twee capaciteiten en de strategische buffers is samengevat weergegeven in Tabel 7.2. In bijlage 6 is de volledig opbouw van de kosten weergegeven. De rode bedragen horen bij de buffergrootten die zijn gekozen voor de berekeningen. Hieruit blijkt dat de buffers relatief duur onderdeel zijn ten opzichte van de overige aanpassingen van de beluchtingsinstallatie. Bij de 100.000 i.e. rwzi zijn de kosten even hoog als de overige investeringen, doordat bij de buffers het aantal modules groter worden en het effect van schaalgrootte ontbreekt.

TABEL 7.2 SAMENVATTING VAN DE BOUW- EN STICHTINGSKOSTEN VOOR HET RWZI DEEL BENUTTING PO EN DE STRATEGISCHE BUFFER (ROOD IS VOORKEUR)

		25.000 i.e.	100.000 i.e.
Daggemiddelde O ₂ inbreng	kg O ₂ /h	169	568
Zuurstofinbrengrendement	%	28%	28%
Capaciteit electrolyser	kg PO/h	604	2.029
Directe bouwkosten	EUR	230.000	440.000
Voorziene bouwkosten	EUR	340.000	650.000
Stichtingskosten maatregelen rwzi	EUR	600.000	1.160.000
Stichtingskosten strategische buffer	EUR		
	13 m ³	190.000	190.000
	25 m ³	380.000	380.000
	50 m ³	770.000	770.000
	75 m ³	1.150.000	1.150.000
	100 m ³		1.540.000
	150 m ³		2.300.000
	200 m ³		3.070.000
	250 m ³		3.840.000
	301 m ³		4.610.000

Toepassen van een strategische buffer voor PO lijkt daarmee niet uit te kunnen en qua energie-besparing weinig meerwaarde te hebben, de besparing is 7 tot 8 %, terwijl de investeringen ten opzichte van de andere maatregelen veel hoger zijn.

7.4 JAARLIJKSE KOSTEN, OPBRENGSTEN EN BREAK-EVEN POINT RWZI DEEL

In Tabel 7.3 zijn de jaarlijkse kosten, opbrengsten voor de twee capaciteiten met en zonder strategische buffer en het break-evenpoint qua stroomprijs vermeld.

TABEL 7.3 JAARLIJKSE KOSTEN, OPBRENGSTEN VOOR DE TWEE CAPACITEITEN MET EN ZONDER STRATEGISCHE BUFFER EN HET BREAK-EVENPOINT QUA STROOMPRIJS

		25.000	ie	100.000	ie
		zonder	met 25 m ³	zonder	met 75 m ³
Kosten					
Annuiteit en onderhoud	EUR/jaar	69.000	104.000	131.000	236.000
Personeel	EUR/jaar	5.000	7.500	10.000	15.000
Totale jaarlijkse kosten	EUR/jaar	74.000	111.500	141.000	251.000
Opbrengsten besparing stroom					
stroomverbruik beluchting	kWh/j	375.000	375.000	1.500.000	1.500.000
Besparing op stroom beluchting	%	74%	82%	74%	81%
Vermeden CO2 heffing	EUR/jaar	-8.000	-9.000	-32.000	-35.000
kostprijs stroom (EUR/kWh)					
	0,12 EUR/jaar	-33.000	-37.000	-133.000	-146.000
	0,24 EUR/jaar	-67.000	-74.000	-267.000	-291.000
	0,50 EUR/jaar	-139.000	-153.000	-556.000	-607.000
Break-even stroomprijs	EUR/kWh	0,24	0,33	0,10	0,18
Opbrengsten vermeden biogasstook					
(twee keer zo veel, 1 EUR/m ³)	EUR/jaar			-520.000	-520.000
(overmaat warmte)					
Of vermeden stroom bij Aquathermie	kWh/jaar			-2.190.000	-2.190.000
Vermeden kosten bij tarief (EUR/kWh)	0,24			-525.600	-525.600
Saldo bij aquathermie bij stroomprijs 0,24 EUR/kWh		-1.000	28.500	-683.600	-600.600

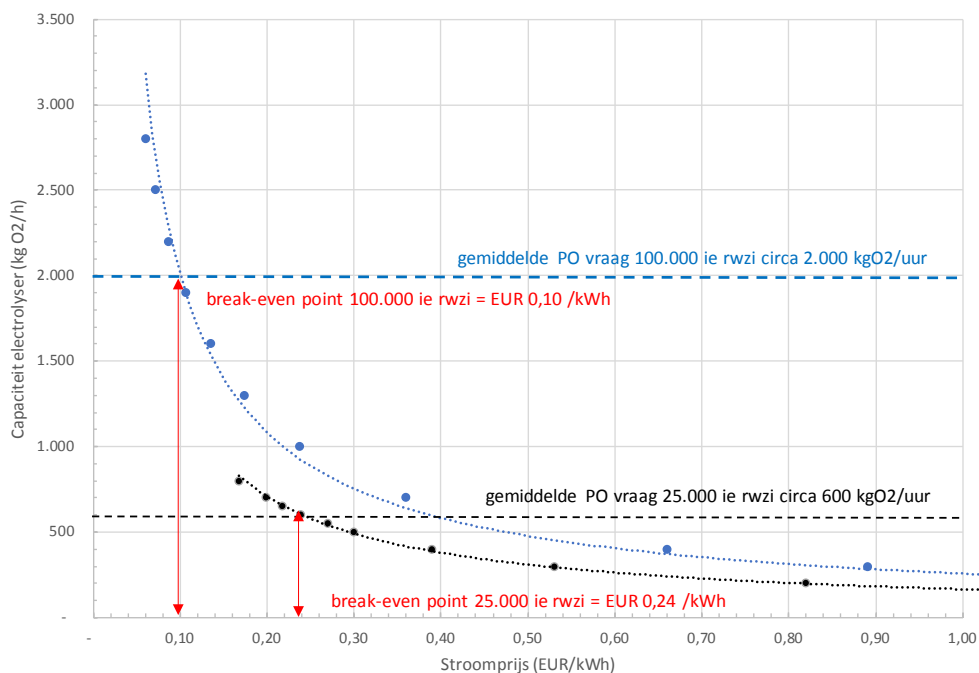
Uit deze tabel blijkt inderdaad dat de kosten van de strategische buffer niet opwegen tegen de besparingen. Te zien is dat bij een 100.000 i.e. rwzi de investeringen in aanpassing van het beluchtingssysteem veel sneller uitkunnen dan bij de 25.000 i.e. rwzi. Bij hogere stroomprijzen wordt het sowieso snel rendabel.

Daarnaast is er nog de benutting van restwarmte voor de gisting. Of er kan meer groen gas worden uitgeleverd óf er wordt bespaard op stroom voor de aquathermie. In beide gevallen is er sowieso een business case en kan dit een voordeel opleveren van circa EUR 500.000. Totaal is het saldo bij benutting van PO en restwarmte van een electrolyser dan tussen de 600.000 en EUR 700.000. Zeer interessant.

Ook het effect van schaalgrootte is goed zichtbaar, zie ook Figuur 7.1.

FIGUUR 7.1

BREAK EVEN POINTS VOOR OMBOUW NAAR PO UIT ELECTROLYSER VERSUS STROOMPRIJS VOOR BELUCHTINGSCOMPRESSOR-EN VOOR 25.000 I.E. EN 100.000 I.E. RWZI



7.5 DOORKIJK KOSTEN TOTAAL MAATREGELEN RWZI ÉN ELECTROLYSER

In Tabel 7.4 zijn de bouw en stichtingskosten van de maatregelen op de rwzi inclusief electrolyser weergegeven. Hierbij is geen PO buffer opgenomen.

TABEL 7.4

BOUW- EN STICHTINGSKOSTEN RWZI DEEL ÉN ELECTROLYSER DEEL (ZONDER PO BUFFER)

		25.000 i.e.	100.000 i.e.
Daggemiddelde O ₂ inbreng	kg O ₂ /h	169	568
Efficiëntie	%	28%	28%
Capaciteit electrolyser	kg PO/h	604	2.029
Maatregelen rwzi voor PO			
Directe bouwkosten	EUR	230.000	440.000
Voorziene bouwkosten	EUR	340.000	650.000
Stichtingskosten maatregelen rwzi	EUR	600.000	1.160.000
Electrolyser			
Directe bouwkosten	EUR	5.520.000	10.240.000
Voorziene bouwkosten	EUR	8.130.000	15.070.000
Stichtingskosten electrolyser	EUR	14.480.000	26.860.000
Totaal electrolyser + maatregelen			
Directe bouwkosten	EUR	5.750.000	10.680.000
Voorziene bouwkosten	EUR	8.470.000	15.720.000
Stichtingskosten totaal	EUR	15.080.000	28.020.000

In Tabel 7.5 zijn de jaarlijkse kosten gegeven voor de maatregelen op de rwzi inclusief de electrolyser. In de bovenste 3 rijen staan de kosten exclusief stroom. Daaronder staan de (potentiële) opbrengsten van H₂ en extra uit te leveren groen gas door restwarmte voor twee verschillende tarieven. In de laatste rijen staat de kosten voor netto stroomvraag. Hierbij is de correctie voor de besparingen in de beluchting weergegeven.

TABEL 7.5 JAARLIJKSE KOSTEN MAATREGELEN RWZI ÉN ELECTROLYSER (ZONDER BUFFER) VOOR VERSCHILLENDE TARIEVEN VOOR H₂ EN GROEN GAS

		25.000 i.e.		100.000 i.e.		
Opbrengsten waterstof na de electrolyser*	EUR/kg	4,0	14,0	4,0	14,0	
Opbrengsten groen gas	EUR/Nm ³			1,0	2,0	
Kapitaal electrolyser en PO rwzi						
Annuiteit en onderhoud	EUR/jaar	1.496.000	1.496.000	2.766.000	2.766.000	
Personeel	EUR/jaar	15.000	15.000	30.000	30.000	
Totale jaarlijkse kosten	EUR/jaar	1.511.000	1.511.000	2.796.000	2.796.000	
Opbrengsten waterstof						
	ton H ₂ /jaar	661	661	2.220	2.220	
	EUR/jaar	-2.650.000	-9.260.000	-8.880.000	-31.080.000	
Opbrengsten vermeden biogasstook						
	EUR/jaar			-520.000	-1.040.000	
Netto stroomvraag (minus besparing)						
Electrolyse	kWh/jaar	36.840.000	36.840.000	123.650.000	123.650.000	
Stroomverbruik beluchting	kWh/jaar	375.000	375.000	1.500.000	1.500.000	
Besparing op stroom beluchting	%	74%	74%	74%	74%	
Netto stroomvraag (minus besparing)	kWh/jaar	36.560.000	36.560.000	122.540.000	122.540.000	
Kostprijs stroom (EUR/kWh)						
	0,03	EUR/jaar	1.096.800	1.096.800	3.676.200	3.676.200
	0,12	EUR/jaar	4.387.200	4.387.200	14.704.800	14.704.800
	0,24	EUR/jaar	8.774.400	8.774.400	29.409.600	29.409.600
Break-even stroomprijs	EUR/kWh	0,03	0,21	0,05	0,24	

* Dus nog zonder pompstation en opslag

Onderaan in de Tabel 7.5 staan de break-even stroomprijzen. In tegenstelling tot de break-even stroomprijs in Tabel 7.3 moet voor de haalbaarheid van de elektrolyse de stroomprijs voor een business case juist onder deze waarde liggen.

Het effect van een hogere opbrengst van H₂ valt direct op. Er is ook een schaafeffect en ook een positieve bijdrage van het benutten van de restwarmte.

Deze tabel maakt ook gelijk duidelijk dat het maken van H₂ alleen uit kan als óf de prijs van H₂ sterk stijgt óf de stroom tegen (zeer) lage prijs wordt ingekocht. Dit kan bijvoorbeeld goedkope stroom uit overschotten aan wind- of zonne-energie zijn of van anders niet aan te sluiten zon- of windparken door de netcongestie¹⁴.

14 In het geval van netcongestie kan de stroomprijs zelfs negatief zijn.

8

DUURZAAMHEID

8.1 BESPAREN OP ELEKTRISCHE ENERGIE BELUCHTING

Wanneer een rwzi gebruik maakt van PO in de zuurstofinbreng van de zuivering, kunnen de compressoren die normaliter lucht inblazen een groot deel van de tijd uit blijven. Dit komt mede doordat de PO al onder druk staat en niet meer onder druk gebracht hoeft te worden. Het enige energieverbruik bij inbreng van PO is nodig voor het mengen van het zuurstofgas in het water door de voortstuwer(s). Omdat de compressoren verreweg het grootste deel van het energie-verbruik op de rwzi hebben, levert dit een belangrijke besparing op in energie. Bij WDODelta verbruikt de beluchting gemiddeld over alle rwzi's circa de helft (14 kWh/ie.jaar) van het energie-verbruik dat totaal voor zuiveren nodig is (27 kWh/ie.jaar). Bij een hybride PO systeem kan op beluchtingsenergie circa 70-100% worden bespaard. De potentiële besparing op het totale energieverbruik in dit geval dus 36-52%.

8.2 MEER DUURZAAM GROEN GAS UITLEVEREN

Er is op het moment een sterke ontwikkeling om het biogas niet meer te verstoken in een WKK, maar op te werken naar groen gas. Dat groene gas is zeer aantrekkelijk omdat daarmee een hoogwaardig product ontstaat, waarmee aardgas kan worden vermeden en het kan worden toegepast in de bebouwde omgeving en daarmee een significante bijdrage wordt geleverd aan de energietransitie.

Er is echter zonder WKK een separate warmtebron nodig om de gisting te verwarmen. Wanneer daarvoor biogas in een CV ketel wordt gebruikt, is 30-50 % van de geproduceerde biogas nodig voor verwarming. Als alternatief kunnen warmtepompen in het effluent óf kan restwarmte van derden worden gebruikt. Daarmee kan 95 % van het biogas als groen gas worden uitgeleverd en hoeft er geen biogas meer verbrand te worden. Anno 2021 werd er jaarlijks 20 miljoen Nm³ groen gas op de Nederlandse rwzi's geproduceerd. Dat zal naar verwachting met de huidige plannen gaan toenemen naar 33 miljoen Nm³ in 2030. In een recente studie van de Unie van Waterschappen¹⁵ is gebleken dat alleen al door het toepassen van omgevings- of restwarmte enkelen tientallen miljoenen Nm³ groen gas per jaar extra kan worden gemaakt. Bij toepassen van een warmtepomp ontstaat weliswaar veel meer groen gas, maar is er wel een significante toename van het elektriciteitsverbruik. Bij de toepassing van (rest)warmte van derden, zoals van een electrolyser, zijn er geen extra warmtepompen en is er geen extra inkoop van elektriciteit nodig.

Dit alles levert voor de waterstofproducent en het waterschap een zeer grote synergie op; meer groen gas en/of minder verbruik aan elektriciteit en een effectieve benutting van de restwarmte.

¹⁵ Unie van Waterschappen, Locatieonderzoek groen gas rwzi's, aug 2022, <https://lnkd.in/e9a2br2h>

8.3 EMISSIES BROEIKASGASSEN

Op basis van de huidige informatie ontstaat er bij toepassing van PO niet meer N_2O dan bij toepassing van lucht. Het lijkt vooral op te treden bij schakelmomenten en daarin lijkt er geen onderscheid te zijn tussen lucht en PO.

Er zijn aanwijzingen van experts¹⁶ dat de grootste bijdrage van rwzi's aan N_2O emissies plaatsvindt door stripeffecten. In STOWA 2019 05 (bijlage 3) is te zien dat de gasdoorzet in het water recht evenredig is met de emissie van vrachten N_2O . Indien bij toepassing van PO een reductie van het gasdebiet met een factor 5,4 plaatsvindt, is daarmee (in theorie) een zelfde reductie van de N_2O emissie in vrachten mogelijk. Dit moet in de praktijk nog worden bevestigd.

8.4 DE ELECTROLYSER OP DE RWZI (SMART ENERGY HUB)

Het grote verhaal achter het opwekken van duurzame waterstof ligt niet in de eerste plaats aan de hierboven beschreven factoren, maar in de waarde van waterstof zelf, als compacte schone drager van energie, die goed kan worden opgeslagen en als molecuul voor veel toepassingen geschikt is.

Een groot deel van de duurzaam opgewerkte energie is in de vorm van elektriciteit en dat zal in de toekomst alleen maar meer worden. Een groot nadeel hierbij zijn de pieken vraag en aanbod, wat een grote vraag doet ontstaan naar opslag. Accu's zijn beperkt in capaciteit en zwaar, waardoor deze voor diverse toepassingen niet in beeld zijn (bijvoorbeeld luchtvaart). Waterstof is compact en licht en heeft een grote energie-inhoud per kg en heeft deze nadelen niet, het kan daarom gemakkelijk worden getransporteerd.

Daarnaast is waterstofproductie ook een zeer geschikt middel om bij een overschot aan zon- of windenergie, of bij problemen door netcongestie, zoals deze in een steeds groter deel van het land optreedt, stroom te verwaarden tot waterstof. In het andere geval zou deze stroom verloren gaan. Het is moeilijk om deze hoeveelheid te kwantificeren, maar het levert zeker een grote bijdrage aan het verminderen van de CO_2 footprint.

¹⁶ In een recent webinar over N_2O emissions (the root causes of N_2O emissions in wastewater treatment bioreactors and what to do about it (international webinar, AM Team) is geponoerd dat in theorie de N_2O emissie door begassing met PO sterk zou kunnen afnemen. Deze afname zou evenredig met de afname van het gasdebiet zijn.

9

POTENTIE VOOR UITROL VAN HET CONCEPT OP RWZI'S

Wat maakt een goede value case voor de productie van waterstof op een rwzi? Iedere rwzi heeft zijn eigen karakteristiek met specifieke omgevingsvariabelen. Daarom zal per rwzi een value case moeten worden gemaakt om de haalbaarheid te kunnen inschatten. Per waterschap kan vervolgens een kanskaart worden gemaakt met kansrijke locaties.

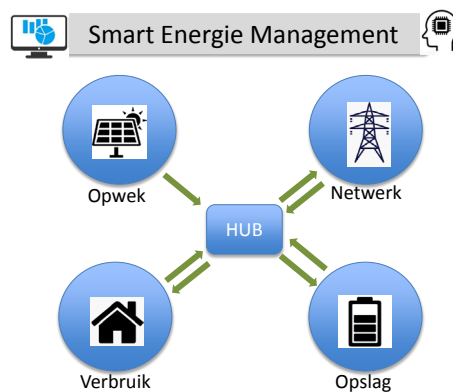
In opdracht van WDOdelta heeft het bureau Repowered een framework gemaakt voor strategische afweging. In acht beslisstappen kan eenvoudig de haalbaarheid per rwzi worden bepaald. Per beslisstap zijn een aantal cruciale variabelen van belang die invloed hebben op de haalbaarheid. Er is een handreiking opgesteld hoe de beslisstappen kunnen worden doorlopen. Het framework is beschikbaar voor alle waterschappen.

In STOWA-verband loopt een vervolgonderzoek rwzi als Smart Energy Hub (SEH). Het concept SEH is een locatie waar energiestromen bij elkaar komen. Lokale opwek, verbruik, opslag en koppeling met het net vinden daar plaats. Zie ook figuur 9.1. Dit alles met slimme sturing met data. Met praktische cases wordt systeemintegratie met de omgeving in een drietal fasen uitgewerkt:

- Fase 1: Generieke mogelijkheden/concepten om de rwzi als smart energie hub in te zetten aan de hand van de drie gegeven casussen Harderwijk, Echten en Breda
- Fase 2: Concrete uitwerking van de SEH voor casus Harderwijk
- Fase 3: Mogelijke rollen van de waterschappen in SEH's en de (maatschappelijke) kansen en risico's die daarbij horen

Productie van waterstof door middel van elektrolyse is daarbij een onderdeel van een groter geheel.

FIGUUR 9.1 HET CONCEPT RWZI ALS SMART ENERGY HUB (BRON: WDODELTA)



Algemeen kan gesteld worden dat kansrijke rwzi's de volgende kenmerken hebben:

- Er is behoefte aan waterstof in de omgeving
- Er is een partner voor de afzet
- De rwzi bevindt zich in een gebied met netcongestie met een grote potentie opwek aan wind- en zonenergie
- Er is een groengasinstallatie of er is potentie hiervoor (warmtevraag)
- Er is grote behoefte aan pure zuurstof voor het zuiveren van afvalwater (zuurstofvraag)

10

DISCUSSIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

10.1 DISCUSSIE

Bij de uitgevoerde testen is gebleken dat buitenlucht vervangen door PO in bestaande beluchtingselementen prima mogelijk is. Zowel vanuit de theorie als vanuit de metingen in de praktijk is gebleken dat qua gasdebiet aan PO 4,8 maal minder nodig is dan aan buitenlucht voor dezelfde O_2 -inbreng. PO of buitenlucht heeft geen invloed op de fysische eigenschappen van de stofoverdracht. De veranderingen zijn direct af te leiden uit het verschil in zuurstofgehalte van PO versus buitenlucht en uit de verschillen in de oplosbaarheid en de stuurwaarden voor het actief-slibproces. Door de kleinere invloed van het O_2 -deficiet is uiteindelijk 5,4 maal ($1,14 \times 4,77$) minder PO gasvolume nodig dan buitenluchtvolume. Ook de O_2 -inbrengrendementen van PO zijn vergelijkbaar met buitenlucht: 28-35 % van de PO of de zuurstof in de buitenlucht lost op in het water, de rest van de zuurstof ontwijkt aan het wateroppervlak. De O_2 inbreng efficiëntie is vooral afhankelijk van de lucht- of gasbelasting van de beluchtingselementen. Er is daarbij geen verschil gezien tussen PO of buitenlucht.

Uit de kolom- en ringproeven is met betrekking tot de effecten op de CO_2 ophoping en pH verlaging tot nu toe weinig informatie van een langere duur beschikbaar gekomen. Uit de testen lijken de effecten op de pH tot nu toe beperkt. Ten aanzien van de N_2O emissies zijn deze net als bij buitenlucht gekoppeld aan schakelmomenten waarbij het zuurstofgehalte fluctueert. Onder een stabiel zuurstofgehalte zijn ook met PO weinig tot geen lachgasemissies waargenomen. Een test van enkele maanden zal hierover meer zekerheid geven.

Bij ombouw van de bellenbeluchting met buitenlucht naar PO beluchting hoeft wegens de factor 5,4 maar een klein deel van de beluchtingselementen (18 % = $1/5,4$) te worden gebruikt. Het O_2 -inbrengrendement blijft dan gelijk ten opzichte van de buitenlucht. Door meer elementen te gebruiken, kan in theorie het O_2 -inbrengrendement toenemen van 28 % naar 35 %. Bij de ombouw van bestaande rwzi's is het echter logischer om te kiezen voor een hybride oplossing, waarbij de andere elementen beschikbaar zijn voor buitenlucht om enerzijds te ondersteunen bij piekaanvoer, anderzijds deze achter de hand te houden als back-up oplossing, indien de electrolyser buiten bedrijf is. De minimale PO flow uit de electrolyser kan dan bijvoorbeeld zijn afgestemd op een daggemiddelde zuurstofvraag van de rwzi, of een nog kleinere capaciteit hebben als bijvoorbeeld het beschikbare elektrische vermogen op de rwzi niet toereikend is voor een grotere electrolyser. Het restant wordt dan ingebracht door de overige elementen en de aanwezige compressoren. Met een strategische buffer kan een nog groter deel van de geproduceerde PO worden benut. Het is echter duidelijk geworden dat toepassen van een strategische buffer voor PO pas bij hogere stroomprijzen financieel rendabel wordt.

Bij de ombouw van een rwzi op buitenlucht naar een "rwzi op PO" wordt het zuurstofgas via nieuw leidingwerk en drukreducerkleppen naar de bestaande actief-slibtanks en naar een

deel van de beluchtingspakketten gebracht. De bestaande O₂-regeling kan worden gebruikt om de laatste regelafsluiters direct vóór de pakketten aan te sturen. Bij een kleiner aantal pakketten zal het zuurstofsetpoint hoger moeten worden gekozen om te zorgen dat door het zuurstofgradiënt een voldoende hoge fractie belucht slib aanwezig is. Dit moet op maat worden bekeken.

In de actief-slibtanks moet voldoende menging aanwezig zijn. Door de inbreng van PO wordt het slib minder in beweging gebracht. De weerstand neemt tegelijk ook af, waardoor de voortstuwing makkelijker gaat. Het hangt af van het soort systeem of daar nog aparte voorzieningen voor nodig zijn. Het is van belang om te controleren of deze menging in de praktijk echt voldoende is.

Uit de verkennende kostenramingen is gebleken dat de schaalgrootte veel invloed heeft. Stel dat de electrolyser buiten de kostenstroom van het waterschap valt en zuurstof kosteloos wordt geleverd, dan verdienen de "PO maatregelen" zich bij een rwzi van de grootte van 25.000 i.e. terug bij een stroomprijs groter dan 24 cent/kWh. Bij een rwzi van 100.000 i.e. is dat al het geval bij 10 cent/kWh. Op grote rwzi's waar de warmte voor de sliblijn met de productie van groen gas (met bijbehorende inkomsten) effectief kan worden benut, is er sowieso een positief saldo en is er zelfs een zeer korte terugverdientijd van enkele jaren in beeld.

Indien de totale kosten van PO maatregelen op de rwzi én de electrolyser worden beschouwd, kan het bij de gekozen tarief van H₂ alleen uit bij zeer lage stroomprijzen (3 tot 5 cent/kWh). Hoe groter de schaal hoe kansrijker. De aanwezigheid en benutting van restwarmte om meer groen gas te maken, heeft ook een positief effect op de stroomprijs. In tegenstelling tot de break-even stroomprijs in de alinea hierboven, moet voor de haalbaarheid van de elektrolyse de stroomprijs voor een business case juist onder deze waarde liggen. Het maken van H₂ kan dus alleen uit als óf de prijs van H₂ sterk stijgt (dan neemt ook de haalbare stroomprijs toe) óf de stroom tegen (zeer) lage prijs wordt ingekocht.

Dat betekent dat de synergie van een electrolyser op de rwzi alleen werkt als het waterschap een besparing op dure inkoop kan vermijden om de beluchtingsinstallatie te bekostigen en de H₂ ondernemer gelijktijdig goedkope stroom weet te benutten voor H₂-productie. Bij de financiële afwegingen moet worden meegewogen dat de kansrijkheid van waterstof vaak gekoppeld wordt aan overschotten aan duurzame stroom door de toegenomen beschikbaarheid en schommelingen in vraag en aanbod én daarbij de op veel plaatsen in Nederland aanwezige netcongestie, waardoor de duurzame stroom sowieso niet aan het net geleverd kan worden. In dat geval zijn de momentane stroomprijzen laag of zelfs negatief. Dan wordt voorkomen dat duurzame stroom verloren gaat en kan de waarde worden vastgelegd in waterstof.

Qua reductie van de CO₂ voetafdruk heeft de synergie van de electrolyser op de rwzi diverse voordelen en kansen. Het energieverbruik van de rwzi neemt fors af en er is een potentie tot het leveren van meer groen gas, wat benut kan worden voor transport of voor de bebouwde omgeving. Daarnaast lijkt er een relatie te zijn tussen de N₂O emissie en de gasdoorzet. Doordat de gasdoorzet een factor 5,4 lager is, is potentieel de N₂O emissie door minder strippen een factor 5,4 keer lager, met een groot effect op de CO₂ voetafdruk. Bovendien gaan de electrolyzers als onderdeel van de Smart Energy Hub een waardevolle energiedrager maken uit (overschotten van) duurzame stroom die onder andere door netcongestie anders niet benut kunnen worden.

10.2 CONCLUSIES

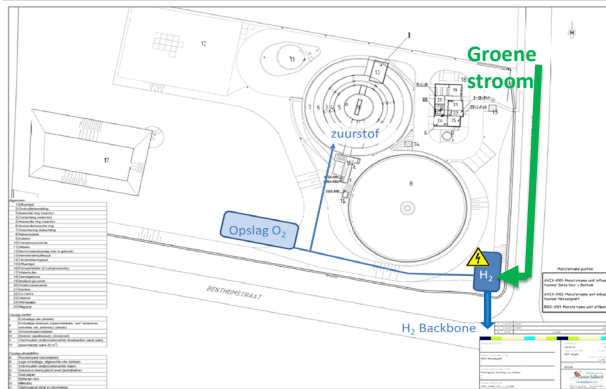
- Lucht vervangen door PO in bestaande beluchtingselementen is prima mogelijk.
- Qua gasdebiet is aan PO 4,8 maal minder nodig dan buitenlucht voor dezelfde O₂-inbreng. Door de kleinere invloed van het O₂-deficiet is uiteindelijk 5,4 maal minder PO gasvolume nodig dan luchtvolume.
- Bij ombouw van de bellenbeluchting met buitenlucht naar PO beluchting hoeft maar 18 % (= 1/5,4) te worden gebruikt. Het O₂-inbrengrendement blijft dan gelijk ten opzichte van de buitenlucht.
- Het inbrengrendement van PO is ook vergelijkbaar met buitenlucht: 28-35 % van de PO of de zuurstof in de buitenlucht lost op in het water, de rest van de zuurstof ontwijkt aan het wateroppervlak.
- Via drukreducerkleppen is het prima mogelijk de zuurstof direct uit de electrolyser of via een strategische buffer naar de beluchtingspakketten te voeren. Via één of meer (druk) regelafsluiters kan via de bestaande O₂ regeling de benodigde hoeveelheid PO worden geleverd.
- Toepassen van een strategische buffer voor PO is pas bij hogere stroomprijzen financieel rendabel.
- De O₂ setpoints moeten worden ingesteld afhankelijk van de grootte van de beluchte tank(s) en het aantal elementenpakketten dat wordt gebruikt. Naar verwachting moeten hogere setpoints worden ingesteld in verband met langere afstanden en kortere beluchtingszones.
- De menging moet worden gecontroleerd. Aandachtspunten zijn minder menging door minder beluchting, maar gemakkelijker voorstuwing door lagere weerstand.
- Er lijken geen knelpunten te zijn ten aanzien van pH en N₂O emissies. De maximale testduur was echter maar een ½ dag, dat is aan de korte kant. Een duurttest van enkele maanden zal hier meer zekerheid over geven.
- Hoe snel de aanpassingen aan de rwzi zich terugverdienen, hangt af van de grootte van de rwzi, de stroomprijzen en de mogelijkheid de warmte van de electrolyser te benutten. Door de hogere stroomprijzen van dit moment (en naar verwachting de toekomst), kan dit voor een waterschap al snel uit, zeker als bij een grotere rwzi de warmte kan worden benut voor de sliblijn en meer groen gas kan worden uitgeleverd (met bijbehorende opbrengsten).
- Als gekeken wordt naar het totale financiële plaatje, wordt het plaatje gunstiger bij een grotere schaal. Bij een gangbaar tarief voor H₂ moet bij een 100.000 i.e. rwzi met centrale slibverwerking de stroomprijs lager zijn dan 5 cent per kWh om een positieve business case te hebben. Bij hogere H₂ tarieven, neemt de acceptabele stroomprijs evenredig toe. In het geval van overmaat duurzame stroom en netcongestie spelen andere afwegingen en is de opslag van duurzame energie in waterstof sowieso kansrijk.
- Qua reductie van de CO₂ voetafdruk zijn de kansen: afname energieverbruik rwzi, potentie tot leveren meer groen gas, een verwachte reductie van de N₂O emissie en het verwaarden van duurzame stroom bij in een waardevolle energiedrager uit (overschotten van) duurzame stroom die onder andere door netcongestie anders niet benut kunnen worden.

10.3 AANBEVELINGEN

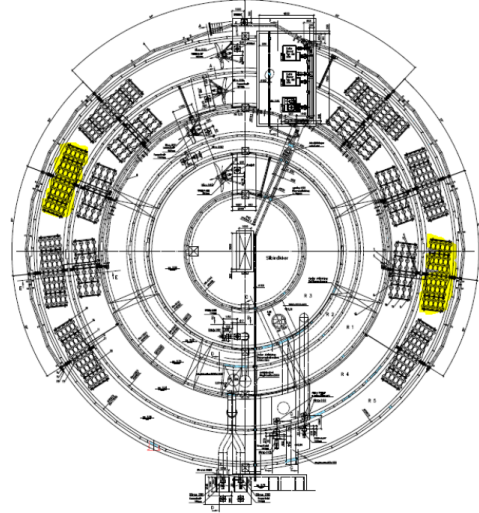
- Er zijn aanvullende duurproeven nodig om een duidelijker beeld te krijgen van de effecten van PO beluchting op de pH en op de lachgasemissies. Beide moeten gedurende langere tijd bij stabiele PO inbreng gemonitord worden om te kunnen concluderen dat er daadwerkelijk geen negatieve effecten optreden.
- Specifiek voor de RWZI Hessenpoort is de menging een aandachtspunt. Dat is in de huidige situatie ook al het geval. De omloopsnelheid wordt verhoogd door de ombouw naar PO, maar de menging neemt af omdat er minder “begassing” is.
- Om de synergie tussen waterstofproductie en rwzi nog verder te vergroten, verdient het aanbeveling om de mogelijkheden te onderzoeken om in plaats van drinkwater gezuiverd effluent als bron voor waterstofproductie te benutten.

BIJLAGE 1

TECHNOLOGISCHE BEREKENINGEN



Mogelijke lay-out O₂ hybride RWZI Hessenpoort



Mogelijke lay-out O₂ hybride RWZI Hessenpoort

OVERZICHT BEREKENINGEN

Rwzi Hessenpoort	Eenheid	Lucht DWA	PO DWA	laag	Opmerkingen
O ₂ gehalte lucht/PO	%	20,75	100		
Diepte AT	m	4,75	4,75	4,75	
Inhoud buitenring	m ³	1.350	1.350	1.350	
OC buitenring	kg O ₂ /h	163	163		
Alfa factor ontwerp lucht	-	0,7	0,7		Ontwerp aanname
Piekfactor	-	1,2	1,2		Aanname
Temperatuur	C	20	20		* ontwerp, niet gecorrigeerd voor extra druk op de 1/2e diepte
Verzadigingswaarde bij T	mg/l	9,2	53	53	** wel gecorrigeerd voor de extra druk op de 1/2e diepte
Gewenst O ₂ gehalte	mg/l	2,0	4,5		op de plek van inbreng
O ₂ deficiet luchtinbreng	-	1,28	1,09		
Zuurstofvraag biologie	kg O ₂ /h	74	74		Ervan uitgaande dat de biologie hetzelfde nodig heeft/zelfde gedrag
O ₂ deficiet luchtinbreng	-	1,28	1,09		
Alfa factor ontwerp lucht	-	0,7	0,7		
OC buitenring DWA (ex piekfactor)	kg O ₂ /h	136	116	45	
			test 1	test 2	
Inbrengrendement (incl alfa factor)	%	32%	25%	45%	aanname
O ₂ gehalte lucht/ PO	kg O ₂ /m ³	0,30	1,40	1,40	
Lucht/gasdebiet	Nm ³ /h	1.417	331	71	
Factor minder gasdebiet tov ontwerp			4,3		
Aantal schotels	-	400	100	100	2 pakketten
Belasting per schotel	Nm ³ /h	3,5	3,3	0,7	
Inbrengefficiëntie berekend	g O ₂ /Nm ³ .m	20,1	74	133	
Opp 9 inch schotel			0,041		
Belasting per m2			81		
alfa-kLa	per h	10,9	1,60	0,62	
	per s	0,0030	0,0004		
	mm	0,1824	0,0267		$OC = k_{La} \times V \times C^* \times \frac{f_{T1}}{\alpha} \text{ (kg O}_2\text{/h)}$
Oppervlak buitenring	m ²	284	284	284	
Superfiele gassnelheid	m/h	5,0	1,2	0,2	
Factor alfaKLa/Gvs	per m	2,2	1,4	2,5	
Berekende inbreng coëff (vd Lans)		20,1	74	133	

Zuurstofverbruik slib lucht		0,100	kg O2/m3.h
Zuurstofverbruik slib PO		0,086	kg O2/m3.h
Volume AT	4.500	m3	
Diepte	5	m	
Oppervlak	900	m2	
Diameter	33,9	m	
Omtrek buitenring	106,3	m	
Zuurstofverbruik slib PO	0,086	kg O2/m3.h	
inhoud buitenring	1.350	m3	
oppervlak buitenring	270	m2	
diameter tot buitenring	28	m	
breedte buitenring	2,8	m	
doorsnede	13,8	m2	
snelheid omloop	0,5	m/s	
waterverplaatsing	6,9	m3/s	
Van x naar 2 mg/l	3,5	4,5	7
gradient O2 bij mg/l	1,5	2,5	5
tijd	h	0,0175	0,0292
	min	1,0496	1,7493
afstand	m	31,5	52,5
pakketten		4	2
			1

BIJLAGE 2

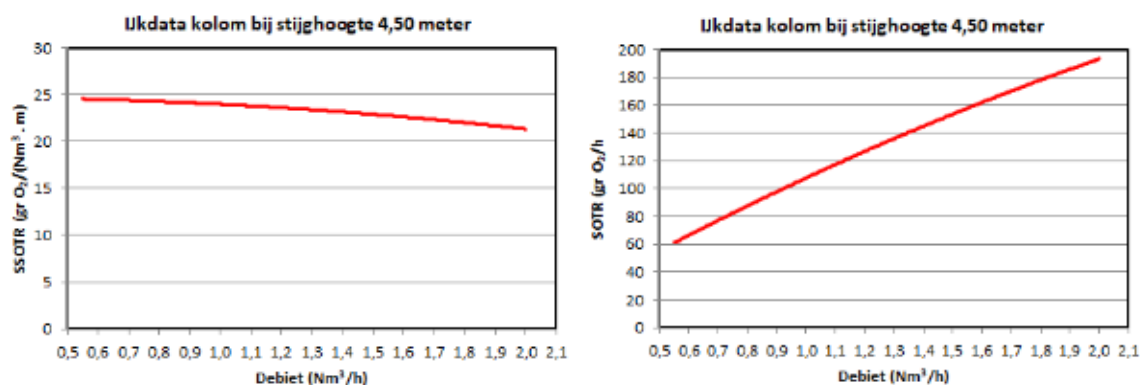
RESULTATEN KOLOMPROEVEN

DRINKWATERTESTEN MET LUCHT

De kolom is geijkt met drinkwater op verschillende debieten en waterhoogtes, voorts zijn er aanvullende testen uitgevoerd om een breed beeld te verkrijgen.

In Figuur B2.1 zijn de resultaten weergegeven met het 7" element voor de situatie met een stijghoogte (h_E) van 4,5 meter (identiek aan Hessenpoort).

FIGUUR B2.1 RESULTATEN IJKING KOLOM MET DRINKWATER



Voorts zijn aanvullende metingen uitgevoerd met zowel de 7" element en het verkleinde beluchtings-element. De gedetailleerde resultaten zijn weergegeven in Tabel B2.1.

TABEL B2.1 RESULTATEN AANVULLENDE METINGEN MET LUCHT

Element diameter	D_E	mm	lucht				
			68		175		
Volumestroom bij 0 °C en 1013 hPa	Q_{Lst}	Nm^3/h	0.21	0.26	0.90	1.21	1.50
Beluchtigheidsconstante bij 20 °C	$k_{La20,1000}$	min^{-1}	0.050	0.069	0.175	0.347	0.397
Verzadigingswaarde bij 20 gr. C	$C_{s,md,20}$	mg/l	11.11	11.11	11.01	11.01	11.01
Zuurstof inbreng onder standaard condities	$SOTR_{20,1000}$	$g O_2/h$	19.1	26.6	101.2	126.0	144.8
Specifieke zuurstofinbreng	SSOTR	$g O_2/(Nm^3.m)$	20.1	22.6	25.0	23.9	22.0
		%/m	6.7	7.6	8.4	7.7	7.2
Specifiek zuurstofinbreng rendement	SSOTE	%	30.9	34.8	37.6	34.7	32.2
Elementbelasting		$m^3_N/h / m^2$	56.9	70.5	37.4	50.1	62.5

DRINKWATERTESTEN MET PO

De testen zijn uitgevoerd met zowel het 7", alsmede het verkleinde element van 68 mm. In Tabel B2.2 de gedetailleerde resultaten van de uitgevoerde metingen bij gelijke stijghoogte (H_E).

TABEL B2.2 RESULTATEN METINGEN MET PO

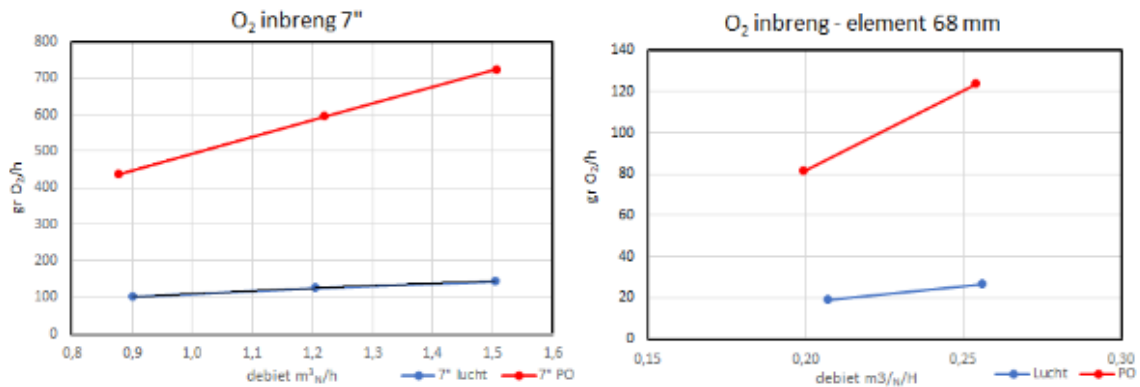
Element diameter	D_E	mm	PO				
			68		175		
Volumestroom bij 0 °C en 1013 hPa	Q_{Lst}	Nm^3/h	0.20	0.25	0.88	1.22	1.51
Beluchttingsconstante bij 20 °C	$k_L a_{20,1000}$	min^{-1}	0.047	0.071	0.253	0.344	0.330
Verzadigingswaarde bij 20 gr. C	$C_{s,md,20}$	mg/l	52.82	52.82	52.55	52.55	52.55
Zuurstof inbreng onder standaard condities	$SOTR_{20,1000}$	$g O_2/h$	81.5	123.9	437.9	595.4	724.7
Specifieke zuurstofinbreng	SSOTR	$g O_2/(Nm^3 \cdot m)$	93.4	111.4	114.3	111.7	110.0
Specifiek zuurstofinbreng rendement	SSOTE	%/m	6.5	7.8	8.0	7.8	7.7
		%	29.4	35.1	36.0	35.2	34.7
Elementbelasting		$m^3_{N/h} / m^2$	54.9	69.9	36.5	50.7	62.7

In Figuur B2.4 is een voorbeeld van de berekeningen met (grafisch) opgenomen data van de drinkwatertest met PO weergegeven.

VERSCHILLEN LUCHT – PO

In Figuur B2.2 de grafische weergave van de verschillen met beluchten met lucht en PO testen.

FIGUUR B2.2 GRAFISCH VERSCHIL LUCHT EN PO BELUCHTING



SLIBWATERTESTEN OP LOCATIE

Hierbij is de kolom gevuld met slibwater uit de beluchttingscircuit en is bemeten volgens de absorptie methode, Voor elke meting is er een nieuwe batch water genomen om de invloed van langere tijd beluchten (en dus vermindering oxideerbare stoffen wat resulteert in een hogere alpha-factor) te vermijden.

Op de tweede dag is er water uit de anaerobe ring genomen, waarbij eerste getracht is een aanvullende absorptietest uit te voeren, echter door de hoge respiratiesnelheid van het slib bleek dit niet mogelijk binnen de verwachte tijd, en na ca. 40 minuten is besloten om deze test verder uit te voeren als duurtest.

De kolom is uitgevoerd met een recirculatiepomp om mogelijk uitgezakt slib in suspensie te houden.

De testen zijn uitgevoerd met alleen het 7" element. In Tabel B2.3 zijn de gedetailleerde resultaten weergegeven van de uitgevoerde metingen voor zowel lucht als PO, bij gelijke stijghoogte (H_E). De in de tabel genoemde alfa-factor is berekend aan de hand van de specifieke zuurstofinbreng SSOTR slibwater / SSOTR drinkwater = alfa-factor.

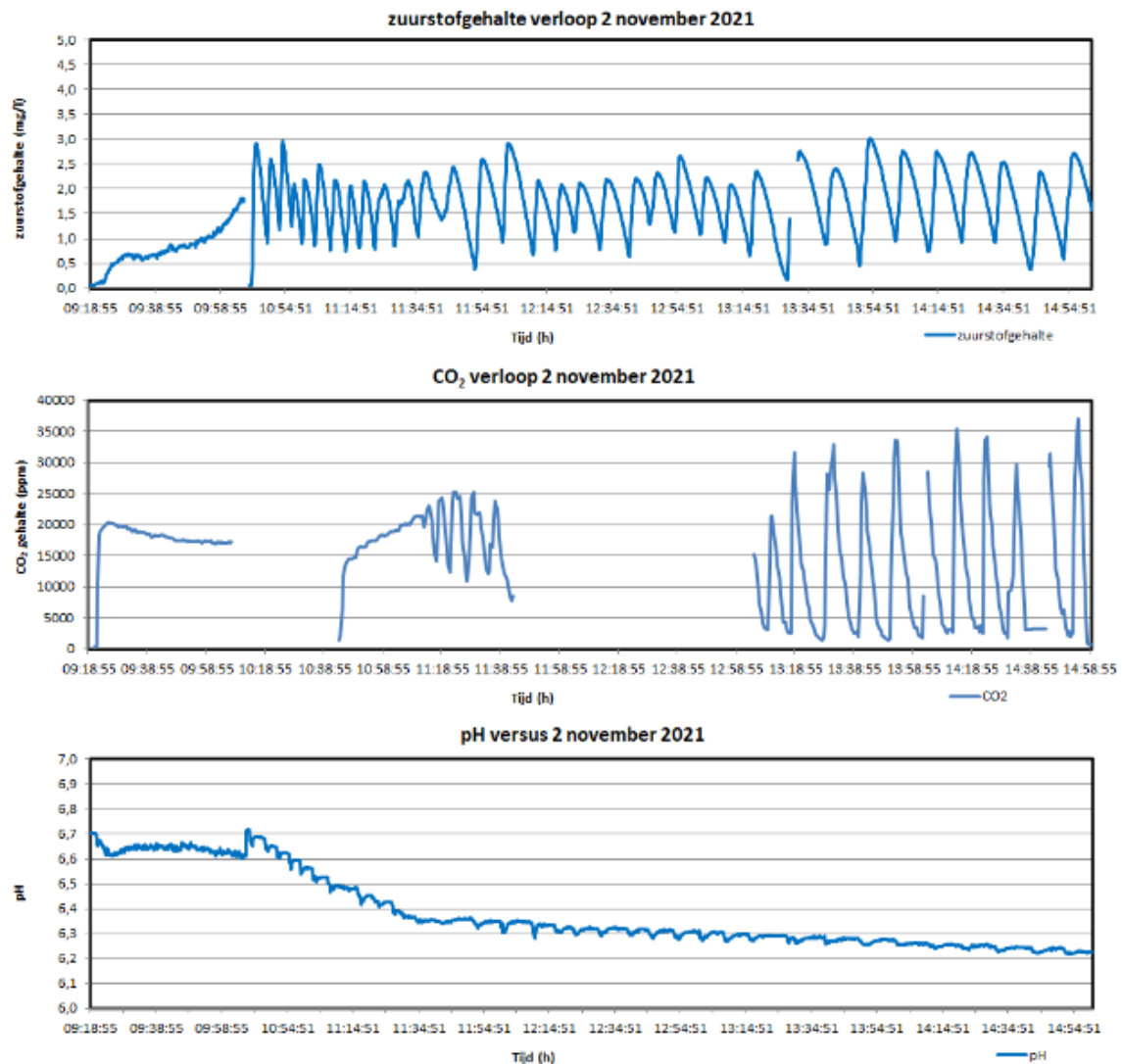
TABEL B2.3 RESULTATEN SILBWATERTESTEN OP LOCATIE

Element diameter	D _E	mm	lucht		PO	
			175	175	175	175
Volumestroom bij 0 °C en 1013 hPa	Q _{L,st}	Nm ³ /h	1.00	1.29	1.00	1.31
Beluchttingsconstante bij 20 °C	k _{L@20,1000}	min ⁻¹	0.131	0.165	0.198	0.181
Verzadigingswaarde bij 20 gr. C	C _{s,md,20}	mg/l	11.10	11.13	52.72	53.14
Zuurstof inbreng onder standaard condities	□ SOTR _{20,1000}	g O ₂ /h	47.9	64.5	343.9	317.6
Specifieke zuurstofinbreng	□ SSOTR	g O ₂ /(Nm ³ .m)	10.9	10.8	78.3	55.4
		%/m	3.6	3.6	5.5	3.9
Specifiek zuurstofinbreng rendement	□ SSOTE	%	16.4	16.2	24.7	17.4
		m ³ N/h / m ²	41.8	53.6	41.8	54.5
Specifieke zuurstofinbreng drinkwater op basis ijkinq	SSOTR	g O ₂ /(Nm ³ .m)	24.7	23.5	113.2	111.1
Alfa-factor	□	-	0.44	0.46	0.69	0.50

CONTINUTEST OP LOCATIE

Het eerste gedeelte, ca. 40 minuut, is belucht met lucht ten behoeve van de voorgenomen OC meting die is afgebroken. Daarna is er belucht met PO waarbij handmatig het zuurstofgehalte in de kolom tussen de ca. 1 en 2,5 mg/l is geregeld. In figuur B2.3 zijn de opgenomen data grafisch over de meetdag weergegeven.

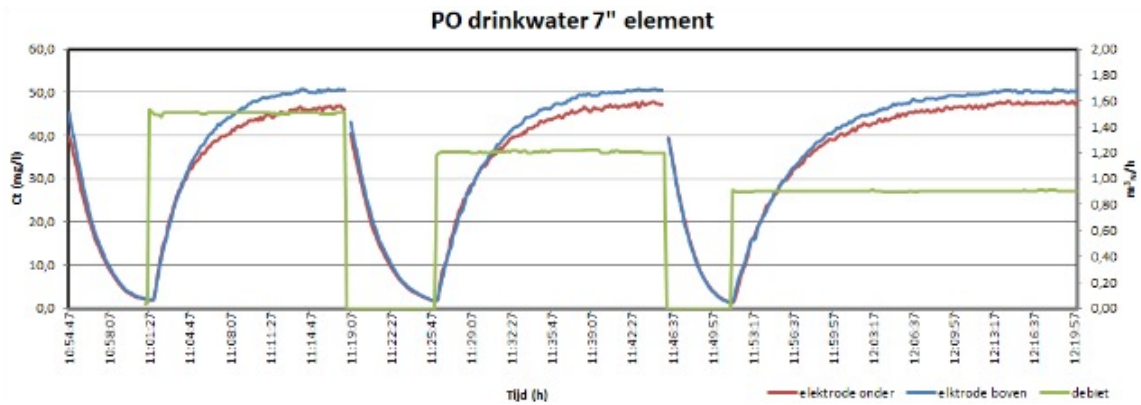
FIGUUR B2.3 OPGENOMEN DATA TIJDENS DE CONTINUTESTEN OP LOCATIE



FIGUUR B2.4 VOORBEELD ZUURSTOFINBRENG-BEREKENING DRINKWATER

PO metingen element 7" uitwerking

		Drinkwater			
		1	2	3	
Test nummer	:	1	2	3	
Datum	:	6 november 2021			
Aanvangstijd	:	11:01	11:26	11:51	
Gemeten waarden					
Waterhoogte boven het element	h_E	4,37	4,37	4,37	m
Volume kolom	V	0,549	0,549	0,549	m ³
Watertemperatuur	T	12,5	12,5	12,4	°C
Geleidbaarheid	G	527	527	527	µS/cm
Volumestroom bij 0 gr. C en 1013 hPa PO	Q_{Lst}	1,51	1,22	0,88	m ³ _N /h
Berekende waarden					
Beluchttingsconstante elektrode 1	$k_{l,aT}$	0,334	0,281	0,203	min ⁻¹
Beluchttingsconstante elektrode 2	$k_{l,aT}$	0,325	0,261	0,194	min ⁻¹
	Gemiddelde $k_{l,aT}$	0,330	0,271	0,199	min ⁻¹
Beluchttingsconstante bij 20° C	$k_{l,a20,1000}$	0,419	0,344	0,253	min ⁻¹
Verzadigingswaarde bij 20 gr. C	$C_{s,ml,20}$	52,55	52,55	52,55	mg/l
Zuurstof inbreng onder standaard condities					
	$SOTR_{20,1000}$	724,7	595,4	437,9	g O ₂ /h
$SOTR_{20}$ gecorrigeerd naar waterhoogte 4,50 m	$SOTR_{20,1000}$	724,7	595,4	437,9	g O ₂ /h
Specifieke zuurstofoverdracht per meter					
	SSOTR	110,0	111,7	114,3	g O ₂ /(m ³ _N · m)
Specifieke zuurstofbenutting					
	SSOTE	7,7	7,8	8,0	%/m
		33,6	34,1	34,9	%



BIJLAGE 3

LOGBOEK EN RESULTATEN RINGPROEVEN

LOGBOEK RINGPROEVEN

datum	tijd	actie
woensdag 26 januari 2022	10:00	Voorbereiden opbouw PO doseerinstallatie
woensdag 26 januari 2022	18:00	Afronden opbouwen en plaatsen panelen
donderdag 27 januari 2022	07:00	start voorbereiding ophalen, reinigen van leidingen en beluchtingsrekken 3 en 7 en aansluiten op PO
donderdag 27 januari 2022	12:00	plaatsen kapsteunen voor ontkoppeling luchtleidingen
donderdag 27 januari 2022	15:00	beluchtingsrekken en leidingen schoon en aangesloten, geen gebreken aan de schotels gezien
donderdag 27 januari 2022	18:00	Afronden lasgedeelte tm 1e paneel
vrijdag 28 januari 2022	hele dag	Lasgedeelte tm 2e paneel afronden en stikstof (N2) aansluiten
maandag 31 januari 2022	07:00	start voorbereiding N2 druktest
maandag 31 januari 2022	09:30	Levering PO racks en logistieke handeling. Issue met 14 van 24 verkeerde koppelingen op O2 racks
maandag 31 januari 2022	13:00	N2 druktest
maandag 31 januari 2022	18:00	Afronden voorbereidingen voor SAT met O2
dinsdag 1 februari 2022	07:00	Voorbereiden SAT
dinsdag 1 februari 2022	08:00	Opbouwen metingen tbv OC testen en plaatsen gaskamp
dinsdag 1 februari 2022	10:00	Losgeschoten 30 bar koppeling vanaf PO rack
dinsdag 1 februari 2022	12:06	Lachgas gasfase en logging aan, data vanaf 14:10 bruikbaar
dinsdag 1 februari 2022	13:00	SAT afgerond met Atex team
dinsdag 1 februari 2022	14:00	Start RWA duurttest
dinsdag 1 februari 2022	14:00	PO flow P1 aan (P1 = paneel 1 = op 1 na laatste beluchtingsrek voor de overstort)
dinsdag 1 februari 2022	15:00	N2O waterfase sensor (DM-1) in aerietank gecheckt en defect verklaard sinds 21-1
dinsdag 1 februari 2022	15:30	N2O waterfase sensor (DM-2) in wisseltank verplaatst naar aerietank
dinsdag 1 februari 2022	15:30	PO flow P1 afgeregeld voor PO max test en uit
dinsdag 1 februari 2022	15:31	PO flow P2 aan (P2 = paneel 2 = 3e beluchtingsrek na de overstort)
dinsdag 1 februari 2022	15:40	Kapafzuiging gestopt, calibratie buitenlucht tot 15:50
dinsdag 1 februari 2022	16:29	PO flow P2 afgeregeld voor PO max test en uit
dinsdag 1 februari 2022	16:30	PO flow P2 uit, einde RWA duurttest
dinsdag 1 februari 2022	18:11	Lachgas gasfase uit, gaskamp luchtafzuiging uit om?

datum	tijd	actie
woensdag 2 februari 2022	06:00	Voorbereiden PO max (OC test 1) en buitenlucht min test (OC test 2)
woensdag 2 februari 2022	06:00	Beluchting aeratie- en wisseltank max aan
woensdag 2 februari 2022	08:00	Aanvoer stop en alle interne recirculaties uit
woensdag 2 februari 2022	09:00	Losmaken, controloren en terugplaatsen 31 bar overdrukventiel
woensdag 2 februari 2022	09:45	Systeemcontrole met WDOdelta Atex team
woensdag 2 februari 2022	09:45	Kapafzuiging gelogd met buitenlucht
woensdag 2 februari 2022	09:52	Compressoren uit en PO aan op 3,0 bar (max flow)
woensdag 2 februari 2022	10:00	Gedurende de test snelheidsmetingen
woensdag 2 februari 2022	10:15	Gaskamp verlegt van buitenlucht sectie naar PO sectie paneel 1
woensdag 2 februari 2022	11:15	N2O waterfase sensor (DM-2) van aerietank terug gewisseld naar wisseltank
woensdag 2 februari 2022	11:15	N2O waterfase sensor (DM-1) in aerietank hersteld en weer operationeel
woensdag 2 februari 2022	12:00	rek gewisseld aan de PO batterij
woensdag 2 februari 2022	12:30	Beide N2O sensoren waterfase gekalibreerd
woensdag 2 februari 2022	13:00	PO uit en beluchting aan compressoren op 395 Nm ³ /uur (19,8 Hz) aan
woensdag 2 februari 2022	13:00	Gedurende de test snelheidsmetingen
woensdag 2 februari 2022	13:15	Gaskamp verplaatst van PO sectie paneel 1 naar buitenluchtsectie
woensdag 2 februari 2022	14:00	N2O sensoren beide gekalibreerd (alle data hiervoor niet betrouwbaar)
woensdag 2 februari 2022	15:00	Aanvoer weer aan, beluchttingsregeling weer normaal
woensdag 2 februari 2022	15:15	Gaskamp en logging luchtafzuiging uit
donderdag 3 februari 2022	06:00	Voorbereiden PO min (OC test 3) en buitenlucht max test (OC test 4)
donderdag 3 februari 2022	06:00	Beluchting aeratie- en wisseltank max aan
donderdag 3 februari 2022	07:45	Aanvoer stop en alle interne recirculaties uit
donderdag 3 februari 2022	10:00	Gaskamp verplaatsen van buitenluchtsectie naar PO sectie paneel 1
donderdag 3 februari 2022	10:00	Gedurende de test snelheidsmetingen
donderdag 3 februari 2022	10:09	Compressoren uit en PO aan op 1,0 bar (min flow)
donderdag 3 februari 2022	10:15	kapafzuiging aan en logging bij PO sectie aan
donderdag 3 februari 2022	15:00	PO uit en beluchting aan compressoren op 900 Nm ³ /uur (50 Hz) aan
donderdag 3 februari 2022	15:15	Gaskamp verplaatsen van PO naar buitenluchtsectie
donderdag 3 februari 2022	15:15	Gedurende de test snelheidsmetingen
donderdag 3 februari 2022	16:00	Aanvoer weer aan, beluchttingsregeling weer normaal

datum	tijd	actie
vrijdag 4 februari 2022	06:00	Voorbereiden DWA duurstest
vrijdag 4 februari 2022	07:00	Monstername kast voor influent aan op 20 ml/m3 en om 7:30 naar 40 ml/m3
vrijdag 4 februari 2022	07:15	Kalibratie on-line N-sensoren omdat NO3-N te hoog lijkt aan te geven; NH4-N geen afwijking; NO3-N circa 4 mg/l te hoog
vrijdag 4 februari 2022	07:15	N2O waterfase sensor (DM-2) van wisseltank naar kolom verplaatst; meetwaarden daarna onbetrouwbaar
vrijdag 4 februari 2022	07:15	Gaskap verplaatsen van buitenluchtsectie naar PO sectie paneel 1
vrijdag 4 februari 2022	07:15	Kolom doorstroomt met 1 l/sec vanuit aerobe ring; 3,6 m3/uur
vrijdag 4 februari 2022	07:20	Beluchting wisseltank uit, PO P1 aan op circa 50 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	07:25	Compressoren aeratietank uit
vrijdag 4 februari 2022	08:10	setpoint O2 regeling staat op 1,0 mgO2/l, O2 loopt terug naar 0,6 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	08:10	PO P2 aan op circa 50 Nm3/uur, totaal circa 100 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	08:15	DWA aanvoer piekt
vrijdag 4 februari 2022	08:45	Setpoint naar 1,6 mgO2/l, actueel 0,75 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	08:45	PO P1 aan op circa 100 Nm3/uur, totaal 150 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	09:00	Gaskap nog meer naar midden PO sectie paneel 1 getrokken
vrijdag 4 februari 2022	09:15	Droge stof gehalte sinds start (7:25) van 4,8 g ds/l naar 3,6 g ds/l
vrijdag 4 februari 2022	09:20	O2 actueel 1,3 mgO2/l, setpoint 1,6 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	09:30	O2 actueel 1,1 mgO2/l, setpoint 1,7 mgO2/l, PO flow circa 150 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	09:30	N2O waterfase sensor (DM-2) kolom 62,4% en DM-1 aeratietank 0%, O2 kolom 2-4 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	09:30	Droge stof gehalte 3,8 g ds/l, NH4-N 1,6 mg/l, NO3-N 1,6 mg/l
vrijdag 4 februari 2022	10:00	PO P2 naar circa 100 Nm3/uur; totaal 200 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	10:15	DWA aanvoer piekt, setpoint O2 1,7 mgO2/l, O2 actueel 1,0 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	10:20	pH is stabiel rond 6,7 in aeratietank en 6,6 in kolom
vrijdag 4 februari 2022	10:28	PO P1 naar circa 175 Nm3/uur; totaal 275 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	10:33	PO P1 naar circa 130 Nm3/uur; totaal 230 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	10:47	N2O waterfase sensor (DM-2) kolom 80,8% en DM-1 aeratietank 0%, O2 kolom 2-4 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	10:47	Droge stof gehalte 4,1 g ds/l, NH4-N 1,6 mg/l, NO3-N 1,5 mg/l
vrijdag 4 februari 2022	10:47	O2 actueel 1,6 mgO2/l, setpoint 1,7 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	11:00	PO1 en PO2 uit
vrijdag 4 februari 2022	11:00	Gaskap verplaatsen van PO naar buitenluchtsectie
vrijdag 4 februari 2022	11:05	Blowers weer aan
vrijdag 4 februari 2022	11:30	Monstername vpv influent
vrijdag 4 februari 2022	11:45	Blowers circa 500-700 Nm3/uur
vrijdag 4 februari 2022	11:45	Droge stof 4,7 g ds/l, NH4 1,3 mgN/l, NO3-N 1,7 mg/l,
vrijdag 4 februari 2022	11:45	O2 actueel 1,6 mg/l, setpoint 1,6 mgO2/l
vrijdag 4 februari 2022	12:15	Beluchting uit ivm demontage testopstelling
vrijdag 4 februari 2022	12:30	Gaskap uit het water
vrijdag 4 februari 2022	12:30	Lachgas meting uit, gaskap luchtafzuiging uit
vrijdag 4 februari 2022	13:00	Blowers weer aan
donderdag 10 februari 2022	08:00	Voorbereiden transport PO installatie naar Dalfsen
donderdag 10 februari 2022	12:00	PO installatie naar Dalfsen.
donderdag 10 februari 2022	12:00	In het magazijn op Hessenpoort liggen nog de beide kapsteunen met flens en ring

RESULTATEN RINGPROEVEN

Opstelling van de testinstallatie (zie ook Figuur 3.5 van het hoofdrapport)

De hoofdgegevens van het beluchtingscircuit (buitenring) van RWZI Hessenpoort zijn als volgt:

Beluchtingscircuit

Type	BCFS – ringenreactor	
Buitendiameter	33,6	m
Binnendiameter	28,0	m
Kanaalbreedte	2,80	m
Waterdiepte	4,70	m (tijdens de OC proeven)
Volume	1274	m ³
Omlooplengte	96,8	m

Beluchtingssysteem

Omschrijving	fijn belLENbeluchtingssysteem	
Leverancier	Wilo	
Type	GVA 12”	
Aantal elementen	400 (8 secties)	
Hoogte element – vloer	0,25	m

Beluchtingsblowers

Aantal	2	
Fabricaat	Aerzen	
Type	GM 25S	
Motorvermogen	30	kW

Voortstuwer

Aantal	1	
Fabricaat	GVA	
Type	Weedless-T	
Motorvermogen	3,3	kW
Propeller diameter	2,5	m
Toerental	37	r.p.m.

Instellingen tijdens de OC testen

1. PO max, 2 secties met in totaal 100 elementen, totaal debiet $333 \text{ Nm}^3/\text{h} = 3,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ per element.
2. Lucht min, 6 secties met in totaal 300 elementen, totaal debiet $308 \text{ Nm}^3/\text{h} = 1,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ per element.
3. PO min, 2 secties met in totaal 100 elementen, totaal debiet $99 \text{ Nm}^3/\text{h} = 1,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ per element.
4. Lucht max, 6 secties met in totaal 300 elementen, totaal debiet $987 \text{ Nm}^3/\text{h} = 3,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ per element.

Debietbepaling

Voor de PO instelling tijdens meting 1 en 3 is herhaaldelijk het debiet, druk en temperatuur afgelezen en genoteerd.

Voor het debiet van de blower is uitgegaan van het door leverancier Aerzen berekende debiet op basis van de actuele aanzuigcondities:

Dag 1, 2 februari 2022, meting 2

- Instelling 20 Hz; motortoerental 1180; Headerdruk 510 mBar
- Aanzuiglucht temperatuur $9,0 \text{ }^\circ\text{C}$; Atmosferische luchtdruk 1019 mBar; Rel. vochtigheid 76%

Berekend debiet van $308 \text{ Nm}^3/\text{h}$ volgens DIN 1343

Dag 2, 3 februari 2022, meting 4

- Instelling 50 Hz; Motortoerental 2950; Headerdruk 520 mBar
- Aanzuiglucht temperatuur $7,0 \text{ }^\circ\text{C}$; Atmosferische luchtdruk 1011 mBar; Rel. vochtigheid 97%

Berekend debiet van $987 \text{ Nm}^3/\text{h}$ volgens DIN 1343

Vermogensmetingen

Het opgenomen vermogen is afgelezen op het display van de aanwezige frequentieomvormer.

Opmerking

Door de beperking dat de zuivering hydraulisch uit bedrijf kon, de aanvoer kon maximaal ca. 8 uur gestopt worden, zijn de OC metingen korter uitgevoerd dan te doen gebruikelijk. Er is echter voldoende data om een betrouwbare meting te kunnen overleggen.

OC METINGEN

De metingen zijn voor PO beluchting uitgevoerd als absorptie- en voor lucht als desorptiemetingen (zie Figuur 3.6 in het hoofdrapport).

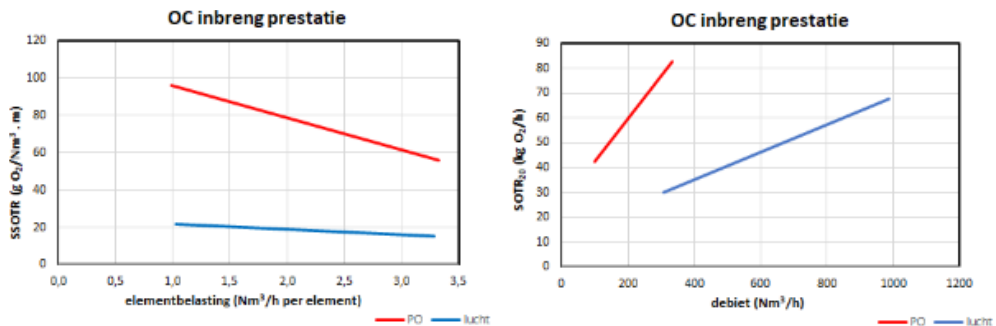
In Tabel B3.1 zijn de gedetailleerde resultaten van de uitgevoerde metingen weergegeven.

FIGUUR B3.1 RESULTATEN OC METING

meting	medium	debiet QL Nm ³ /h	element belasting Nm ³ /h/elem.	vermogen P kWh	SOTR ₂₀ kg O ₂ /h	SSOTR g O ₂ /(Nm ³ .m)	SSOTE		SAE kg O ₂ /kW
							%/m	%	
1	PO	333	3.3	--	82.7	55.8	3.9	17.4	--
2	lucht	308	1.0	7.5	29.8	21.8	7.3	32.4	3.98
3	PO	99	1.0	--	42.3	96.4	6.7	29.8	--
4	lucht	987	3.3	22.4	67.6	15.4	5.2	22.9	3.02

In Figuur B3.1 is in grafiekvorm het resultaat van de 4 metingen weergegeven.

FIGUUR B3.2 METING 1 - PO DEBIET 333 NM³/H



In Figuren B3.2, B3.3, B3.4 en B3.5 is grafisch de opgenomen data van het verloop van het zuurstofgehalte tijdens de metingen weergegeven.

In Figuur B3.6 is een voorbeeld van de berekeningen weergegeven van meting 4 en in Figuur B3.7 de grafieken van meting 4 van de ringproef weergegeven.

ALFA-FACTOR METINGEN

Er is in slibwater getest, teneinde de resultaten naar rein water of "standaard condities" te vertalen zijn aanvullende alpha-factor metingen uitgevoerd. De alpha-factor metingen zijn uitgevoerd in de kunststof kolom zoals verder omschreven in paragraaf 3.3.

Per OC meting is de kolom met 2 batches water gevuld uit de buitenring. In de eerste batch water zijn twee absorptie metingen en in de tweede batch water één absorptie meting en één desorptie meting uitgevoerd.

De ijkdata met drinkwater is in een eerdere fase gemeten en vastgesteld (zie Figuur B1.1).

Het gemiddelde van de testen is gebruikt bij de berekening van de alpha-factor.

De alfa-factor bedraagt:

OC meting 1 – alfa meting 1: 0,733

OC meting 1 – alfa meting 2: 0,740

OC meting 1 – gemiddeld: 0.736

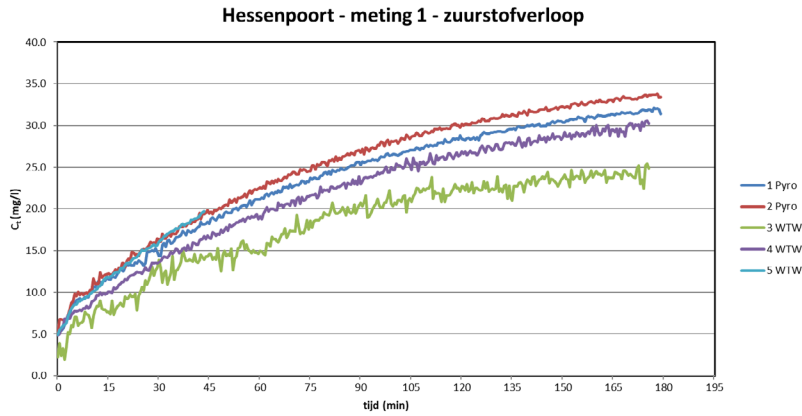
OC meting 2 – alfa meting 3: 0,670

OC meting 2 – alfa meting 4: 0,708

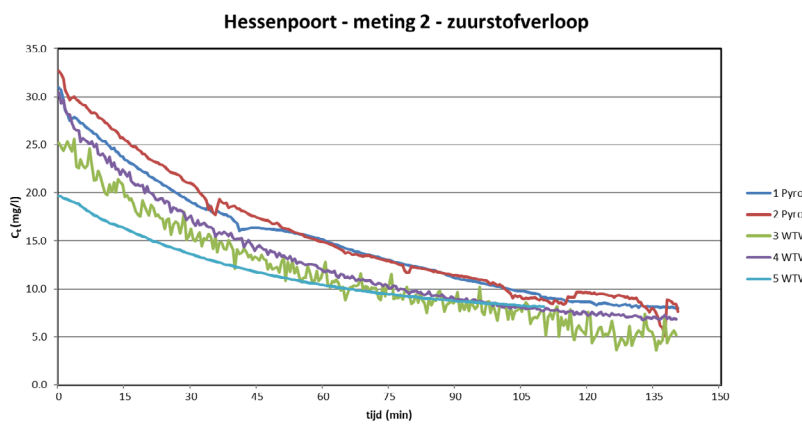
OC meting 2 – gemiddeld: 0.689

In Figuur B3.8 is een voorbeeld van de berekeningen met (grafisch) opgenomen data van de alfactor meting weergegeven.

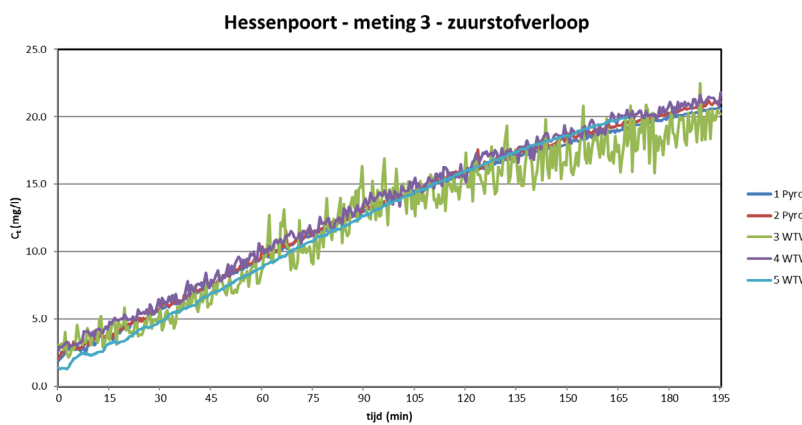
FIGUUR B3.3 METING 2 - LUCHTDEBIET 308 NM³/H

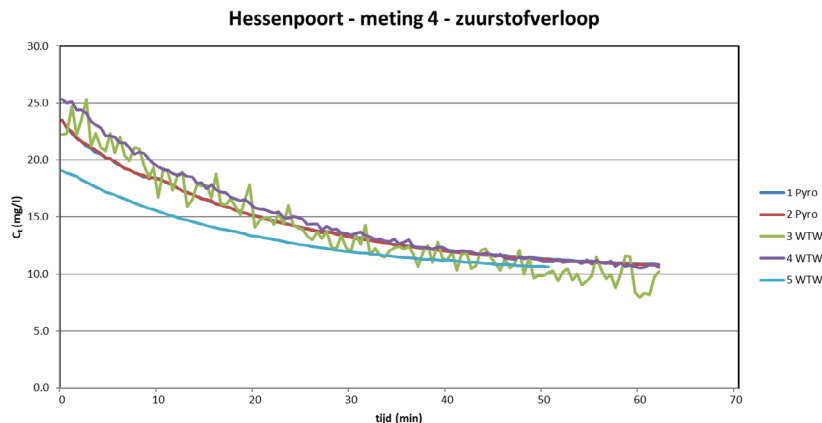


FIGUUR B3.3 METING 2 - LUCHTDEBIET 308 NM³/H



FIGUUR B3.4 METING 3- PO DEBIET 99 NM³/H



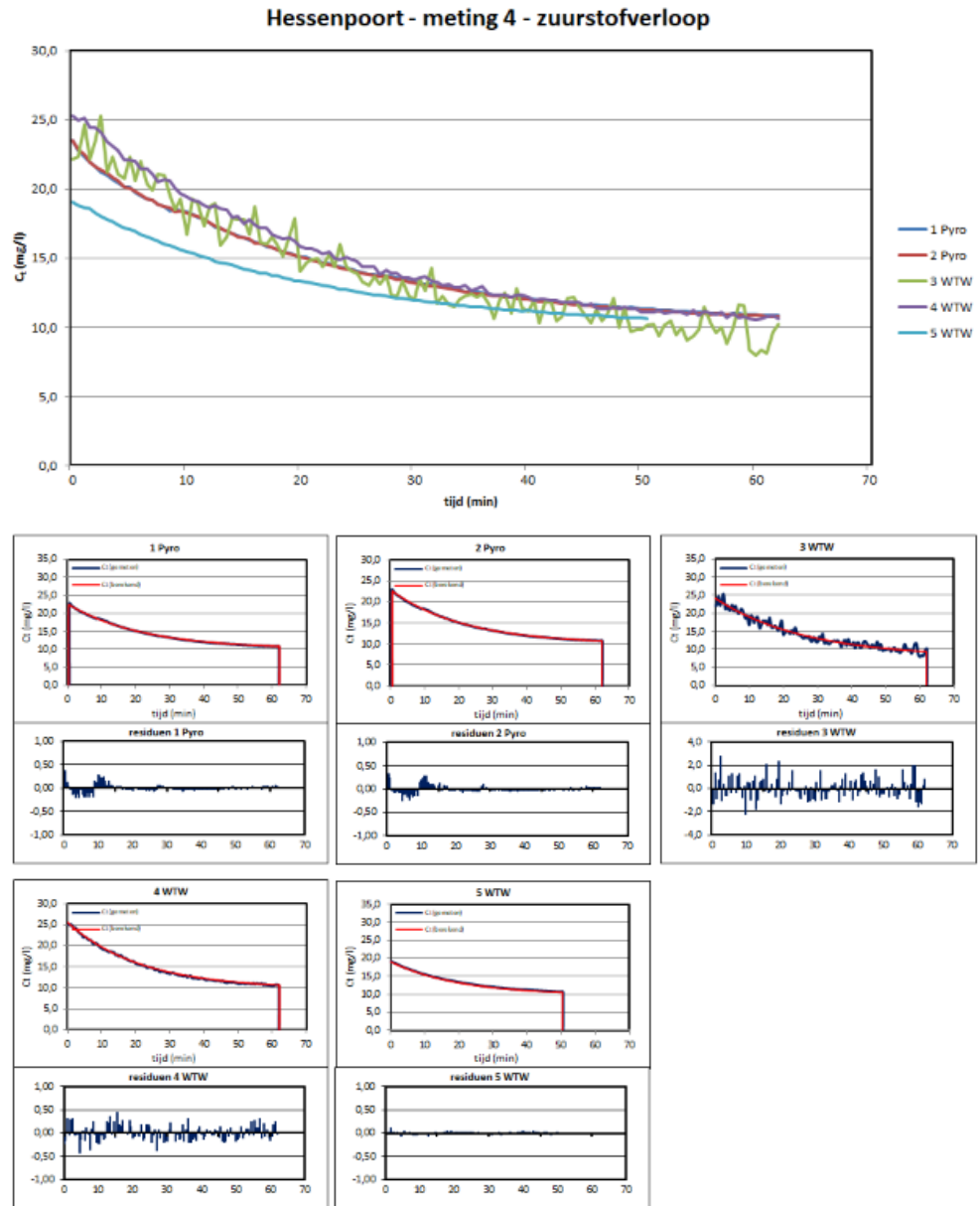
FIGUUR B3.5 METING 4 - LUCHTDEBIET 987 NM³/H

FIGUUR B3.6 VOORBEELD BEREKENING (METING 4) ZUURSTOFINBRENG OC METING

Uitwerking zuurstofinbreng

Project	:	Hessenpoort					
Meting nr.	:	4					
Datum	:	3 februari 2022					
Tijd	:	14:17					
Beluchertype	:	Wilco - GVA 12"					
Beluchingsbassin	:	Ringenreactor					
Buitendiameter	:	33,6					
Binnendiameter	:	28,0 m					
Kanaalbreedte	:	2,80 m					
Waterdiepte	:	4,70 m tijdens de testen					
Bassinvolume	V	:	1274 m ³				
Waterhoogte boven de beluchtingselementen	h_E	:	4,45 m				
Bepaling zuurstofinbreng							
Geleidbaarheid	l_f	:	694 $\mu S/cm$				
Berekende verzadigingswaarde bij 20 gr. C voor lucht	$C_{s,mf,20}$:	11,04 mg/l				
Resultaten per elektrode			1 Pyro	2 Pyro	3 WTW	4 WTW	5 WTW
Watertemperatuur	T	:	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4 °C
Zuurstofconcentratie op tijdstip 0	C_0	:	22,72	22,84	23,99	25,52	19,11 mg/l
Schijnbare zuurstofverzadigingswaarde	C^*	:	10,04	9,97	7,86	9,70	9,88 mg/l
Beluchingsconstante	α_{k,a_T}	:	0,0455	0,0460	0,0379	0,0465	0,0496 min ⁻¹
Beluchingsconstante bij 20 °C	$\alpha_{k,a_{20}}$:	0,0572	0,0578	0,0476	0,0583	0,0623 min ⁻¹
Zuurstofinbreng onder proces condities	$\alpha SOTR_{20}$:	48,2	48,8	40,2	49,2	52,6 kg O ₂ /h
Zuurstofinbreng onder proces condities gemiddeld	$\alpha SOTR_{20}$:	46,6 kg O ₂ /h				
alpha-factor	α	:	0,69				
Zuurstofinbreng onder standaard condities gemiddeld	SOTR₂₀	:	67,6 kg O₂/h			bij waterhoogte 4,7 m	
Bepaling specifieke zuurstofinbreng							
blower	:	1 2					
Volumestroom bij 0 gr. C en 1013 hPa totaal	$Q_{L,m}$:	987 uit m ³ _N /h				
Totaal volumestroom	$Q_{L,st}$:	987 m³_N/h				
Specifieke zuurstofoverdracht per meter stijghoogte	SSOTR	:	15,4 g O₂/m³_N/m				
Specifieke zuurstofbenutting	SSOTE	:	5,2 %/m		bij s.g. 0,299 kg O ₂ /m ³		
Bepaling rendement							
blower	:	1 2					
Totaal opgenomen per blower	P_{opgen}	:	22,4 uit kWh				
Totaal opgenomen vermogen	P_{totaal}	:	22,4 kWh				
Rendement	SAE	:	3,02 kg O₂/kW				

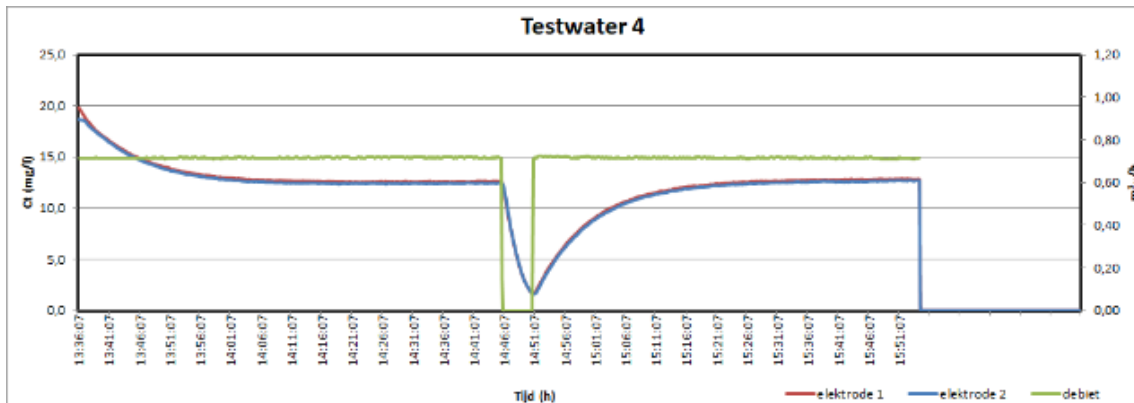
FIGUUR B3.7 VOORBEELD GRAFISCHE WEERGAVE (METING 4) MET SPREIDINGSGRAFIEKEN



FIGUUR B3.8 VOORBEELD BEREKENING ALFA-FACTOR BEPALING

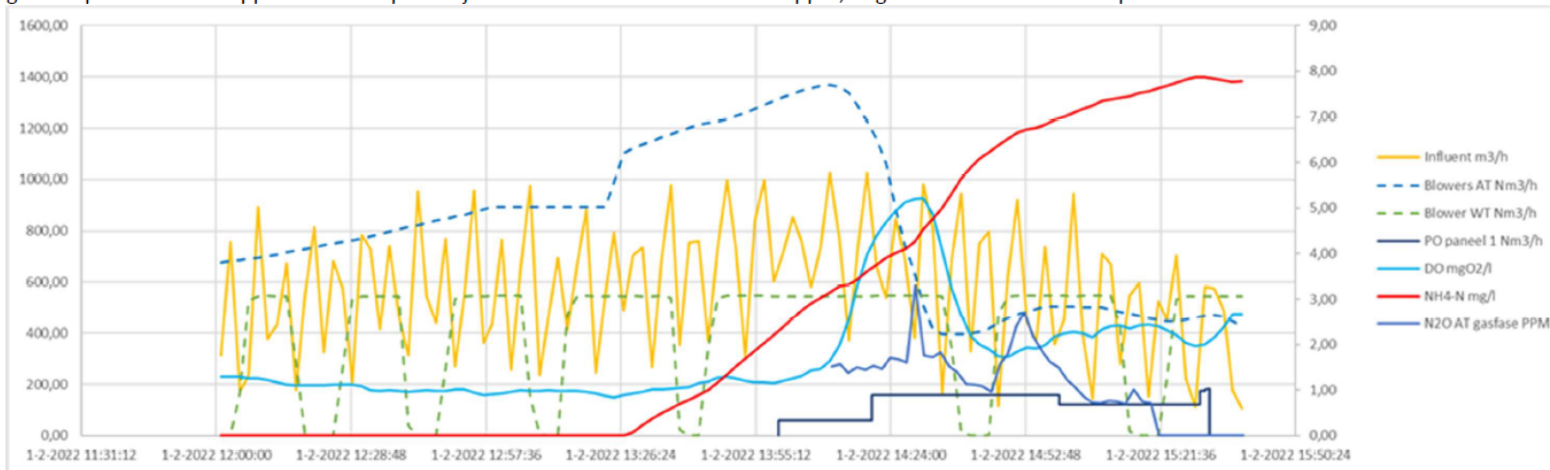
Alpha factor uitwerking

		Testwater 4			
		1	2	3	
Test nummer	:	3 februari 2022			
Datum	:	13:36 14:51			
Aanvangstijd	:				
Gemeten waarden					
Waterhoogte boven het element	h_E	4,37	4,37		m
Volume kolom	V	0,549	0,549		m ³
Watertemperatuur	T	10,0	9,6		°C
Geleidbaarheid	G	694	694		μS/cm
Volumestroom blower bij 0 gr. C en 1013 hPa	$Q_{L,0}$	0,72	0,72		m ³ /h
Persdruk	p	479,0	478,7		hPa
Berekende waarden					
Beluchttingsconstante elektrode 1	k_{La1}	0,112	0,109		min ⁻¹
Beluchttingsconstante elektrode 2	k_{La2}	0,110	0,109		min ⁻¹
Gemiddelde	k_{La}	0,111	0,109		min ⁻¹
Beluchttingsconstante bij 20° C	k_{La20}	0,149	0,147		min ⁻¹
Verzadigingswaarde bij 20 gr. C	$C_{s,mil,20}$	11,01	11,01		mg/l
Zuurstof inbreng onder standaard condities	SOTR ₂₀	53,9	53,2		g O ₂ /h
Specifieke zuurstofoverdracht per meter	SSOTR	17,23	17,00		g O₂/(Nm³.m)
Zuurstof inbreng onder standaard condities	SOTR _{20,1000}	56,66	55,91		g O ₂ /h
Specifieke zuurstofoverdracht per meter	SSOTR ₁₀₀₀	18,11	17,88		g O ₂ /(Nm ³ .m)
Drinkwater op basis debiet en waterhoogte					
Specifieke zuurstofoverdracht per meter	SSOTR	24,18	24,18		g O₂/(Nm³.m)
Alpha-factor, gemiddeld	α	0,708	-		
Alpha-factor, gemiddeld	α_{1000}	0,744	-		

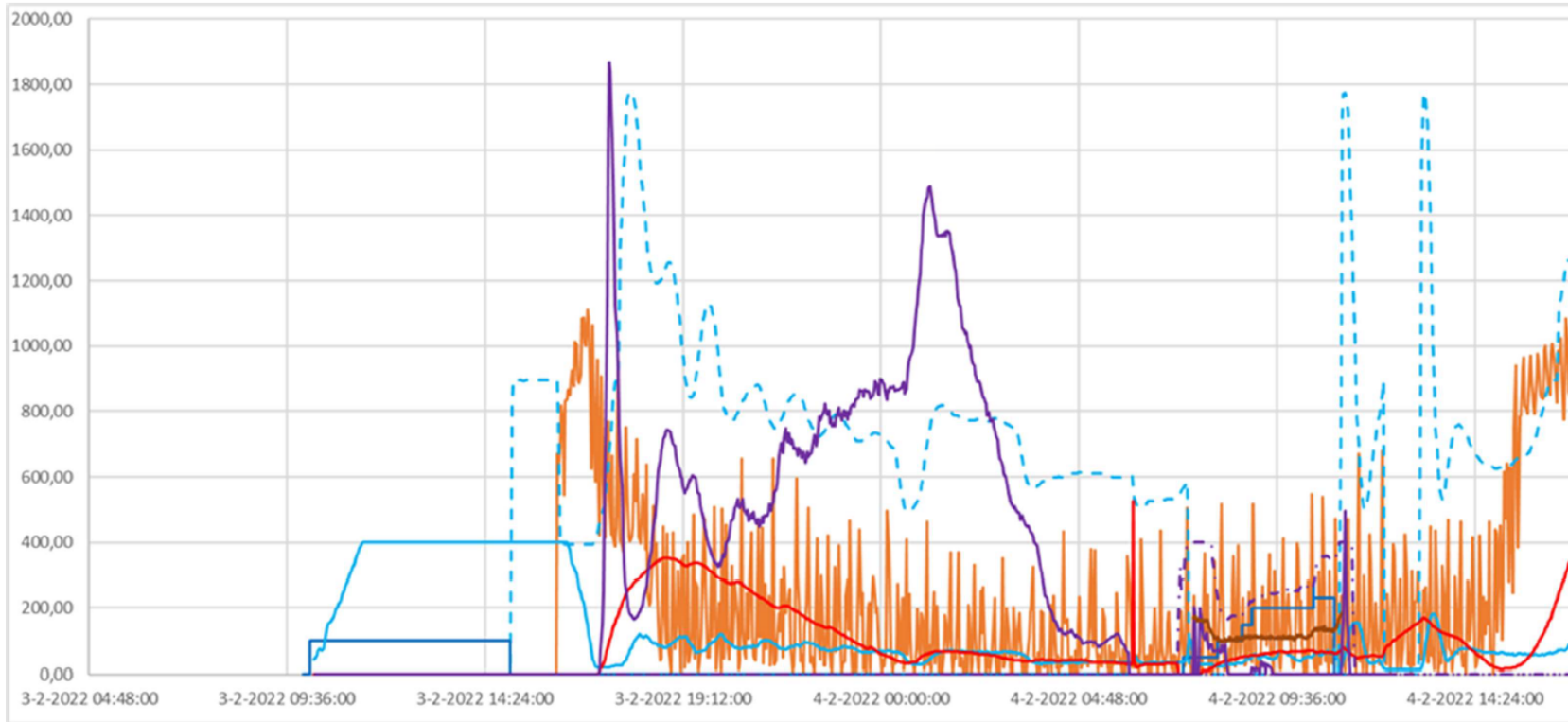


RESULTATEN LACHGASMETINGEN RINGPROEVEN

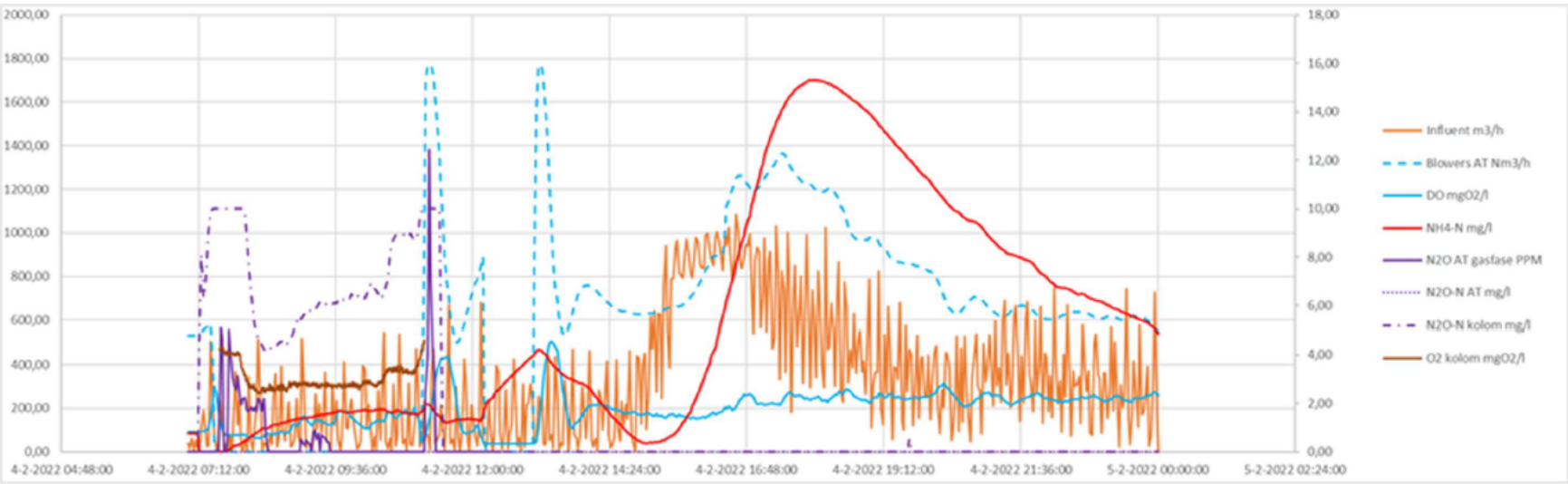
De blowers op de aeratietank draaien in de ochtend nog rustig maar door de aanvoer van veel NH4 door RWA gaan deze naar bijna 1.400 Nm3/uur. Als gelijk met de stijging van NH4 in de AT de PO bijkomt met 60 Nm3/uur, stijgt het DO (opgelost O2) gehalte snel en daalt de luchttoevoer van de blowers. De DO piek geeft ook een N2O gasfase piek van circa 3 ppm. Na verloop van tijd zwakt de N2O emissie af naar 0 ppm, nog voor de PO toevoer stopt.



Hieronder een plotje met de data van de ad- en desorptietest van donderdag 3 feb, de donderdagnacht met normale bedrijfsvoering, de DWA duurtest met PO dosering op vrijdag 4 feb waarbij parallel is gemeten in de kolom op buitenlucht en tot slot een uurtje beluchting uit gevolgd door normale bedrijfsvoering. De gasfase meter is paraat geweest tot aan vrijdag 12.00, de waterfase N20 meters in de wissel- en aeratietank ook. Beide waterfase meters hebben niets gemeten wissel- en aeratietank. Alleen in de kolom is N20-N gemeten (hier is tijdelijk de wisseltank meter voor gebruikt) tot het maximum van de schaal (10 mgN20-N/l). De kolom werd doorstroomt vanuit de aeratietank met circa 3,6 m3/uur (volume 0,5 m3), het DO gehalte was daar tussen 2 en 4 mgO2/l. De gasfase meter heeft ook N20 gemeten. Duidelijk zichtbaar de N20 gasfase piek als de aanvoer weer start nadat deze 8 uur stilgelegd heeft. In de avond en nacht na de ad- en desorptiesten ook veel N20. Tijdens de DWA duurproef met PO van circa 7.30 tot 11.00 piekt de gasfase N20 licht. De piekjes vallen samen met stijging van het DO gehalte door de omschakelingen van buitenlucht naar PO en weer terug.



Hieronder in meer detail de DWA duurtest met PO (7.30-11.00) gevolgd door normale bedrijfsvoering (zonder wisseltank) tot aan 12.00, dan een periode van circa een uur zonder beluchting ivm demontage van de PO installatie en daarna vanaf circa 13.00 weer normale bedrijfsvoering.



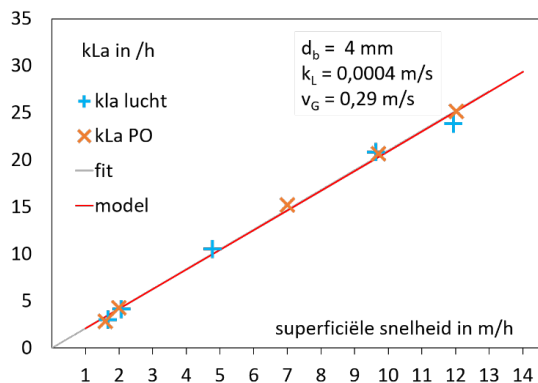
BIJLAGE 5

THEORETISCHE BESCHOUWING EFFECT PO EN LUCHT OP $k_L a$

Deze bijlage is een theoretische beschouwing van het verschil tussen PO en lucht in de $k_L a$. Deze bijlage is opgesteld door Rob van der Lans (Senior consultant scaling up/down and mixing in large scale bioreactors en gastdocent TU Delft) in opdracht van WDO Delta. Deze achtergrondkennis helpt om de bevindingen in het rapport theoretisch te verklaren en te begrijpen.

Gerekend is aan de $k_L a$ en de superficiële gassnelheid v_{Gs} . Zowel op basis van de theorie als op basis van de meetresultaten van de kolomproeven als de ringproeven. De stelling is dat $k_L a$ en de v_{Gs} bij de gebruikte lage gasdebieten evenredig zijn: $k_L a = f v_{Gs}$. Uit de experimenten van de kolomproeven met drinkwater-data blijkt dat $f = 2,1$ /m (voor dit systeem), zie onderstaande figuur B5.1 met de resultaten van de kolomproeven met de $k_L a$ versus de superficiële gassnelheid v_{Gs} (maal oppervlak kolom = gasdebiet). Voor de gebruikte data, zie bijlage 2 en 3 uit dit rapport.

FIGUUR B5.1 RELATIE $k_L a$ EN v_{Gs} MET DRINKWATER IN DE KOLOMPROEVEN



Zowel de punten van PO als van buitenlucht liggen op dezelfde lijn. De $k_L a$ is dus onafhankelijk van het "medium" PO of lucht. Dit klopt ook met een theoretische modelbenadering met bellen van 4 mm, een stofoverdrachtscoëfficiënt van 1,44 m/h en een gassnelheid v_G van

$$1.044 \text{ m/h (0,29 cm/s): } k_L a = \frac{k_L}{d_b} \frac{6\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \text{ met } \varepsilon = \frac{v_{Gs}}{v_G}.$$

Uit de definitie van SSOTR volgt dat deze 2,1 maal de verzadigingswaarde van lucht en zuurstof is. Dat is dus een constante.

$$SSOTR = \frac{OC}{QH} = \frac{k_L a V c_s}{QH} = \frac{k_L a c_s}{QH/V} = \frac{2.1 v_{Gs} c_s}{v_{Gs}} = 2.1 c_s \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{m}} \right]$$

Vandaar ook dat de debietsfactor tussen PO en lucht kan worden berekend op 4,77 uit het quotiënt van de O_2 verzadigingswaarden, zie de onderstaande tabel B7.1. Dat komt ook overeen met het quotiënt van het percentage O_2 in PO en lucht: $100\% / 20,95\% = 4,77$.

TABEL B5.1 BEREKENING VAN DE VERZADIGINGSWAARDEN EN QUOTIËNT PO/LUCHT BIJ 20 °C

Henry 20°C for oxygen	4,09E+09 Pa	note
used pressure	1,00E+05 Pa	actual pressure not given
atmospheric pressure	1,01E+05 Pa	for comparison. Ranges normally between 1.02 and 1.04
oxygen content air	20,95 %	
partial pressure air at 1 bar	20950 Pa	
at 1 atm	4389 Pa	
molar mass water	0,018 kg/mol	
molar mass oxygen	0,032 kg/mol	
density water 20 °C	998 kg/m3	
saturation conc. in air at 1 bar	9,088 g/m3	
at 1 atm	9,206 g/m3	
saturation concentration PO	43,38 g/m3	
at 1 atm	43,94 g/m3	
Ratio PO/air	4,77	

Bij de kolomproeven waren de temperaturen lager (ca 12 °C) en de verzadigingswaarden hoger.

Voor de SSOTR volgt voor $2,1 \times 11,11 = 23 \frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{m}}$; $\text{PO} : \times 52,7 = 111 \frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{m}}$. Voor de SSOTE volgt uit vergelijkingen 6 en 7 van DWA-M 209: ($\rho_{\text{lucht}} = 0,299 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_{\text{PO}} = 1,43 \text{ kg/m}^3$):

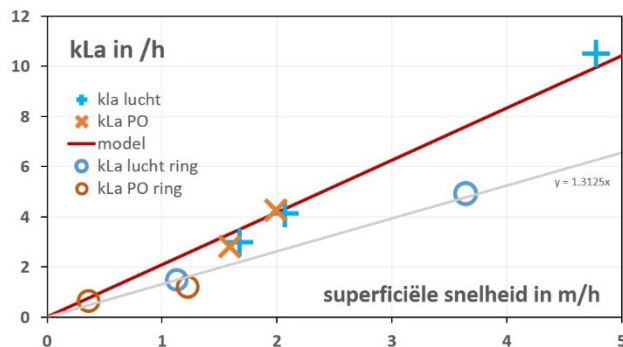
$$SSOTE = \frac{SSOTR}{10\rho} = \begin{cases} \frac{23}{3} = 7,7 \% / \text{m} = 34,5 \% \text{ over } 4,5 \text{ m (lucht)} \\ \frac{111}{14,3} = 7,7 \% / \text{m} = 34,9 \% \text{ (PO)} \end{cases}$$

Ook bij de resultaten van de ringproeven in actiefslib wordt het bovenstaande bevestigd. Zoals bij de kolomproeven is uitgewerkt, is er een relatie tussen $k_L a$ en gasinbreng v_{Gs} . Voor lage gasdebieten is die lineair en was voor de kolom: $k_L a = 2,1 v_{Gs}$. Op dezelfde wijze zijn voor de ringproeven de huidige data gecorreleerd met als uitkomst $k_L a = 1,31 v_{Gs}$, zie onderstaande tabel en figuur B5.2. Deze metingen zijn uitgevoerd in actiefslib. Daarom is gecorrigeerd voor de alfa factor.

	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Meting 4	Eenheid
	PO	air	PO	air	
Q_{element}^a	3,3	1,3	1,0	3,0	Nm ³ /h.element
Q_{totaal}^a	333	395	99	987	Nm ³ /h
v_{Gs}	1,23	1,45	0,37	3,6	Nm/h
$\alpha k_L a$	0,87	1,5	0,43	3,4	/h
$k_L a$	1,2	2,0	0,63	4,9	/h

^aZie voor de bron van deze data tabel B3.1 van Bijlage 3: Logboek en resultaten ringproeven

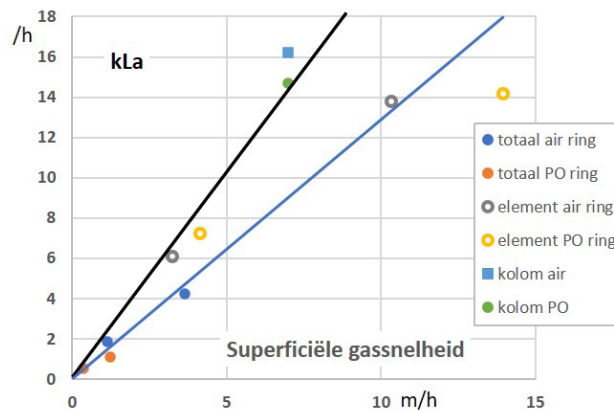
FIGUUR B5.2 RELATIE $k_L a$ EN v_{Gs} MET DRINKWATER IN DE KOLOMPROEVEN EN IN ACTIEFSLIB MET DE RINGPROEVEN



De waarden van de beluchtingsconstante zijn dus lager dan in de kolom. Op zich is dat niet vreemd omdat er in de ring sprake is van een kortere verblijftijd van de bellen door de vloeistofcirculatie (spiral flow) die in de kolom niet aanwezig is. Al met al blijkt de $k_L a$ in de buitenring meer dan de helft lager te zijn dan in de kolom.

Gecheckt is in hoeverre de kolomdata en die van de ring zijn te vergelijken. De OC van de ring is teruggerekend naar één element en daarna met de kLa vergeleken.

FIGUUR B5.3 RELATIE $k_L a$ EN V_{GS} MET DRINKWATER IN DE KOLOMPROEVEN, IN ACTIEFSLIB ALS TOTAAL EN PER ELEMENT MET DE RINGPROEVEN



Er is zoals te verwachten geen grote nauwkeurigheid, maar grofweg valt het wel binnen de range. Interessant is natuurlijk dat er nu ook hoge superficiële gassnelheden zijn om met de kolom te vergelijken. Helaas is die van PO wel nogal afwijkend.

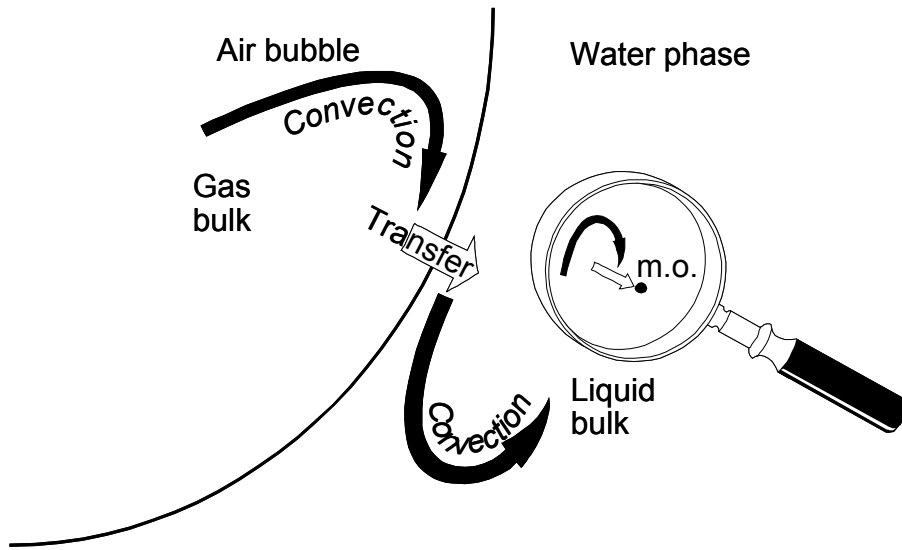
SAMENGEVAT

- Er is bij kleine gasdebieten een lineaire relatie tussen gasdebiet Q en de OC
- De SSOTR is daardoor constant en hangt alleen af van de verzadigingswaarde c_s

SCHEMATISCHE FIGUREN UIT DE COLLEGEPRAKTIJK VAN ROB VAN DER LANS

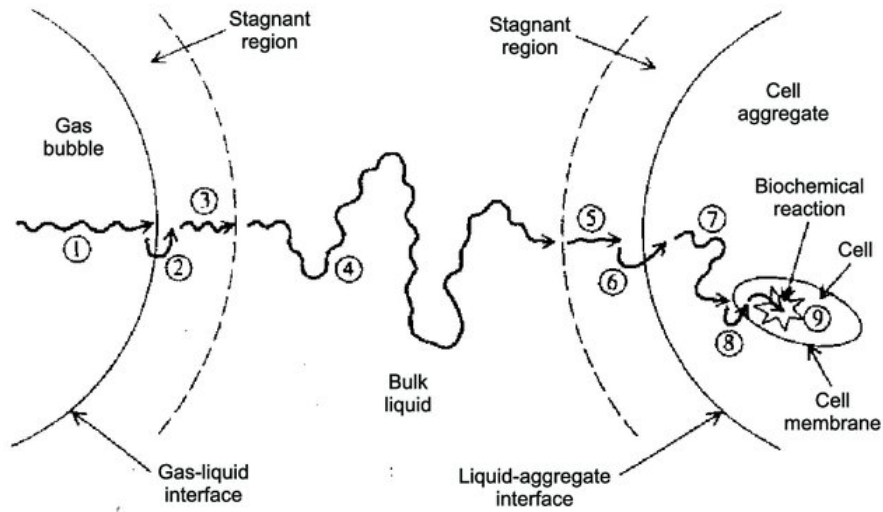
Deze figuur (B5.4) werd op colleges/advanced courses gebruikt als inleiding op zuurstofoverdracht. Het verschil in afmeting wordt benadrukt, evenals menging (convectie) in gas en vloeistof. De overdrachtsweerstand K_L wordt zonder detail weergegeven. Transport naar een vlok wordt niet weergegeven.

FIGURE B5.4 TRANSPORT SEQUENCE OF OXYGEN FROM GAS BULK TO MICROORGANISMS: CONVECTION FROM GAS BULK TO GAS-LIQUID INTERFACE, INTERPHASE TRANSFER, CONVECTION FROM GAS-LIQUID INTERFACE TO LIQUID BULK, TRANSFER TO MICROORGANISMS



Figuur B5.5 uit de literatuur geeft een beeld in het geval dat vlokken een rol spelen. De nadruk ligt op het filmmodel. Volgens dat model zijn de ‘films’ hier niet in verhouding weergegeven.

FIGURE B5.5 KUMAR A, RAY DK & GUPTA SM (2012) "BIOPROCESS TECHNOLOGY". IN: BIOTECHNOLOGY IN MEDICINE AND AGRICULTURE: PRINCIPLES AND PRACTICES. (EDS. KUMAR A, PAREEK A & GUPTA SM) I. K. INTERNATIONAL PUBLISHING HOUSE PVT. LTD., NEW DELHI, INDIA, PP. 827-857



TOELICHTING

De belangrijkste transportweerstand zijn door:

- 1 en 4, transport door convectie (menging)
- 3 en 5, overdracht gedomineerd door diffusie
- 7 transport door diffusie en interne stroming in vlok

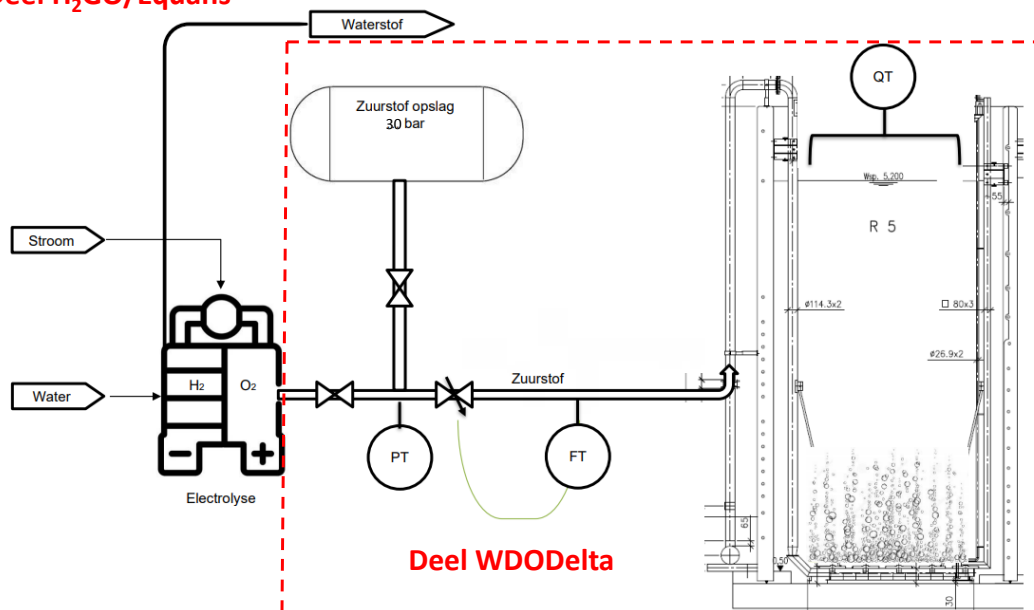
5. Transport in de gasfase van de bel. Diffusie in gas is in vergelijking met vloeistof héél snel, dus zelfs in een rigide bel (geen grensvlakbeweging) is de transportweerstand volledig verwaarloosbaar.
6. Overdracht door grensvlak. Bij reinwater speelt dit geen rol. Oppervlakreactieve stoffen verhogen de transportweerstand, maar dat wordt gecompenseerd door een groter uitwisselend oppervlak door het hinderen van coalescentie.
7. Overdracht aan vloeistofzijde gedomineerd door diffusie. Diffusie: in vloeistof is erg traag. De 'film' volgens filmmodel is ca 5 μm dik bij een 6 mm bel. Toch is dit de voornaamste weerstand.
8. Transport door menging. In het geval van ideale menging is de zuurstofconcentratie overal even groot. Maar vooral op grotere schaal is dat moeilijk te realiseren. De overdrachtstijd bij 10 m/h is ongeveer 12 minuten. De mengtijd in de ring (100 m) is ongeveer 11 minuten (5 \times circulatietijd). In dit geval is de 'weerstand' ongeveer even groot als die van punt 3.
9. Overdracht aan vloeistofzijde gedomineerd door diffusie.: Afhankelijk van turbulentie en grootte van vlok. Bij vlokken in de orde van grootte van de bellen kan de weerstand vergelijkbaar zijn. Door de vorm van de vlok kan de weerstand echter toch zeer klein zijn. In ieder geval bij gesuspendeerde micro-organismen.
10. Overdracht over grensvlak. Niet te verwachten bij vlokken.
11. Transport in de vlok. Combinatie van diffusie, stroming door losse structuur van de vlok en consumptie is complex. Afhankelijk van de vorm kan zelfs zuurstofuitputting optreden (anaerobe kern in granules)
12. En 9. Microbiologie.

BIJLAGE 6

ONTWERPUITGANGSPUNTEN EN KOSTENRAMINGEN

In de volgende figuur is het onderscheid aangegeven van de ramingen door Equans en H₂-Go en WDOdelta/TAUW voor het rwzi deel. Op de figuur ontbreekt de stikstof purgeer installatie. Deze installatie is nodig om de de electrolyser en de zuurstofopslag- en doseerinstallatie te kunnen inertiseren.

Deel H₂GO/Equans



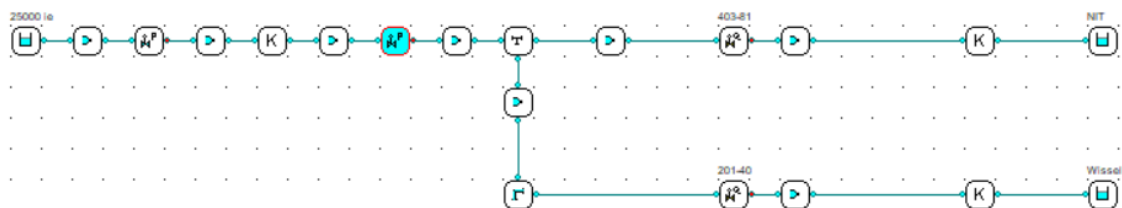
De werktuigbouwkundige uitgangspunten voor het WDOdelta deel zijn hieronder gegeven. Daarna zijn uitgangspunten van H₂-Go en Equans vermeld.

W DIMENSIONERING PO MAATREGELEN OP DE RWZI 25.000 I.E.

Voor de 25.000 i.e. variant is de dimensionering als volgt (zie figuur B6.1 en tabel B6.1):

- Gezamenlijke toevoerleiding met de drukreducerkleppen in diameter oplopend van DN 32 naar DN 50
- In de gezamenlijke toevoerleiding twee drukreducerkleppen DN 40
- Afzonderlijke leiding DN 125 naar de NIT met debietregelklep DN 50
- Afzonderlijke leiding DN 65 naar de wissel met debietregelklep met DN 40

FIGUUR B6.1 SCHEMA DRUKREDUCEERKLEPPEN RWZI 25.000 I.E.



TABEL B6.1 SPECS VAN DE REDUCEERKLEPPEN BIJ 25.000 I.E.

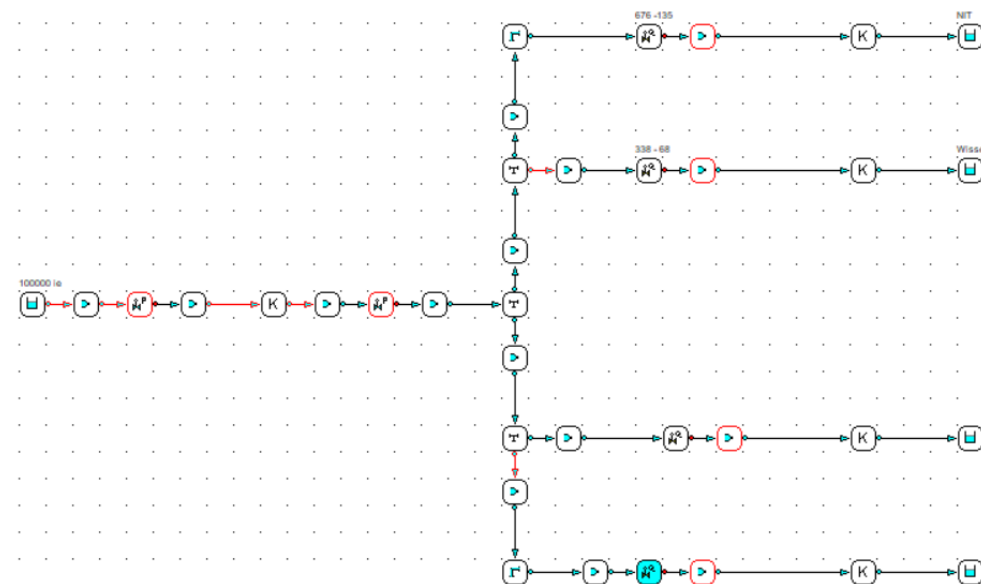
Debieten en klepstanden	NIT	Wissel
Debiet 100%	403 kg/h	201 kg/h
Klepstand debietregelklep - debiet 100 %	76%	86%
Klepstand 1e drukreducerklep - debiet 100%	77%	77%
Klepstand 2e drukreducerklep - debiet 100%	71%	71%
Debiet 20%	81 kg/h	40 kg/h
Klepstand debietregelklep - debiet 20%	37%	47%
Klepstand 1e drukreducerklep - debiet 20%	37%	37%
Klepstand 2e drukreducerklep - debiet 20%	32%	32%

W DIMENSIONERING PO MAATREGELEN OP DE RWZI 100.000 I.E.

Voor de 100.000 i.e. variant is de dimensionering als volgt (zie figuur B6.2 en tabel B6.2):

- Gezamenlijke toevoerleiding met de drukreducerkleppen in diameter oplopend van DN 50 naar DN 80
- In de gezamenlijke toevoerleiding twee drukreducerkleppen DN 40
- Afzonderlijke leiding DN 150 naar de NIT met debietregelklep DN 50
- Afzonderlijke leiding DN 125 naar de wissel met debietregelklep met DN 40

FIGUUR B6.2 SCHEMA DRUKREDUCEERKLEPPEN RWZI 100.000 I.E.



TABEL B6.2 SPECS VAN DE REDUCEERKLEPPEN BIJ 100.000 I.E.

Debieten en klepstanden	Per NIT	Per Wissel
Debiet 100%	675 kg/h	338 kg/h
Klepstand debietregelklep - debiet 100 %	89 %	89%
Klepstand 1e drukreducerklep - debiet 100%	72 %	72 %
Klepstand 2e drukreducerklep - debiet 100%	70 %	70 %
Debiet 20%	135 kg/h	68 kg/h
Klepstand debietregelklep - debiet 20%	49 %	49%
Klepstand 1e drukreducerklep - debiet 20%	32 %	32 %
Klepstand 2e drukreducerklep - debiet 20%	30 %	30 %

Er zijn diverse gesprekken geweest met Equans en H₂-Go over de prestaties en kosten van de Electrolysers op de RWZI Hessenpoort. De kengetallen berekeningen van Equans en H₂-Go zijn bedoeld geweest voor Fase 3 van de experimenten op de RWZI Hessenpoort, waarbij een duurtest van een langere periode zal plaatsvinden. De RWZI Hessenpoort is belast op circa 50% van de ontwerpcapaciteit. Daarom wijken de aangeleverde data af van de berekeningen in dit rapport voor een situatie van 25.000 ie (RWZI Hessenpoort volbelast) en 100.000 ie rwzi met sliblijn. Data zijn doorvertaald met een engineers guess (expert opinion, schalen met de wortelregel).

De Equans en H₂-Go uitgangspunten en kengetallen zijn weergegeven in het volgende overzicht. Daarna volgen de uitgangspunten voor de kostenberekeningen en daarna de kostenbladen met bouwkosten, stichtingskosten en TCO. Er is gerekend voor een O₂ inbreng-efficiëntie van 28%. Ook is er gekeken naar het break-even point met betrekking tot de stroomprijzen, waarbij de investeringen van de aanpassingen op de rwzi zich terugverdienen.

Rwzi Hessenpoort	25.000 ie			Opmerkingen	Uit profiel Hessenpoort_ontwerp.xlsx
O2 vraag slib	2.557	kg O2/d			
Deficiet lucht	1,29			verzadigingswaarde O2	9 mg/l setpoint 2,0 mg/l
Alfa factor	0,7				
O2 inbreng excl piek	4.697	kg O2/d			
Daggemiddelde O2 inbreng	196	kg O2/h			
OC Hessenpoort	244	kg O2/h			
Piekfactor	1,25				
Deficiet PO	1,11			verzadigingswaarde O2	45 mg/l setpoint 4,5 mg/l
Correctie deficiet voor PO	0,86				
Daggemiddelde O2 inbreng PO	169	kg O2/h			
Rendement O2 inbreng PO	28%		35%	Ook obv expert judgement, zie hiernaast het rekenvoorbeeld	
Te produceren PO electrolyser	604	kg O2/h	483	kg O2/h	
	5.291	ton O2/jaar	4.233	ton O2/jaar	
Hoeveelheid H2	75	kg H2/h	60	kg H2/h	Delen door 8
	661	ton H2/jaar	529	ton H2/jaar	
Vermogen electrolyser	4,2	MW	3,4	MW	
Elektriciteitsverbruik	36,8	GWh/jaar	29,5	GWh/jaar	
Rendementverlies	14,8	GWh/jaar	11,8	GWh/jaar	
Effectief te benutten warmte	26,6	TJ/jaar	21,3	TJ/jaar	
Rwzi	100.000 ie			Opmerkingen	
Met VBT + SGT					
O2 vraag lager door VBT	84%				Expert judgement obv ontwerpberoekeningen rwzi Weesp
Daggemiddelde O2 inbreng PO	568	kg O2/h			Ook obv expert judgement, zie hiernaast het rekenvoorbeeld
Rendement O2 inbreng PO	28%		35%		
Te produceren PO electrolyser	2.029	kg O2/h	1.623	kg O2/h	
	17.777	ton O2/jaar	14.222	ton O2/jaar	
Hoeveelheid H2	254	kg H2/h	203	kg H2/h	Delen door 8
	2.222	ton H2/jaar	1.778	ton H2/jaar	
Vermogen elektrolyser	14,1	MW	11,3	MW	
Elektriciteitsverbruik	123,8	GWh/jaar	99,0	GWh/jaar	
Rendementverlies	49,7	GWh/jaar	39,8	GWh/jaar	
Effectief te benutten warmte	89,5	TJ/jaar	71,6	TJ/jaar	Aanname 50 % te benutten
Slib verwerken totaal	200.000 ie				
Nodig aan warmtevermogen	1.000	kW	obv rwzi Echten		
	8.760	MWh/jaar			
	31,5	TJ/jaar		Er is ruim voldoende warmte voor de SGT	
Hoeveelheid gas					
200.000 ie	1.600.000	Nm3/jaar	biogas	eigen + 100.000 ie extern slib	
	50%		biogas gaat naar verwarming		
	520.000		extra groen gas uit te leveren		
	1,0		euro per Nm3 opbrengsten		

Kostenomrekeningsfactoren (engineers guess)							
Equans en H2Go		25.000 ie		100.000 ie		Opm	
		28 % rendement	35 % rendement	28 % rendement	35 % rendement		
Totaal electrolyser	182,4 kg O2/h	604	483	2.029	1.623		
Vermogen elektrolyser	1,27 MW	4,2	3,4	14,1	11,3		evenredig
Aaneemson elektrolyser	1.500 keuro	2.730	2.441	5.003	4.475		wortelregel
Compressor H2	275 keuro	500	448	917	820		wortelregel
Opslagstation H2	350 keuro	637	570	1.167	1.044		wortelregel

DEEL WDOELTA/TAUW

Bouwkosten begroting		Bijgewerkt met versie 16 mei 2022 van André Visser					
		Voor	604 kg O2/h			2.029 kg O2/h	
Uurtarief hoog	100						
Uurtarief laag	75						
		25000 ie			100000 ie		
		Eenheid	Aantal	Uren laag	Uren hoog	Subtotaal	
Debietregelklep		6.000	2			12.000	6.000 4 24.000
Debietmeter		7.000	2			14.000	7.000 4 28.000
Druktransmitter		1.000	2			2.000	1.000 2 2.000
Drukreduceerklep		4.000	2			8.000	4.000 2 8.000
Handafsluiters		700	5			3.500	1.000 10 10.000
Leidingwerk		35	250			8.750	38 350 13.300
Elektrische afsluiter		4.500	2			9.000	4.500 4 18.000
Tekenen				100		7.500	
Fabrikage				25		1.875	
Montage					240	18.000	
Projectleiding					73	7.300	
Elektrische aansluitingen		7.500	7			52.500	7.500 13 97.500
Procesautomatisering		25.000	1			25.000	30.000 1 30.000
A&K 20%						18.385	
Bouwkosten						188.000	
							324.000

ALLEEN DEEL RWZI

Directe bouwkosten		Alleen deel rwzi						
Onderdeel	Hessenpoort Geen slibbijn Civiel	1. Aanneemson 25.000 ie			2. Aanneemson 100.000 ie			Opmerkingen
		WTB	E, I +PA WTB	Schaal rwzi Met slibbijn Civiel	WTB	E, I +PA WTB		
Deel electrolyser								
Opstelplaat beton + L stukken	-							
Trafo .. MW								
Electrolyser compleet								
strategische opslag O2 500 bar								
Compressor 500 bar								
Leidingwerk + reduceerventielen, druk beveiliging H2								
Opslagstation H2								
Compressor 500 bar								
Leidingwerk + reduceerventielen, druk beveiliging O2								
PM								
Subtotaal (incl winst en risico leverancier)	-							
Onvoorzien	40%							
Totaal electrolyser + H2 + O2 uitleveren								
Deel Rwzi								
30 bar O2 opslagbuffer 1.000 kg O2								
Debietregelklep			12.000			24.000		
Debietmeter						28.000		
Druktransmitter			2.000			2.000		
Drukreduceerklep			2.000			2.000		
Handafsluiters			3.500			10.000		
Leidingwerk			8.750			13.300		
Elektrische afsluiter			9.000			18.000		
Elektrisch en PA				77.500			127.500	
PM EX en extra O2 sensoren								
Tekenen			7.500			7.500		
Fabrikage			1.875			2.250		
Montage			18.000			37.500		
Projectleiding			7.300			12.600		
A&K W-aannemer	20%		14.385			31.430		
Subtotaal (incl winst en risico leverancier)	-		86.310	77.500		188.580	127.500	
Onvoorzien	40%		34.524	31.000		75.432	51.000	
Totaal aanpassingen rwzi voor O2			120.834	108.500		264.012	178.500	
		Civiel	WTB	E, I +PA	Civiel	WTB	E, I +PA	
Totale aanneemson electrolyser + ombouw rwzi O2			120.834	108.500		264.012	178.500	
Totaal directe bouwkosten		229.334			442.512			

ALLEEN DEEL RWZI

Stichtingskosten		Alleen deel rwzi					
Onderdeel		Stichtingskosten 25.000 ie			Stichtingskosten 100.000 ie		
		Hessenpoort Geen slibbijn Civiel	WTB	E, I +PA	Schaal rwzi Met slibbijn Civiel	WTB	E, I +PA
Directe bouwkosten electrolyser + H2 + O2 uitleveren		-	-	-	-	-	-
Directe bouwkosten aanpassingen rwzi voor O2		-	120.834	108.500	-	264.012	178.500
Nader te detailleren bouwkosten	15%	-	18.125	16.275	-	39.602	26.775
Totaal directe bouwkosten		-	138.959	124.775	-	303.614	205.275
Enmalige kosten	1%	-	1.390	1.248	-	3.036	2.053
Algemene bouwplaatskosten	5%	-	6.948	6.239	-	15.181	10.264
Uitvoeringskosten	8%	-	11.117	9.982	-	24.289	16.422
algemene kosten	7%	-	11.089	9.957	-	24.228	16.381
Winst en risico	5%	-	8.475	7.610	-	18.517	12.520
Totaal voorziene bouwkosten		-	177.977	159.811	-	388.866	262.914
Onvoorzien (15%)	15%	-	26.697	23.972	-	58.330	39.437
Tijdelijke voorzieningen (2%)	2%	-	3.560	3.196	-	7.777	5.258
Inrichting gebouwen en kantoor (2%)	2%	-	3.560	3.196	-	7.777	5.258
Opleiding personeel (1%)	1%	-	1.780	1.598	-	3.889	2.629
Verzekeringen en bouwrente (4,5%)	5%	-	8.009	7.191	-	17.499	11.831
Communicatie (2%)	2%	-	3.560	3.196	-	7.777	5.258
Advieskosten extern (10%)	10%	-	17.798	15.981	-	38.887	26.291
Advieskosten OG (10%)	10%	-	17.798	15.981	-	38.887	26.291
Leges/heffingen (3%)	3%	-	5.339	4.794	-	11.666	7.887
BTW (21%)	21%	-	51.017	45.810	-	111.468	75.364
Totale stichtingskosten		-	317.093	284.727	-	692.822	468.421
Totale stichtingskosten		601.820			1.161.243		
Factor op de directe bouwkosten		2,3					

ALLEEN DEEL RWZI

Jaarlijkse kosten		Alleen deel rwzi							
Onderdeel		TCO 25.000 ie			TCO 100.000 ie			Uitgangspunten TCO	
		Hessenpoort Geen sliblijn Civiel	WTB	E, I +PA	Schaal rwzi Met sliblijn Civiel	WTB	E, I +PA		
Totaal voorziene bouwkosten, excl BTW		-	177.977	159.811	-	388.866	262.914		
Totale stichtingskosten, incl BTW		-	317.093	284.727	-	692.822	468.421	Afschrijvingstermijn civiel	30 jaar
								Afschrijvingstermijn WTB	15 jaar
								Afschrijvingstermijn E, I + PA	10 jaar
Afschrijving (annuïteitenmethode, incl BTW)								Rentepercentage voor kapitaallasten	2,10%
Civiel		-			-			Annuiteit civiel	0,045
WTB			24.863			54.323		Annuiteit WTB	0,078
E, I+PA				31.864			52.421	Annuiteit E, I + PA	0,112
Onderhoud civiel, incl BTW	21%	-			-			Onderhoudskosten civiel	0,5% van de bouwkosten excl BTW
Onderhoud WTB, incl BTW	21%		6.461			14.116		Onderhoudskosten W, E, I + PA	3,0% van de bouwkosten excl BTW
Onderhoud E, I + PA, incl BTW	21%			5.801			9.544		
Factor energiebesparing	82%								
Vermeden energiekosten beluchting, incl BTW			-36.783			-147.131		Energiekosten EUR	0,12 per kWh, huidig tarief incl alles en BTW
Vermeden CO2 emissie			-8.889			-35.557		CO2 heffing	100 euro/ton CO2 NL Mix in 2020
Stroomverbruik elektrolyser			-			-			15 kWh/ie.jaar
Opbrengsten H2 gas			-			-			- per kWh, tarief stroom elektrolyser
Opbrengsten warmteproductie	100%		-			-520.000		Vermeden verstoken biogas/groen gas	0,0 euro/kg H2
hulpfactor wel of geen warmtebenutting (0 of 1)	1								
personeelskosten			5.000			10.000		Personeelskosten EUR	100.000 per fte per jaar
Totale TCO (EUR/jaar)			28.317			-562.283			

TOTAAL ZOWEL ELECTROLYSER ALS RWZI DEEL

Directe bouwkosten		O2 inbrengcoëfficiëntie 28%						
Onderdeel		1. Aanneemsom 25.000 ie			2. Aanneemsom 100.000 ie			Opmerkingen
		Hessenpoort Geen sliblijn Civiel	WTB	E, I +PA	Schaal rwzi Met sliblijn Civiel	WTB	E, I +PA	
Deel electrolyser								
Opstelplaat beton + L stukken		25.000			75.000		factor 3 schatting	
Trafo .. MW			PM			PM		
Electrolyser compleet			2.729.539			5.003.328		
strategische opslag O2 500 bar			-			-		
Compressor 500 bar			-			-		
Leidingwerk + reduceerventielen, druk beveiliging H2			25.000			75.000	factor 3, schatting	
Opslagstation H2			636.892			1.167.443		
Compressor 500 bar			500.415			917.277		
Leidingwerk + reduceerventielen, druk beveiliging O2			25.000			75.000	factor 3, schatting	
PM							E, I+PA inclusief	
Subtotaal (incl winst en risico leverancier)		25.000	3.916.847	-	75.000	7.238.047	-	
Onvoorzien	40%	10.000	1.566.739	-	30.000	2.895.219	-	
Totaal electrolyser + H2 + O2 uitleveren		35.000	5.483.586	-	105.000	10.133.266	-	
Deel Rwzi								
30 bar O2 opslagbuffer 1.000 kg O2			-			-		
Debietregelklep			12.000			24.000		
Debietmeter						28.000		
Druktransmitter			2.000			2.000		
Drukreduceerklep			2.000			2.000		
Handafsluiters			3.500			10.000		
Leidingwerk			8.750			13.300		
Elektrische afsluiter			9.000			18.000		
Elektrisch en PA				77.500			127.500	
PM EX en extra O2 sensoren								
Tekenen			7.500			7.500		
Fabrikage			1.875			2.250		
Montage			18.000			37.500		
Projectleiding			7.300			12.600		
A&K W-aannemer	20%		14.385			31.430		
Subtotaal (incl winst en risico leverancier)		-	86.310	77.500	-	188.580	127.500	
Onvoorzien	40%	-	34.524	31.000	-	75.432	51.000	
Totaal aanpassingen rwzi voor O2		-	120.834	108.500	-	264.012	178.500	
		Civiel	WTB	E, I +PA	Civiel	WTB	E, I +PA	
Totale aanneemsom electrolyser + ombouw rwzi O2		35.000	5.604.420	108.500	105.000	10.397.278	178.500	
Totaal directe bouwkosten		5.750.000			10.680.000			

TOTAAL ZOWEL ELECTROLYSER ALS RWZI DEEL

Stichtingskosten		O2 inbrengcoëfficiëntie			28%		
Onderdeel		Stichtingskosten			Stichtingskosten		
		Hessenpoort	25.000	ie	Schaal rwzi	100.000	ie
		Geen slibblij			Met slibblij		
		Civiel	WTB	E, I +PA	Civiel	WTB	E, I +PA
Directe bouwkosten electrolyser + H2 + O2 uitleveren		35.000	5.483.586	-	105.000	10.133.266	-
Directe bouwkosten aanpassingen rwzi voor O2		-	120.834	108.500	-	264.012	178.500
Nader te detailleren bouwkosten	15%	5.250	840.663	16.275	15.750	1.559.592	26.775
Totaal directe bouwkosten		40.250	6.445.083	124.775	120.750	11.956.870	205.275
Enmalige kosten	1%	403	64.451	1.248	1.208	119.569	2.053
Algemene bouwplaatskosten	5%	2.013	322.254	6.239	6.038	597.844	10.264
Uitvoeringskosten	8%	3.220	515.607	9.982	9.660	956.550	16.422
algemene kosten	7%	3.212	514.318	9.957	9.636	954.158	16.381
Winst en risico	5%	2.455	393.086	7.610	7.365	729.250	12.520
Totaal voorziene bouwkosten		51.552	8.254.797	159.811	154.655	15.314.240	262.914
Onvoorzien (15%)	15%	7.733	1.238.220	23.972	23.198	2.297.136	39.437
Tijdelijke voorzieningen (2%)	2%	1.031	165.096	3.196	3.093	306.285	5.258
Inrichting gebouwen en kantoor (2%)	2%	1.031	165.096	3.196	3.093	306.285	5.258
Opleiding personeel (1%)	1%	516	82.548	1.598	1.547	153.142	2.629
Verzekeringen en bouwrente (4,5 %)	5%	2.320	371.466	7.191	6.959	689.141	11.831
Communicatie (2%)	2%	1.031	165.096	3.196	3.093	306.285	5.258
Advieskosten extern (10 %)	10%	5.155	825.480	15.981	15.466	1.531.424	26.291
Advieskosten OG (10 %)	10%	5.155	825.480	15.981	15.466	1.531.424	26.291
Leges/heffingen (3 %)	3%	1.547	247.644	4.794	4.640	459.427	7.887
BTW (21%)	21%	14.777	2.366.238	45.810	44.332	4.389.827	75.364
Totale stichtingskosten		91.847	14.707.159	284.727	275.542	27.284.615	468.421
Totale stichtingskosten		15.083.733			28.028.578		
Factor op de directe bouwkosten		2,3					

Jaarlijkse kosten		O2 inbrengcoëfficiëntie			28%			
Onderdeel		TCO			TCO			Uitgangspunten TCO
		Hessenpoort	25.000	ie	Schaal rwzi	100.000	ie	
		Geen slibblij			Met slibblij			
		Civiel	WTB	E, I +PA	Civiel	WTB	E, I +PA	
Totaal voorziene bouwkosten, excl BTW		51.552	8.254.797	159.811	154.655	15.306.930	262.914	
Totale stichtingskosten, incl BTW		91.847	14.707.159	284.727	275.542	27.271.591	468.421	Afschrijvingstermijn civiel 30 jaar Afschrijvingstermijn WTB 15 jaar Afschrijvingstermijn E, I + PA 10 jaar
Afschrijving (annuiteitenmethode, incl BTW)								Rentepercentage voor kapitaallasten 2,10%
Civiel		4.158			12.473			Annuiteit civiel 0,045
WTB			1.153.172			2.138.336		Annuiteit WTB 0,078
E, I+PA				31.864			52.421	Annuiteit E, I + PA 0,112
Onderhoud civiel, incl BTW	21%	312			936			Onderhoudskosten civiel 0,5% van de bouwkosten excl BTW
Onderhoud WTB, incl BTW	21%		299.649			555.642		Onderhoudskosten W, E, I + PA 3,0% van de bouwkosten excl BTW
Onderhoud E, I + PA, incl BTW	21%			5.801			9.544	
Vermeden energiekosten beluchting, incl BTW			-45.000			-180.000		Energiekosten EUR 0,12 per kWh, huidig tarief incl alles en BTW
Vermeden CO2 emissie			-10.875			-43.500		CO2 heffing 100 euro/ton CO2 NL Mix in 2020
Stroomverbruik elektrolyser			1.178.837			3.956.933		15 kWh/ie, jaar energie beluchting
Opbrengsten H2 gas			-2.645.422			-8.879.730		0,032 per kWh, tarief stroom elektrolyser na de elektrolyser
Opbrengsten warmteproductie			-			-520.000		Vermeden verstoken biogas/groen gas 4,0 euro/kg H2
personeelskosten			15.000			30.000		Personeelskosten EUR 100.000 per fte per jaar
Totale TCO (EUR/jaar)			-12.504			-2.866.948		
Omslagpunt	EUR/kWh		0,032			0,055		