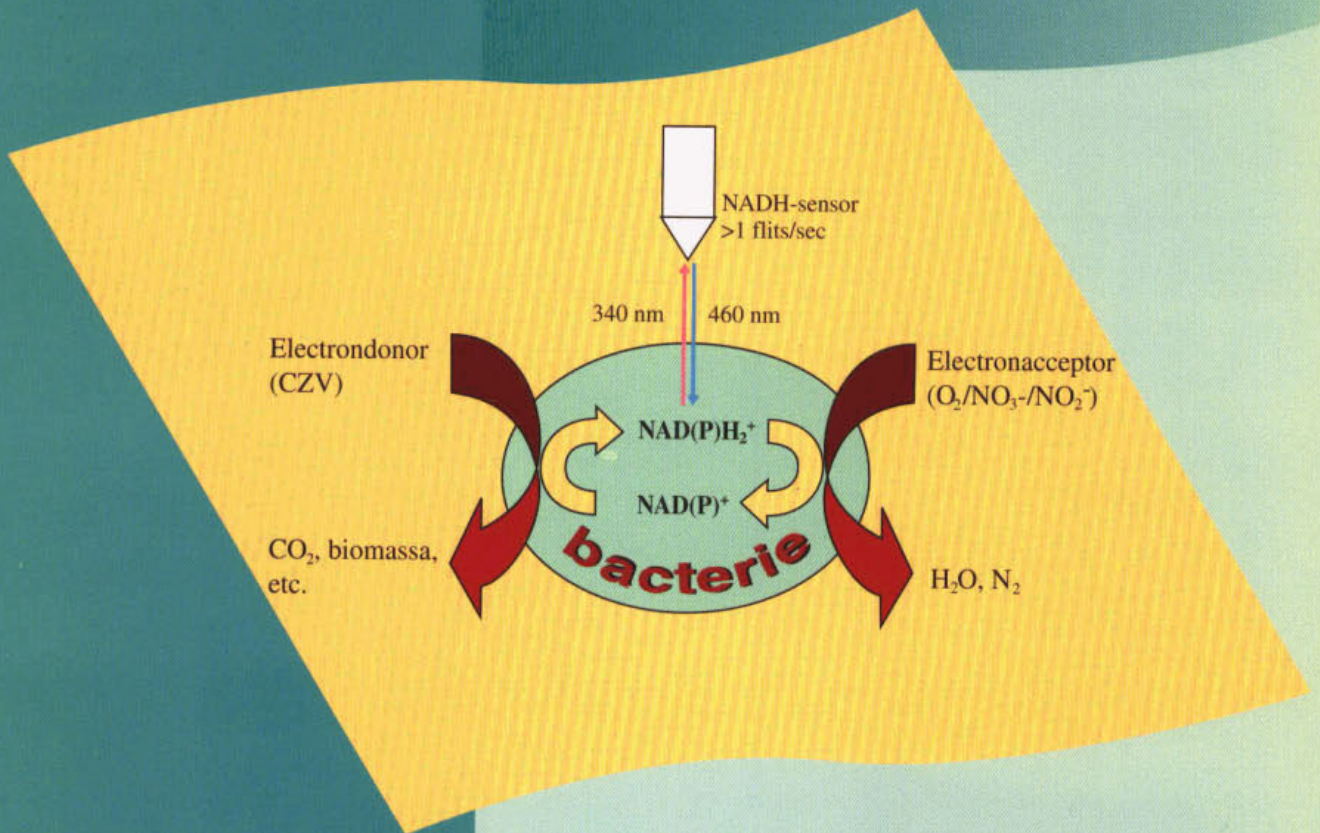


Toepassingsmogelijkheden van een NADH-sensor in de afvalwaterzuivering

Literatuurrecherche en praktijkonderzoek



**Toepassingsmogelijkheden van een NADH-sensor
in de afvalwaterzuivering**

Literatuurrecherche en praktijkonderzoek

99 25

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66
E-mail stowa@stowa.nl

ISBN 90.5773.075.8

Ten geleide

SAMENVATTING

1	INLEIDING	4
2	THEORIE VAN DE NADH-METING	5
	2.1 Inleiding	5
	2.2 Meetprincipe en sensoruitvoering	6
	2.3 NADH en redoxcondities	7
	2.4 Interpretatie van het signaal en storende effecten	8
3	ERVARINGEN IN HET BUITENLAND	10
	3.1 Inleiding	10
	3.2 Symbio proces	10
	3.3 Zuiveringinstallaties met NADH-regeling	11
	3.3.1 <i>Rwzi Fakse, Denemarken</i>	11
	3.3.2 <i>Rwzi Thisted, Denemarken</i>	12
	3.3.3 <i>Rwzi Hammersholt, Denemarken</i>	15
	3.3.4 <i>Rwzi Nr. Herlev, Denemarken</i>	16
	3.3.5 <i>Rwzi Hecklingen, Duitsland</i>	16
	3.3.6 <i>Rwzi Oostende, België</i>	17
	3.3.7 <i>Rwzi Essen, België</i>	17
	3.4 Conclusies	19
4	ERVARINGEN IN NEDERLAND	20
	4.1 Inleiding	20
	4.2 Laboratoriumonderzoek	20
	4.2.1 <i>Slibconcentratie</i>	20
	4.2.2 <i>Slibgrootteverdeling</i>	21
	4.2.3 <i>Slibbelasting</i>	22
	4.2.4 <i>Zuurstofconcentraties</i>	24
	4.2.5 <i>Nitrificatie</i>	25
	4.2.6 <i>pH</i>	25
	4.2.7 <i>Nitraat</i>	25
	4.2.8 <i>Verminderde slibactiviteit bij langdurige beluchting</i>	26
	4.3 Waarnemingen op praktijkschaal	28
	4.3.1 <i>Inleiding</i>	28
	4.3.2 <i>Configuratie en bedrijfsomstandigheden van de installaties</i>	28
	4.3.3 <i>Rwzi Genemuiden</i>	29
	4.3.4 <i>Rwzi Dokhaven</i>	32
5	EVALUATIE EN TOEKOMSTPERSPECTIEF	36
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	37
	6.1 Conclusies	37
	6.2 Aanbevelingen	37

Bijlagen:

- 1 Beschrijving van het onderzoek op de rwzi Essen, België
- 2 Kentallen van de rwzi's Genemuiden en Dokhaven

Ten geleide

De stof NADH (nicotinamide-adenine-dinucleotide) is een belangrijke schakel in de energiehuishouding van levende systemen, speelt een rol bij het elektrontransport en is een maat voor de verhouding tussen elektrondonor- en elektronacceptoraanbod. De hoogte van het NADH-signaal wordt dus bepaald door het aanbod van substraat en de af-/aanwezigheid van zuurstof of nitraat.

Via UV-fluorescentiemeting is de NADH-concentratie in de bacteriecellen te meten. Recent is op de markt een sensor geïntroduceerd waarmee het NADH-gehalte van levende cellen kan worden geregistreerd. Dit zou (regel)mogelijkheden kunnen openen om de luchtinbreng af te kunnen stemmen op de zuurstofbehoefte van het actiefslib of vlokbelading in een selector te kunnen optimaliseren.

In de hier gerapporteerde studie zijn de interpreteerbaarheid, de reproduceerbaarheid en de bruikbaarheid van het NADH-signaal voor een eventuele implementatie in de praktijk nagegaan aan de hand van buitenlandse ervaringen, Nederlands praktijkonderzoek en laboratoriumonderzoek.

Hoewel sprake is van een robuuste en goed werkende sensor is met het onderhavige onderzoek aangetoond dat het NADH-signaal onder praktijkomstandigheden ongevoelig is voor de slibconcentratie en de slibdeeltjesgrootteverdeling. Nitrificatie en directe slibbelasting worden niet waargenomen. Alleen bij zeer lage zuurstofconcentratie reageert het NADH-signaal op heterotrofe slibactiviteit. Beluchtingsregeling op basis van dit signaal valt dus af.

De werkzaamheden werden door het bestuur van de STOWA opgedragen aan DHV Water B.V. (projectteam ir. H.F. van der Roest, ir. R.J. van der Kuij en ir. K. Meinema-Linders) en het Kluyverlaboratorium voor Biotechnologie van de Technische Universiteit Delft (onderzoekers prof.dr.ir. M.C.M. van Loosdrecht en ir. C. Hellinga). Het project werd namens de STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ing. A.A.J.C. Schellen (voorzitter), ing. J.W. van Dijk, dr.ir. J. Hulsbeek, ing. J. van Liebergen, ir. P.J. Roeleveld en ir. P.C. Stamperius.

Utrecht, december 1999

De directeur van de STOWA

ir. J.M.J. Leenen

SAMENVATTING

De stof NADH (nicotinamide-adenine-dinucleotide) is een belangrijke schakel in de energiehuishouding van levende systemen. Het speelt een rol bij het elektrontransport van een hoog energieniveau (substraat: elektrondonor) naar een laag energieniveau (zuurstof/nitraat/...: elektronacceptor). De vrijkomende energie kan het organisme aanwenden voor groei, produktvorming of het onderhoud van de levensprocessen. NAD^+ kan door de elektrondonor met twee elektronen (en twee protonen) worden opgeladen waarbij NADH_2^+ gevormd wordt. Na overdracht van deze elektronen op de elektronacceptor ontstaat weer NAD^+ . Als het organisme in "zuurstofnood" verkeert zal de concentratieverhouding NADH/NAD groot zijn. Als er ten opzichte van het substraataanbod veel elektronacceptor beschikbaar is, zal de verhouding laag zijn. In veel biochemische studies wordt aangenomen dat de totale NAD(H) -voorraad in een cel ongeveer constant is, zodat gebrek aan elektrondonor correspondeert met een hoge NADH -concentratie en een overschot aan elektronacceptor met een lage NADH -concentratie.

Door de NADH -concentratie te meten wordt een maat verkregen voor de verhouding tussen elektrondonor- en elektronacceptoraanbod. Een hoge NADH -concentratie zou onder aërobe condities bijvoorbeeld een aanwijzing kunnen zijn dat er intensiever belucht moet worden.

In het buitenland, met name Duitsland en Denemarken, is een NADH -sensor op een aantal rwzi's al in de praktijk toegepast. Deze sensor is gebaseerd op een UV-fluorescentiemeting. Voor een deel is de sensor geïmplementeerd in een beluchtingsregeling en voor een deel alleen als verschaffer van informatie. In de meeste gevallen is de NADH -sensor gekoppeld aan het Symbio-proces van de firma BioBalance. Hierbij wordt de NADH -meting toegepast in de procesregeling. Het betreft een stikstofverwijderingsproces met een nitrificatie- en een denitrificatiefase. Deze twee fasen worden in situaties niet in plaats of tijd gescheiden. Er wordt gebruik gemaakt van het feit dat de micro-organismen voorkomen in vlokken en films. De scheiding tussen de beide processen vindt plaats binnen in de vlokken. De bacteriën in de buitenste laag van een vlok kunnen altijd over vrije zuurstof beschikken omdat het zuurstofniveau in de procesvloeistof continu op een zeker niveau gehandhaafd blijft. In dieper gelegen lagen van de vlok heersen anoxische tot anaërobe condities, afhankelijk van de zuurstofdiffusiesnelheid en de zuurstofconsumptiesnelheid van de nitrificeerders en andere zuurstofconsumerende bacteriën. De UV-sensor meet de intensiteit van de NADH -fluorescentie van alle bacteriën.

Op basis van de praktijkinformatie wordt geconcludeerd dat de NADH -sensor op verschillende rwzi's wordt toegepast, maar dat de door de leverancier geclaimde voordelen als energiebesparing, capaciteitsvergroting en slibbezinkbaarheidsverbetering niet kunnen worden gerelateerd aan toepassing van de sensor.

Bij de interpretatie van de praktijkinformatie is een aantal vragen gerezen, waarop met behulp van aanvullend laboratoriumonderzoek gepoogd is een antwoord te geven. Het betreft hier de invloed op het NADH -signaal van de slibconcentratie, de slibgrootteverdeling, de slibbelasting, autotrofe en heterotrofe activiteit en de pH.

Uit de laboratoriumexperimenten kan worden geconcludeerd dat het NADH -signaal onder praktijkomstandigheden ongevoelig is voor de slibconcentratie en de slibgrootteverdeling. Met name het eerste aspect maakt het signaal minder toepasbaar.

Daarnaast is het NADH -signaal een maat voor de heterotrofe slibactiviteit. Nitrificatie wordt niet waargenomen. De directe slibbelasting wordt zodoende niet waargenomen. Het NADH -signaal reageert voor de heterotrofe activiteit pas bij zeer lage zuurstofconcentraties.

In de praktijk beïnvloedt de pH nauwelijks het NADH-sigitaal.

Bovenstaande resultaten leiden tot de constatering dat een beluchtingsregeling op basis van een NADH-sigitaal niet aan te bevelen is. Noch de belasting, noch de nitrificatie wordt gemeten, slechts de heterotrofe activiteit.

De met behulp van een NADH-sensor verkregen informatie kan bijvoorbeeld voor het regelen van de hoeveelheid heterotrofe biomassa in de selector worden gebruikt door sturing van het retourslibdebiet naar de selector. Hiermee kan wellicht een continue goede vlokbelading worden verkregen, waardoor de slibbezinkbaarheid toeneemt.

1 INLEIDING

Introductie

Door de firma Entec is een nieuwe sensor op de Nederlandse markt gebracht, waarmee het NADH-gehalte van levende cellen kan worden geregistreerd. De hoogte van het NADH-niveau wordt bepaald door het substraataanbod en de (af)aanwezigheid van zuurstof of nitraat (elektronenacceptoren). Dit opent de mogelijkheid om de beluchtingsinbreng direct af te stemmen op de zuurstofbehoefte van het slib. Naast een potentiële verlaging van de energie-inbreng zou met het oog op een verdergaande stikstofverwijdering hiermee ook organische stof (CZV) in het slib kunnen worden 'gespaard' (denitrificatie).

Tevens zou het signaal kunnen worden gebruikt om de vlokbelading in een selector te optimaliseren, waardoor de slibbezink eigenschappen zouden kunnen verbeteren.

Doelstelling

Op basis van het voorgaande is de volgende doelstelling van onderhavig onderzoeksproject geformuleerd:

- vaststellen van de geschiktheid van het signaal van de NADH-meter voor toepassing in beluchttingsregelingen van volbelaste Nederlandse rwzi's in combinatie met het vaststellen van de eventuele voordelen ten opzichte van andere regelingen;
- toepasbaarheid van het signaal van de NADH-meter voor het regelen van het retourslibdebiet naar een selector ter optimalisatie van het bezinkproces.

Belangrijke aandachtspunten zijn voor het eerste onderzoekpunt het zuiveringsrendement en het energieverbruik en voor het tweede de slibbezinkbaarheid.

Projectaanpak

Om de mogelijkheden van voornoemde NADH-sensor te inventariseren is in opdracht van de STOWA door DHV Water BV in samenwerking met de Technische Universiteit Delft een verkennend onderzoek uitgevoerd. Hierbij zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- literatuuronderzoek;
- bezoek aan een drietal rwzi's in Denemarken, waar de NADH-sensor in de praktijk is geïnstalleerd;
- evaluatie van de gegevens van andere buitenlandse rwzi's;
- evaluatie van de meetgegevens van de NADH-sensor op de rwzi's Genemuiden en Dokhaven;
- aanvullende laboratoriumexperimenten.

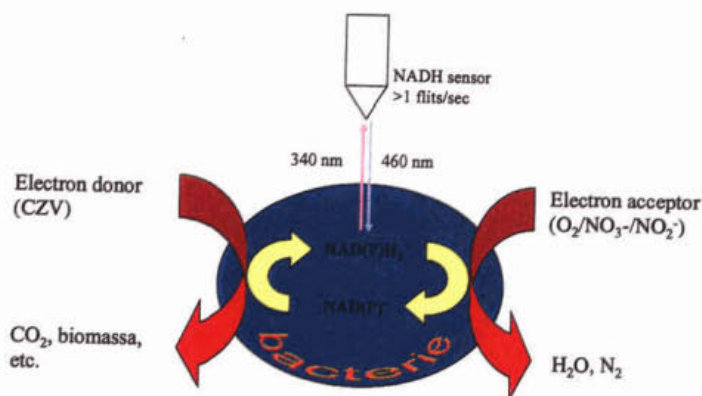
Leeswijzer

Onderhavige rapportage beoogt een samenvatting te geven van de voornoemde activiteiten. Hoofdstuk 2 bevat de resultaten van het literatuuronderzoek. In hoofdstuk 3 is een overzicht gegeven van buitenlandse ervaringen, waarna in hoofdstuk 4 is ingegaan op de Nederlandse ervaringen. In hoofdstuk 5 zijn een evaluatie en het toekomstperspectief weergegeven. Hoofdstuk 6 tenslotte bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 THEORIE VAN DE NADH-METING

2.1 Inleiding

De stof NADH (nicotinamide-adenine-dinucleotide) is een belangrijke schakel bij de energiehuishouding in levende systemen. Het speelt een rol bij het elektrontransport van een hoog energieniveau (substraat: elektrondonor) naar een laag energieniveau (zuurstof/nitraat/...: elektronacceptor). De vrijkomende energie kan het organisme aanwenden voor groei, produktvorming of het onderhoud van de levensprocessen.



Figuur 1 : Rol van NAD(H) bij elektrontransport

Figuur 1 laat schematisch zien hoe NAD⁺ door de elektrondonor met 2 elektronen (en 2 protonen) wordt opgeladen waarbij NADH₂⁺ gevormd wordt. Na overdracht van deze elektronen op de elektronacceptor ontstaat weer NAD⁺. In deze rapportage worden voornoemde verbindingen als NADH en NAD weergegeven.

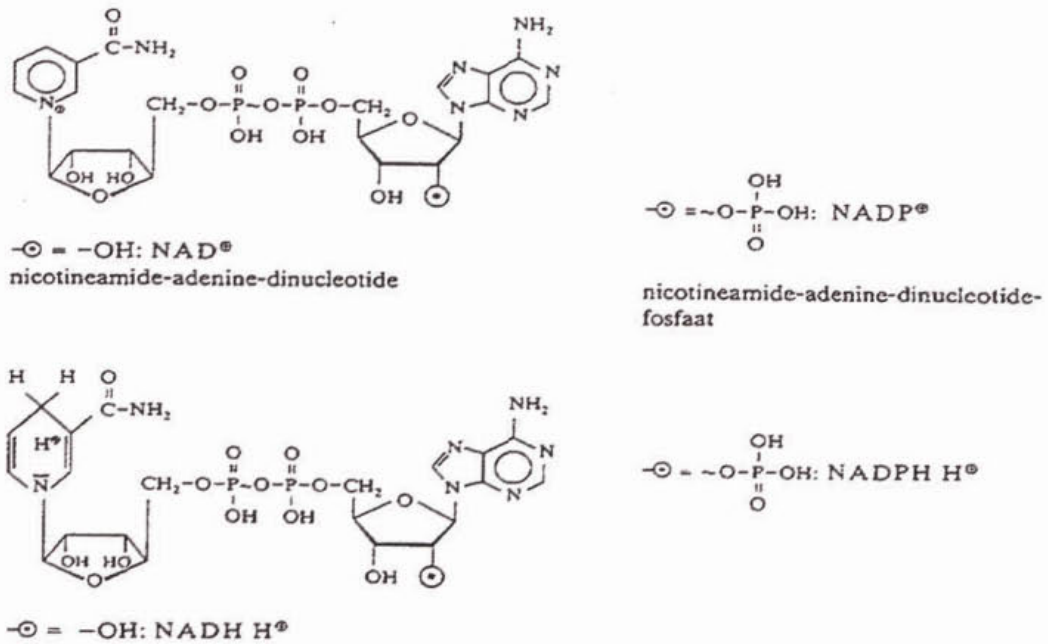
Als het organisme in "zuurstofnood" verkeert zal de concentratieverhouding NADH/NAD groot zijn. Als er ten opzichte van het substraataanbod veel elektronacceptor beschikbaar is, zal de verhouding laag zijn. In veel biochemische studies wordt aangenomen dat de totale NAD(H)-voorraad in een cel ongeveer constant is, zodat gebrek aan elektrondonor correspondeert met een hoge NADH-concentratie en een overschot aan elektronacceptor met een lage NADH-concentratie.

Door de NADH-concentratie te meten wordt derhalve een maat verkregen voor de verhouding tussen elektrondonor- en elektronacceptoraanbod. Een hoge NADH-concentratie zou onder aërobe condities bijvoorbeeld een aanwijzing kunnen zijn dat er intensiever belucht moet worden.

Hoewel de concentratieniveaus van zowel NADH als NAD met relatief eenvoudige metingen kunnen worden bepaald, wordt gekozen voor de bepaling van het NADH-niveau, omdat de concentratie van NADH in de cellen veel lager is dan die van NAD. Als de NADH/NAD-verhouding verandert, is de relatieve verandering van de NADH-concentratie daarom vele malen groter dan die van NAD.

Dat in figuur 1 gesproken wordt van NAD(P)H₂⁺ en NAD(P)⁺ heeft te maken met het feit dat NADPH (nicotinamide-adenine-dinucleotide-fosfaat) een soortgelijke functie vervult als NADH, zie figuur 2. NADPH speelt met name een rol bij groeigekoppelde processen. Met de

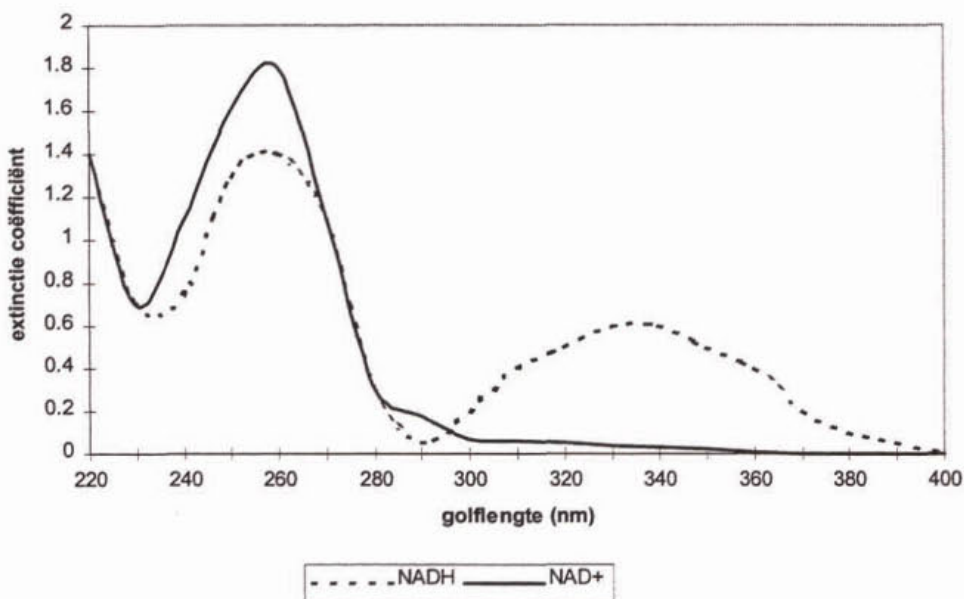
UV-meting die onderstaand wordt toegelicht wordt in feite het totaal van NAD(P)H bepaald. Vooralnsg wordt er vanuit gegaan, dat de bijdrage van de NADPH-varianties klein is.



Figuur 2 : De verschillende vormen van NAD(P)H

2.2 Meetprincipe en sensoruitvoering

NADH en NAD zijn beide fluorescentiestoffen: als ze worden aangestraald met ultraviolet licht van zekere golflengtes zenden ze fluorescentielicht uit. Figuur 3 laat de absorptiespectra van NADH en NAD⁺ zien als functie van de golflengte van het opvallende UV-licht.

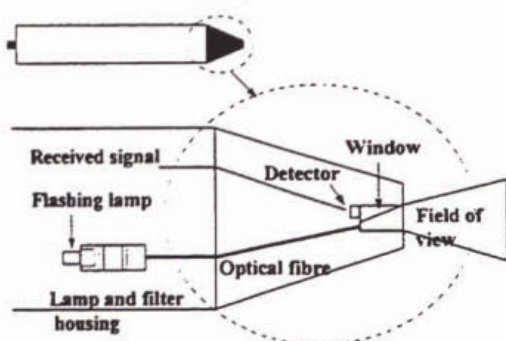


Figuur 3 : Absorptiespectra van NADH en NAD⁺

Bij 257 nm vertonen beide componenten verhoogde absorptie, bij 360 nm alleen NADH. Verhoogde absorptie valt vaak samen met het optreden van fluorescentie. De lichtenergie wordt opgenomen om het molecuul in een aangeslagen toestand te brengen. Bij de terugkeer naar de normale toestand (dit gebeurt in ongeveer 10^{-9} s) wordt een deel van het licht bij een hogere golflengte weer uitgezonden. Dit verschijnsel staat bekend als fluorescentie.

Bij aanstralen met 340 nm zendt NADH fluorescentielicht uit van 460 nm, en fluoresceert NAD niet.

Dit meetprincipe wordt al bijna twee decennia gebruikt voor NADH-metingen, hoofdzakelijk in het laboratorium.



Figuur 4 : Schema van BioBalance-sensor

De Deense firma BioBalance heeft een meetinstrument ontwikkeld dat UV-licht van 340 nm uitzendt en simultaan de fluorescentie-intensiteit bij 460 nm meet. Beide lichtstralen gaan door een klein kwartsglazen venstertje aan de punt van de sensor (figuur 4) waar dankzij de hoge UV-stralingsintensiteit geen biomassa op kan aangroeien. De totale lengte van de sensor is ongeveer 60 cm. De optische componenten zijn in de RVS behuizing van de sensor gemonteerd. Een Xenon lamp geeft pulserend UV-licht en heeft naar opgave van de fabrikant een levensduur van meer dan 20 jaar. De elektronische componenten zijn daarmee bepalend voor de effectieve levensduur die naar schatting zo'n 10 jaar zal bedragen. De pulsen kunnen in zeer hoge frequentie worden afgegeven. Voor rwzi's wordt doorgaans gewerkt met een puls-frequentie van 1 Hz, waarbij 60 meetsignalen gemiddeld worden om een meetfrequentie van 1/min. te verkrijgen. In het navolgende zal blijken dat de sensor eenvoudig te installeren en nagenoeg onderhoudsvrij is.

De sensor is gekoppeld aan een digitale uitleeseenheid die een 20 mA signaal uitstuurt. Dit signaal kan met een computer worden verwerkt.

2.3 NADH en redoxcondities

Het NADH-gehalte in de cellen kan beschouwd worden als een maat voor de cel-interne redoxtoestand. Met de gangbare redoxmeter wordt de redoxtoestand van het medium gemeten. De precieze interpretatie van het redoxsignaal is lastig, omdat vele stoffen hier invloed op uitoefenen. Behalve zuurstof en nitraat/nitriet kunnen bijvoorbeeld ijzer- en zwavelverbindingen in lage concentraties grote invloed hebben. Ook de pH is rechtstreeks van invloed op de redoxwaarde.

Het signaal, dat gemeten wordt in mV, is in essentie een logaritmische functie van de elektronacceptor/-donorverhouding van de individuele koppels. Iedere halvering van

bijvoorbeeld de opgeloste-zuurstofconcentratatie leidt dus - binnen zekere grenzen - tot een vaste afname van het aantal mV.

Een hoog signaal (-100 tot honderden mV) is karakteristiek voor aërobe condities. Onder anoxische condities in rwzi's (geen zuurstof, wel nitraat/nitriet als elektronacceptor) ligt het signaal typisch tussen -300 en -100 mV; bij anaërobe condities (geen elektronacceptor aanwezig) daalt het nog verder.

Bij een hoog redoxniveau kunnen bacteriën relatief eenvoudig de elektronen uit het substraat overdragen naar de elektronacceptor en zal het NADH-signaal laag zijn. Omgekeerd moet een laag redoxsignaal tot een hoog NADH-signaal leiden.

In hoeverre de micro-organismen van de redoxcondities kunnen "profiteren" voor hun energieproductie hangt evenwel ook af van de aanwezigheid van substraat en de vorm waarin dat beschikbaar is.

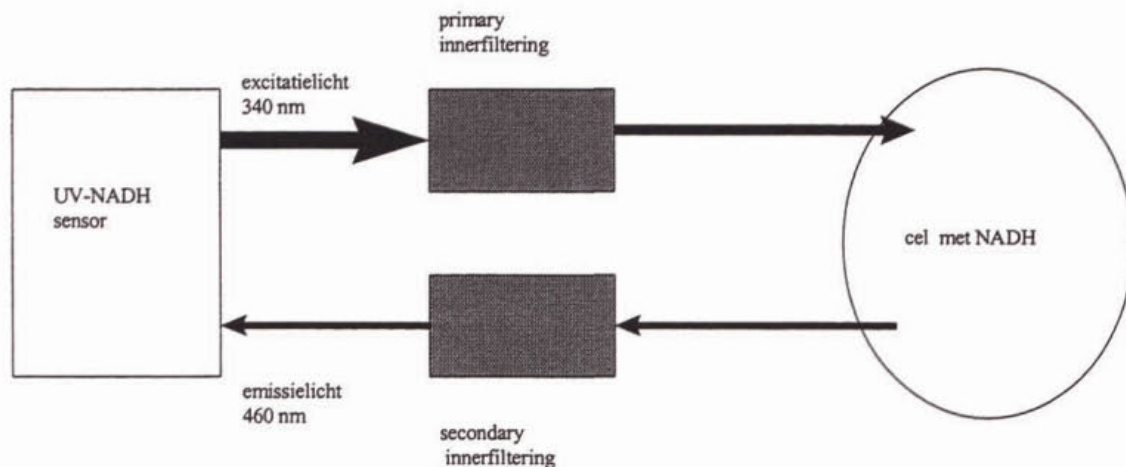
Waar het redoxsignaal een maat geeft voor de aanwezige potentie van energieproductie, laat het NADH-signaal zien, in hoeverre die potentie ook werkelijk benut wordt. *Het is in tegenstelling tot het redoxsignaal een directe maat voor de biomassa-activiteit zelf.*

Kwantitatief is nog weinig bekend over de relatie tussen redox- en NADH-signaal.

2.4 Interpretatie van het signaal en storende effecten

Uit bovenstaande is duidelijk dat het fluorescentiesignaal bij aanstraling met 340 nm - verder aangeduid als het NADH-signaal - zeer interessante informatie kan verschaffen over de toestand waarin de bacteriën zich bevinden en dus van belang kan zijn voor de procesregeling.

De informatie is tot dusver echter nog erg globaal. Biochemisch is nog allerminst bekend hoe het NADH-concentratieniveau kwantitatief reageert op elektron donor- en elektron acceptor-aanbod. Verder is er geen sprake van een zuivere bacteriesuspensie, maar van een "ratjetoe" aan stoffen en bevinden de bacteriën zich bovendien in vlokken, die tot absorptie van zowel het aanstraallicht als het fluorescentielicht aanleiding kunnen geven. Dit laatste wordt in de literatuur wel aangeduid met *primary* respectievelijk *secondary inner-filtering* (figuur 5).



Figuur 5 : Grafische voorstelling van primary en secondary inner-filtering

De vraag dringt zich op of alle bacteriën in de vlokken "gezien" worden of alleen bacteriën in de periferie. Als dit laatste het geval is zal de vlogrootteverdeling van invloed zijn op het signaal. Als alle bacteriën inderdaad worden waargenomen zullen gradiënten van elektrondonor en -acceptor in de vlok dus medebepalend zijn voor de signaalhoogte.

Daarnaast rijst de vraag hoeveel vlokken gezien worden. Als de zogenaamde optische weglengte groot is, zal het signaal een minder ruisachtige waarde geven omdat lokale effecten worden uitgemiddeld.

Andere voor de hand liggende vragen zijn:

- worden zowel autotrofe processen (nitrificatie: elektrondonor = ammonium, elektronacceptor = zuurstof) als heterotrofe processen waargenomen?
- wat is het verschil in signaalhoogte voor de heterotrofe processen onder oxische, anoxische en anaërobe omstandigheden?

Verder is bekend dat bepaalde stoffen verstoringen kunnen opleveren, hetzij omdat ze zelf fluorescentiegedrag vertonen, hetzij omdat ze hechten op het glas van het sensoroog (vetten en ijzer zijn voorbeelden van de laatste categorie). Fluorescerende stoffen kunnen onder meer geproduceerd worden door micro-organismen. De stralings/emissiefrequenties van NADH lijken vooralsnog evenwel vrij specifiek te zijn.

In de literatuur wordt er verder op gewezen dat daglicht kan interfereren met de meting. De gemeten emissiefrequentie van NADH is 460 nm. Dit is zichtbaar blauw licht en komt derhalve voor in daglicht. Bij relatief helder afvalwater in de open lucht zal hiermee rekening moeten worden gehouden.

In de literatuur wordt verder nog melding gemaakt van het feit dat belLEN en agitatie de meting beïnvloeden. Dit zou consequenties kunnen hebben voor de plaatsing van de NADH-sensor. Daarnaast spelen ook de temperatuur en de zuurgraad een rol, hoewel deze nog niet nauwkeurig in kaart zijn gebracht.

Met eigen onderzoek zoals beschreven in hoofdstuk 4 is getracht een antwoord te vinden op een aantal van deze vragen.

3 ERVARINGEN IN HET BUITENLAND

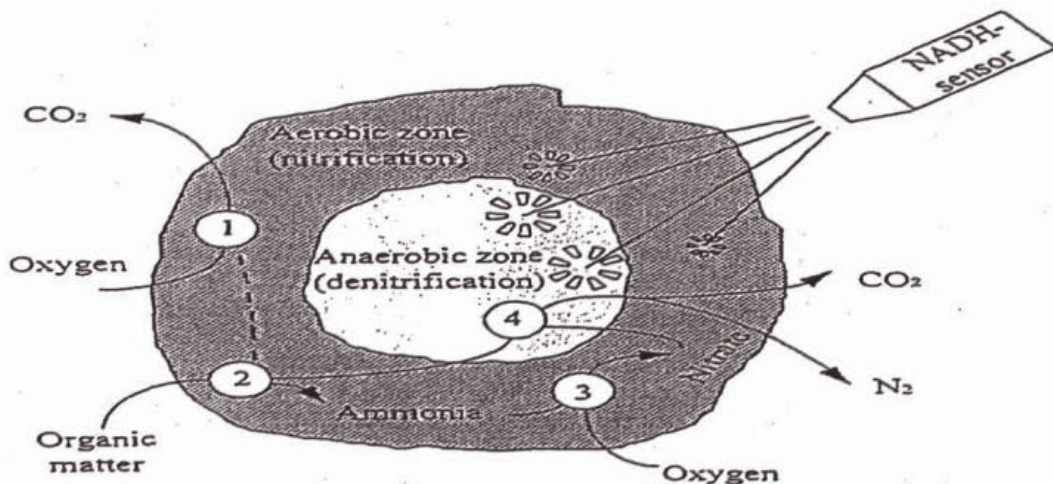
3.1 Inleiding

In het buitenland, met name Duitsland en Denemarken, is de NADH-sensor op een aantal rwzi's al in de praktijk toegepast. Voor een deel is de sensor geïmplementeerd in een beluchtingsregeling en voor een deel alleen als verschafter van informatie.

Een aantal Deense rwzi's is bezocht. Van de Duitse en de niet bezochte Deense rwzi's is informatie gebruikt, die door de leverancier van de sensor is verstrekt. Tenslotte is voor België gebruik gemaakt van informatie, die door Aquafin beschikbaar is gesteld.

3.2 Symbio-proces

In het Symbio-proces van de Deense firma BioBalance wordt de NADH-meting toegepast in de procesregeling. Het betreft een stikstofverwijderingsproces met een nitrificatie- en een denitrificatiefase. Deze twee fasen worden in onderhavige situatie niet in plaats of tijd gescheiden. Er wordt gebruik gemaakt van het feit dat de micro-organismen voorkomen in vlokken en films. De scheiding tussen de beide processen vindt plaats binnen in de vlokken. De bacteriën in de buitenste laag van een vlok kunnen altijd over vrije zuurstof beschikken omdat het zuurstofniveau in de procesvloeistof continu op een zeker niveau gehandhaafd blijft. In dieper gelegen lagen van de vlok heersen anoxische tot anaërobe condities, afhankelijk van de zuurstofdiffusiesnelheid en de zuurstofconsumptiesnelheid van de nitrificeerders en andere zuurstofconsumerende bacteriën. De UV-sensor meet de intensiteit van de NADH-fluorescentie van alle bacteriën, ongeacht de zone van de vlok waarin ze voorkomen, zie figuur 6.



Figuur 6 : Belangrijke conversieprocessen in vlokken

Als het zuurstofgehalte in het water daalt, of als de zuurstofconsumptie in de vlok stijgt, wordt de anaërobe kern in de vlok groter en de aërobe schil dunner. Hierdoor neemt het aantal bacteriën met een relatief hoge NADH-concentratie toe.

In dit proces wordt de UV-meting toegepast om continu het setpoint voor de opgeloste-zuurstofconcentratie in het medium te herberekenen. Hierdoor zou de juiste verhouding tussen de nitrificerende en denitrificerende fasen in de vlok gehandhaafd blijven. De zuurstofconcentratie wordt gehandhaafd op circa 0,4 mg/l.

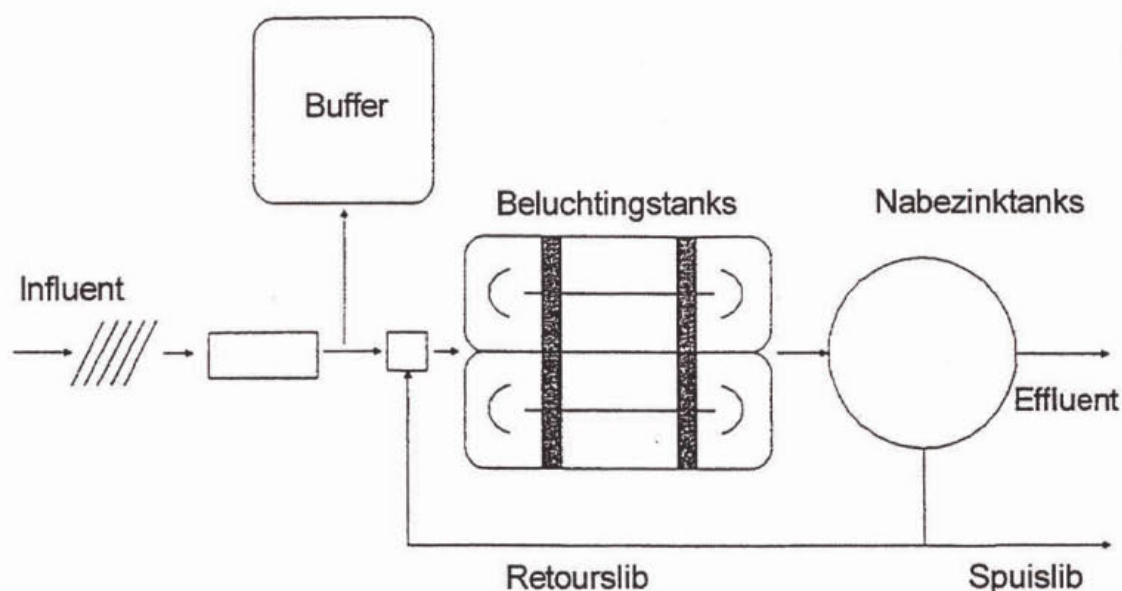
Door BioBalance worden in het octrooi onder meer de volgende voordelen geclaimd:

- lager energieverbruik;
- betere effluentkwaliteit of verhoogde capaciteit van de rwzi;
- betere slibbezinkbaarheid.

3.3 Zuiveringinstallaties met NADH-regeling

3.3.1 *Rwzi Fakse, Denemarken*

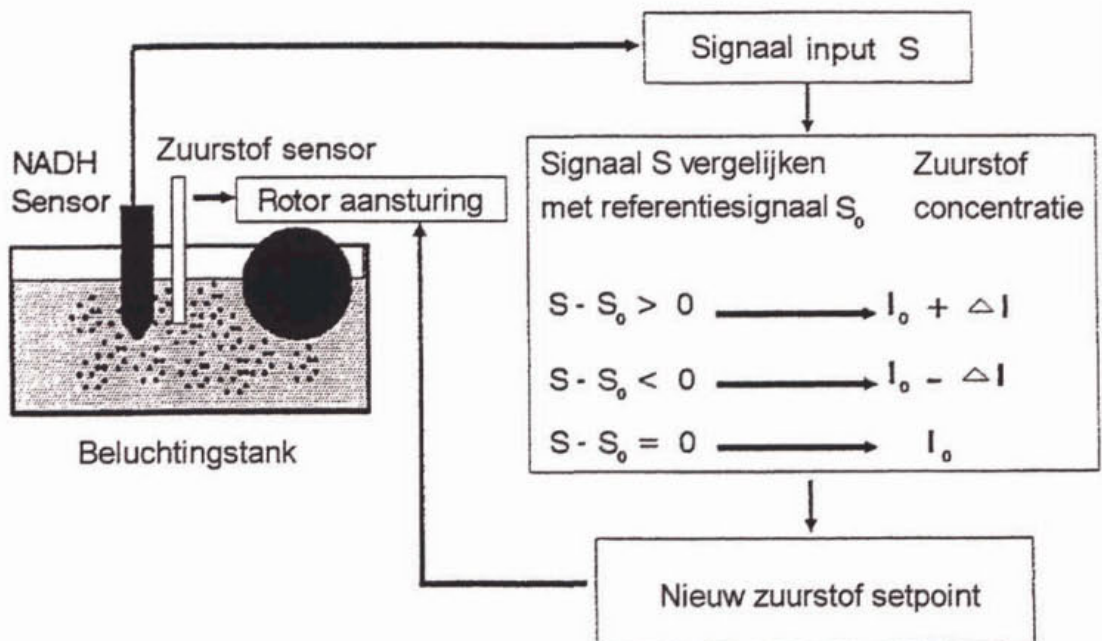
De rwzi Fakse heeft een ontwerpcapaciteit van 145.000 i.e.. Na de roostergoedverwijdering en de zandvang wordt het afvalwater in vier oxidatiesloten geleid. Het slib-watermengsel wordt gescheiden in nabezinktanks. Het spuislib wordt ingedikt en vervolgens vergist en ontwaterd. In figuur 7 is een schema van de rwzi Fakse opgenomen.



Figuur 7 : Schema van de rwzi Fakse

De oxidatiesloten werden alternerend bedreven met een zuurstofsetpoint van 2-3 mg/l en een slibgehalte van 8 g/l. De effluentwaarden gedurende een onderzoeksperiode van 1 maand waren ongeveer 1 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ en 1 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$. De belasting gedurende deze maand was laag. Er werden alleen kleine variaties in het NADH-signaal waargenomen, hoewel de belastingvariaties soms groot waren.

Na deze onderzoeksperiode is een NADH-sensor geïnstalleerd in een cascade-regeling met een zuurstofmeter, waarbij het zuurstofsetpoint de "slave" was en het NADH-signaal de "master". Sinds oktober 1992 is deze beluchtingsregeling in bedrijf. In figuur 8 is de beluchtingsregeling schematisch weergegeven.



Figuur 8 : Schema van de beluchtingsregeling

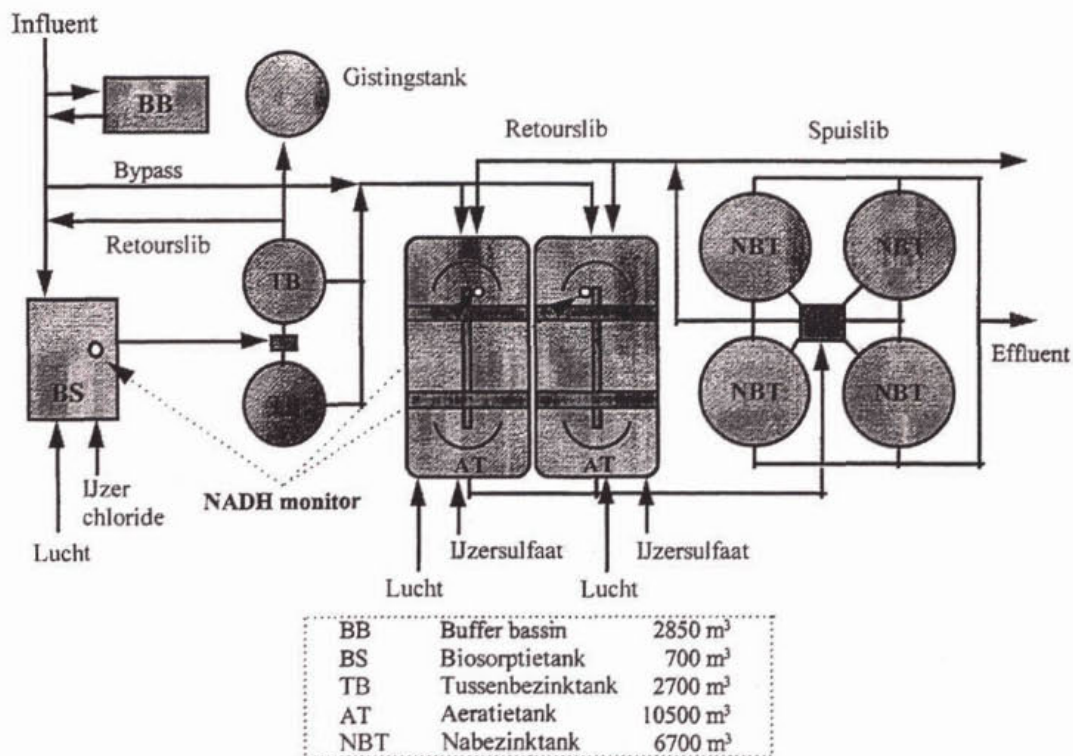
Tegelijkertijd werd het slibgehalte verlaagd tot 5 g/l. De bedrijfsvoering is hierbij veranderd in continue beluchting. De effluentkwaliteit kon met deze wijzigingen op hetzelfde niveau blijven. Tijdens deze tweede periode was de slibbelasting 0,058 kg BZV/kg ds.d (daarvoor 0,036 kg BZV/kg ds.d, de belasting was niet substantieel veranderd).

Vanaf 1992 is het energieverbruik met circa 40% gedaald. Op grond van berekeningen kan worden gesteld dat een klein gedeelte (3%) van de energiebesparing te danken is aan het verlagen van het slibgehalte. Een groot deel van de besparing is te danken aan het feit, dat gedurende een deel van het jaar de helft van de beluchtingstanks buiten bedrijf is gezet. Daarnaast kan een kenmerk van een alternerend proces zijn dat gedurende de beluchte perioden te veel zuurstof wordt ingebracht en daardoor het energieverbruik te hoog is.

Met name door het buitenbedrijf zetten van beluchtingstanks is niet vast te stellen of de NADH-sensor een positieve invloed heeft gehad op het energieverbruik.

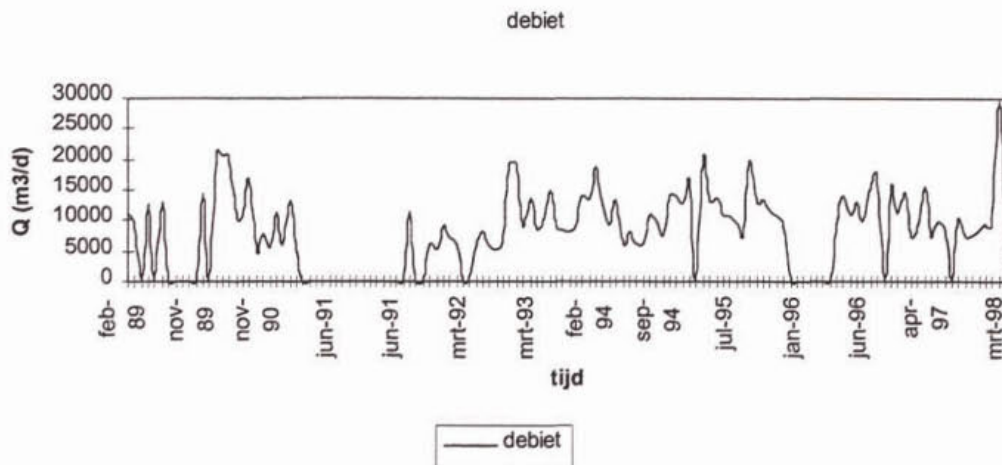
3.3.2 *Rwzi Thisted, Denemarken*

De rwzi Thisted heeft een ontwerpcapaciteit van 80.000 i.e. Het is een tweetraps actiefslibinstallatie waarbij ongeveer tweederde van de belasting afkomstig is van een melkfabriek, een bierbrouwerij, een mouterij en een slachthuis. In figuur 9 is een schema van de rwzi Thisted opgenomen.

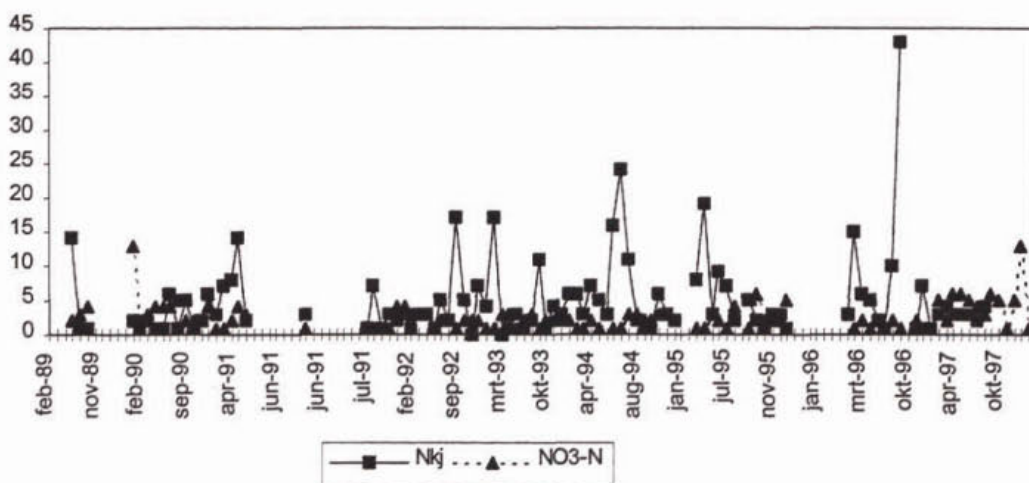


Figuur 9 : Schema van de rwzi Thisted

Eind 1994 zou de belasting worden verhoogd van 80.000 i.e. naar 120.000 i.e. ten gevolge van het afvalwater van een slachthuis. Volgens een geraadpleegd ingenieursbureau moest de rwzi worden uitgebreid. Op grond van de beschikbare gegevens had dit met name te maken met de beluchtingscapaciteit, die niet voldoende was voor intermitterende beluchting. De firma BioBalance heeft een ander besturingsconcept voorgesteld, hetgeen voor een groot deel neerkomt op omschakeling van een (alternerend) BioDenitro-systeem naar een (continu) SymBio-systeem. Hiertoe zijn o.m. drie NADH-sensoren geplaatst: één in de hoogbelaste eerste trap en twee in de laagbelaste tweede trap. De eerste wordt gebruikt voor de regeling van de stroom van en naar de influentbuffer, de FeCl_3 - dosering, de beluchttingsintensiteit en het retourslibdebiet. De sensoren in de tweede trap worden gebruikt voor de zuurstofregeling, dosering van FeSO_4 en het retourslibdebiet. Ook kan op basis van deze signalen een deel van het influent om de A-trap heen direct in de B-trap worden geleid om een eventuele lage BZV/N-verhouding te corrigeren. Zonder uitbreiding heeft de rwzi nu een capaciteit van ruim 120.000 i.e. en kan aan de gestelde effluenteisen voldoen. De slibbelasting van de tweede trap is lager dan 0,043 kg BZV/kg ds.d en 0,007 kg N/kg ds.d. De reden tot uitbreiding is derhalve met het oog op de belasting moeilijk te begrijpen. In figuur 10 en 11 is een overzicht gegeven van het influentdebiet en de effluentstikstofconcentraties. Hierin is te zien, dat het aantal overschrijdingen van de stikstofeffluenteis ($N_{\text{ totaal}} = 8 \text{ mg/l}$) in 1992-1994 oploopt.



Figuur 10 : Influentdebiet van de rwzi Thisted



Figuur 11 : Effluentconcentraties van de rwzi Thisted

Voor de regeling worden regimes in het NADH-niveau gedefinieerd die corresponderen met pompdebieten en zuurstofsetpoints voor de zuurstofregeling. Voor de zuurstofregeling is dus sprake van een master-slave constructie, die overeenkomt met die van de rwzi Fakse.

In tabel 1 is een overzicht opgenomen hoe wordt omgegaan met het NADH-sigitaal.

Tabel 1 : Processturing m.b.v. NADH-sigitaal

	eenheid	interval	BPA ¹⁾
A-trap			
beluchting	m ³ /h	200-1.000	100-500
recirculatie	%	40-100	100-500
ijzerchloridedosering	l/d	40-125	100-500
B-trap			
zuurstofconcentratie	mg/l	0,2-0,6	40-80
recirculatie	%	40-100	40-80
ijzersulfaatdosering	l/d	40-125	40-80

1) eenheid voor NADH-waarde

Ook bij de rwzi Thisted wordt een energiebesparing geclaimd van circa 40%. Dit wordt naar alle waarschijnlijkheid veroorzaakt door het lagere zuurstofgehalte.

Daarnaast is de SVI aanzienlijk gedaald sinds de aanpassingen aan de installatie. Tot 1994 varieerde de SVI tussen 100 en 200 ml/g bij een slibgehalte van 4 g/l, daarna tussen 40 en 80 ml/g bij een slibconcentratie van 6-10 g/l en een slibleeftijd van 40 dagen. Het slib heeft een korrelige structuur. De concentratie aan zwevendstof in het effluent bedraagt circa 10 mg/l. Aangezien tegelijkertijd meerdere modificaties zijn aangebracht aan de rwzi Thisted, kan de verlaging van de SVI niet eenduidig aan één bepaalde maatregel worden toegeschreven.

Gemiddelde effluentcijfers zijn: 5 mg/l BZV; 62 mg/l CZV; 8,4 mg/l N_{totaal} ; 2,7 mg/l NH_4^+ -N.

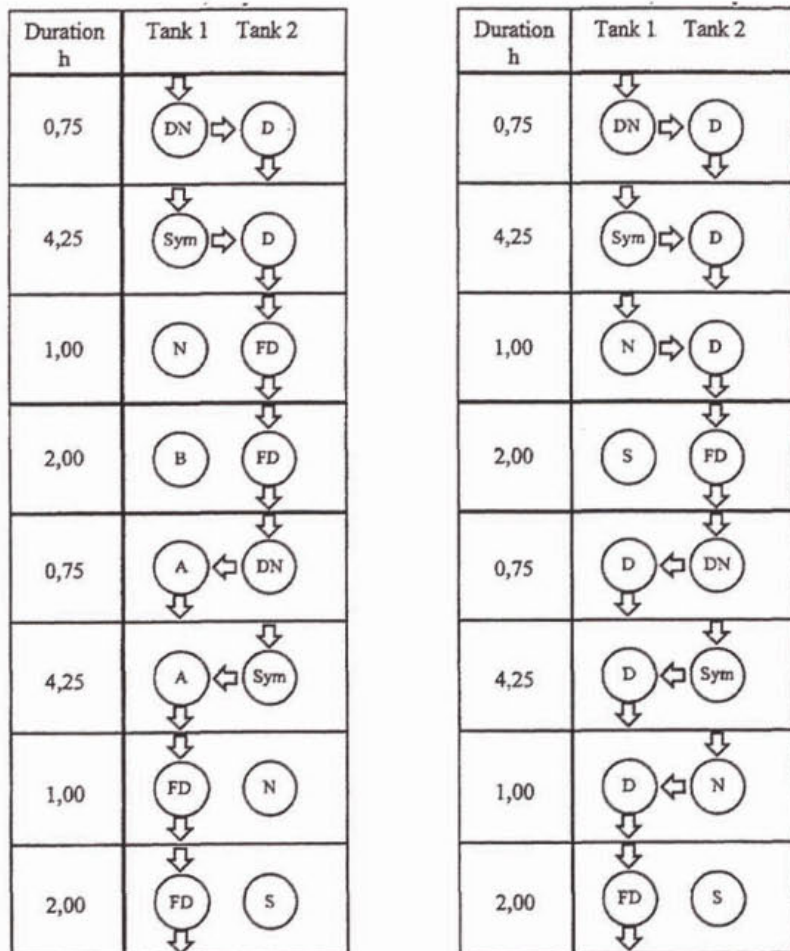
De conclusie die kan worden getrokken, is dat de rwzi Thisted na verandering van de bedrijfsvoering van een alternerend naar een continu systeem kan voldoen aan de effluenteisen, ondanks een 50% toename van de influentvracht. Doordat meerdere maatregelen tegelijkertijd zijn genomen, kan de waarde van de NADH-sensor in de bedrijfsvoering niet worden vastgesteld.

3.3.3 *Rwzi Hammersholt, Denemarken*

De rwzi Hammersholt wordt momenteel belast met ongeveer 3.300 i.e. De effluenteis voor totaalstikstof bedraagt nu nog 8 mg N/l, maar zal in de nabije toekomst worden verlaagd tot 6 mg N/l. Daarnaast zijn er zomer- en wintereisen voor ammonium (1 respectievelijk 3 mg N/l).

Deze rwzi is van het type Sequencing Batch Reactor (SBR). Ook op deze rwzi is een NADH-sensor geïnstalleerd, die indirect voor de sturing van de verschillende fasen zorgt. Gedurende een aantal maanden is onder normale besturingscondities het gedrag van de rwzi onderzocht en is gelijktijdig een aantal NADH-profielen opgesteld. Op basis van deze vooraf opgestelde bereiken wordt nu gestuurd. Een overzicht van de fasetijden voor twee verschillende procestemperaturen is opgenomen in figuur 12.

De slibconcentratie van de rwzi Hammersholt bedraagt 5 g/l, de effluentconcentraties zijn 0,2 mg/l NH_4 -N en 6 mg/l NO_3 -N. Er zijn geen analyseresultaten beschikbaar, op basis waarvan een oordeel kan worden gegeven over eventuele voor- of nadelen van het sturen op basis van een NADH-sensor.



Figuur 12 : Fasetijden van de rwzi Hammersholt

3.3.4 Rwzi Nr. Herlev, Denemarken

De rwzi Nr. Herlev (capaciteit 500 i.e.) wordt momenteel nog niet gestuurd op basis van het NADH-signaal, maar de sensor is reeds geïnstalleerd om relevante procesgegevens te genereren. Daarnaast zijn een ammonium-, nitraat- en fosfaatanalyser opgesteld. De effluenteisen zijn gelijk aan die van de rwzi Hammersholt. Om hieraan te kunnen voldoen is na het omloopsysteem een aparte tank voor nitrificatie (20 m³) en denitrificatie (6 m³) gebouwd, waar ook een externe koolstofbron kan worden gedoseerd. De belasting van de rwzi is 0,057 kg BZV/kg ds.d en 0,014 kg N/kg ds.d.

De slibconcentratie bedraagt 4 g/l. Effluent concentraties zijn 3 mg/l NH₄-N en 3-5 mg/l NO₃-N.

3.3.5 Rwzi Hecklingen, Duitsland

De rwzi Hecklingen (50.000 i.e.) kent een tweestratenconfiguratie. Per straat zijn twee aëratietanks die bedreven worden volgens het (alternerende) Biedenipho-principe. Tijdens de beluchte fase is het zuurstofgehalte 0,4 - 1,7 mg/l.

Gedurende vijf maanden in 1995 is een proefonderzoek uitgevoerd bestaande uit verschillende fasen. In de eerste fase is één van de twee straten bedreven volgens het SymBio-principe, de andere als Biedenipho. Uit het (summiere) onderzoeksrapport zijn de volgende gegevens gehaald.

Tabel 2 : Onderzoek op de rwzi Hecklingen, fase 1

Parameter	eenheid	waarde
hydraulische verblijftijd	d	6,3 - 11,4
temperatuur	°C	10
MLSS	g/l	12-15
BZV-belasting	kg BZV/kg ds.d	0,005 - 0,011

In beide straten zijn vergelijkbare resultaten behaald. Gezien de zeer lage belasting van het systeem is dit niet opmerkelijk. Het vervolgonderzoek richtte zich met name op het uit bedrijf nemen van één of meer straten. Dit had geen nadelige gevolgen voor de effluentkwaliteit in relatie tot de gestelde eisen. (N.B. de maximale belasting was bij uitbedrijfname van drie van de vier aëratietanks ongeveer 0,045 kg BZV/kg ds.d).

Vanwege de lage hydraulische belasting van de rwzi leidde een drogestofgehalte van 12-15 g/l niet tot een overbelasting van de nabezinktanks. Het gehalte aan onopgeloste bestanddelen was derhalve altijd kleiner dan circa 20 mg/l.

Al met al kan worden geconcludeerd, dat het onderzoek met de NADH-sensor op de rwzi Hecklingen niet representatief was vanwege de onderbelasting.

3.3.6 *Rwzi Oostende, België*

De rwzi Oostende behandelt gescheiden huishoudelijk en industrieel afvalwater en heeft een ontwerpcapaciteit van ongeveer 650.000 i.e.. Daarnaast wordt septisch materiaal verwerkt dat momenteel 35% van de belasting vertegenwoordigt. De configuratie bestaat uit harkroosters, zandvangsers, voorbezinktanks, beluchtingstanks met borstelbeluchters en nabezinktanks. De zuivering is momenteel niet volledig belast. De voorbezinktanks worden gebypassed en een deel van de beluchtingstanks wordt gebruikt als sliboxydatiebekkens.

Hoewel de belasting relatief laag is, vindt geen vergaande stikstofverwijdering plaats. Dit wordt onder andere veroorzaakt door een niet volledige nitrificatie, hoewel het geïnstalleerd vermogen van de beluchters voldoende lijkt.

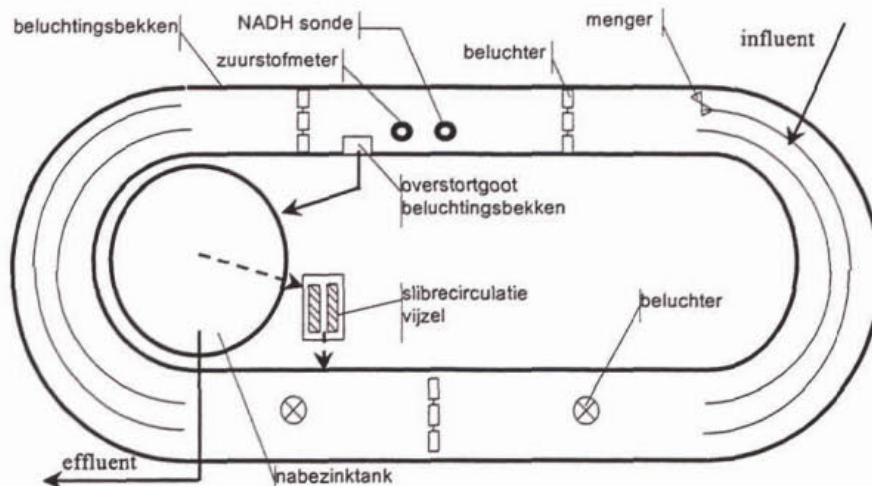
Gedurende een testperiode van drie weken in het begin van 1996 is onderzocht of er een correlatie is tussen het NADH-signaal, gemeten in één beluchtingstank, en de zuurstofbehoefte van de bacteriën zoals bepaald uit de belasting en het zuurstofsignaal. Op grond van deze test is geconcludeerd, dat er een verband bestaat, maar in hoeverre dit aanleiding kan geven tot een betere zuurstofsturing kan niet worden geconcludeerd.

Daarom is door Aquafin, de beheerder van de rwzi Oostende, besloten om een vervolproef uit te voeren op de rwzi Essen.

3.3.7 *Rwzi Essen, België*

De rwzi Essen werd in 1974 gebouwd voor een ontwerpcapaciteit van 11.000 i.e. Het afvalwater (DWA + RWA) wordt door middel van twee vijzels opgepompt en stroomt vervolgens via een fijnrooster en zandvang naar een oxidatiesloot. Er is één nabezinktank.

De BZV-belasting bedroeg in 1998 gemiddeld 22.000 i.e. De hydraulische belasting was gemiddeld 4.500 m³/d.



Figuur 13 : Schematische weergave van de rwzi Essen

Installatie en onderhoud van de NADH-sensor

Het installeren van de sensor is zeer eenvoudig. De sensor is in het actiefslib gehangen in de buurt van de zuurstofmeter (zie figuur 13). Gedurende de twee maanden durende testperiode werd aan de sensor geen enkel onderhoud uitgevoerd. Regelmatige inspectie leerde dat reiniging overbodig was. Kalibratie is niet aan de orde geweest.

Implementatie van de zuurstofregeling

De implementatie van het SymBio-proces zou in twee fasen gebeuren:

- in de eerste fase werd de instelwaarde van de zuurstofregeling geleidelijk aan verlaagd tot 0,5 mg/l. Het NADH-signaal, de zuurstofconcentratie en het debiet werden gelogd. De influent- en effluentsamenstelling werden gemeten op debietproportionele monsters, genomen in een periode van 48 uur. Het slibgehalte en de slibvolumeindex werden drie maal per week ter plaatse gemeten. Die metingen vonden plaats tussen 5 maart en 8 mei 1998.
- in de tweede fase zou een automatisch regelsysteem geïnstalleerd worden waarbij de instelwaarde van de zuurstofregeling voortdurend automatisch aangepast zou worden op basis van het NADH-signaal.

De tweede fase is echter uit het project geschrapt om de volgende redenen:

- op basis van de resultaten van de eerste fase is er weinig voordeel te verwachten van een bijkomende sturing op basis van het NADH-signaal;
- op grond van de bevindingen in Nederland is door Aquafin gesteld dat de door BioBalance voorgestelde regeling wetenschappelijk niet te onderbouwen is.

Een beschrijving van de resultaten van het onderzoek op de rwzi Essen is in bijlage 1 opgenomen. De volgende conclusies kunnen worden getrokken op grond van het onderzoek:

- er is een lichte correlatie tussen het NADH-signaal en de CZV-vracht;
- er kan geen verband worden aangetoond tussen het NADH-signaal en de effluentconcentraties;
- een lager zuurstofgehalte in de aëratietank levert een verbeterde effluentkwaliteit voor totaalstikstof;
- het lagere zuurstofgehalte heeft geen nadelige invloed op de slibbezinkbaarheid.

3.4 Conclusies

Op basis van de informatie over de praktijktoepassingen van de NADH-sensor in Duitsland, Denemarken en België kan een aantal conclusies worden geformuleerd.

Deze conclusies zijn:

- er is een sensor beschikbaar, die NADH meet;
- de exacte plaats van meten (in de vlok of in losse cellen) is vooralsnog niet bekend;
- deze NADH-sensor is beschikbaar in een robuuste uitvoering, met lange levensduur, die nagenoeg geen onderhoud vergt;
- de NADH-sensor wordt reeds in de praktijk toegepast bij laagbelaste installaties (slibbelasting lager dan 0,6 kg BZV/kg ds.d) en verschaft dan primaire informatie voor het bedienen van een installatie;
- de NADH-sensor wordt in beluchttingsregelingen toegepast (een cascaderегeling met zuurstof als slave en NADH als niet on-line master);
- op de rwzi Thisted wordt de NADH-sensor simultaan toegepast voor het bypassen van influent, chemicaliëndosering en retourlibregelingen;
- de geclaimde voordelen voor capaciteitsverhoging, energiebesparing en verbetering van de SVI kunnen niet worden gerelateerd aan het toepassen van een NADH-sensor.

4 ERVARINGEN IN NEDERLAND

4.1 Inleiding

Er zijn twee experimentele programma's uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de interpretatie van het NADH-signaal bij de zuivering van huishoudelijk afvalwater.

Op het laboratorium van de T.U. Delft is de sensor getest met zuiveringsslib, waarbij de slibbelasting en de dosering van elektronacceptor (zuurstof/nitraat) onafhankelijk gevarieerd konden worden. Heterotrofe en autotrofe activiteit zijn apart bestudeerd. Ook is gekeken naar de invloed van de bacterieconcentratie, de vloggrootte, en de pH (paragraaf 4.2).

Om de NADH-respons onder praktijkomstandigheden te evalueren, is de sensor gedurende enkele maanden geïnstalleerd geweest op de rwzi's Genemuiden (Waterschap Groot-Salland) en Dokhaven (Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden). In paragraaf 4.3 wordt hier verslag van gedaan.

4.2 Laboratoriumonderzoek

Om de signaalvariaties onder praktijkomstandigheden beter te kunnen begrijpen, zijn experimenten uitgevoerd die inzicht moeten geven in de invloed van:

- slibconcentratie;
- slibgrootteverdeling;
- slibbelasting (BZV) bij verschillende zuurstof- en nitraatconcentraties;
- nitrificatie versus heterotrofe activiteit;
- pH.

De experimenten zijn uitgevoerd in batch-experimenten (20 l) met B-trap slib van de rwzi Dokhaven in Rotterdam. Naast de NADH-sensor waren ook een zuurstof-, redox-, en pH-elektrode aanwezig. De pH, zuurstof-, slib-, nitraat-, ammonium- en acetaatconcentraties konden onafhankelijk worden ingesteld.

4.2.1 Slibconcentratie

In een eerste experiment is onderzocht hoe het NADH-signaal afhangt van de actieve biomassaconcentratie, zonder dat er al te grote effecten van inner- en outer filtering (paragraaf 2.4) verwacht worden. Hiertoe zijn metingen aan bakkersgist op verschillende concentratieniveaus uitgevoerd. In figuur 14 is te zien dat het signaal nagenoeg rechtevenredig met de gistconcentratie (en dus met de hoeveelheid actieve biomassa) is.

Als het experiment herhaald wordt met zuiveringsslib vinkt het signaal af bij toenemende concentratie. Bij 4 g d.s./l is het NADH-signaal nauwelijks nog gevoelig voor de slibconcentratie. Dit is gunstig voor waarnemingen in rwzi's, omdat het signaal niet gecorrigeerd hoeft te worden voor fluctuaties in het slibgehalte. De verklaring voor de afnemende signaalgevoeligheid is dat UV-licht verstrooid en/of geabsorbeerd wordt door slibbestanddelen (inner/outer filtering). Het relatieve deel van het uitgezonden, dan wel geretourneerde licht dat geabsorbeerd wordt neemt dan toe met de slibconcentratie.

Dit is onderzocht door het slib bloot te stellen aan verschillende roersnelheden. Figuur 16 laat zien hoe het signaal reageert bij stapsgewijze verhoging van die roersnelheid van 50 rpm (de vloeistof is dan nauwelijks in beweging) tot 550 rpm (wild dansend oppervlak). Voor het experiment was acetaat toegevoegd om zeker te zijn van biologische activiteit. Bij verschillende toerentallen zijn monsters van het medium genomen om de slibgrooteverdeling vast te stellen. Direct na uitschenken over een Petri-schaal was met het oog duidelijk waarneembaar dat bij de hoge toerentallen de vlokken beduidend kleiner zijn dan bij de lage toerentallen. Omdat de vlokken "in rust" snel uitgroeien, was het niet mogelijk dit objectief te kwantificeren.

Als de lichtdringing van het UV-licht bij aanstraling, dan wel het geretoureerde fluorescentielicht, gering is, moet het NADH-sigitaal gevoelig zijn voor de gemiddelde vlokgroote. Als de vlokgroote bij vaste slibconcentratie bijvoorbeeld zou stijgen, zou het NADH-sigitaal moeten afnemen.

Slibgrooteverdeling

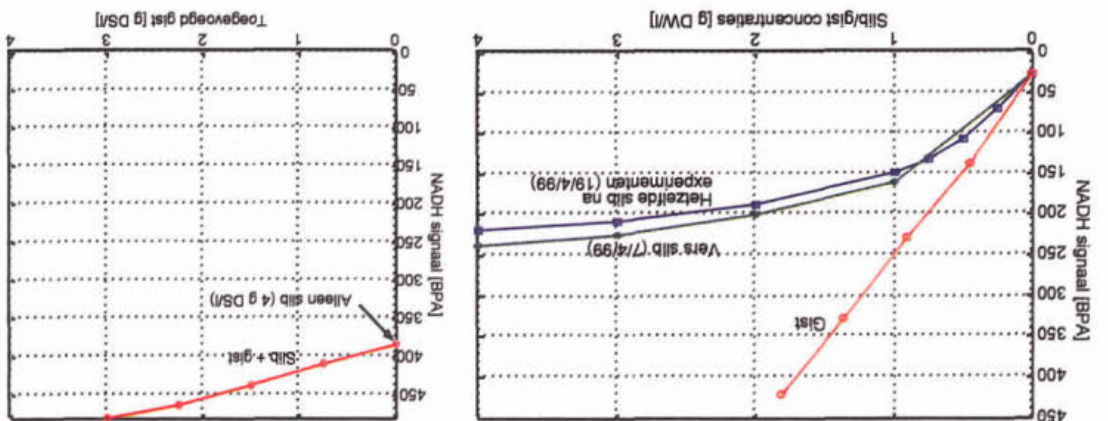
Dit leidt tot een aantal belangrijke conclusies:

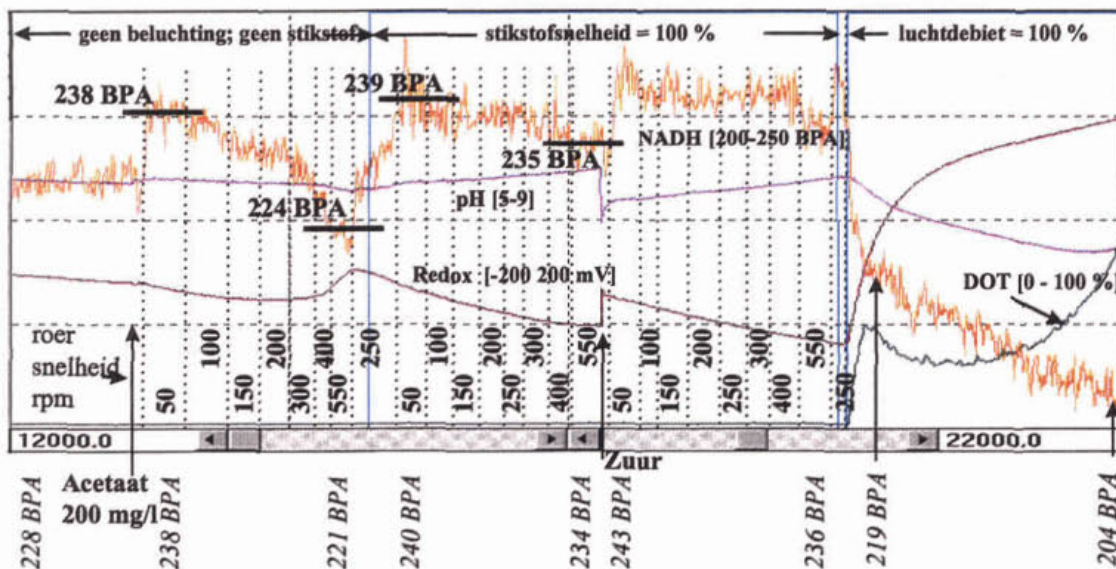
- 1) onder praktijkomstandigheden is het NADH-sigitaal weinig gevoelig voor de slibconcentratie rond 4 g/l;
- 2) het geeft wel een maat voor de hoeveelheid actieve biomassa in het slib. Verderop zal worden aangetoond, dat autotrofe activiteit niet wordt waargenomen, zodat het hier uitsluitend om heterotrofe biomassa gaat;
- 3) omdat de "troebelheid" van het medium een rol speelt bij de signaalhoogte, zullen procesomstandigheden die hier invloed op uitoeenen van belang zijn voor de signaalhoogte.

Hierbij kan onder meer gedacht worden aan chemicaliëndosering en regenweeraanvoer.

Als deze verklaring juist is, mag verondersteld worden dat bij hogere slibconcentratie het signaal nog wel ongeveer evenredig is met de hoeveelheid actieve biomassa in het slib. Immers de lichtverstrooiing/absorptie zal vrij ongeveer gelijk zijn voor het precieze aandeel van levende bacteriën in het slib. Figuur 15 laat zien hoe het NADH-sigitaal reageert als aan een hoeveelheid slib (4 g d.s./l) stapsgewijs gist wordt toegevoegd. De signaalvariatie per gram toegevoegd slib is daarbij uiteraard kleiner geworden dan wanneer dan wanneer aan zuivere gist wordt gemeten.

Figuur 14 en 15 : NADH-respons bij verschillende slib- en gistconcentraties.





Figuur 16 : Variatie van de roersnelheid (tijdschaal: 6,1 uur)

In het meest linkse deel van figuur 16 is zichtbaar dat het NADH-sigitaal lager wordt naarmate de roersnelheid toeneemt. Dit is merkwaardig als de lichtindringdiepte gering is, omdat dan het tegenovergestelde effect wordt verwacht. Waarschijnlijker is dat de verbeterde zuurstofoverdracht via het oppervlak bij hoge toerentallen hier debet aan is (het systeem werd niet belucht). Hoewel de zuurstofconcentratie in alle gevallen meetbaar is, laat het redoxsignaal een stijging zien boven de 400 rpm. Dit wijst inderdaad op een toename van de zuurstofconcentratie in het lage bereik. Op het moment dat het redoxsignaal stijgt, daalt zoals verwacht het NADH-sigitaal. Het experiment is daarom herhaald waarbij stikstofgas over de vloeistof werd geleid. De daling is nu nagenoeg verdwenen (midden van de figuur). Het redoxsignaal daalt in deze periode gestaag doordat het slib de laatste restjes zuurstof verbruikt. Dit effect is niet zichtbaar in het NADH-sigitaal. Het lijkt erop, dat het NADH-sigitaal duidelijk verandert als een kritische zuurstofgrens in het lage bereik wordt gepasseerd, maar dat verdergaande daling van de zuurstofconcentratie geen invloed meer heeft (zie ook figuur 19). Op deze kleine schaal (40 cm diepte) is de verhouding oppervlakte/volume ongeveer 10 * zo hoog als in de praktijk (4 m diepte). We zien hier dus een typisch "laboratorium-effect". In de praktijk is het effect van de vloeistofbeweging aan het oppervlak van veel minder betekenis.

Op grond van dit experiment is geconcludeerd dat de gemiddelde vloggrootte weinig invloed heeft op het NADH-sigitaal. De vlokken worden volledig doorstraald met het UV-licht.

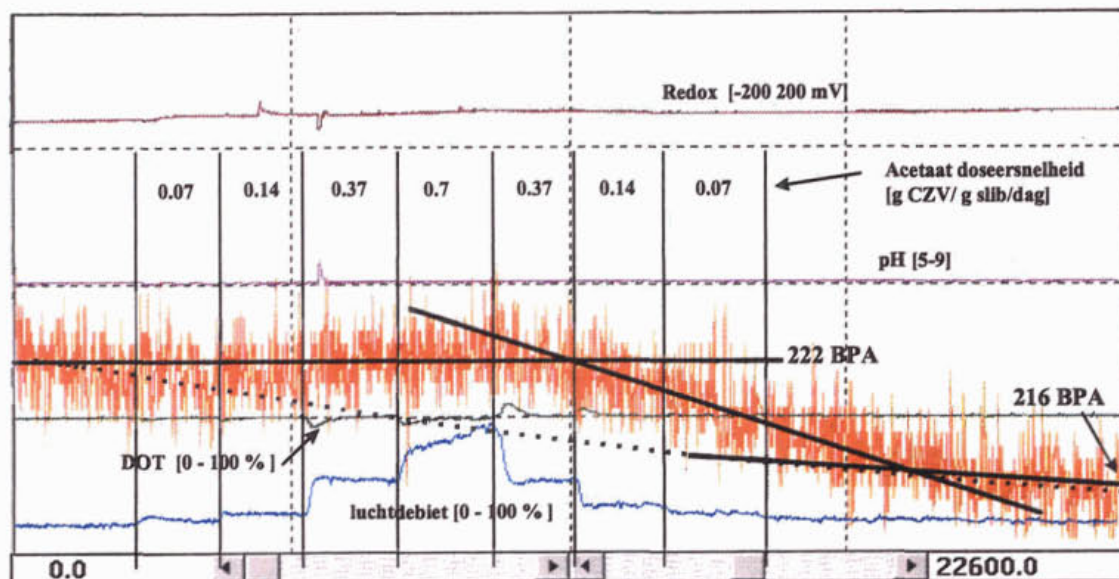
De volgende conclusies liggen voor de hand:

- 1) slibgrootteverdeling heeft weinig invloed op het NADH-sigitaal. De doordringdiepte van het (geretourneerde) licht is dus hoog;
- 2) variaties in de zuurstofconcentratie op een zeer laag niveau (niet meetbaar met een zuurstofelectrode, maar wel met een redoxmeter) hebben een duidelijk effect op het NADH-sigitaal.

4.2.3 Slibbelasting

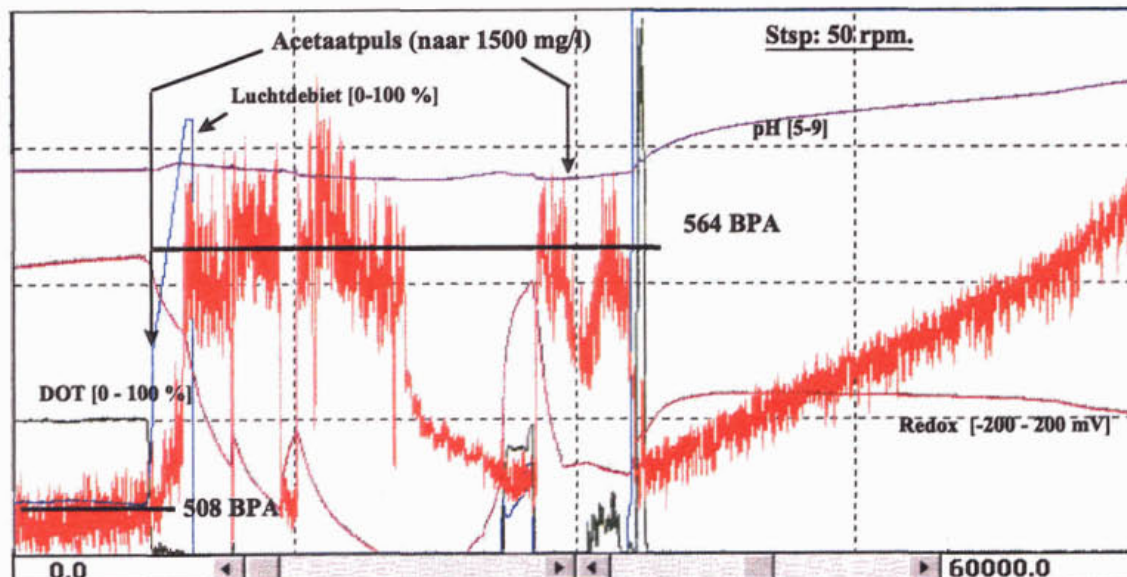
Het systeem is belast met acetaatpulsen en met continue toevoeging van acetaat. Figuur 17 toont het effect van een stapsgewijze verhoging en verlaging van een continue acetaatdosering. Het luchtdebiet werd in dit experiment automatisch geregeld om de zuurstofconcentratie op 2,5

mg/l te houden. Duidelijk is te zien dat de zuurstofbehoefte van het systeem toeneemt met hogere acetaatbelasting. Het NADH-signaal blijft evenwel min of meer constant.



Figuur 17 : Effect van continue acetaatdosering (0,07-0,7 g CZV/g slib/dag). Tijdschaal: 6,3 u.

Over veel langere termijn (hier niet getoond) vertoonde het signaal een dalende tendens die is aangegeven met een stippellijn. Ten opzichte van die tendens neemt het NADH-signaal toe met toenemende acetaatbelasting, maar het gaat om zeer kleine verschillen. Bij pulsdoseringen (van 0 tot 1500 mg/l acetaat) werd momentaan geen significante stijging van het signaal waargenomen. Wel gaven deze pulsdoseringen een vertraagd effect, zoals figuur 18 laat zien.



Figuur 18 : Pulsdoseringen met acetaat (2* 1500 mg/l). Tijdschaal: 75,4 u.

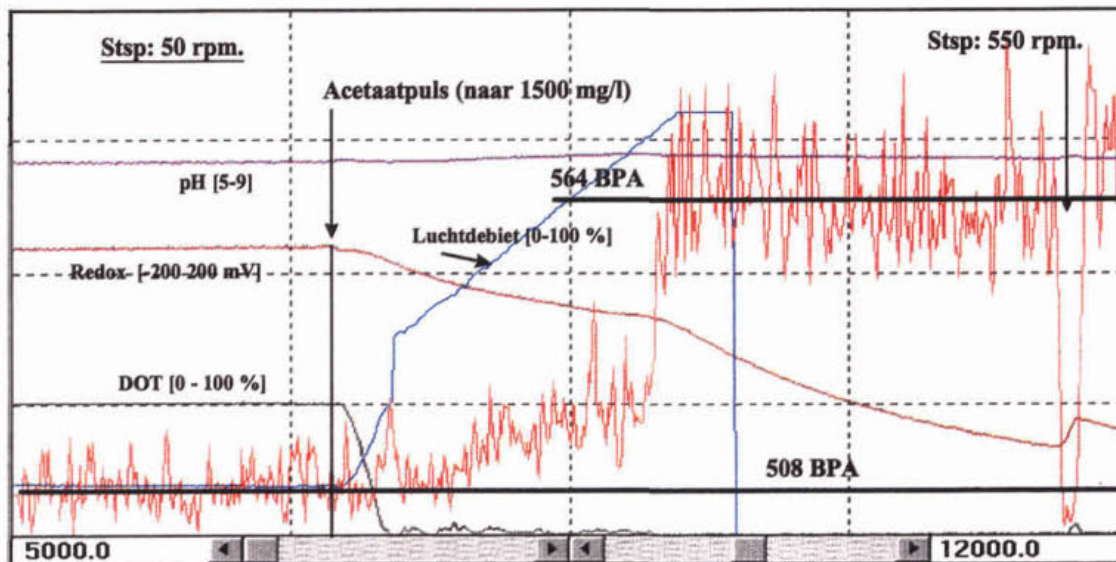
Over een langere termijn van 50-70 uur is een sterke signaalverhoging waar te nemen (van 500 naar zo'n 750 BPA, deels onder anoxische, deels onder oxische condities). In overeenstemming met de proeven beschreven onder "slibconcentratie" wordt aangenomen dat de toename van heterotrofe biomassa debet is aan deze stijging. Bekend is dat bij pulsdoseringen met acetaat

relatief veel interne opslagpolymeren worden gevormd. Dit kan verklaren waarom de toename van de biomassaconcentratie relatief langzaam verloopt (de groeisnelheid wordt wellicht opgelegd door de "hydrolysesnelheid" van die polymeren).

De conclusie die kan worden getrokken is, dat het NADH-sigitaal geen maat geeft voor de directe slibbelasting.

4.2.4 Zuurstofconcentraties

Figuur 19 toont de reactie van het NADH-sigitaal op de zuurstofconcentratie (elektronacceptor) in de aanwezigheid van veel acetaat (elektron donor). Vrij snel na de acetaatpuls daalt de zuurstofconcentratie tot met de zuurstofsensoren niet of nauwelijks meetbare waarden (<0,1-0,2 mg/l). Het systeem werd wel belucht, maar de roersnelheid was zo laag dat er geen zuurstofoverdracht van betekenis optrad. Het NADH-sigitaal reageert niet. Als het redox-sigitaal begint af te nemen (de zuurstofconcentratie wordt nu buitengewoon laag), begint het NADH-sigitaal enigszins te stijgen. Pas wanneer er een knik in het redox-sigitaal optreedt (bij -50 mV; alle niraat is nu verbruikt, zie paragraaf 4.2.7) stijgt het NADH-sigitaal momentaan zo'n 40 eenheden. Een uur later wordt de roersnelheid van 50 tot 550 rpm verhoogd. De zuurstofconcentratie wordt nu net boven het nulpunt getild en het NADH-niveau valt onmiddellijk terug tot het niveau onder beluchte condities. Dit is de sterkste korte-termijnreactie van het NADH-sigitaal die werd waargenomen, vermoedelijk als gevolg van het lage redoxniveau.



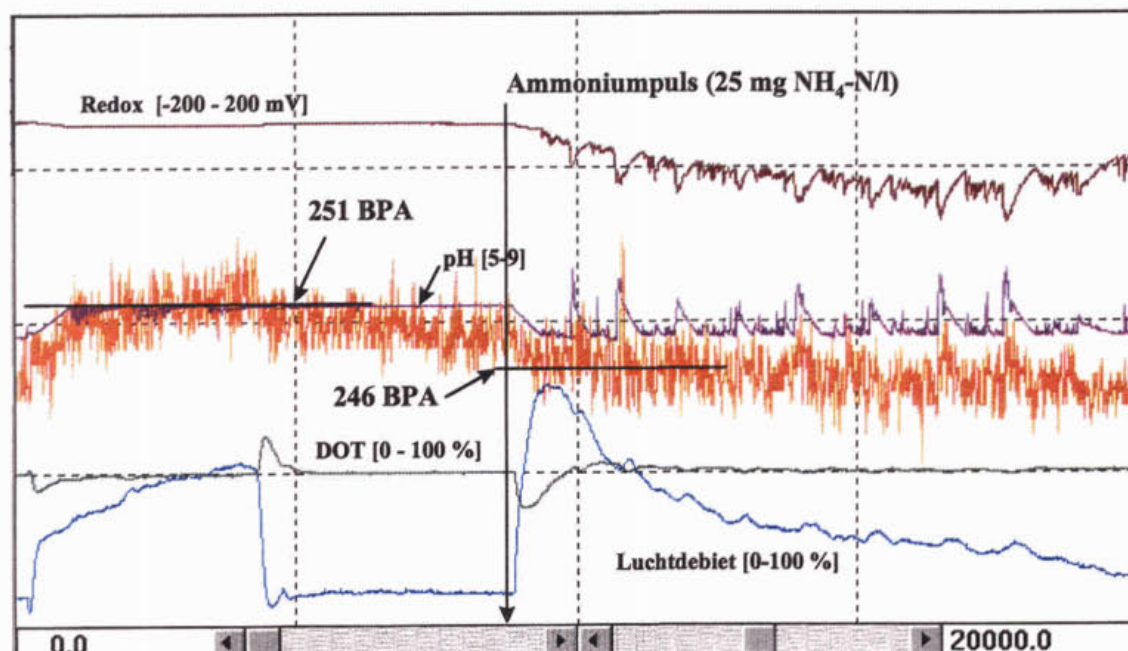
Figuur 19 : Invloed van zuurstof (tijdschaal: 3,3 u)

Conclusies:

- 1) opnieuw is vastgesteld dat het NADH-niveau pas reageert bij een zeer lage zuurstofconcentratie;
- 2) de overgang anoxisch-anaëroob komt beter in het sigitaal tot uitdrukking dan de overgang oxisch-anoxisch;
- 3) de sigitaalvariaties zijn klein ten opzichte van langere-termijn groei-effecten.

4.2.5 Nitrificatie

Figuur 20 toont het effect van een - in vergelijking met de praktijk zeer forse - ammoniumpuls (0 -> 25 mg/l).



Figuur 20 : Effect van een ammoniumpuls

Het benodigde luchtdebiet stijgt sterk om de zuurstofconcentratie constant op 2,5 mg/l te houden. Het NADH-sigitaal reageert evenwel nauwelijks waarneembaar.

Conclusies:

- 1) nitrificatie-activiteit wordt door de NADH-sensor niet waargenomen;
- 2) dit in combinatie met het feit dat voor heterotrofe activiteit het sigitaal pas reageert bij zeer lage zuurstofconcentratie, maakt een procesregeling puur op basis het NADH-sigitaal zeer riskant voor de nitrificatie.

4.2.6 pH

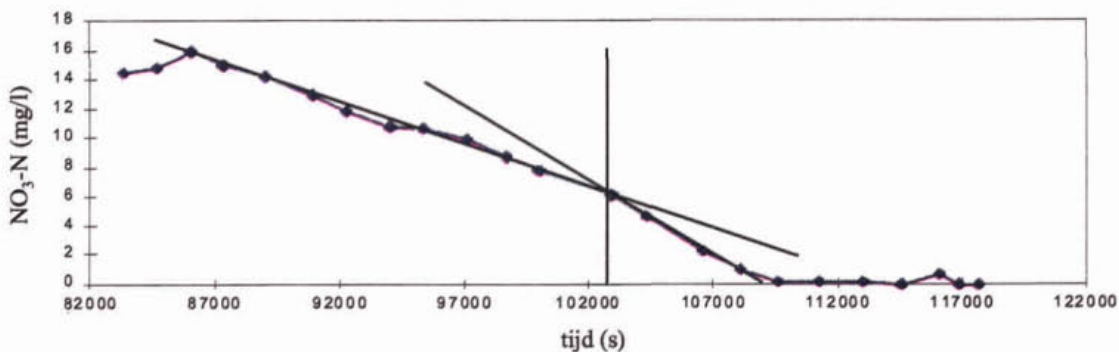
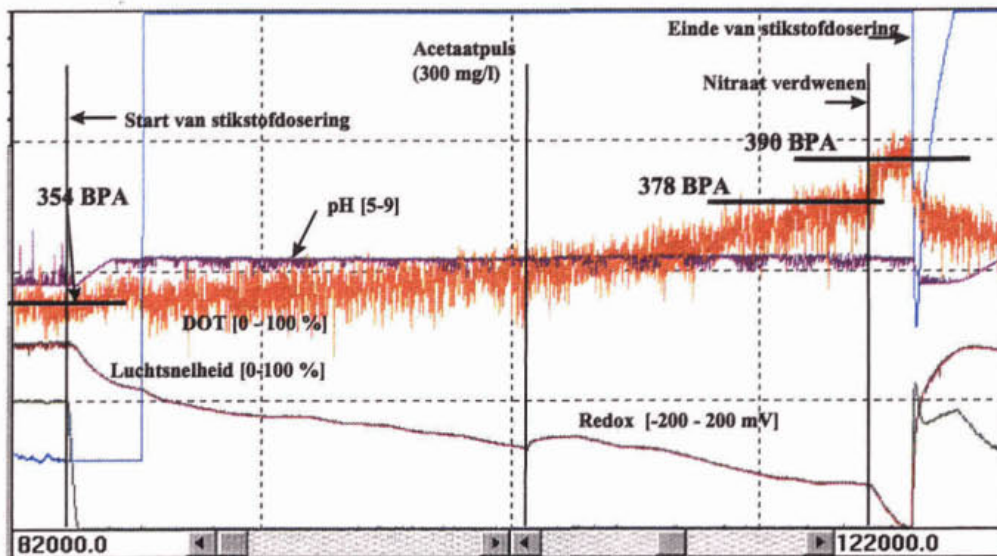
Door de pH sprongsgewijs te veranderen en de overige omstandigheden hetzelfde te houden is gemeten dat een stap van pH 8,8 naar pH 7 leidde tot een NADH-daling van 778 naar 743 BPA (-2,5% per pH-eenheid). In een ander experiment daalde NADH van 381 BPA naar 373 BPA bij een pH-sprong van 6,9 naar 6 (-2,3% per pH-eenheid). Onder praktijkomstandigheden zijn de pH-variaties veel kleiner en meer geleidelijk.

De conclusie die kan worden getrokken is, dat in de praktijk het NADH-sigitaal nauwelijks gevoelig zal zijn voor pH-variaties van enkele tienden pH-eenheden.

4.2.7 Nitraat

In de figuren 21 en 22 zijn de resultaten weergegeven van nitraatdoseringen. Figuur 22 toont het verloop van de nitraatconcentratie, figuur 21 de overige signalen. Het NADH-sigitaal stijgt in de proefperiode langzaam, vermoedelijk als gevolg van biomassatoename. Na de acetaatpuls

is de toename sterker dan daarvoor. Uit de nitraatafname kan worden geconcludeerd, dat na de acetaatdosering de denitrificatiesnelheid toeneemt. Een duidelijke NADH-reactie treedt pas op als er een knik in de redoxcurve ontstaat (378-390 BPA). Uit de analyses lijkt te volgen dat nitraat dan al enkele uren is uitgeput. In andere experimenten lag de knik veel dicht bij het punt waar nitraat op was. Vermoedelijk is er in de monsters nog denitrificatie opgetreden voordat ze geanalyseerd werden.



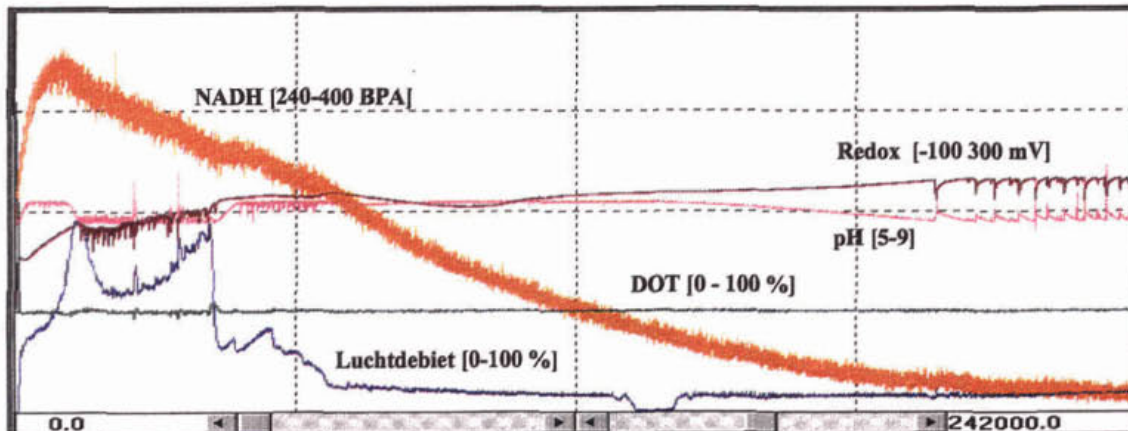
Figuur 21 en 22 : Invloed van nitraat (tijdschaal: 33,3 u)

Uit voorgaand experiment wordt geconcludeerd, dat net als bij zuurstof het NADH-sigitaal dus pas reageert als het nitraat volledig is uitgeput. De signaalverandering is gering ten opzichte van andere veranderingen.

4.2.8 Verminderde slibactiviteit bij langdurige beluchting

Figuur 23 toont een responscurve als het slib over een periode van bijna 3 etmalen belucht wordt. Na toevoeging van het slib (dat 2 weken bewaard was bij 6° C) vindt er eerst een activiteitstoename plaats (toename van het NADH-sigitaal in de eerste 3 uur en toenemende zuurstofconsumptie). De stijgende zuurstofconsumptie is waarneembaar aan de toename van het luchtdebiet, nodig om de opgeloste-zuurstofconcentratie op 2,5 mg/l te houden. Het precieze verloop van het luchtdebiet is merkwaardig. De eerste piek kan wijzen op de opname van snel veradembaar substraat. Waarom daarna een geleidelijke toename plaatsvindt is onduidelijk. Na de initiële stijging daalt het NADH-sigitaal. De daling wordt sterker als het luchtdebiet aangeeft dat er nauwelijks verademing van substraat plaatsvindt.

Hoogstwaarschijnlijk is dit te wijten aan de afsterving of predatie van de verantwoordelijke micro-organismen.



Figuur 23 : Belucht slib (tijdschaal 67,2 u)

In figuur 24 is het resultaat van een soortgelijk experiment weergegeven. Initieel was er sprake van anoxische condities, waartoe 100 mg/l nitraat was toegevoegd. Het slib was inmiddels 30 dagen bewaard bij 6 °C. De piek in zuurstofverbruik wordt nu pas na 22,5 uur bereikt. Als de anoxische periode niet wordt meegeteld duurt het 10-12 uur voordat de maximale activiteit bereikt wordt. Ook uit andere experimenten bleek dat activiteitstoename langer duurde naarmate het slib langer bewaard was. Als naar het verloop van het nitraatgehalte wordt gekeken in de anoxische periode valt op dat bij de eerste snelle stijging van het NADH-signaal nog geen nitraatafname plaatsvindt. Kennelijk is dit een periode van "revitalisatie". Daarna treedt er een geleidelijke toename van de denitrificatiesnelheid op, wat consistent is met de ingroei van bacteriën, c.q. de stijging van het NADH-signaal. De knik in de redoxcurve treedt weer op als nitraat op is, waarna het NADH-signaal snel stijgt. Als even later belucht wordt zakt het signaal tot het anoxische niveau.

Het NADH signaal geeft dus informatie over de biomassa-activiteit in het slib.

Kentallen van de beide installaties zijn opgenomen in bijlage 2. Opvallende verschillen van belang voor dit onderzoek zijn de nagenoeg tien maal hogere vloeistofverbleef tijd in

De B-trap van de rwzi Dokhaven ontvangt voorbehandeld water uit de A-trap (zandvangner, beluchtingstank, tussensbezinktank). Deze is ingericht voor nitrificatie. De zuurstofconcentratie bedraagt minimaal 0,5 mg/l, maar is meestal boven 1 mg/l.

De rwzi Genemuiden is een continue oxydatiesloot. Na passage van een anaërobie tank wordt het water eerst door een anoxische en vervolgens door een oxische tank geleid. Vanuit de oxische tank vindt recirculatie naar de anoxische tank plaats. De anoxische tank bezit oppervlaktebeluchters die regelmatig bijgeschakeld worden om meer oxydatiecapaciteit te verkrijgen. Metingen hebben plaatsgevonden in de anoxische tank, waarin de zuurstofconcentratie varieert tussen 0 en 0,5 mg/l en de nitraatconcentratie tussen 0 en 4-6 mg/l.

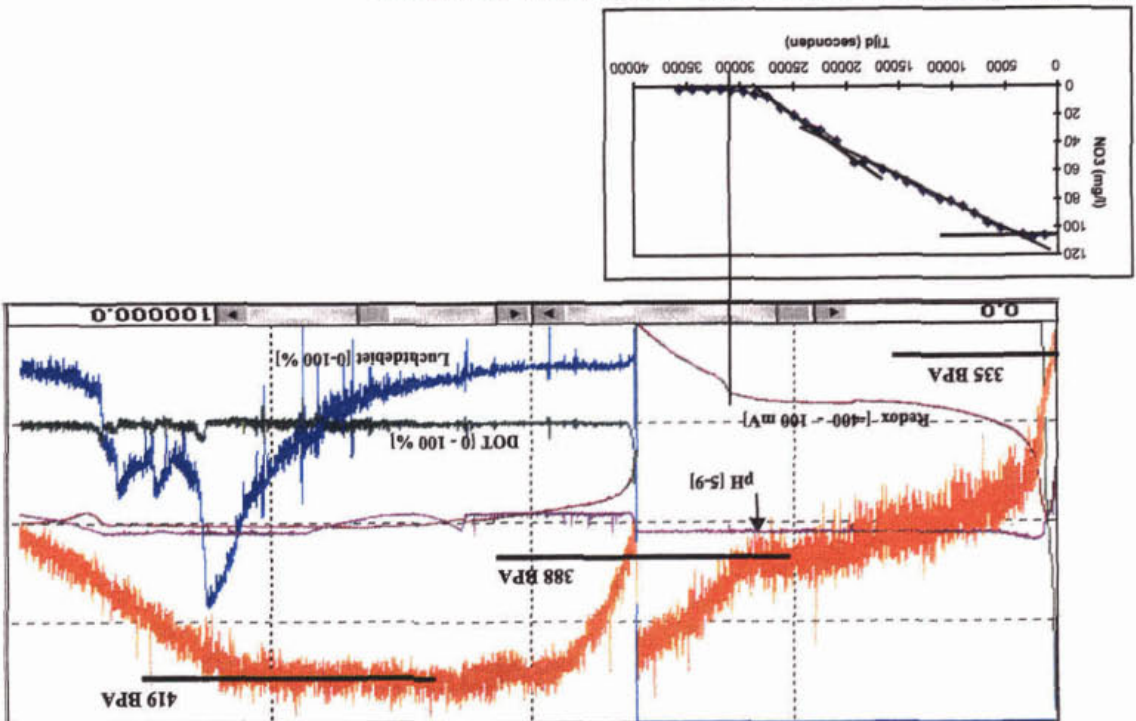
Configuratie en bedrijfsomstandigheden van de installaties

De NADH-sensor is gedurende langere periodes in twee installaties getest. In de rwzi Genemuiden (30.000 i.e., Zuiveringschap Groot-Salland) heeft de sensor 6 weken in een anoxische tank gehangen, die wordt belucht op momenten van verhoogde belasting. In het A-B proces van de rwzi Dokhaven te Rotterdam (470.000 i.e., Zuiveringschap Hollandse Eilanden en Warden) heeft de sensor bijna een half jaar in de B-trap (nitrificatietank) gehangen. In beide installaties zijn simultaan o.a. ook het zuurstof- en het drogestofgehalte alsmede het influentdebiet en de redoxpotentiaal geregistreerd.

Inleiding

Waarnemingen op praktijkschaal

Figuur 24 : Slib onder anoxische en oxische condities (tijdschaal: 27,8 uur).



4.3.2

4.3.1

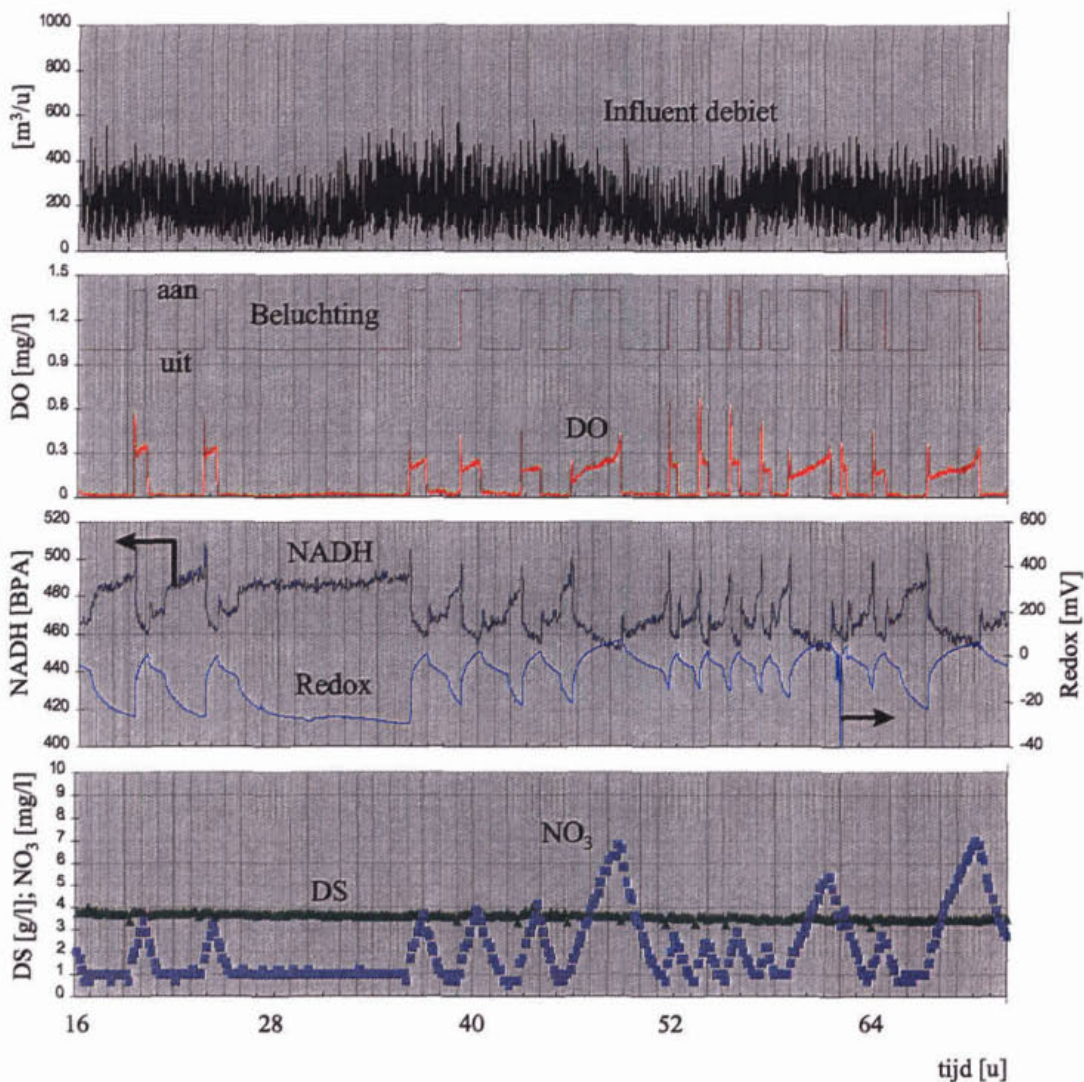
4.3

Genemuiden ten opzichte van de B-trap van Dokhaven. Het slib in de B-trap van Dokhaven is ongeveer vier maal zo hoog belast als in Genemuiden.

Responscurves van de installaties voor kenmerkende periodes zijn opgenomen als figuur 25 t/m 27 (Genemuiden, DWA) en 28 t/m 31 (B-trap, DWA en RWA). In bijlage 2 is de proefopzet beschreven.

4.3.3 Rwzi Genemuiden

Variaties van het NADH-signaal zijn goed waarneembaar ten opzichte van het lage ruisniveau (1-2 BPA op een volle schaal van 0-1000 BPA) en bewegen, zoals te verwachten, tegengesteld aan het redoxsignaal. Dit is vooral goed te zien in de responscurves uit Genemuiden (figuur 25).

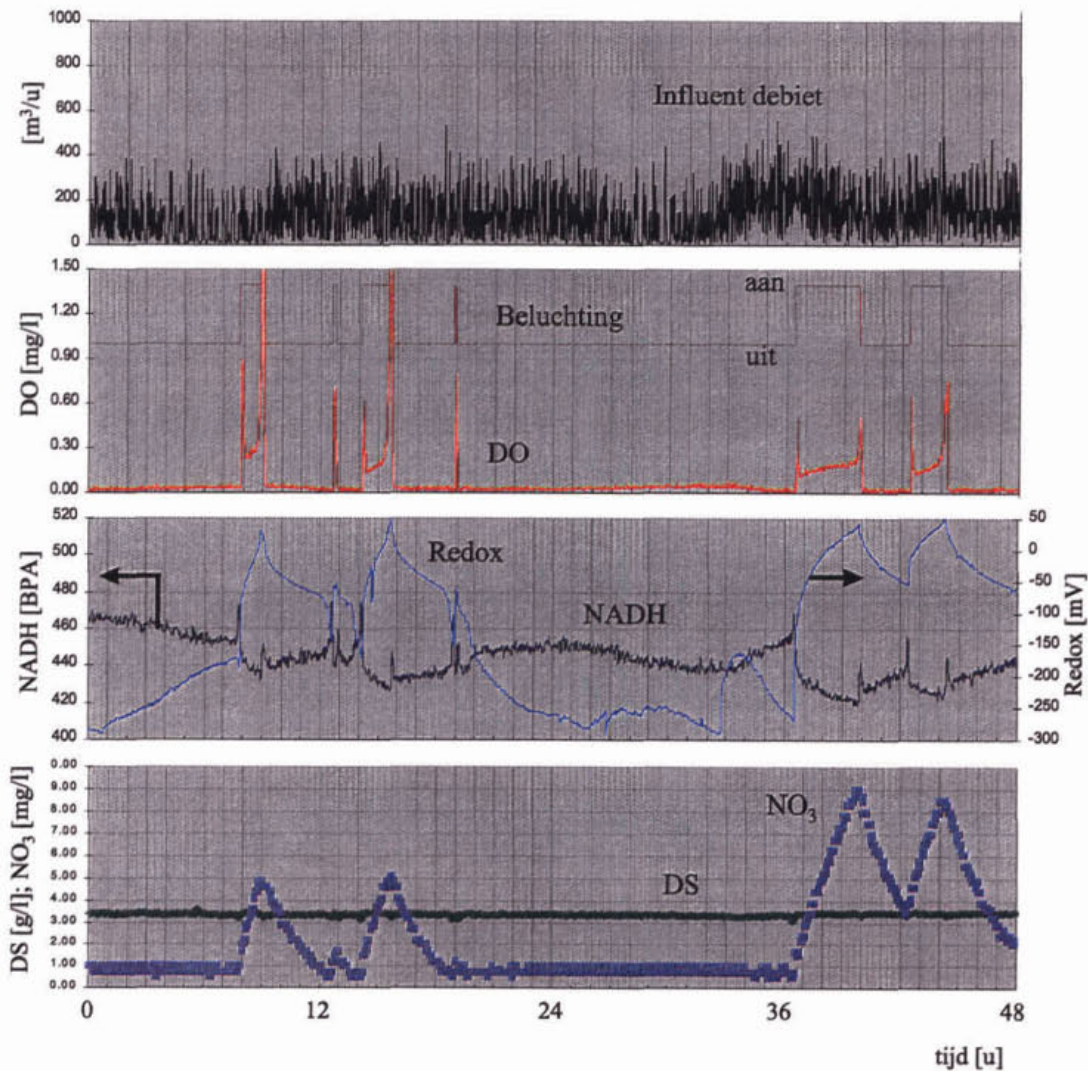


Figuur 25 : Meetresultaten van de rwzi Genemuiden 10/7/96 16:00-13/7/96 00:00

Op het moment dat de beluchters worden ingeschakeld stijgt het redoxniveau van -250 naar -50 mV, terwijl het NADH-signaal daalt van 490 naar 470 BPA. Er ontstaat nu nitraat. Gedurende de beluchte periode daalt NADH nog zo'n 10 eenheden en stijgt redox tot rond 0 mV. Ook de zuurstofconcentratie stijgt enigszins (daling NH_4^- - en CZV-niveaus). Als de beluchters uitgaan

(anoxische condities) stijgt het NADH-niveau onmiddellijk met 10 eenheden en daalt de redox met 80-100 mV. Als 1 tot 2 uur later het nitraat is uitgeput (anaërobie), stijgt NADH weer momentaan tot 490 BPA en neemt het redoxsignaal over zo'n 4 uur weer af tot circa -250 mV. Er bestaan dus drie verschillende NADH-niveaus die kenmerkend zijn voor oxidische, anoxische en anaërobie condities. De niveauverschillen bedragen 10 respectievelijk 20 BPA-eenheden. Opvallend is verder de NADH-piek die steeds optreedt bij overschakeling tussen de redoxniveaus. Dit kan erop wijzen dat de metabole omschakeling van de micro-organismen enige tijd vergt.

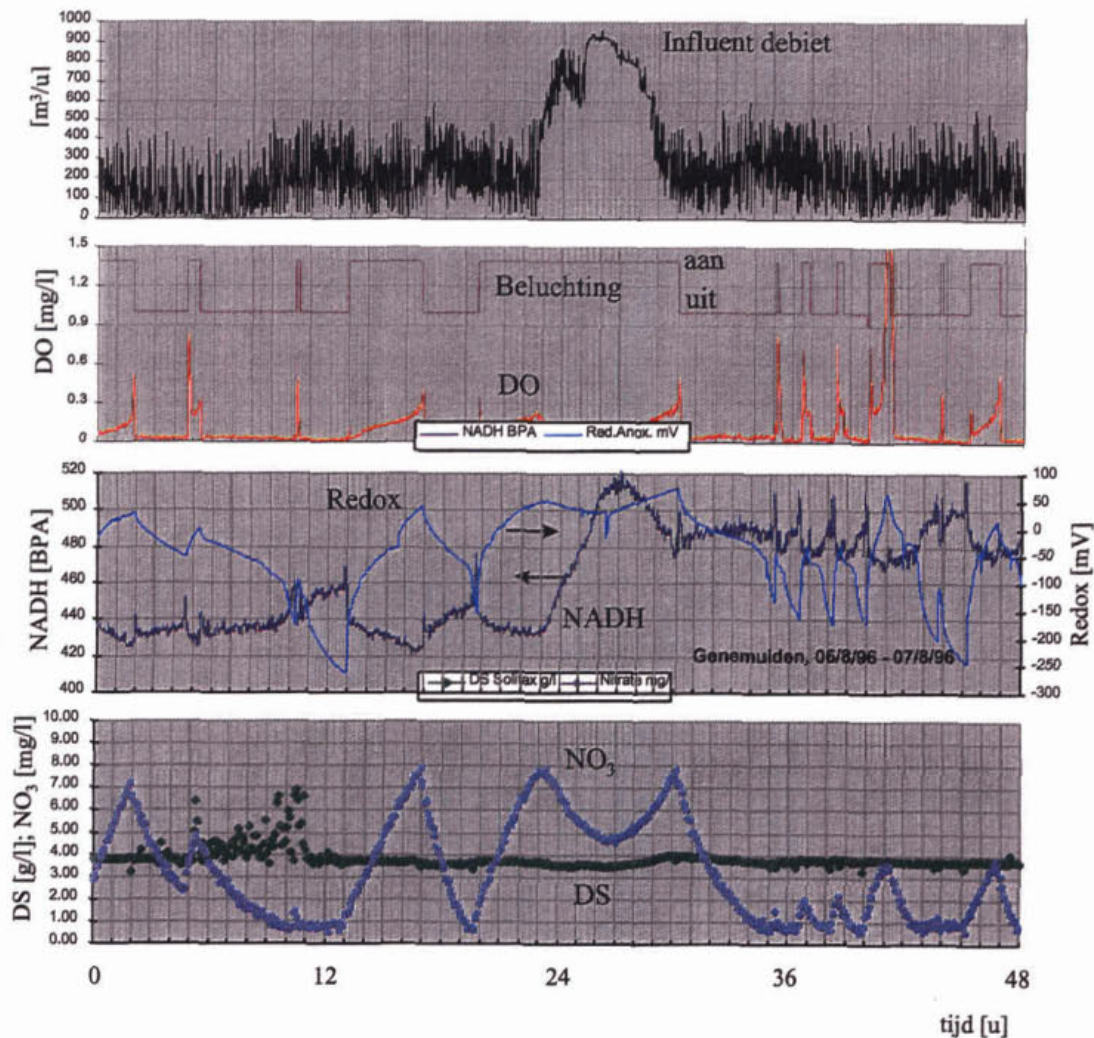
De belasting van de installatie volgt een duidelijk dag/nachtritme (zwarte curve). Tussen 28 en 30 uur (4:00-6:00 a.m.) is de belasting minimaal. Als in de ochtend de belasting weer toeneemt is er een zeer geringe toename van NADH waar te nemen (enkele eenheden).



Figuur 26 : rwzi Genemuiden, dag-nachtritme

In de nacht van 22 juli (figuur 26, omstreeks 30 uur) is er sprake van een zeer minimale aanvoer en is de trend in het NADH-sigitaal beter waarneembaar (10-15 eenheden).

In de nacht van 6 op 8 augustus vindt er een sterke debietsverhoging plaats (figuur 27, 20 uur). Het redoxniveau reageert hier zwak op, maar NADH stijgt van 430 naar bijna 520 BPA eenheden en blijft dan geruime tijd op een verhoogd niveau tussen 470 en 505 BPA (er is gemeten tot 9 augustus, toen het NADH-sigitaal slechts licht was gedaald 460-500 BPA).



Figuur 27 : rwzi Genemuiden, debietsverhoging

Op basis van de resultaten van de laboratoriumexperimenten is het aannemelijk dat ingroei van biomassa door de verhoogde belasting een rol speelt. Het voor lange tijd verhoogde NADH-niveau is hiermee consistent. De piek na ongeveer 5 uur en de volgende daling met ± 40 eenheden kan ook met de biomassaconcentratie te maken hebben: als er sprake is geweest van een verhoogd spuislibdebiet om het drogestofgehalte constant te houden (groene lijn onderste grafiek), kan de daling inderdaad het gevolg zijn van een verlaagde biomassaconcentratie (bacteriën zijn per saldo vervangen door langzaam afbreekbaar organisch materiaal). Het is echter ook mogelijk dat de lichtverstrooiingseigenschappen zich wijzigen bij verhoogde aanvoer (verlaging van de troebelheid geeft een hoger NADH-sigitaal bij gelijkblijvende biomassaconcentratie).

Na ongeveer 1 maand is de NADH-sensor uit het bassin gehaald en geïnspecteerd. Het venster was schoon. Na reiniging met alcohol was er geen significant signaalverschil waarneembaar.

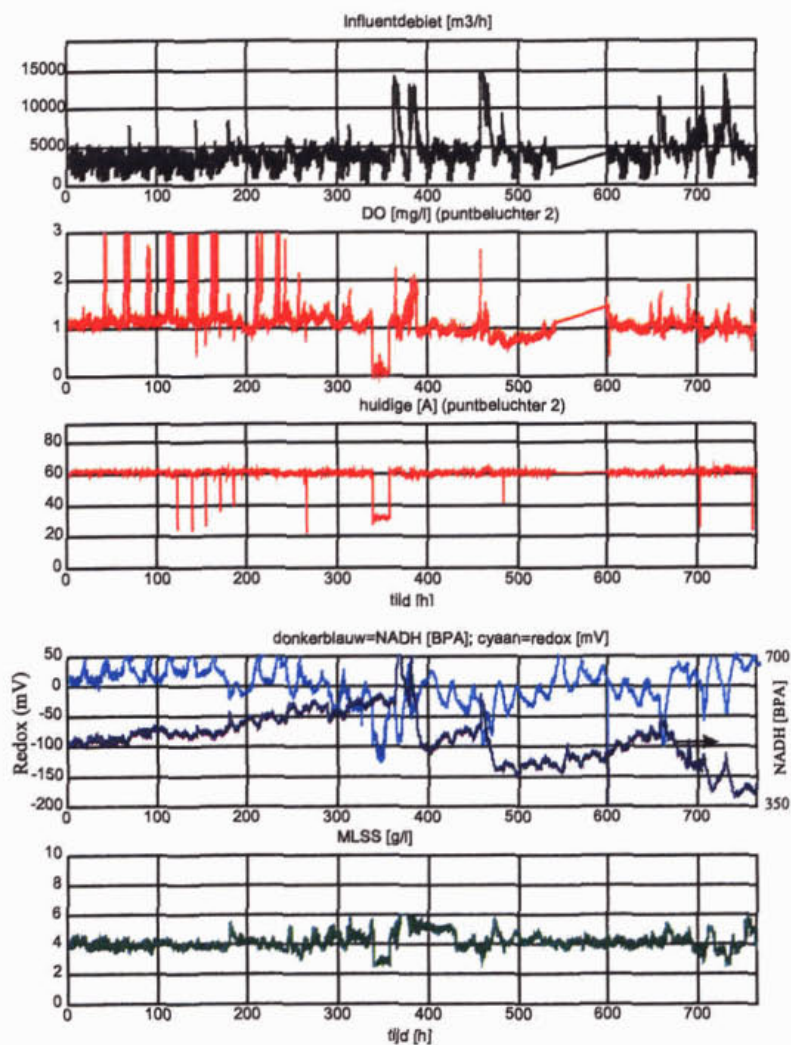
De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- 1) de reactie op oxische/anoxische/anaërobe omstandigheden (redoxcondities) is vergelijkbaar met die gemeten in het laboratorium;
- 2) het NADH-sigitaal en het redox-sigitaal hebben voor wat betreft de redoxcondities dezelfde informatie-inhoud. De sigitaal/ruis verhouding van het redox-sigitaal is beter;

- 3) lange-termijneffecten - toe/afname van biomassa-activiteit - geven veel grotere NADH-signaalvariëaties (langzaam) dan de wisselende redoxcondities (snel);
- 4) belastingsvariëaties zijn wel met de NADH-sensor en niet met de redoxmeter waarneembaar. Met de kennis van de laboratoriumexperimenten moet worden geconcludeerd dat niet de momentane belastingsvariëatie als zodanig, maar het vertraagde effect van zich aanpassende biomassa-activiteit wordt waargenomen;
- 5) de sensor is robuust, eenvoudig te installeren en zo goed als onderhoudsvrij.

4.3.4 Rwzi Dokhaven

In de B-trap van Dokhaven is over een veel langere periode gemeten. De B-trap bestaat uit vier rechthoekige beluchtingstanks met elk vier puntbeluchters (zie bijlage 2). De NADH-sensor was in één tank gemonteerd nabij puntbeluchter 2. In figuur 28 (signalen tussen eind mei-eind juni 1997) geeft de zwarte curve het influentdebiet aan, de bovenste rode curve de zuurstofconcentratie en de tweede rode curve de opgenomen stroom van puntbeluchter 2. De lichtblauwe lijn is het redoxsignaal, de donkerblauwe lijn het NADH-signaal, en de groene curve het drogestofgehalte. Al deze sensoren waren gemonteerd naast puntbeluchter 2.

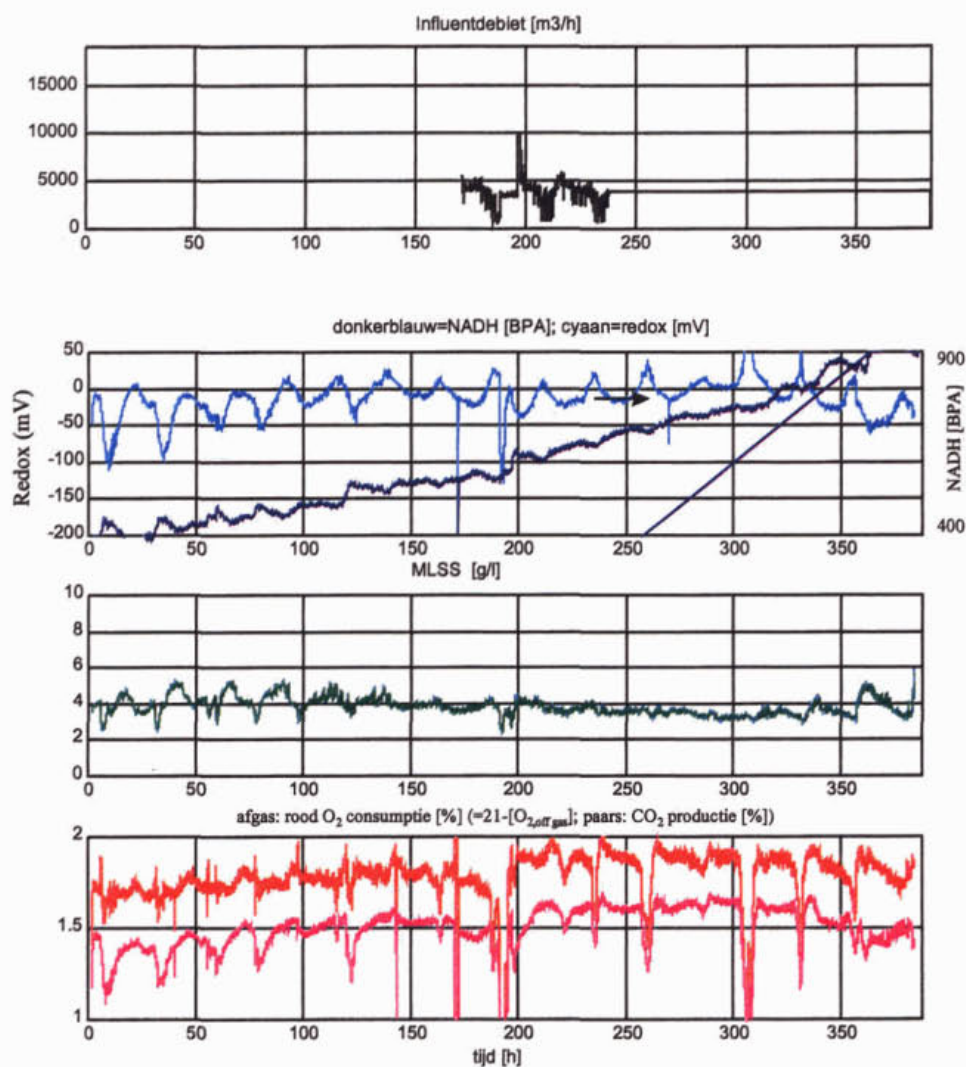


Figuur 28 : Meetsignalen van de rwzi Dokhaven (23/5/97 - 24/6/97)

Opvallend verschil met de omstandigheden in Genemuiden is dat de zuurstofconcentratie nabij de NADH-electrode voortdurend rond 1 mg/l ligt. Het redoxniveau is hier dan ook veel hoger

(bij DWA, typisch 0-40 mV). In de bovenste grafiek is een zestal regenbuien herkenbaar. Ook in Dokhaven blijkt het NADH-sigitaal hier sterk op te reageren (donkerblauwe curve). Tijdens verhoogde aanvoer kan NADH meer dan 100 eenheden scherp stijgen, om daarna te eindigen op een (in tegenstelling tot in Genemuiden) beduidend *lager* niveau dan voor de regenbui. Bij regenweeraanvoer is in Dokhaven bekend dat de tussenbezinktanks een verhoogd drogestofgehalte doorlaten. Dit is ook waarneembaar in de drogestofcurve rond 400 uur (groene curve).

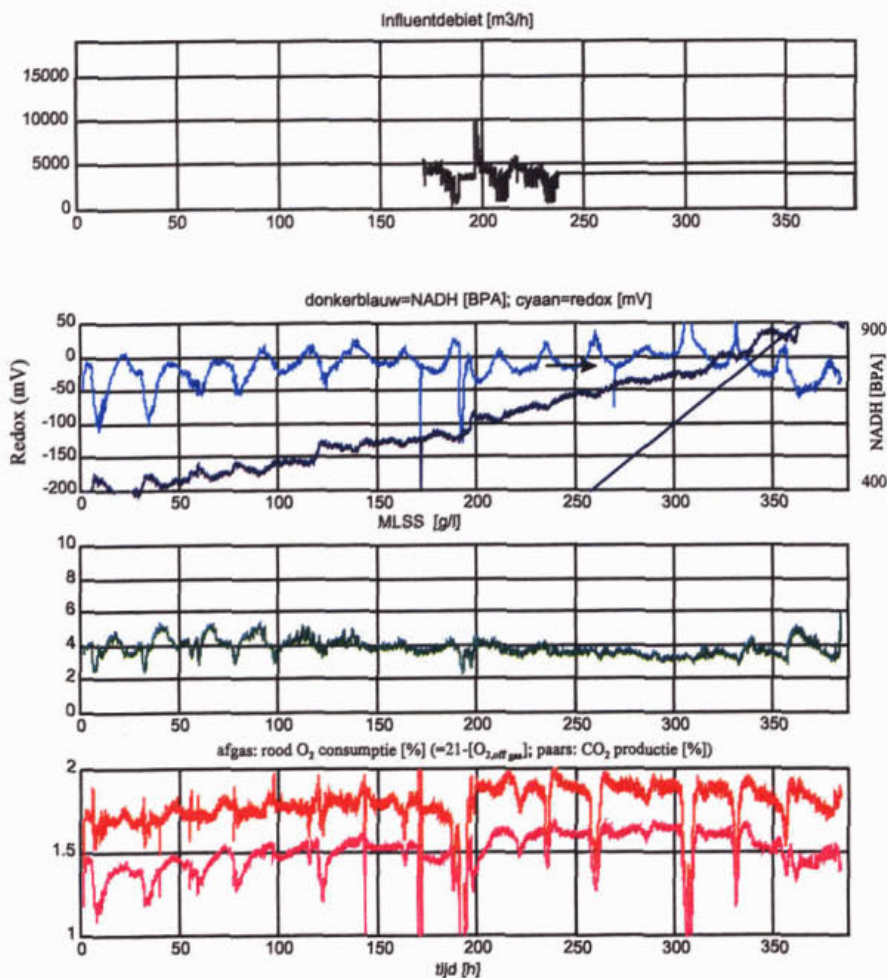
Als het drogestofgehalte later wordt teruggeregeld met het spuislibdebiet naar het oorspronkelijke niveau moet het aandeel van de actieve biomassa in het slib (en dus het totale NADH-gehalte van het slib) gedaald zijn.



Figuur 29 : Meetsignalen van de rwzi Dokhaven, lange DWA periode (1/7/97 - 17/7/97)

Na een regenbui neemt over een periode van dagen tot weken het NADH-niveau weer toe, wat wordt verklaard met de ingroei van bacteriën. In de eerste twee weken van juli '97 is een zeer uitgesproken toename van het NADH-sigitaal geconstateerd (figuur 29). De monitoring heeft weliswaar niet over de gehele periode gefunctioneerd, maar uit bedrijfsgegevens is gebleken dat het de laatste dagen van juni en de eerste dagen van juli geregeld heeft. Daarna is een aangesloten DWA-periode opgetreden. Behalve een toename van het NADH-sigitaal is ook een toename van de biomassa-activiteit waar te nemen. De rode en donkerrode curve geven de

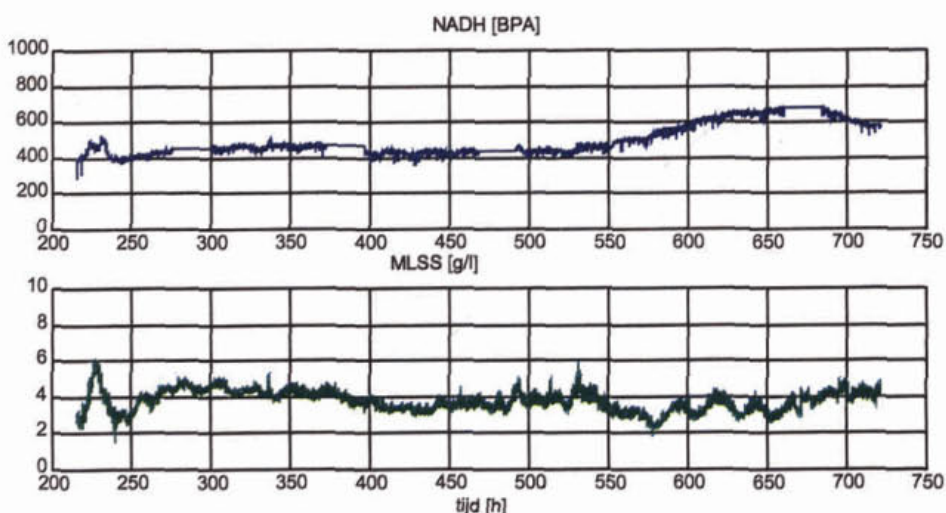
afname van de O_2 -concentratie en de CO_2 -concentratie in het afgas [%] weer. De afgasgegevens wijzen op een toename van de biomassa-activiteit met zo'n 15-20%, terwijl het NADH-signaal meer dan verdubbelt. Een mogelijke verklaring is dat een verhoogde concentratie aan heterotrofe biomassa leidt tot een lagere "bacterieproductie", doordat de groeisnelheid per bacterie lager is en er dan relatief veel substraat nodig is voor onderhoud van cellen (maintenance). Dit is dus analoog aan het bekende effect van een hogere slibleeftijd: meer zuurstofopname, minder slibproductie.



Figuur 30 : Meetsignalen van de rwzi Dokhaven: uitschakeling puntbeluchters en RWA (5/6/97; 330 = 6:00 a.m.)

In figuur 30 is het effect van regenaanvoer zichtbaar (na 190 uur). Het NADH-signaal reageert zeer duidelijk op de veranderde aanvoer, het redoxsignaal nauwelijks. Ook toont deze figuur een moment waarop de puntbeluchters uitgeschakeld werden (3^e grafiek van boven. Alle vier puntbeluchters en de lokale zuurstofconcentraties -grafiek 2- zijn nu aangegeven). Wat opvalt aan de NADH-stijging gedurende de anoxische periode is dat er sprake is van een geleidelijke toename, terwijl in Genemuiden er een onmiddellijke sprong optrad bij overschakeling van oxisch naar anoxisch. In Genemuiden is het slib meer geadapteerd aan anoxisch/oxische variaties. Als er in de B-trap slib adaptatie zou moeten ondergaan, lag het meer voor de hand dat het NADH-signaal eerst een forse stijging zou vertonen en daarna een daling. De vorm van de responscurve kan daarom niet goed verklaard worden. Duidelijk is verder dat het momentane wegvallen van de nitrificatie niet tot een directe NADH-respons leidt.

Een andere opvallende waarneming was dat begin januari 1997 het NADH-signaal een zeer uitgesproken piek vertoonde (400-650 BPA) over een periode van tien dagen, zie figuur 31. Uit effluent- fosfaatcijfers blijkt dat ijzerdosering in de A-trap begin januari weer is aangezet. Deze piek, die niet zichtbaar was in de overige signalen, kan met die dosering en de invloed die dat heeft op slibsamenvorming, c.q. slibbelasting van de B-trap samenhangen, al is onduidelijk wat het precieze mechanisme is en waarom de verhoging van voorbijgaande aard is.



Figuur 31 : invloed van ijzerfosfaatdosering in de A-trap op het NADH-signaal in de B-trap (540 uur correspondeert met 1 jan. 1997)

Uit bedrijfsgegevens volgt dat de temperatuur in de meetperiode van december tot juli is opgelopen van 12 tot 21 °C (bijlage 2). Wat de invloed daarvan op de NADH-meting is, is niet bekend.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken op basis van het praktijkonderzoek:

- 1) het NADH-signaal geeft unieke informatie over de toestand van het systeem. Met name de sterke stijging bij een lange DWA periode is interessant. Het wijst vermoedelijk op de ingroei van actieve (heterotrofe) biomassa en daarmee op een efficiëntere CZV-verwijdering, wat overeenstemt met de afgasanalyses;
- 2) regenweeraanvoer heeft bij de rwzi Dokhaven een ander effect op het NADH-signaal dan bij de rwzi Genemuiden. Initieel stijgt in beide gevallen het signaal: bij Dokhaven treedt daarna een grote daling op, bij Genemuiden een stijging. Hoogstwaarschijnlijk leiden verschillen in het procesontwerp bij Dokhaven tot een afname van de hoeveelheid actieve biomassa (wegpompen van het mengsel van B-trap slib en doorgespoeld A-trap slib met relatief weinig biomassa) en bij Genemuiden tot een stijging ("binnenhouden" van de vergrote vuillast aan het begin van een regenbui, gevolgd door heterotrofe groei);
- 3) chemicaliëndosering heeft een belangrijke, maar nog onbegrepen invloed op het signaal.

5 EVALUATIE EN TOEKOMSTPERSPECTIEF

De toepassingsmogelijkheden van de NADH-sensor zijn verkend door enerzijds praktijkinformatie te beoordelen en anderzijds aanvullende laboratoriumexperimenten uit te voeren. Als mogelijke toepassingen is in eerste instantie gedacht aan implementatie in beluchttingsregelingen en retourslibregelingen.

Op basis van de praktijkinformatie wordt geconcludeerd dat de NADH-sensor op verschillende rwzi's wordt toegepast, maar dat de door de leverancier geclaimde voordelen als energiebesparing, capaciteitsvergroting en slibbezinkbaarheidsverbetering niet kunnen worden gerelateerd aan toepassing van de sensor.

Bij de interpretatie van de praktijkinformatie is een aantal vragen gerezen, waarop met behulp van aanvullend laboratoriumonderzoek gepoogd is een antwoord te geven. Het betreft hier de invloed op het NADH-signaal van de slibconcentratie, de slibgrootteverdeling, de slibbelasting, autotrofe en heterotrofe activiteit en de pH.

Uit de laboratoriumexperimenten kan worden geconcludeerd dat het NADH-signaal onder praktijkomstandigheden ongevoelig is voor de slibconcentratie en de slibgrootteverdeling. Met name het eerste maakt het signaal minder toepasbaar.

Het NADH-signaal is wel een maat voor de heterotrofe slibactiviteit. Nitrificatie wordt niet waargenomen. De directe slibbelasting wordt zodoende niet waargenomen. Het NADH-signaal reageert voor de heterotrofe activiteit pas bij zeer lage zuurstofconcentraties.

In de praktijk zal de pH nauwelijks het NADH-signaal beïnvloeden.

Bovenstaande resultaten leiden tot de constatering dat een beluchterregeling op basis van een NADH-signaal niet aan te bevelen is. Noch de belasting, noch de nitrificatie wordt gemeten, slechts de heterotrofe activiteit.

Een mogelijke toepassing kan het regelen van de hoeveelheid heterotrofe biomassa in de selector zijn door sturing van het retourslibdebiet naar de selector. Hiermee kan wellicht een continue goede vlokbelading worden verkregen, waardoor de slibbezinkbaarheid toeneemt. Het onderhavige rapport gaat echter niet in op de wijze waarop dit uitgevoerd kan worden en hoe hiertoe de NADH-signalen moeten worden geïnterpreteerd.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Op basis van de evaluatie van buitenlandse en Nederlandse ervaringen kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

- er is een robuuste sensor op de markt, die NADH meet; deze sensor vergt nagenoeg geen onderhoud;
- deze sensor wordt reeds in de praktijk toegepast bij laagbelaste installaties (slibbelasting lager dan 0,6 kg BZV/kg ds.d) en verschaft dan primaire informatie voor het bedrijven van een installatie, zoals beluchterregelingen;
- de door de leverancier geclaimde voordelen voor capaciteitsverhoging, energiebesparing en verbetering van de SVI kunnen niet worden gerelateerd aan het toepassen van de NADH-sensor;
- het NADH-signaal is een maat voor de concentratie aan heterotrofe actieve biomassa;
- in aanwezigheid van enkele biomassa (gist) is het NADH-signaal evenredig met de biomassaconcentratie. Het signaal vlakt af bij stijgende biomassaconcentratie, maar blijft evenredig met de hoeveelheid actieve biomassa daarin;
- het is waarschijnlijk dat lichtverstrooiing/absorptie een rol speelt bij de signaalhoogte. Influentamenstelling en chemicaliëndosering zouden daarom van invloed kunnen zijn op de signaalhoogte. Dit is niet verder onderzocht;
- het NADH-signaal is onder praktijkcondities nauwelijks gevoelig voor variaties in de slibconcentratie en evenmin voor pH-schommelingen;
- variatie van electronacceptorbeschikbaarheid (zuurstof/nitraat) leidt tot herkenbare signaalveranderingen, die echter klein zijn ten opzichte van de lange-termijneffecten door groei/afsterving. Deze veranderingen treden pas op als zuurstof, respectievelijk nitraat volledig zijn verbruikt;
- het NADH-signaal is niet een directe maat voor de slibbelasting. Indirect wordt dit echter wel waargenomen door de groei van heterotrofe biomassa;
- een NADH-sensor neemt geen nitrificatie waar;
- laagbelaste en hoogbelaste installaties reageren verschillend op RWA-belasting in termen van de slibmenstelling.

6.2 Aanbevelingen

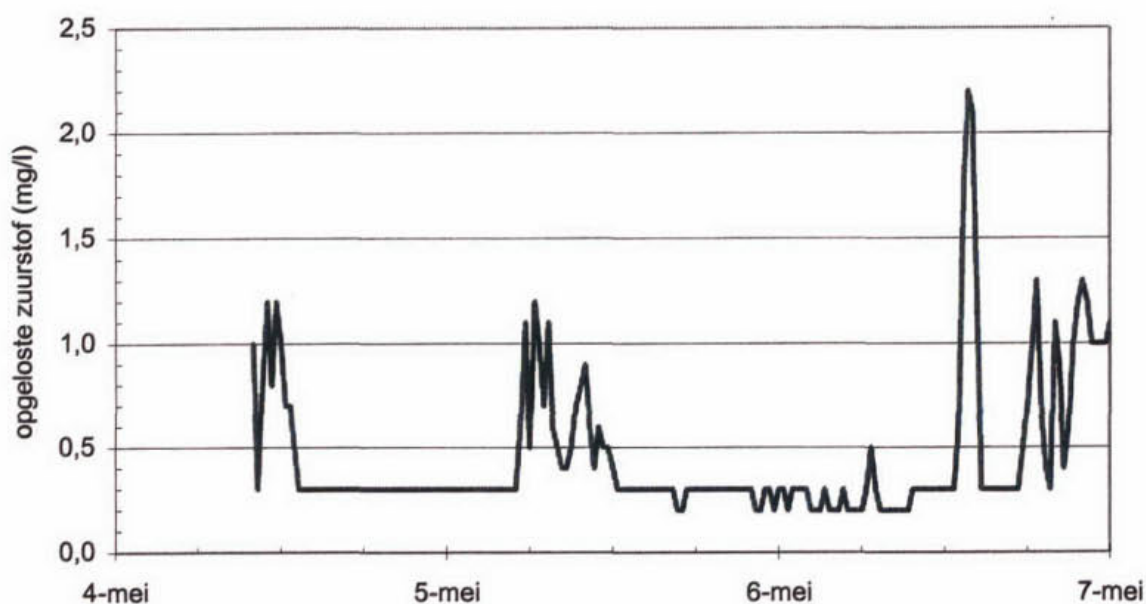
Op grond van het uitgevoerde onderzoek kan worden gesteld, dat hoewel het NADH-signaal informatie oplevert over de biomassa zelf, geen uitgesproken toepassing als meetinstrument in de afvalwaterzuivering kan worden vastgesteld.

Het verschaffen van informatie over de biomassa zelf houdt in dat mogelijke toepassingen kunnen zijn:

- het vaststellen van de hoeveelheid heterotrofe biomassa ten behoeve van modelkalibratie van dynamische simulatiemodellen;
- het regelen van de hoeveelheid heterotrofe biomassa in de selector door sturing van het retourslibdebiet naar de selector. Hiermee kan wellicht een continue goede vlokbelading worden verkregen, waardoor de slibbezinkbaarheid toeneemt.

Bijlage 1 : Beschrijving van het onderzoek op de rwzi Essen, België

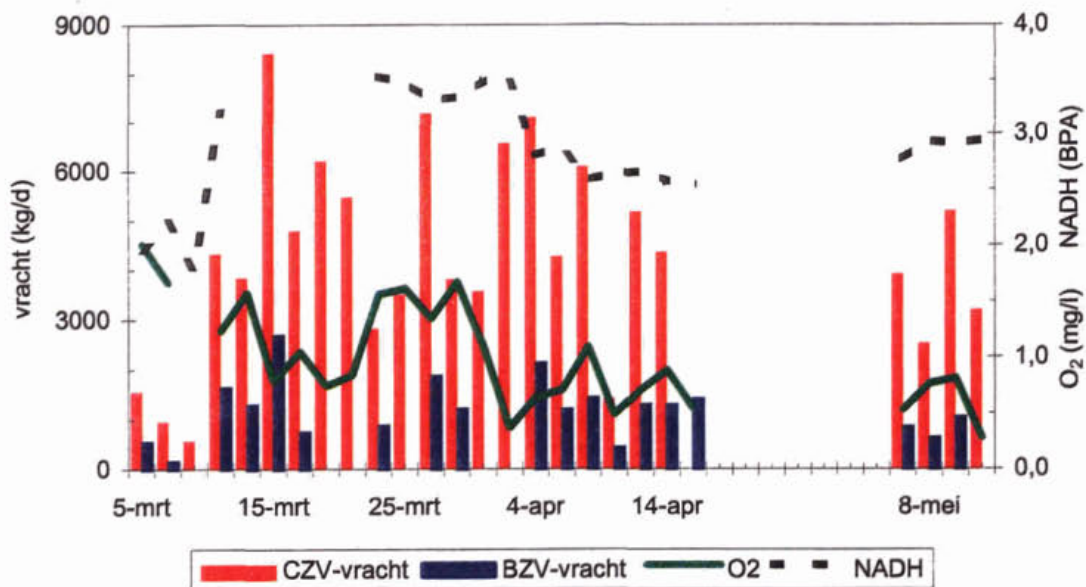
De rwzi Essen heeft negen borstelbeluchters en twee sneldraaiende puntbeluchters (zie figuur 13). De puntbeluchters en de drie borstelbeluchters aan de buitenrand van de oxidatiesloot draaiden continu. De overige borstelbeluchters werden gestuurd in twee groepen van drie, afhankelijk van het zuurstofgehalte. Elke groep heeft een ondergrens (het zuurstofgehalte waarbij ze aanslaan) en een bovengrens (het zuurstofgehalte waarbij ze uitvallen). Die grenzen werden tijdens de testperiode geleidelijk aan verlaagd. Op het einde bedroeg de ondergrens voor de twee gestuurde groepen respectievelijk 0,4 en 0,2 mg O₂/l. De bovengrenzen waren 1,2 en 0,8 mg O₂/l. Met die instelwaarden klimt het zuurstofgehalte af en toe toch nog boven 1 mg/l. Dit is nodig om te vermijden dat het slib bezinkt in het beluchtingsbekken. Een verloop van het zuurstofgehalte is te zien in figuur 32.



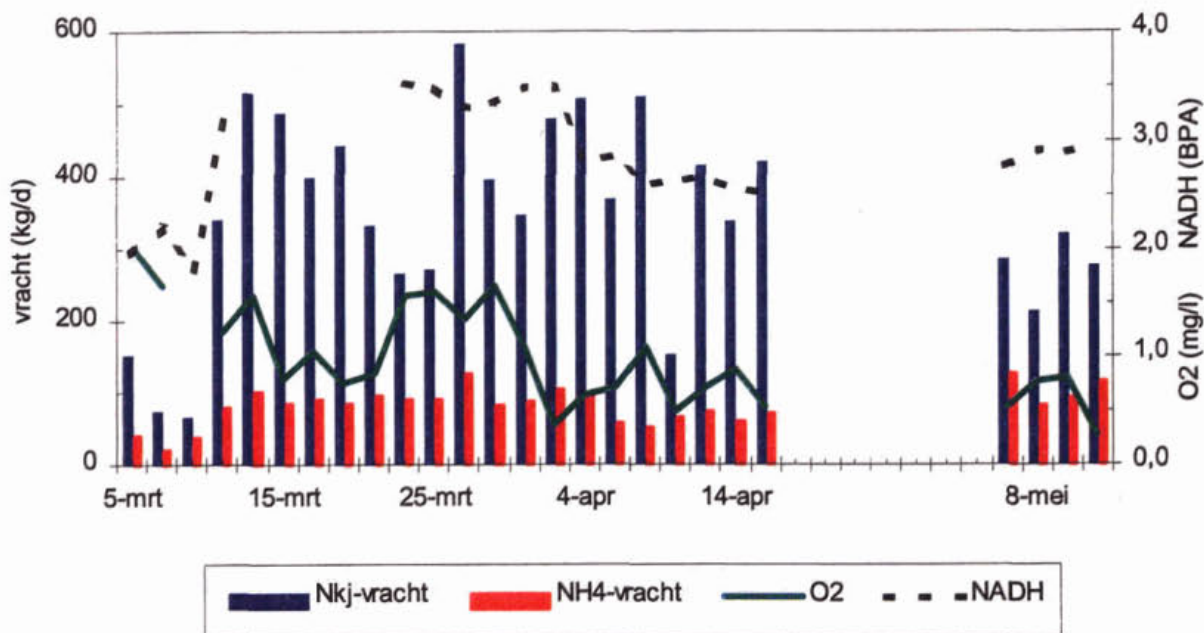
Figuur 32 : Verloop van het zuurstofgehalte in de aëratietank van de rwzi Essen

Verband tussen NADH-signaal en de samenstelling van het influent

Tussen 5 maart en 12 mei 1998 werd het gehalte aan opgeloste zuurstof in het beluchtingsbekken geleidelijk aan verlaagd van 2 mg O₂/l naar 0,5 mg O₂/l. De CZV- en BZV-belasting tijdens die periode staan afgebeeld in figuur 33 samen met het zuurstofgehalte en het NADH-signaal. De stikstofbelasting staat afgebeeld in figuur 34.



Figuur 33 : Daggemiddelde CZV-, BZV-vracht, zuurstof- en NADH-gehalte

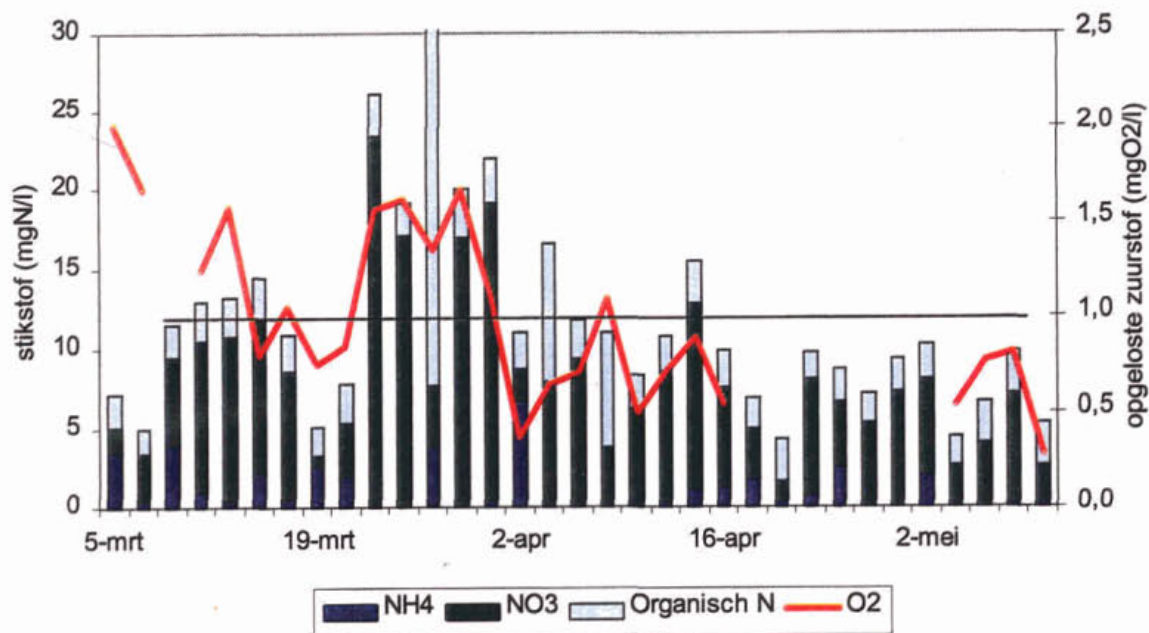


Figuur 34 : Daggemiddelde stikstofvracht, zuurstof- en NADH-concentratie

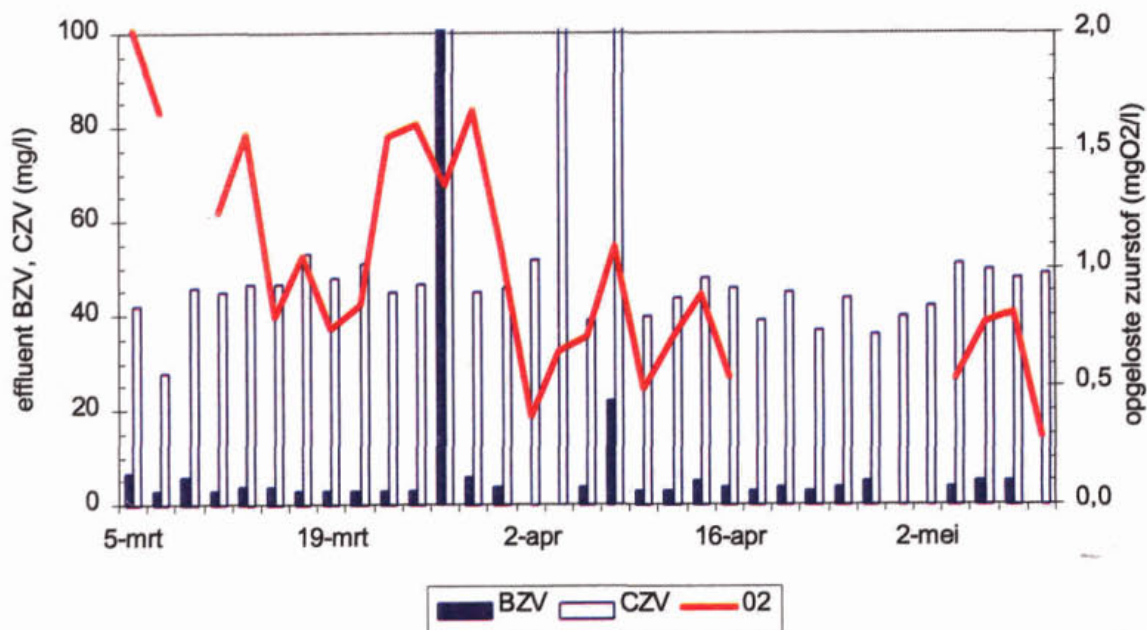
Uit figuur 33 en 34 blijkt, dat er geen lichte correlatie bestaat tussen het NADH-signaal en de vracht. De relatie tussen het NADH signaal en de influentconcentraties is analoog.

Effect van een verlaagd zuurstofgehalte op de effluentkwaliteit

Gedurende de testperiode werd de instelwaarde voor het zuurstofgehalte geleidelijk verlaagd tot 0,5 mg O₂/l. Uit figuur 35 blijkt dat het totale stikstofgehalte in het effluent daalt met dalende zuurstofconcentraties. In Essen is op die manier een totaalstikstofgehalte lager dan 10 mg/l haalbaar. De nitrificatie blijft nagenoeg volledig, ook bij zuurstofconcentraties lager dan 1 mg/l. Uit figuur 36 blijkt dat het effect op BZV en CZV neutraal is. De uitschieters eind maart en midden april zijn te wijten aan slibuitspoeling.



Figuur 35 : Zuurstofgehalten in de aëratietank en effluentstikstofgehalten

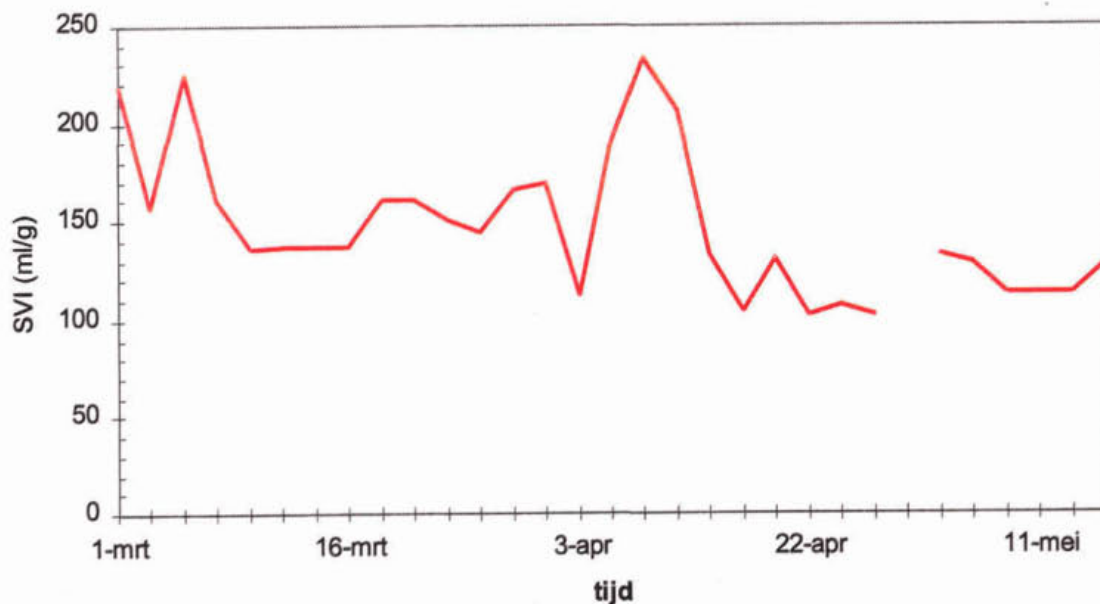


Figuur 36 : Zuurstofgehalten in de aëratietank en CZV en BZV in het effluent

De zuurstofregeling is gebaseerd op een meting van het zuurstofgehalte op één punt in de oxydatiesloot (figuur 13). Het zuurstofgehalte varieert van plaats tot plaats. Feit is wel dat regeling van het zuurstofgehalte op één plaats voldoende is om het totaal stikstofgehalte in het effluent onder controle te krijgen.

Effect van het verlaagd zuurstofgehalte op de SVI

De slibvolume-index (SVI) werd tijdens de testperiode gevolgd. De resultaten zijn te zien in figuur 37. Daaruit blijkt dat de slibbezinking niet nadelig beïnvloed lijkt te worden door een laag zuurstofgehalte. De onderzoeksperiode is echter te kort geweest om hierover harde uitspraken te doen.



Figuur 37 : SVI

Bijlage 2 : Kentallen van de rwzi's Genemuiden en Dokhaven

Tabel 3 : Jaargemiddelde kentallen van de rwzi's Genemuiden en Dokhaven

	rwzi Genemuiden (1995)	B-trap rwzi Dokhaven (1996)	eenheden
ontwerpcapaciteit	30.000	470.000	[i.e.]
volumen			[m ³]
oxisch bassin	3.750	12.000	
anoxisch bassin	3.750		
influentdebiet	280	4.700	[m ³ /h]
vloeistofverblijftijd	26	2,6	[h]
slibleeftijd	27	13	[d]
slibconcentratie (MLSS)	4	3	[kg/m ³]
slibbelasting			[kg/kg slib/d]
CZV	0,114	0,40	
BZV	0,036	0,13	
NKj	0,01	0,1	
Influentconcentraties			[mg/l]
CZV	457	129	
BZV	149	41	
N-Kj	45	32	
Effluentconcentraties			[mg/l]
CZV	42	51	
BZV	3,0	8	
N-Kj	2,0	8,2	
NO ₃ ⁻ -N	4,1	21	
globale volumetrische omzettingssnelheden			[kg/m ³ /h]
CZV	0,0155	0,0345	
Zuurstof voor N-Kj	0,0015*4,57=0,007	0,0128*4,57=0,059	

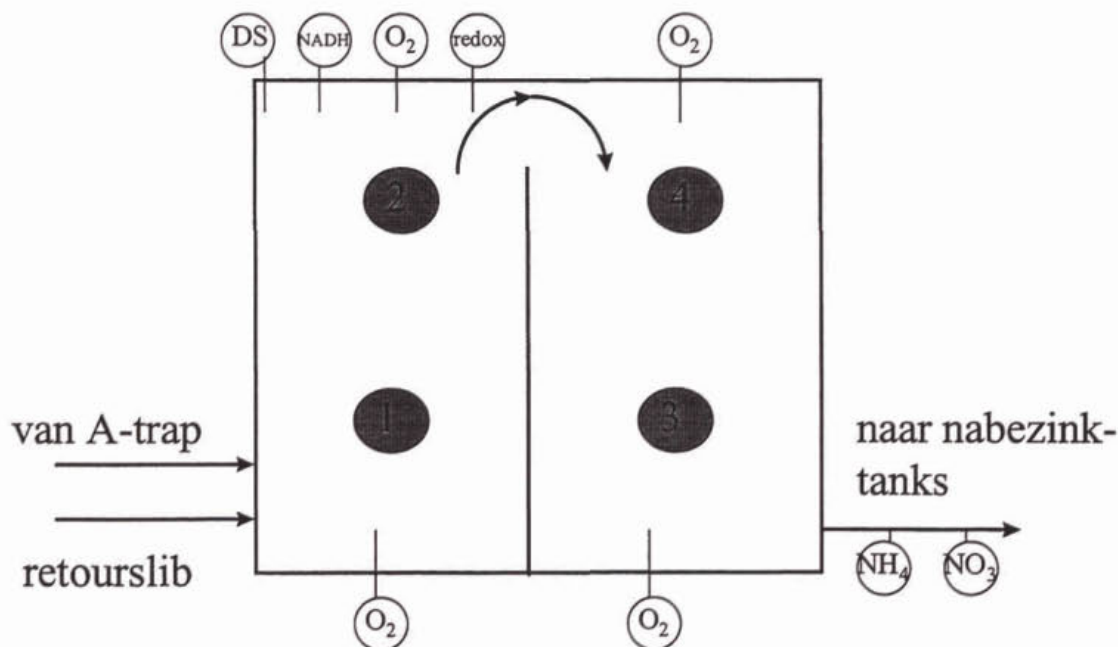
Metingen aan de rwzi Genemuiden

De NADH-sensor is tezamen met de redoxelectrode gemonteerd dicht bij het punt waar toevoer vanuit de oxische tank plaatsvindt. Nitraat (Dr. Lange Nitrox), drogestof (Dr. Lange Solitax, UV) en zuurstof werden ± 20 meter stroomafwaarts (1 minuut transporttijd) van dit punt gemeten. Verder werden geregistreerd: het aanvoerdebiet van de installatie, het recirculatiedebiet van de oxische tank naar de anoxische tank, het afvoerdebiet vanuit de anoxische tank naar de anaërobe tank en de schakelmomenten van de beluchters.

Metingen aan de B-trap van rwzi Dokhaven

De B-trap bestaat uit vier parallelle straten (bassins: 29,6*29,6*4 m) die ieder zijn uitgerust met vier puntbeluchters (zie figuur 38). De NADH-sensor was gemonteerd nabij de tweede puntbeluchter, tezamen met een DS-sensor (Dr. Lange PS1, infrarood lichtverstrooiing), een zuurstofsensoren (Danfoss EMCO 1) en een redoxmeter (Mycrom CPM 151R). Naast de overige drie puntbeluchters waren ook zuurstofsensoren aanwezig. Onder normale bedrijfscondities worden de laatste twee puntbeluchters in vermogen teruggeregeld bij toenemende belasting. De zuurstofconcentratie in de buurt van de eerste twee puntbeluchters ligt rond 1 mg/l. Bij de laatste twee varieert deze tussen 1 en 3 mg/l (DWA nachturen). Doordat het gebrek aan denitrificatie is het nitraatgehalte hoog, meestal tussen 10 en 30 mg/l. Bij eerder onderzoek is

vastgesteld dat het influent van de B-trap onder DWA een vrij constante samenstelling heeft, zodat de belasting evenredig met het debiet varieert.



Figuur 38 : Schema van de B-trap proefstraat van de rwzi Dokhaven, met de sensorlocaties in de waterlijn

Over de overdekte B-trap wordt lucht geblazen. In de in- en uitgaande lucht zijn de zuurstof- en kooldioxideconcentraties gemeten met een Servomex 1100 (paramagnetisch) respectievelijk een Beckman Industrial Model 870 (infrarood). De meters werden maandelijks geijkt en continu gecorrigeerd voor drukvariaties in de leidingen die ook geregistreerd werd.

Nitraat en ammonium worden bedrijfsmatig voor ieder van de straten geregistreerd in het effluent van de aërietanks met een Amtax respectievelijk een Nitrox van Dr. Lange. Gedurende delen van de proefperiode is de meetapparatuur alleen op de proefstraat aangesloten geweest voor continue registratie.

Ook werden het influentdebiet van de installatie en de vermogenstoevoer naar de beluchters geregistreerd. Maandgemiddelde temperaturen waren:

Tabel 4 : Maandgemiddelde temperaturen rwzi Dokhaven

maand	temperatuur (°C)
dec. '96	12,5
jan. '97	11,5
feb. '97	11,8
mrt. '97	13,8
apr. '97	15,5
mei '97	17,5
juni '97	20
juli '97	21,5

