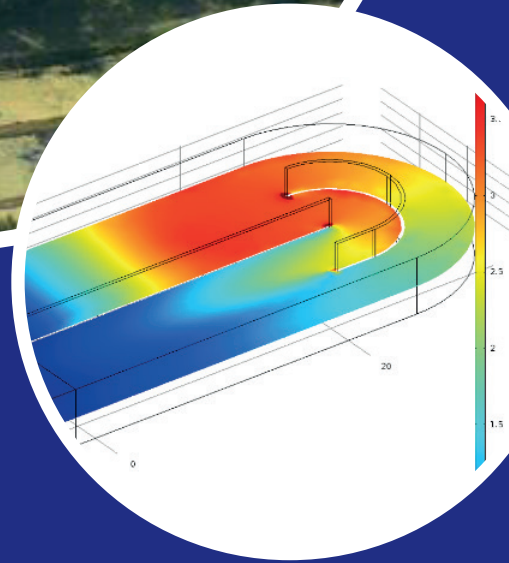


BELLENBELUCHTING IN OXIDATIESLOTEN



RAPPORT

2018
34



BELLENBELUCHTING IN OXIDATIESLOTEN

RAPPORT

2018

34

ISBN 978.90.5773.803.6



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

PROJECTUITVOERING

Ir. A.G.N. van Bentem, Royal HaskoningDHV
Ir. E. van Dijk, Royal HaskoningDHV
Ir. O. Icke, Royal HaskoningDHV

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Ir. P. van Otten ten Doeschot, Waterschap Vechtstromen
Ir. D. Marsman, Waterschap Hollandse Delta
Ir. H. Kuipers, Waterschap Zuiderzeeland
Ir. M. Janssen, Waterschap de Dommel
Ing. P. Timmerman, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, thans werkzaam bij Waterschap
Vallei en Veluwe
Ir. R. Vingerhoeds, Waterschap Brabantse Delta
Ir. C. Uijterlinde, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2018-34
ISBN 978.90.5773.803.6

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

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

TEN GELEIDE

MEER INZICHT VOOR (HER) ONTWERP ENERGIEZUINIGE BELLENBELUCHTING

De meest effectieve maatregel om energie te besparen is het vervangen van oppervlaktebeluchters door diffuse fijne bellenbeluchting. De beluchting is verantwoordelijk voor het grootste deel van het energiegebruik van een rwzi (gemiddeld 55 - 60%). De oxidatiesloot is het meest voorkomende type afvalwaterzuivering in Nederland. In het kader van de MJA3 is reeds op verschillende oxidatiesloten de beluchting aangepast. De wijze waarop dit gebeurt, verschilt per installatie en ook de energiewinst van deze maatregelen blijkt in de praktijk sterk te variëren. Om meer inzicht en eenduidigheid te verkrijgen over de toepassing van bellenbeluchting in oxidatiesloten is door STOWA dit onderzoeksproject uitgevoerd. Het doel van dit project is het formuleren van de do's en don'ts bij installatie van bellenbeluchting in een oxidatiesloot.

Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van praktijkmetingen en statische en dynamische computermodellen (CFD). De in het rapport beschreven resultaten geven inzicht in de factoren die van invloed zijn op de zuurstofoverdracht en het belang hiervoor van een goede stroming. Deze inzichten kunnen de ontwerper helpen bij de keuzes die moeten worden gemaakt bij het herinrichten van de beluchtingstank. Dit zal leiden tot een optimaal ontwerp en een maximale energiebesparing.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

In Nederland zijn veel rwzi's van het type oxidatiesloot met puntbeluchting. Een effectieve en veel toegepaste maatregel om energie te besparen is het vervangen van deze oppervlaktebeluchters door diffuse fijne belLENbeluchting. De wijze waarop dit gebeurt verschilt per rwzi en ook de energiewinst van deze maatregelen varieert sterk. Om meer inzicht en eenduidigheid te verkrijgen over de toepassing van belLENbeluchting in oxidatiesloten is door STOWA een onderzoeksproject uitgevoerd. Het rapport kan worden gebruikt om meer inzicht te krijgen in de complexe interacties tussen configuratie, voortstuwing en beluchting in een omloopsysteem. De meet- en modelresultaten kunnen richting geven aan de keuzes waar de ontwerper van een rwzi tegenaan loopt.

Het doel van dit project is het formuleren van de do's en don'ts bij installatie van belLENbeluchting in een oxidatiesloot. Het gaat hierbij met name om de plaatsing van het belLENpakket in de tank, en de invloed daarvan op de stroomsnelheid en de zuurstofoverdracht. Om dit doel te bereiken is een CFD-model van een oxidatiesloot opgesteld, waarmee de stroming en de zuurstofinbreng in het omloopsysteem kan worden gemodelleerd. Dit model is gevalideerd op basis van praktijkmetingen op de rwzi Soerendonk. Met het gevalideerde model zijn vervolgens de optimalisatiemogelijkheden onderzocht.

Op de rwzi Soerendonk zijn verschillende typen metingen uitgevoerd. Dit betreft stroomsnelheidsmetingen, zowel 1D (in de stromingsrichting) als 3D, en meting aan de zuurstofinbreng. De resultaten van de 1D stroomsnelheidsmetingen zijn allereerst gebruikt om een 1D stromingmodel van de oxidatiesloot te verifiëren. Dit model is gebruikt om inzicht te krijgen in de weerstandsfactoren in een oxidatiesloot. De weerstand bestaat uit vaste weerstanden (bochten, wanden, obstakels) en variabele weerstanden (belLENbeluchting). De weerstand van het belLENpakket neemt toe naarmate de beluchttingscapaciteit toeneemt en naarmate de stroomsnelheid afneemt. De resultaten hiervan zijn samen met de resultaten van de 3D stroomsnelheidsmetingen en de zuurstofinbrengmetingen gebruikt om het CFD model te calibreren. Dit betreft achtereenvolgens de calibratie van de stroming en de zuurstofinbreng.

Het model blijkt over het algemeen goed in staat op de stroomsnelheid te berekenen die in de praktijk is gemeten. Ook het stromingspatroon rondom de beluchttingspakketten wordt goed gemodelleerd. Het CFD-model berekent tendensen in de zuurstofinbreng die bekend zijn; een toename van de zuurstofoverdracht bij lagere plaatbelasting en bij hogere stroomsnelheden. De invloed van de positionering van de beluchttingselementen op de zuurstofoverdracht is volgens het model gering, behalve bij het plaatsen van beluchttingselementen in de bocht.

Op basis van simulatieberekeningen onder praktijkcondities kan worden aangetoond dat de effectieve zuurstofinbreng in de praktijk sterk kan afwijken van de zuurstofinbreng zoals die wordt voorgeschreven en gemeten onder schoonwatercondities. De gemeten zuurstofinbreng gaat uit van standaardcondities in zuurstofloos water. In de praktijk hebben de positionering van de beluchttingsvelden en de stroomsnelheid invloed op het zuurstofdeficiet en daarmee op de zuurstofoverdracht. Hierbij kan bijvoorbeeld worden geconcludeerd dat het opsplitsen van een beluchttingsveld in twee (of meer) kleinere beluchttingsvelden, weliswaar leidt tot een lagere stroomsnelheid, maar ook tot een verhoging van de zuurstofinbreng onder praktijkcondities.

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 van 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.

SUMMARY

In the Netherlands there are many WWTP's of the oxidation ditch type with surface aeration. An effective and frequently used measure to save energy is to replace these surface aerators with diffuse fine bubble aeration. The way in which this is done differs per WWTP and the energy gains of these measures vary greatly. In order to gain more insight and clarity about the application of fine bubble aeration in oxidation ditches, STOWA has carried out a research project. The report can be used to gain more insight into the complex interactions between configuration, propulsion and aeration in an oxidation ditches. The measurement and model results can give direction to the choices that the designer of a WWTP faces.

The goal of this project is to formulate the do's and don'ts when installing bubble aeration in an oxidation ditch. This concerns in particular the placement of the aeration elements in the tank, and the influence thereof on the flow rate and the oxygen transfer. To achieve this goal, a CFD model of an oxidation ditch has been set up, with which the flow and the oxygen input in the oxidation ditch can be modeled. This model has been validated on the basis of practical measurements at the Soerendonk WWTP. With the validated model, the optimization options were then examined.

Various types of measurements were carried out at the Soerendonk WWTP. This concerns flow rate measurements, both 1D (in the flow direction) and 3D, and measurements of the oxygen input capacity. The results of the 1D flow rate measurements were first used to verify a 1D flow model of the oxidation ditch. This model has been used to gain insight into the resistance factors in an oxidation ditch. The resistance consists of fixed resistances (bends, walls, obstacles) and variable resistances (due to the fine bubble aeration). The resistance of the air bubbles increases as the aeration capacity increases and as the flow velocity decreases. The results of this were used together with the results of the 3D flow rate measurements and the oxygen input measurements to calibrate the CFD model. This concerns successively the calibration of the flow and the oxygen input.

The model is generally well able to calculate the flow rate that has been measured in practice. The flow pattern around the aeration grids is also well modeled. The CFD model calculates trends in the oxygen input that are known; an increase in oxygen transfer at lower surface load and at higher flow rates. The influence of the positioning of the aeration elements on the oxygen transfer is small according to the model, except when placing aeration elements in the bend.

On the basis of simulation calculations under practical conditions, it can be demonstrated that the effective oxygen input can deviate in practice from the oxygen input as prescribed and measured under clean water conditions. The measured oxygen input is based on standard conditions in oxygen-free water. In practice, the positioning of the aeration grids and the flow velocity have an effect on the oxygen deficit and therefore on the oxygen transfer. For example, it can be concluded that the splitting of an aeration field into two (or more) smaller aeration fields, admittedly leads to a lower flow rate, but also to an increase of the oxygen input under practical conditions.

DE STOWA IN BRIEF

The Foundation for Applied Water Research (in short, STOWA) is a research platform for Dutch water controllers. STOWA participants are all ground and surface water managers in rural and urban areas, managers of domestic wastewater treatment installations and dam inspectors.

The water controllers avail themselves of STOWA's facilities for the realisation of all kinds of applied technological, scientific, administrative legal and social scientific research activities that may be of communal importance. Research programmes are developed based on requirement reports generated by the institute's participants. Research suggestions proposed by third parties such as knowledge institutes and consultants, are more than welcome. After having received such suggestions STOWA then consults its participants in order to verify the need for such proposed research.

STOWA does not conduct any research itself, instead it commissions specialised bodies to do the required research. All the studies are supervised by supervisory boards composed of staff from the various participating organisations and, where necessary, experts are brought in.

The money required for research, development, information and other services is raised by the various participating parties. At the moment, this amounts to an annual budget of some 6,5 million euro.

For telephone contact number is: +31 (0)33 - 460 32 00.

The postal address is: STOWA, P.O. Box 2180, 3800 CD Amersfoort.

E-mail: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl.

BELLENBELUCHTING IN OXIDATIESLOTEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
	SUMMARY	
	DE STOWA IN BRIEF	
1	INLEIDING	1
2	ACHTERGROND EN OPZET VAN HET ONDERZOEK	2
2.1	Achtergronden	2
2.2	Voorbeeldprojecten	4
2.2.1	RWZI Amersfoort	4
2.2.2	RWZI Zwolle	5
2.3	Opzet van het onderzoek	6
3	METINGEN RWZI SOERENDONK	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Beschrijving rwzi Soerendonk	7
3.3	Meetprogramma	9
3.3.1	Inleiding	9
3.3.2	Metingen	9
3.3.3	Meetprogramma	11
3.4	Meetresultaten	12
3.4.1	Stroomsnelheid (1D)	12
3.4.2	3D-stroming	15
3.4.3	Zuurstofinbreng	17

4	STATISCHE BEREKENINGEN	19
4.1	Inleiding	19
4.2	Theoretische achtergrond	19
4.3	Resultaten rwzi Soerendonk	21
4.3.1	Inleiding	21
4.3.2	Systeemweerstand	21
4.3.3	Weerstand bellenbeluchting	21
5	CFD MODELBEREKENINGEN	23
5.1	Inleiding	23
5.2	Beschrijving CFD model rwzi Soerendonk	23
5.3	Resultaten stroomsnelheidsberekeningen	24
5.4	Resultaten 3D-snelheidsprofielen	26
5.5	Resultaten OC-metingen	29
5.5.1	Inleiding	29
5.5.2	Herberekening 1D-model	29
5.5.3	Calibratie CFD model	30
5.5.4	OC onder verschillende procescondities	31
5.6	Conclusies	33
6	EVALUATIE	34
6.1	Inleiding	34
6.2	Resultaten afwijkende configuraties	34
6.3	Zuurstofinbreng onder praktijkomstandigheden	35
6.4	Gevoeligheidsanalyse belgrootte	38
6.5	Nawoord	39
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	40
7.1	Conclusies	40
7.2	Aanbevelingen	41
8	REFERENTIES	42
BIJLAGE 1	Resultaten van de 3D-stroomsnelheidsmetingen – Meting 10	43
BIJLAGE 2	Resultaten van de 3D-stroomsnelheidsmetingen – Meting 11	47
BIJLAGE 3	Resultaten van de 3D-stroomsnelheidsmetingen – Meting 12	51
BIJLAGE 4	Beschrijving CFD model	56
BIJLAGE 5	Modelresultaten – 3D-snelheidsprofielen	61
BIJLAGE 6	Aanvullende OC-metingen scenario 8 en 11	67

1

INLEIDING

In Nederland is ongeveer de helft van de rwzi's uitgerust met oppervlaktebeluchting [ref. 1]. Een groot deel hiervan betreft oxidatiesloten met puntbeluchting (Carrousel) of beluchtingsrotoren. Op het totale energiegebruik van een rwzi neemt de beluchting het grootste aandeel in (gemiddeld 55 - 60%). De meest effectieve maatregel om energie te besparen is het vervangen van oppervlaktebeluchters door diffuse fijne bellenbeluchting. In het kader van de MJA3 is reeds op verschillende rwzi's de beluchting aangepast. De wijze waarop dit gebeurt verschilt per rwzi. Er zijn rwzi's waar alle oppervlaktebeluchting wordt vervangen door bellenbeluchting. Er zijn ook rwzi's waar een deel van de oppervlaktebeluchting is vervangen door bellenbeluchting, en waar hybride beluchting plaatsvindt (zie Afbeelding 3). Ook de uitvoeringsvorm en lay-out van de bellenbeluchting in een oxidatiesloot verschilt sterk. Vaak wordt de bellenbeluchting over de hele breedte van een been geplaatst. Regelmatig wordt de beluchting echter over een deel van de beenbreedte geïnstalleerd of zelfs in de bocht. Dit wordt gedaan om bijvoorbeeld de drijfslag te breken of om de doorstroming te verbeteren.

In de praktijk blijkt de energiewinst van deze maatregelen sterk te variëren. Er zijn rwzi's waar een grote energiebesparing op de beluchting wordt gehaald. Er zijn echter ook rwzi's waar de verwachte energiebesparing erg tegenvalt of zelfs helemaal niet optreedt. Om meer inzicht en eenduidigheid te verkrijgen over de toepassing van bellenbeluchting in oxidatiesloten is door STOWA een onderzoeksproject uitgevoerd. Het doel van dit project is het formuleren van de do's en don'ts bij installatie van bellenbeluchting in een oxidatiesloot. Het gaat hierbij met name om de plaatsing van het bellenpakket in de tank, en de invloed daarvan op de stroomsnelheid en de zuurstofoverdracht.

De achtergronden en opzet van het onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 zijn de metingen beschreven welke zijn uitgevoerd op de rwzi Soerendonk. Op basis van de metingen is met statische en dynamische modelberekeningen onderzocht welke invloed bellenbeluchting heeft op de stroming en de zuurstofoverdracht. De statische berekeningen zijn gepresenteerd in hoofdstuk 4, de CFD-modelberekeningen in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 zijn de resultaten van het onderzoek geëvalueerd. De conclusies en aanbevelingen zijn in hoofdstuk 7 gepresenteerd.

2

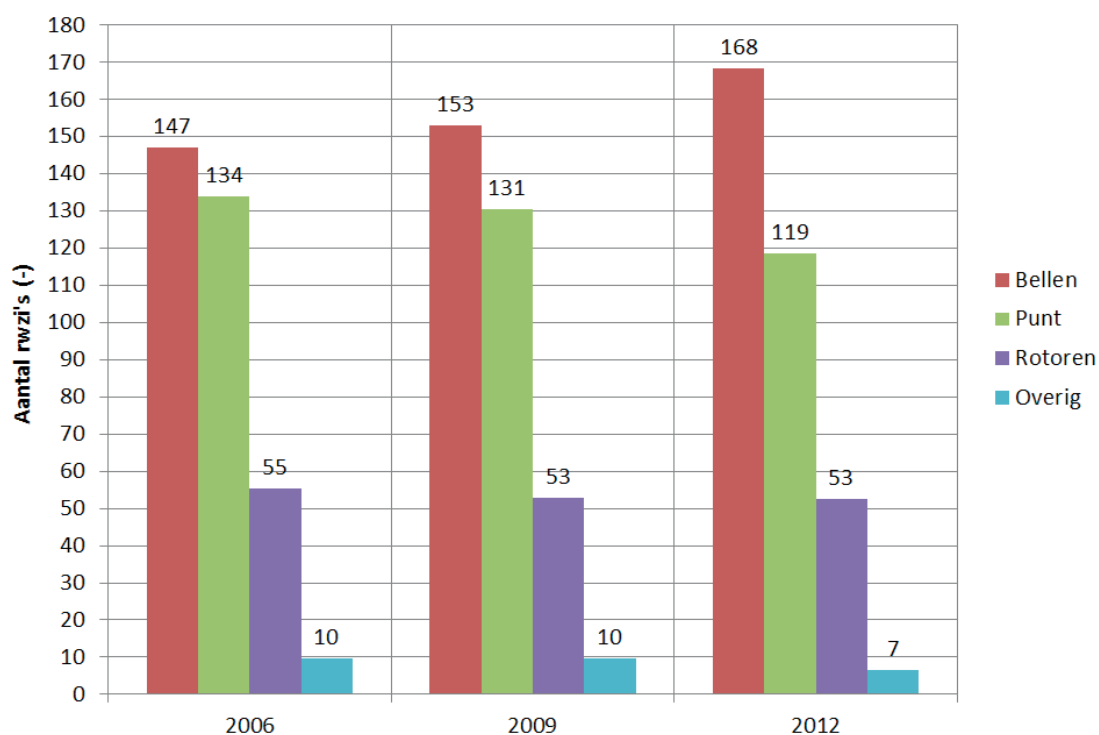
ACHTERGROND EN OPZET VAN HET ONDERZOEK

2.1 ACHTERGRONDEN

In Nederland is een groot deel van de rwzi's van het type oxidatiesloot, uitgerust met puntbeluchting (Carrousel) of roteren. In Afbeelding 1 is weergegeven hoeveel rwzi's met de verschillende vormen van beluchting er waren in 2006, 2009 en 2012 [ref.1]. Hieruit blijkt dat het aantal rwzi's met bellenbeluchting stijgt ten koste van het aantal rwzi's met puntbeluchting. Dit komt doordat op bestaande rwzi's de puntbeluchters geheel of gedeeltelijk worden vervangen door bellenbeluchting. Tussen 2009 en 2012 is het aantal rwzi's met bellenbeluchting met 15 gestegen, dit is 4% van het totale aantal rwzi's in Nederland.

AFBEELDING 1

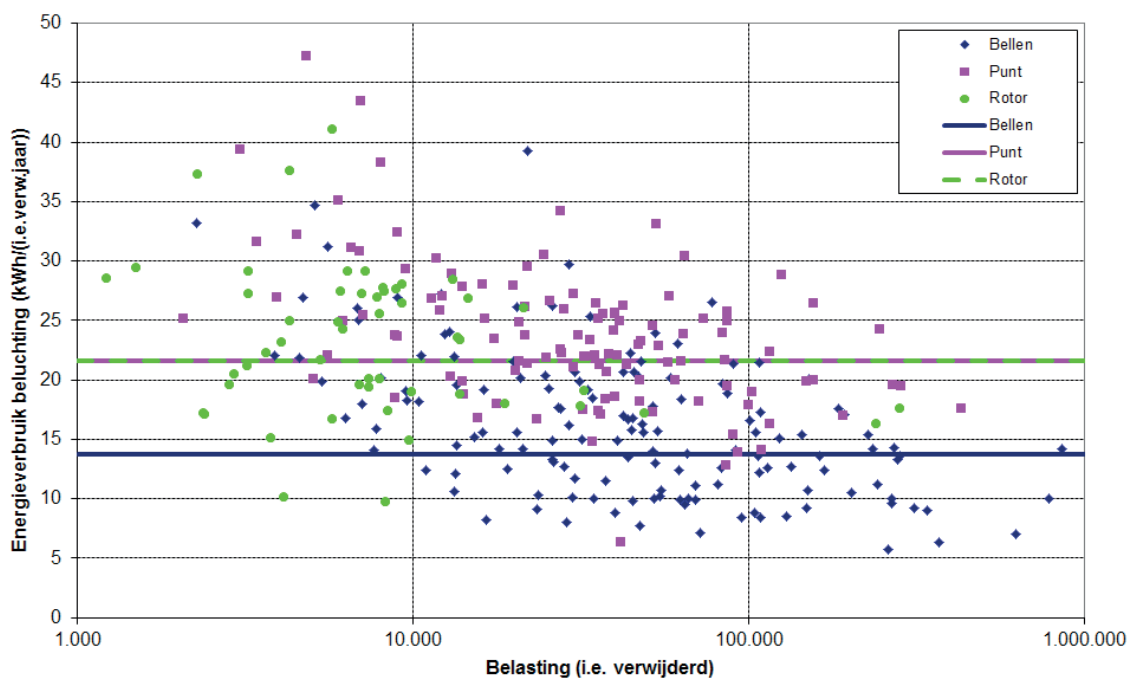
HET TYPE BELUCHTING VAN ALLE RWZI'S VAN NEDERLAND IN 2006, 2009 EN 2012 [REF. 1]



De reden dat deze vervanging plaatsvindt is energiebesparing. Het rendement van puntbeluchting is 1,8-2,2 kg O₂/kWh, terwijl dit voor fijne bellenbeluchting 3,0-4,5 kg O₂/kWh bedraagt. Het toepassen van bellenbeluchting kan tot een energiebesparing op de beluchting leiden van 25-60%. Hierbij dient te worden opgemerkt dat vaak wel extra energie voor voortstuwing en menging nodig is.

Voor het jaar 2009 is in Afbeelding 2 het energieverbruik van de beluchting van alle rwzi's in Nederland weergegeven [ref. 2]. Hierbij is onderscheid gemaakt in de rwzi's met bellenbeluchting, puntbeluchting en beluchtingsrotoren. De installaties met hybride beluchting (b.v. puntbeluchting én bellenbeluchting) zijn niet getoond. Op basis van deze afbeelding kan worden geconcludeerd dat rwzi's met bellenbeluchting een gemiddeld energieverbruik voor de beluchting van 16,2 kWh/(v.e.jaar) hebben. Voor rwzi's met puntbeluchting of beluchtingsrotoren is dit circa 23,5 kWh/(v.e.jaar). Het gemiddelde energieverbruik van de beluchting van de rwzi's met bellenbeluchting is ruim 30% lager dan met punt- en rotorbeluchting.

AFBEELDING 2 HET ENERGIEVERBRUIK VAN DE BELUCHTING VAN ALLE NEDERLANDSE RWZI'S [2009, REF. 2]



Op het totale energiegebruik van een rwzi neemt de beluchting het grootste aandeel in (gemiddeld 55 - 60%). Uit een inventarisatie uit 2009 blijkt dat de meest energiezuinige rwzi's in Nederland bellenbeluchting met een lage elementbelasting toepassen [ref. 3]. De meest effectieve maatregel om energie te besparen is dan ook het vervangen van oppervlaktebeluchters door diffuse fijne bellenbeluchting. In het kader van de MJA3 is reeds op verschillende rwzi's de beluchting aangepast. De wijze waarop dit gebeurt verschilt per rwzi. Er zijn rwzi's waar alle oppervlaktebeluchting wordt vervangen door bellenbeluchting. Er zijn ook rwzi's waar een deel van de oppervlaktebeluchting is vervangen door bellenbeluchting, en waar hybride beluchting plaatsvindt (zie Afbeelding 3). Ook de uitvoeringsvorm en lay-out van de bellenbeluchting in een oxidatiesloot verschilt sterk. Vaak wordt de bellenbeluchting over de hele breedte van een been geplaatst. Regelmatig wordt de beluchting echter over een deel van de beenbreedte geïnstalleerd [ref. 4] of bijvoorbeeld in de bocht geplaatst [ref. 5].

In de praktijk blijkt de energiewinst van deze maatregelen sterk te variëren. Er zijn rwzi's waar 30-50% energiebesparing op de beluchting wordt gehaald. Er zijn echter ook rwzi's waar de verwachte energiebesparing erg tegenvalt of zelfs helemaal niet optreedt. Dit kan allerlei oorzaken hebben; een verkeerde plaats van de bellenpakketten, onvoldoende diepte van de tank, een slecht functionerende beluchterregeling etc. Wat echter ook een belangrijke factor is voor het energieverbruik van een oxidatiesloot met (hybride) bellenbeluchting, is de stroming in de tank. Het plaatsen van bellenbeluchting leidt tot extra weerstand in de tank. De

grootte van deze weerstand is afhankelijk van de stroomsnelheid [ref. 6, paragraaf 3.6.6.]. De stroomsnelheid dient zodanig hoog te zijn dat de spiraalstromen rondom de belLENpakketten worden onderdrukt. Dit leidt tot de hoogste zuurstofoverdracht en de laagste weerstand. In het genoemde rapport [ref. 6] wordt aangegeven dat het helaas nog niet mogelijk is om deze benodigde snelheid te berekenen, omdat daarvoor de formules nog onvoldoende met metingen zijn onderbouwd. Dit is het geval voor ronde reactoren maar geldt zeker ook voor oxidatiesloten. Om te voorkomen dat de extra weerstand van de belLENbeluchting tot lage stroomsnelheden leidt, worden vaak extra voortstuwers geplaatst. Dit leidt tot extra energie-verbruik t.b.v. voortstuwing.

Doordat er niet altijd voldoende kennis is over de weerstanden in een oxidatiesloot met belLENbeluchting, worden niet-optimale ontwerpen gemaakt. Het komt bijvoorbeeld voor dat de voortstuwing toch niet voldoende is en dat het toch nodig is om altijd een puntbeluchter bij te zetten om de snelheid te waarborgen. Dit heeft uiteraard een negatief effect op de energiewinst. Indien er meer bekend is over de hydraulica van een oxidatiesloot met belLENbeluchting kan de inrichting van de tank (plaats van de belLENpakketten, aantal en capaciteit van de voortstuwers) beter worden bepaald.

2.2 VOORBEELDPROJECTEN

2.2.1 RWZI AMERSFOORT

Sinds de uitbreiding in de jaren 90 bestond de rwzi Amersfoort (304.000 i.e. à 150 g TZV) van Waterschap Vallei en Veluwe uit twee Carrousels met elk 4 puntbeluchters. In maart/april 2011 is in beide Carrousels belLENbeluchting geïnstalleerd en in bedrijf genomen. Het uitgangspunt hierbij was een hybride beluchting waarbij de belLENbeluchting voor de basisbeluchting zorg draagt (circa 40% van het totaal) en de puntbeluchters voor de extra benodigde zuurstof. Er is voor gekozen om één puntbeluchter per Carrousel te verwijderen en een blower te installeren in het beluchterhuisje (zie Afbeelding 3).

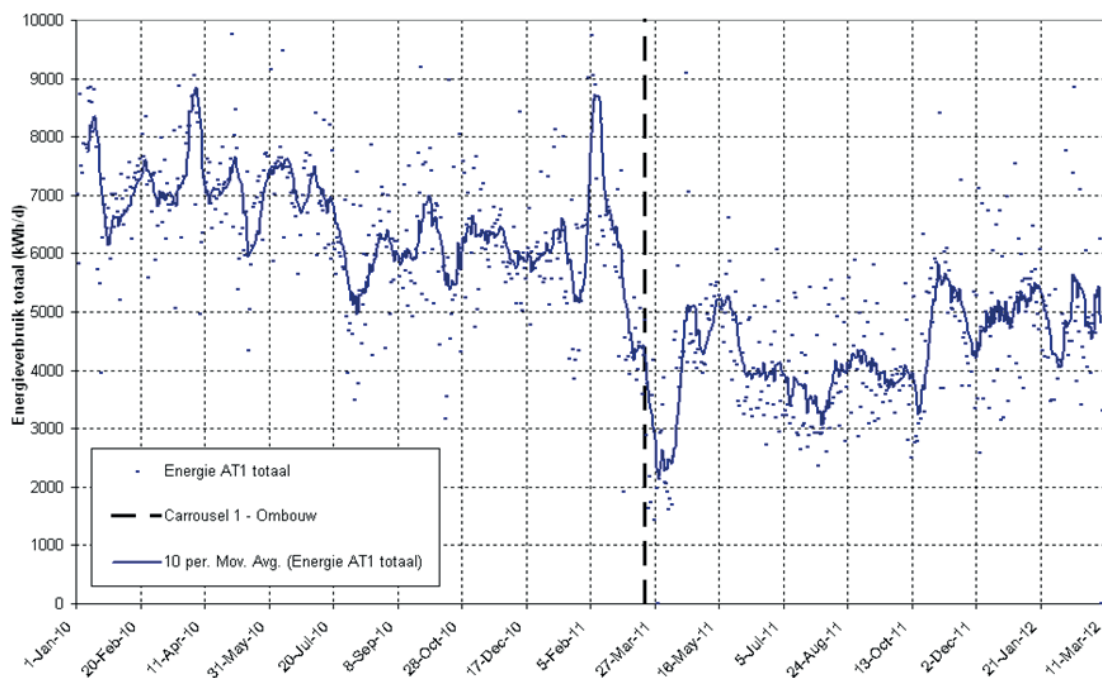
AFBEELDING 3 BELUCHTERHUISJE OP DE RWZI AMERSFOORT



De reden om slechts één puntbeluchter te vervangen is dat dit relatief de hoogste energie-winst oplevert. De bellenbeluchting zal hierbij altijd in bedrijf zijn, terwijl de kosten relatief laag zijn. Daarnaast is de negatieve invloed op de stroomsnelheid beperkt waardoor geen extra voortstuwers benodigd waren.

In de praktijk staat de bellenbeluchting altijd aan (basisbeluchting) en komen de puntbeluchters bij indien nodig. De invloed van deze ombouw op het energieverbruik van de één van de reactoren is weergegeven in Afbeelding 4. Op basis van deze grafiek kan een energiebesparing van circa 35% worden afgeleid.

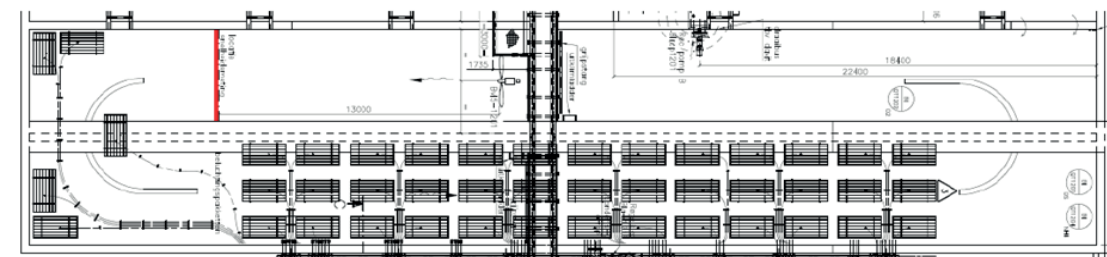
AFBEELDING 4 ENERGIEBESPARING OP DE BELUCHTING VAN DE RWZI AMERSFOORT



2.2.2 RWZI ZWOLLE

De rwzi Zwolle (180.000 i.e. à 150 g TZV) van Waterschap Groot Salland is in 2011 aangepast. De vier propstroombeluchtingstanks zijn omgebouwd tot omloopsystemen met bellenbeluchting en een vijfde gelijksoortige reactor is bijgebouwd. Elke tank heeft een volume van 1.830 m³ en is uitgevoerd met 39 beluchtingsplaten in één been en 5 platen in de bocht, zoals weergegeven in Afbeelding 5. Er is één voortstuwer in het andere been geplaatst die voor de stroming moet zorgen.

AFBEELDING 5 DE INRICHTING VAN DE BELUCHTINGSTANKS VAN RWZI ZWOLLE



Na de ombouw zijn stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd. Hieruit bleek dat de stroomsnelheid ruim onder de 20 cm/s was terwijl in het ontwerp van 30 cm/s was uitgegaan. Ook de zuurstofinbreng bleef achter bij het ontwerp. Om deze reden zijn CFD-berekeningen uitge-

voerd om te onderzoeken welke maatregelen tot een verhoging van de stroomsnelheid leiden. De belangrijkste aanbevelingen waren:

- Het uitzetten van de beluchterplaten in de bocht;
- Het vergroten van de stuwkracht van de voortstuwer;
- Aanpassingen aan de instroming in de reactor.

Daarnaast zijn extra beluchtingsplaten in het andere been geïnstalleerd om de plaatbelasting te verlagen en de zuurstofinbreng te verhogen. Het bleek met deze maatregelen niet mogelijk om aan de ontwerpeisen te voldoen, maar wel om de situatie te verbeteren. De problematiek op de rwzi Zwolle komt vaker voor en geeft aan dat de (invloed van) voortstuwing bij de inrichting van een omloopsysteem met bellenbeluchting niet moet worden onderschat.

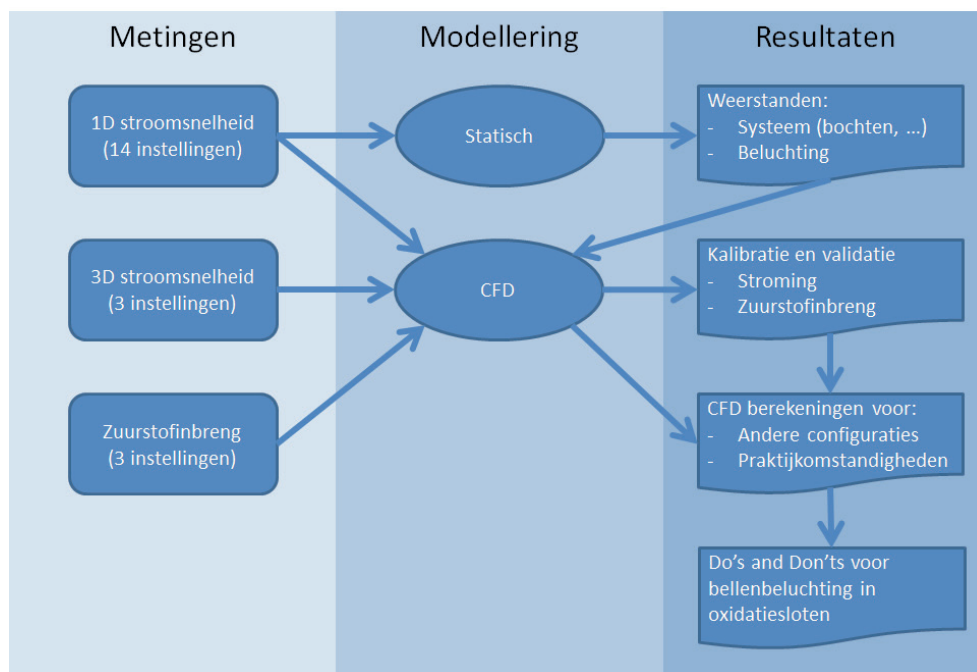
2.3 OPZET VAN HET ONDERZOEK

Om meer inzicht en eenduidigheid te verkrijgen over de toepassing van bellenbeluchting in oxidatiesloten is door STOWA dit onderzoeksproject uitgevoerd. Het doel van dit project is het formuleren van de do's en don'ts bij installatie van bellenbeluchting in een oxidatiesloot. Het gaat hierbij met name om de plaatsing van het bellenpakket in de tank, en de invloed daarvan op de stroomsnelheid en de zuurstofoverdracht.

De opzet van het onderzoek is schematisch weergegeven in Afbeelding 6. Centraal in het onderzoek staat de opzet en validatie van een CFD-model van een oxidatiesloot. Met dit model kan de stroming en de zuurstofinbreng in het omloopsysteem worden gemodelleerd. Dit model is gevalideerd op basis van praktijkmetingen op de rwzi Soerendonk, dit betreft zowel stroomsnelheidsmetingen (1D en 3D) als metingen van de zuurstofinbreng. Met het gevalideerde model kunnen vervolgens de optimalisatiemogelijkheden worden onderzocht. Zo kan bijvoorbeeld worden onderzocht wat het effect is van het plaatsen van bellenpakketten in de bochten op zowel de stroomsnelheid als de zuurstofinbreng. De resultaten van de berekeningen leiden tot inzichten en dienen als basis voor het definiëren van de do's en don'ts.

AFBEELDING 6

OPZET VAN HET ONDERZOEK



3

METINGEN RWZI SOERENDONK

3.1 INLEIDING

Ten behoeve van het onderzoek is een meetprogramma uitgevoerd op de rwzi Soerendonk van het waterschap De Dommel. Afbeelding 7 toont een luchtfoto van de installatie. De installatie is in 2012 geheel nieuw gebouwd en heeft een ontwerpcapaciteit van 38.170 v.e. (à 150 g TZV) en 1.830 m³/h.

AFBEELDING 7 LUCHTFOTO VAN DE RWZI SOERENDONK



In dit hoofdstuk zijn de opzet van het meetprogramma en de resultaten hiervan beschreven. Allereerst is in paragraaf 3.2 de rwzi Soerendonk beschreven. De opzet van het meetprogramma is toegelicht in paragraaf 3.3. In paragraaf 3.4 zijn de meetresultaten gepresenteerd.

3.2 BESCHRIJVING RWZI SOERENDONK

De rwzi Soerendonk is een laagbelast actiefslibstelsysteem, bestaande uit een anaërobe tank, een voordennitrificatietank, een beluchtingstank en twee nabezinktanks. Het effluent wordt in een watertuin nabehandeld. De beluchtingstank is een 2-beens Carrousel met bellenbeluchting en vier voortstuwers. De belangrijkste onderdelen zijn weergegeven in Tabel 1.

TABEL 1

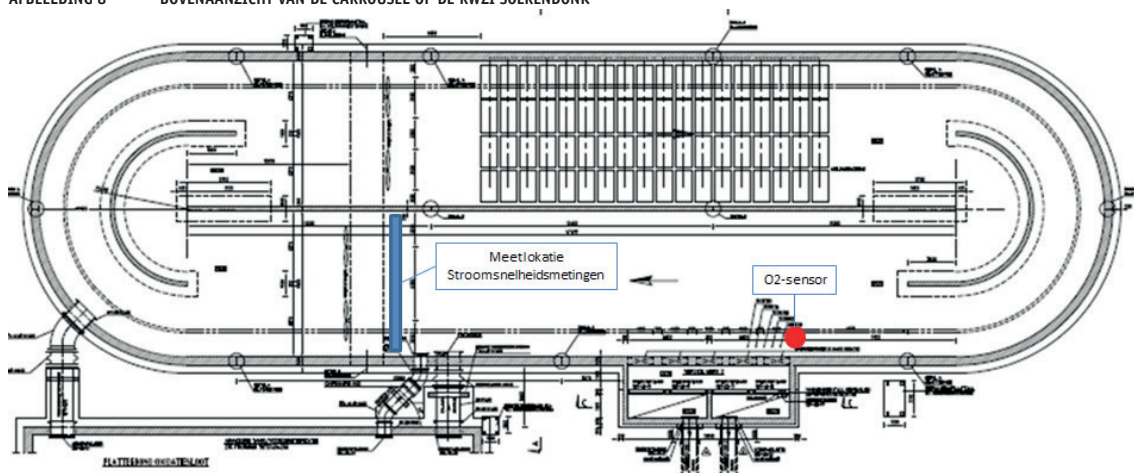
ONTWERPGEGEVENS VAN DE CARROUSEL OP DE RWZI SOERENDONK

Procesonderdeel	Parameter	Eenheid	Waarde
Carrousel	Volume	m ³	5.000
	Waterdiepte	m	4,4
	Aantal benen	-	2
	Beenbreedte	m	9,0
Bellenbeluchting	Type	-	Plaatbeluchting
	Fabriek	-	Messner V20M50
	Aantal beluchtingsplaten	-	4 x 18 = 72
	Oppervlakte elementen	m ²	144
	Capaciteit blowers	Nm ³ /h	4.320
	Maximale plaatbelasting	Nm ³ /(m ² .h)	30
Voortstuwers	Type	-	Flygt SR4410
	Bladdiameter	m	2,5
	Toerental	rpm	25
	Aantal	-	4 (waarvan 2 met F0)
	Vermogen elk	kW	2,3
	Stuwkracht elk	N	1.710

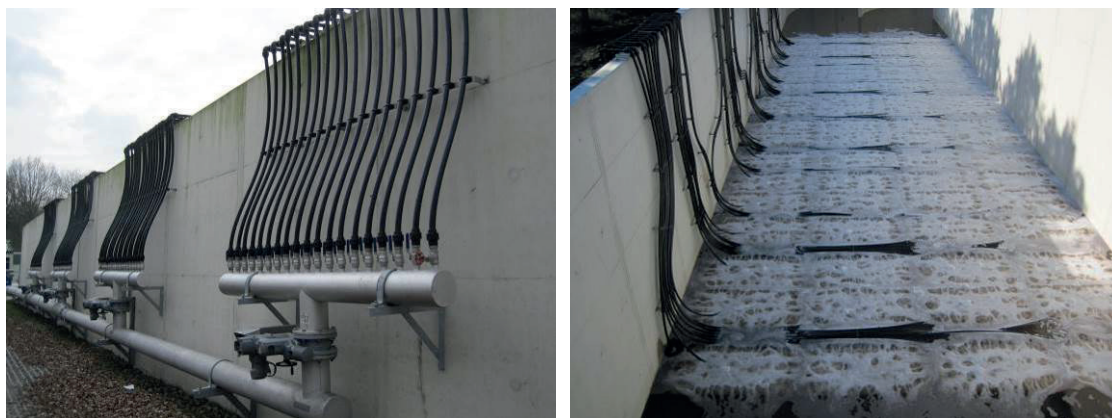
In Afbeelding 8 is een bovenaanzicht van de Carrousel weergegeven. De belangrijkste kenmerken van de beluchtingstank zijn:

- De tank is hydraulisch optimaal ontworpen. De bochten zijn rond en voorzien van doorgetrokken geleidewanden. Dit betekent dat de weerstand die de tank uitoefent op de stroming relatief gering is. De stromingsrichting in Afbeelding 8 is van links naar rechts in het bovenste been (met beluchting).
- De 72 beluchtingsplaten zijn verdeeld over 4 beluchtingsvelden welke strak achter elkaar in één been zijn geplaatst. De platen zijn dicht tegen elkaar en tegen de zijwanden aangelegd. Elke beluchtingsplaat heeft een eigen toevoerslag welke middels een handafsluiter dicht of open is te zetten (zie Afbeelding 9). In normaal bedrijf zijn alle velden in bedrijf.
- De 4 voortstuwers zijn in paren verdeeld over beide benen. In normaal bedrijf zijn alle voortstuwers in bedrijf.
- De toevoer vanuit de anaërobe tank vindt plaats aan het begin van de bocht stroomopwaarts van de bellenpakketten. De afvoer naar de nabezinktanks vindt plaats via een overstortrand aan het begin van het been zonder beluchting. Iets verder stroomafwaarts vindt de onttrekking van actiefslib plaats ten behoeve van de recirculatie naar de anaërobe tank.

AFBEELDING 8 BOVENAANZICHT VAN DE CARROUSEL OP DE RWZI SOERENDONK



AFBEELDING 9 LUCHTHEADER EN TOEVOERLEIDINGEN IN EN BUITEN DE TANK



De belangrijkste redenen dat de rwzi Soerendonk is gekozen voor de metingen zijn:

- Het omloopsysteem is representatief, zowel wat betreft de afmetingen (diepte / breedte verhouding) als de configuratie van het belenpakket.
- Van de belenpakketten kunnen onderdelen worden afgeschakeld. Dit betreft zowel de verschillende pakketten als de individuele beluchtingsplaten.
- Het omloopsysteem is een 2-beens systeem. Dit maakt zowel de metingen als de modelberekeningen overzichtelijk.

3.3 MEETPROGRAMMA

3.3.1 INLEIDING

Van 4 t/m 7 juni 2013 zijn metingen uitgevoerd op de rwzi Soerendonk. Het betrof stroomsnelheids- en zuurstofoverdrachtsmetingen onder verschillende bedrijfscondities. De uitgevoerde metingen en toegepaste meetapparatuur zijn beschreven in paragraaf 3.3.2. In paragraaf 3.3.3 is het meetprogramma nader toegelicht.

3.3.2 METINGEN

Er zijn drie typen metingen uitgevoerd. Dit betreft:

- Stroomsnelheidsmeting: meting van de stroomsnelheid door een horizontaal vlak (x-richting);

- 3D-stroming: stroming in de x-, y-, en z-richting op verschillende punten rondom het beluchtingsveld;
- OC-meting: de zuurstofinbreng in actiefslib.

De stroomsnelheidsmetingen zijn uitgevoerd met een EMS-meter (Electro Magnetic Sensor) van het type Marsch-McBirney. De metingen zijn uitgevoerd op de brug in het onbeluchte been (zie Afbeelding 8). Er is een raster van 30 meetpunten bemeet, 6 punten over de breedte en 5 over de diepte. De gerapporteerde stroomsnelheid betreft het gemiddelde van de 30 meetwaarden.

De 3D-stroming is gemeten met de Vector van de firma Nortek (zie linkerfoto in Afbeelding 10). De Vector is een akoestische snelheidsmeter die de snelheid in drie dimensies met een hoge frequentie meet. Met een akoestische meting kan niet in het bellenpakket worden gemeten aangezien luchtbellen de meting verstoren. De metingen kunnen daarom alleen worden uitgevoerd rondom het bellenpakket op plekken waar geen bellen meer aanwezig zijn. Voor de metingen is gebruik gemaakt van een knikarm telescoophoogwerker. De Vector is met een verschuifbare stang aan het bakje van de hoogwerker vastgemaakt (zie rechterfoto in Afbeelding 10). Op deze wijze was het mogelijk om op elke lokatie en diepte te meten en kon worden bewerkstelligd dat de meetsonde altijd in de juiste richting in het water werd ondergedompeld.

AFBEELDING 10 MEETOPSTELLING VAN DE 3D-SNELHEIDSMETINGEN



De OC-metingen zijn uitgevoerd als adsorptiemetingen in actiefslib [ref. 7]. Het betreft in feite een vergelijkende α OC-meting waarbij wordt verondersteld dat de α -factor tijdens de verschillende metingen ongeveer gelijk is gebleven. Deze aanname is plausibel aangezien:

- het influentgemaal was stilgezet zodat er tijdens de metingen geen biologische belasting was;
- voor elke meting de beluchting twee uur maximaal had aangestaan zodat het zuurstofverbruik van het slib op endogeen niveau was;
- de (drie) metingen op twee achtereenvolgende dagen zijn uitgevoerd.

De OC-metingen zijn uitgevoerd met behulp van de aanwezige zuurstofmeter en een mobiele zuurstofmeter.

3.3.3 MEETPROGRAMMA

Er zijn metingen uitgevoerd onder 14 verschillende procescondities. Dit betreft condities waarbij alleen voortstuwers in bedrijf zijn en waarin zowel voortstuwers als een deel van de beluchting in bedrijf zijn. Het meetprogramma is weergegeven in Tabel 2. Het meetprogramma is zodanig opgezet dat het effect van bepaalde condities (b.v. plaatbelasting) op de stroomsnelheid kan worden vastgesteld.

TABEL 2

PROCESCONDITIES EN MEETPROGRAMMA

Nr.	Beluchting	Beluchtingsvelden		Voortstuwers	Instroming	Metingen		
	Capaciteit	Aan	Uit			1D	3D	OC
[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<i>Geen beluchting – verschillende stroomsnelheden</i>								
1	-	-	-	4	NEE	X		
2	-	-	-	3	NEE	X		
3	-	-	-	2	NEE	X		
4	-	-	-	1	NEE	X		
<i>Alle voortstuwers – verschillende beluchtingscapaciteiten / plaatbelastingen</i>								
5	100%	4	-	4	NEE	X		
6	75%	4	-	4	NEE	X		
7	50%	4	-	4	NEE	X		
<i>75% beluchting – verschillende stroomsnelheden</i>								
8	75%	3	1e veld	4	NEE	X		X
9	75%	3	1e veld	3	NEE	X		X
10	75%	3	1e veld	2	NEE	X	X	
<i>Alle voortstuwers – verschillende beluchtingsconfiguraties</i>								
11	75%	4 x 75%	Buitenzijde	4	NEE	X	X	X
12	75%	2 + 2x50%	Midden	4	NEE	X	X	
<i>Geen beluchting – met in- en uitstroming</i>								
13	-	-	-	4	JA	X		
14	-	-	-	2	JA	X		

De metingen 1 t/m 4 zijn uitgevoerd zonder beluchting en met respectievelijk 4, 3, 2 en 1 voortstuwers in bedrijf. Met behulp van deze metingen kan effect van de voortstuwing op de stroomsnelheid worden bepaald. Deze informatie kan worden gebruikt om de weerstand van de tank (wandverliezen, bochten) vast te stellen.

Bij de metingen 5 t/m 7 zijn alle voortstuwers in bedrijf en vindt de beluchting plaats met alle vier de beluchtingsvelden. De beluchtingscapaciteit is achtereenvolgens 100%, 75% en 50%. Hierdoor kan het effect van de beluchtingscapaciteit en de plaatbelasting op de stroomsnelheid worden bepaald.

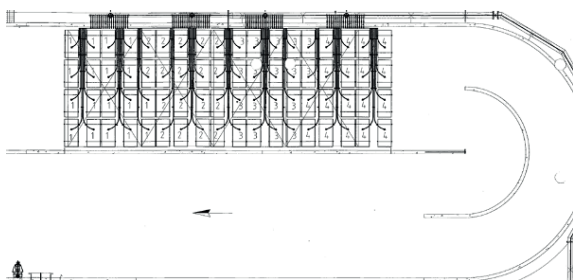
Tijdens meting 8 t/m 10 vindt de beluchting plaats op 75% van de capaciteit met 75% van de beluchtingsplaten in bedrijf (= 54 platen). Hiertoe is het eerste beluchtingsveld afgeschakeld (zie Afbeelding 11). Dit betekent dat de plaatbelasting maximaal is. Achtereenvolgens zijn 4, 3 en 2 voortstuwers in bedrijf genomen. Op basis van de metingen kan de invloed van de stroomsnelheid op de weerstand van het belenpakket worden vastgesteld.

Bij meting 11 en 12 zijn afwijkende configuraties van de beluchtingsvelden ingesteld (zie Afbeelding 11). Bij meting 11 is de luchttoevoer naar de buitenste rij beluchtingsplaten afgesloten. Bij meting 12 zijn de middelste 4 rijen platen afgesloten.

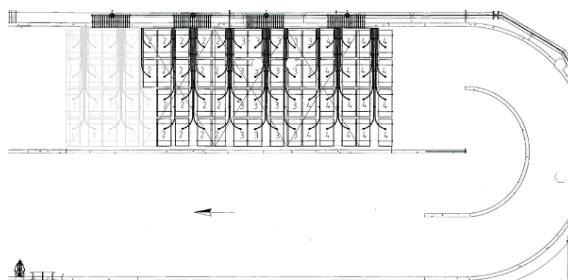
De metingen 13 en 14 zijn uitgevoerd zonder beluchting en met respectievelijk 4 en 2 voortstuwers in bedrijf (net als bij metingen 1 en 3). Bij de metingen 1 t/m 12 stond de aanvoer naar de tank uit. Bij metingen 13 en 14 werd door het rondpompen van slib met behulp van de recirculatiepomp en de retourslibvijzels een toevoer naar de tank nagebootst. De totale toe- en afvoer tijdens deze metingen bedroeg circa 3.000 m³/h.

AFBEELDING 11 CONFIGURATIE VAN DE BELUCHTINGSVELDEN TIJDENS DE VERSCHILLENDE METINGEN

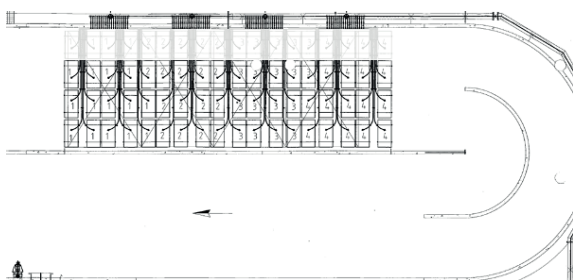
METING 5 T/M 7 – 4 BELUCHTINGSVELDEN



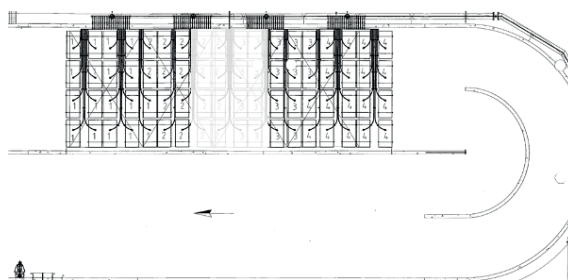
METING 8 T/M 10 – 3 BELUCHTINGSVELDEN (1 UIT)



METING 11 – BUITENSTE RIJ BELUCHTINGSPLATEN UIT



METING 12 – MIDDELSTE 4 RIJEN BELUCHTINGSPLATEN UIT



3.4 MEETRESULTATEN

3.4.1 STROOMSNELHEID (1D)

De stroomsnelheidsmetingen zijn bij alle meetinstellingen uitgevoerd. De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel 3. Ter illustratie is in Afbeelding 12 grafisch weergegeven welke snelheidsvariaties over de breedte en diepte van het been kunnen optreden. Opvallend is dat indien de beluchtenbeluchting aan staat dat de stroomsnelheid aan de binnenzijde van het been hoger is dan aan de buitenzijde. Indien de beluchting uit staat is dit enigszins tegengesteld en is de stroomsnelheid aan de buitenzijde iets hoger.

TABEL 3

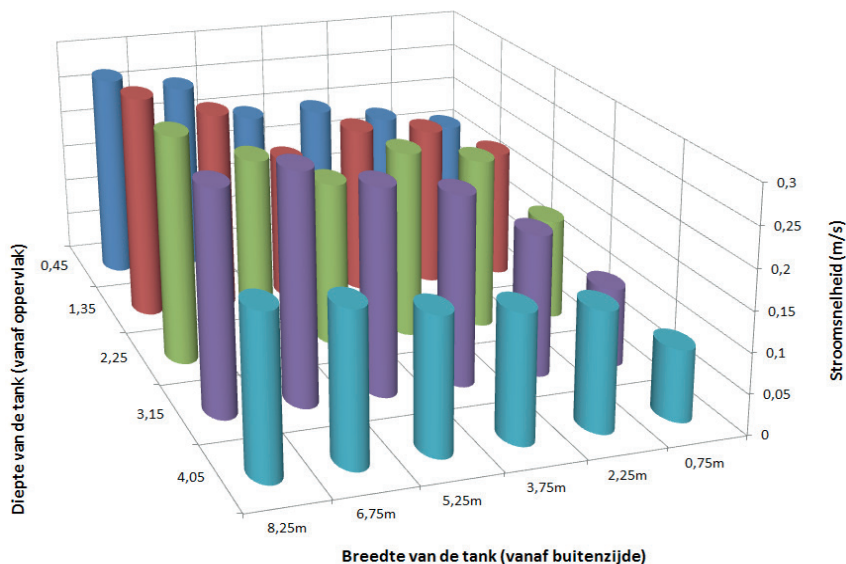
RESULTATEN VAN DE STROOMSNELHEIDSMETINGEN (GEMIDDELDEN)

Nr.	Beluchting	Beluchtingsvelden		Voortstuwers	Instroming	Stroomsnelheid
	Capaciteit	Aan	Uit	Aantal		
[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[cm/s]
<i>Geen beluchting – verschillende stroomsnelheden</i>						
1	-	-	-	4	NEE	31,6
2	-	-	-	3	NEE	25,6
3	-	-	-	2	NEE	20,1
4	-	-	-	1	NEE	15,8
<i>Alle voortstuwers – verschillende beluchtingscapaciteiten / plaatbelastingen</i>						
5	100%	4	-	4	NEE	22,0
6	75%	4	-	4	NEE	23,8
7	50%	4	-	4	NEE	28,2
<i>75% beluchting – verschillende stroomsnelheden</i>						
8	75%	3	1e veld	4	NEE	21,8
9	75%	3	1e veld	3	NEE	16,1
10	75%	3	1e veld	2	NEE	11,0
<i>Alle voortstuwers – verschillende beluchtingsconfiguraties</i>						
11	75%	4 x 75%	Buitenzijde	4	NEE	25,8
12	75%	2 + 2x50%	Midden	4	NEE	23,3
<i>Geen beluchting – met in- en uitstroming</i>						
13	-	-	-	4	JA	29,6
14	-	-	-	2	JA	18,5

Zoals verwacht blijkt uit metingen 1 t/m 4 dat de stroomsnelheid afneemt als er minder voortstuwers in bedrijf zijn. Hetzelfde is het geval als de beluchting aan staat, zoals blijkt uit de metingen 8 t/m 10. In Afbeelding 13 is de relatie tussen de het aantal voortstuwers en de stroomsnelheid weergegeven voor de situatie met en zonder beluchting. Ook zijn de meetpunten van metingen 13 en 14 toegevoegd, waarbij de aanvoer aan stond.

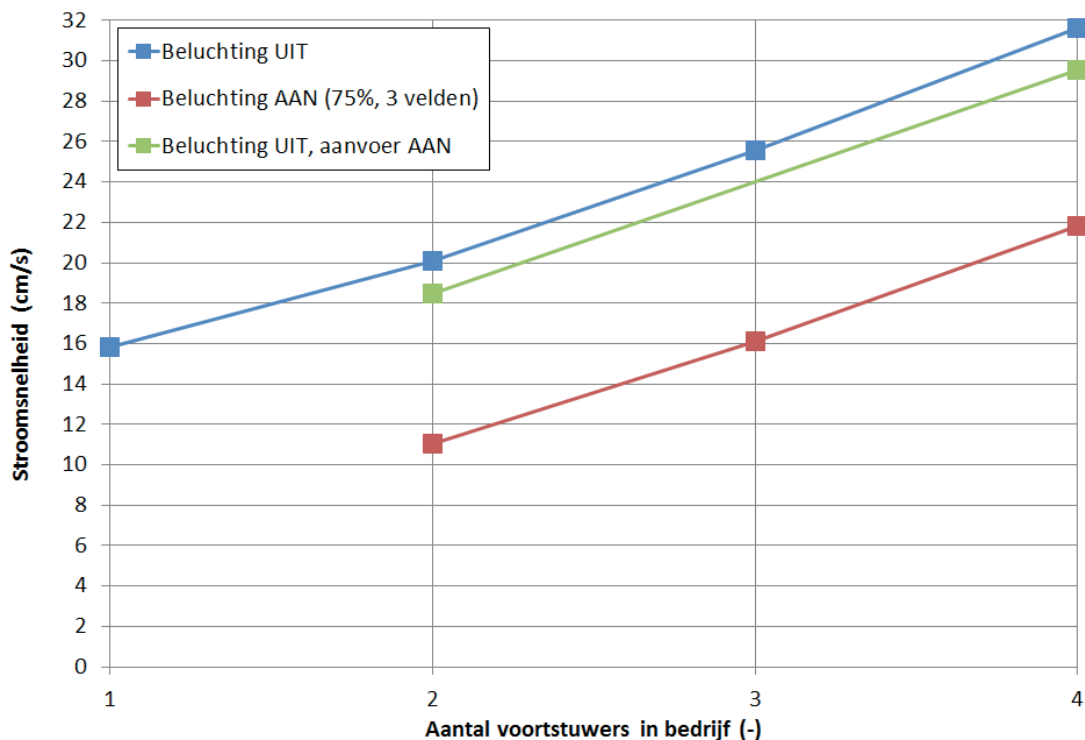
AFBEELDING 12

HET STROOMSNELHEIDSPROFIEL TIJDENS METING 8



AFBEELDING 13

DE STROOMSNELHEID BIJ VERSCHILLENDE AANTALLEN VOORTSTUWERS IN BEDRIJF

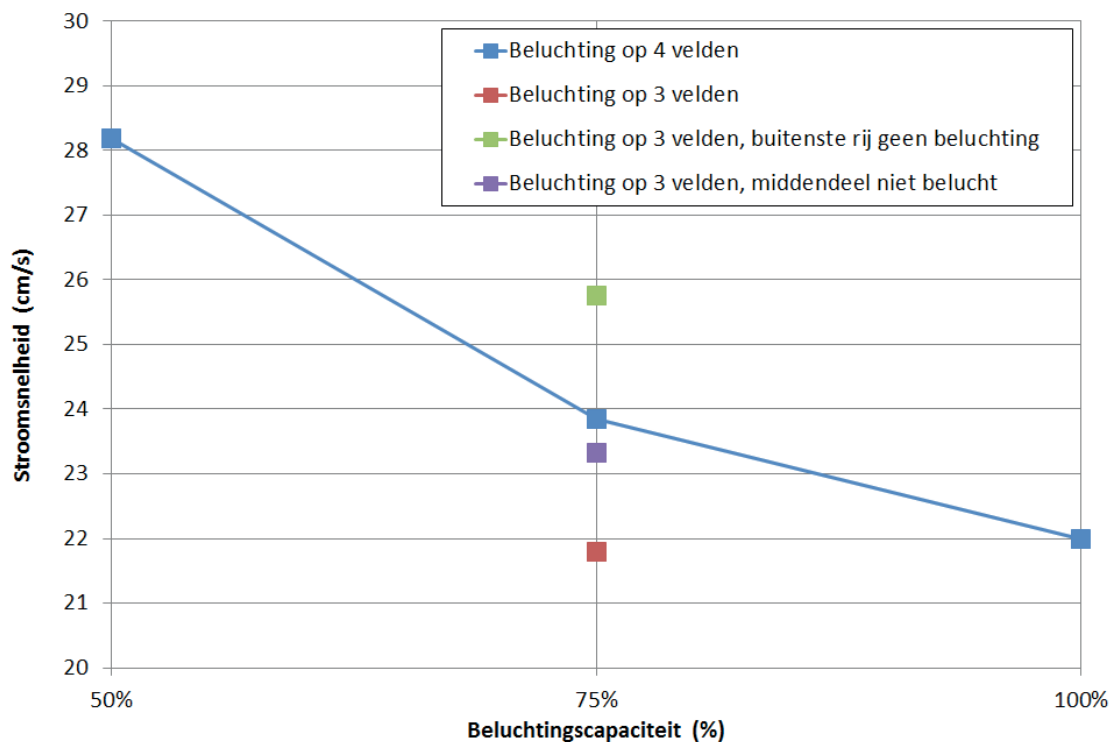


Voor alle situaties geldt dat de stroomsnelheid meer dan lineair toeneemt met het aantal voortstuwers. Het aanzetten van de beluchting op 75% capaciteit ($3.240 \text{ Nm}^3/\text{h}$) leidt tot een afname van de stroomsnelheid van bijna 10 cm/s . Het aanzetten van de aanvoer leidt eveneens tot een afname van de stroomsnelheid, met bijna 2 cm/s .

De resultaten van de metingen 5 t/m 7, 8, 11 en 12 zijn grafisch weergegeven in Afbeelding 14. Deze metingen kunnen met elkaar worden vergeleken omdat ze allemaal zijn uitgevoerd met 4 voortstuwers in bedrijf. De metingen 5 t/m 7 zijn uitgevoerd met alle vier de beluchtingsvelden in bedrijf. De metingen 8, 11 en 12 zijn allen uitgevoerd met 75% beluchtingscapaciteit en drie beluchtingsvelden in bedrijf. Op basis van deze metingen kan het volgende worden gesteld:

- Metingen 5 t/m 7: De stroomsnelheid neemt af als de beluchtingscapaciteit toeneemt;
- Meting 6 en 8: De stroomsnelheid neemt met circa 2 cm/s af als dezelfde hoeveelheid lucht (75%) wordt ingebracht over een kleiner deel van de beluchtingsvelden (4 respectievelijk 3 velden). Hierbij wordt de specifieke belasting van de beluchtingsplaten met 33% verhoogd van 75% ($= 22,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) naar 100% ($= 30 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$).
- Meting 5 en 8: De stroomsnelheid verandert niet als de beluchtingscapaciteit wordt verhoogd van 75% op 3 velden naar 100% op 4 velden. Hierbij is de specifieke belasting van de beluchtingsplaten gelijk ($= 30 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$).
- Meting 8 en 11: De stroomsnelheid neemt met 4 cm/s toe als de buitenste rij platen wordt afgezet in plaats van het eerste veld.
- Meting 8 en 12: De stroomsnelheid neemt iets toe ($1,5 \text{ cm/s}$) als het middeldeel van de platen uitstaat in plaats van het eerste veld.

AFBEELDING 14 DE STROOMSNELHEID BIJ VERSCHILLENDE BELUCHTINGSSCENARIO'S (BIJ 4 VOORTSTUWERS)



3.4.2 3D-STROMING

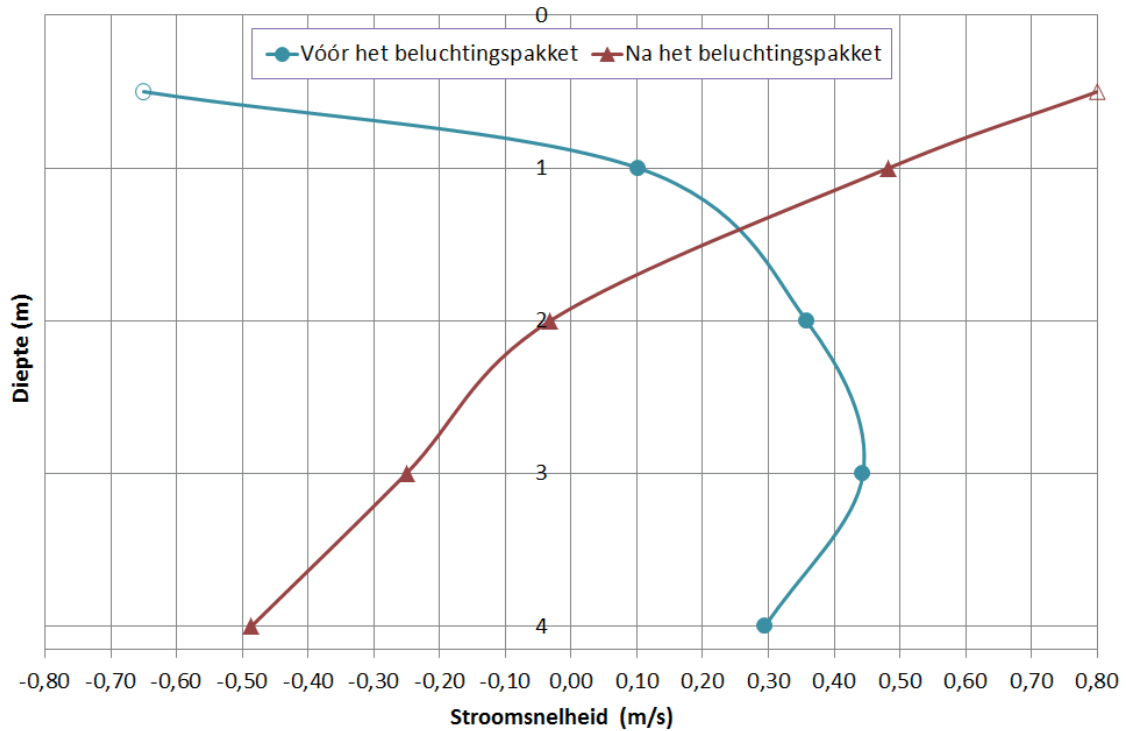
Bij drie instellingen (meting 10, 11 en 12, zie Tabel 2) is op verschillende plaatsen rondom het belienpakket de stroomsnelheid in drie richtingen gemeten. Uit de ruwe meetresultaten blijkt dat de stroomsnelheid soms zeer variabel kan zijn in de tijd. De weergegeven resultaten zijn telkens de gemiddelde stroomsnelheden in de x-, y- en z-richting gedurende een meetperiode van 1-2 minuten. Hierbij geldt:

- de x-richting is de stromingsrichting (+ = met de stroom mee, - = tegen de stroom in);
- de y-richting is de zijwaartse stroming (+ = naar de buitenwand, - = naar de binnenwand);
- de z-richting is de opwaartse stroming (+ = omhoog, - = omlaag).

De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in bijlagen 1 t/m 3. In deze paragraaf zijn de belangrijkste resultaten van de drie metingen weergegeven.

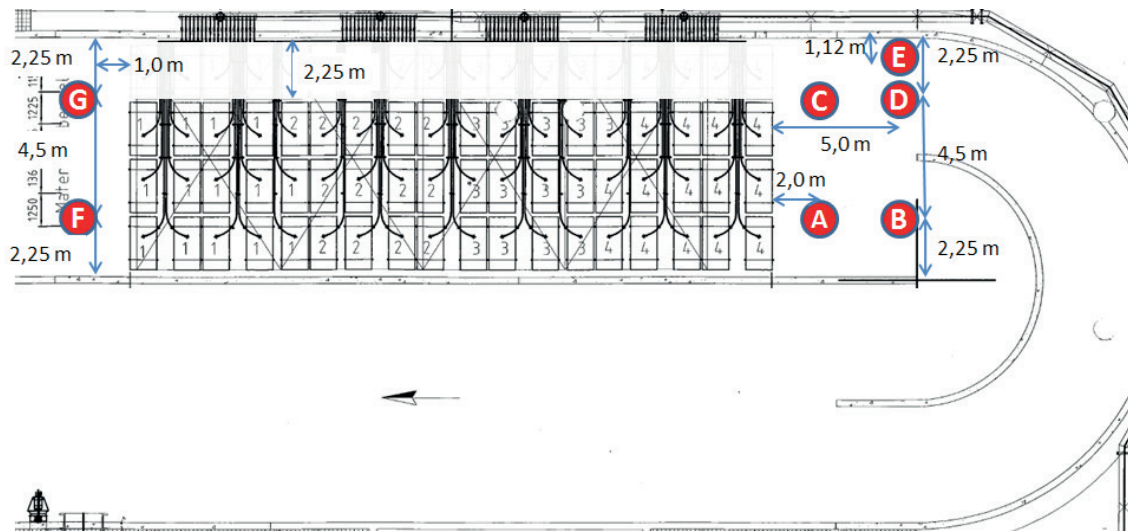
Allereerst zijn de resultaten van meting 10 getoond. Hierbij stond de beluchting op 75%, was het 1^e beluchttingsveld uitgeschakeld en stonden 2 voortstuwers aan. De gemeten stroomsnelheid (in de x-richting) was hierbij relatief laag, namelijk 11 cm/s (zie Tabel 3). In Afbeelding 15 is het verloop van de stroomsnelheid over de diepte weergegeven vóór en vlak na het beluchttingsveld. Het betreft hier de gemiddelde waarden van alle meetpunten. Het punt in de grafiek op een halve meter diepte is niet een werkelijk gemeten punt, maar geëxtrapoleerd op basis van de beschikbare gegevens. Hierbij is als uitgangspunt genomen dat de gemiddelde stroomsnelheid over de diepte gelijk moet zijn aan de gemeten gemiddelde waarde van 11 cm/s. Hoewel deze methodiek discutabel is geeft het naar verwachting wel een goed beeld van de stroomsnelheid aan het oppervlak van de tank.

AFBEELDING 15 STROOMSNELHEIDSPROFIEL TIJDENS METING 10 (X-RICHTING)

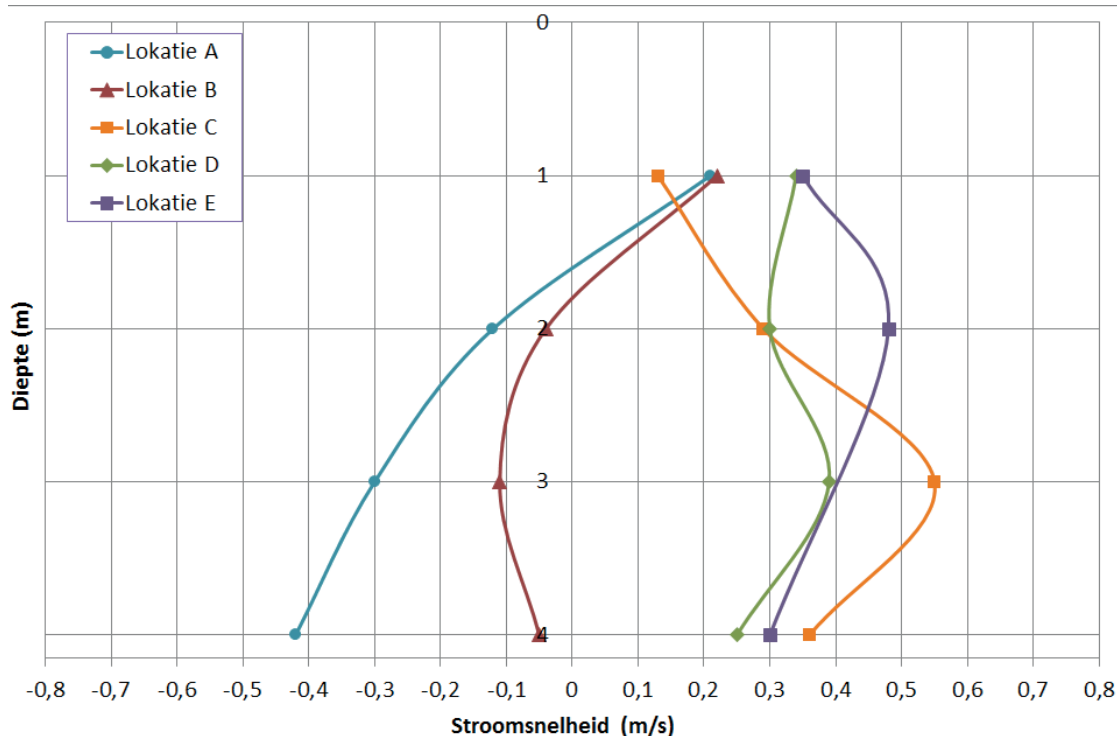


Er is een groot verschil met de stroomsnelheidsprofielen bij meting 11. Dit is de instelling waarbij de buitenste rij platen is uitgezet. In Afbeelding 16 zijn de meetlokaties weergegeven. Op elke lokatie is op vier dieptes gemeten; 1, 2, 3 en 4 meter onder het wateroppervlak. In Afbeelding 17 is het snelheidsprofiel over de diepte in de x-richting (stromingsrichting) weergegeven voor de verschillende meetlokaties na de beluchtingsplaten (lokaties A t/m E).

AFBEELDING 16 POSTITIE VAN DE MEETPUNTEN TIJDENS METING 11



AFBEELDING 17 STROOMSNELHEIDSPROFIEL TIJDENS METING 11 (X-RICHTING)



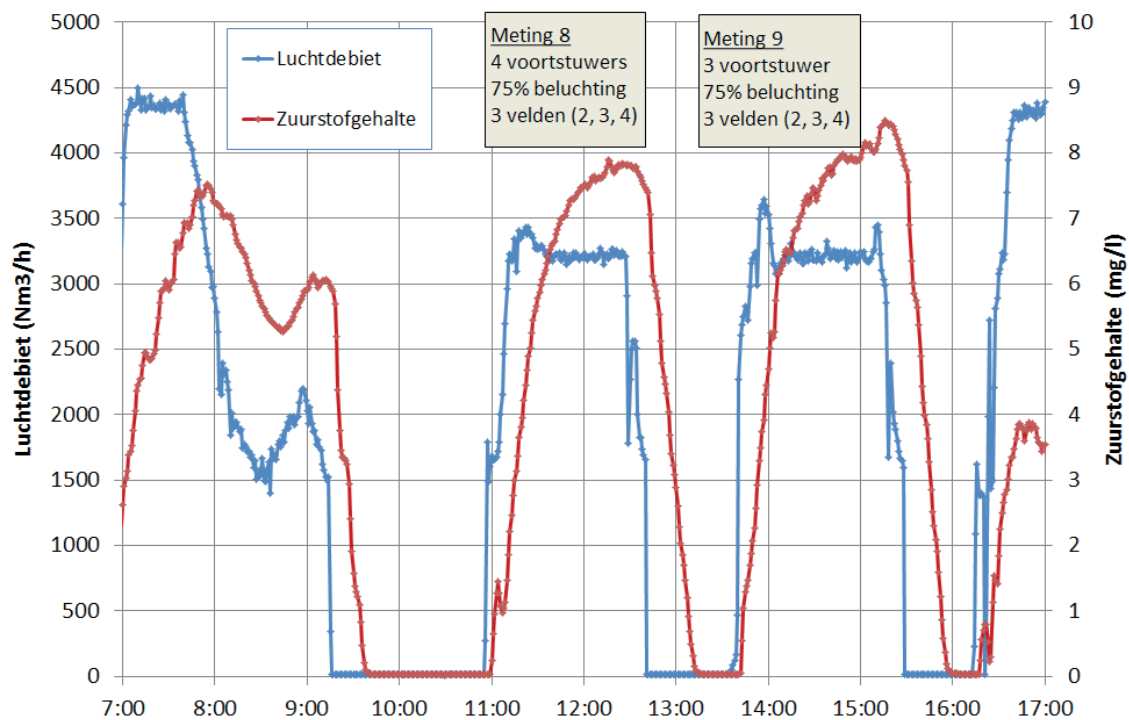
De snelheidsprofielen op lokaties A en B vertonen eenzelfde verloop als bij meting 10. Aan het oppervlak is de stroming positief, dus in de stroomrichting. In het onderste deel van de tank is de stroming negatief, dus in de richting van het belenpakket. Op de lokaties achter de zijde waar de beluchtungsplaten uit zijn gezet, is het snelheidsprofiel duidelijk anders. De stroming is op alle hoogtes positief, wat betekent dat een groot deel van de stroming via de buitenzijde plaatsvindt.

3.4.3 ZUURSTOFINBRENG

Om het effect van de beluchtungsconfiguratie en de stroomsnelheid op de zuurstofoverdracht te kunnen beoordelen zijn bij drie meetinstellingen OC-metingen uitgevoerd. Bij nadere beschouwing bleek dat de procescondities tijdens de derde meting (procesconditie 11 in Tabel 2) niet stabiel waren. De endogene respiratiesnelheid voor de meting was aanzienlijk hoger dan na de meting. Dit betekent dat de respiratiesnelheid tijdens de meting niet constant was waardoor de meting onbruikbaar is.

De resultaten van de overige twee metingen dienen slechts ter vergelijking aangezien de metingen niet volgens de officiële procedure zijn uitgevoerd [ref. 7]. Zo is gebruik gemaakt van slechts twee zuurstofelectrodes en is de alfa-factor van het actief-slibmengsel niet gemeten. Daarnaast bleek het in de praktijk niet mogelijk om de beluchtungs capaciteit in één keer op de gewenste capaciteit in te stellen. Hierdoor was de beluchtungs capaciteit tijdens de eerste 10-15 minuten van de meting nog niet constant. Het verloop van het luchtdebiet en het zuurstofgehalte tijdens de twee OC-metingen is weergegeven in Afbeelding 18.

AFBEELDING 18 HET VERLOOP VAN HET LUCHTDEBIET EN HET ZUURSTOFGEHALTE TIJDENS DE OC-METINGEN



4

STATISCHE BEREKENINGEN

4.1 INLEIDING

De stroomsnelheid in een oxidatiesloot is een resultante van de aanwezige stuwkracht (t.g.v. de voortstuwers) en de weerstand in het systeem. De weerstand wordt veroorzaakt door:

- De weerstand van de tank (bochten, wanden, obstakels);
- De weerstand van het bellenpakket.

In het vorige hoofdstuk zijn de praktijkmetingen op de rwzi Soerendonk beschreven. De stroomsnelheid is bij verschillende beluchter- en voortstuwer-instellingen gemeten. In dit hoofdstuk is op basis van de meetresultaten berekend welke weerstanden in de oxidatiesloot van invloed zijn op de stroomsnelheid en hoe deze afhankelijk zijn van de omstandigheden. Allereerst is in paragraaf 4.2 een beschrijving gegeven van de theorie. Vervolgens zijn de Soerendonk resultaten in paragraaf 4.3 vergeleken met de theoretische berekeningen.

4.2 THEORETISCHE ACHTERGROND

In het STOWA-rapport “Menging en voortstuwing van actief-slibsystemen in ronde reactoren” [ref. 6] is uitgebreid ingegaan op de theorie van voortstuwing in ronde reactoren. Deze theorie geldt grotendeels ook voor oxidatiesloten. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de belangrijkste principes. Voor meer informatie wordt verwezen naar het genoemde STOWA-rapport 2006-19.

In een oxidatiesloot wordt de stroming opgewekt door de voortstuwers. Een voortstuwer heeft een stuwkracht, welke onder andere wordt bepaald door de bladdiameter en het toerental. De stuwkracht (F) van de voortstuwers op de rwzi Soerendonk bedraagt 1.710 N. Dit betreft de stuwkracht onder zogenaamde open sea condities, waarbij geen invloed van aanstroming op de stuwkracht aanwezig is. In een omloopsysteem is dit niet het geval en dient er een correctie plaats te vinden om de “effectieve” stuwkracht te berekenen. Bij de voortstuwers van Soerendonk en de snelheidsrange waarbij deze werken kan hierbij uitgegaan van 25% [ref. 8]. Voor de “effectieve” stuwkracht kan daarom worden uitgegaan van 75% van 1.710 N = 1.282 N.

De weerstand in een oxidatiesloot bestaat uit een aantal componenten [ref. 9]:

- k_b Weerstand van de bochten van de oxidatiesloot;
- k_f Wrijvingsverlies door de stroming langs de bodem en de wanden;
- k_o Weerstand van obstakels in de tank;
- k_a Weerstand van de beluchting.

De relatie tussen de stroomsnelheid, de weerstand en de stuwkracht wordt gegeven door de formule:

$$F = (k_b + k_f + k_o + k_a) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_x$$

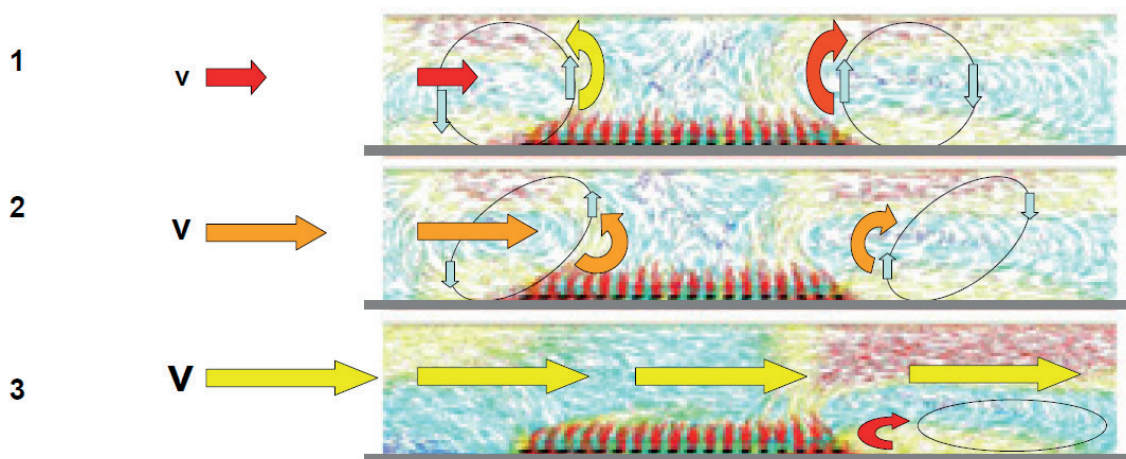
met:

F	=	Stuwkracht	(N)
k_x	=	Weerstandsfactor	(-)
ρ	=	Dichtheid	(kg/m ³)
U	=	Stroomsnelheid	(m/s)
A_x	=	Natte doorsnede	(m ²)

Uit de formule blijkt dat de benodigde stuwkracht toeneemt met het kwadraat van de stroomsnelheid. Op basis van deze formule kan de benodigde stuwkracht worden berekend als de weerstanden en de gewenste stroomsnelheid bekend zijn. Andersom kan ook de weerstand worden berekend als de geïnstalleerde stuwkracht bekend is en de stroomsnelheid is gemeten.

De weerstanden van de bochten, de obstakels en de wrijvingsverliezen zijn theoretisch te berekenen. De weerstand van de belLENbeluchting is niet eenduidig te berekenen en ook niet constant. Deze k-factor neemt toe als de stroomsnelheid afneemt. Dit principe is schematisch weergegeven in Afbeelding 19. De toenemende stroming is in staat de verticaal gerichte energie, aan het begin en aan het eind van het beluchtingpakket, te overwinnen. De sterkte van de verticale energiestromen is afhankelijk van de luchtbelasting (Nm /h) en van de stijghoogte (m) [ref. 6]. Als de stroomsnelheid te laag is (1 in Afbeelding 19) ontstaan spiraalstromen aan de voor- en achterkant van het belLENpakket. Hierdoor neemt de verblijftijd van de belLEN in de vloeistof af en daarmee verminderd de zuurstofoverdracht. Bij een toenemende stroomsnelheid (2 in Afbeelding 19) worden de spiraalstromen meer platgedrukt in de richting van de stroomrichting. Uiteindelijk verdwijnen de spiraalstromen aan de voorkant bij het begin van het pakket als de horizontale snelheid voldoende is verhoogd (3 in Afbeelding 19). Onder deze omstandigheden wordt de hoogste zuurstofoverdracht behaald.

AFBEELDING 19 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET STROMINGSGEDRAG RONDOM DE BELUCHTINGSPAKKETTEN BIJ VERSCHILLENDE STROOMSNELHEDEN [REF. 6]



In het STOWA rapport 2006-19 wordt geconstateerd dat het bepalen van de juiste snelheid nog niet kan worden berekend, omdat daarvoor de benodigde formules nog onvoldoende met metingen zijn onderbouwd. In de volgende paragraaf wordt op basis van de meetresultaten op de rwzi Soerendonk de relatie tussen de stroomsnelheid en de weerstand van de belLENbeluchting onderzocht.

4.3 RESULTATEN RWZI SOERENDONK

4.3.1 INLEIDING

Het meetprogramma op de rwzi Soerendonk was zodanig opgesteld dat de verschillende weerstanden in de tank apart kunnen worden berekend. De uitwerking wordt in deze paragraaf stapsgewijs beschreven. In paragraaf 4.3.2 wordt allereerst de weerstand van het systeem bepaald. Vervolgens wordt in paragraaf 4.3.3 de weerstand van het belenpakket onder verschillende omstandigheden berekend.

4.3.2 SYSTEEMWEERSTAND

Op basis van de metingen 1 t/m 4 (voortstuwers aan, belenbeluchting uit) kan de totale systeemweerstand worden bepaald. Dit betreft zowel de weerstand van de bochten, de weerstand van eventuele obstakels en het wrijvingsverlies van de tank. Omdat de stuwkracht tijdens elke meting bekend is kan op basis van de gemeten stroomsnelheid de totale weerstand van de tank worden afgeleid. De resultaten hiervan zijn samengevat weergegeven in Tabel 4. Hierbij zijn ook de resultaten van meting 13 en 14, met in- en uitstroming, gepresenteerd.

TABEL 4 SYSTEEMWEERSTAND TIJDENS METING 1 T/M 4, 13 EN 14

Nr.	Voortstuwers		Stroomsnelheid		Weerstandsfactor	
	Aantal	Effectieve Stuwkracht	Meting	Totaal	Tank	Instroming
[-]	[-]	[N]	[cm/s]	[-]	[-]	[-]
1	4	5.130	31,6	2,75	2,75	-
2	3	3.848	25,6	3,15	3,15	-
3	2	2.565	20,1	3,40	3,40	-
4	1	1.282	15,8	2,75	2,75	-
13	4	5.130	29,6	3,0	3,0 ¹⁾	0,0
14	2	2.565	18,5	3,8	3,0 ¹⁾	0,8

¹⁾ Uitgangspunt: gemiddelde van meting 1 t/m 4

Uit de berekeningen van metingen 1 t/m 4 blijkt dat de totale systeemweerstand varieert tussen 2,75 en 3,40. In het vervolg zal worden uitgegaan van de gemiddelde systeemweerstand, welke 3,0 bedraagt. De weerstand van de bochten kan theoretisch worden afgeleid op basis van de afmetingen [ref. 10] of worden overgenomen uit een handboek [ref. 9]. Uit beide methoden blijkt dat de weerstandsfactor voor een bocht met een doorgetrokken geleidewand 0,50 is. Het wrijvingsverlies van de tank kan worden afgeleid op basis van de afmetingen van de tank en de wandruwheid. Uitgaande van een wandruwheid van 0,001 m⁻¹ bedraagt het wrijvingsverlies 0,18. De resterende weerstand wordt aan obstakels in de tank toegeschreven. Deze weerstand bedraagt dan $3,0 - 2 \times 0,5 - 0,18 = 1,82$.

Op basis van de berekeningen aan meting 13 en 14 kan worden opgemaakt dat de weerstand ten gevolge van de in- en uitstroming van influent, retourslib en recirculatie, varieert van 0 tot 0,8 en waarschijnlijk in de orde-grootte van 0,5 ligt.

4.3.3 WEERSTAND BELLENBELUCHTING

Tijdens de meetinstellingen 5 t/m 12 staan zowel voortstuwers als belenbeluchting aan. De weerstand bestaat hierbij uit die van de tank (zie vorige paragraaf, gemiddeld 3,0) en van de belenbeluchting. De effectieve stuwkracht van de voortstuwers is bekend en gelijk aan het aantal voortstuwers in bedrijf x 1.282 N. Op basis van de gemeten stroomsnelheid kan de totale weerstandscoefficiënt en daarmee de weerstandscoefficiënt van de belenbeluchting worden berekend. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5.

TABEL 5

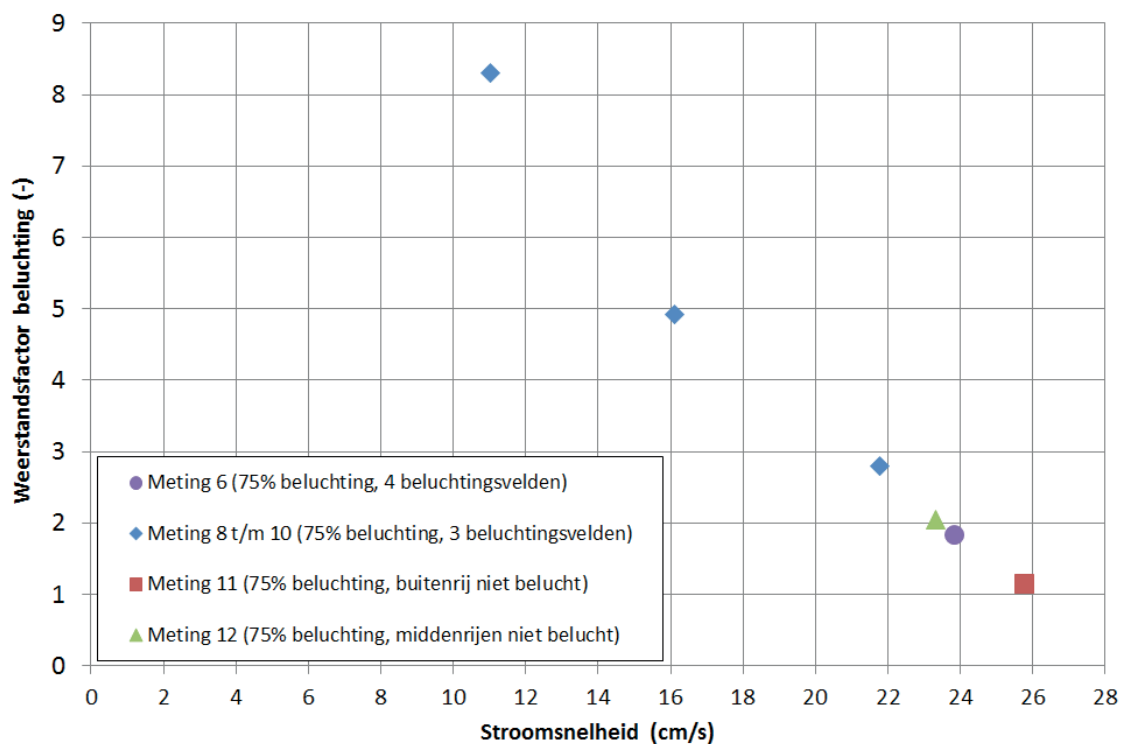
WEERSTAND VAN DE BELUCHTING TIJDENS METING 5 T/M 12

Nr.	Beluchting	Voortstuwers		Stroomsnelheid		Weerstand	
		Aantal	Stuwkracht	Meting	Totaal	Tank	Beluchting
[-]	[%]	[-]	[N]	[cm/s]	[-]	[-]	[-]
5	100%, 4 velden	4	5.130	22,0	5,7	3,0	2,7
6	75%, 4 velden	4	5.130	22,8	4,8	3,0	1,8
7	50%, 4 velden	4	5.130	23,7	3,5	3,0	0,5
8	75%, 3 velden	4	5.130	22,8	5,8	3,0	2,8
9	75%, 3 velden	3	3.848	17,7	7,9	3,0	4,9
10	75%, 3 velden	2	2.565	15,0	11,3	3,0	8,3
11	75%, buitenrij niet	4	5.130	22,8	4,1	3,0	1,1
12	75%, midden niet	4	5.130	22,4	5,1	3,0	2,1

Uit de berekeningen blijkt dat de weerstand van de beluchting varieert van 0,5 (bij 50% beluchtingscapaciteit) tot 8,3 (bij lage stroomsnelheid met 2 voortstuwers). Als de stroomsnelheid wordt uitgezet tegen de weerstandsfactor (zie Afbeelding 20) wordt de relatie tussen stroomsnelheid en weerstand van de beluchting duidelijk. Er is op de rwzi Soerendonk een bijna lineair verband tussen de stroomsnelheid en de weerstand van de beluchting.

AFBEELDING 20

DE RELATIE TUSSEN DE STROOMSNELHEID EN DE WEERSTAND VAN DE BELLENBELUCHTING



Op basis van de meet- en berekeningsresultaten kan voor de rwzi Soerendonk worden afgeleid dat het verhogen van de stuwkracht met 10% leidt tot een afname van de weerstand van de beluchting met 5,5%.

5

CFD MODELBEREKENINGEN

5.1 INLEIDING

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van de praktijkmetingen op de rwzi Soerendonk beschreven. Op basis hiervan kan een goed beeld worden gekregen van de invloed van de belLENbeluchting op de stroomsnelheid en zuurstofoverdracht in een oxidatiesloot. Hoewel er bij 14 verschillende instellingen metingen zijn uitgevoerd, is het toch niet mogelijk om op basis hiervan conclusies te trekken over alle van belang zijnde invloeden. Als vervolg op de metingen is daarom een CFD-model opgesteld van de oxidatiesloot van de rwzi Soerendonk. Met behulp van dit model kunnen ook invloeden en instellingen die niet in de praktijk zijn onderzocht worden beoordeeld.

De CFD-modellering is uitgevoerd met behulp van het pakket COMSOL. COMSOL Multiphysics is een software pakket waarmee verschillende typen fysica (welke beschreven worden met partiële differentiaalvergelijkingen) numeriek kunnen worden opgelost. In dit geval is gebruik gemaakt van de CFD (computational fluid dynamics) module van COMSOL. In paragraaf 5.2 is de opbouw van het CFD model van de rwzi Soerendonk beschreven. In paragraaf 5.3 tot en met 5.5 zijn de belangrijkste resultaten van de modelberekeningen gepresenteerd en vergeleken met de meetresultaten uit hoofdstuk 3. Achtereenvolgens zijn de resultaten van de stroomsnelheid (paragraaf 5.3), de 3D-stromingsprofielen (paragraaf 5.4) en de OC-metingen (paragraaf 5.5) beschreven. De belangrijkste conclusies uit de simulaties zijn samengevat weergegeven in paragraaf 5.6.

5.2 BESCHRIJVING CFD MODEL RWZI SOERENDONK

Computational Fluid Dynamics (CFD), is een gedeelte van de vloeistofmechanica dat gebruik maakt van numerieke oplossingstechnieken voor het oplossen en analyseren van vraagstukken die betrekking hebben op vloeistof en -gasstromen. Het opstellen van een CFD model in COMSOL [ref. 11] bestaat uit de volgende generieke stappen:

1. Opstellen van een geometrie (vereenvoudigde schematisatie van het te modelleren object);
2. Selectie van het type fysica, inclusief configureren van de randvoorwaarden en (initieële) condities;
3. Opstellen van een mesh (grid) voor het specifieke type fysica;
4. Selectie van een oplossingstechniek.

In bijlage 4 worden deze stappen voor het specifieke CFD model van rwzi Soerendonk nader uitgewerkt. Ter illustratie is in Afbeelding 21 de 3D geometrie van het model van rwzi Soerendonk weergegeven.

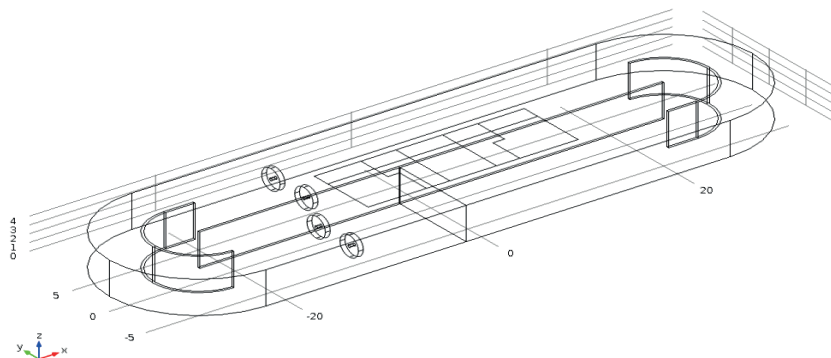
Er zijn met het model stationaire en niet-stationaire berekeningen uitgevoerd.

- Het belLEN- en stromingsmodel zijn gecombineerd doorgerekend. De belLEN in het belLENmodel worden berekend als fractie; het aantal belLEN per element. In beide gevallen is

alleen de stationaire eindtoestand interessant. Voor elk scenario is dus een uitkomst middels een stationaire berekening bepaald.

- Het zuurstofoverdracht model is apart doorgerekend op basis van de uitkomsten van bovenstaande stationaire oplossing. De benodigde stroomsnelheden, turbulentie en gasfractie zijn dus al bepaald. In dit geval is het verloop van de zuurstofconcentratie over de tijd van belang. Voor elk scenario is dus een uitkomst middels een niet-stationaire berekening bepaald.

AFBEELDING 21 DE 3D GEOMETRIE VAN RWZI SOERENDONK



5.3 RESULTATEN STROOMSNELHEIDSBEREKENINGEN

Meting 1 (4 voortstuwers, geen beluchting) is gebruikt om het stromingsmodel te calibreren. In het calibratieproces is de stuwkracht van de voortstuwers gebruikt om het model te fitten. Zoals beschreven in paragraaf 4.2 bedraagt de effectieve stuwkracht circa 75% van de door de leverancier opgegeven stuwkracht doordat een omloopsysteem geen “open-sea” condities heeft. Indien meting 1 met deze stuwkracht wordt doorgerekend komt de stroomsnelheid te hoog uit. Uiteindelijk bleek meting 1 gefit te kunnen worden bij een stuwkracht die 50% was van de opgegeven stuwkracht. Dit kan betekenen dat de effectieve stuwkracht tijdens de metingen lager is geweest dan 75% van de fabriekswaarde doordat bijvoorbeeld de voortstuwers niet optimaal zijn gepositioneerd of de voortstuwers niet maximaal hebben gedraaid. Het kan echter ook betekenen dat het omloopsysteem niet volledig is gemodelleerd en dat er bijvoorbeeld nog obstakels in de reactor aanwezig zijn die de systeemweerstand vergroten. In de 1D-modellering in paragraaf 4.3 is van dit laatste uitgegaan en is een extra weerstand van onbekende en niet-gemodelleerde obstakels van 1,82 verondersteld. In het CFD-model is dit niet mogelijk (de obstakels zijn immers niet bekend) en daarom is het model gefit met de effectieve stuwkracht.

Er zijn CFD-modelberekeningen uitgevoerd voor de metingen 1 t/m 12 (zie Tabel 2). De stroomsnelheid volgens deze metingen en volgens de CFD-modelberekeningen is weergegeven in Tabel 6. In de kolom “CFD” is de gemiddelde stroomsnelheid over het meetraster (zie Afbeelding 8) weergegeven zoals deze door het CFD model is berekend. Over het algemeen komen de berekende stroomsnelheden goed overeen met de gemeten waarden. Een verschil van (naar schatting) 2 cm/s kan worden geweten aan de onnauwkeurigheid van de meting en de berekening. Dit betreft zowel de onnauwkeurigheid in de procesinstellingen (luchtdebiet, voortstuwing) als de onnauwkeurigheid van de meting (representativiteit meetpunten, variatie in de stroomsnelheid, meetonnauwkeurigheid apparatuur).

Zoals aangegeven is het model gefit op meting 1. Bij deze situatie komt de berekende stroomsnelheid daardoor goed overeen met de gemeten waarde. In Afbeelding 22 en Afbeelding 23 is voor deze instelling het snelheidsprofiel over de breedte en de diepte weergegeven voor achtereenvolgens de meting en de modelberekening. In beide grafieken is de rechterzijde de buitenwand van de tank en de linkerzijde de binnenwand. In beide gevallen is de stroomsnelheid aan de buitenwand hoger dan aan de binnenwand. Bij de meting verloopt deze van 35-40 cm/s aan de buitenwand tot 25-30 cm/s aan de binnenwand. In de modelberekeningen is het verloop iets groter, namelijk van 40-45 cm/s aan de buitenwand tot 20-25 cm/s aan de binnenwand. Gezien de nauwkeurigheid van de metingen is dit een acceptabele afwijking en kan worden gesteld dat het model de werkelijkheid goed benadert.

TABEL 6

RESULTATEN VAN DE STROOMSNELHEID VAN DE SIMULATIES VERGELEKEN MET METINGEN

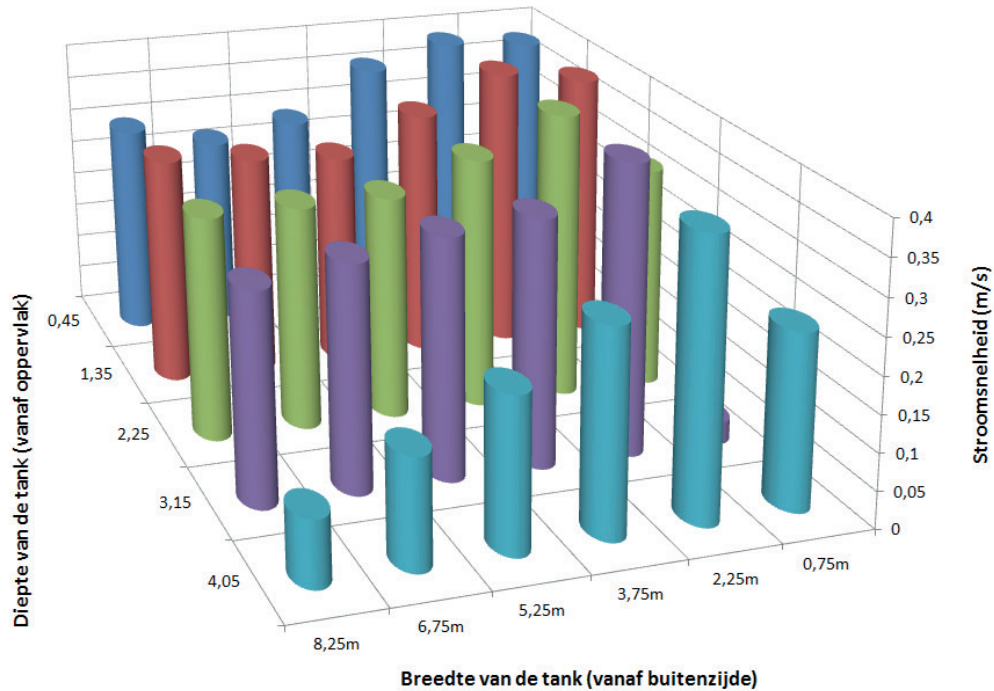
Nr.	Beluchting	Beluchtingsvelden		Voortstuwers		Stroomsnelheid	
	Capaciteit	Aan	Uit	Aantal	Meting	CFD	Verschil
[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
1	-	-	-	4	31,6	31,7	-0,1
2	-	-	-	3	25,6	24,1	1,5
3	-	-	-	2	20,1	21,1	-1,0
4	-	-	-	1	15,8	16,8	-1,0
5	100%	4	-	4	22,0	21,8	0,2
6	75%	4	-	4	23,8	22,6	1,2
7	50%	4	-	4	28,2	23,6	4,6
8	75%	3	1e veld	4	21,8	22,6	-1,2
9	75%	3	1e veld	3	16,1	17,6	-1,5
10	75%	3	1e veld	2	11,0	14,8	-3,8
11	75%	4 x 75%	Buitenzijde	4	25,8	22,6	3,2
12	75%	2+2x50%	Midden	4	23,3	22,2	1,1

De andere berekeningen van de situaties waarin alleen de voortstuwers aan staan (meting 2 t/m 4) liggen allemaal binnen een range van 1,5 cm/s van de meetwaarde. Voor de situaties met alleen voortstuwers en geen beluchting komen de modelresultaten dus goed overeen met de praktijkmetingen.

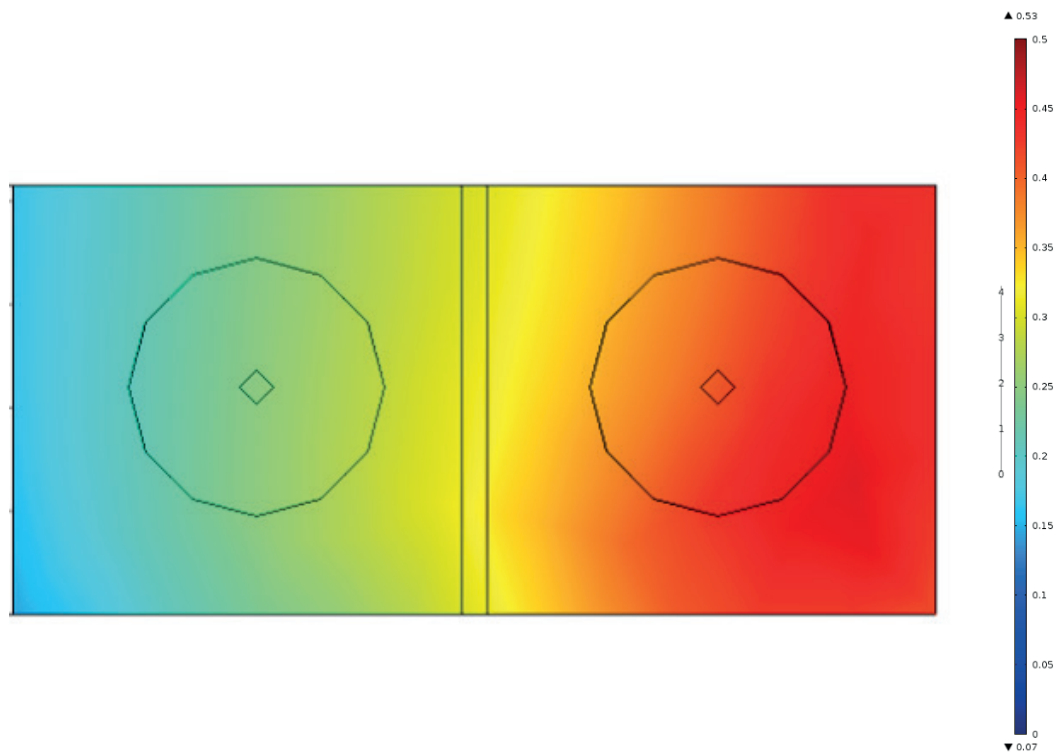
Voor de metingen met de beluchting in bedrijf (metingen 5 t/m 12) geldt dat voor de meeste situaties de stroomsnelheid die het model berekent goed overeenkomt (± 2 cm/s) met de meetwaarden. Opvallend is dat de berekende stroomsnelheid voor metingen 7 en 10 afwijkt van de gemeten waarde. Op basis van deze afwijkingen kan het volgende worden opgemerkt:

- Volgens het model is de invloed van de beluchtingscapaciteit op de stroomsnelheid minder groot dan uit de metingen kan worden opgemaakt. Volgens de metingen neemt de stroomsnelheid sterk toe als de beluchtingscapaciteit wordt verlaagd van 75% (meting 6) naar 50% (meting 7). Ook bij het verhogen van de beluchtingscapaciteit naar 100% (meting 5) is het effect dat het model berekend minder groot dan uit de metingen blijkt.
- Volgens het model is de invloed op de stroomsnelheid van het afschakelen van voortstuwers tijdens beluchten (metingen 9 en 10), minder groot dan uit de metingen kan worden opgemaakt. Volgens de metingen neemt de stroomsnelheid sterk af als het aantal voortstuwers wordt verlaagd, van 4 naar 2 voortstuwers (meting 8 → meting 10) leidt tot een verlaging van de stroomsnelheid van 10,8 cm/s. Volgens het model neemt de stroomsnelheid maar met 7,8 cm/s af.

AFBEELDING 22 HET STROOMSNELHEIDSPROFIEL BIJ METING 1



AFBEELDING 23 HET STROOMSNELHEIDSPROFIEL BIJ METING 1 VOLGENS DE CFD-BEREKENING



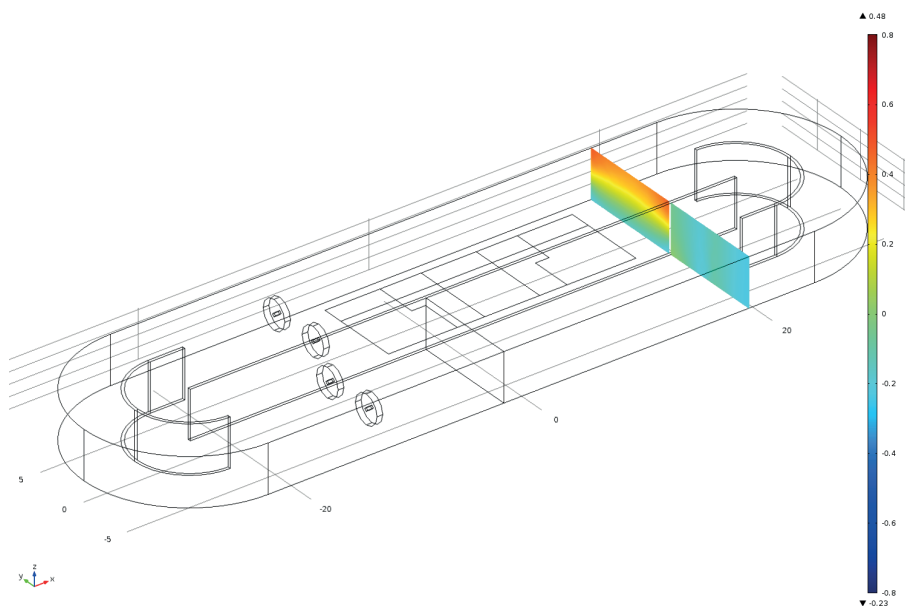
5.4 RESULTATEN 3D-SNELHEIDSPROFIELEN

In paragraaf 3.4.2 zijn de resultaten van de 3D-stromingsmetingen beschreven. Deze metingen zijn uitgevoerd tijdens meting 10, 11 en 12. De resultaten van de metingen zijn in deze paragraaf vergeleken met de CFD-modelresultaten bij deze instellingen. Hierbij is ook meting 8 meegenomen. Voor deze metingen zijn in bijlage 5 verschillende grafische weergaven opgenomen uit de CFD-modellering. Op basis van deze plaatjes wordt een indruk verkregen van

de 3D-stroming rondom de beluchtingsvelden. De figuren in de bijlage zijn doorsneden in de lengterichting (XZ-vlak) en dwarsdoorsneden door het stroomvlak (YZ-vlak). De kleuren zijn geschaald van -0,8 m/s (donkerblauw) tot +0,8 m/s (donkerrood)¹.

Als eerste voorbeeld is in Afbeelding 24 het snelheidsprofiel over de dwarsdoorsnede getoond achter het bellenpakket tijdens meting 10. Hierbij komt de lokatie van de visualisatie overeen met de meetpunten A en C uit Afbeelding 1.1 in bijlage 1. Een vergelijking van het stromingsprofiel uit deze afbeelding met de meetwaarden uit Afbeelding 1.2 in bijlage 1 toont dat de vorm en de absolute waarden goed overeenkomen. Bovenin de tank is een positieve stroming van 0,5-0,6 m/s en onderin is er een terugstroming van circa 0,3-0,4 m/s.

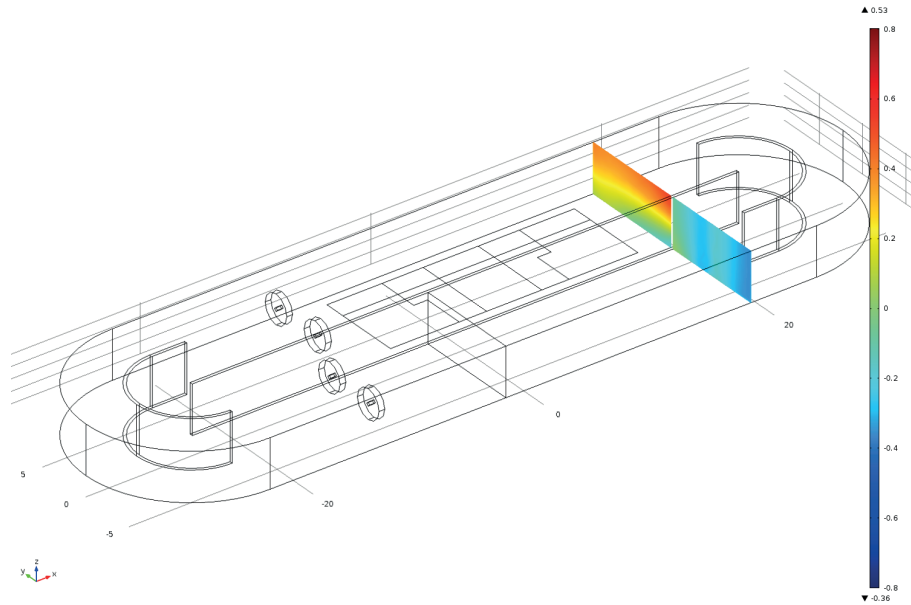
AFBEELDING 24 DWARSDOORSNEDE VAN DE STROOMSNELHEID (SCENARIO 10)



Als tweede voorbeeld is in Afbeelding 25 het snelheidsprofiel in de over de dwarsdoorsnede getoond achter het bellenpakket tijdens meting 11. Hierbij komt de lokatie van de visualisatie overeen met de meetpunten A en C uit Afbeelding 16. Een vergelijking van het stromingsprofiel uit deze afbeelding met de meetwaarden uit Afbeelding 17 toont eveneens dat de vorm en de absolute waarden goed overeenkomen. Tegen de middenwand aan is de stroming, net als bij meting 10, positief aan de bovenzijde en negatief onderin de tank. Aan de buitenzijde van de tank, achter het deel van het bellenpakket waar de beluchting uit staat, is het beeld afwijkend. Hier vindt onder in de tank geen terugstroming plaats maar is de stroming over de hele diepte van dezelfde orde, namelijk 0,2-0,4 cm/s.

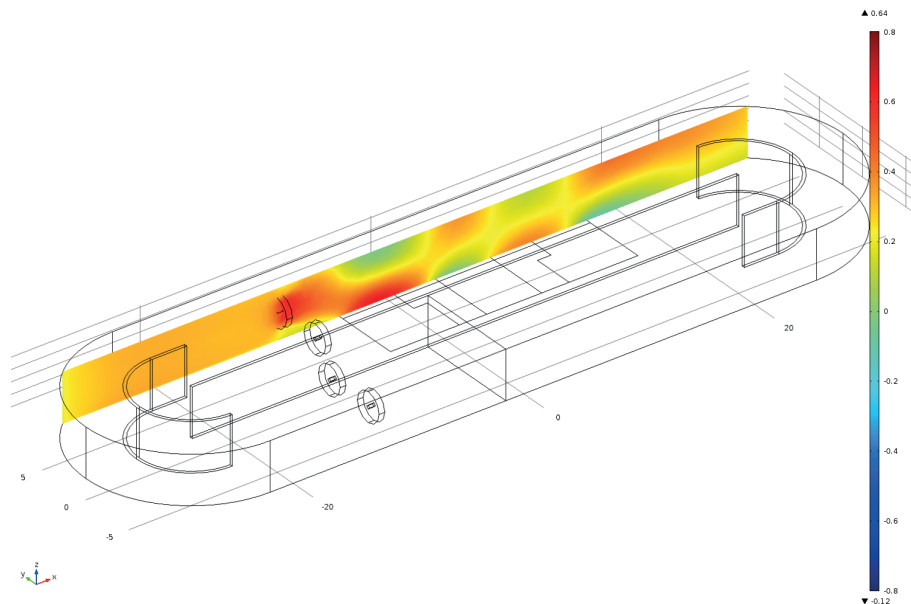
1 De stromingsrichting in het bovenste been (met beluchting) is positief, in het andere been is de stromingsrichting negatief. Dit wil zeggen dat als de aangegeven stroomsnelheid in het onderste been bijvoorbeeld -0,4 m/s is, dat deze in werkelijkheid +0,4 cm/s is.

AFBEELDING 25 DOORSNEDE SNELHEID IN DE LENGTERICHTING (SCENARIO 11)



Als laatste voorbeeld is in Afbeelding 26 het snelheidsprofiel in de lengterichting getoond tussen de twee beluftpakketten tijdens meting 12. Hierbij komt de lokatie van de visualisatie overeen met de meetpunten C, K en G uit Afbeelding 3.1 in bijlage 3. Tussen de beluchtingspakketten is de stroming zeer divers. De uitstroming van het eerste pakket wordt snel opgevolgd door de instroming naar het tweede pakket. Hierdoor vindt een terugstroming zowel onderin de tank als bovenin de tank plaats.

AFBEELDING 26 DOORSNEDE SNELHEID IN LENGTERICHTING (SCENARIO 12)



Over het algemeen kan worden gesteld dat de stroming rondom de beluchtingsvelden goed met het CFD-model wordt berekend.

5.5 RESULTATEN OC-METINGEN

5.5.1 INLEIDING

Op basis van de in paragraaf 3.4.3 beschreven zuurstofinbreng metingen is de zuurstofoverdracht in het CFD-model van de rwzi Soerendonk gecalibreerd. Aangezien een aantal instellingen tijdens de metingen onbekend of variabel waren is hiervoor allereerst een 1D-herberekening uitgevoerd, welke in paragraaf 5.5.2 is beschreven. Op basis van deze berekening is in paragraaf 5.5.3 de calibratie van het CFD-model toegelicht. Met behulp van het gecalibreerde CFD-model is vervolgens in paragraaf 5.5.4 de zuurstofinbreng in de andere procescondities bepaald.

5.5.2 HERBEREKENING 1D-MODEL

Zoals weergegeven in Afbeelding 18 is het beluchtingsdebiet tijdens de OC-metingen niet constant. Gedurende de eerste 10 minuten neemt het toe waarna er korte tijd een teveel aan beluchting is alvorens het stabiele luchtdebiet wordt bereikt. Omdat tijdens de CFD-berekeningen wordt gerekend vanuit een steady-state situatie met een constant luchtdebiet, is het niet mogelijk om de gemeten zuurstofcurves met het CFD-model te fitten. Er is daarom een 1D-berekening gebruikt om de gemeten curve te kunnen vertalen naar een curve die behoort bij het constante luchtdebiet waar het CFD-model mee rekent.

Het 1D-model berekent de toename van het zuurstofgehalte op de volgende wijze:

- Het verloop van het luchtdebiet is hetzelfde als tijdens de metingen (zie Afbeelding 18);
- Voor de endogene respiratiesnelheid wordt een gemeten waarde van 15 mg O₂/(l.h) aangehouden;
- Voor de procestemperatuur wordt de gemeten waarde van 16,6 °C aangehouden;
- De toename van het zuurstofgehalte wordt berekend als resultante van de zuurstofoverdracht en de respiratie, volgens de volgende formule:

$$dC_L/dt = \alpha K_L a (C_L^* - C_L) - r_{akt} C_L / (\mu O_2 + C_L)$$

Hierbij is:

α Alfa-factor (-)

K_L zuurstofoverdrachtscoëfficiënt (1/h)

a beloppervlakte (m²/m³)

C_L actuele zuurstofgehalte (mg/l)

C_L^* zuurstof verzadingswaarde, berekend volgens de wet van Henry (zie bijlage 4) (mg/l)

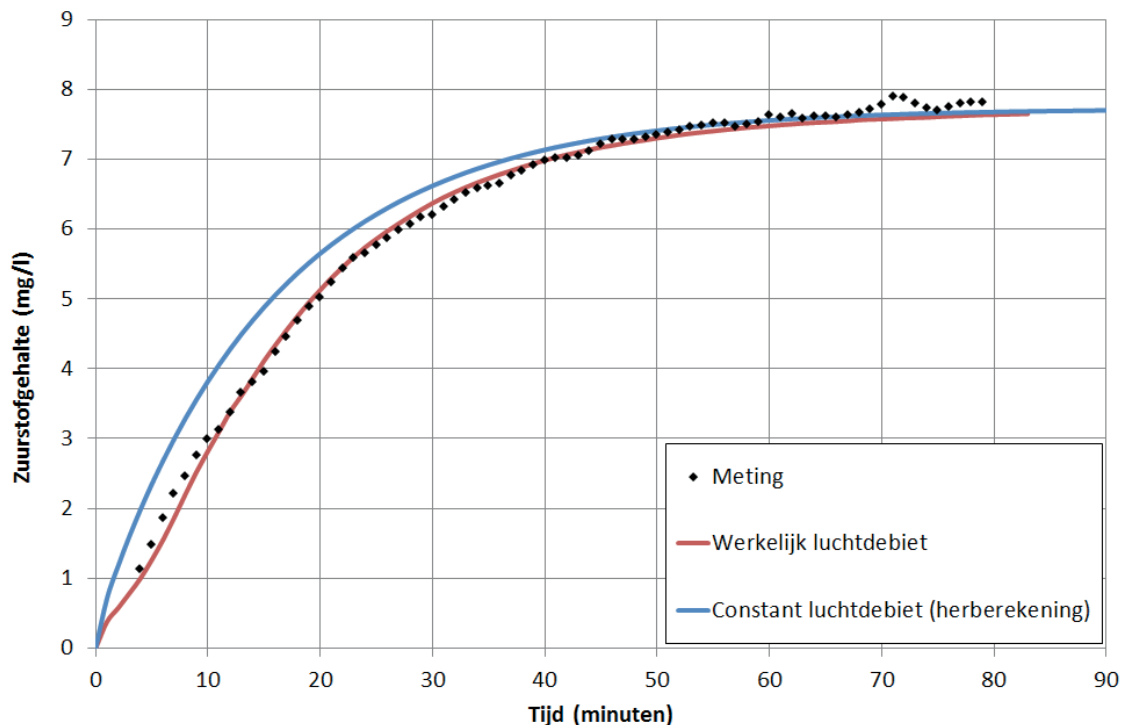
R_{akt} respiratiesnelheid (meetwaarde: 15 mg O₂/(l.h))

μO_2 monodconstante voor zuurstof in de respiratieterm (uitgangspunt: 0,2 mg/l)

De totale zuurstofoverdrachtscoëfficiënt ($K_L a$) is in het 1D-model als parameter gebruikt waarmee de berekende zuurstofcurve op de gemeten curve is gefit. Het resultaat hiervan, bij een $K_L a$ van 3,60 h⁻¹, is weergegeven in Afbeelding 27. De gefitte rode curve ligt bovenop de zwarte meetpunten.

Vervolgens is met het gefitte model en uitgaande van een constant luchtdebiet (dus een constante $K_L a$ van 3,60 h⁻¹) dezelfde berekening uitgevoerd. Het resultaat hiervan is de blauwe curve in Afbeelding 27. Dit is dus de zuurstofcurve welke gemeten zou zijn als het luchtdebiet tijdens de OC-meting constant was geweest. Deze curve wordt in paragraaf 5.5.3 gebruikt voor de calibratie van het CFD-model.

AFBEELDING 27 HERBEREKENING ZUURSTOFMETING (SCENARIO 8)



5.5.3 CALIBRATIE CFD MODEL

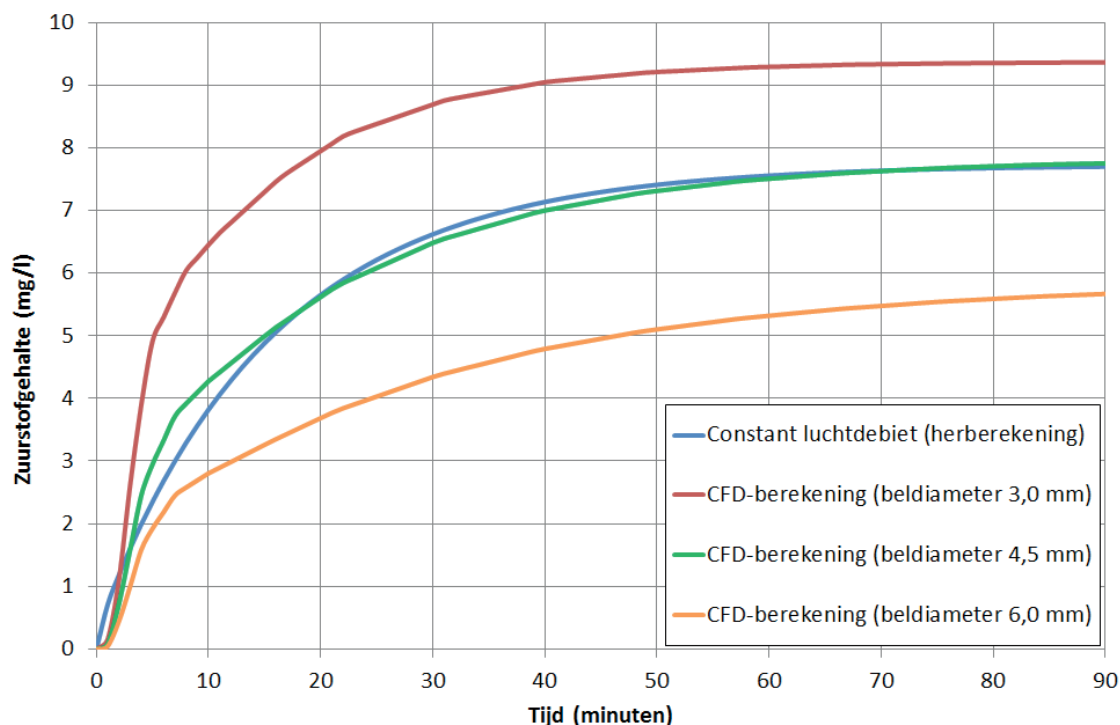
Het CFD-model van de rwzi Soerendonk is beschreven in paragraaf 5.2. Het is een theoretisch model waarbij de zuurstofinbreng wordt berekend op basis van de fysische omstandigheden in de reactor, zoals de temperatuur, het luchtdebiet, het aantal luchtbellens in de tank, de grootte van de luchtbellens en dergelijke. De belangrijkste procescondities die in de CFD-berekeningen in deze paragraaf en in het vervolg van dit rapport zijn aangehouden, zijn weergegeven in Tabel 7.

TABEL 7 PROCESCONDITIES TIJDENS DE CFD-BEREKENINGEN

Parameter	Eenheid	Waarde
Temperatuur	°C	16,6
Alfa-factor	-	0,70
Respiratiesnelheid	mg O ₂ /(L.h)	15,0
Belgrootte	mm	4,5

Voor de calibratie van het CFD-model is de zuurstofcurve bij verschillende beldiameters berekend. In Afbeelding 28 is de gemeten zuurstofcurve (gecorrigeerd voor constant luchtdebiet) weergegeven naast de berekende curves bij 3,0 mm, 4,5 mm en 6,0 mm beldiameter. Op basis van deze vergelijking is voor het vervolg uitgegaan van een beldiameter van 4,5 mm. Het feit dat uit de modellering een belgrootte van 4,5 mm volgt wil overigens niet zeggen dat dit ook de werkelijke gemiddelde belgrootte is. De belgrootte is gebruikt om de zuurstofoverdracht in het CFD-model te fitten. Indien in de praktijk de alfa-factor niet 0,7 is geweest maar bijvoorbeeld 0,8 dan zou de gefitte belgrootte nog wat groter zijn uitgevallen.

AFBEELDING 28 CALIBRATIE VAN HET CFD-MODEL (VOOR METING 8)



Er is ook een OC-meting uitgevoerd bij scenario 9. De omstandigheden bij deze meting waren niet sterk afwijkend van scenario 8, waardoor de zuurstofcurve een vergelijkbaar patroon had. De herberekening en de calibratie van dit scenario is daardoor ook vergelijkbaar.

Het gecalibreerde model is gevalideerd op basis van de OC-meting van scenario 11, waarbij een duidelijk afwijkende beluchtingsconfiguratie aanwezig was. Omdat tijdens de eerste serie metingen de OC-meting van scenario 11 niet onder de juiste procescondities hadden plaatsgevonden zijn in een later stadium (in mei 2016) de OC-metingen van scenario 8 en 11 nogmaals uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn weergegeven in bijlage 6.

Omdat het optoeren van de beluchting tijdens de meting van scenario 8 erg traag verliep, vertoont de zuurstofcurve van deze meting een afwijkend verloop. Desondanks bleek het mogelijk om deze curve met het 1D-model redelijk goed te simuleren. Beide metingen zijn vervolgens op dezelfde wijze als hierboven beschreven met het CFD-model en een beldiameter van 4,5 mm gesimuleerd. De getoonde grafieken tonen het resultaat van de CFD-modellering bij exact dezelfde zuurstofinbrengcapaciteit. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de zuurstofinbrengcapaciteit bij beide scenario niet wezenlijk verschilt, en het uitschakelen van de buitenste rij beluchtingsplaten weinig invloed heeft op de zuurstofinbreng.

5.5.4 OC ONDER VERSCHILLENDE PROCESCONDITIES

Met het gecalibreerde CFD-model van de rwzi Soerendonk is voor verschillende procesconfiguraties en procesinstellingen de zuurstofinbrengcapaciteit (OC) berekend. De hierbij gevolgde werkwijze is als volgt:

- Het CFD-model heeft bij de gewenste instellingen en modelparameters de steady state situatie berekend;
- Bij deze steady state situatie is op basis van een naberekening de zuurstofinbreng berekend, uitgaande van de modelparameters uit Tabel 7;
- De berekeningen zijn uitgevoerd onder schoonwatercondities, dat wil zeggen dat de respiratiesnelheid op 0 mg/(l.h) is gesteld;

- Door middel van een integratie van het zuurstofgehalte in de tank is de gemiddelde zuurstofcurve in de reactor berekend. Hierdoor heeft de plaats van de zuurstofmeting ten opzichte van de beluchtingspakketten geen invloed op het resultaat;
- Met behulp van de STOWA tool [ref. 7] is door middel van curve fitting de $K_L a$ berekend.
- De zuurstofoverdracht (OC_{20}) is vervolgens berekend door de $k_L a$ te vermenigvuldigen met het tankvolume, de theoretische zuurstofverzadingsconcentratie bij 20°C en de temperatuurcorrectiefactor.

De resultaten van de verschillende scenario's zijn weergegeven in Tabel 8. Hierin zijn ook de resultaten van twee extra configuraties (15 en 16) opgenomen die in het volgende hoofdstuk worden besproken.

TABEL 8

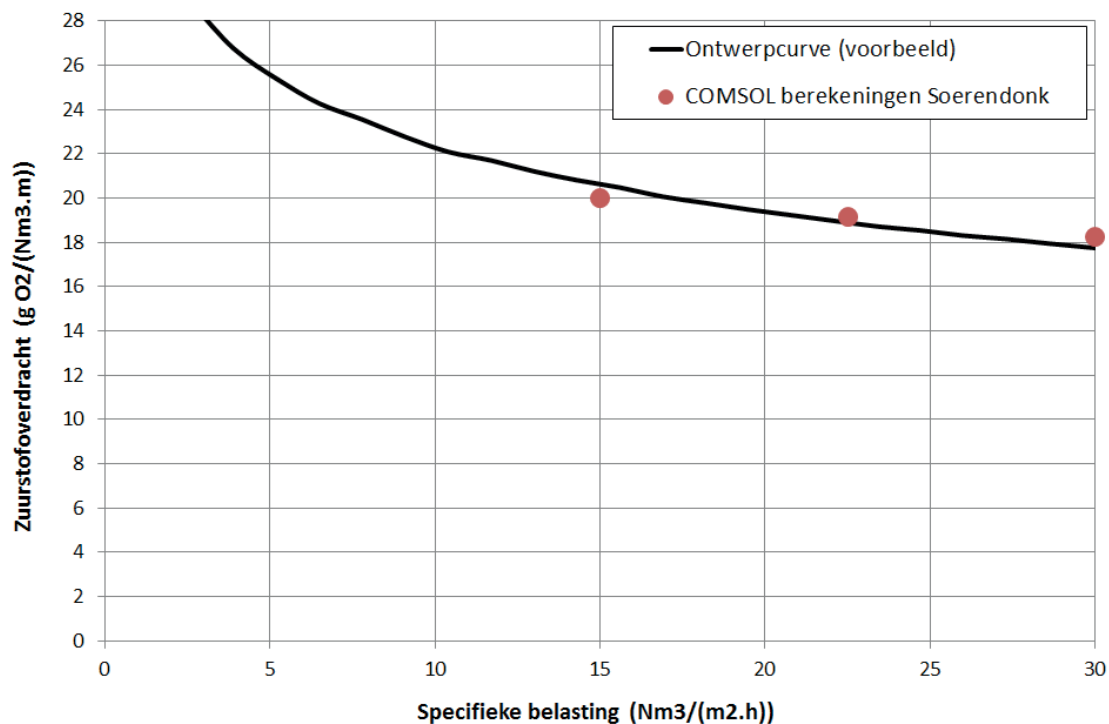
RESULTATEN VAN DE OC-BEREKENINGEN

Nr.	Beluchting	Beluchtingsvelden		Voortstuwars		Modelberekening	
	Capaciteit	Aan	Uit	Aantal	Stroomsnelheid	OC_{20}	
[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[cm/s]	[kg O_2 /h]	[g O_2 /(Nm ³ .m)]
<i>Afname beluchtingscapaciteit</i>							
5	100%	4	-	4	21,8	319	17,8
6	75%	4	-	4	22,6	251	18,6
7	50%	4	-	4	23,6	175	19,5
<i>Afname stroomsnelheid</i>							
8	75%	3	1e veld	4	22,6	244	18,1
9	75%	3	1e veld	3	17,6	237	17,6
10	75%	3	1e veld	2	14,8	227	16,9
<i>Alternatieve configuraties (referentie scenario 8)</i>							
11	75%	4 x 75%	Buitenzijde	4	22,6	240	17,8
12	75%	2+2x50%	Midden	4	22,2	247	18,3
<i>Extra alternatieve configuraties (referentie scenario 5)</i>							
15	100%	4	2 elk been	4	20,8	313	17,4
16	100%	4	Bocht	4	16,7	283	15,8

De belangrijkste conclusies uit deze OC-berekeningen zijn:

- Bij een afname van de beluchtingscapaciteit, en daarmee van de plaatbelasting, neemt de specifieke zuurstofinbreng toe (scenario 5, 6 en 7). Deze toename bedraagt circa 10% bij een halvering van de beluchtingscapaciteit. Ter illustratie zijn de resultaten van deze scenario's in Afbeelding 29 vergeleken met een typische ontwerpcurve zoals die door leveranciers wordt gebruikt. De modelresultaten komen redelijk overeen met de gehanteerde ontwerpuitgangspunten.
- Bij een afname van de stroomsnelheid neemt bij gelijkblijvende beluchtingscapaciteit de zuurstofoverdracht af (scenario 8, 9 en 10). De afname bedraagt circa 7% bij een afname van de stroomsnelheid van 35%.
- Bij een toename van de plaatbelasting bij gelijkblijvende beluchtingscapaciteit neemt de specifieke zuurstofinbreng af (scenario 6 en 8). De afname bedraagt circa 3% bij een toename van de plaatbelasting van 33%.
- Het wijzigen van de configuratie van de beluchtingsvelden heeft nauwelijks invloed op de zuurstofinbreng (scenario 8, 11 en 12).

AFBEELDING 29 ZUURSTOFOVERDRACHT VERSUS PLAATBELASTING



5.6 CONCLUSIES

Met het CFD-model zijn de metingen op de rwzi Soerendonk nagebootst. Het model blijkt over het algemeen goed in staat op de stroomsnelheid te berekenen die ook in de praktijk is gemeten. Het lijkt er echter op dat het variëren van de beluchtingscapaciteit in het model minder effect op de stroomsnelheid heeft dan in de praktijk. De stroming rondom de beluchtingspakketten wordt goed gemodelleerd.

Het berekenen van de zuurstofoverdracht is gecalibreerd op basis van de metingen en ondersteunende 1D-modelberekeningen. Uitgaande van een alfa-factor van 0,7 en een belddiameter van 4,5 mm komen de modelresultaten goed overeen met de meetresultaten.

De modelresultaten van de verschillende scenario's komen deels overeen met de verwachtingen. Opvallend is dat het wijzigen van de configuratie van de beluchtingsvelden nauwelijks invloed op de zuurstofinbreng lijkt te hebben.

6

EVALUATIE

6.1 INLEIDING

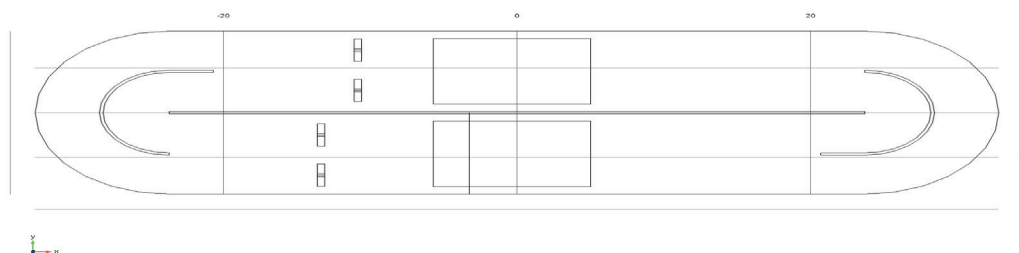
Het CFD-model van de rwzi Soerendonk is gecalibreerd op basis van de stroomsnelheids- en OC-metingen. Met dit gecalibreerde model kunnen situaties worden doorgerekend die in de praktijk niet konden worden bemeaten en kunnen gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn in dit hoofdstuk beschreven. In paragraaf 6.2 zijn enkele alternatieve configuraties gemodelleerd. De invloed van de beluchtingsconfiguraties onder praktijkomstandigheden zijn beschreven in paragraaf 6.3. In paragraaf 6.4 is de invloed van belgrootte onderzocht.

6.2 RESULTATEN AFWIJKENDE CONFIGURATIES

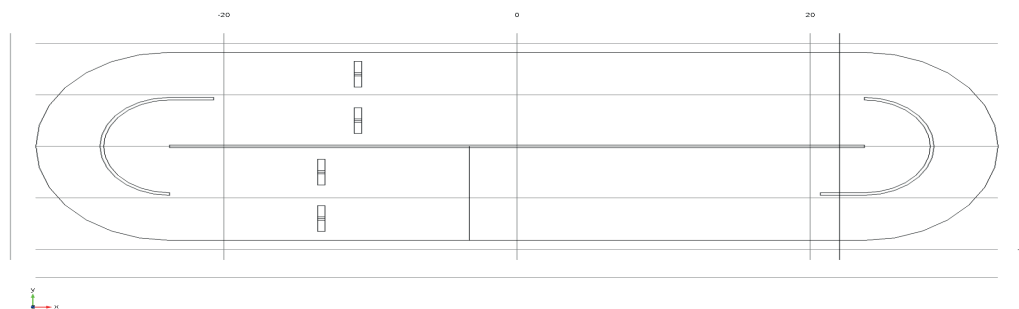
Met het gecalibreerde CFD-model van de rwzi Soerendonk kan elke denkbare configuratie worden doorgerekend. In deze paragraaf zijn de volgende twee configuraties bekeken:

- Scenario 15: Beluchtingsvelden in twee benen. Hierbij is de helft van de aanwezige beluchtingsvelden van de rwzi Soerendonk in het andere been geplaatst. De positie van de voortstuwert is hierbij niet gewijzigd. De geometrie is gevisualiseerd in Afbeelding 30.
- Scenario 16: Beluchtingsvelden in de bocht. Hierbij zijn de vier aanwezige beluchtingsvelden verdeeld over de gehele bocht. De geometrie is gevisualiseerd in Afbeelding 31.

AFBEELDING 30 DE GEOMETRIE VAN SCENARIO 15



AFBEELDING 31 DE GEOMETRIE VAN SCENARIO 16



Voor beide configuraties is een CFD-modellering uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van 100% beluchting en vier voortstuwers in bedrijf. De stroomsnelheid en beluchtingscapaciteit van beide instellingen is, samen met die van de andere scenario's, weergegeven in Tabel 8.

Het verdelen van de vier beluchtingspakketten over de twee benen van de oxidatiesloot leidt tot een lichte daling van de stroomsnelheid. De weerstand van de twee aparte bellenpakketten is iets groter dan de weerstand van het ene grote bellenpakket omdat de stroming tweemaal een bellenkolom moet doorkruisen. Ook de zuurstofinbrengcapaciteit is in deze variant iets lager.

De stroomsnelheid neemt volgens het model sterk af wanneer de beluchtingspakketten in de bocht worden geplaatst. Het bellenpakket veroorzaakt aanzienlijk meer weerstand dan wanneer het in het been wordt geplaatst. Op basis van statische berekeningen (zie paragraaf 4.3) kan worden afgeleid dat de weerstand van het bellenpakket toeneemt van 2,7 (bij scenario 5) naar 6,7 (bij scenario 16). De zuurstofinbrengcapaciteit is eveneens aanmerkelijk lager (11%) dan bij scenario 5.

6.3 ZUURSTOFINBRENG ONDER PRAKTIJKOMSTANDIGHEDEN

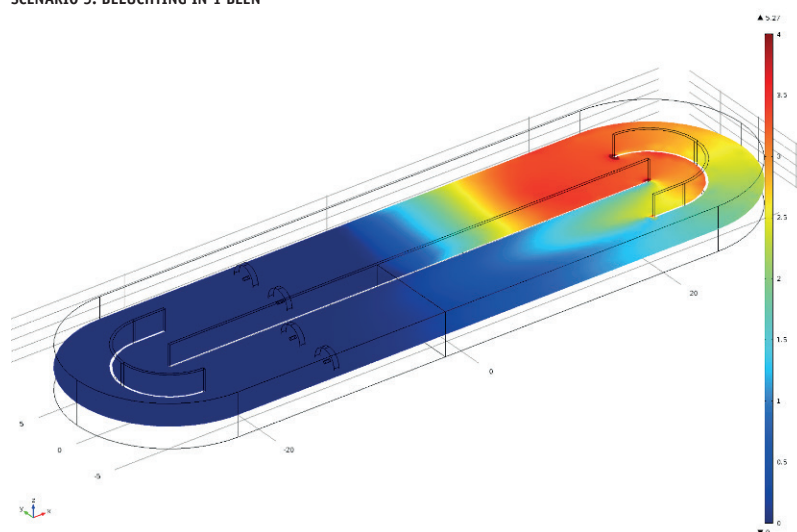
De zuurstofinbrengcapaciteit zoals die bij een OC-meting wordt vastgesteld is de zuurstofinbreng onder standaardomstandigheden. Dit wil zeggen dat deze wordt omgerekend naar een procestemperatuur van 20°C, atmosferische druk en een zuurstofgehalte van 0 mg/l. Het zuurstofdeficiet is hierbij dus maximaal en speelt geen onderscheidende rol. In de praktijk kan dit echter wel het geval zijn. In deze paragraaf is daarom voor verschillende scenario's de zuurstofinbreng onder praktijkomstandigheden met het CFD-model bepaald. Hiervoor is voor de scenario's met beluchting (5 t/m 16, zie Tabel 8) de zuurstofinbreng berekend bij een respiratiesnelheid die onder normaal bedrijf, dus bij toevoer van influent, kan voorkomen (75 mg O₂/(l.h)). Op het moment dat een evenwichtssituatie is bereikt en het zuurstofprofiel in de reactor niet meer verandert, is berekend hoe groot de totale respiratiecapaciteit (in kg O₂/h) in de reactor is. Omdat er sprake is van een evenwichtssituatie kan worden gesteld dat de totale respiratiecapaciteit overeenkomt met de zuurstofinbrengcapaciteit, en kan de zuurstofinbrengcapaciteit onder praktijkcondities dus worden bepaald.

Ter illustratie is in Afbeelding 32 voor de evenwichtssituatie van scenario's 5, 15 en 16 het verloop van het zuurstofgehalte op de halve diepte grafisch weergegeven. Hieruit valt op te maken dat afhankelijk van de configuratie het verloop van het zuurstofgehalte boven de beluchtingsvelden sterk kan variëren.

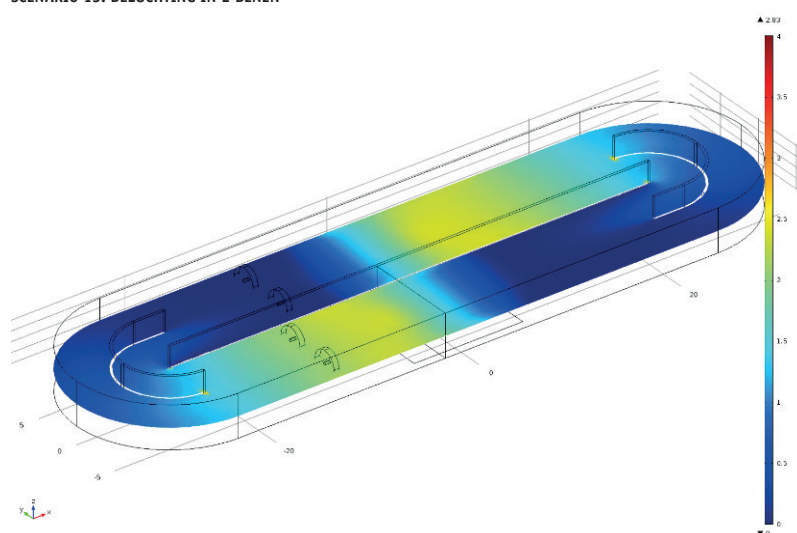
In Afbeelding 33 is de zuurstofinbreng in schoonwater vergeleken met de zuurstofinbreng onder praktijkcondities. Omdat de absolute waarden niet goed te vergelijken zijn (vanwege het variabele en onbekende deficiet bij de praktijkcondities) zijn de berekende waarden omgerekend naar een percentage, waarbij de berekende zuurstofinbreng voor zowel de schoonwater- als de praktijkcondities bij scenario 5 op 100% is gesteld.

AFBEELDING 32 HET VERLOOP VAN HET ZUURSTOFGEHALTE BIJ SCENARIO 5, 15 EN 16

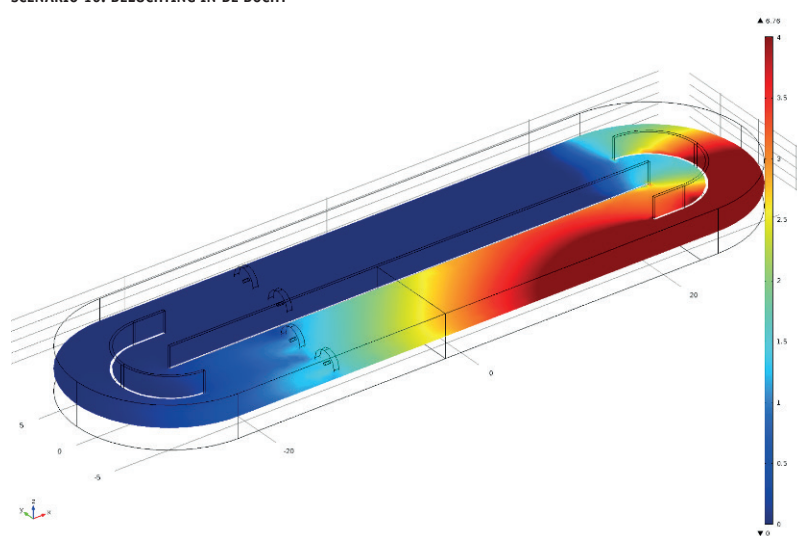
SCENARIO 5: BELUCHTING IN 1 BEEN



SCENARIO 15: BELUCHTING IN 2 BENEN



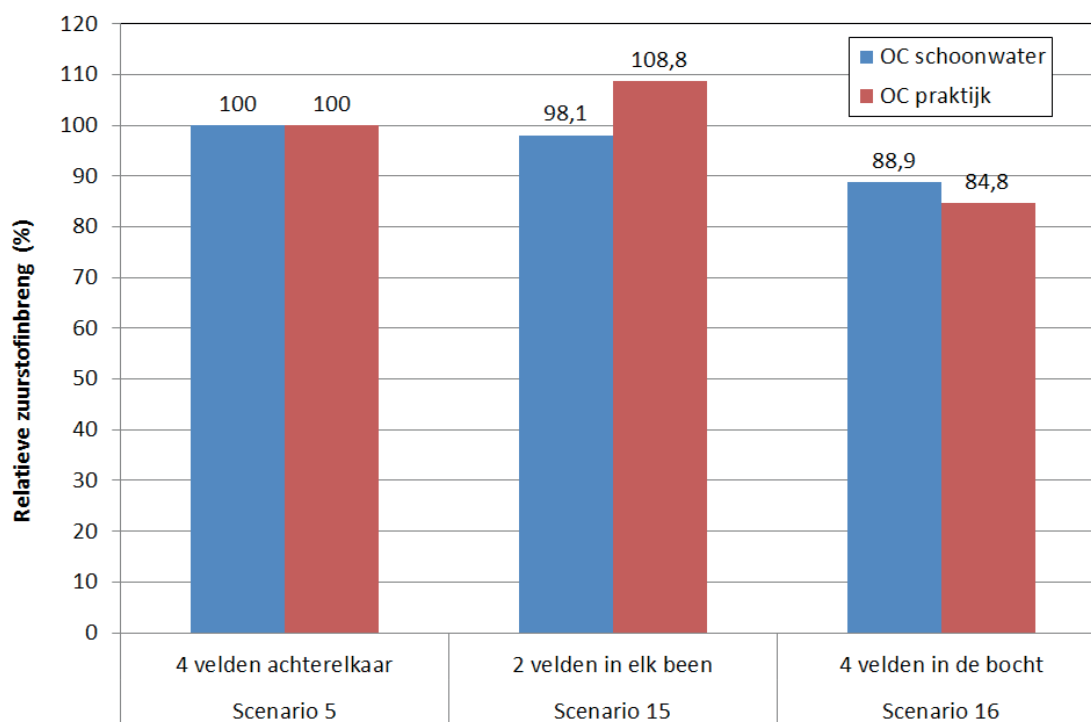
SCENARIO 16: BELUCHTING IN DE BOCHT



Bij scenario 15 (2 velden in elk been) blijkt daaruit een heel ander beeld te komen. Uit de OC-berekening in schoonwater volgt een iets lagere zuurstofinbrengcapaciteit dan bij scenario 5. Onder praktijkcondities is de zuurstofinbreng echter 8,8% hoger dan bij scenario 5. Dit is een gevolg van het aanzienlijk lagere zuurstofgehalte rondom de beluchtingsvelden (zie Afbeelding 32) waardoor het deficit gemiddeld hoger ligt en de zuurstofoverdracht sneller verloopt. Wanneer scenario 5 als referentie wordt gebruikt is de zuurstofinbreng onder praktijkcondities bij scenario 15 circa $108,8 / 98,1 = 1,11 = 11\%$ hoger dan op basis van de schoonwatermeting zou worden vastgesteld.

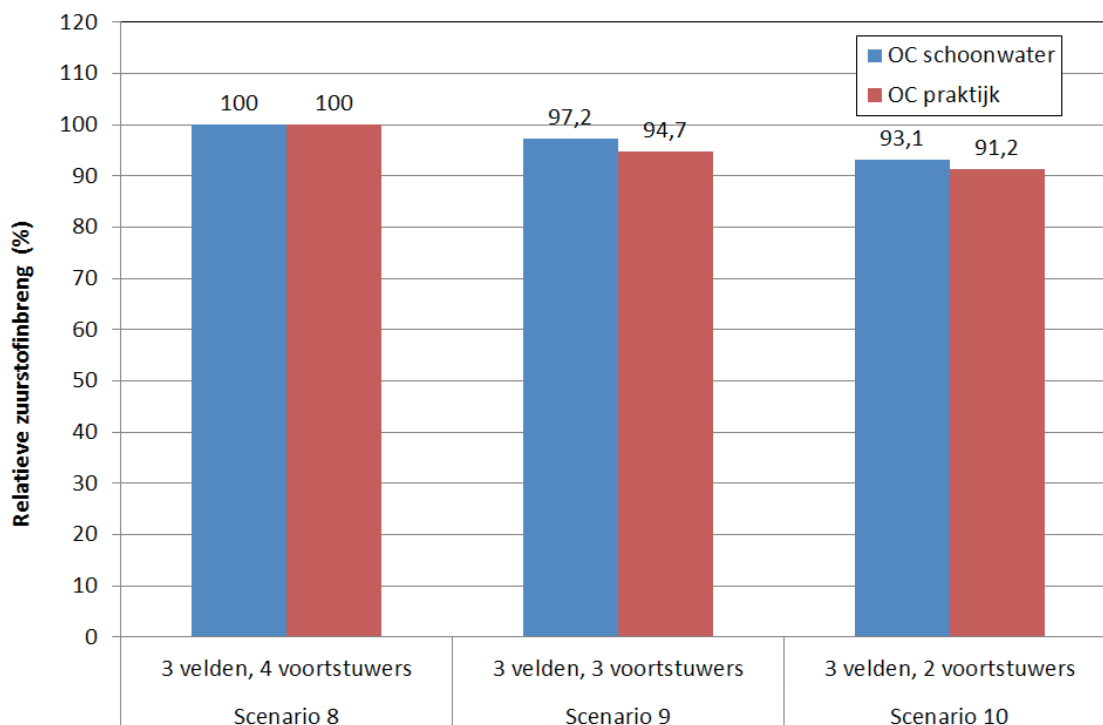
Voor scenario 16 (beluchting in de bocht) is het tegengestelde effect zichtbaar. De zuurstofinbreng in schoonwater is lager dan in scenario 5, maar onder praktijkcondities is deze nog slechter. Door de zeer lage stroomsnelheid neemt de contacttijd tussen bellenbeluchting en langsstromend water toe, waardoor het zuurstofgehalte sterk toeneemt. Dit heeft een negatief effect op de zuurstofoverdracht. Ten opzichte van de schoonwatermeting is de zuurstofinbreng onder praktijkcondities bij scenario 16 circa $84,8 / 88,9 = 0,95 = 5\%$ lager.

AFBEELDING 33 RELATIEVE ZUURSTOFINBRENG IN SCHOONWATER EN IN DE PRAKTIJK (100% BELUCHTING)



In Afbeelding 34 is een zelfde vergelijking weergegeven voor de scenario's 8, 9 en 10, waarbij bij 75% beluchting over 3 velden, achtereenvolgens 4, 3 en 2 voortstuwers in bedrijf waren. De stroomsnelheid nam hierbij af van 22,6 (scenario 8) naar 14,8 cm/s (scenario 10). Ook hierbij kan worden waargenomen dat een lagere snelheid tot een ongunstiger zuurstofdeficit leidt en daarmee tot een lagere zuurstofinbreng onder praktijkcondities. Door de lagere beluchttingscapaciteit neemt het zuurstofgehalte minder sterk toe dan bij scenario 5, 15 en 16, en is het verschil tussen schoonwater OC en praktijk OC minder groot.

AFBEELDING 34 RELATIEVE ZUURSTOFINBRENG IN SCHOONWATER EN IN DE PRAKTIJK (75% BELUCHTING)



6.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE BELGROOTTE

In paragraaf 5.5.3 is het CFD-model van rwzi Soerendonk gecalibreerd op basis van de OC-meting van configuratie 8. Bij deze configuratie wordt in 3 beluchtingsvelden met 75% beluchtingscapaciteit belucht. Het bleek mogelijk het model te calibreren door uit te gaan van een belgrootte van 4,5 mm, zoals getoond in Afbeelding 28. Uit deze afbeelding bleek al dat de invloed van de belgrootte op de zuurstofoverdracht groot is. Om dit te kunnen kwantificeren is voor dezelfde configuratie een OC-berekening in schoonwater uitgevoerd voor de drie verschillende belgroottes (3,0 / 4,5 / 6,0 mm). Met behulp van de STOWA tool voor OC-metingen [ref. 7] is door middel van curve fitting vervolgens de $K_L a$ berekend. De zuurstofoverdracht (OC_{20}) is vervolgens berekend door de $k_L a$ te vermenigvuldigen met het tankvolume, de theoretische zuurstofverzadingsconcentratie bij 20°C en de temperatuurscorrectiefactor. Het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel 9.

TABEL 9 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR DE BELGROOTTE (CONFIGURATIE 8)

Belgrootte	Stroomsnelheid	OC_{20} schoonwater		Zuurstofinbreng in de praktijk	
[mm]	[cm/s]	[kg O_2 /h]	[g O_2 /(Nm ³ .m)]	[%]	[%]
3,0	22,8	384	28,6	157	143
4,5	22,6	244	18,1	100	100
6,0	22,6	167	12,4	68	72

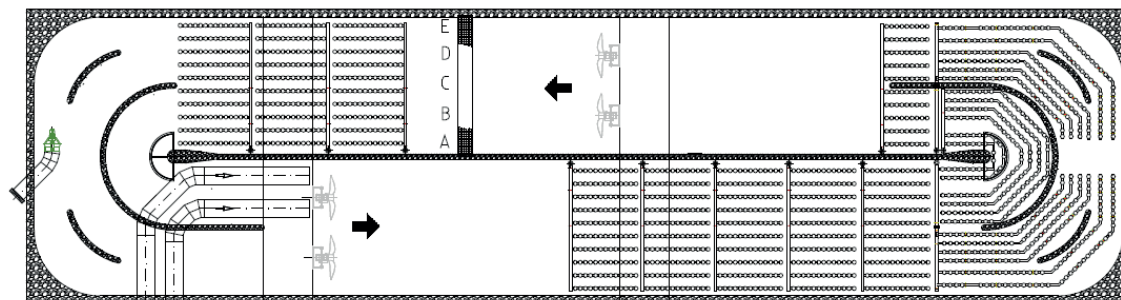
Uit Tabel 9 blijkt dat de belgrootte welke in de modellering wordt aangehouden een grote invloed heeft op de zuurstofoverdracht. Het verdubbelen van de belgrootte van 3,0 naar 6,0 mm leidt tot een afname van de zuurstofoverdracht met een factor 2,3. De invloed op de stroomsnelheid is zeer beperkt.

In de laatste kolom van Tabel 9 is de berekende zuurstofinbreng onder praktijkcondities weer-gegeven, zoals beschreven in paragraaf 6.3. Hierdoor is de vergelijking tussen de zuurstofinbreng in schoonwater en onder praktijkcondities mogelijk. Hieruit blijkt dat de invloed van de belgrootte in de praktijk minder groot is dan op basis van een OC-meting kan worden afgeleid. Het verdubbelen van de belgrootte van 3,0 naar 6,0 mm leidt tot een afname van de zuurstofoverdracht met een factor 2,0.

6.5 NAWOORD

Volgens het toegepaste model heeft het plaatsen van bellenbeluchting alleen in de bocht een negatieve invloed op de stroomsnelheid en de zuurstofoverdracht. In de praktijk worden echter wel positieve resultaten gerapporteerd van omloopssystemen waarbij de beluchtings-elementen aaneengesloten in een bocht wordt geplaatst. Op basis van metingen aan deze configuratie op de rwzi Wenen [ref. 12] wordt geconcludeerd dat dit een verbetering van zowel stroomsnelheid als zuurstofinbreng oplevert. Op basis van deze resultaten is de optie om elementen in de bocht te plaatsen ook opgenomen in de Duitse DWA richtlijn die het ontwerp van de beluchting beschrijft [ref. 13].

AFBEELDING 35 BELLENBELUCHTING IN DE BOCHT OP DE RWZI WENEN [REF. 13]



De zuurstofoverdracht in een omloopstelsel is een complex proces wat niet eenvoudig te modelleren is. In dit onderzoek is getracht om de processen die hierop van invloed zijn zo goed mogelijk te modelleren en het model zo goed mogelijk te calibreren op basis van de meetgegevens. Of het model vervolgens goed genoeg is om ook effecten te voorspellen onder omstandigheden die afwijken van de meetomstandigheden is lastig te verifiëren. Bovenstaande beschouwing over het plaatsen van beluchtingselementen in de bocht laat zien dat deze praktijkervaringen niet overeenkomen met de modelvoorspellingen uit paragraaf 6.2. Dit geeft aan dat modelvoorspellingen met een zekere terughoudendheid betracht moeten worden.

7

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 CONCLUSIES

Er zijn onder 14 verschillende condities stroomsnelheidsmetingen verricht. Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De stroomsnelheid neemt af als de beluchtingscapaciteit toeneemt;
- De stroomsnelheid neemt af als bij een gelijkblijvend luchtdebiet de specifieke elementbelasting toeneemt;
- De stroomsnelheid neemt toe als aan de buitenzijde van het beluchtingspakket een strook platen wordt uitgezet. Er vindt hierbij een gedeeltelijke kortsluitstroming langs het resterende beluchtingsveld plaats.
- De stroomsnelheid neemt af als het middendeel van het beluchtingsveld uit staat.

Op basis van statische berekeningen kan worden geconcludeerd dat de weerstandsfactor van de reactor van de rwzi Soerendonk circa 3 bedraagt. Hiervan wordt circa 40% veroorzaakt door de bochten en de wanden. De andere helft is een gevolg van onbekende (niet-gemodelleerde) obstakels. De weerstand van de in- en uitstroming is op de rwzi Soerendonk circa 0,5 en is heeft daarmee relatief weinig invloed. Dit is sterk afhankelijk van de uitvoering en kan voor andere beluchtingstanks anders zijn. De weerstand van de bellenbeluchting is sterk afhankelijk van de configuratie en de procesomstandigheden, en varieert van <1 tot 10. De weerstand van de bellenbeluchting neemt sterk toe bij een lagere stroomsnelheid.

Met een CFD-model in COMSOL zijn de metingen op de rwzi Soerendonk gemodelleerd. Het model blijkt over het algemeen goed in staat om de stroomsnelheid te berekenen die ook in de praktijk is gemeten. Het lijkt er echter op dat het variëren van de beluchtingscapaciteit in het model minder effect op de stroomsnelheid heeft dan in de praktijk. De stroming rondom de beluchtingspakketten wordt goed gemodelleerd.

Het berekenen van de zuurstofoverdracht is gecalibreerd op basis van de metingen en ondersteunende 1D-modelberekeningen. Uitgaande van een alfa-factor van 0,7 en een belldiameter van 4,5 mm komen de modelresultaten goed overeen met de meetresultaten.

Het CFD-model berekent tendensen in de zuurstofinbreng die bekend zijn; een toename van de zuurstofoverdracht bij lagere plaatbelasting en bij hogere stroomsnelheden. De invloed van de positionering van de beluchtingselementen op de zuurstofoverdracht is volgens het model gering, behalve bij het plaatsen van beluchtingselementen in de bocht (scenario 16).

Op basis van simulatieberekeningen onder praktijkcondities kan worden geconcludeerd dat de effectieve zuurstofinbreng in de praktijk sterk kan afwijken van de zuurstofinbreng zoals die wordt voorgeschreven en gemeten onder schoonwatercondities. De gemeten zuurstofinbreng gaat uit van standaardcondities in zuurstofloos water. In de praktijk heeft de positionering van de beluchtingsvelden invloed op het deficit en daarmee op de effectieve zuurstofoverdracht. Hierbij kan worden gesteld dat:

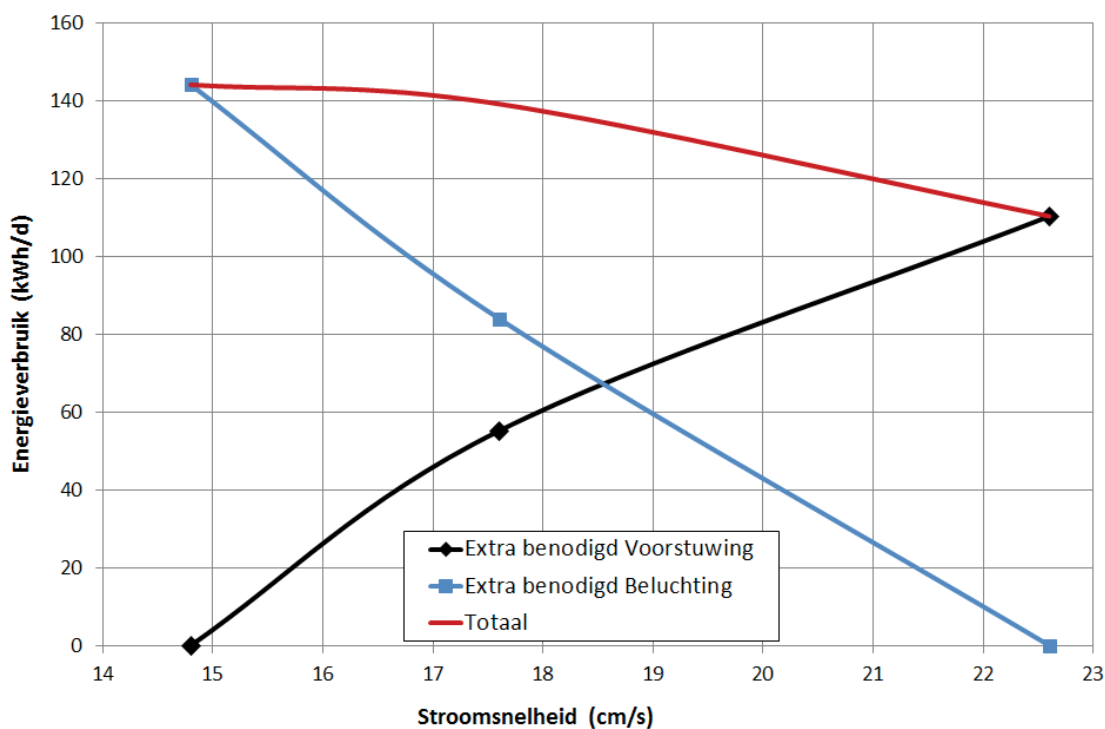
- De effectieve zuurstofoverdracht in de praktijk sterker afhankelijk is van de stroomsnelheid doordat de stroomsnelheid de verblijftijd in het beltenpakket bepaald en daarmee het zuurstofdeficiet. Een hogere stroomsnelheid heeft daardoor een positiever effect dan uit een OC-meting zou blijken.
- Het opsplitsen van een beluchtingsveld in twee (of meer) kleinere beluchtingsvelden leidt, ondanks de lagere stroomsnelheid, tot een verhoging van de zuurstofinbreng onder praktijkcondities. Een bijkomend voordeel van het scheiden van de pakketten in twee zones (scenario 15) kan zijn dat er een grotere aerobe zone ontstaat waardoor de nitrificatiecapaciteit toeneemt.

7.2 AANBEVELINGEN

Op basis van het onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden geformuleerd.

- Het plaatsen van meer beluchtingselementen leidt tot een lagere specifieke elementbelasting. Dit heeft een positieve invloed op zowel de stroomsnelheid als de zuurstofoverdracht.
- Bij het installeren van beltenbeluchting in een omloopsysteem dient voldoende voorstuwkracht te worden geïnstalleerd. Een hogere stroomsnelheid leidt tot een hogere zuurstofoverdracht. Voor de rwzi Soerendonk ligt het optimum boven 22 cm/s (zie Afbeelding 36).
- Het verdelen van de benodigde beluchtingselementen over twee (of meer) velden leidt tot een hogere zuurstofinbreng in de praktijk. Hierbij dienen uiteraard wel de procestechnologische randvoorwaarden voor (simultane) denitrificatie te worden aangehouden.

AFBEELDING 36 HET (EXTRA) ENERGIEVERBRUIK VERSUS DE STROOMSNELHEID VOOR RWZI SOERENDONK



Indien er niet voldoende ruimte in het omloopsysteem aanwezig is kan worden overwogen om beluchtingselementen in de bocht te plaatsen. Indien elementen alleen in de bocht worden geplaatst leidt dit volgens het model tot een grotere weerstand, een lagere stroomsnelheid en een verslechtering van de zuurstofoverdracht. Het plaatsen van elementen in het been en aaneengesloten in de bocht kan wel worden overwogen. Deze configuratie is in dit onderzoek niet meegenomen maar leidt volgens andere onderzoeken (zie paragraaf 6.5) wel tot een verbetering van de zuurstofoverdracht.

8

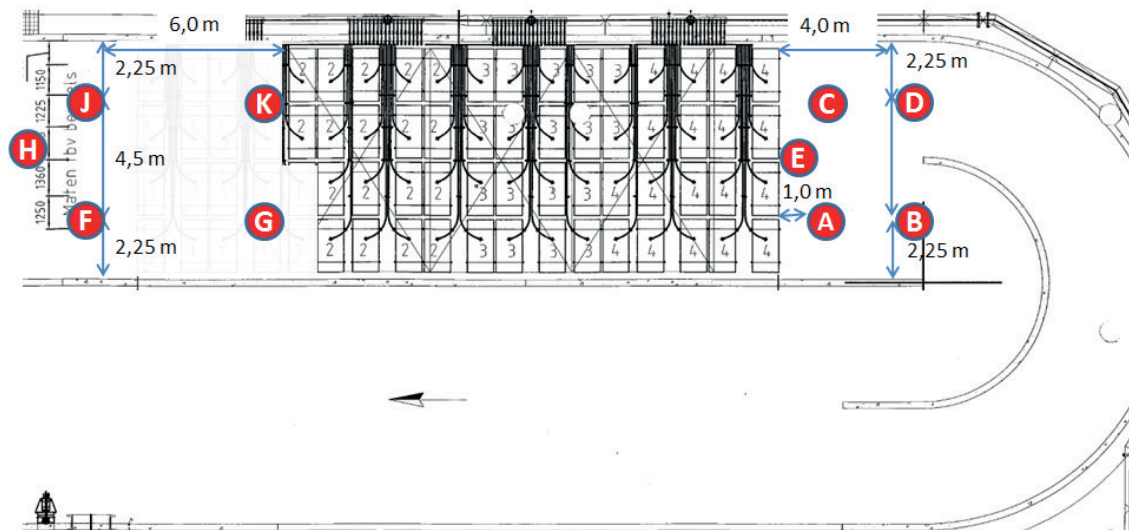
REFERENTIES

- [1] Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer 2012 (Unie van Waterschappen)
- [2] Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer 2009 (Unie van Waterschappen)
- [3] Quick scan inventarisatie achtergronden energiezuinige beluchting rwzi's
STOWA, rapport nr. 2009-W07, ISBN 978.90.5773.445.8
- [4] Energiebesparing door hybride beluchting.
Frank Brandse, Rutger Dijsselhof (Waterschap Reest en Wieden) en Mike van Boldrik (Tauw)
Neerslag 2011/VI, blz. 41-47
- [5] Efficiënt omgaan met energie: rwzi Wenen
Lambert Mombers (ITT Flygt)
Neerslag 2007/V, blz. 50-56
- [6] Menging en voortstuwing van actief-slibsystemen in ronde reactoren
STOWA, rapport nr. 2006-19, ISBN 978-90.5773.339.0
- [7] Handreiking OC-meting in de praktijk
STOWA, rapport nr. 2009-15, ISBN 978.90.5773.433.5
- [8] Mondelinge mededelingen door Lars Uby en Lambert Mombers van Xylem
- [9] Handbook of mixing for wastewater and similar applications
Lars Uby, Ph.D., 2012, Xylem Water Solutions AB, ISBN 978-91-980421-0-8
- [10] Handbook of hydraulic resistance; coefficients of local resistance and of friction.
I.E. Idel'cik, 1960
- [11] COMSOL CFD Module Users Guide
- [12] The role of diffuser arrangement and mixing for efficiency optimisation of fine bubble aeration systems
Wilhelm Frey, LWWTP Workshop, Wenen, September 2007
- [13] Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen –
Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung
DWA Regelwerk, Merkblatt DWA-M 229-1, September 2017

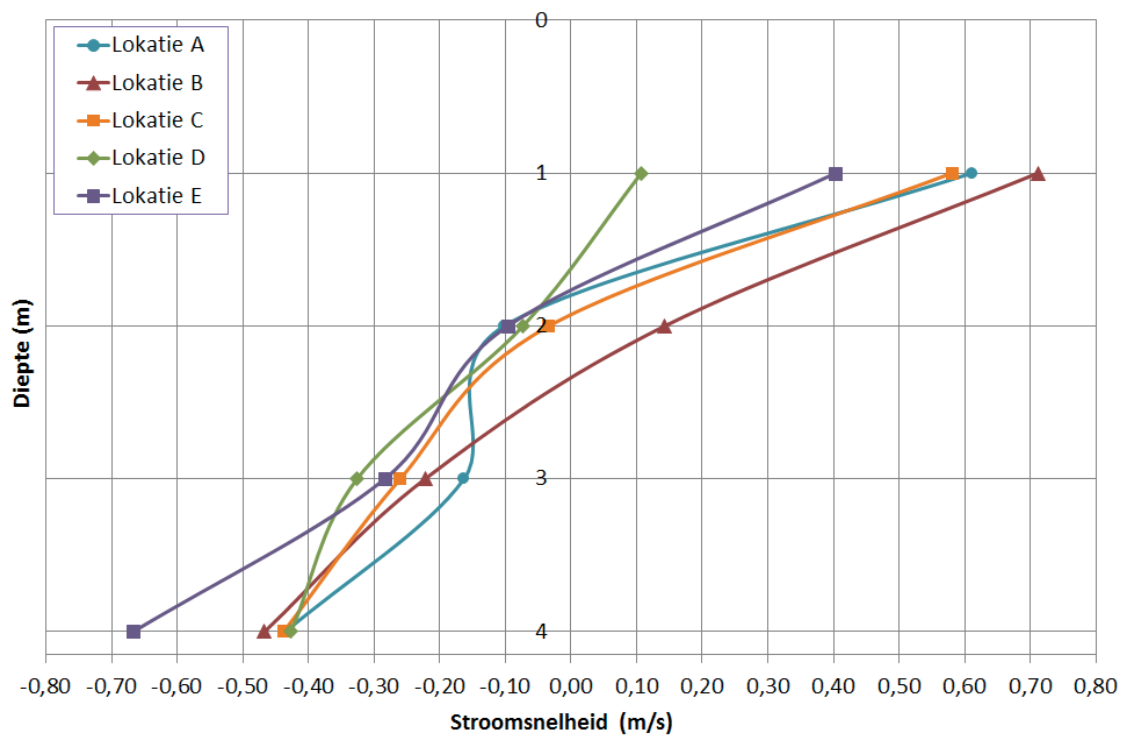
BIJLAGE 1

RESULTATEN VAN DE 3D-STROOMSNELHEIDSMETINGEN – METING 10

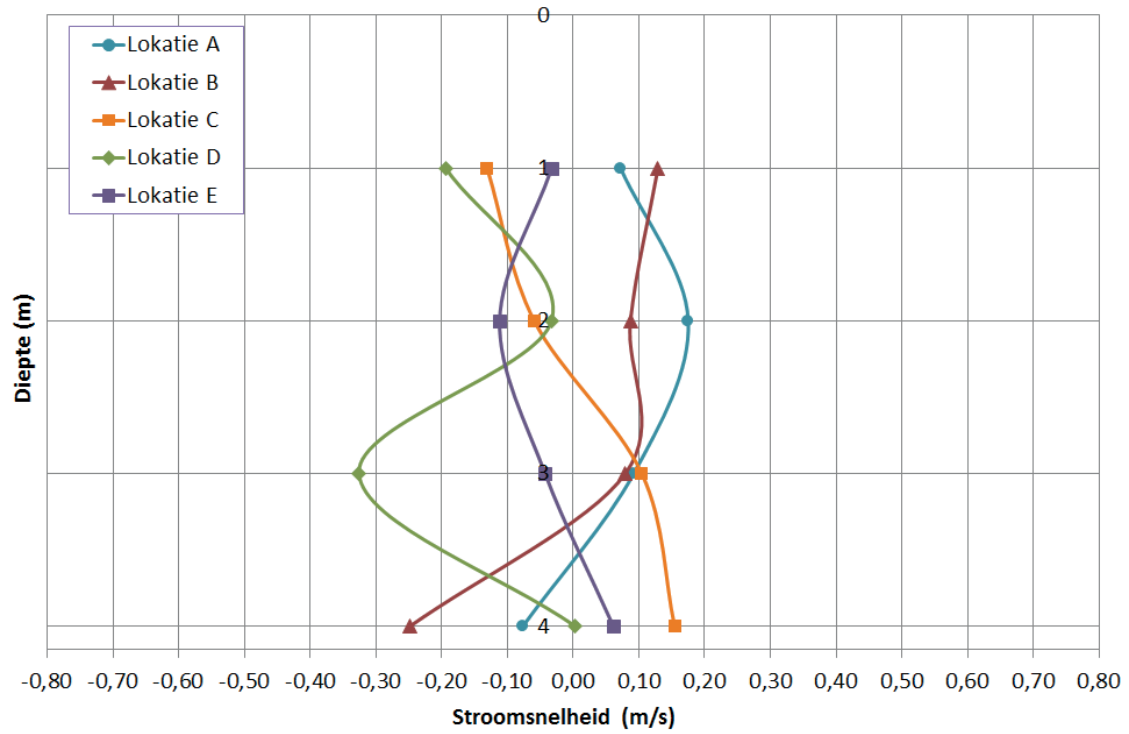
AFBEELDING 1.1 SYSTEEMCONFIGURATIE EN MEETLOKATIES TIJDENS METING 10



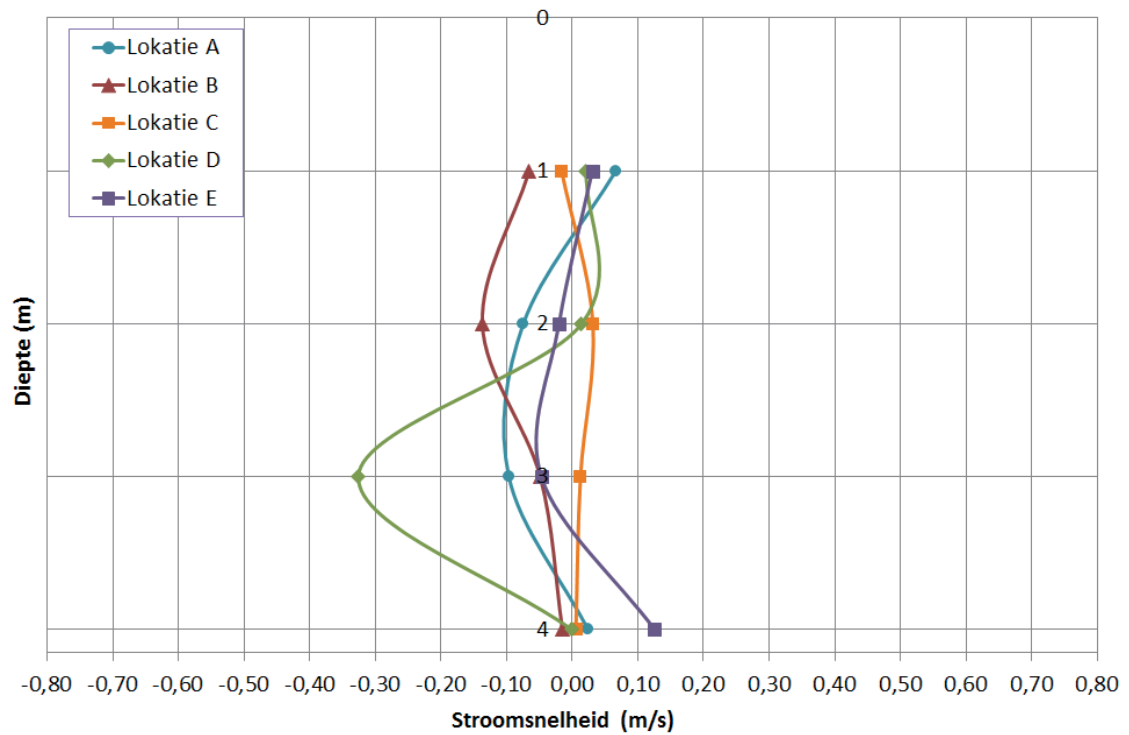
AFBEELDING 1.2 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (X-RICHTING)



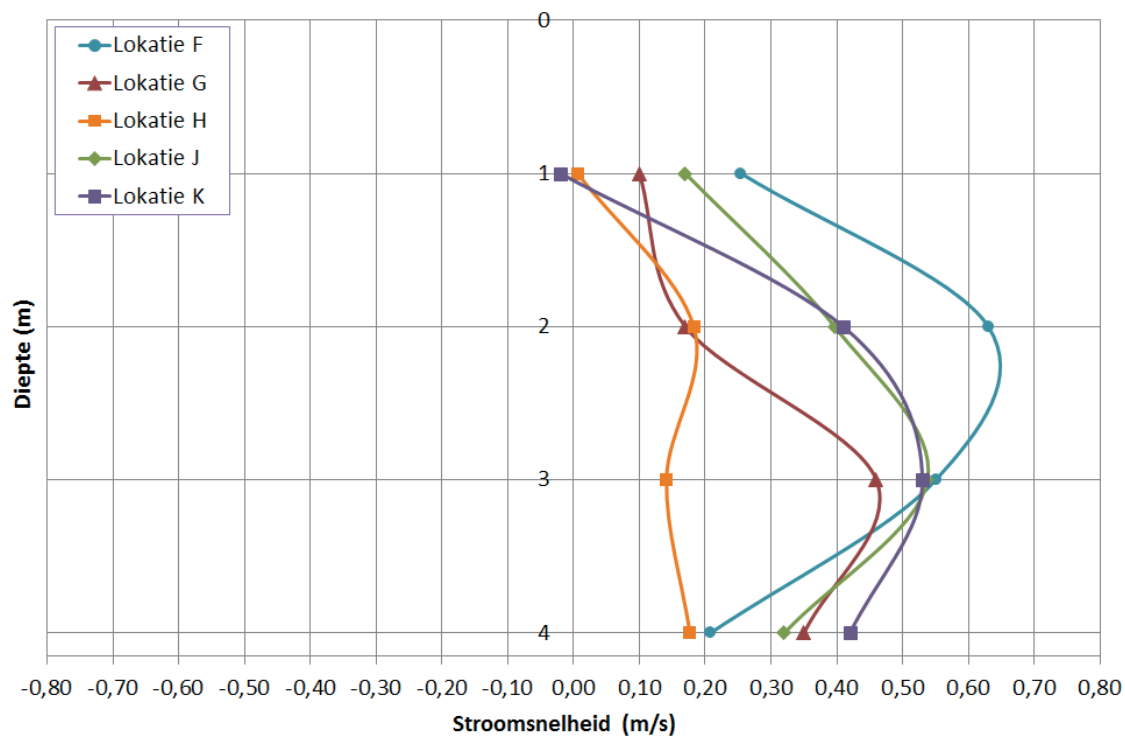
AFBEELDING 1.3 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Y-RICHTING)



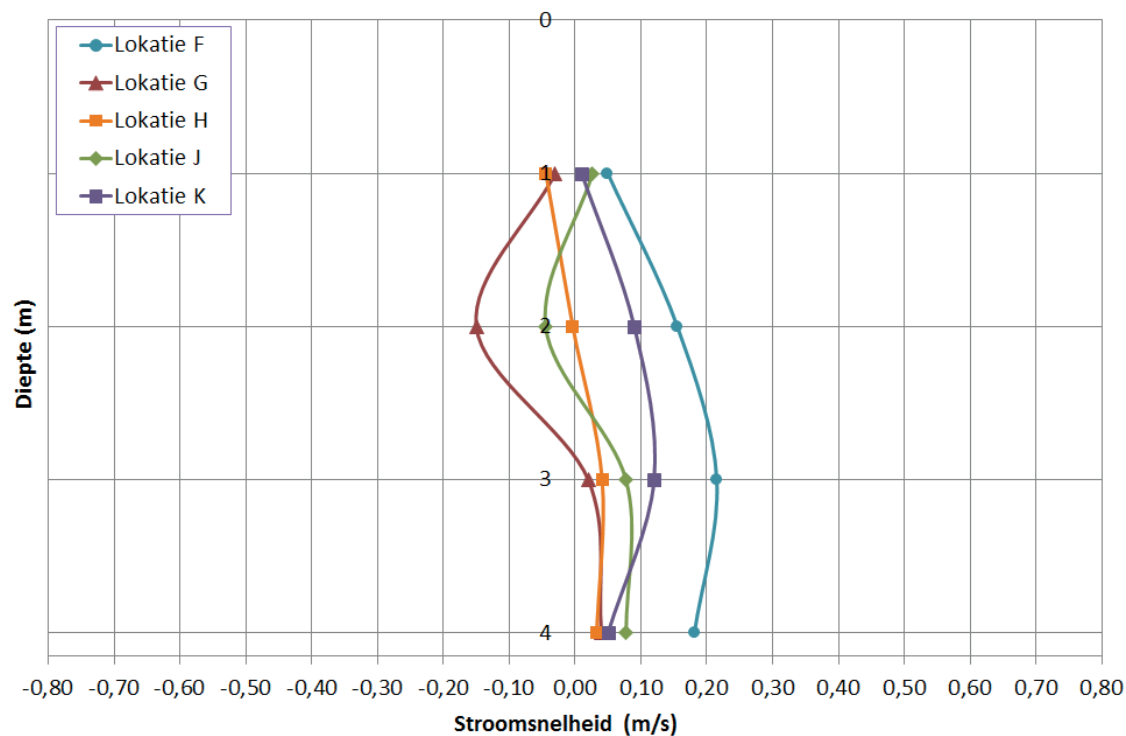
AFBEELDING 1.4 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Z-RICHTING)



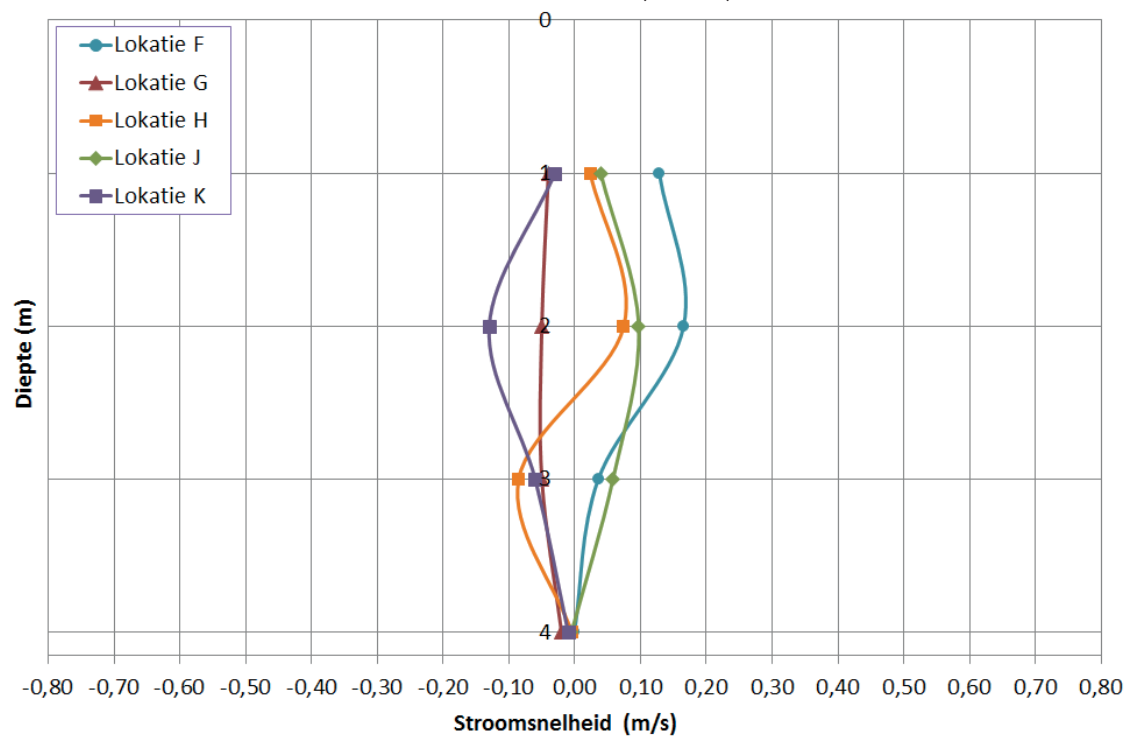
AFBEELDING 1.5 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (X-RICHTING)



AFBEELDING 1.6 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Y-RICHTING)



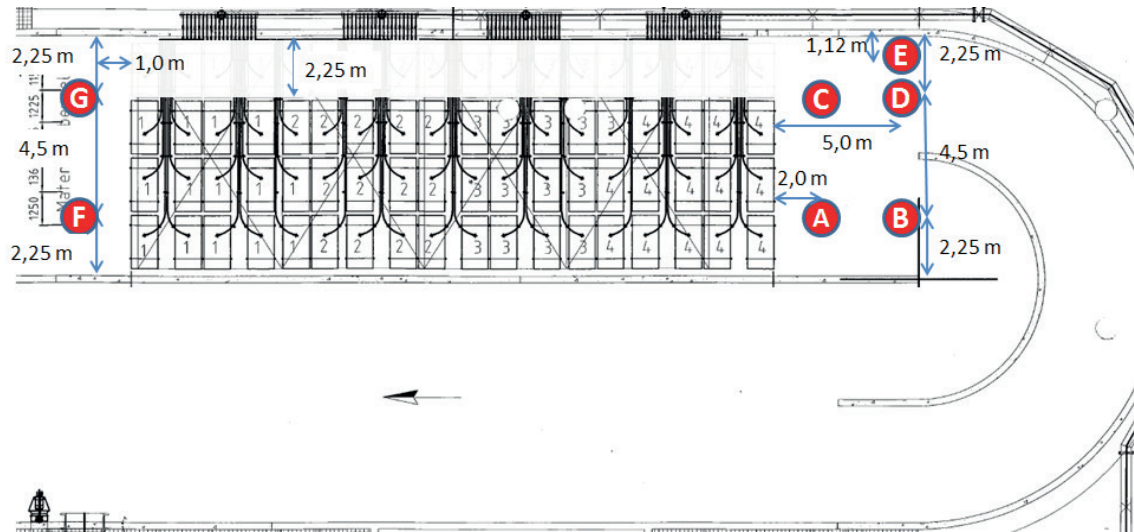
AFBEELDING 1.7 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Z-RICHTING)



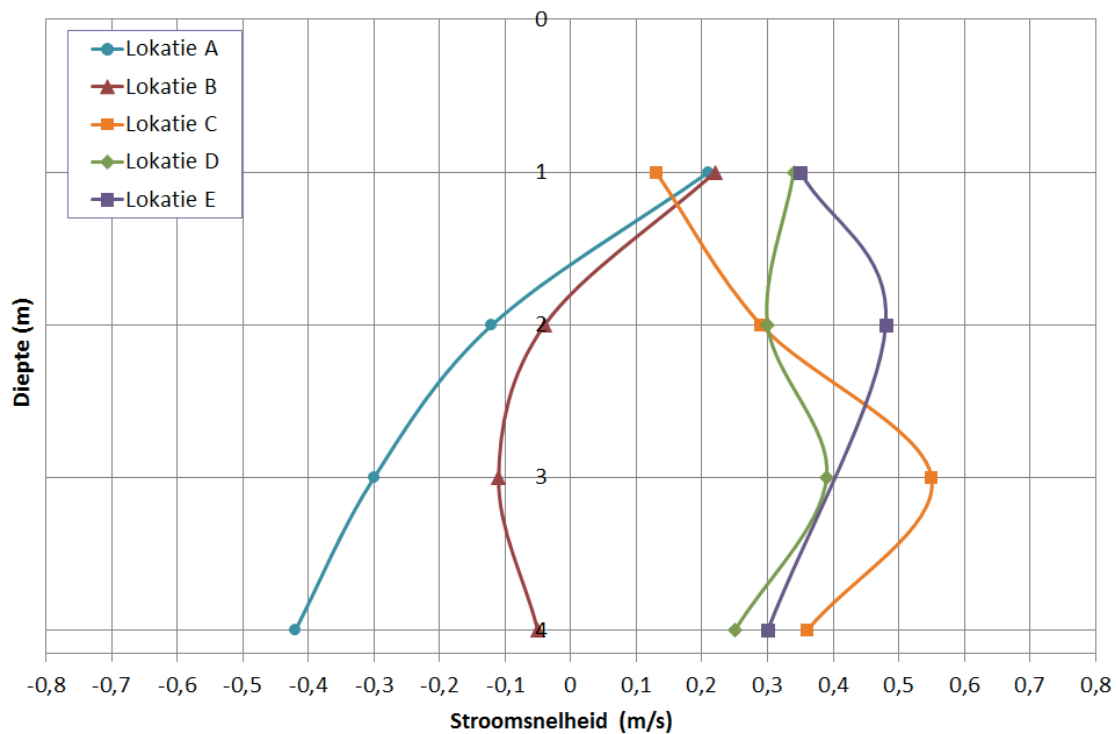
BIJLAGE 2

RESULTATEN VAN DE 3D-STROOMSNELHEIDSMETINGEN – METING 11

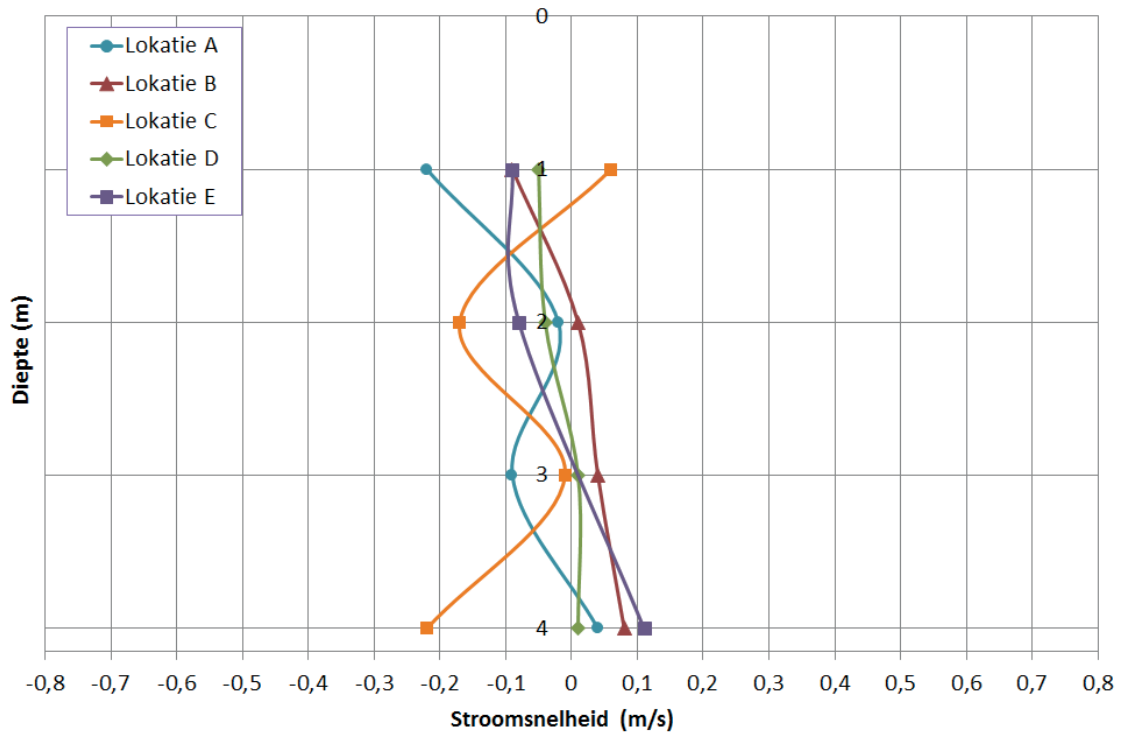
AFBEELDING 2.1 SYSTEEMCONFIGURATIE EN MEETLOKATIES TIJDENS METING 11



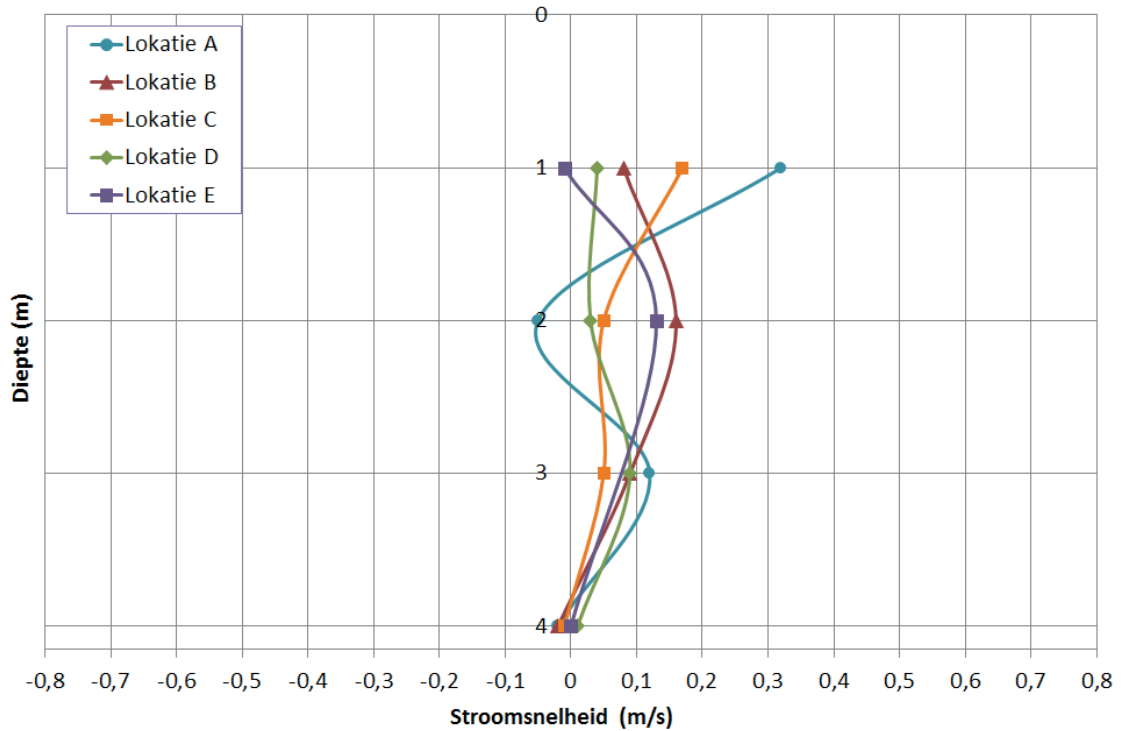
AFBEELDING 2.2 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (X-RICHTING)



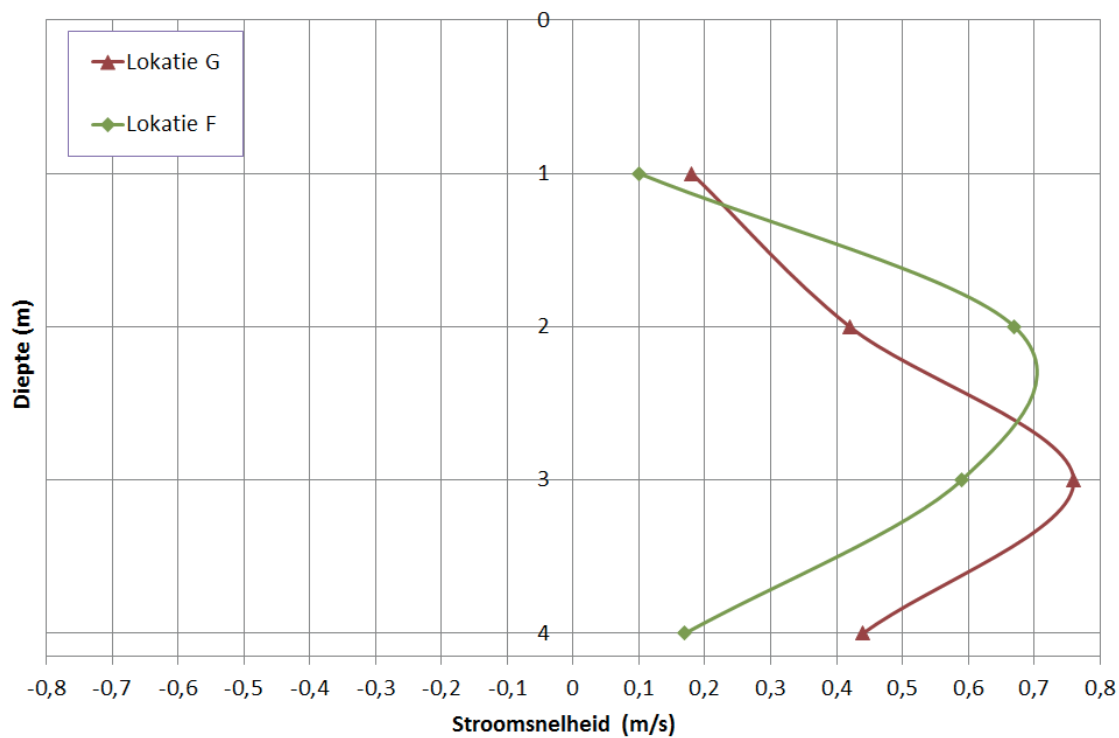
AFBEELDING 2.3 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Y-RICHTING)



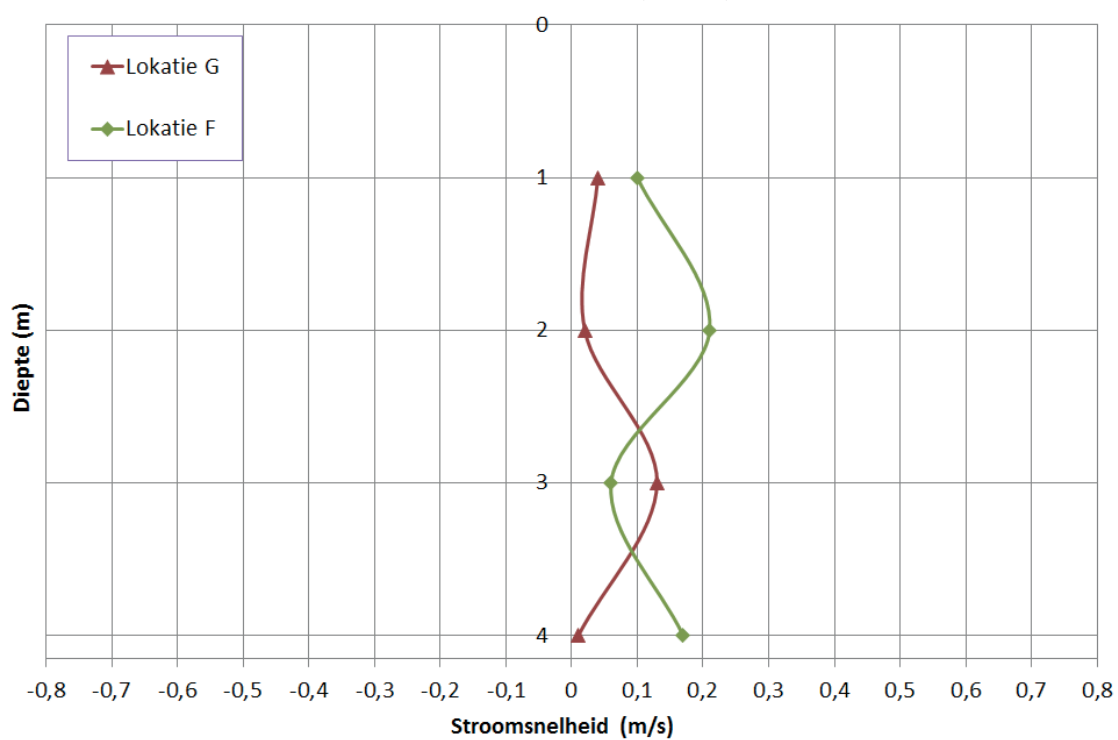
AFBEELDING 2.4 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Z-RICHTING)



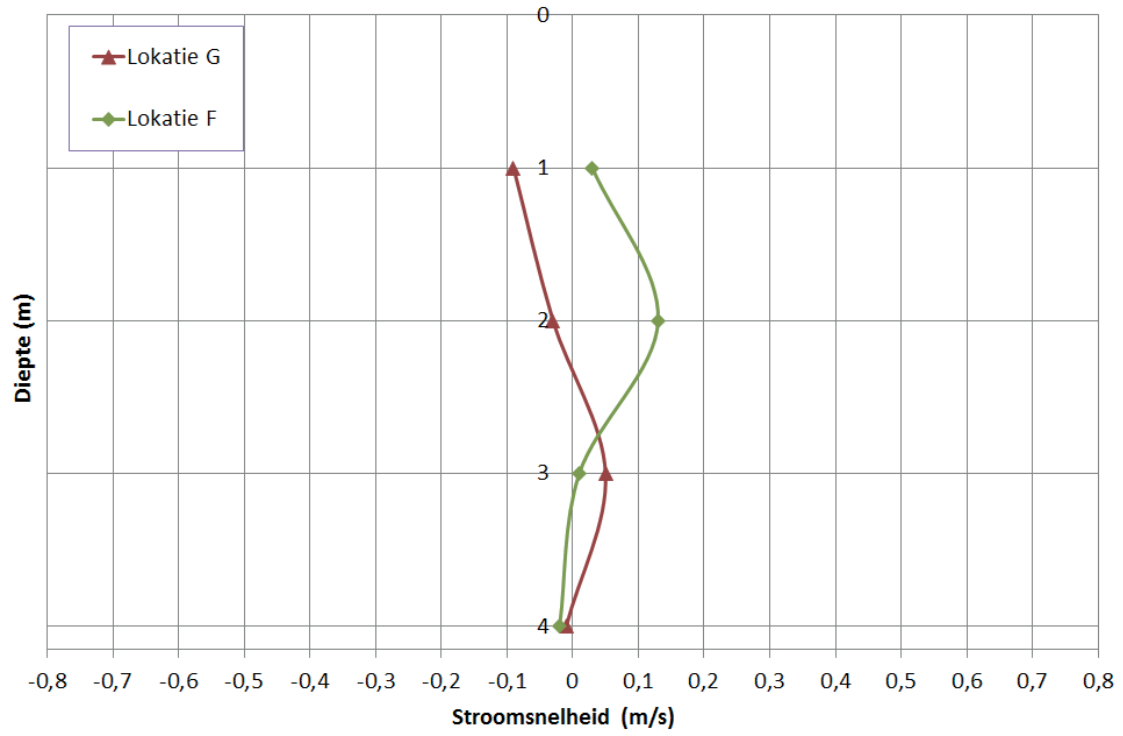
AFBEELDING 2.5 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (X-RICHTING)



AFBEELDING 2.6 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Y-RICHTING)



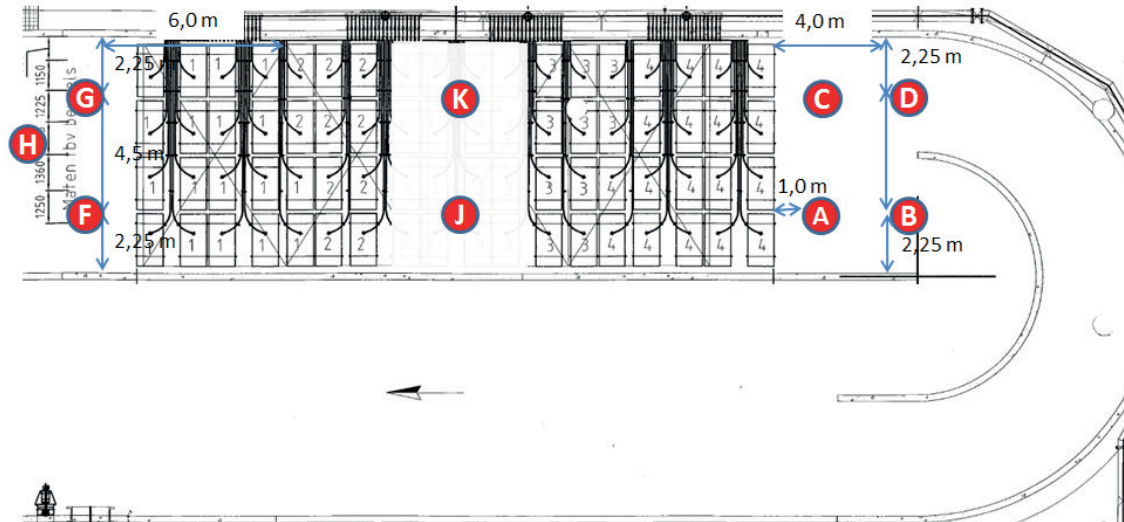
AFBEELDING 2.7 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Z-RICHTING)



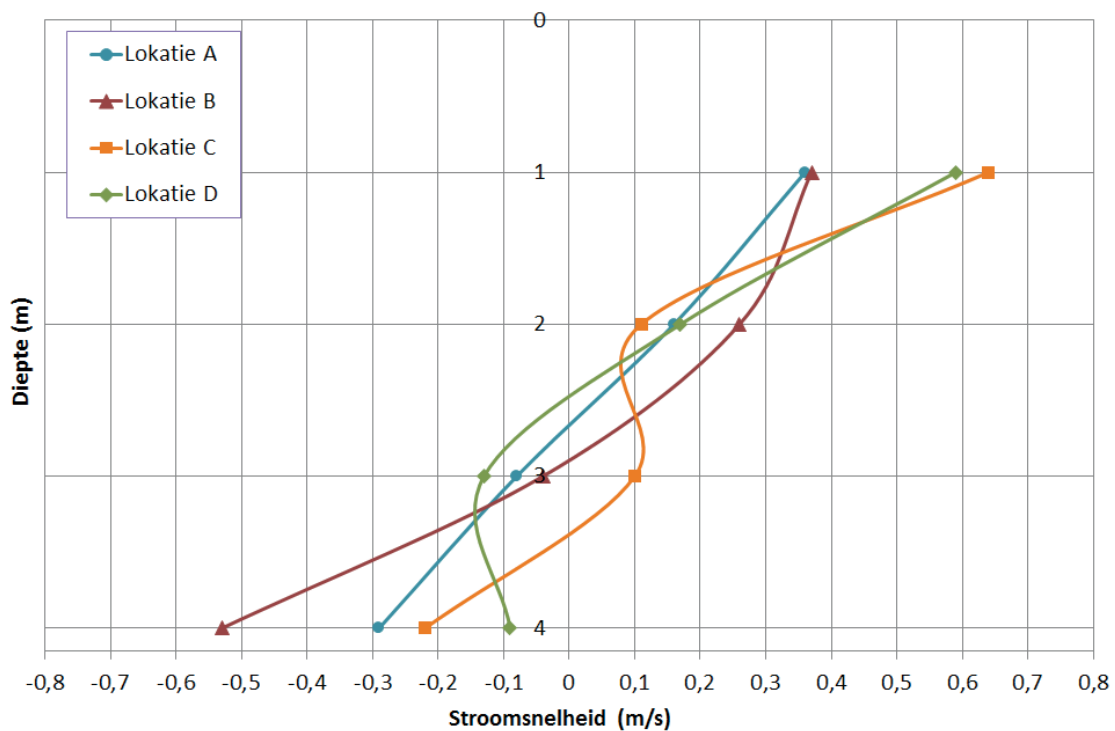
BIJLAGE 3

RESULTATEN VAN DE 3D-STROOMSNELHEIDSMETINGEN – METING 12

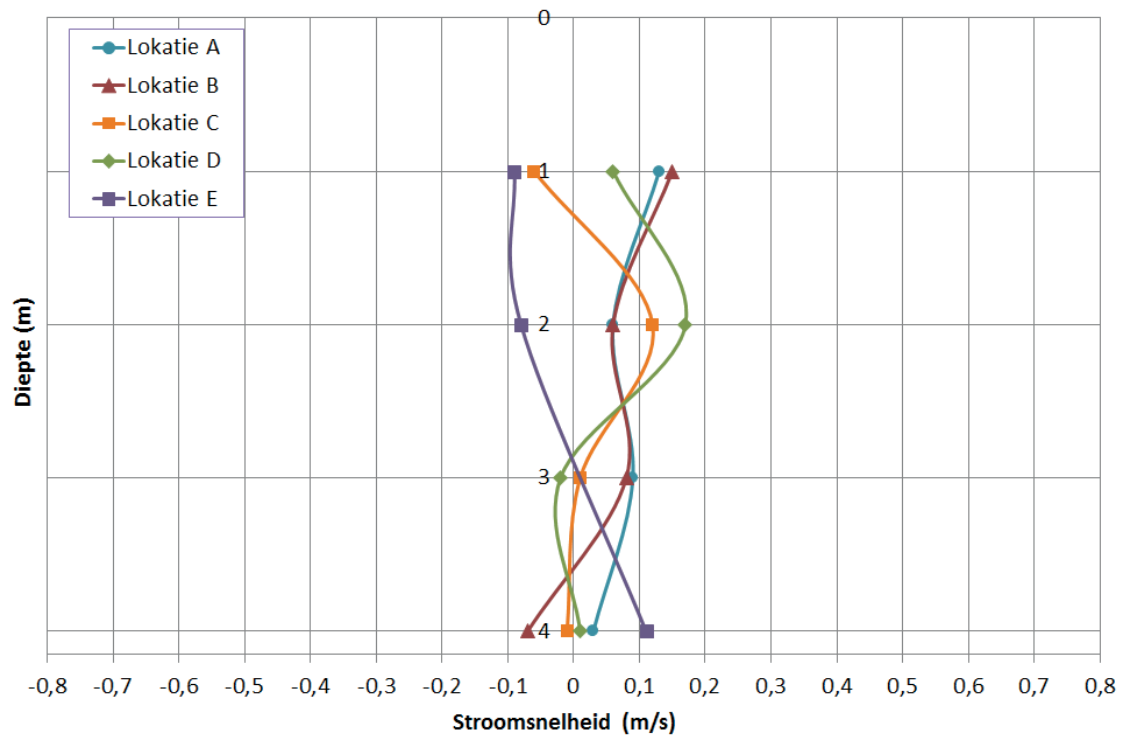
AFBEELDING 3.1 SYSTEEMCONFIGURATIE EN MEETLOKATIES TIJDENS METING 12



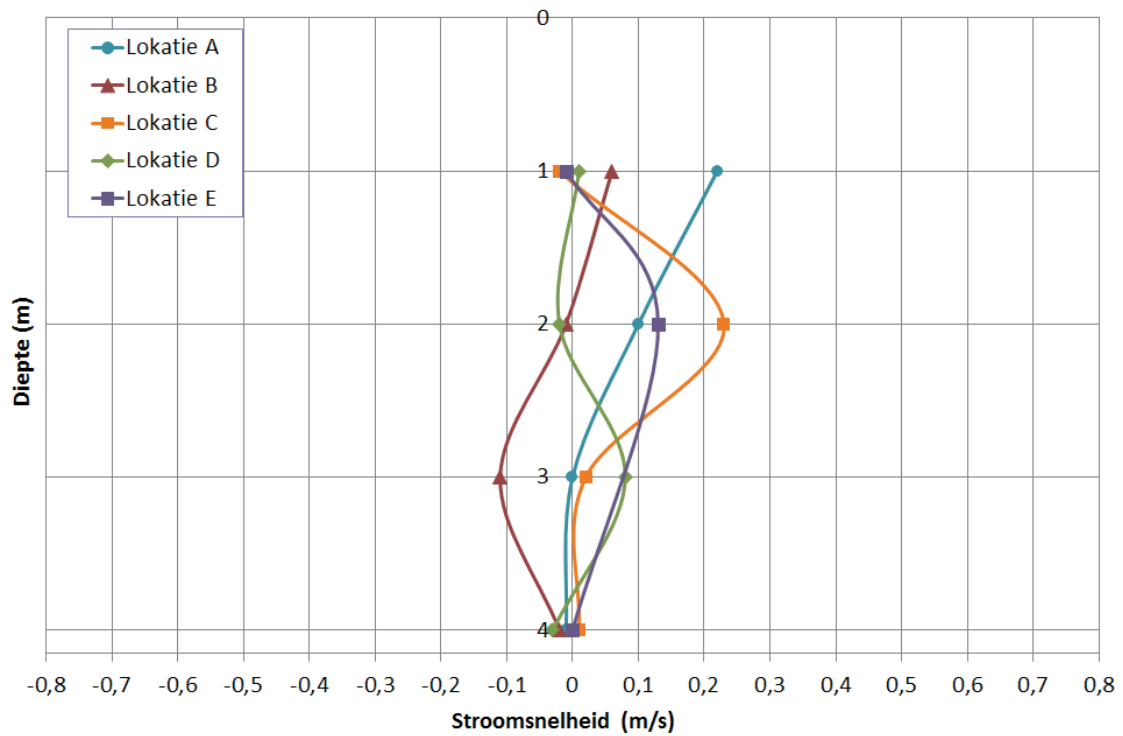
AFBEELDING 3.2 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (X-RICHTING)



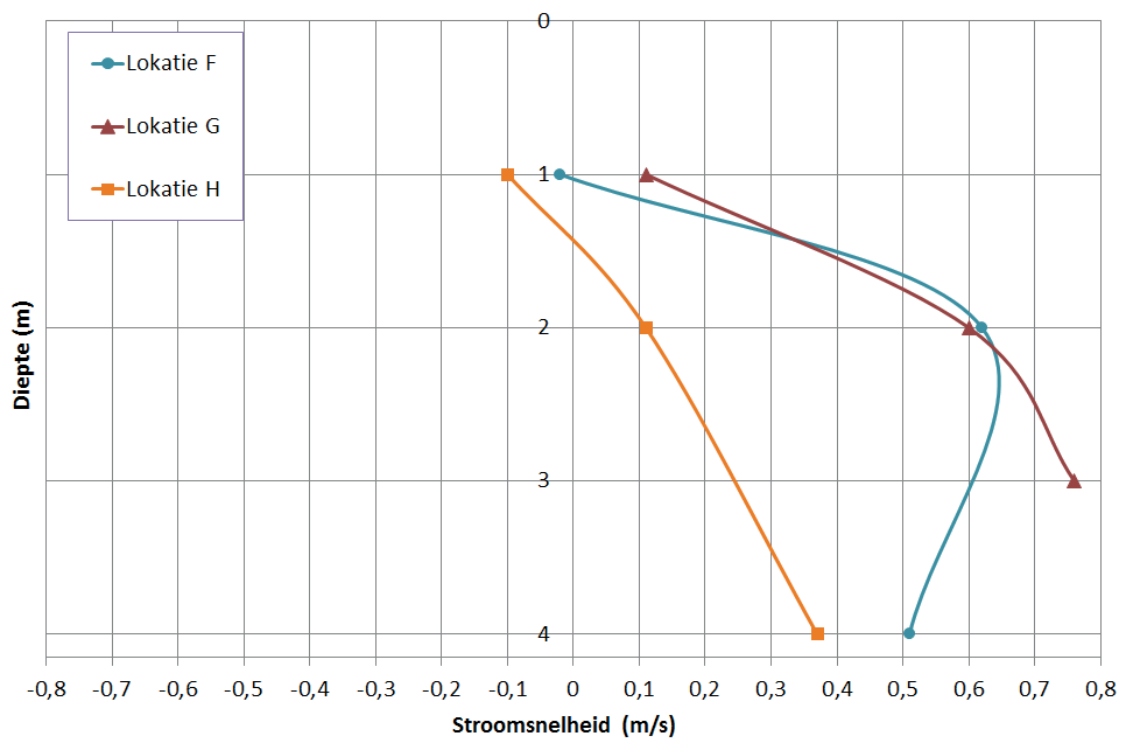
AFBEELDING 3.3 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Y-RICHTING)



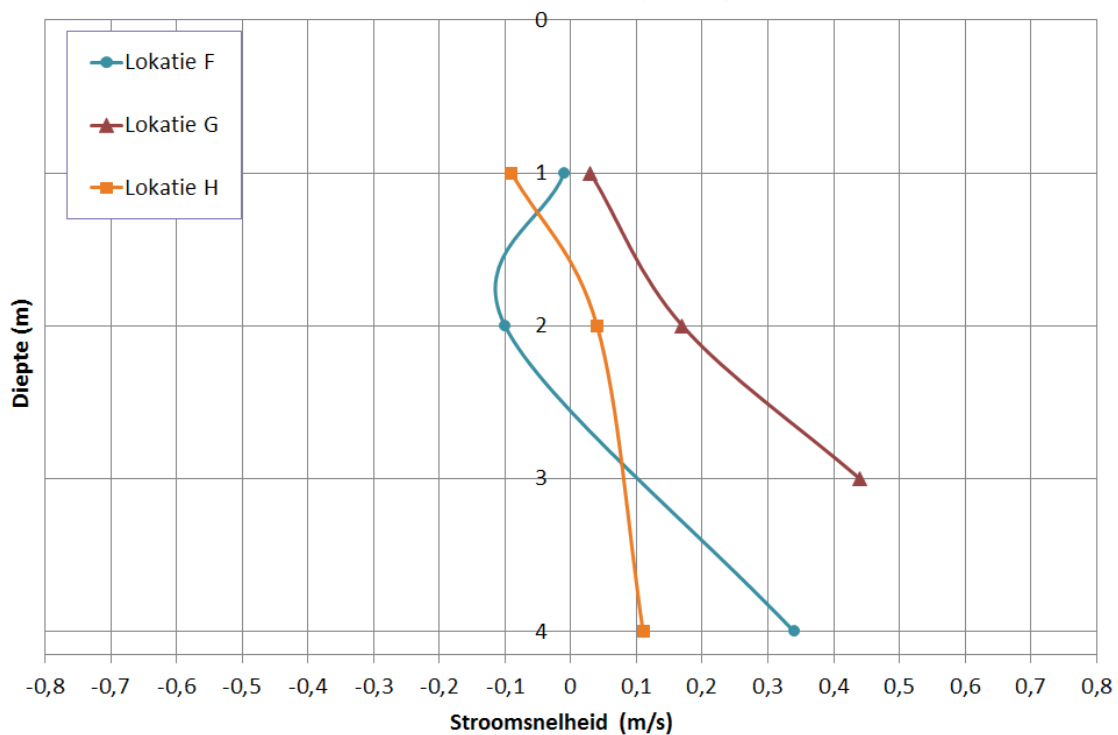
AFBEELDING 3.4 STROOMSNELHEDEN STROOMAFWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Z-RICHTING)



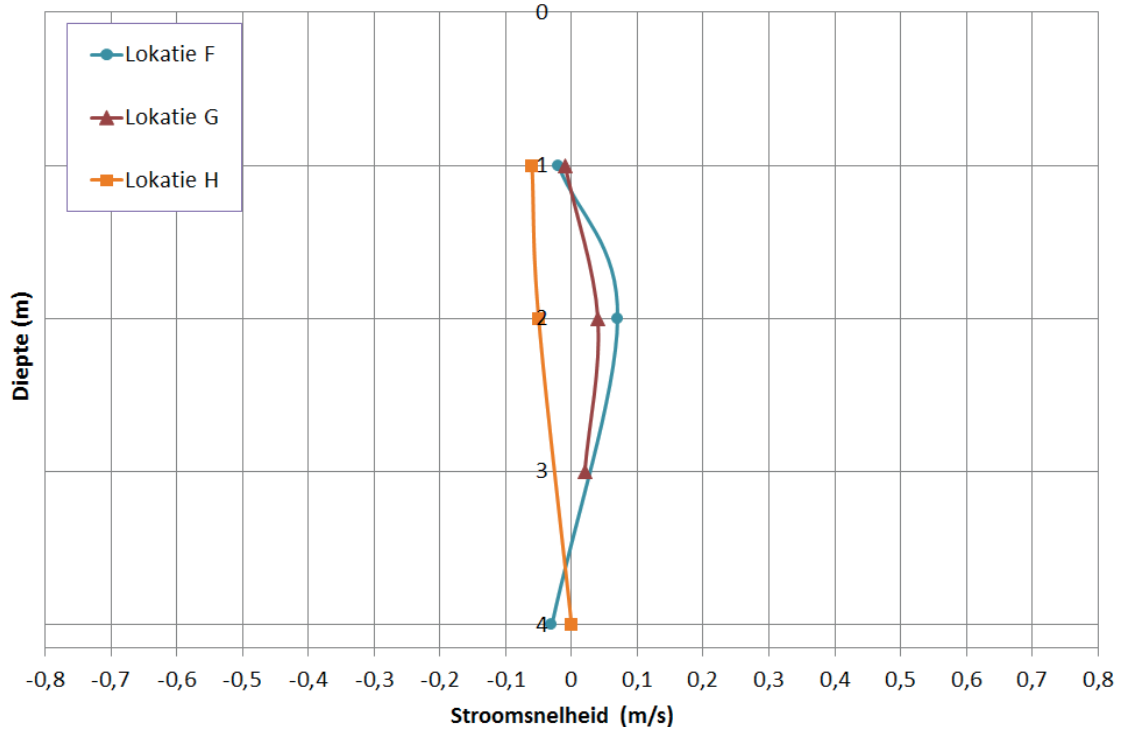
AFBEELDING 3.5 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (X-RICHTING)



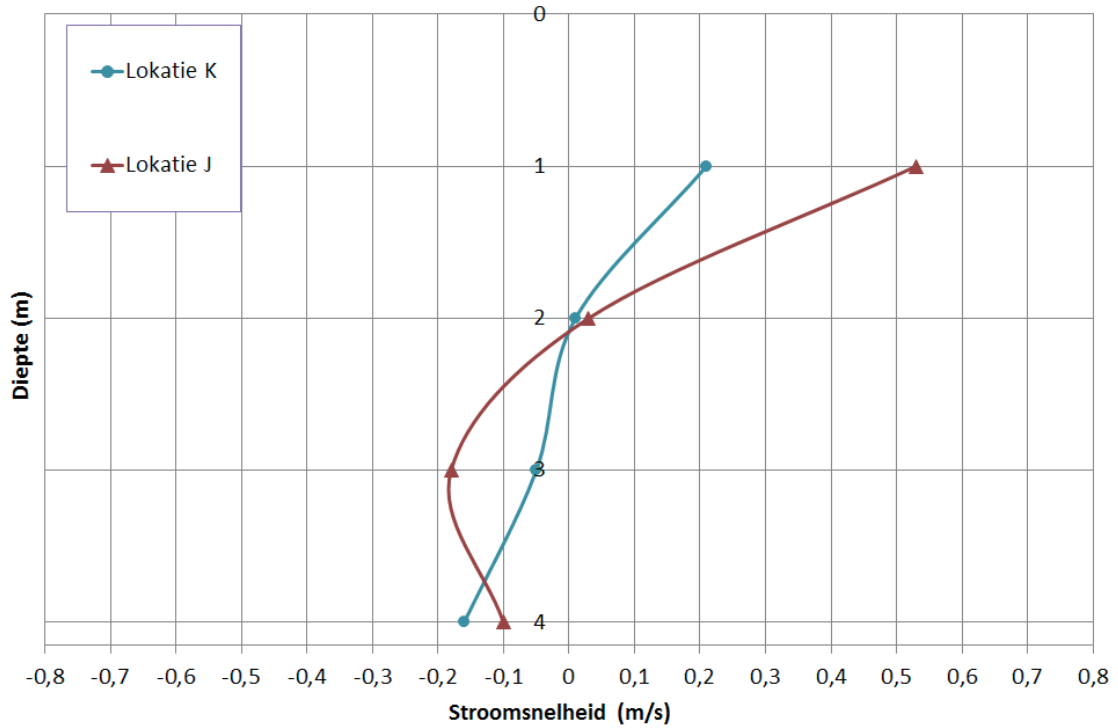
AFBEELDING 3.6 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Y-RICHTING)



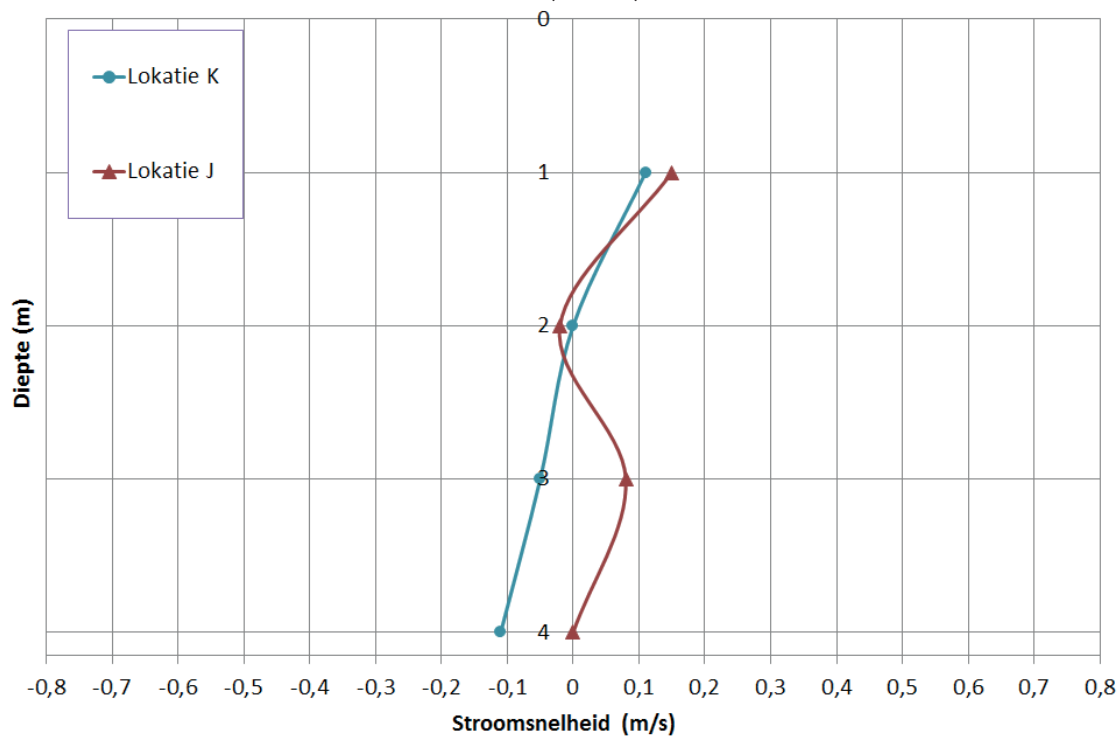
AFBEELDING 3.7 STROOMSNELHEDEN STROOMOPWAARTS VAN HET BELUCHTINGSPAKKET (Z-RICHTING)



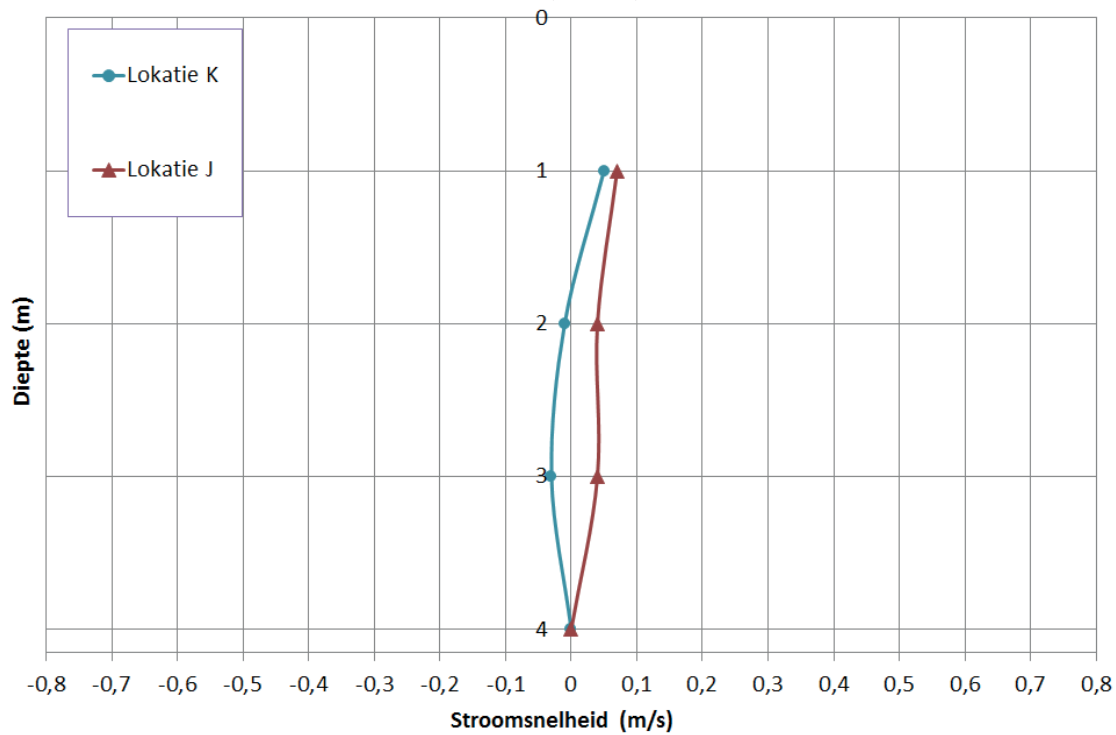
AFBEELDING 3.8 STROOMSNELHEDEN TUSSEN DE BELUCHTINGSPAKKETTEN (X-RICHTING)



AFBEELDING 3.9 STROOMSNELHEDEN TUSSEN DE BELUCHTINGSPAKKETTEN (Y-RICHTING)



AFBEELDING 3.10 STROOMSNELHEDEN TUSSEN DE BELUCHTINGSPAKKETTEN (Z-RICHTING)



BIJLAGE 4

BESCHRIJVING CFD MODEL

INLEIDING

Computational Fluid Dynamics (CFD), is een gedeelte van de vloeistofmechanica dat gebruik maakt van numerieke oplossingstechnieken voor het oplossen en analyseren van vraagstukken die betrekking hebben op vloeistof- en gasstromen. De analytische vergelijkingen van het gekozen stromingsmodel worden omgezet in zogeheten differentievergelijkingen welke voor een eindig aantal cellen (mesh) numeriek worden opgelost. In het geval van COMSOL wordt gebruik gemaakt van de eindige elementen methode als discretisatie methode. Het opstellen van een CFD model in COMSOL bestaat uit de volgende generieke stappen:

1. Opstellen van een geometrie (vereenvoudigde schematisatie van het te modelleren object);
2. Selectie van het type fysica, inclusief configureren van de randvoorwaarden en (initiële) condities;
3. Opstellen van een mesh (grid) voor het specifieke type fysica;
4. Selectie van een oplossingstechniek.

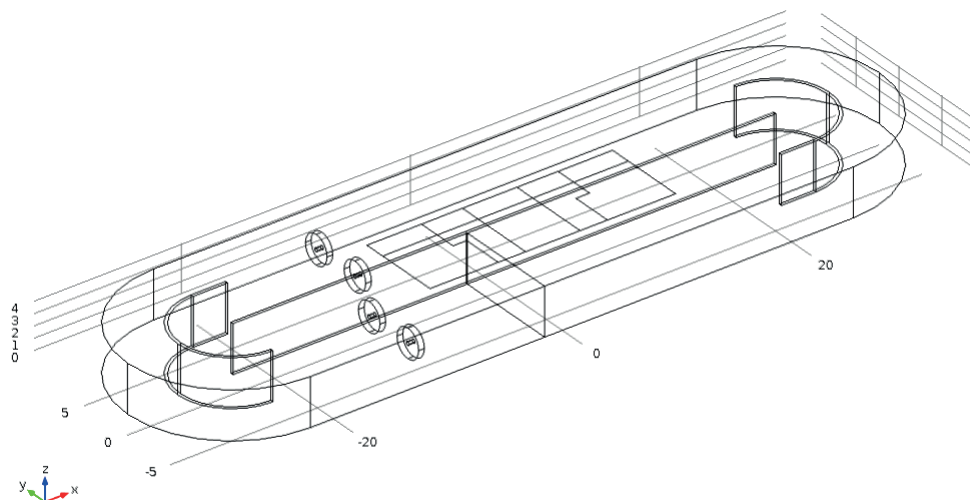
In het onderstaande worden de eerder benoemde generieke stappen voor het specifieke CFD model van rwzi Soerendonk nader uitgewerkt.

GEOMETRIE

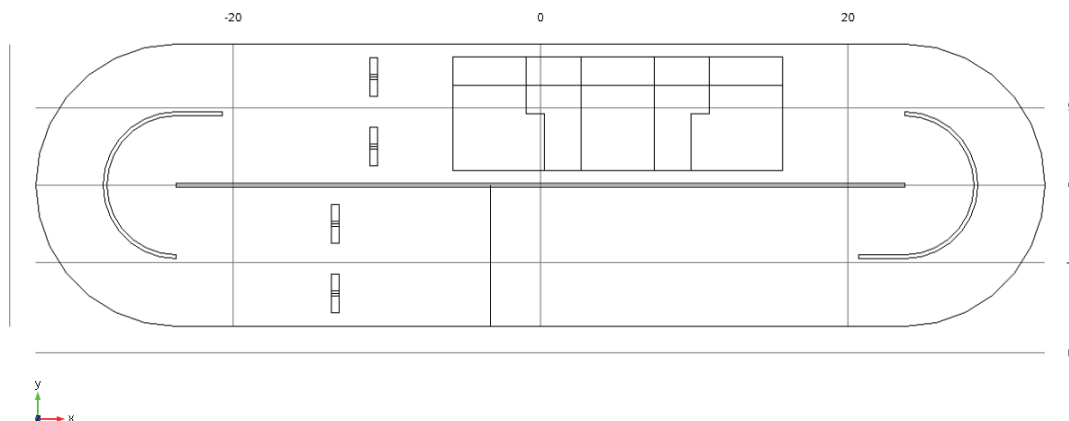
In afbeelding 4.1 en 4.2 is de 3D geometrie van het model van rwzi Soerendonk weergegeven. In het onderstaande zijn de kenmerken van de geometrie samengevat:

- De afstand van de bodem tot de waterspiegel: 4,15 m;
- De scheidingsmuren zijn 1:1 overgenomen van de werkelijke geometrie;
- De beluchtingsplaten zijn op de bodem geschematiseerd, rekening houdend met de in- en uitgeschakelde zones in de eerder beschreven metingen;
- De voortstuwers zijn gedefinieerd als cilinders met een diameter van 2,5 m en een dikte van 0,5 m;
- Er is sprake van een gesloten circulerend systeem (geen in- en uitstroom).

AFBEELDING 4.1 DE 3D GEOMETRIE VAN RWZI SOERENDONK



AFBEELDING 4.2 DE 3D GEOMETRIE VAN RWZI SOERENDONK (BOVENAANZICHT)



FYSICA

In het CFD model worden drie typen fysica toegepast:

1. Turbulent stromingsmodel (Reynolds-Averaged Navier-Stokes k-epsilon model);
2. Bellenstromingsmodel (Bubbly Flow model);
3. Zuurstofoverdracht model (Convectie-dispersie model i.c.m. reactiekinetiek)

In de volgende paragrafen zijn de drie typen fysica nader uitgewerkt en gespecificeerd.

CONFIGURATIE TURBULENT STROMINGSMODEL

Voor het turbulent stromingsmodel is gebruik gemaakt van het zogeheten k-epsilon model. Het model maakt gebruik van de Reynolds-Averaged Navier-Stokes vergelijkingen. Voor de uitgebreide uitwerking van deze vergelijkingen wordt verwezen naar de COMSOL manual [ref. 9].

Randvoorwaarden

Het model is met de volgende randvoorwaarden geconfigureerd:

1. “volume force” voor de voortstuwers: de voortstuwers zijn als volumekracht geconfigureerd, hierbij bedraagt de bruto kracht 1,7 kN per voortstuwer welke met een factor voor “non-open-sea conditions” is gecorrigeerd (ca. 25% afname) en vervolgens gekalibreerd (ca. 25% afname). De kalibratie is uitgevoerd voor de referentiesituatie zonder beluchting en vier voortstuwers (meting 1) en gevalideerd voor de situaties zonder beluchting met één t/m drie voortstuwers (metingen 2, 3 en 4).
De volumekracht van de voortstuwers is ruimtelijk gedistribueerd met de “Goldstein optimum method”.
2. “slip” voor de waterspiegel, verondersteld wordt dat de waterspiegel geen wrijving ondervindt deze keuze modelmatig de voorkeur.
3. “wall function” voor alle overige wanden. De muurfunctie is noodzakelijk voor de berekening van de bocht- en wandverliezen die optreden. Voor de frictie van de muur is een waarde van 1,0 mm gehanteerd. De bochtverliezen volgen uit de berekening zelf.

Overige belangrijke constanten en variabelen:

- referentiedruk (P_{ref}): 1,0 atm

CONFIGURATIE BELLEN STROMINGSMODEL

Voor het belLEN stromingsmodel is gebruik gemaakt van het zogeheten Bubbly Flow model. Het model maakt gebruik van de Bubbly Flow vergelijkingen. Voor de uitwerking van deze vergelijkingen wordt verwezen naar de COMSOL manual [ref. 9].

Randvoorwaarden

Het model is met de volgende randvoorwaarden geconfigureerd:

1. “gass inlet” voor de beluchtingsplaten, bij 100% beluchting bedraagt de massaflux lucht ca. 0,01 kg/m²/s of te wel 4320 Nm³/h. Afhankelijk van het te beschouwen scenario, is deze randvoorwaarde aangepast.
2. “gass outlet” voor de waterspiegel: de belLEN ontsnappen hier vrij aan de waterspiegel.
3. “no gass flux” voor alle overige wanden.

Overige belangrijke constanten en variabelen:

- Diameter bel(d_b): 3,0 mm, (4,5 mm t.b.v. zuurstofoverdracht)
- Oppervlaktespanning (σ): 0,07 N/m
- Moleculair gewicht lucht (M): 28,8 g/mol

CONFIGURATIE ZUURSTOFOVERDRACHT MODEL

Voor het zuurstofoverdracht model is gebruik gemaakt van een zogeheten conversie-dispersie- en een reactiekinetiek model. Voor de uitwerking van de vergelijkingen van het convectie-dispersie model wordt verwezen naar de COMSOL manual [ref. 9]. In het onderstaande zijn de vergelijkingen van het reactiekinetiek model nader uitgewerkt:

1. Berekening van de zuurstofoverdracht van de gasfase naar de waterfase:
 - a. De zuurstofoverdracht per tijdseenheid wordt berekend op basis van een zuurstof deficit t.o.v. de verzadigingsconcentratie (C_L^*):

$$dC_L/dt = \alpha K_L a (C_L^* - C_L)$$
 - b. De verzadigingsconcentratie (C_L^*) van zuurstof in water kan worden berekend met de wet van Henry:

$$C_L = \epsilon_g (P_{ref} + P)/H$$
 - c. De lokale overdrachtscoëfficiënt (K_L) kan worden berekend op basis van de wet van Higbie met V_r (m/s) de relatieve snelheid en D_L (cm²/s) de diffusiecoëfficiënt van zuurstof in water:

$$K_L = 2\sqrt{(D_L V_r / \pi d_b)}$$
 - d. Het uitwisselingsoppervlak van de belLEN a (m²/m³) wordt berekend op basis van de gasfractie (ϕ_g) en de belldiameter (d_b):

$$a = \phi_g / (1 - \phi_g) * (6/d_b)$$
2. Berekening van de endogene respiratie in de waterfase met de Monod vergelijking:
 - a. $dC_L/dt = -r_{akt} C_L / (\mu O_2 + C_L)$

Randvoorwaarden

Het model is met de volgende randvoorwaarden geconfigureerd:

1. Stroomsnelheden (uit kepsilon model) worden in het convectie-dispersie model gebruikt voor de convectie van opgelost zuurstof in water;

2. Turbulente dispersie (uit k-epsilon model) wordt in het convectie-dispersie model gebruikt voor de dispersie van opgelost zuurstof in water;
3. “No Flux” voor alle wanden.

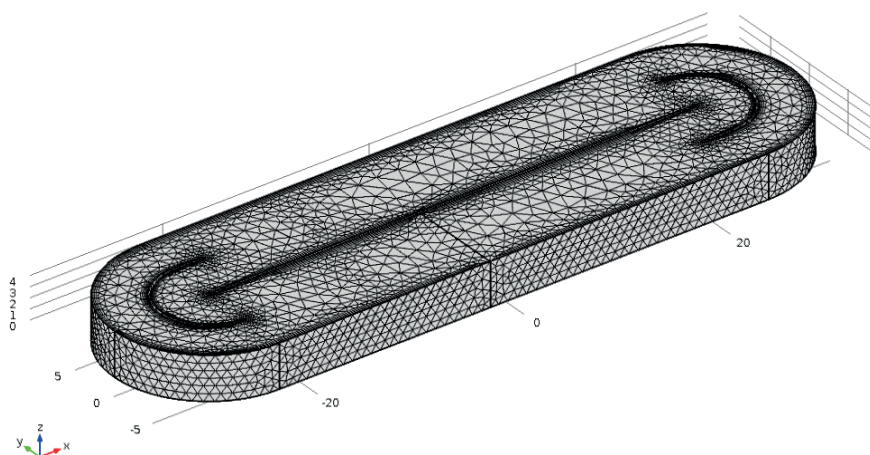
Overige belangrijke constanten en variabelen:

- Constante van Henry (H) O_2 in H_2O als functie van de temperatuur bij $16,6^\circ C$: $652 \text{ dm}^3 \text{ atm/mol}$
- Gasfractie (ϵ_g) zuurstof in lucht: 20%
- Endogene respiratie (μ_{O_2}): $\sim 0,25 \text{ g/m}^3/\text{min}$ inactief slib $\sim 1,25 \text{ g/m}^3/\text{min}$ actief slib.
- Alfa factor (α) voor fijne bellenbeluchting: 0,70 –
- Diffusiecoëfficiënt zuurstof in water (D_l): $1,97 \text{ e}^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
- Moleculair gewicht zuurstof (M): $32,0 \text{ g/mol}$

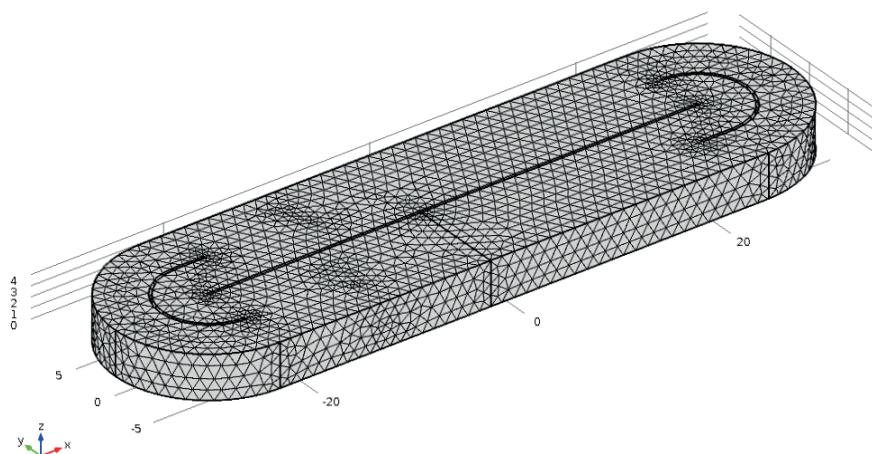
MESH

In afbeelding 4.3 en 4.4 is een voorbeeld van 3D meshing van het model van rwzi Soerendonk weergegeven. De meshing is specifiek toegespitst op de gekozen fysica. Voor de toepassing van het turbulente stromingsmodel met bellenstroming is een mesh toegepast dat nabij de wand sterk is verfijnd. De voornaamste reden hiervoor is dat in het geval van het turbulente stromingsmodel het essentieel is om de stroming nabij de wand juist te simuleren. Voor de toepassing van het convectie-dispersie model is het van belang dat de meshing overal het geheel fijn is. De voornaamste reden hiervoor is dat in het geval van het convectie-dispersie model het van belang is om uitmiddeling als gevolg van het mesh zoveel mogelijk te voorkomen. Het aantal op te lossen parameters is net als de resolutie van het mesh bepalend voor het geheugengebruik bij de berekening. In het geval van één op te lossen parameter, zoals bij het convectie-dispersie model, is er meer ruimte over voor fijnere meshing.

AFBEELDING 4.3 DE 3D MESH VAN RWZI SOERENDONK TURBULENTE STROMINGSMODEL



AFBEELDING 4.4 DE 3D MESH VAN RWZI SOERENDONK CONVECTIE-DISPERSIEMODEL



OPLOSSINGSTECHNIEK

Het CFD model is met een directe (i.p.v. iteratieve) oplossingstechniek opgelost, gegeven de randvoorwaarden en het mesh. Er zijn twee typen berekeningen uitgevoerd:

Stationaire berekeningen:

Het belLEN- en stromingsmodel zijn gecombineerd doorgekend. Het turbulente stromings- en belLENmodel maken beide gebruik van een uitgemiddelde benadering. De turbulenties in het stromingsmodel worden “gemiddeld berekend” als ook blijkt uit de naam “Reynolds-Averaged”. De belLEN in het belLENmodel worden berekend als fractie: het aantal belLEN per element. In beide gevallen is alleen de stationaire eindtoestand van interesse, namelijk de stroomsnelheden en belLENfractie gegeven de randvoorwaarden.

Voor elk scenario is dus een uitkomst middels een stationaire berekening bepaald.

Niet-stationaire berekeningen:

Het zuurstofoverdracht model is apart doorgekend op basis van de uitkomsten van bovenstaande stationaire oplossing. De benodigde stroomsnelheden, turbulentie en gasfractie zijn dus al bepaald. In dit geval is het verloop van de zuurstofconcentratie over de tijd van interesse gegeven de randvoorwaarden.

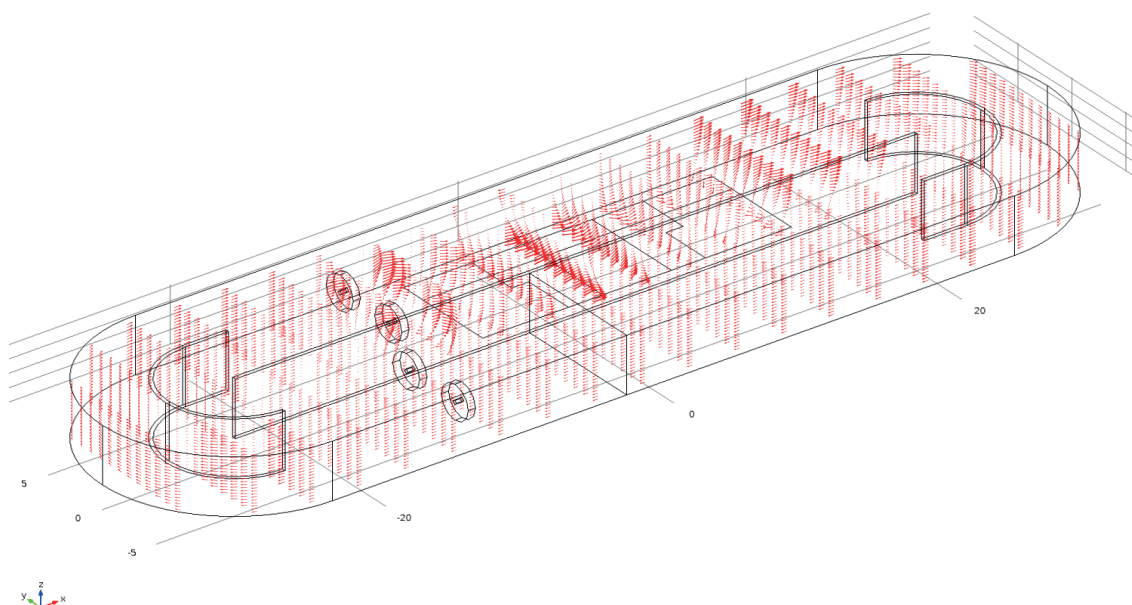
Voor elk scenario is dus een uitkomst middels een niet-stationaire berekening bepaald.

BIJLAGE 5

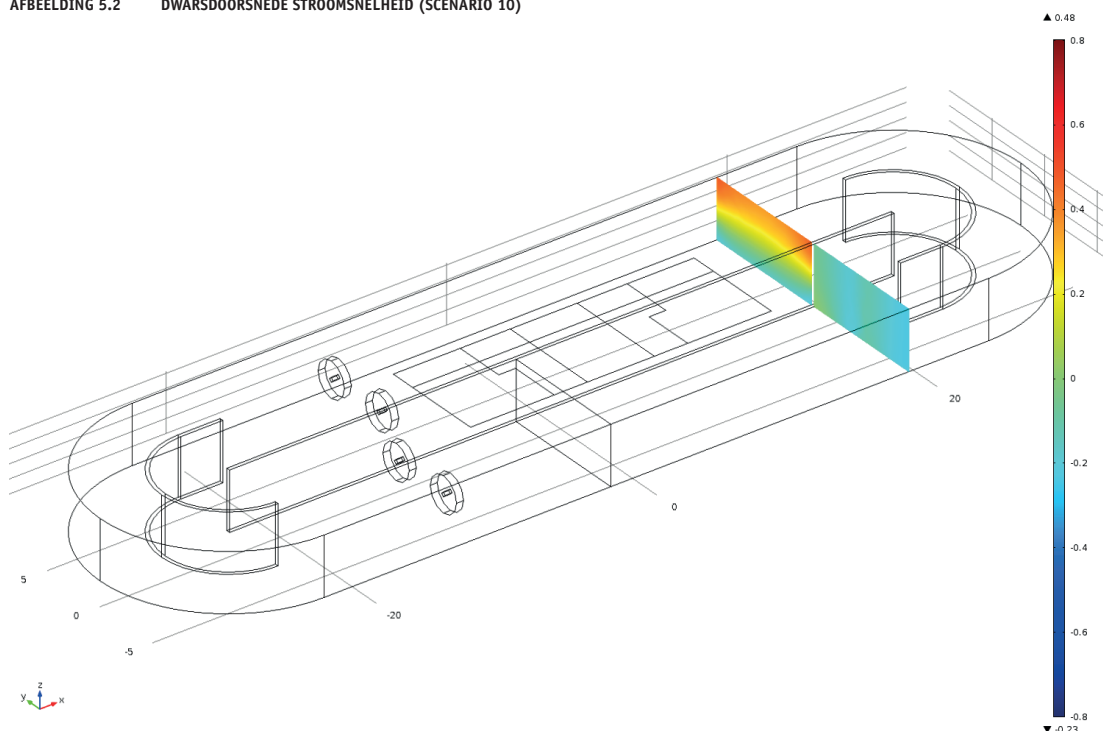
MODELRESULTATEN – 3D-SNELHEIDSPROFIELEN

SCENARIO 10 – 75% BELUCHTING, 3 BELUCHTINGSVELDEN, 2 VOORTSTUWERS

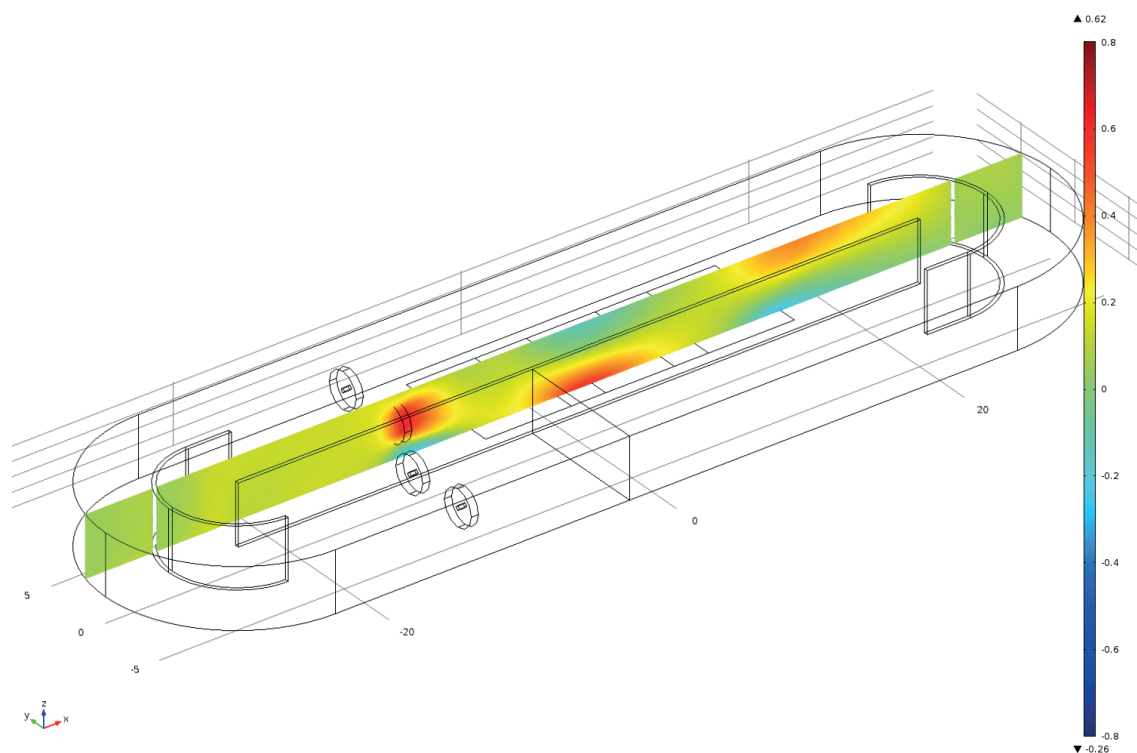
AFBEELDING 5.1 SNELHEIDSVECTORVELD SCENARIO 10

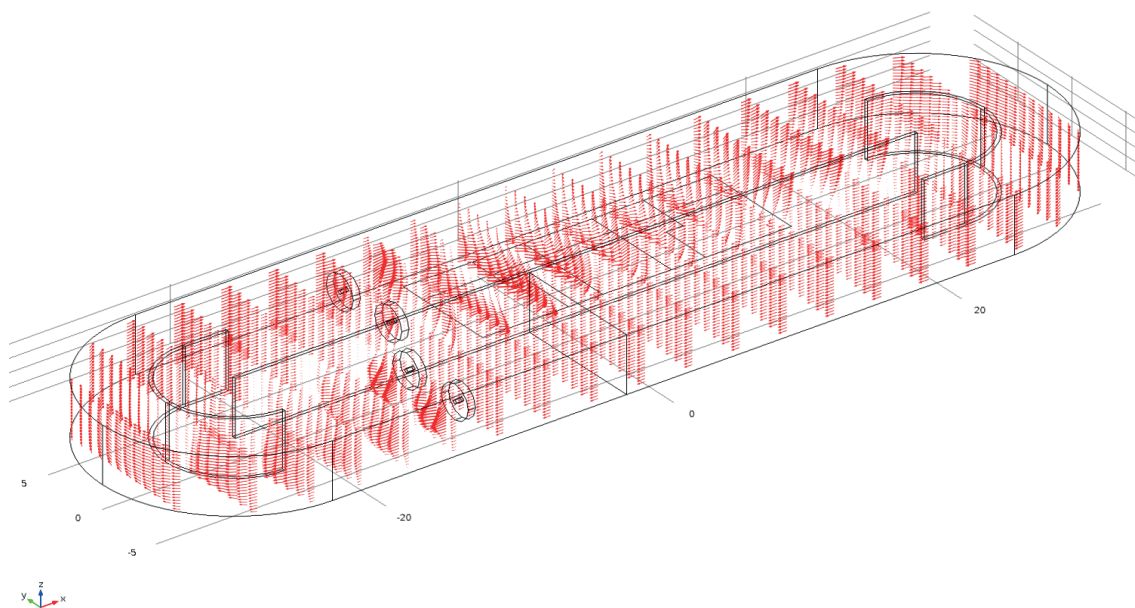
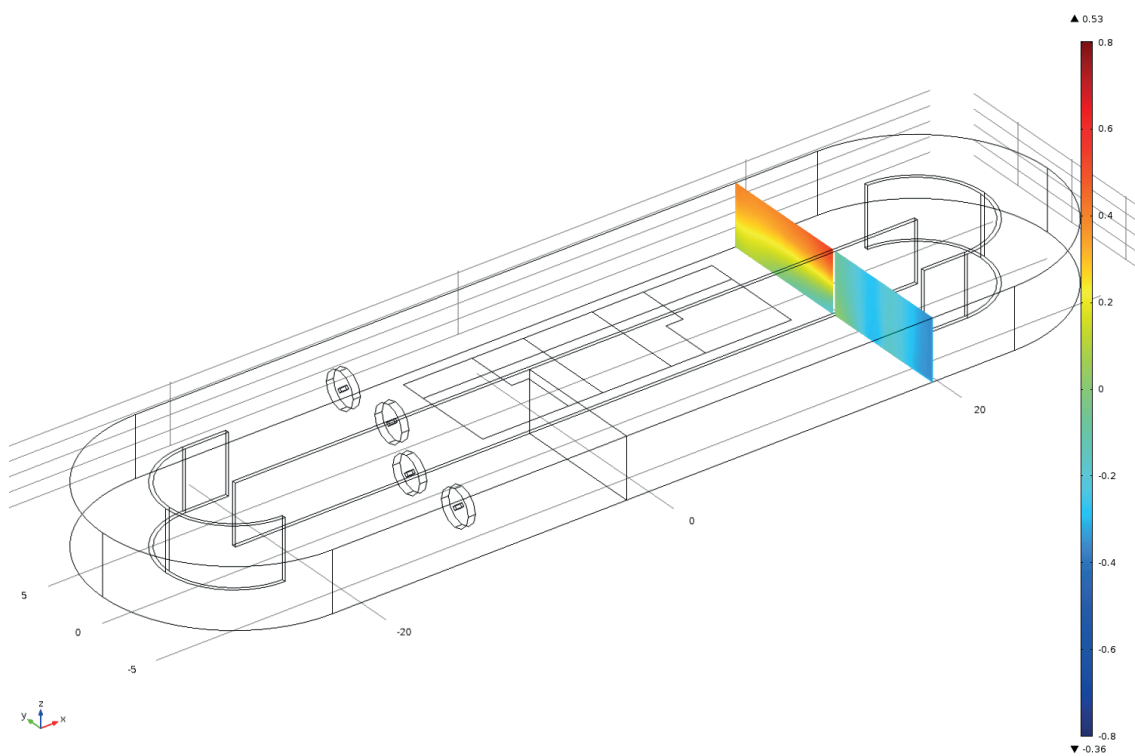


AFBEELDING 5.2 DWARSDOORSNEDE STROOMSNELHEID (SCENARIO 10)

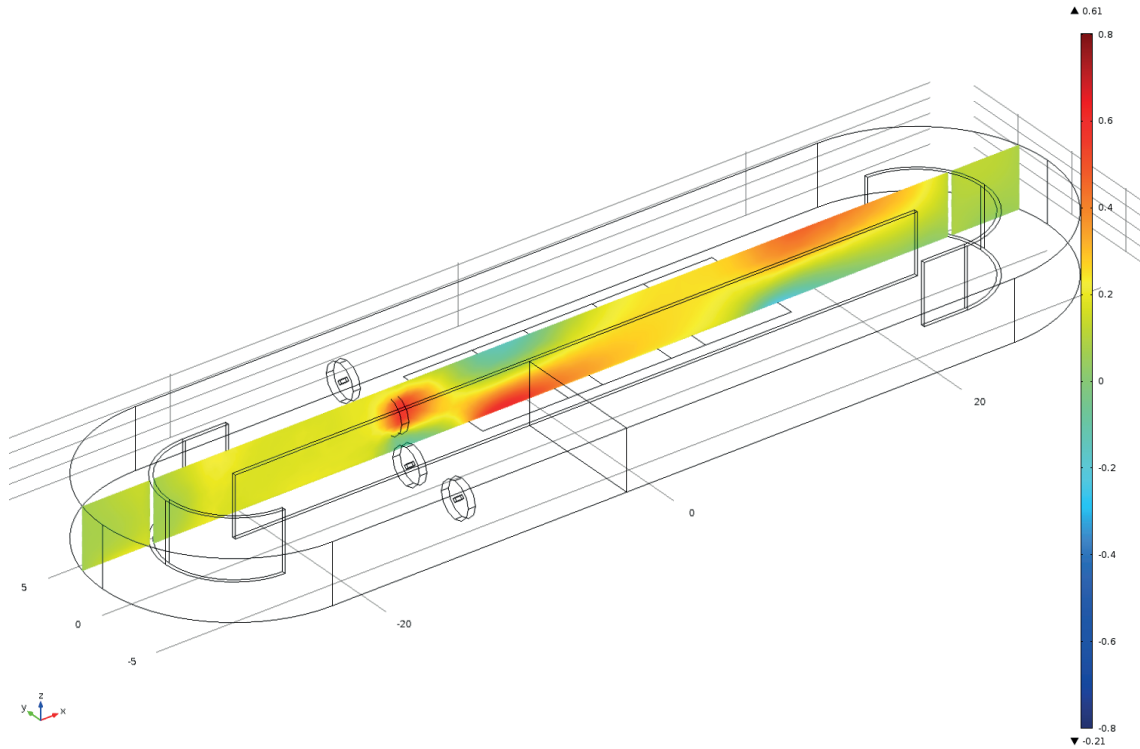


AFBEELDING 5.3 DOORSNEDE SNELHEID IN DE LENGTERICHTING (SCENARIO 10)

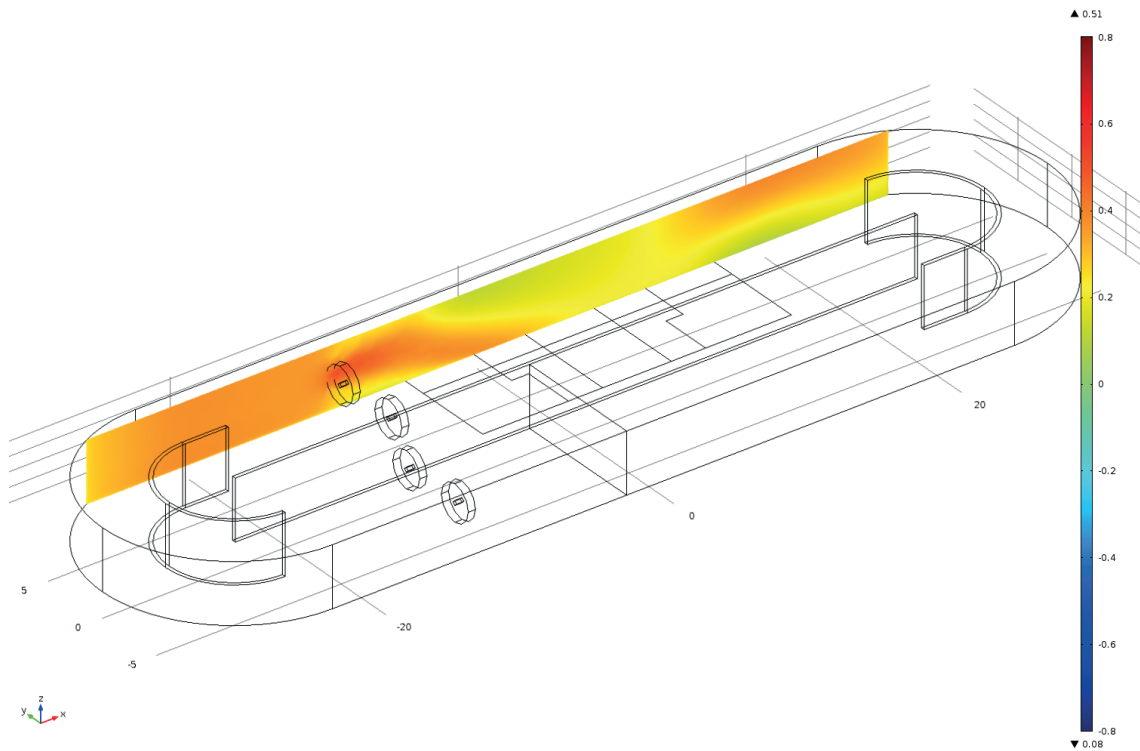


SCENARIO 11 – 75% BELUCHTING, BUITENRIJ NIET BELUCHT, 4 VOORTSTUWERS**AFBEELDING 5.4 SNELHEIDSVECTORVELD SCENARIO 11****AFBEELDING 5.5 DWARSDOORSNEDE STROOMSNELHEID (SCENARIO 11)**

AFBEELDING 5.6 DOORSNEDE SNELHEID IN DE LENGTERICHTING (SCENARIO 11)

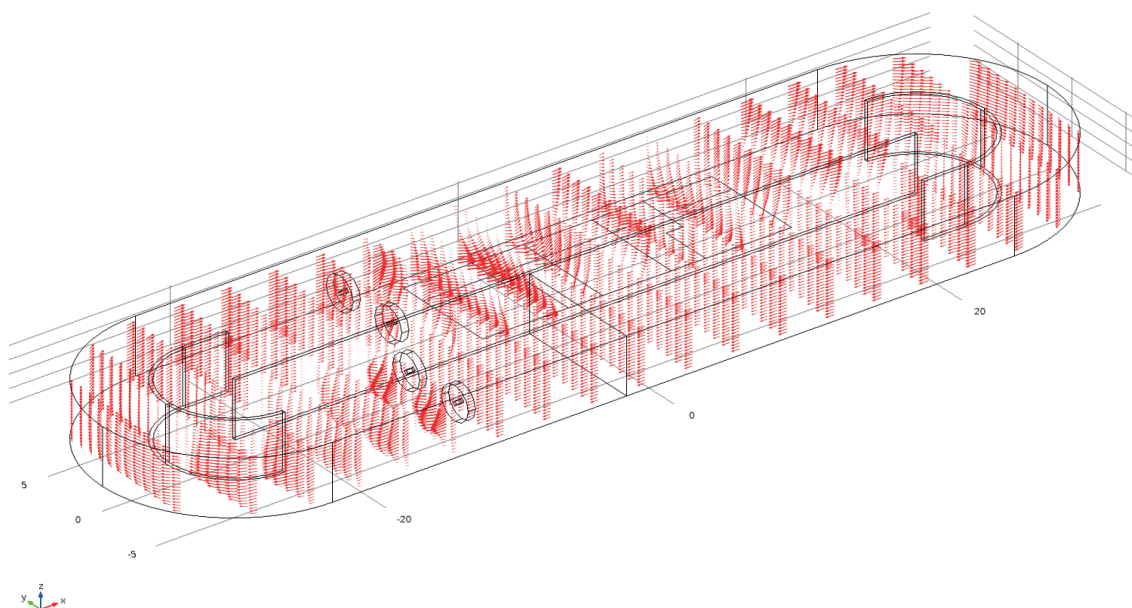


AFBEELDING 5.7 DOORSNEDE SNELHEID IN DE LENGTERICHTING LANGS DE WAND (SCENARIO 11)

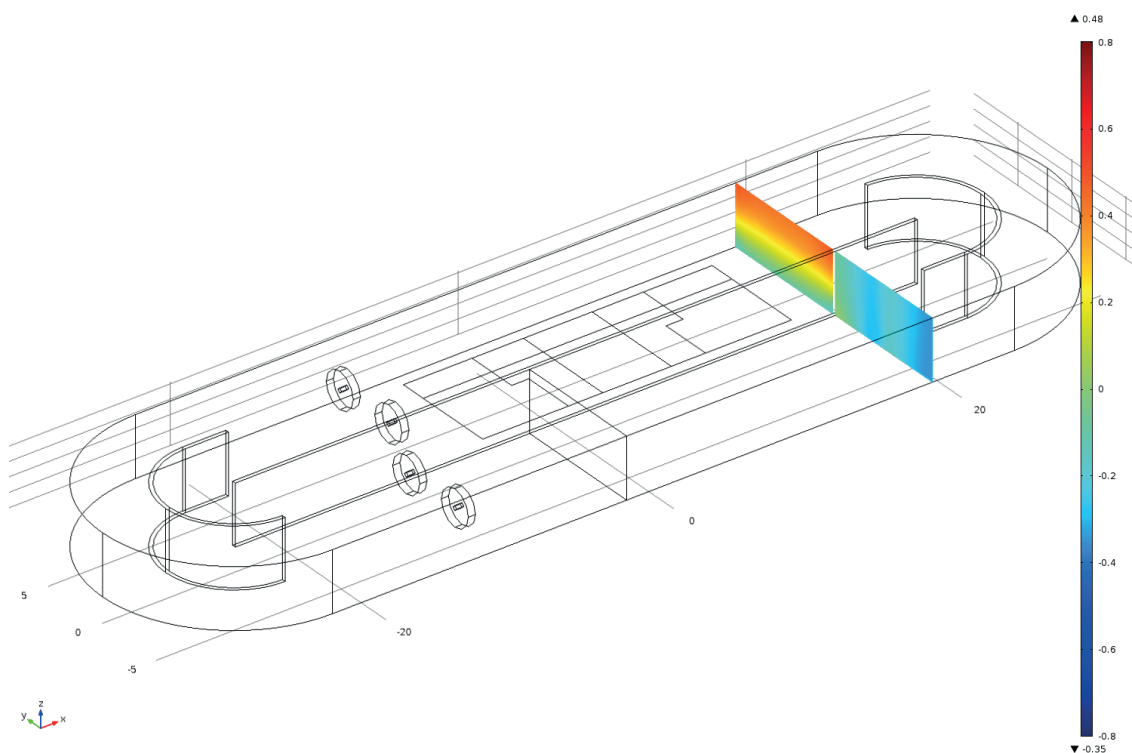


SCENARIO 12 – 75% BELUCHTING, MIDDENRIJEN NIET BELUCHT, 4 VOORTSTUWERS

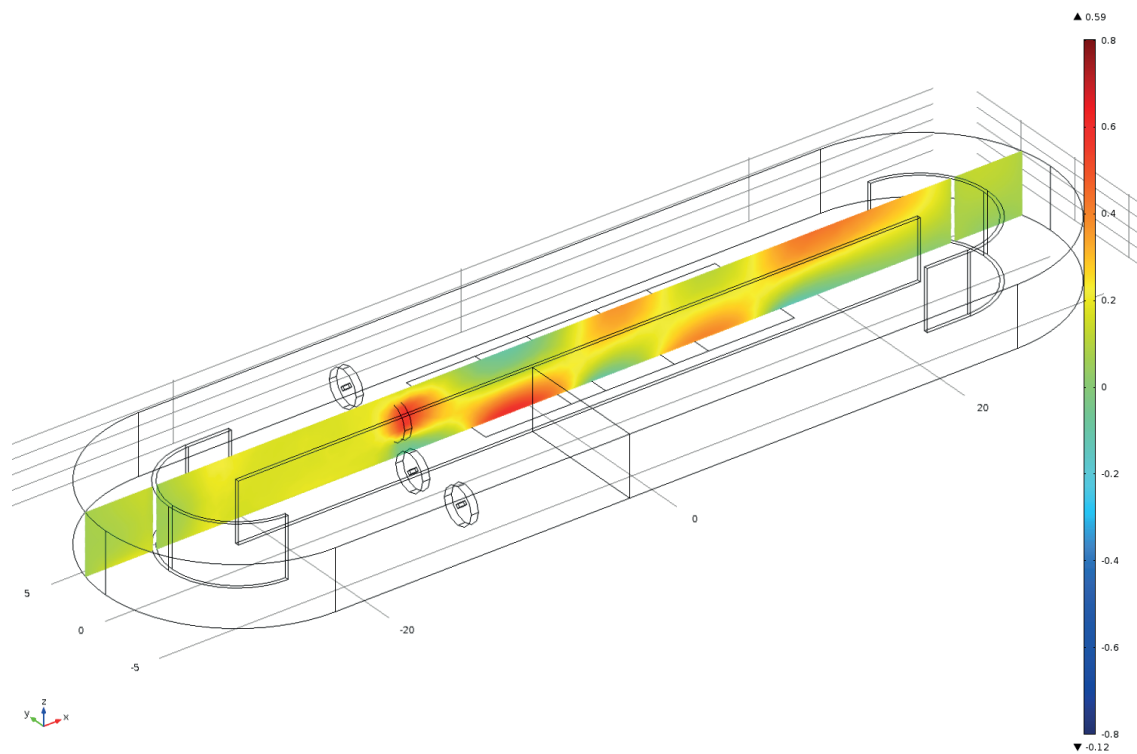
AFBEELDING 5.8 SNELHEIDSVECTORVELD BEREKENING SCENARIO 12



AFBEELDING 5.9 DWARSDOORSNEDE STROOMSNELHEID (SCENARIO 12)



AFBEELDING 5.10 DOORSNEDE SNELHEID IN DE LENGTERICHTING (SCENARIO 12)

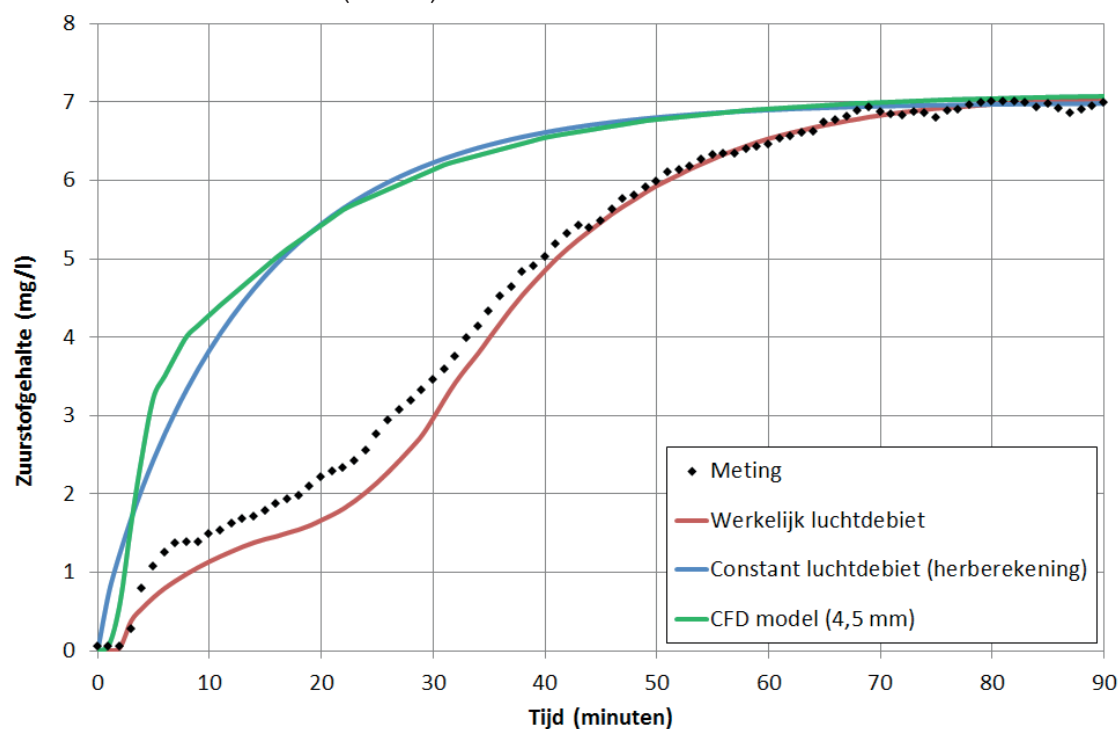


BIJLAGE 6

AANVULLENDE OC-METINGEN

SCENARIO 8 EN 11

AFBEELDING 6.1 OC-METING VAN MEI 2016 (SCENARIO 8)



AFBEELDING 6.2 OC-METING VAN MEI 2016 (SCENARIO 11)

