

1985-11_denitrificatie

stora

Denitrificatie



postbus 414, 2280 AK rijswijk

 070 - 99.11.33

stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

Denitrificatie

STOWA

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 8090
3503 RB Utrecht
tel. 030-321199
fax 030-321766

Publikaties en het publikatieoverzicht
kunt u uitsluitend bestellen bij:

Hageman Verpakkers BV
Postbus 281

2700 AC Zoetermeer

tel. 079-611188

fax 079-613927

o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.

	INHOUD	I	-	III
	Ten geleide			V
1	SAMENVATTING	1	-	5
2	INLEIDING			6
3	BESCHRIJVING DENITRIFICATIEPROCES (LITERATUUR- OVERZICHT)	7	-	20
3.1	Algemeen	7	-	8
3.2	Biologische stikstofverwijdering	8	-	12
3.2.1	nitrificatie	8	-	9
3.2.2	denitrificatie			9
3.2.3	effecten van denitrificatie op het actief-slibproces	9	-	10
3.2.4	nitrificatie- en denitrificatiesnelheden	10	-	12
3.3	Toepasbare processen voor biologische stikstofver- wijdering	12	-	15
3.4	Praktijkvoorbeelden	15	-	17
3.5	Denitrificatie in combinatie met defosfateren	17	-	18
3.5.1	chemische defosfatering			18
3.5.2	biologische defosfatering			18
3.6	Berekeningsmethoden voor dimensionering denitrifi- catieruimten	18	-	20
4	DENITRIFICATIE OP DE NEDERLANDSE RIOOLWATERZUIVE- RINGSINRICHTINGEN	21	-	31
4.1	Typen rwzi's in gebruik in Nederland	21	-	22
4.2	rwzi's met denitrificatieruimte	22	-	24
4.3	rwzi's zonder denitrificatieruimte	24	-	26
4.4	Nadere evaluatie praktijkresultaten	26	-	28
4.5	In de praktijk beproefde aanpassingen	29	-	30
5	MOGELIJKHEDEN TER VERBETERING VAN DENITRIFICATIE OP NEDERLANDSE RWZI'S	31	-	34
6	UITWERKING AANPASSINGSMOGELIJKHEDEN	35	-	68
6.1	Uitgangspunten	35	-	37
6.1.1	samenstelling afvalwater			35
6.1.2	nitrificatie	35	-	36
6.1.3	temperatuur	36	-	37
6.1.4	kosten			37

6.2	Circuit: optimalisatie van de zuurstoftoevoer	38	-	43
6.2.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	38	-	39
6.2.2	uitwerking van een voorbeeld	39	-	40
6.2.3	kosten	40	-	42
6.2.4	conclusies	42	-	43
6.3	Circuit met denitrificatieruimte: vergroten van de recirculatie	43	-	48
6.3.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	43	-	44
6.3.2	uitwerking van een voorbeeld	44	-	45
6.3.3	kosten	45	-	46
6.3.4	conclusies			47
6.4	Propstroomsystemen: optimalisatie van de zuurstof-toevoer	47	-	51
6.4.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	47	-	49
6.4.2	uitwerking van een voorbeeld	49	-	50
6.4.3	kosten			51
6.4.4	conclusies			51
6.5	Volledig gemengd systeem: alternerend beluchten	51	-	55
6.5.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	51	-	52
6.5.2	uitwerking van een voorbeeld	52	-	54
6.5.3	kosten	54	-	55
6.5.4	conclusies			55
6.6	Volledig gemengd systeem: compartimentering met anoxische zone	55	-	58
6.6.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	55	-	56
6.6.2	uitwerking van een voorbeeld	56	-	57
6.6.3	kosten	57	-	58
6.6.4	conclusies			58
6.7	Extra denitrificatietank	58	-	62
6.7.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	58	-	59
6.7.2	uitwerking van een voorbeeld	59	-	61
6.7.3	kosten	61	-	62
6.7.4	conclusies			62
6.8	Actief-slibstelsysteem: ombouw van een voorbezinktank	62	-	66
6.8.1	maatregelen ter verbetering van de denitrificatie	62	-	63
6.8.2	uitwerking van een voorbeeld	63	-	65
6.8.3	kosten	65	-	66
6.8.4	conclusies			66
6.9	Evaluatie aanpassingsmogelijkheden	66	-	68

7	CONCLUSIES	69	-	71
8	AANBEVELINGEN			72
9	LITERATUURLIJST	73	-	76
BIJLAGE 1	: Biologische stikstofverwijdering	77	-	83
BIJLAGE 2	: Denitrificatie in combinatie met defosfateren	84	-	87
BIJLAGE 3	: Berekening denitrificatie	88	-	94

Ten geleide

In de lozingsvergunningen van circa veertig procent van de rioolwaterzuiveringsinrichtingen in ons land wordt nitrificatie van het gezuiverde afvalwater voorgeschreven.

Nitrificatie kost energie en verhoogt de kans op het optreden van licht slib; door na de nitrificatie te denitrificeren, kan energie worden teruggewonnen, wordt de kans op het voorkomen van licht slib beperkt en wordt het stikstofgehalte van het effluent verlaagd. Dit laatste kan van belang zijn in verband met de eutrofiëring van de Nederlandse oppervlaktewateren.

Dit rapport geeft een overzicht van de mogelijkheden voor toepassing van denitrificatie op bestaande- en nieuwe te bouwen zuiveringsinrichtingen; als leidraad voor beheer en ontwerp zijn de technische en economische aspecten voor zeven alternatieven doorgerekend.

Het onderzoek werd door het algemeen bestuur van de STORA op advies van de OAC* opgedragen aan Witteveen + Bos Raadgevend Ingenieursbureau dat namens de STORA begeleid werd door een commissie bestaande uit: ir. A.H. Dirkzwager (voorzitter), ir. R. den Engelse, ir. B.A. Heide en ir. K.F. de Korte.

Rijswijk, oktober 1985.

De directeur van de STORA

— drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

*De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit: prof. ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en ir. J. Boschloo, ir. R. den Engelse, prof. dr. P.G. Fohr, ir. R. Karper, drs. S.P. Klapwijk, dr. E.J.M. Kobus, ir. J.S. Kuyper, ir. Tj. Meijer, ir. H.M.J. Scheltinga, dr. ir. D.W. Scholte Ubing, drs. J. Verhaagen, drs. A.A. Wismeijer (leden).

SAMENVATTING

Een vergaande N-totaalverwijdering door middel van denitrificatie kan van belang zijn bij beperking van de hoeveelheid nutriënten in oppervlaktewater, verlaging van energieverbruik en tegengaan van op-drijvend slib in de nabezinktanks.

Dit onderzoek naar de mogelijkheden ter verbetering van de denitrificatie heeft zich vooral gericht op de mogelijke ombouw van bestaande rwzi's, werkend volgens het actief-slibproces waarin nitrificatie optreedt.

Uit een inventarisatie van de werking van de Nederlandse rwzi's (stand per 1-1-1983) blijkt, dat van de 460 aanwezige rwzi's (ontwerpcapaciteit 19 miljoen i.e.) op 43% daarvan (37% op i.e.-basis) een goede nitrificatie plaatsvindt (meer dan 80% N-Kj-verwijdering). Het betreft hier circuits, laagbelaste actief-slibinstallaties en een deel van de tweetrapsinstallaties. Bij volbelasting treedt goede nitrificatie op bij 36% van het totaal aantal rwzi's (27% op i.e.-basis).

Van de goed nitrificerende rwzi's treedt in ruim de helft van de gevallen ook een goede denitrificatie op, dat wil zeggen meer dan 70% N-totaalverwijdering. Wanneer deze rwzi's volbelast zijn, vindt in 65% daarvan (83% op i.e.-basis) een goede denitrificatie plaats. De belastingsgraad heeft een belangrijke invloed op de denitrificatie.

Viif rwzi's van het type circuit met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing bezitten een aparte denitrificatieruimte. Deze rwzi's hebben bij zelfde belastingsgraad een 20 à 25% hogere N-totaalverwijdering dan hetzelfde type zonder denitrificatieruimte.

Op enige rwzi's in Nederland zijn methoden ter verbetering van de denitrificatie onderzocht, zoals een betere regeling van de beluchting, altemnerend beluchten en verplaatsing van de toevoer van influent in circuits naar de anoxische zone. De ervaringen met de aanpassingen waren in het algemeen goed.

De rwzi's die in aanmerking komen voor verbetering van de denitrificatie zijn vooral oxydatiesloten met borstelbeluchting, laagbelaste actief-slibinstallaties en onderbelaste oxydatiesloten met puntbeluchting of bellenbeluchting. Het betreft hier ongeveer 80 rwzi's, waarvan 24 volbelast (3,2 respectievelijk 0,4 miljoen i.e.).

Voor een goede totaal-stikstofverwijdering door middel van denitrificatie is in eerste instantie een goede nitrificatie nodig. Aangezien de bacteriën die voor de nitrificatie nodig zijn een relatief lage groeisnelheid hebben, zal de slibleeftijd in het beluchtings-systeem voldoende hoog moeten zijn.

Hierdoor moet een lage slibbelasting worden aangehouden. Daarnaast spelen het zuurstofgehalte, de pH en de temperatuur een belangrijke rol. In het algemeen kan worden aangehouden dat in de winter nog nitrificatie optreedt bij een slibbelasting van ten hoogste 0,15 kg BZV/kg d.s.d en in de zomer bij ten hoogste 0,25 kg BZV/kg d.s.d bij een pH van circa 7 à 7,5.

Er treedt een beperkte verhoging van de kosten op. Bij een hogere slibbelasting is geen of slechts een beperkte ruimte voor denitrificatie beschikbaar om de nitrificatie niet te verstoren. De bereikbare N-totaalverwijdering neemt bij hogere slibbelasting dan ook snel af.

- alternerend beluchten bij volledig gemengde systemen;

In het uitgewerkte voorbeeld wordt 50% van de beluchtingstank gedurende 50% van de tijd niet belucht, waarbij een procesvoering volgens het zogenaamde Biodenitro-principe wordt toegepast. Uit de berekeningen blijkt, dat voor een vergaande denitrificatie gedurende een langere tijd niet belucht moet worden. Bij een slibbelasting van 0,10 kg BZV/kg d.s.d moet dit wel mogelijk worden geacht.

- compartimentering van de beluchtingstanks bij volledig gemengde systemen;

Wanneer meerdere beluchters in een beluchtingstank aanwezig zijn, is het mogelijk de tank in compartimenten te verdelen die in serie doorstroomd worden. Door het eerste compartiment niet te beluchten maar alleen te mengen ontstaat een anoxische zone bij voldoende recirculatie van nitraat vanuit de afloop van de beluchtingstank naar het begin ervan.

Bij een slibbelasting van 0,10 kg BZV/kg d.s.d en een anoxische zone van 25% is een gemiddelde N-totaalverwijdering over het gehele jaar van circa 60% te verkrijgen voor relatief beperkte extra kosten. Bij hogere slibbelastingen is zeker in de winter een verstoring van de nitrificatie niet uitgesloten.

- bouw van een extra denitrificatietank;

Bij slibbelastingen van 0,15 kg BZV/kg d.s.d is de simultane denitrificatie vanwege mogelijke verstoringen van de nitrificatie in de winter nauwelijks te verbeteren.

In die situatie, maar ook wanneer de constructie van de tank het creëren van anoxische zones onmogelijk maakt, is alleen door het bouwen van een extra denitrificatietank een verbetering van de denitrificatie te verkrijgen. Van belang hierbij is een voldoende recirculatie van nitraat en slib vanuit de afloop van de beluchtingstank naar de voor-denitrificatietank. Afhankelijk van de grootte van de denitrificatietank is een N-totaalverwijdering van circa 64 tot 75% te bereiken. De optimale grootte van de denitrificatietank is circa 35% van het totale volume van beluchtingstank en denitrificatietank.

De extra kosten zijn echter aanzienlijk vergeleken met de andere methoden.

- ombouw van de voorbezinktank tot denitrificatietank;

Als alternatief voor de bouw van een extra denitrificatietank kan ook een voorbezinktank worden omgebouwd tot een tank, die tijdens droogweeraanvoer als denitrificatietank werkt en tijdens regen-

weeraanvoer als voorbezinktank. De kosten zijn aanzienlijk lager dan bij de bouw van een extra tank. De bedrijfsvoering is echter gecompliceerd, terwijl de tank veelal een te beperkte inhoud heeft om vergaand te kunnen denitrificeren.

De eisen, die momenteel worden gesteld aan de effluentkwaliteit van rwzi's maken het noodzakelijk om tot nitrificatie van het afvalwater over te gaan. De meeste rwzi's, die de laatste 10 jaar zijn gebouwd, of in belangrijke mate zijn aangepast, zijn zodanig ontworpen, dat nitrificatie plaatsvindt.

Bij het ontwerp en de bedrijfsvoering van deze rwzi's heeft de denitrificatie in het algemeen minder aandacht gekregen.

Deze studie houdt zich bezig met de vraag op welke wijze denitrificatie op rwzi's kan worden uitgevoerd. Uit bedrijfstechnisch oogpunt brengt denitrificatie enkele voordelen met zich mee:

- het totaal-N-gehalte in het effluent wordt verlaagd;
- het energieverbruik wordt beperkt;
- de kans op opdrijvend slib in de nabezinktank wordt verminderd.

Aangezien er nog maar een beperkt aantal nieuwe rwzi's zullen worden gebouwd, is de vraag hoe tot verdergaande denitrificatie moet worden overgegaan vooral van belang voor bestaande rwzi's, waar nitrificatie wordt toegepast.

De opzet van dit rapport is zodanig, dat het de waterkwaliteitsbeheerder een leidraad biedt bij de beoordeling van het verloop van de denitrificatie en de mogelijkheden tot verbetering hiervan, voor een specifieke zuiveringsinrichting.

Uit praktische overwegingen beperkt het rapport zich tot rwzi's werkend volgens het actief-slibstelsel inclusief zeer laag belaste systemen volgens oxydatieslootprincipe. Andere systemen komen in de praktijk nauwelijks voor of zijn niet in staat te nitrificeren.

In het rapport wordt eerst een beschrijving gegeven van het denitrificatieproces mede op basis van een globaal literatuuronderzoek. Aangezien bij het onderzoek de nadruk ligt op de praktische toepasbaarheid van de modificaties voor het denitrificatieproces, heeft geen veelomvattende literatuurstudie plaatsgevonden.

Vervolgens worden de resultaten gegeven van de inventarisatie van denitrificatie op Nederlandse rwzi's. Tenslotte wordt een aantal interessante methoden voor aanpassing van bestaande rwzi's nader uitgewerkt, inclusief de kosten ervan. De uitwerking van deze methoden geschiedt op basis van een berekeningsmethode die in Duitsland is ontwikkeld en die mede op basis van de toetsing aan Nederlandse praktijksituatie het meest geschikt wordt geacht.

Deze berekeningsmethode wordt in bijlage 3 zodanig uitgewerkt, dat deze ook voor andere situaties is te gebruiken.

Algemeen

De laatste jaren worden rioolwaterzuiveringsinrichtingen vanwege de gestelde effluenteisen in het algemeen ontworpen volgens het actief-slibstelsysteem met een zeer lage tot lage slibbelasting (0,05-0,15 kg BZV/kg d.s.d). Hierdoor zijn deze rwzi's in principe in staat vergaand te nitrificeren.

Het hoge energieverbruik, de kans op opdrijvend slib in nabezinktanks en de lozing van nitraat zijn echter belangrijke nadelen van de nitrificatie.

Er bestaan verschillende methoden voor de verwijdering van stikstofverbindingen uit het afvalwater (zie tabel 1) ^{4 6}. De meeste van deze methoden zijn echter voornamelijk geschikt voor de zuivering van industrieel afvalwater. Gezien de relatief lage stikstofconcentraties in huishoudelijk afvalwater is op rwzi's alleen de methode met biologische nitrificatie-denitrificatie toepasbaar, zowel uit kostenoverwegingen als vanwege de praktische toepasbaarheid.

	stikstof- verbinding	totale selectiviteit
<u>fysisch chemische methoden</u> verontreiniging afscheiden door:	—	
- indampen	NO_3^-	niet-specifiek
- uitdrijven (strippen met stoom of met lucht)	NH_3	specifiek
- omgekeerde osmose	NH_4^+ , NO_3^- , ureum	niet-specifiek
- adsorptie (actieve kool)	organische N-verbind.	niet-specifiek
- ionenwisseling	NH_4^+ , NO_3^-	gedeeltelijk specifiek
- elektrodialyse	NH_4^+ , NO_3^-	niet-specifiek
<u>chemische methoden</u> verontreiniging vernietigen door:		
- oxydatie door verbranden	Kjeldahl-N	niet-specifiek
- oxydatie met chloor	Kjeldahl-N	niet-specifiek
<u>biochemische methoden</u> verontreiniging omzetten door:		
- dissimilatie, assimilatie	alle stikstof	N en P
- nitrificatie	NH_4^+	specifiek
- denitrificatie	NO_3^-	specifiek
- hydrolyse	org. N-verb., ureum	niet-specifiek

Tabel 1. Verwijdering of omzetting van stikstofverbindingen uit afvalwater

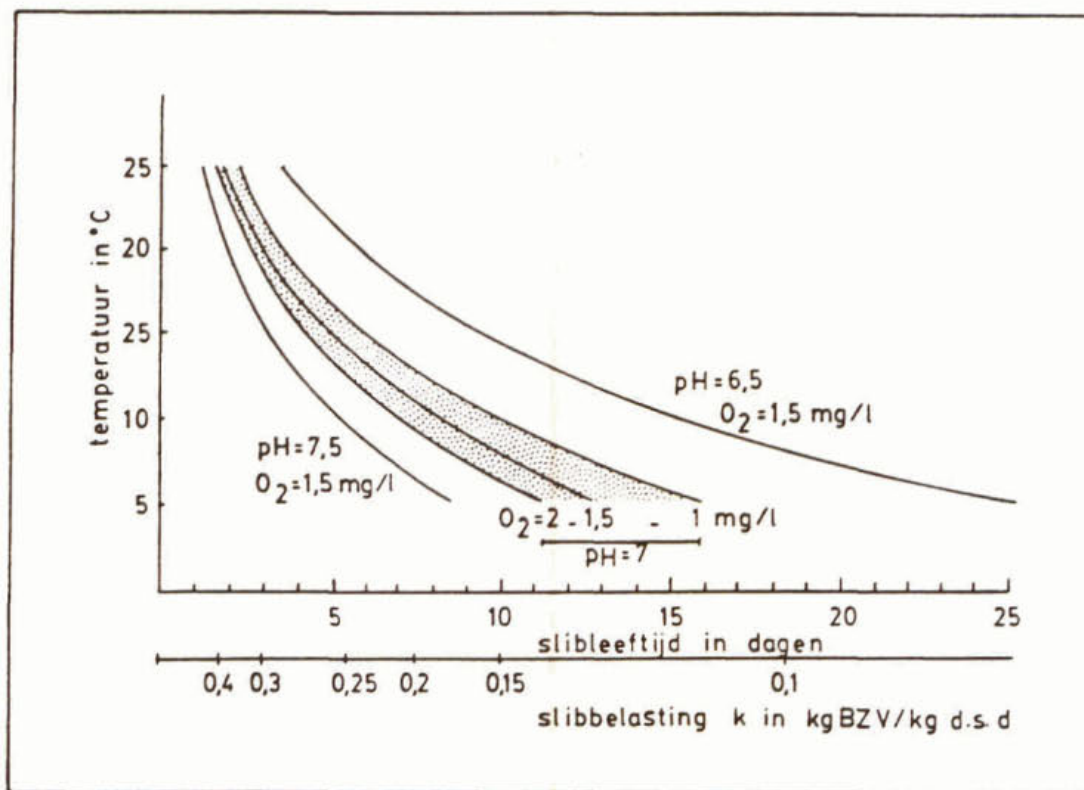
In de volgende paragrafen wordt kort ingegaan op de volgende aspecten:

- principe van de biologische stikstofverwijdering;
- toepasbare processen voor biologische stikstofverwijdering;
- enige praktijkvoorbeelden vermeld in de literatuur.

3.2 Biologische stikstofverwijdering

3.2.1 nitrificatie

De nitrificatie in het actief-slibproces geschiedt door bacteriën van de geslachten Nitrosomonas (omzetting ammonium in nitriet) en Nitrobacter (omzetting nitriet in nitraat). Deze bacteriën hebben een lage groeisnelheid ten opzichte van de andere bacteriën in het actiefslib, zodat nitrificatie alleen bij een hoge slibleeftijd optreedt. In figuur 1 is de minimale slibleeftijd voor het optreden van nitrificatie weergegeven als functie van de temperatuur, de pH en de zuurstofconcentratie ³⁶.



Figuur 1. Minimaal vereiste slibleeftijd voor het optreden van nitrificatie, als functie van temperatuur, pH en zuurstofconcentratie.

Een belangrijk kenmerk van de nitrificatie is de sterke afhankelijkheid van de temperatuur, waardoor nitrificatie op veel rwzi's alleen in de zomer plaatsvindt. De bacteriën zijn bovendien obligaat aëroob. Bij een zuurstofconcentratie groter dan 2 mg O₂/l is de nitrificatie-activiteit maximaal. Voor een goede nitrificatie is

minimaal 1 mg O_2 /l noodzakelijk, terwijl beneden 0,5 mg O_2 /l de activiteit van de nitrificerende bacteriën nog zeer gering is ⁴⁶.

3.2.2 denitrificatie

Bacteriën met het vermogen om te denitrificeren komen algemeen voor in actiefslib, zodat elke actief-slibinstallatie in principe in staat is om te denitrificeren. Essentieel hierbij is, dat er een zuurstofloze zone in het afvalwater aanwezig is, zodat deze bacteriën in plaats van zuurstof nitraat gebruiken voor de oxydatie van organische stof ³⁴. Het bij de nitrificatie gevormde nitraat wordt hierbij gereduceerd tot stikstofgas. Voor een goed verloop van de denitrificatie is een zuurstofgehalte van minder dan 0,5 mg O_2 /l nodig ⁴. In de vlok kan dan zuurstofloosheid en daardoor denitrificatie optreden ²².

Voor een goed verloop van de denitrificatie is de aanwezigheid van voldoende BZV noodzakelijk. Een BZV/N-verhouding van 4 à 5 is in het algemeen vereist. Het optimale pH-gebied voor zowel nitrificatie als denitrificatie ligt tussen 7 en 8. Door nitrificatie daalt de pH, terwijl door denitrificatie de pH stijgt.

3.2.3 effecten van denitrificatie op het actief-slibproces

Het verbeteren van de denitrificatie in een actief-slibinstallatie kan resulteren in een lager energieverbruik voor de beluchting.

Voor nitrificatie is per g N-Kj 4,57 g O_2 nodig. Wanneer het gevormde nitraat weer wordt gebruikt voor denitrificatie levert dit weer een equivalent van 2,86 g O_2 op voor oxydatie van organische stof.

Tabel 2 geeft weer hoe de globale opbouw van het zuurstofverbruik is bij vergaande en beperkte denitrificatie (berekend volgens ⁵⁹).

	slibbelasting 0,05 kg BZV/kg d.s.d		slibbelasting 0,15 kg BZV/kg d.s.d	
N-totaal verwijdering	60%	85%	40%	80%
Zuurstofverbruik in g O_2 /i.e.d (%) voor:				
- BZV-afbraak	27 (23%)	27 (24%)	17 (27%)	17 (33%)
- endogene ademhaling	65 (55%)	65 (59%)	21 (33%)	21 (40%)
- N-verwijdering	26 (22%)	19 (17%)	25 (40%)	14 (27%)
totaal	118 (100%)	111 (100%)	63 (100%)	52 (100%)

Tabel 2. Specificatie zuurstofverbruik bij beperkte en vergaande denitrificatie

Uit tabel 2 volgt dat door verbetering van de denitrificatie bij zeer laag belaste actief-slibsystemen een energiebesparing van circa 6% en bij laag belaste actief-slibsystemen van circa 17% kan worden bereikt.

Een ander mogelijk voordeel van denitrificatie is de geringere kans op slibuitspoeling uit de nabezinktank. Dit wordt dikwijls veroorzaakt door denitrificatie van nitraathoudend afvalwater in de sliblaag van de nabezinktank. Hierdoor ontstaan stikstofgasbelletjes, die het slib kunnen doen opdrijven (biologische flotatie).

Dit houdt tegelijkertijd in dat, als de denitrificatie de laatste stap in het proces is, het noodzakelijk is het stikstofgas via een nabeluchting uit het water en actiefslib te strippen om slibopdriving te voorkomen.

De slibproductie zal nauwelijks worden beïnvloed door het al dan niet optreden van denitrificatie ³⁴.

Er zijn aanwijzingen dat de denitrificatie een positieve invloed heeft op de slibbezinking. De groei van draadvormige bacteriën wordt mogelijk beperkt. Bovendien kan de slibleeftijd en daarmee ook de nitrificatie toenemen ⁴⁹.

3.2.4 nitrificatie- en denitrificatiesnelheden

Voor de dimensionering van de benodigde ruimte voor nitrificatie en denitrificatie spelen de omzettingssnelheden van beide processen een belangrijke rol. In tabel 3 zijn de omzettingssnelheden weergegeven, zoals die door diverse onderzoekers zijn bepaald. Om deze waarden te kunnen vergelijken zijn ze omgerekend naar een omzetting in mg N per g droge stof per dag.

De slibbelasting en N-belasting van tabel 3 zijn de procesomstandigheden op de rwzi waarvan het bij het onderzoek gebruikte slib afkomstig is. De waarden geven dus een indicatie van de aard van het slib. De waarden voor de nitrificatie- en denitrificatiesnelheden zijn vervolgens in proefopstellingen bepaald, waarbij veelal een overmaat stikstofbron aanwezig was. Aangezien de gemeten waarden van de nitrificatie- en denitrificatiesnelheid in het algemeen hoger zijn dan de N-belasting van het slib op de rwzi, kan hieruit worden geconcludeerd dat de capaciteit van het slib om te nitrificeren en te denitrificeren veelal hoger is dan de hoeveelheid die werkelijk op de rwzi wordt omgezet, vanwege een tekort aan stikstof.

In de praktijk zijn de nitrificatie- en denitrificatiesnelheden afhankelijk van:

- de temperatuur;
- de slibbelasting;
- het stikstofaanbod;
- de aanwezige C-bron;
- de zuurstofconcentratie;
- de pH;
- de aanwezigheid van remmende stoffen.

		slibbelasting kg BZV/kg d.s.d.	N-belasting g N/kg d.s.d.	nitrificatiesnelheid g N/kg d.s.d.				denitrificatiesnelheid g N/kg d.s.d.			
				10°C	15°C	20°C	25°C	10°C	15°C	20°C	25°C
Heide ¹	oxydenitroproces	0.05	10-12	25		27		8 ^{xx}		8 ^{xx}	
Klapwijk ¹	synthetisch afvalwater	0.08	41,5			67 ⁽¹⁾					
	huishoudelijk afvalwater	0.05	10-17			260 ⁽²⁾				17-67	
Christensen and Hermans ¹	literatuuroverzicht onder- en bovengrens					61				3-5 ^{xx}	
Christensen ¹	bio-denitro proces	0.045	4,5			26				31-46 ^{xx}	
Schlegel ¹	rwzi-Lüdinghausen	0.19 (winter) 0.07 (zomer) 0.15 (gemiddeld)	120 60	26		52		26		5 ⁽³⁾ -29 ⁽⁴⁾	
Kienle ¹	denitrificatietank	0.05 0.10 0.15									20 30 40
N.P.C.F. ¹	maximale snelheden							23	37	59	
Zuiveringschap Drenthe ¹	metingen aan slib van rwzi-Gieten	0.04	12,5	20				6-7 ^{xx}			
Zuiveringschap Drenthe ¹	praktijkgegevens van rwzi Gieten jaargemidd. '76-'80	0.04	12,5		12			10			
EPA ¹	literatuurgegevens							6-20		10-26	
EPA ¹	proefinstallatie Blue Plains maximale snel- heden (alternerend belucht)	0.06	14		10-25		60	13 ^{xx} 20 ^{xx}			20 ^{xx} 20 ^{xx} 30 ^{xx}
Z.N.E.W.	rwzi-Sliedrecht metingen aan slib (tegenstroombe- luchting + voor-denitrifi- catie)	0.035	11			32 ⁽⁵⁾				18 ⁽⁵⁾	

Tabel 3. Nitrificatie- en denitrificatiesnelheden

- x endogene ademhaling als C-bron
xx influent als C-bron
(1) continu belucht
(2) alternerend belucht
(3) onder anaërobe omstandigheden
(4) onder anaërobe omstandigheden
(5) 18,5°C

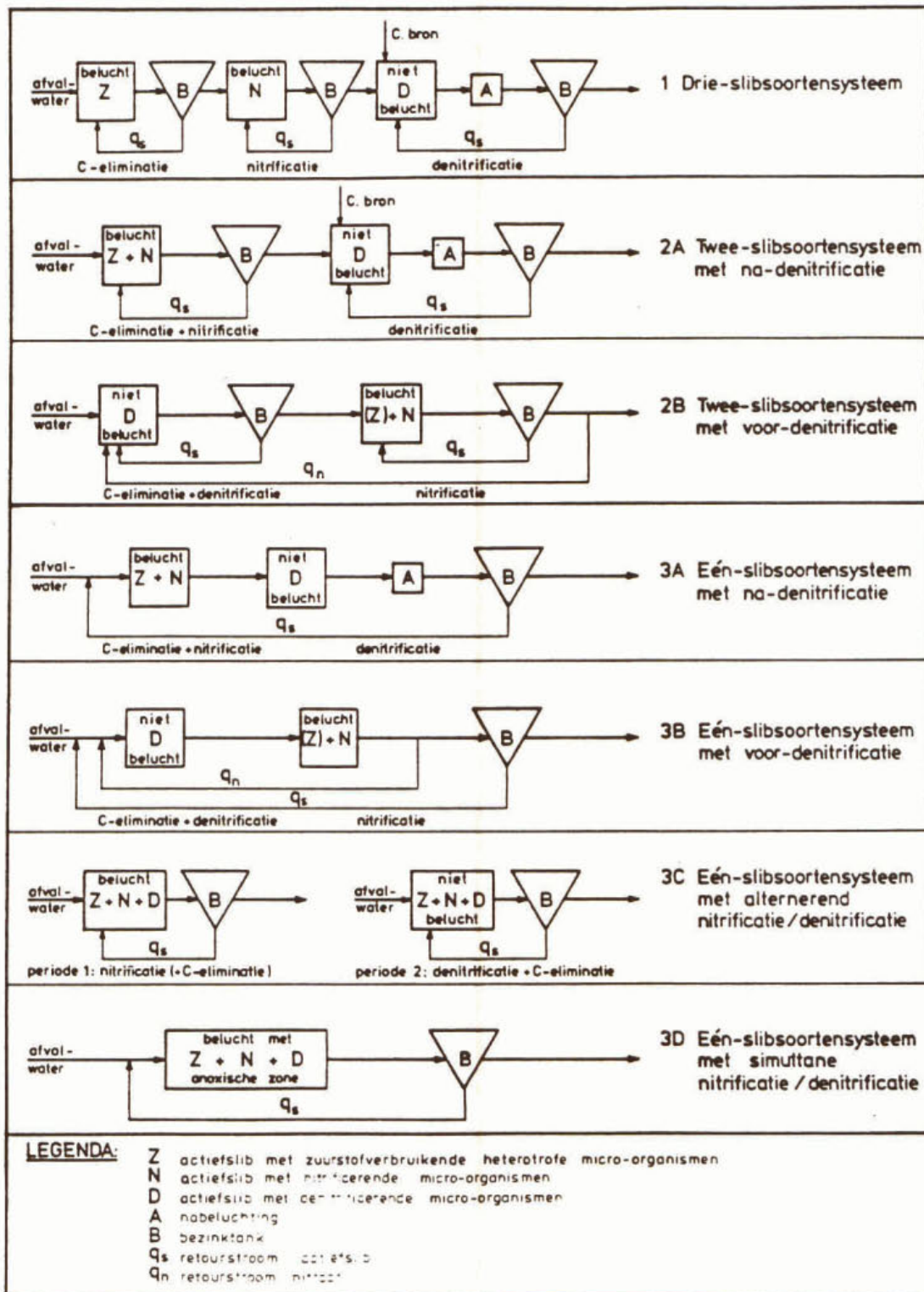
Met name de stikstofbelasting en de slibbelasting hebben een belangrijke invloed op de omzettingssnelheden. Bij een hogere slibbelasting zal namelijk een groter deel van het actiefslib bestaan uit levend bacteriemateriaal.

Dawson en Murphy ⁶ hebben een onderzoek verricht naar de denitrificatiesnelheid van de denitrificerende bacterie *Pseudomonas denitrificans*. Bij deze monoculturen konden omzettingssnelheden van 480 mg N/g bacteriën per dag bij 10°C en 1700 mg N/g bacteriën per dag bij 20°C worden bereikt.

De denitrificatiesnelheid wordt ook beïnvloed door de gebruikte C-bron. Bij gebruik van influent als C-bron ligt de denitrificatiesnelheid aanzienlijk hoger dan bij endogene ademhaling die veelal bij na-denitrificatie als C-bron optreedt. Bij endogene ademhaling zijn waarden gevonden voor de denitrificatiesnelheid van 3 - 8 mg N/g d.s.d.

De verschillen in de waarden van tabel 3 worden mede veroorzaakt door de verschillende methoden, die worden toegepast om de omzettingssnelheden te bepalen, zoals:

- vergelijking van in- en effluentgegevens, al dan niet rekening houdend met stikstofopname in het slib;
- volgen van stikstofomzettingen in een laboratoriumopstelling, waarbij gebruik wordt gemaakt van huishoudelijk afvalwater en slibmonsters van een rwzi.



Figuur 2. Toepasbare processen voor biologische stikstofverwijdering

- één-slibsoortensysteem met voor-denitrificatie;
- één-slibsoortensysteem met simultane nitrificatie-denitrificatie.

3.4 Praktijkvoorbeelden

In de literatuur worden verschillende voorbeelden gegeven van aanpassing van bestaande rwzi's aan denitrificatie.

Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- oxydenitroproces ¹⁶ ;
- carrousel ^{52,60} ;
- biodenitroproces ⁵⁴ ;
- rwzi-Alexandra ^{41,42} ;
- rwzi-Lüdinghausen ⁴⁹ ;
- rwzi-Billerbeck ⁵⁰ ;
- alternerende beluchting + sturing op nitraat ¹⁰ ;
- voor-denitrificatie volgens het opstroom-principe ³² .

In figuur 3 zijn enige installaties met denitrificatie weergegeven.

Het oxydenitroproces is in een proefinstallatie van 500 i.e. met een slibbelasting van 0,05 kg BZV/kg d.s.d onderzocht ¹⁶. Het systeem werkt volgens een één-slibsoortensysteem met zowel vóór- als na-denitrificatie. Uit het onderzoek is ondermeer gebleken dat na-denitrificatie met endogene ademhaling als C-bron minder goede resultaten geeft dan voor-denitrificatie.

Het benodigde recirculatie-debiet voor de nitraattoevoer naar de voor-denitrificatieruimte is aanzienlijk, namelijk 3 x influent-debiet bij zowel vóór- als na-denitrificatie en 7x influent-debiet bij uitsluitend voor-denitrificatie om een totale stikstofreductie van 85% te verkrijgen.

Bij zuivering van afvalwater in carrousel wordt in het algemeen een goede denitrificatie verkregen tengevolge van een lage zuurstofconcentratie in het lange omloopbeen waarin niet wordt belucht. Met name anoxische zones in de slibvlokken spelen hierbij een belangrijke rol ^{22,52}. Noodzakelijk hierbij is een goede zuurstofregeling, mede op basis van een frequente meting van nitraat en ammoniak in het effluent ¹³.

Het biodenitroproces is een alternerend belucht systeem uitgevoerd over twee in serie geschakelde beluchtingstanks, waarbij de influenttoevoer wordt omgeschakeld naar de tank, die tijdelijk niet wordt belucht.

Christensen ³ geeft een berekeningsschema voor de optimale cyclusduur bij verschillende omstandigheden. Het systeem is in de praktijk uitgetest, waarbij een N-totaalverwijdering van 90% werd verkregen (N-totaal in effluent 3 mg/l).

Op de rwzi Alexandra (Johannesburg, 180.000 i.e.) met een volledig gemengd beluchtingssysteem is de denitrificatie aanzienlijk

tane defosfatering, chemisch danwel biologisch, in de beluchtings-tanks wordt toegepast.

Het is dan ook van belang om na te gaan of deze simultane defos-fatering van invloed is op het nitrificatie-denitrificatieproces.

In bijlage 2 wordt nader ingegaan op dit aspect. In de volgende paragrafen wordt hiervan een samenvatting gegeven.

3.5.1 chemische defosfatering

Bij simultane defosfatering zal het actiefslib voor een groter deel uit anorganisch materiaal bestaan. Zonder defosfatering bestaat het actiefslib voor circa 20% uit anorganisch materiaal terwijl dit met defosfatering kan oplopen tot 35 à 45%, afhankelijk van het toege-past defosfateringsmiddel ¹⁹. Om toch een gelijke hoeveelheid actieve biologische massa te verkrijgen zal het drogestofgehalte in de beluchtingstank hoger moeten zijn.

Bij simultane defosfatering met AVR is een sterke remming geconsta-teerd van de nitrificatiesnelheid ¹⁹. Uit laboratoriumproeven is niet gebleken dat de denitrificatie wordt beïnvloed door de AVR-dosering ¹⁹.

De nitrificatie- en denitrificatiesnelheid werden bij de proeven niet geremd door defosfatering met kalk.

3.5.2 biologische defosfatering

De laatste jaren wordt onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid van biologische defosfatering ^{40, 44, 57}. Hierbij wordt getracht zo-danige procesomstandigheden te creëren dat het slib grote hoeveel-heden fosfaat opneemt.

Dit geschiedt door de beluchtingsruimte te splitsen in een anaërobe en aërobe zone. Dit kan echter niet worden gecombineerd met een voor-denitrificatie omdat het nitraat dat voor de voor-denitrifi-catie wordt gerecirculeerd, storend werkt op het defosfaterings-proces. Een combinatie van biologische defosfatering en denitrifi-catie is dan ook alleen mogelijk door middel van een systeem met twee zuurstofloze zones, namelijk een anoxische zone met nitraat-recirculatie ten behoeve van voor-denitrificatie en een anaërobe zone met alleen slibrecirculatie. Dit is door middel van gescheiden compartimenten of door toepassing van stapsgewijze voeding in een propstroomreactor te bereiken.

Voorbeelden hiervan zijn het Bardenpho-proces ⁵⁷ en het A/O-proces ⁴⁰ (zie ook bijlage 2). De biologische fosfaatverwijdering al dan niet in combinatie met nitrificatie en denitrificatie bevindt zich nog in een ontwikkelingsstadium.

Praktijkervaringen in Nederland zijn nog niet voorhanden.

3.6 Berekeningsmethoden voor dimensionering denitrificatieruimten

Het ontwerp van denitrificatieruimten zal in principe moeten plaats-vinden op basis van de denitrificatiesnelheid. Dit geldt zowel voor een aparte voor- of na-denitrificatieruimte, als voor de te creëren anoxische zone in een beluchtingstank.

Ook bij altemnerend beluchten kan de verhouding tussen duur van stilstand en in bedrijf zijn van de beluchting in principe hiervan worden afgeleid.

De denitrificatiesnelheid die kan worden bereikt is in principe afhankelijk van:

- samenstelling van het actiefslib;
- temperatuur;
- pH;
- zuurstofconcentratie;
- nitraatgehalte;
- aard en hoeveelheid C-bron;
- fluctuaties in de samenstelling van het afvalwater en de procescondities.

De slibsamenvatting, met name de hoeveelheid denitrificerende bacteriën hierin zal zich, wanneer de overige procesomstandigheden goed zijn, aanpassen aan het nitraataanbod. Bij het twee- en drie-slibsoortensysteem kan daardoor de denitrificatiesnelheid per kg droge stof aanzienlijk hoger zijn dan bij een één-slibsoortensysteem.

De denitrificatiesnelheid per kg droge stof wordt mede bepaald door de hoeveelheid biologisch actieve massa in het slib, zodat de slibbelasting (i.v.m. de stabilisatiegraad van het slib) en toepassing van defosfatering hierbij een rol spelen.

De mate van denitrificatie wordt dan ook mede bepaald door de procescondities en de bedrijfsvoering (temperatuur, pH, zuurstofgehalte, C-bron).

Bij de dimensionering van denitrificatieruimten kan derhalve niet worden uitgegaan van denitrificatiesnelheden die in de huidige praktijksituaties zijn bepaald.

Enerzijds worden deze sterk beïnvloed door de optredende procescondities. Zo wordt deze bij zeer laagbelaste actief-slibinstallaties (oxydatieslootprincipe) veelal gelimiteerd door een nitraatgebrek. Anderzijds zijn de methoden voor de bepaling van de denitrificatiesnelheid niet gelijk.

Bij simultane denitrificatie is de endogene ademhaling vaak een belangrijke C-bron, waardoor de gemeten denitrificatiesnelheid laag is. Bij voor-denitrificatieinstallaties is de recirculatieverhouding en daarmee de nitraataanvoer beperkt, waardoor eveneens een lage denitrificatiesnelheid wordt gemeten.

Noodzakelijk is dat er bij de dimensioneringsberekeningen rekening wordt gehouden met factoren als slibbelasting, nitraatbelasting, temperatuur, en aard en hoeveelheid C-bron.

De in tabel 1 vermelde denitrificatiesnelheden zijn als algemeen bruikbare waarden dan ook niet toepasbaar.

In de literatuur is slechts één berekeningsmethode gevonden die met deze factoren rekening houdt. Deze berekeningsmethode is opgezet door Kayser ²⁹.

Uitgangspunten voor dit model zijn:

- de denitrificatiecapaciteit is gekoppeld aan de BZV-afbraakcapaciteit met O_2 . Aan de hand van metingen heeft Kayser geconclu-

deerd dat de denitrificatiesnelheid 5 - 30% lager is dan de BZV-afbraaksnelheid. In het door Kayser gebruikte model wordt uitgegaan van een denitrificatiesnelheid die gemiddeld 75% bedraagt van de BZV-afbraaksnelheid met zuurstof;

- denitrificatiesnelheid bij vóór-denitrificatie verschilt van de simultane denitrificatiesnelheid;
- de denitrificatiesnelheid neemt toe bij kleinere denitrificatieruimte (ofwel hogere nitraatbelasting van het slib).

Met behulp van nomogrammen kan uit de slibbelasting (maat voor BZV-afbraaksnelheid), de temperatuur, de influentsamenstelling en de grootte van de denitrificatiezone, de effluentsamenstelling worden berekend. In bijlage 3 is de berekeningswijze van Kayser nader uitgewerkt.

Toetsing van de modelberekening van Kayser aan de praktijk is niet eenvoudig, omdat gegevens van rwzi's, die zijn ontworpen voor denitrificatie ontbreken. Wel is de gemiddelde zuurstofverbruiksnelheid op Nederlandse rwzi's bepaald ⁵⁹. Omdat Kayser uitgaat van een denitrificatiesnelheid van 75% van de BZV-afbraaksnelheid kunnen de beide waarden worden vergeleken.

Ook kan het model worden vergeleken met resultaten van proefinstallaties. Uitgebreid onderzoek hierover is uitgevoerd door Heide aan het oxydenitroproces ¹⁷.

Vergelijking van deze drie waarden voor een rwzi met een slibbelasting van 0,05 kg BZV/kg d.s.d geeft het volgende beeld (zie tabel 4).

temperatuur	Kayser ²⁹	Heide ¹⁷	uit gemiddeld O ₂ -verbruik ⁵⁹
10°C	19	17	22
15°C	20	17	
20°C	23	22	

Tabel 4. Vergelijking denitrificatiesnelheden uitgedrukt in g N/kg d.s.d

Hieruit kan worden geconcludeerd, dat het model Kayser de door Heide gemeten denitrificatiesnelheden redelijk kan voorspellen. De bij het model aangehouden BZV-afbraaksnelheden komen ook goed overeen met de Nederlandse praktijksituatie.

4 DENITRIFICATIE OP DE NEDERLANDSE RIOOLWATERZUIVERINGSINRICHTINGEN

4.1 Typen rwzi's in gebruik in Nederland

Op 01-01-1983 waren in Nederland in totaal 460 biologische zuiveringsinrichtingen voor gemeentelijke kernen in bedrijf met een totale ontwerpcapaciteit van ruim 19 miljoen i.e.⁴⁷.

Globaal zijn deze inrichtingen als volgt in te delen (zie tabel 5).

type rwzi	BZV- verwij- dering	nitri- ficatie	slib- stabi- lisatie
zeer laag belaste actief-slibinstallaties (circuits) (k = 0,05 kg BZV/kg d.s.d) - o.a. continue en discontinue oxydatiesloten, carroussels, systemen met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing; - zonder voorbezinking en slibgisting;	+	+	+
laag belaste actief-slibinstallaties (k = 0,15 kg BZV/kg d.s.d) - veelal propstroomsystemen met bellenbeluchting; - met voorbezinking en slibgisting;	+	+	-
hoog belaste actief-slibinstallaties (k = 0,4 kg BZV/kg d.s.d) - veelal volledig gemengde tanks met puntbeluchting - met voorbezinking en slibgisting	+	-	-
oxydatiebedden, laag- of hoogbelast - veelal met lavavulling; - met voorbezinking en slibgisting	+	-	-
overigen, zoals tweetrapsinstallaties, compactinstallaties	+	+/-	+/-

Tabel 5. Indeling biologische zuiveringsinrichtingen

In tabel 6 is de bijdrage van de verschillende typen rwzi's uitgedrukt in % van zowel het totaal aantal als van de totale ontwerpcapaciteit gegeven.

type rwzi	% van aantal	% van capaciteit (i.e.)
zeer laag belaste actief-slibinstallaties	61	30
laag belaste actief-slibinstallaties	6	20
hoog belaste actief-slibinstallaties	8	25
oxydatiebedden	19	14
overigen	6	11

Tabel 6. Verdeling typen biologische zuiveringsinrichtingen naar aantal en capaciteit

Uit bovenstaande tabellen blijkt dat begin 1983 ongeveer 70% van het aantal installaties - ruim de helft van de in Nederland geïnstal-

leerde zuiveringscapaciteit - kon nitrificeren; dit betreft zeer laag en laag belaste actief-slibinstallaties en een deel van de overige installaties. Verwacht mag worden dat deze percentages nog aanzienlijk toe zullen nemen, omdat het effluent van de oxydatiebedden en de hoogbelaste actief-slibinstallaties niet meer voldoet aan de eisen, die hiervoor momenteel worden gesteld. Ook de nog te realiseren rwzi's zullen in het algemeen mede op nitrificatie zijn ontworpen.

De zeer laag belaste actief-slibinstallaties hebben in het algemeen een beperkte capaciteit. De grotere installaties zijn veelal van het type laag of hoog belast actief-slib. De laag belaste installaties zijn veelal van het type propstroomreactor. Zeker wat betreft de ontwerpcapaciteit is echter het aandeel gemengde tanks met puntbeluchters niet te verwaarlozen, vooral vanwege de - eventueel nog te realiseren - aanpassingen van hoog belaste installaties. Ten aanzien van de zeer laag belaste systemen geldt dat de discontinue oxydatiesloten weinig voorkomen en veelal aan vervanging toe zijn.

De overige installaties worden qua capaciteit vooral bepaald door enige grote tweetrapsinstallaties die als tweede trap een zeer laag of laag belaste actief-slibinstallatie hebben. Op deze categorie wordt niet apart ingegaan.

Resumerend zal het verdere onderzoek zich richten op:

- zeer laag belaste actief-slibinstallaties (circuits)
 - . oxydatiesloot met puntbeluchting (o.a. type carrousel, concent)
 - . oxydatiesloot met borstels
 - . systemen met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing (o.a. type schreiber, rotoflow en landox);
- laag belaste actief-slibinstallaties
 - . propstroomreactoren met bellenbeluchting
 - . gemengde tanks met puntbeluchters.

Uit de inventarisatie van de Nederlandse rwzi's ⁴⁷ is gebleken, dat vier rwzi's zijn gebouwd met een speciale denitrificatieruimte, terwijl een vijfde in aanbouw was. Het betreft hier systemen met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing.

Verder is gebleken, dat bij de bedrijfsvoering van de overige installaties in vele gevallen getracht wordt zoveel mogelijk te denitrificeren, in het algemeen door middel van de zuurstofregeling (sturing op laag O_2 -gehalte, ongelijkmatige beluchting). Op de bedrijfsresultaten van beide systemen wordt nader ingegaan.

4.2

rwzi's met denitrificatieruimte

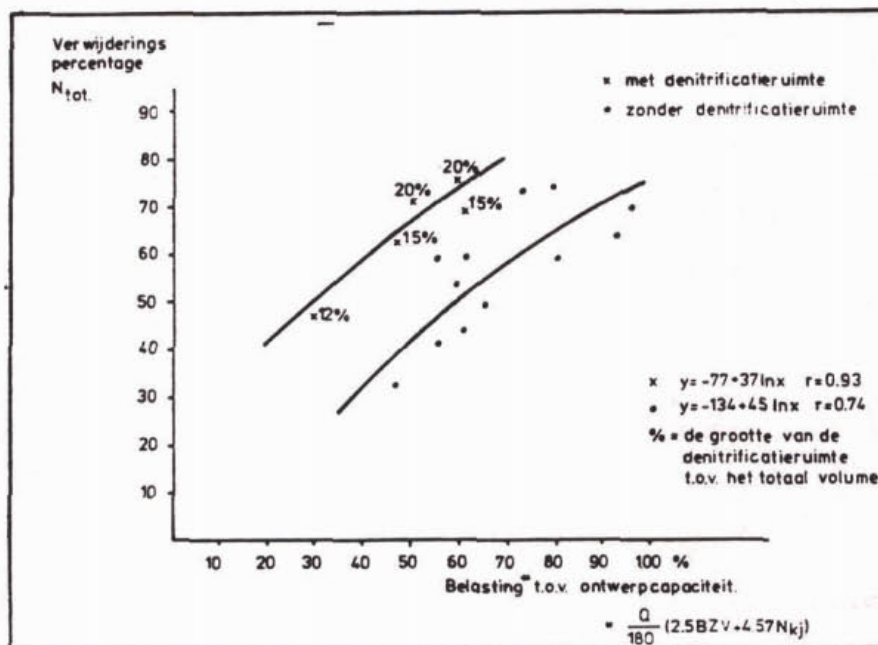
Deze rwzi's worden gekenmerkt door een voor-denitrificatie in een niet-beluchte binnenring. Verdere BZV-afbraak en nitrificatie vindt plaats in de beluchte buitenring. Het influent wordt met het retour-slib in de binnenring aangevoerd. Via een overstort of gaten in de wand stroomt het slib-watermengsel naar de buitenring. Directe recirculatie vanuit de buitenring vindt in het algemeen nauwelijks plaats, zodat de nitraat-toevoer naar de denitrificatieruimte vooral via de retourslibstroom geschiedt.

De denitrificatieruimte is voor drie installaties 20 - 25% van de totale inhoud van de beluchtingstank en voor twee installaties slechts 12 - 15%. De grootte van de denitrificatieruimte is veelal op praktische gronden gekozen (resterende ruimte die in het midden overblijft wanneer de beluchtingselementen in de buitenring op zo'n economisch mogelijke wijze zijn aangebracht). Optimalisatie naar denitrificatie heeft veelal niet plaatsgevonden.

Uit de jaaroverzichten van de bedrijfsresultaten van drie installaties werkend volgens het "schreiber"-systeem van 1982 en 1983 is gebleken dat de totaal-N-verwijdering van deze installaties ligt tussen de 50 en 75%, waarbij geldt dat de verwijdering groter is naarmate de denitrificatieruimte groter is. Van de beide overige installaties zijn de resultaten of niet bekend (installatie nog in aanbouw) of niet vergelijkbaar (2^e trap van een tweetrapsinstallatie, zodat C/N-verhouding zeer ongunstig is).

De resultaten van de N-verwijdering van andere schreiber-installaties zonder denitrificatieruimte liggen in dezelfde orde van grootte.

Nadere analyse wijst echter uit dat de resultaten sterk beïnvloed worden door de belastingsgraad van de rwzi. Bij onderbelaste installaties kan namelijk de beluchting onvoldoende worden teruggeregeld, zodat de denitrificatie door te hoge zuurstofgehalten niet optimaal is. In figuur 4 wordt dit geïllustreerd. Hierin zijn verschillende schreiber-installaties met en zonder denitrificatie met elkaar

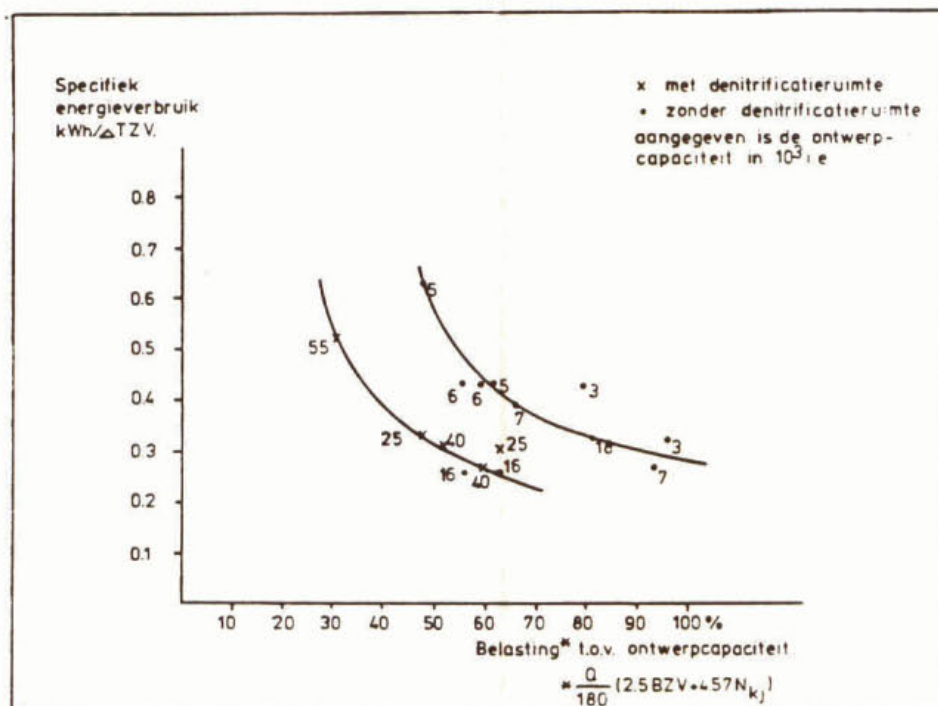


Figuur 4. Totaal stikstofverwijdering als functie van de belastingsgraad voor schreiber-installaties met en zonder denitrificatieruimten

vergeleken, waarbij de totaal-N-verwijdering is uitgezet tegen de belastingsgraad van de rwzi.

Hieruit blijkt dat bij vergelijkbare belastingsgraad de rwzi's met denitrificatieruimte een 20 - 25% hogere N-verwijdering geven dan rwzi's zonder denitrificatieruimte.

Vergelijking van het specifiek energieverbruik (kWh per kg totaal zuurstofverbruik) geeft aan dat dit daalt naarmate de belastingsgraad van de rwzi toeneemt (zie figuur 5).



Figuur 5. Specifiek energieverbruik als functie van de belastingsgraad voor schreiber-installaties

Uit figuur 5 blijkt dat het specifiek energieverbruik voor rwzi's met denitrificatieruimte lager is dan voor rwzi's zonder denitrificatieruimte. Het verschil in energieverbruik tussen installaties met en zonder denitrificatieruimte is aanzienlijk groter dan de circa 6% die in par. 3.2.3 is aangegeven. De installaties met denitrificatieruimte zijn echter aanzienlijk groter dan de installaties zonder denitrificatieruimte, zodat mag worden aangenomen dat de zuurstofregeling in de beluchtingstank beter is, wat eveneens een bijdrage levert tot het lager specifiek energieverbruik.

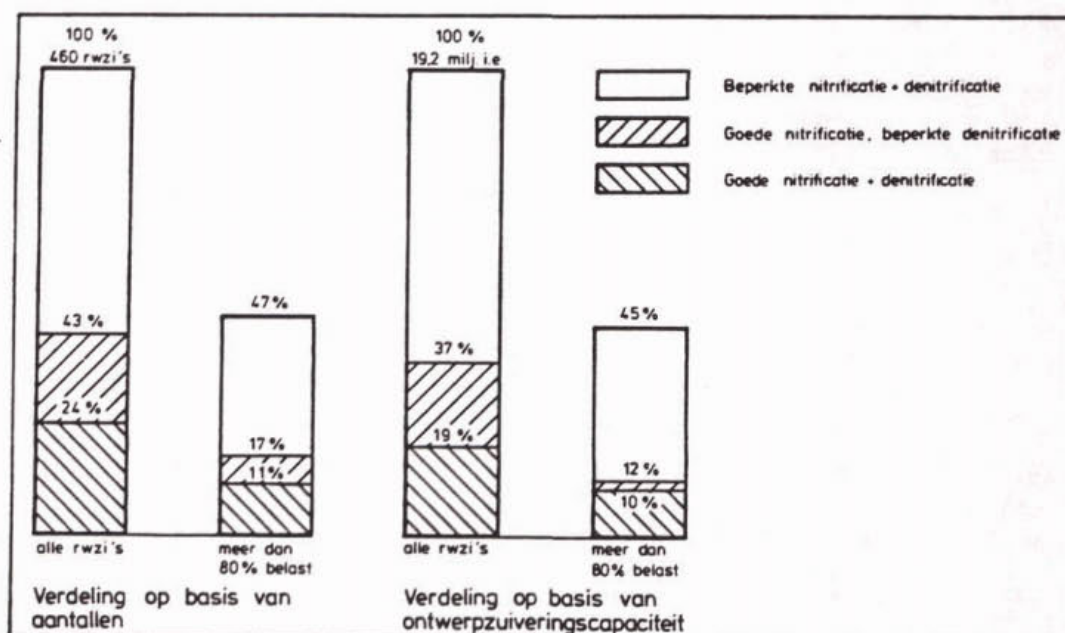
4.3 rwzi's zonder denitrificatieruimte

De denitrificatie in deze rwzi's verloopt volgens het één-slib-soortensysteem met simultane denitrificatie. Voor de inventarisatie van de denitrificerende werking van de rwzi's zonder denitrificatieruimte is gebruik gemaakt van de technologische jaarverslagen over het jaar 1982 van de Nederlandse waterkwaliteitsbeheerders. Bij de inventarisatie is 93% van de in Nederland geïnstalleerde zuiveringscapaciteit betrokken.

Voor de beoordeling van de stikstofverwijdering van rwzi's zijn voor dit onderzoek enkele arbitraire keuzen betreffende de al dan niet goede werking gemaakt:

- belastingsgraad: gezien de belangrijke invloed van de belastingsgraad van een rwzi op de stikstofverwijdering is een onderscheid gemaakt tussen rwzi's die ongeveer op de ontwerpbelasting worden bedreven en rwzi's die duidelijk zijn onderbelast. De grens hiervoor is gelegd bij 80% van de ontwerpbelasting op jaarbasis;
- nitrificatie: voor het onderzoek zijn alleen van belang de rwzi's, die goed nitrificeren. Als goed nitrificerende rwzi's zijn gekozen de rwzi's met een N-Kjeldahlverwijdering van meer dan 80% op jaarbasis;
- denitrificatie: de grens voor rwzi's met een al dan niet goede denitrificatie is in dit onderzoek gesteld op 70% N-totaalverwijdering op jaarbasis.

De beoordeling is zowel uitgevoerd op basis van het aantal rwzi's dat op 01-01-1983 in werking was (100% = 460 rwzi's) als op basis van de totaal aanwezige ontwerpzuiveringscapaciteit per 01-01-1983 (100% = 19,2 miljoen i.e.). In figuur 6 zijn de resultaten van de inventarisatie, gebaseerd op alle typen biologische zuiveringsinrichtingen, weergegeven.



Figuur 6. Nitrificatie en denitrificatie op Nederlandse rwzi's

Uit figuur 6 blijkt een groot aantal Nederlandse rwzi's onderbelast te zijn. Een goede nitrificatie vindt plaats op circa 40% van alle rwzi's. Voor goed belaste rwzi's is dit percentage lager, omdat bij volbelaste installaties de slibbelasting veelal hoger is, zodat de nitrificatie minder goed verloopt.

Vergeleken met de waarden uit tabel 6 (par. 4.1) blijkt, dat in de praktijk een deel van de rwzi's niet goed denitrificeert, terwijl dit in principe wel goed mogelijk is.

Op de rwzi's, die goed nitrificeren, treedt in meer dan de helft van de gevallen ook een goede denitrificatie op. Echter voor nage-
noeg volbelaste rwzi's neemt dit percentage toe tot circa 65% op
basis van het aantal rwzi's tot zelfs meer dan 80% op basis van
zuiveringscapaciteit. Dit wordt veroorzaakt door de veelal be-
perkte mogelijkheden om de zuurstoftoevoer bij onderbelasting vol-
doende terug te kunnen regelen.

Hieruit volgt dat vooral onderbelaste rwzi's in aanmerking komen
voor maatregelen ter verbetering van de denitrificatie.

In tabel 7 is voor verschillende typen rwzi's aangegeven hoeveel
rwzi's een goede nitrificatie hebben (meer dan 80% N-Kj-verwij-
dering) maar een onvoldoende denitrificatie (minder dan 70%
totaal-N-verwijdering).

type rwzi	totaal aantal	aantal met meer dan 80% belastingsgraad
circuits		
. oxydatiesloten met puntbel.	17	0
. oxydatiesloten met borstelbel.	35	19
. installatie met bellenbeluchting + gescheiden voortstuwing	9	1
laagbelaste actief-slibinstall.	10	3
tweetrapsinstallaties	3	0
totaal	80	24
totaal in i.e.	3,2 miljoen i.e.	0,4 miljoen i.e.

Tabel 7. Rwzi's met goede nitrificatie en onvolledige denitrifi-
catie

Uit het bovenstaande blijkt dat de aanpassingen vooral nodig zijn
voor oxydatiesloten met borstelbeluchting, actief-slibinstallaties
en onderbelaste oxydatiesloten met puntbeluchting.

4.4 Nadere evaluatie praktijkresultaten

Op basis van de technologische jaarverslagen van de waterkwali-
teitsbeheerders is een nadere analyse uitgevoerd van de stikstof-
verwijdering voor diverse typen rwzi's.

Deze analyse is uitgevoerd voor:

- vrijwel volledig belaste oxydatiesloten met borstelbeluchting
met een goede nitrificatie; hierbij is een splitsing gemaakt
naar rwzi's met en zonder vergaande denitrificatie;
- vrijwel volledig belaste carrousels (oxydatiesloten met punt-
beluchting) met een goede nitrificatie; deze rwzi's hebben ook

bijna altijd een goede denitrificatie, zodat hier geen nadere splitsing is te maken;

- schreiber-installaties (bellenbeluchting met gescheiden voortstuwing); hierbij zijn alle installaties meegenomen, aangezien er weinig installaties zijn met een vrijwel volledige belasting; voor deze installaties is een onderscheid gemaakt tussen rwzi's met en zonder denitrificatieruimte.

In tabel 8 zijn de resultaten weergegeven.

	oxydatiesloten		carroussels	schreiber-installaties	
	meer dan 80% belast en 80% N-Kj-verw.		meer dan 80% belast meer dan 70% N-tot. verw.	zonder deni- trificatie ruimte	met deni- trificatie- ruimte
	minder dan 70% N-tot. verw.	meer dan 70% N-tot. verw.			
aantal rwzi's	14	17	13	12	5
slibbelasting (kg BZV/kg d.s.d)	0,047	0,062	0,045	0,035	0,033
N-belasting (kg N/kg d.s.d)	0,013	0,017	0,009	0,011	0,011
N-Kj verwijdering	86%	87%	90%	85%	90%
N-tot. verwijdering	59%	77%	79%	56%	65%
nitrificatiesnelheid (g N/kg d.s.d)	11,7	14,6	8,0	8,9	9,4*
denitrificatiesnelheid (g N/kg d.s.d)	7,7	13,0	7,2	5,8	11,3**
beluchtingsenergie (kWh/kg TZV)	0,55	0,36	0,39	0,38	6,7*
spec. slibproductie (kg d.s./kg BZV)	1,21	1,02	0,93	0,94	41,5***
BZV/N verh. influent gemiddelde grootte (i.e.)	3,4	3,8	5,1	3,1	0,34
	6.150	3.550	46.500	5.650	40.000

Tabel 8. Enkele grootheden van goed nitrificerende circuits

- * berekend over totale inhoud beluchtingstank
- ** berekend over inhoud nitrificatieruimte
- *** berekend over inhoud denitrificatieruimte

De resultaten van tabel 8 zijn gemiddelde waarden voor een aantal rwzi's. Hierbij moet worden opgemerkt dat de spreiding in de resultaten in het algemeen groot is (in het algemeen 20 - 60%).

Van de laag belaste actief-slibinstallaties zijn in Nederland te weinig installaties aanwezig, die goed nitrificeren en voor minimaal 80% belast worden om hiervoor gemiddelde waarden te kunnen geven. Daarom zijn in tabel 9 van een zestal installaties de belangrijkste procesomstandigheden weergegeven.

Bij de waarden voor de nitrificatie- en denitrificatiesnelheden uit tabellen 8 en 9 moet worden opgemerkt, dat hierin is inbegrepen de stikstofopname door het slib. In werkelijkheid zullen de omzettingssnelheden dus 10 à 20% lager liggen.

Uit de resultaten blijkt, dat bij voldoende hoge slibleeftijd - zodat een aangroei van nitrificerende bacteriën kan optreden - een goede nitrificatie en denitrificatie kan plaatsvinden. Limiterende factoren voor de nitrificatie en denitrificatie zijn de N-belasting en de procesomstandigheden.

	actief-slibinstallaties meer dan 80% belast meer dan 80% N-Kj verw. minder dan 70% N-tot. verw.			actief-slibinstallaties meer dan 80% belast meer dan 70% N-tot. verw.		
	Amsterdam- Noord	Renkum	Barneveld	Bath*	Amsterdam- West	Epe
slibbelasting (kg BZV/kg d.s.d)	0,27	0,17	0,09	0,15	0,11	0,11
N-belasting (kg N/kg d.s.d)	0,0094	0,023	0,022	0,021	0,027	0,018
N-Kj verwijdering	81%	88%	89%	84%	90%	84%
N-totaal verwijdering	59%	47%	69%	71%	75%	76%
nitrificatiesnelheid (g N/kg d.s.d)	76	20	20	19	24	15
denitrificatiesnelheid (g N/kg d.s.d)	55	11	15	15	20	14
beluchtingsenergie (kWh/kg TZV)	0,58	0,18	0,37	0,43	0,67	0,38
spec. slibproductie (kg d.s./kg BZV)	1,13	0,52	0,71	0,48	0,70	0,99
BZV/N-verhouding influent	2,8	7,4	4,1	7,1	4,1	6,1
ontwerpgrootte (i.e.)	130.000	120.000	46.000	405.000	400.000	42.000

Tabel 9. Praktijkgegevens van enkele goed nitrificerende laag belaste actief-slibinstallaties met een vrijwel volledige belasting

* alleen periode 2^e helft 1983

Bij goede procesomstandigheden vindt een zodanige adaptatie van het slib aan de aangeboden N-vracht plaats (variërend aandeel nitrificerende en denitrificerende bacteriën), dat tot hoge omzettingssnelheden kan worden gekomen. De situatie Amsterdam-Noord toont dit duidelijk aan. Bij een relatief hoge slibbelasting treden zeer hoge nitrificatie- en denitrificatiesnelheden op die worden veroorzaakt door de zeer hoge N-belastingen.

Hieruit blijkt dat de uit praktijkresultaten berekende waarden voor de N-omzettingssnelheden weinig zeggen over het vermogen van een rwzi om te nitrificeren en denitrificeren.

Het creëren van goede procesomstandigheden is noodzakelijk. De oorzaak voor de minder goede N-verwijdering van een aantal met de in tabellen 8 en 9 vergelijkbare rwzi's moet dan ook worden gezocht in de voor denitrificatie minder gunstige procesomstandigheden.

In het algemeen betreft het installaties met simultane denitrificatie, waarbij door de beperkte regelingsmogelijkheden en de vaak sterke schommelingen in BZV- en N-belasting moeilijk optimale condities zijn te creëren, zowel voor nitrificatie als voor denitrificatie.

Een voorbeeld hiervan levert het verschil in verbruikte beluchtingsenergie voor oxydatiesloten met vergaande en minder vergaande denitrificatie. Dit verschil (35%) is aanzienlijk groter dan mag worden verwacht van uitsluitend de denitrificatie (6%, zie par.3.2.3.). Het verschil is eerder te verklaren door een niet optimale zuurstofregeling.

De slibproductiecijfers bieden, mede door de grote spreiding in de waarden (35 - 45%) voor ieder type zuiveringssysteem, geen mogelijkheid om hieraan conclusies te verbinden.

De BZV/N-verhouding is gemiddeld vrij laag. In de literatuur worden veelal minimale waarden van 4 à 5 genoemd^{4,6}. Dit kan mede de oorzaak zijn van de minder vergaande denitrificatie.

In de praktijk beproefde aanpassingen

In Nederland verloopt momenteel de denitrificatie nagenoeg uitsluitend volgens het simultane nitrificatie-denitrificatieprincipe. Een goede regeling van de procesomstandigheden is hierbij essentieel. Het ontwerp van de rwzi's is hierop niet altijd gericht, omdat in het algemeen geen eisen worden gesteld aan denitrificatie.

Om diverse redenen, zoals beperking van de nitraatbelasting van het oppervlaktewater, beperking van het energieverbruik en voorkomen van denitrificatie in de nabezinktanks, zijn op een aantal rwzi's maatregelen genomen om de denitrificatie te verbeteren.

Uit gesprekken met waterkwaliteitsbeheerders, die in het kader van dit onderzoek zijn gevoerd, zijn de volgende methoden naar voren gekomen:

- regeling beluchting

Vooral uit het oogpunt van energiebesparing wordt de laatste jaren meer aandacht besteed aan een betere regeling van de zuurstofinbreng in de beluchtingstank, waarbij het zuurstofgehalte zo laag mogelijk wordt gehouden.

Hierdoor treedt ook een verdergaande denitrificatie op, vooral omdat een toename van de anaërobie in de actief-slibvlok wordt verkregen. Een voorbeeld van een verdergaande regeling van de zuurstoftoevoer werd op de rwzi Nieuw-Lekkerkerk (schreiber-systeem, 7000 i.e.) toegepast ⁵⁶.

Overdag, wanneer de grootste aanvoer plaatsvond, werd het zuurstofgehalte zeer laag gehouden, zodat de denitrificatie werd bevorderd. 's Nachts werd een tweede blower een aantal uren ingeschakeld zodat nitrificatie optrad. Hierdoor werd optimaal gebruik gemaakt van de lagere elektriciteitsstarieven in de nachtperiode. De rwzi is nu volledig belast, zodat deze schakeling niet meer wordt toegepast.

Op een aantal laag belaste actief-slibinstallaties met propstroom en bellenbeluchting in beheer bij het Zuiveringschap West-Overijssel, wordt de luchttoevoer naar het eerste compartiment van de beluchting zodanig teruggeregeld, dat juist voldoende wordt gemengd, maar het water-slibmengsel in deze zone anoxisch is. In combinatie met een hoge retourslibstroom wordt de denitrificatie verbeterd;

- alternerend beluchten

De beluchting wordt hierbij een bepaalde tijd geheel stilgezet. Op de rwzi Oudeschild is een aparte mixer geïnstalleerd om toch een menging in de oxydatiesloot te handhaven. Het nitraatgehalte in het effluent daalde hierdoor van 19 mg/l naar 0,9 mg/l (jaargemiddelde).

Op de rwzi's Haarlem-Schalkwijk (laag belast actiefslib met 1 puntbeluchter) en Hazerswoude-Dorp (carrousel) worden 's nachts de puntbeluchters een bepaalde periode stilgezet.

De rwzi Haarlem-Schalkwijk heeft hoge piekbelastingen ($k = 0,1 - 0,5$ kg BZV/kg d.s.d) zodat de zuiveringsresultaten niet optimaal

zijn. De denitrificatie verloopt echter toch redelijk (verwijderingspercentages: BZV: 78%, N-Kj: 65% en N-totaal: 52%). De rwzi Hazerswoude-Dorp zuivert goed (verwijderingspercentages BZV: 97%, N-Kj: 85% en N-totaal: 70%);

- invoer influent bij de denitrificatiezone

Bij oxydatiesloten met borstels of puntbeluchters is de denitrificatie verbeterd door de toevoer van influent te plaatsen aan het begin van de langste niet-beluchte zone in plaats van vlak voor de beluchting, zodat de C/N verhouding in de denitrificatiezone hoger wordt. Voorbeelden hiervan zijn de rwzi's Katwijk en Bodegraven (type carrousel). Op de rwzi De Cocksdorp (oxydatiesloot met 3 borstels en 4 benen) is de volgorde waarin de borstels in werking treden aangepast aan de plaats waar de toevoer plaatsvindt.

Betreffende de huidige situatie ten aanzien van denitrificatie in de praktijk kan nog het volgende worden opgemerkt.

Voor het optreden van nitrificatie in het gehele jaar is een slibbelasting van 0,15 kg BZV/kg d.s.d of minder noodzakelijk. Bij installaties die ongeveer op deze grens zitten is er in de winter geen ruimte aanwezig voor een anoxische zone ten behoeve van denitrificatie, omdat dan de nitrificatie zal teruglopen. In de zomer kan in een beluchtingstank met een slibbelasting van circa 0,15 kg BZV/kg d.s.d de zuurstoftoevoer zodanig worden gestuurd dat een anoxische zone ontstaat voor de denitrificatie. Indien denitrificatie het gehele jaar door is gewenst, moet een extra ruimte worden gecreëerd.

Bij onderbelasting van de rwzi's vermindert de zuurstofvraag, vooral als de slibbelasting door verlaging van het slibgehalte op de ontwerpwaarde wordt gehouden. De beluchtingscapaciteit is in het algemeen gebaseerd op de situatie zonder denitrificatie maar met nitrificatie. Bij onderbelasting ontstaat daarom vaak een situatie dat de zuurstoftoevoer niet meer tot de voor denitrificatie gewenste waarde kan worden teruggeregeld.

Bij lozing van het effluent op rijkswater moet een lozingsheffing worden betaald gebaseerd op de BZV en N-Kj-vracht die wordt geloosd. De bedrijfsvoering van dergelijke rwzi's wordt dan ook gericht op zo volledig mogelijke nitrificatie. Beperking van het nitraatgehalte door denitrificatie wordt veelal niet nagestreefd om het risico van verminderde nitrificatie en daarmee hogere effluentheffingen te vermijden.

Lozing op polderwater beïnvloedt in ernstiger mate de kwaliteit van het ontvangende water, zodat op rwzi's die op polderwater lozen bij de bedrijfsvoering meer met denitrificatie rekening wordt gehouden. Sterke fluctuaties in de aanvoer resulteren ook in sterke variaties van de slibbelasting, waardoor met name de nitrificatie kan worden verstoord. Bij deze rwzi's zal voor nitrificatie dan ook een overcapaciteit aanwezig moeten zijn. Benutting van deze overcapaciteit voor denitrificatie is dan ook niet of nauwelijks mogelijk.

MOGELIJKHEDEN TER VERBETERING VAN DENITRIFICATIE OP NEDERLANDSE RWZI'S

In het vorige hoofdstuk is een overzicht gegeven van de stand van zaken van de denitrificatie op rwzi's. Op basis hiervan wordt een selectie gemaakt van aanpassingen die voor de huidige Nederlandse praktijksituatie perspectieven lijken te bieden.

De uitwerking van de alternatieven zal zich richten op de volgende typen rwzi's:

- zeer laag belaste actief-slibinstallaties (circuits)
 - . circuits met puntbeluchting of borstelbeluchting
 - . circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing; bij een aantal van deze systemen is een niet beluchte ruimte in de vorm van een binnenring aanwezig;
- laag belaste actief-slibinstallaties
 - . propstroomreactoren met bellenbeluchting
 - . gemengde tanks met puntbeluchting.

De aanpassingsmogelijkheden voor andere systemen, waarbij nitrificatie optreedt, zijn veelal af te leiden uit de bovenstaande systemen (o.a. twee-trapsinstallaties), ofwel de systemen zijn zo specifiek dat een algemene uitwerking niet zinvol is.

Bij de uitwerking van de denitrificatiemogelijkheden is geen rekening gehouden met specifieke situaties op een rwzi. In de vorige hoofdstukken is op de invloed van een aantal van deze aspecten ingegaan (o.a. defosfatering en sterke fluctuaties in aanvoer). -

In paragraaf 3.3 zijn de meest aantrekkelijke systemen voor de denitrificatie weergegeven. Een aantal hiervan wordt in de praktijk reeds toegepast.

Deze systemen zijn:

- één- of tweeslibsoortensysteem met voor-denitrificatie;
- één-slibsoortensysteem met altemnerende beluchting;
- één-slibsoortensysteem met simultane denitrificatie.

Naast de keuze van het denitrificatiesysteem is het ook van belang om de procesomstandigheden voor denitrificatie te verbeteren. Hierbij spelen met name een rol:

- goede regelbaarheid van de zuurstoftoevoer;
- beschikbaarheid van een adequate C-bron;
- beschikbaarheid van nitraat;
- grootte van anoxische ruimte.

Nadere analyse van de denitrificatiemethoden en procesomstandigheden voor de verschillende zuiveringssystemen geeft het volgende beeld:

voor-denitrificatie

- bij circuits met oppervlaktebeluchting is de beschikbare beluchtingsruimte voldoende groot om zowel nitrificatie als denitrificatie te laten plaatsvinden, terwijl goede mogelijkheden aanwezig zijn om door zuurstofregeling anoxische zones te creëren.

Een dure voor-denitrificatieruimte is dan ook niet zinvol. Dit systeem is dan ook alleen geschikt voor laag belaste actief-slib-systemen ($k = 0,1-0,25$ kg BZV/kg d.s.d) en voor circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing waarbij de beluchting meestal homogeen over de beluchtingstank plaatsvindt;

- met een één-slibsoortensysteem is een goede samenstelling van het slib te verkrijgen voor BZV-verwijdering, nitrificatie en denitrificatie. De door middel van het twee-slibsoortensysteem te realiseren verhoging van de denitrificatiesnelheid, waardoor een kleinere denitrificatieruimte nodig is, weegt niet op tegen de extra benodigde bezinktank en de gecompliceerde bedrijfsvoering. Toepassing van het twee-slibsoortensysteem lijkt dan ook niet zinvol;
- bij de voor-denitrificatie vormt het influent een goede C-bron;
- het handhaven van anoxische omstandigheden geschiedt door recirculatie van nitraat uit de afvoer van de beluchtingstank (eventueel via het retourslib). Van belang is dat de grootte van de voor-denitrificatieruimte goed is afgestemd op de hoeveelheid nitraat die wordt gerecirculeerd;
- bij sommige circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing (o.a. type landox) is de mogelijkheid aanwezig om de beluchtingselementen zodanig te plaatsen dat anoxische zones worden gecreëerd, zodat voor-denitrificatie dan niet zinvol is. Voor de overige bestaande systemen is voor-denitrificatie een mogelijkheid wanneer simultane denitrificatie via verbetering van de zuurstofregeling niet het gewenste resultaat geeft. Voor nieuwe rwzi's is een voor-denitrificatieruimte in de vorm van een onbeluchte binnenring aantrekkelijk, zoals de bestaande rwzi's reeds aangeven. Hierbij is een voldoende grote denitrificatieruimte en een goede nitraatrecirculatie van belang. In de bestaande installaties met denitrificatieruimte zijn zeker verbeteringen mogelijk.

alternerende beluchting

- bij systemen met bellenbeluchting is het niet wenselijk om de beluchting uit te schakelen in verband met mogelijke verstopping van de beluchtingselementen;
- uit de praktijkresultaten is gebleken, dat bij circuits veelal de mogelijkheid aanwezig is, om via anoxische zones goede denitrificatie te verkrijgen; ook met alternerend beluchten zijn goede ervaringen opgedaan; omdat bij circuits veelal geen verdergaande denitrificatie noodzakelijk is, wordt alternerend beluchten voor dit zuiveringssysteem niet nader uitgewerkt;
- alternerend beluchten is dus alleen voor laag belaste actief-slibsystemen met puntbeluchting interessant;
- door een goede aan- en uitregeling van de beluchting dienen optimale procesomstandigheden in de praktijk te worden vastgesteld; hierbij moet ermee rekening worden gehouden dat de nitrificatie niet wordt verstoord door een te korte duur van de beluchting, waardoor de langzaam groeiende nitrificerende bacteriën niet goed tot ontwikkeling komen.

simultane denitrificatie

- bij simultane denitrificatie zijn de volgende twee methoden toepasbaar:
 - . in de gehele beluchtingstank een zodanig lage zuurstofconcentratie handhaven, dat in de actief-slibvlok anoxische condities optreden
 - . in de beluchtingstank zones creëren met anoxische omstandigheden door middel van een ongelijkmatige zuurstoftoevoer;
- anoxische zones kunnen bij circuits met oppervlaktebeluchting worden verkregen door de O₂-regeling in de niet beluchte benen hier specifiek op in te stellen. De denitrificatie kan nog worden bevorderd door ondermeer de influenttoevoer aan het begin van de anoxische zone te plaatsen; wanneer meerdere beluchters worden toegepast, kunnen ook één of meer beluchters periodiek worden uitgeschakeld om zo de anoxische zone te vergroten;
- bij laagbelaste actief-slibsystemen met propstroming en bellenbeluchting dient de anoxische zone aan het begin van de tank te worden gesitueerd om een goede C-bron te hebben. De zuurstoftoevoer naar het begin van de tank zal veelal moeten worden aangepast. Hierbij is het van belang dat voldoende menging in dit gedeelte wordt gehandhaafd. Daarnaast zal aan de nitraatrecirculatie, eventueel via de retourslibstroom, voldoende aandacht moeten worden besteed.

Bij dit systeem is het essentieel, dat de nitrificatiecapaciteit niet terugloopt. In de winter kan daarom waarschijnlijk niet worden gedenitrificeerd;
- bij gemengde tanks is het creëren van anoxische zones alleen mogelijk door de tank om te bouwen tot een systeem met compartimenten, zodat een beperkte propstroming ontstaat. In het eerste compartiment kan overeenkomstig het hiervoor beschreven systeem worden gedenitrificeerd. Deze methode is alleen toepasbaar wanneer de beluchtingstank meerdere beluchters heeft. Ook hier is de verstoring van de nitrificatie mogelijk;
- bij de meeste circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing is het niet mogelijk om anoxische zones te creëren. Hier dient dan ook de methode met anoxische condities in de actief-slibvlok te worden toegepast. Een fijne zuurstofregeling is hiervoor noodzakelijk;
- bij circuits met oppervlaktebeluchting is gezien de vorm van de beluchtingsruimte het systeem met uitsluitend anoxische condities in de slibvlok niet interessant;
- bij volledig gemengde systemen met puntbeluchting geeft deze methode kans op verstoring van de nitrificatie.

Op basis van de bovenstaande overwegingen kan de volgende selectie worden gemaakt voor een nadere uitwerking:

zuiveringssysteem

1 circuits

maatregelen

: optimalisatie zuurstoftoevoer al dan niet met extra menging

- | | | | |
|---|---|---|---|
| 2 | circuits met bellenbeluchting en binnenring voor denitrificatie | : | verbeteren nitraattoevoer door middel van recirculatie |
| 3 | propstroomsystemen | : | creëren van anoxische zone aan het begin van de beluchtingstank door middel van aanpassing beluchtingssysteem, al dan niet met vergroting van nitraatrecirculatie |
| 4 | volledig gemengd systeem | : | toepassing altemnerend beluchten |
| 5 | volledig gemengd systeem | : | compartimentering beluchtingstank en optimaliseren van zuurstoftoevoer en nitraatrecirculatie (alleen voor bepaalde typen bruikbaar) |
| 6 | propstroom, volledige menging en circuits met bellenbeluchting | : | extra voor-denitrificatie |
| 7 | propstroom, volledige menging | : | alleen bij speciale typen kan als alternatief voor 6 gebruik worden gemaakt van de voorbezinktank als voor-denitrificatieruimte onder droogweeomstandigheden. |

In de volgende hoofdstukken worden de alternatieven nader uitgewerkt op basis van algemeen gehanteerde richtwaarden. Voor een specifieke situatie kunnen de mogelijke aanpassingen worden uitgewerkt op de wijze zoals is aangegeven.

6 UITWERKING AANPASSINGSMOGELIJKHEDEN

6.1 Uitgangspunten

De gehanteerde uitgangspunten voor de dimensioneringsgrondslagen en zuiveringsprocessen zijn zoveel mogelijk gebaseerd op "gemiddelde" condities. Deze generalisering houdt tegelijkertijd in dat in de praktijk incidenteel sterk afwijkende omstandigheden kunnen optreden.

Bij de kostencalculatie is geen rekening gehouden met extra voorzieningen die vanwege de terreingesteldheid, ruimteverdeling, en dergelijke getroffen zouden moeten worden. De geraamde kosten kunnen derhalve in dit opzicht als minimumprijzen worden beschouwd.

6.1.1 samenstelling afvalwater

Voor de berekeningen is als voorbeeld de volgende gemiddelde samenstelling van huishoudelijk afvalwater aangenomen ⁵⁵ (tabel 10). De berekeningen zijn zodanig opgezet dat zij ook voor specifieke situaties kunnen worden uitgevoerd.

	ruw influent	voorbezonden afvalwater
volume (l/i.e.d)	188	188
BZV-vracht (g/i.e.)	54	35
concentratie (mg/l)	290	185
N-kj-vracht (g/i.e.)	11,8	10,4*
concentratie (mg/l)	63	55
BZV/N-verhouding	4,6	3,4

* praktijkgegevens 1982 van 31 rwzi's

Tabel 10. Uitgangspunten hoeveelheid en samenstelling afvalwater

6.1.2 nitrificatie

Denitrificatie kan alleen dan worden verbeterd, als de nitrificatie goed blijft verlopen. Een voorwaarde hiervoor is dat de slibbelasting maximaal 0,15 kg BZV/kg d.s.d bedraagt bij een temperatuur van 8°C en maximaal 0,25 kg BZV/kg d.s.d bij een temperatuur van 15°C (bij een pH = 7 en een O₂-gehalte van 1,5 mg/l; zie figuur 1, par.3.2.1).

In veel gevallen houdt verbetering van de denitrificatie in het creëren van een anoxische zone in de beluchtingsruimte. Weliswaar veranderen de slibbelasting, slibproductie en slibleeftijd hierdoor in principe niet, maar de samenstelling - in het bijzonder het aandeel van de nitrificeerders in het slib - zal wel wijzigingen ondergaan.

Nitrificerende bacteriën kunnen zich alleen in het beluchte deel vermenigvuldigen. In het actiefslib zullen dus minder nitrificerende bacteriën voorkomen, zodat uitspoeling van de nitrificerende flora eerder zal optreden. In principe moet de slibleeftijd over het beluchte deel voldoende groot blijven.

Als vuistregel kan worden gehanteerd, dat de slibbelasting, berekend over alleen het beluchte deel kleiner dan 0,15 kg BZV/kg d.s.d moet zijn (bij 8°C) om nitrificatie te waarborgen²⁹.

Dit gegeven dient dan ook als uitgangspunt bij de dimensionering van anoxische zones.

In tabel 11 is voor 8°C en 15°C aangegeven hoe groot de denitrificatiezone kan zijn, afhankelijk van de slibbelasting berekend over de totale procesruimte.

	k kg BZV/kg d.s.d	minimaal nitrificatie- deel (%)	maximaal denitrificatie- deel (%)
8°C	0,05	33	67
	0,1	67	33
	0,125	83	17
	0,15	100	0
15°C	0,05	20	80
	0,1	40	60
	0,125	50	50
	0,15	60	40
	0,20	80	20
	0,25	100	0

Tabel 11. Maximale denitrificatiezone bij verschillende slibbelasting

6.1.3 temperatuur

De temperatuur speelt een belangrijke rol in het nitrificatie-denitrificatieproces. Uit een indicatieve inventarisatie van de heersende temperatuur op Nederlandse rwzi's¹⁸ is het volgende gebleken:

de temperatuur is 5 maanden per jaar hoger dan 15°C
 4 maanden per jaar 10 - 15°C
 3 maanden per jaar 7 - 10°C.

Bij de berekeningen is onderscheid gemaakt tussen de circuits en de overige rwzi's. Het zuiveringsrendement van de circuits ($k = 0,05$) is minder gevoelig voor de temperatuur, aangezien de verblijftijd lang is en daardoor de slibleeftijd hoog.

Wel zal de gemiddelde temperatuur lager zijn, dan bij hoger belaste installaties door sterkere afkoeling¹⁴. Voor de circuits is derhalve één berekening gemaakt voor een gemiddelde temperatuur van 10°C.

De berekeningen voor de hoger belaste actief-slibinstallaties zijn gemaakt voor 2 temperaturen: 8°C (als gemiddelde wintertemperatuur) en 15°C (als gemiddelde zomertemperatuur).

De nauwkeurigheid van deze berekeningen bedraagt circa 25%.

6.1.4 kosten

De berekende investeringskosten zijn gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

- er is een fundering op staal mogelijk;
- de grondwaterstand is dermate laag, dat geen bronnerings- en op-drijvingsvoorzieningen nodig zijn;
- voor de voorgestelde aanpassingen is voldoende vrije ruimte aanwezig, zodat geen extra voorzieningen nodig zijn, zoals opbreken van wegen of omleggen van kabels en leidingen;
- de elektrotechnische aanpassingen zijn mogelijk door het inbouwen in bestaande schakelruimten.

Voor de totale investeringskosten zijn de aanneemsommen verhoogd met 60% bijkomende kosten zoals advieskosten en BTW (conform NEN 2631). De nauwkeurigheid van de ramingen is circa 15%. Het prijspeil van 1 december 1984 is gehanteerd.

De kosten zijn berekend volgens de "contante waarden"-methode, ten-einde vergelijking der alternatieven mogelijk te maken.

Hiertoe zijn de volgende gegevens gebruikt:

- disconteringsvoet (= rente)	8%
- algemene inflatie	5%
- afschrijving civieltechnisch deel	30 jaar
- afschrijving elektro/mechanisch deel	15 jaar
- kosten onderhoud (als % van de investering)	
. civieltechnisch deel	0,5% per jaar
. elektro/mechanisch deel	2,0% per jaar
- kosten elektrische energie	f 0,25 per kWh

De "contante waarden"-methode houdt in dat alle kosten of baten herleid worden tot een waarde in een bepaald basisjaar. De herleiding geschiedt met behulp van de disconteringsvoet volgens:

$$A = \frac{A_k}{(1 + p)^k}$$

waarin: A = kosten in het basisjaar
 A_k = kosten in jaar k
 p = disconteringsvoet (fractie per jaar)
 k = beschouwd jaar

Als looptijd van het project is 15 jaar aangehouden. De restwaarde van de civieltechnische aanpassingen bedraagt dan nog circa de helft van de aanvangsinvestering.

Een positieve contante waarde betekent, dat de investering in de looptijd van 15 jaar niet wordt terugverdiend. Een negatieve contante waarde betekent, dat een netto besparing mogelijk is.

Als de contante waarde wordt gedeeld door de looptijd (15 jaar) en de vuilbelasting in i.e., levert dit de grootte-orde van het bedrag, waarmee jaarlijkse kosten per i.e. toenemen, respectievelijk lager worden (bij negatieve constante waarde).

6.2 Circuit: Optimalisatie van de zuurstoftoevoer

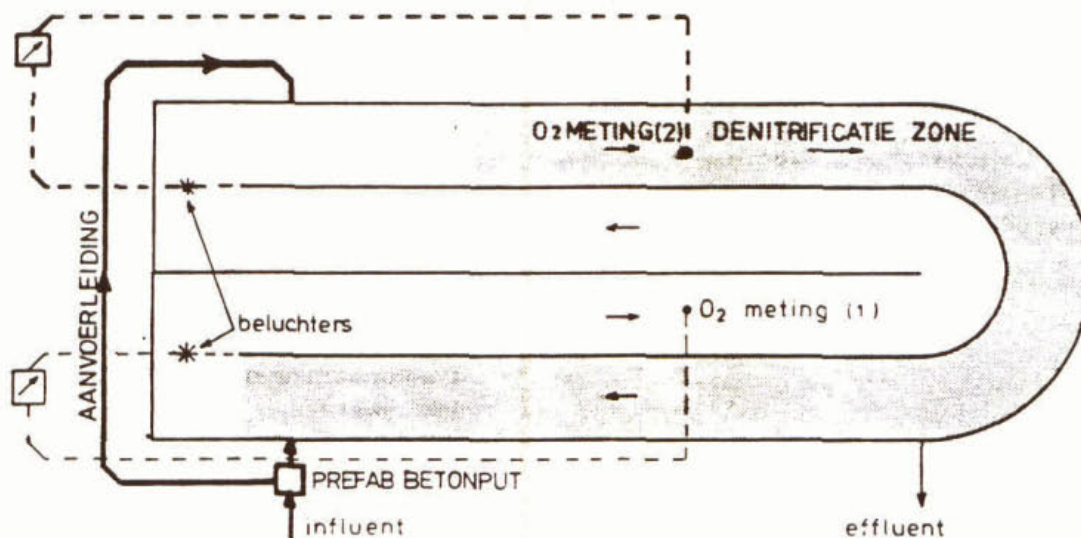
6.2.1 maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

Onvolledige denitrificatie in circuits komt in hoofdzaak voor bij onderbelaste installaties, waarbij de zuurstoftoevoer onvoldoende kan worden teruggeregeld. De berekeningen zullen daarom worden uitgevoerd voor verschillende belastingsgraden (in inwoner-equivalenten ten opzichte van de ontwerpbelasting).

Optimalisatie van de beluchting betekent in een circuit het creëren van een anoxische zone. Om deze goed te laten functioneren zijn de volgende maatregelen nodig:

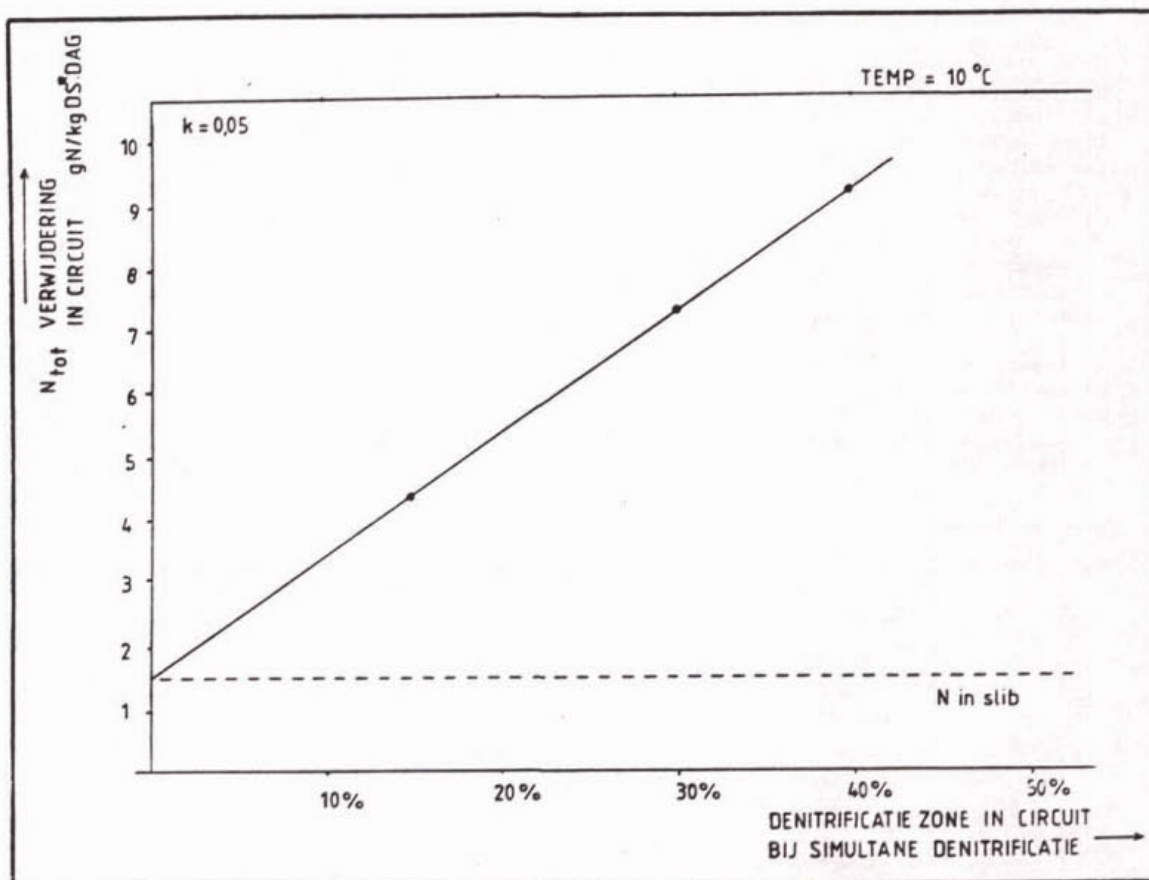
- verplaatsen van de influenttoevoer naar het begin van de anoxische zone;
- regelen van de beluchter vlak voor de anoxische zone op het zuurstofgehalte in de anoxische zone (minder dan 0,5 mg/l);
- regelen van de overige beluchters op het zuurstofgehalte in de aërobe zone (meer dan 1 mg/l);
- plaatsen van een voortstuwingspropeller in de beluchtingstank, wanneer de kans aanwezig is, dat door terugregeling van de beluchtingscapaciteit de minimaal benodigde stromingssnelheid niet meer wordt gehaald. Bij circuits met puntbeluchting is de minimaal benodigde beluchtingsenergie circa 10 W/m³ en bij borstelbeluchting circa 5 W/m³.

In figuur 7 is een voorbeeld gegeven van de aanpassingen voor een circuit met puntbeluchting. Voor circuits met borstelbeluchting zijn overeenkomstige aanpassingen te maken door middel van terugregeling-/uitschakeling van de borstels.



Figuur 7. Optimalisatie zuurstoftoevoer in circuits (gerasterd gedeelte is de denitrificatiezone)

Aan de hand van de methode Kayser ²⁹ (zie bijlage 3) kan de grootte van de denitrificatiezone worden berekend als functie van de totaalstikstofverwijdering. In figuur 8 is het resultaat van de berekening weergegeven.



Figuur 8. Grootte van de anoxische zone bij simultane denitrificatie in relatie tot de N_{tot} -verwijdering (berekend volgens Kayser)

* d.s. = drogestofhoeveelheid in gehele circuit

6.2.2 uitwerking van een voorbeeld

Als voorbeeld voor de uitwerking is gekozen voor een rwzi met een capaciteit van 20.000 i.e. Als variabele is de belastingsgraad ingevoerd. Bij de berekening is ervan uitgegaan, dat de bedrijfsvoering zodanig is, dat een slibbelasting op de ontwerpwaarde (0,05 kg BZV/kg d.s.d) wordt gehandhaafd. Het slibgehalte wordt dus verlaagd bij onderbelasting. In de praktijk wordt deze wijze van bedrijfsvoering niet altijd toegepast. Bij een lagere slibbelasting is het energieverbruik in de uitgangssituatie nog hoger dan hier is aangegeven.

	Ontwerp = 100%	belastingsgraad				
		90%	80%	70%	60%	50%
belasting (i.e.)	20.000	18.000	16.000	14.000	12.000	10.000
BZV-toevoer (kg/d)	1.080	972	864	756	648	540
N-Kj toevoer (kg/d)	237	213	190	166	142	119
slibbelasting (kg BZV/kg d.s.d)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
inhoud beluchtingstank (m ³)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
slibgehalte (kg d.s./m ³)	4,3	3,9	3,5	3,0	2,6	2,2
BZV-verwijdering	98%	98%	98%	98%	98%	98%
N-Kj-verwijdering	90%	90%	90%	90%	90%	90%
N-totaalverwijdering*						
- voor optimalisatie	75%	70%	65%	60%	55%	50%
- na optimalisatie	80%	80%	80%	80%	80%	80%
besparing O ₂ -verbruik** (kg O ₂ /d)	34	61	81	95	102	102
O ₂ -gehalte in beluchtingstank (% van verzadiging)						
- voor optimalisatie***						
- circuit met puntbeluchting	10	12	15	24	33	43
- circuit met borstelbeluchting	10	12	15	20	25	30
- na optimalisatie	5	5	5	5	5	5

Tabel 12. Procesparameters bij optimalisatie circuits als functie van de belastingsgraad

* geschatte waarden

** berekening: $2,86 \times \text{N-Kj-toevoer} \times \text{verschil N-totaalverwijdering voor en na optimalisatie}$

*** geschatte waarden op basis van de aanname, dat:

- bij borstelbeluchting de toename van de O₂-concentratie alleen t.g.v. beperkte regelmogelijkheden optreedt;
- bij puntbeluchting bij lage belastingsgraad tevens de vereiste stromingssnelheid van belang is.

Voor een goede regeling van de zuurstoftoevoer bij verschillende belastingen van de rwzi zal het regelbereik van de beluchting groot moeten zijn. In deze situatie met twee beluchters kan bijvoorbeeld een regelbereik van iedere beluchter van 50 tot 100% worden gekozen. Door een beluchter uit te schakelen (eventueel voortstuwingspropeller nodig) is een totaal regelbereik van 25 -100% aanwezig. Na optimalisatie is de totaal-N-verwijdering 8,8 kg N/kg d.s.d. Om dit te bereiken is een anoxische zone nodig van 37% (zie figuur 8).

6.2.3 kosten

Voor het aanpassen van circuits met puntbeluchters of borstelbeluchters zijn de volgende maatregelen nodig:

- verplaatsen van de influenttoevoer (extra leiding + prefab betonput, sparing maken in circuit);
- wijziging O₂-meting;

- toerenregeling op beluchter;
- eventueel plaatsen van een voortstuwingspropeller (alleen bij sterk onderbelaste installaties, waarbij door terugregeling van de beluchting de stromingssnelheid in het circuit te ver zou teruglopen).

De investeringskosten zijn als volgt geraamd:

- civieltechnische aanpassingen	f 40.000,-
- toerenregeling beluchter	f 35.000,-
- O ₂ -meting	f 10.000,-
- voortstuwingspropeller (incl. bevestigingsbrug)	f 50.000,-
- bijkomende kosten (60%)	f 81.000,-
- totale investeringskosten	
. incl. voortstuwing	f 216.000,-
. excl. voortstuwing	f 136.000,-

De aanpassingen geven een besparing op het energieverbruik van de beluchting, enerzijds door de lagere zuurstofbehoefte door de verdergaande denitrificatie, anderzijds door het lager zuurstofgehalte, dat in de beluchtingstank wordt gehandhaafd (5% i.p.v. 10 - 35% van de O₂-verzadigingswaarde). Bij een zuurstoftoevoerrendement van 1,8 kg O₂/kWh en een α -factor van 1 is de besparing op het energieverbruik:

$$\frac{1}{1,8} \times \frac{\text{O}_2\text{-behoefte vóór optimalisatie}}{(100 - \% \text{ O}_2)/100} - \frac{\text{O}_2\text{-behoefte na optimalisatie}}{0,95}$$

De energiebesparing is dan in relatie tot de belastingsgraad van de rwzi's als volgt:

belastingsgraad	100%	90%	80%	70%	60%	50%
besparing energieverbruik (kWh/d)						
. borstelbeluchting	94	133	178	238	286	318
. puntbeluchting	94	133	178	298	414	542

Tabel 13. Besparing energieverbruik

Voor een voldoende stromingssnelheid in circuits met borstelbeluchting is uitgegaan van een minimaal benodigde energieinbreng door de borstels van circa 5 W/m³. Bij een belastingsgraad van minimaal 50% is dan geen voortstuwingspropeller nodig. Bij circuits met puntbeluchting is voor de stromingssnelheid een minimale energieinbreng van circa 10 W/m³ aangehouden. Daarbij is reeds een voortstuwingspropeller nodig bij een belastingsgraad van 90% of minder. Het energieverbruik voor de voortstuwing met behulp van uitsluitend een propeller ligt in de orde van circa 1,5 W/m³. Bij een combinatie van puntbeluchters en een voortstuwingspropeller verbruikt de propeller

dus een hoeveelheid energie, die gelijk is aan circa 15% van het verschil tussen de minimaal benodigde en de werkelijk ingebrachte beluchtingsenergie.

De kosten voor de aanpassingen zijn als volgt geraamd:

	belastingsgraad					
	100%	90%	80%	70%	60%	50%
<u>circuits met borstelbeluchting</u> (geen voortstuwingspropeller)						
totale investeringskosten	f 136.000,-	f 136.000,-	f 136.000,-	f 136.000,-	f 136.000,-	f 136.000,-
onderhoudskosten (per jaar)	1.100,-	1.100,-	1.100,-	1.100,-	1.100,-	1.100,-
besparing op beluchting (per jaar)	8.600,-	12.100,-	16.200,-	21.700,-	26.100,-	20.000,-
totale nettobesparing bedrijfskosten	7.500,-	11.000,-	15.100,-	20.600,-	25.000,-	27.900,-
contante waarde over 15 jaar						
- investering (minus restwaarde	116.000,-	116.000,-	116.000,-	116.000,-	116.000,-	116.000,-
civiele investering)						
- besparing bedrijfskosten	90.000,-	133.000,-	182.000,-	248.000,-	302.000,-	336.000,-
- totale contante waarde	26.000,-	- 17.000,-	- 66.000,-	- 132.000,-	- 186.000,-	- 220.000,-
<u>circuits met puntbeluchting</u> (met voortstuwingspropeller)						
totale investering	216.000,-	216.000,-	216.000,-	216.000,-	216.000,-	216.000,-
onderhoudskosten per jaar	2.100,-	2.100,-	2.100,-	2.100,-	2.100,-	2.100,-
besparing op beluchting per jaar	8.600,-	12.100,-	16.200,-	27.200,-	37.800,-	49.500,-
energiekosten voortstuwing	-	200,-	1.900,-	3.900,-	5.600,-	7.300,-
totale nettobesparing bedrijfskosten	6.500,-	9.800,-	12.000,-	21.200,-	30.100,-	40.100,-
contante waarde over 15 jaar						
- investering (minus restwaarde	196.000,-	196.000,-	196.000,-	196.000,-	196.000,-	196.000,-
civiele investering)						
- besparing bedrijfskosten	76.000,-	118.000,-	147.000,-	256.000,-	363.000,-	484.000,-
- totale contante waarde	118.000,-	78.000,-	49.000,-	- 60.000,-	- 167.000,-	- 288.000,-

Tabel 14. Kosten voor aanpassingen bij circuits

6.2.4 conclusies

Het optimaliseren van de zuurstoftoevoer bij circuits richt zich op het creëren van een anoxische zone in het circuit door gescheiden sturing van de verschillende beluchters op de zuurstofconcentratie in de aërobe en anoxische zone.

Aan de hand van de berekeningsmethode Kayser ²⁹ kan de benodigde grootte van deze zone worden vastgesteld. In de praktijk moet de grootte hiervan liggen in de orde van 35 à 40% van het totale circuit, wat in de meeste situaties wel mogelijk is.

In de huidige praktijksituatie kan bij onderbelasting de zuurstofconcentratie veelal onvoldoende worden teruggeregeld, enerzijds vanwege het beperkte regelbereik en anderzijds door de benodigde minimale beluchtingsenergie voor de vereiste stromingssnelheid.

Hierdoor lopen de zuurstofgehalten in de beluchtingstanks bij onderbelasting aanzienlijk op, waardoor de denitrificatie vooral bij onderbelaste installaties minder goed verloopt.

Door de optimalisatie van de zuurstoftoevoer ontstaan dan ook aanzienlijke besparingen met name doordat lagere zuurstofgehalten kunnen worden gehandhaafd. De energiebesparing door denitrificatie speelt slechts een beperkte rol.

Bij circuits met puntbeluchters is het in het algemeen wel nodig om de stromingssnelheid op te voeren door het plaatsen van voortstuwingspropellers.

Bij de circuits met borstelbeluchting (zonder voortstuwingspropellers) weegt de te bereiken besparing reeds op tegen de extra investeringen bij zeer geringe onderbelasting.

Wanneer voortstuwingspropellers moeten worden geïnstalleerd zijn de kapitaalslasten in het algemeen lager dan de te bereiken nettobesparingen bij een belastingsgraad beneden circa 75%, vooral vanwege het feit, dat vóór optimalisatie al bij beperkte terugregeling van de beluchting, de minimaal vereiste stroomsnelheid wordt bereikt.

Bij de berekeningen is ervan uitgegaan, dat bij onderbelasting de ontwerp-slibbelasting gehandhaafd blijft door verlaging van het slibgehalte. De optimalisatie wordt financieel gezien nog gunstiger wanneer in de actuele situatie met een lagere slibbelasting wordt gewerkt.

6.3 Circuit met denitrificatieruimte: vergroten van de recirculatie

6.3.1 maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

Bij circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing (o.a. typen schreiber en rotoflow) is in een aantal situaties een aparte denitrificatieruimte aanwezig in de vorm van een niet beluchte binnenring in de ronde tank. Hoewel de denitrificatie in dit type beter is dan in de tanks zonder aparte denitrificatieruimte (zie par. 4.2) verloopt de denitrificatie vooral bij onderbelaste installaties niet optimaal. De oorzaken hiervan zijn:

- de beperkte inhoud van de denitrificatieruimte;
- de onvoldoende recirculatie van nitraat, die nagenoeg alleen via de retourslibstroom verloopt.

Voor de verbetering van de denitrificatie zijn de volgende maatregelen mogelijk:

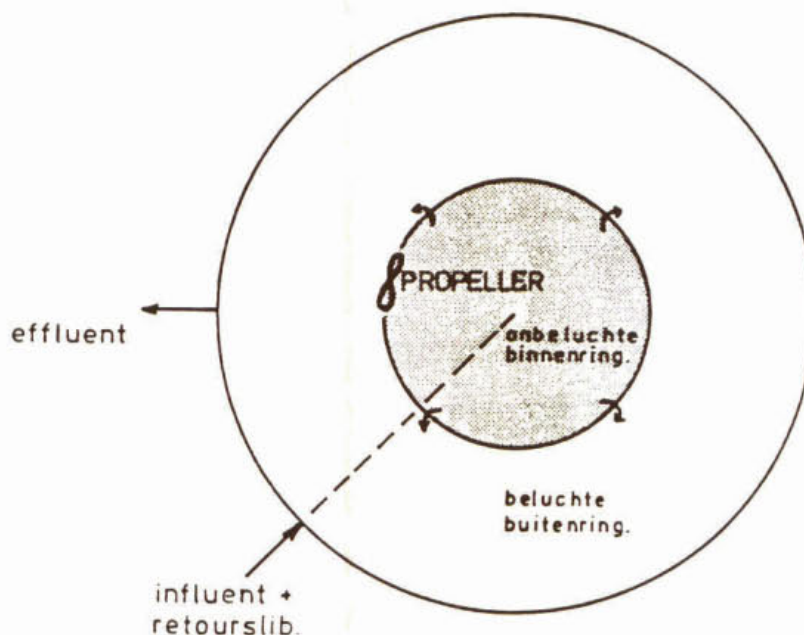
- bevorderen van de recirculatie van nitraat door een directe retourstroom vanuit de beluchte buitenring naar de denitrificatieruimte te creëren;
- verbetering van de zuurstofregeling in de buitenring, zodat een O_2 -gehalte van circa 1 mg/l kan worden gehandhaafd. Hierdoor vindt ook gedeeltelijk simultane denitrificatie door anaërobie in de slibvlok plaats, die nodig is vanwege de veelal te beperkte inhoud van de denitrificatieruimte.

Aan de hand van berekeningsmethode Kayser (bijlage 3) kan de denitrificatie in de denitrificatiezone worden vastgesteld, zodat voor iedere specifieke situatie de noodzaak van een aanvullende simultane denitrificatie in de buitenring kan worden vastgesteld.

Tengevolge van de gescheiden voortstuwing heeft het terugregelen van de zuurstofinbreng geen consequenties voor de stromingssnelheid in

het circuit. De bepalende factoren hiervoor zijn het regelbereik van de blowers en de minimaal benodigde luchttoevoer door de beluchtingselementen om verstoppingen te voorkomen. In bepaalde gevallen zal het nodig zijn om het regelbereik van de blowers te vergroten door aanpassing van het toerental of bijplaatsen van een kleinere blower en om eventueel tijdelijk een deel van de beluchtingselementen te verwijderen.

Ten behoeve van de verhoging van de recirculatie kan een propeller worden geplaatst in de wand tussen de binnen- en buitenring (zie figuur 9).



Figuur 9. Verhoging nitraattoevoer naar binnenring (gerasterd deel is denitrificatiezone)

6.3.2 uitwerking van een voorbeeld

Als voorbeeld voor de uitwerking is gekozen voor een rwzi met een capaciteit van 20.000 i.e. Bij de berekening is ervan uitgegaan, dat de rwzi overeenkomstig het ontwerp wordt belast en een goede zuurstofregeling kan worden toegepast. Voor een verbetering van de zuurstofregeling wordt naar de overige paragrafen van dit hoofdstuk verwezen. De berekeningen worden uitgevoerd voor verschillende grootten van de binnenring.

belasting	20.000 i.e.
BZV-toevoer	1080 kg BZV/d
N-Kj-toevoer	237 kg N-Kj/d
slibbelasting	0,05 kg BZV/kg d.s.d. (op totale inhoud tank)
slibgehalte	4,3 kg d.s./m ³

inhoud beluchtingstank (m ³)	a	b	c
- denitrificatieruimte	750	1000	1250
- beluchtingsruimte	4250	4000	3750
- totaal	5000	5000	5000
BZV-verwijdering	98%	98%	98%
N-Kj-verwijdering	90%	90%	90%
N-Kj in effluent (kg N/d)	24	24	24
N in spuislib* (kg N/d)	30	30	30
NO ₃ -verwijdering door simultane denitrificatie** (kg N/d)	55	52	48
NO ₃ -verwijdering in denitrificatieruimte (kg N/d)			
. met beperkte recirculatie***	64	66	68
. met optimale recirculatie*	100	125	145
NO ₃ -N in effluent (kg N/d)			
. met beperkte recirculatie	64	65	67
. met optimale recirculatie	28	6	0
benodigde totale recirculatiefactor voor optimale denitrificatie	3,6	21	∞
reële max. recirculatiefactor (incl. retourslib)	3,6	10	10
NO ₃ -N in effluent (kg N/d)	28	12	12
N-totaal-verwijdering (%)	78%	85%	85%

* berekeningen volgens bijlage 3

** uitgaande van een denitrificatiesnelheid van 3 g N/kg d.s.d in beluchtingsruimte

*** uitgaande van recirculatieverhouding 1:1.

Uit de bovenstaande waarden blijkt, dat de simultane denitrificatie in de beluchtingsruimte nog een belangrijke rol speelt. Mogelijk kunnen nog hogere simultane denitrificatiesnelheden worden bereikt door een betere zuurstofregeling in de beluchtingsruimte. Het risico van een verminderde nitrificatie is dan echter wel aanwezig.

In de drie alternatieven wordt de volledige denitrificatiecapaciteit bij beperkte recirculatie (factor 1:1) niet bereikt tengevolge van een gebrek aan nitraat.

Door optimalisatie van de recirculatie kan een zeer vergaande denitrificatie worden bereikt wanneer de denitrificatieruimte tenminste circa 20% van de totale beluchtingstank vormt. Hoewel nog verdergaande denitrificatie mogelijk is lijkt het niet zinvol om een recirculatiefactor groter dan circa 10 te hanteren. Bij een denitrificatieruimte van 15% van de tank is een toename van de recirculatieverhouding tot meer dan 3,6 niet zinvol omdat dan de maximale denitrificatiecapaciteit van deze ruimte bereikt is.

6.3.3 kosten

Uitgaande van een methode voor de verhoging van de recirculatiefactor door middel van het plaatsen van een propeller in een aan te brengen sparing in de wand tussen de binnen- en buitenring worden de totale investeringskosten als volgt geraamd:

- civiel-technische aanpassingen	f 10.000,-
- propeller	f 30.000,-
	f 40.000,-
- bijkomende kosten (60%)	f 24.000,-
- totale investering	f 64.000,-.

De aanpassingen geven een besparing op het energieverbruik van de beluchting als gevolg van de verdergaande denitrificatie.
De besparing kan als volgt worden berekend:

	grootte denitrificatieruimte		
	15%	20%	25%
NO ₃ -N-verwijdering in denitrificatieruimte (kg N/d)			
- voor optimalisatie	64	66	68
- na optimalisatie	100	119	123
besparing O ₂ -toevoer (2,86 x Δ NO ₃ -N kg O ₂ /d)	103	152	157
besparing energieverbruik (kWh/d)	45	66	68

Tabel 15. Besparingen door aanpassingen circuits met denitrificatieruimte

De totale kosten voor de aanpassingen zijn dan als volgt:

	grootte denitrificatieruimte		
	15%	20%	25%
totale investeringskosten	f 64.000,-	f 64.000,-	f 64.000,-
onderhoudskosten (per jaar)	650,-	650,-	650,-
besparing op beluchting (per jaar)	4.100,-	6.000,-	6.200,-
energiekosten propeller	800,-	2.200,-	2.200,-
totale nettobesparing	f 2.650,-	f 3.150,-	f 3.350,-
contante waarde over 15 jaar			
- investering (minus restwaarde)	59.000,-	59.000,-	59.000,-
- jaarlijkse besparing	32.000,-	38.000,-	40.000,-
- totale contante waarde	27.000,-	21.000,-	19.000,-

Tabel 16. Kosten voor aanpassingen circuits met denitrificatieruimte

6.3.4 conclusies

Bij circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing is in enkele situaties een denitrificatieruimte als binnenring aanwezig. De denitrificerende werking hiervan is echter niet optimaal, vooral door de beperkte grootte van deze ruimte en de onvoldoende recirculatie van nitraat.

Verhoging van de nitraatrecirculatie kan in deze systemen worden verkregen door een propeller in de wand tussen de binnen- en buitenring te plaatsen. Het nitraatgehalte in het effluent kan hierdoor met 55 - 85% worden verminderd, afhankelijk van de denitrificatiecapaciteit van de denitrificatieruimte en de toegepaste recirculatiefactor. Bij kleine denitrificatieruimten (minder dan circa 20% van de totale tank) is de denitrificatiecapaciteit beperkt, zodat het opvoeren van de recirculatiefactor slechts tot een bepaalde waarde zinvol is. Bij voldoende grote denitrificatieruimten blijft de denitrificatie toenemen bij vergroting van de recirculatiefactor. Boven een waarde voor de recirculatiefactor van circa 10 wordt het effect echter klein.

De extra investeringskosten voor de aanpassingen zullen in het algemeen niet opwegen tegen de besparingen die worden bereikt op het energieverbruik van de beluchting.

6.4 Propstroomsystemen: optimalisatie van de zuurstoftoevoer

6.4.1 maatregelen ter verbetering van denitrificatie

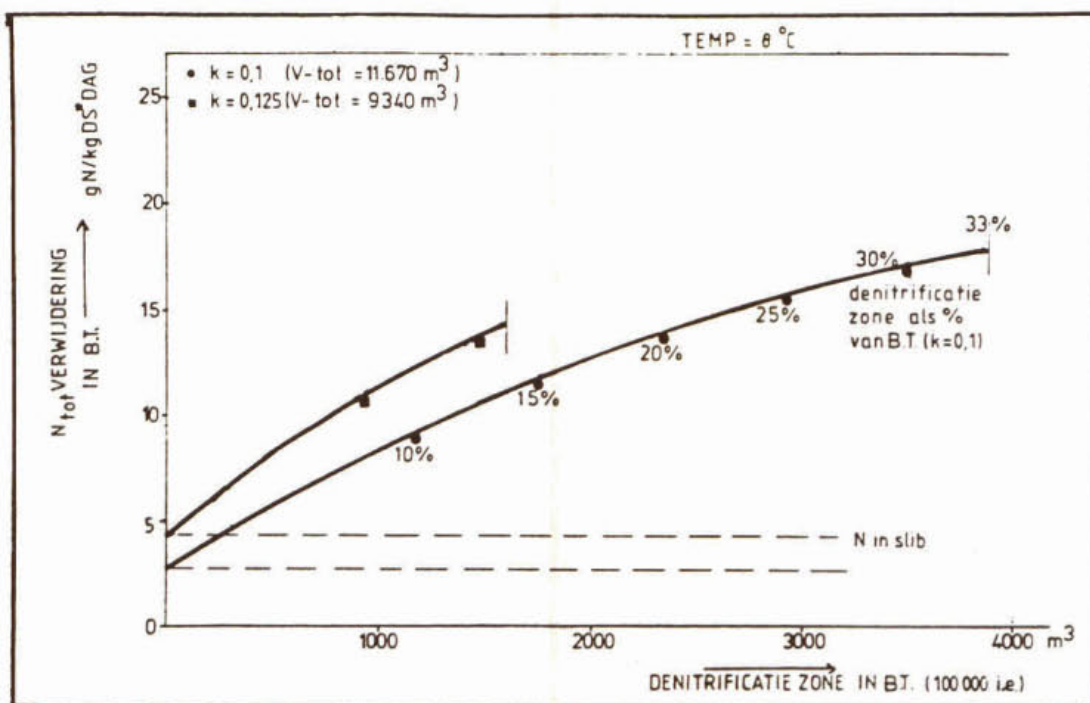
Bij een beluchtingstank in de vorm van een propstroomreactor kan het beste vóór in de beluchtingsruimte één anoxische zone worden gemaakt. Meerdere anoxische zones leveren geen extra voordeel op, terwijl de kans dat de nitrificatie wordt verstoord steeds groter wordt.

Bij een slibbelasting van 0,1 kg BZV/kg d.s.d kan een anoxische zone ter grootte van 33% van de beluchtingsruimte het gehele jaar fungeren, bij een slibbelasting groter dan 0,15 kg BZV/kg d.s.d alleen in de zomer (zie ook tabel 11).

De beluchtingselementen uit het eerste deel van de beluchtingsruimte moeten worden verplaatst naar het tweede deel van de tank. Eén of twee beluchtingsstrengen aan de zijkant van de beluchtingstank blijven fungeren ten behoeve van de menging (een alternatief hiervoor is plaatsing van een mechanische menger).

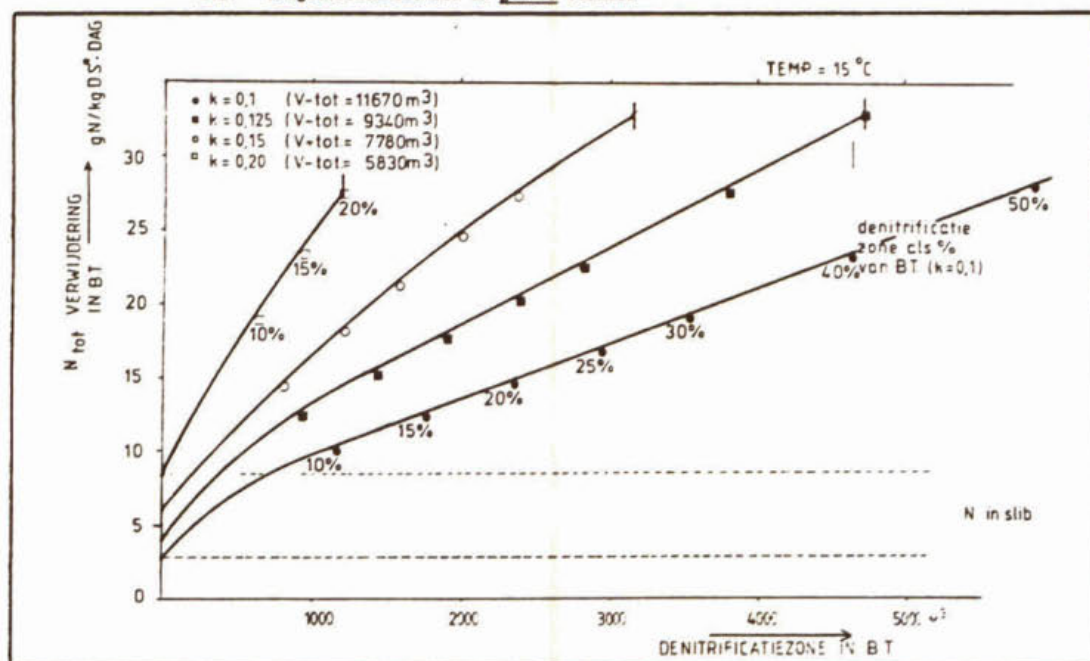
Tevens is een verhoging van de recirculatie nodig ten behoeve van de nitraattoevoer. Hiervoor kan in veel gevallen een vijzel met een geringe opvoerhoogte worden gebruikt.

In de figuren 10 en 11 is aangegeven hoeveel kg N-totaal per kg d.s. (in de gehele beluchtingstank) per dag kan worden verwijderd bij een bepaalde denitrificatiezone. De figuren zijn gegeven voor een rwzi met een capaciteit van 100.000 i.e. en een slibgehalte in de beluchtingstank van 3 kg d.s./m³. De berekening is uitgevoerd volgens de methode Kayser (bijlage 3) voor zowel de winter- als zomersituatie. In de figuren is tevens aangegeven wanneer de nitrificatie beperkend wordt.



Figuur 10. N-totaal-verwijdering (denitrificatie + assimilatie) als functie van de grootte van de denitrificatiezone voor een rwzi van 100.000 i.e. bij 8°C

* d.s. = drogestofhoeveelheid in gehele circuit



Figuur 11. N-totaalverwijdering (denitrificatie + assimilatie) als functie van de grootte van de denitrificatiezone voor een rwzi van 100.000 i.e. bij 15°C

* d.s. = drogestofhoeveelheid in gehele circuit

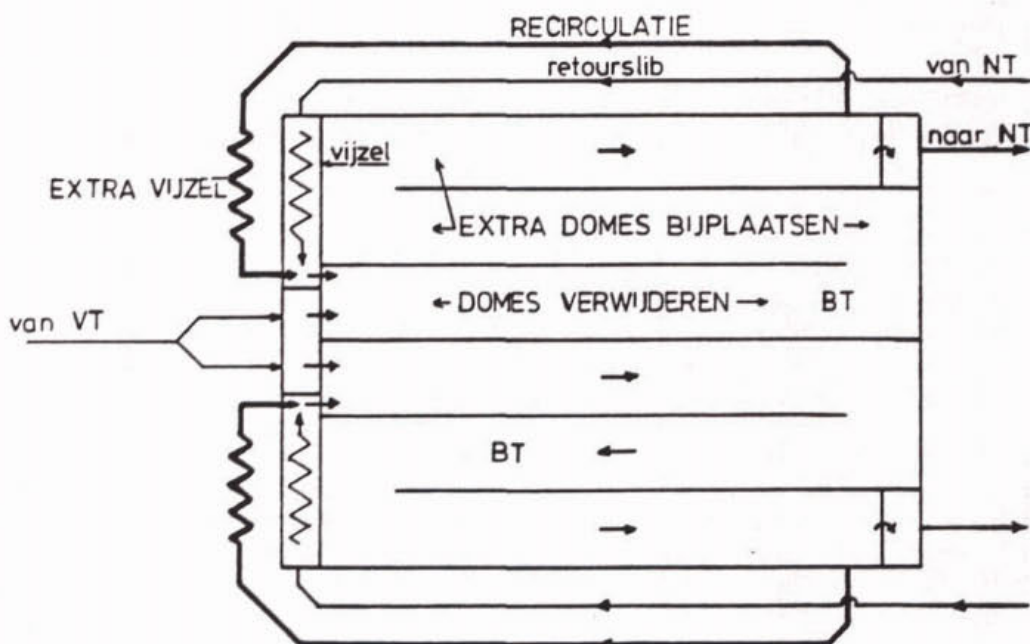
6.4.2 uitwerking van een voorbeeld

Voor de uitwerking van deze methodiek is gekozen voor een rwzi met een actuele capaciteit van 100.000 i.e. die wordt bedreven op een slibbelasting van 0,10 kg BZV/kg d.s.d. De beluchtingstank bestaat uit drie gelijke compartimenten die in propstroom worden doorstroomd.

De volgende aanpassingen worden aangebracht:

- verwijderen beluchtingselementen in het eerste compartiment van de beluchtingstank; deze elementen worden toegevoegd aan het tweede compartiment; ten behoeve van de menging blijft in het eerste compartiment een beperkt aantal beluchtingselementen aanwezig;
- plaatsen van een vijzel ten behoeve van de recirculatie vanuit de afloop van de beluchtingstank.

Er wordt aangenomen dat de zuurstoftoevoer goed kan worden geregeld. In figuur 12 zijn de wijzigingen aangegeven.



Figuur 12. Aanpassing propstroomstelsel (de aanpassingen zijn in hoofdletters aangegeven)

De volgende dimensioneringsgrondslagen kunnen worden gehanteerd:

actuele belasting	100.000 i.e.
BZV-toevoer beluchting	3500 kg BZV/d
N-Kj-toevoer beluchting	1040 kg N-Kj/d
slibbelasting	0,10 kg BZV/kg d.s.d

slibgehalte beluchting	3,0 kg d.s./m ³	
totale inhoud beluchtingstanks	11.670 m ³	
aantal tanks	4	
BZV-verwijdering	95%	
N-Kj-verwijdering	85%	
N-Kj in effluent	156 kg N/d	
N in spuislib*	95 kg N/d	
N-verwijdering door denitrificatie		
. voor optimalisatie**	269 kg N/d	
. na optimalisatie*	zomer: 618 kg N/d	
	winter: 554 kg N/d	
	gem.: 586 kg N/d	
NO ₃ -N in effluent		
. voor optimalisatie	520 kg N/d	
. na optimalisatie	203 kg N/d	
besparing O ₂ -verbruik	2,86 x (586-269) = 907 kg O ₂ /d	
besparing energieverbruik	394 kWh/d (2,3 kg O ₂ /kWh)	
benodigde totale recirculatiefactor:	zomer: 4,6	
	winter: 3,4	
	gem.: 3,9	
N-totaalverwijdering	in beluchting	totale rwzi
. voor optimalisatie	35%	43%
. na optimalisatie	65%	70%

* berekend volgens bijlage 3

** aangenomen, dat een totaal-N-verwijdering van 35% in de beluchting optreedt.

Uit het bovenstaande blijkt, dat door de aanpassingen een aanzienlijke toename van de nitraatverwijdering is te realiseren. Zeer lage waarden voor totaal-N in het effluent zijn niet te bereiken. De waarden zijn echter gemiddelde waarden over het gehele jaar. In de zomer zal het totaal-N-gehalte door verdergaande nitrificatie en denitrificatie aanzienlijk lager zijn dan in de winter.

Voor rwzi's met een hogere slibbelasting dan 0,1 kg BZV/kg d.s.d. kan alleen in de zomer het gehele eerste compartiment voor denitrificatie worden gebruikt. Door het tragere verloop van de nitrificatie moet ook (eventueel een deel) van het eerste compartiment als aërobe zone worden gebruikt. Bij hogere slibbelastingen zal dus het effect van de maatregelen op de effluentkwaliteit in de winter gering zijn.

In principe bestaat de mogelijkheid om in de zomer de beluchting naar het eerste compartiment af te sluiten, waarbij bijvoorbeeld 1 x per week de beluchting wordt aangezet om verstoppingen van de elementen te voorkomen. Aan deze methode zijn nauwelijks kosten verbonden, het risico voor verstoppingen van de elementen blijft echter aanwezig.

6.4.3 kosten

De aanpassingen omvatten de volgende maatregelen:

- verwijderen van de beluchtingselementen in het eerste compartiment van de tank;
- herplaatsen van de elementen in het tweede compartiment, inclusief aanleg van nieuwe luchtleidingen;
- recirculatieleidingen en recirculatievijzels aanleggen en aansluiten op de beluchtingstanks.

De investeringskosten zijn als volgt geraamd:

- civieltechnische aanpassingen	f 176.000,-
- wijzigen van het beluchtingssysteem	f 70.000,-
- recirculatievijzels	f 300.000,-
- bijkomende kosten (60%)	f 328.000,-
Totale investeringskosten	f 874.000,-

De bedrijfskosten zijn:

- onderhoudskosten (per jaar)	f 7.000,-
- energiekosten interne recirculatie (opvoerhoogte 0,5 m, $Q_r = 3,4 Q$)	f 11.000,-
- energiebesparing door denitrificatie	f 36.000,-
Totale nettobesparing bedrijfskosten	f 18.000,-

Contante waarde over 15 jaar:

- investering (minus restwaarde)	f 786.000,-
- besparing bedrijfskosten	f 217.000,-
- totale contante waarde	f 569.000,-

6.4.4 conclusies

Propstroomsystemen, die door middel van aanpassingen in het zuurstoftoevoersysteem zijn geoptimaliseerd kunnen alleen een goede denitrificatie over het gehele jaar geven bij slibbelastingen van 0,1 kg BZV/kg d.s.d of lager. Bij slibbelastingen groter dan 0,1 kg BZV/kg d.s.d is het systeem alleen in de zomer te gebruiken om geen verstoring van de nitrificatie te verkrijgen.

Wanneer 1/3 deel van de beluchtingstank als denitrificatiezone is te gebruiken is het mogelijk om een totaal-N-verwijdering van circa 70% te verkrijgen, terwijl zonder optimalisatie veelal niet meer dan circa 45% wordt bereikt. De te verkrijgen resultaten zijn wel sterk afhankelijk van de specifieke situatie op de rwzi. De aan te brengen optimalisaties zullen hieraan moeten worden aangepast.

De investeringskosten van de aanpassingen zullen aanzienlijk hoger zijn dan de besparingen die in de bedrijfskosten zijn te realiseren.

6.5 Volledig gemengd systeem: alternerend beluchten

6.5.1 maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

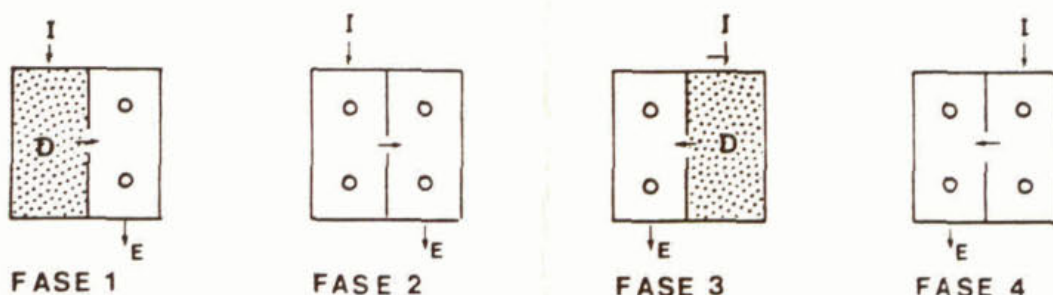
Het volledig gemengd systeem bestaat veelal uit een vierkante of rechthoekige tank met een aantal puntbeluchters verdeeld over de tank.

Bij toepassing van alternerend beluchten zal er voldoende tijd om te beluchten over moeten blijven voor de nitrificatie. De maximale tijd, gedurende welke de beluchting kan worden uitgeschakeld, kan uit tabel 11 (6.1.2) worden afgeleid. Daarnaast zal de beluchtingscapaciteit voldoende moeten zijn om de zuurstofbehoefte in de kortere beschikbare tijd te kunnen inbrengen.

In iedere praktijksituatie moet worden bekeken wat de mogelijkheden zijn. Hierbij kan worden overwogen het gehele jaar of alleen in de zomer alternerend te beluchten (afhankelijk van de gehanteerde slibbelasting) en daarnaast het uitschakelen van de beluchting eventueel te beperken tot perioden met een lage zuurstofbehoefte, zoals 's-nachts, alleen gedurende perioden met droogweeraanvoer of buiten de normale pieken in de aanvoer.

Als methode voor alternerend beluchten lijkt het Biotenitroproces ⁵⁴ het meest aantrekkelijk, omdat het risico voor verstoring van de nitrificatie het geringst is en een zo hoog mogelijke C/N-verhouding aanwezig is.

In het Biotenitroproces wordt gebruikt gemaakt van 2 beluchtingstanks (eventueel te vormen uit een tank door plaatsing van een tussenwand) die in vier fasen wordt bedreven, zoals in figuur 13 is weergegeven.



Figuur 13. Principeschema alternerend beluchten

Voor dit systeem zijn dus twee plaatsen voor influenttoevoer nodig die afwisselend kunnen worden gebruikt.

Om een effectieve denitrificatie te handhaven zal het slib niet of slechts beperkt mogen uitzakken, zodat in de tanks mengers moeten worden geplaatst. Tussen de beide alternerend beluchte tanks moet een opening worden gemaakt.

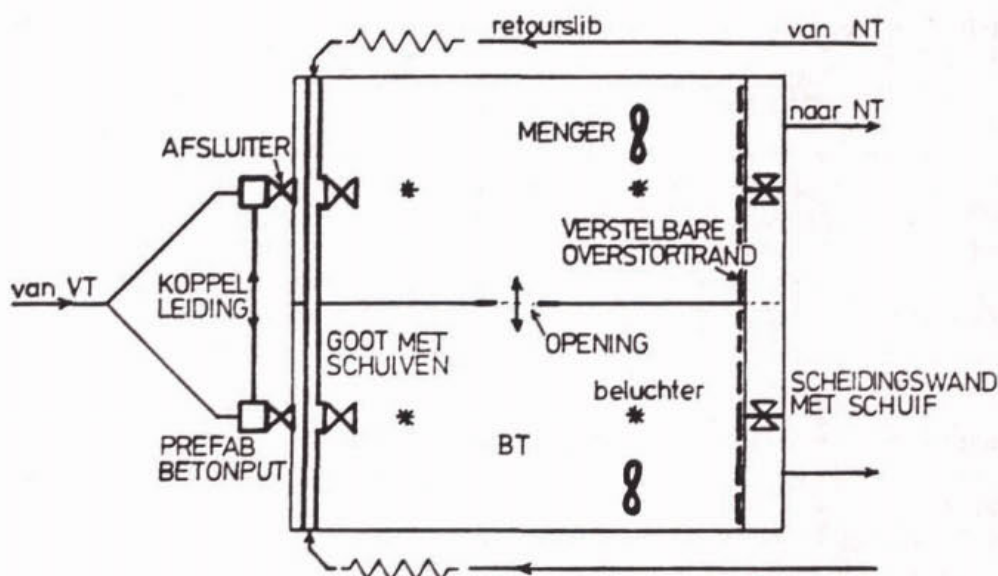
6.5.2 uitwerking van een voorbeeld

Voor de uitwerking van dit alternatief is gekozen voor een rwzi met een actuele capaciteit van 100.000 i.e., die wordt bedreven op een slibbelasting van 0,10 kg BZV/kg d.s.d. De beluchting bestaat uit twee tanks, die ieder in twee parallel doorstroomde ruimten zijn gescheiden door een tussenwand.

De volgende aanpassingen moeten worden aangebracht:

- wijziging van de aanvoerconstructie;
- aanbrengen van mixers in de beluchtingstanks;
- aanbrengen van verstelbare overstortranden;
- wijziging van de afvoerconstructie;
- maken van openingen in de tussenwand;
- aanbrengen van elektrisch bediende schuiven op diverse plaatsen;
- elektrische regeling van het systeem (schuiven, overstortranden, schakeling beluchters).

In figuur 14 zijn de wijzigingen aangegeven.



Figuur 14. Aanpassing beluchtingstank voor alternerend beluchten
(de aanpassingen zijn met hoofdletters aangegeven)

Op basis van een goed verlopende nitrificatie kan in principe een anoxische periode van 33% in de winter en van 60% in de zomer worden aangehouden. Om bij piekbelastingen voldoende zuurstof in te kunnen brengen in de aërobe periode wordt in dit voorbeeld een gemiddelde anoxische periode van 25% aangehouden. Het optimale percentage dient in de praktijk te worden vastgesteld, waarbij deze in de zomer groter dan in de winter kan zijn.

De duur van iedere fase is dus in dit voorbeeld 25% van de tijd. In dat geval is 50% van de tijd een anoxische zone aanwezig, die functioneert als een vóór-denitrificatie, omdat het influent in de anoxische zone wordt toegevoerd.

De volgende dimensioneringsgrondslagen kunnen worden gehanteerd:

belasting	100.000 i.e.
BZV-toevoer beluchting	3500 kg BZV/d
N-Kj-toevoer beluchting	1040 kg N-Kj/d
slibbelasting	0,10 kg BZV/kg d.s.d
slibgehalte beluchting	3,0 kg d.s/m ³
inhoud beluchtingstank	11.670 m ³

BZV-verwijdering	95%
N-Kj-verwijdering	85%
N-Kj in effluent	156 kg N/d
N-opname in slib*	95 kg N/d

* berekening volgens bijlage 3.

In deze situatie - met een minder vergaande duur van de anoxische periode - kan worden aangenomen, dat het nitraat niet de beperkende factor is bij de denitrificatie. Dit kan wel het geval worden, wanneer lange anoxische perioden worden toegepast of wanneer de duur van iedere fase te lang is.

Uitgaande van een anoxische zone als voor-denitrificatie van 50% gedurende 50% van de tijd kan op basis van methode Kayser (bijlage 3) worden berekend dat door denitrificatie gemiddeld 408 kg N/d wordt verwijderd.

In het effluent is dus nog aanwezig 381 kg NO₃-N/d en 156 kg N-Kj/d. De totaal-N-verwijdering is dus 48% in de beluchting ofwel 54% over de totale rwzi. Uitgaande van een N-totaalverwijdering vóór de optimalisatie van 35% in de beluchting (43% over de totale rwzi) wordt dus een besparing op zuurstofinbreng verkregen van 398 kg O₂/d ofwel 249 kWh/d (1,6 kg O₂/kWh).

6.5.3 kosten

De aanpassingen omvatten de volgende maatregelen:

- aanpassen van de aanvoerleidingen;
- prefab betonputten in de aanvoerleidingen;
- elektrisch bediende schuiven;
- mengers in de beluchtingstanks;
- verstelbare overstortranden;
- tussenwanden in de overstortgoot;
- elektrisch bediende schuiven;
- slopen van de tussenwand in de afvoergoot;
- aluminium goten voor het retourslib;
- elektrisch bediende schuiven in deze goten;
- elektronische tijdschakeling.

De investeringskosten worden geraamd op:

- wijziging van de aanvoeren	f	146.000,-
- mengers in de beluchtingstanks	f	160.000,-
- aanpassingen in de tanks	f	343.000,-
- aanpassingen aan de retourslibstroom	f	140.000,-
- tijdschakeling	f	10.000,-
	f	799.000,-
- bijkomende kosten 60%	f	480.000,-
Totale investering	f	1.279.000,-

De bedrijfskosten zijn:

- onderhoudskosten (per jaar)	f	6.550,-
- energiekosten menging (per jaar) (1 W/m ³ , 25% van de tijd)	f	6.350,-
- energiebesparing door denitrificatie	f	22.700,-
Totale netto besparing bedrijfskosten	f	9.800,-

Contante waarde over 15 jaar:

- investering minus restwaarde	f 964.500,-
- besparing bedrijfskosten	f 118.200,-
totale contante waarde	846.300,-

Bij de opzet van alternerend beluchten is uitgegaan van een voor het nitrificatieproces veilige duur van de anoxische periode. Als in de praktijk blijkt, dat deze periode aanzienlijk kan worden vergroot, zodat een N-totaal-verwijdering van bijvoorbeeld 75% wordt bereikt, zal er door denitrificatie circa 685 kg N/d worden verwijderd en op energieverbruik 744 kWh/d worden bespaard.

Hierdoor is de netto besparing op de bedrijfskosten f 55.000,- per jaar en de totale contante waarde f 301.200,-.

6.5.4 conclusies

Optimalisatie van de nitrificatie door middel van alternerend beluchten volgens het Biotenitroproces levert, als een beperkte duur van de anoxische periode wordt aangehouden om verzekerd te zijn van een goed verlopende nitrificatie, slechts een beperkte verbetering van de totaal-N-verwijdering op. Aangezien vrij kostbare aanpassingen moeten worden aangebracht, zullen de te bereiken besparingen aanzienlijk minder zijn dan de noodzakelijke investeringskosten.

Wanneer het in de praktijk mogelijk is om de processturing zodanig te optimaliseren dat zowel de nitrificatie als de denitrificatie goed verlopen (bij een vrij constant belaste installatie met een niet te hoge slibbelasting moet dit zeker tot de mogelijkheden worden gerekend) kan de totale netto contante waarde wel aanzienlijk worden verminderd.

6.6 Volledig gemengd systeem: compartimentering met anoxische zone

6.6.1 maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

Bij volledig gemengde systemen met meerdere beluchters is het in een aantal situaties ook mogelijk, om een compartimentering aan te brengen. Door plaatsing van tussenwanden ontstaat een aantal in serie doorstroomde tanks met in iedere tank een puntbeluchter. Hierdoor benadert het systeem het propstroomprincipe. Deze opzet is alleen zinvol wanneer per beluchtingseenheid drie of meer beluchters aanwezig zijn.

In het eerste compartiment kan dan een anoxische zone worden gecreëerd. De menging in het anoxische compartiment kan worden verkregen door de beluchter regelmatig gedurende een korte tijd te laten draaien of door een menger te installeren.

De resterende beluchters moeten wel voldoende zuurstof kunnen inbrengen om aan de zuurstofbehoefte te kunnen voldoen. De verbeterde denitrificatie geeft evenwel een enigszins lagere zuurstofbehoefte.

Bij dit systeem is een extra recirculatie vanuit de afloop van de beluchter nodig voor de nitraattoevoer naar de anoxische zone.

Bij slibbelastingen van 0,1 kg BZV/kg d.s.d of lager kan de anoxische zone het gehele jaar worden gehandhaafd. In de zomer zou

Ook wanneer bijvoorbeeld door piekbelastingen de nitrificatie verstoord dreigt te worden, kan onmiddellijk worden overgegaan tot beluchting van de anoxische zone.

Voor de uitwerking is gekozen voor een rwzi gelijk aan de rwzi uit paragraaf 6.5.2 (100.000 i.e.; slibbelasting 0,1 kg BZV/kg d.s.d, twee parallel bedreven tanks, van elkaar gescheiden door een tussenwand, met ieder twee beluchters).

- compartimentering door het aanbrengen van scheidingswanden en het maken van openingen of overstortranden in de bestaande tussenwand;
- wijziging van de aanvoerconstructie (scheiding van het afvalwater naar de twee tanks vervalt);
- wijziging van de afvoerconstructie;
- recirculatie van nitraat naar de anoxische zone;
- aparte regeling van de beluchters in compartiment 1.

The diagram illustrates a two-chambered fish tank system. On the left, a water inlet labeled 'van VT' (from water tank) splits into two vertical pipes. The upper pipe leads to the 'GOOT' (top) chamber, and the lower pipe leads to the 'BT' (bottom) chamber. Both chambers contain a star-shaped filter element. The 'GOOT' chamber is connected to a 'retourslib' (return siphon) at the top, which leads to a reservoir labeled 'van NT' (from water tank). The 'BT' chamber is connected to a 'VIJZEL' (jet) at the bottom, which leads to a 'RECIIRCULATIE' (recirculation) system. This system includes a pump and a filter, with water being pumped back into the 'BT' chamber. The 'BT' chamber also has an 'EXTRA WAND' (extra wall) and 'OPENINGEN' (openings) for water flow. The right side of the tank features a 'WAND VERHOGEN' (raised wall) and a 'SCHEIDINGSWAND' (partition wall). Arrows indicate the flow of water from the 'van NT' reservoir, through the 'GOOT' chamber, and then to the 'naar NT' (to water tank) outlet. The 'BT' chamber has an outlet at the bottom right.

- 56 -

De denitrificatieberekeningen kunnen worden uitgevoerd als is aangegeven in paragraaf 6.4 (propstroomsystemen, optimalisatie zuurstoftoevoer).

De volgende dimensioneringsgrondslagen kunnen worden gehanteerd:

belasting	100.000 i.e.	
BZV-toevoer	3.500 kg BZV/d	
N-Kj-toevoer	1.040 kg N-Kj/d	
slibbelasting	0,1 kg BZV/kg d.s.d	
slibgehalte beluchting	3,0 kg d.s/m ³	
inhoud beluchtingstank	11.670 m ³	
aantal tanks		
. voor optimalisatie	4	
. na optimalisatie	2 met ieder 4 compartimenten	
grootte anoxische zone	25%	
BZV-verwijdering	95%	
N-Kj-verwijdering	85%	
N-Kj in effluent	156 kg N/d	
N-opname in slib*	95 kg N/d	
N-verwijdering door denitrificatie		
. voor optimalisatie**	269 kg N/d	
. na optimalisatie*	zomer 502 kg N/d	
	winter 443 kg N/d	
	gem. 473 kg N/d	
NO ₃ -N in effluent		
. voor optimalisatie	520 kg N/d	
. na optimalisatie	316 kg N/d	
besparing O ₂ -verbruik	$2,86 \times (520 - 316) = 583$ kg O ₂ /d	
besparing energieverbruik	364 kWh/d (1,6 kg O ₂ /kWh)	
benodigde recirculatiefactor	zomer: 2,7	
	winter: 2,3	
	gem. 2,5	
N-totaalverwijdering	in beluchting	totale rwzi
. voor optimalisatie	35%	43%
. na optimalisatie	55%	60%

* volgens berekening bijlage 3

** aangenomen dat een totaal N-verwijdering van 35% in de beluchting optreedt.

6.6.3 kosten

De aanpassingen omvatten de volgende maatregelen:

- aanpassen van de aanvoerleidingen;
- betonnen wand voor contacttank;
- betonnen scheidingswand;
- openingen maken in de bestaande wand;
- opstorten van de eindwand;
- tussenwanden in de afvoergoot;
- beluchter in compartiment 1 apart regelen;
- recirculatieleidingen leggen;
- aansluiten van de leidingen op de bestaande tank;
- recirculatievijzel.

De investeringskosten worden geraamd op:

- wijziging invoer	f 30.000,-
- civieltechnische aanpassingen in de tank	f 407.000,-
- aanpassing beluchters	f 5.000,-
- recirculatieleidingen	f 36.000,-
- recirculatievijzels	f 150.000,-
	f 628.000,-
bijkomende kosten 60%	f 377.000,-
Totale investering	f 1.005.000,-

De bedrijfskosten bedragen:

- onderhoudskosten (per jaar)	f 5.500,-
- energie voor interne recirculatie ($Q_r = 2 Q$, opvoerhoogte 0,5 m)	f 6.700,-
- energiebesparing door denitrificatie	f 33.200,-
Totale netto besparing bedrijfskosten	f 21.000,-

Contante waarde over 15 jaar:

- investering (minus restwaarde)	f 739.000,-
- besparing bedrijfskosten	f 253.300,-
Totale contante waarde	f 485.700,-

6.6.4 conclusies

Wanneer beluchtingstanks met volledige menging mogelijkheden bieden om tot compartimentering van de tank over te gaan, zodat een anoxische zone kan worden gecreëerd, zijn goede mogelijkheden aanwezig om de denitrificatie te verbeteren.

Door een goede regeling van de beluchting in het eerste compartiment kan worden voorkomen dat bij piekbelastingen en in de winter de nitrificatie wordt verstoord. Een ander mogelijk voordeel is de vermindering van licht slib, dat in dit type beluchting regelmatig voorkomt.

De resultaten zijn afhankelijk van de grootte van het eerste compartiment (33% bij 3 of 6 beluchters per tank en 25 of 50% bij 4 beluchters per tank) en van de slibbelasting (voorkoming van verstoring nitrificatie).

6.7 Extra denitrificatietank

6.7.1 maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

In actief-slibinstallaties met k groter dan 0,15 kg BZV/kg d.s.d is de slibbelasting veelal zodanig hoog, dat geen anoxische zone kan worden gecreëerd in verband met mogelijke verstoring van de nitrificatie. In dat geval biedt het bouwen van een extra denitrificatieruimte mogelijkheden.

Ook bij circuits met bellenbeluchting kan het nodig zijn een aparte denitrificatieruimte te creëren, omdat een simultane denitrificatie hier veelal minder goede mogelijkheden biedt.

Bij nieuwe installaties van dit type is reeds in een aantal gevallen een aparte denitrificatieruimte ingebouwd, wat bij deze installaties voor geringe meerkosten mogelijk is.

Op basis van de berekeningsmethode van Kayser (bijlage 3) kan afhankelijk van de gewenste kwaliteit van het effluent de grootte van de denitrificatietank worden bepaald, met de daarbij behorende recirculatie van nitraat.

Het voordeel van deze methode is dan ook dat de denitrificatie niet, zoals bij de voorgaande alternatieven in bestaande beluchtingsruimten, is gelimiteerd door de specifieke omstandigheden (slibbelasting, praktische uitvoerbaarheid van de maatregelen, de reeds vaststaande grootte van de anoxische zone).

De maatregelen omvatten de bouw van een denitrificatietank en een recirculatie van het retourslib (één-slibsoortensysteem) en een deel van de afloop van de beluchtingstank ten behoeve van de nitraattoevoer. De tank moet worden gemengd om het slib in suspensie te houden.

6.7.2 uitwerking van een voorbeeld

In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een rwzi met een capaciteit van 100.000 i.e. en een slibbelasting van 0,15 kg BZV/kg d.s.d. De aanpassingen kunnen zowel voor propstroom als voor volledig gemengde systemen worden toegepast.

In figuur 16 is de opzet van de aangepaste rwzi schematisch weergegeven.

De uitwerking zal geschieden voor verschillende grootten van de denitrificatieruimte.

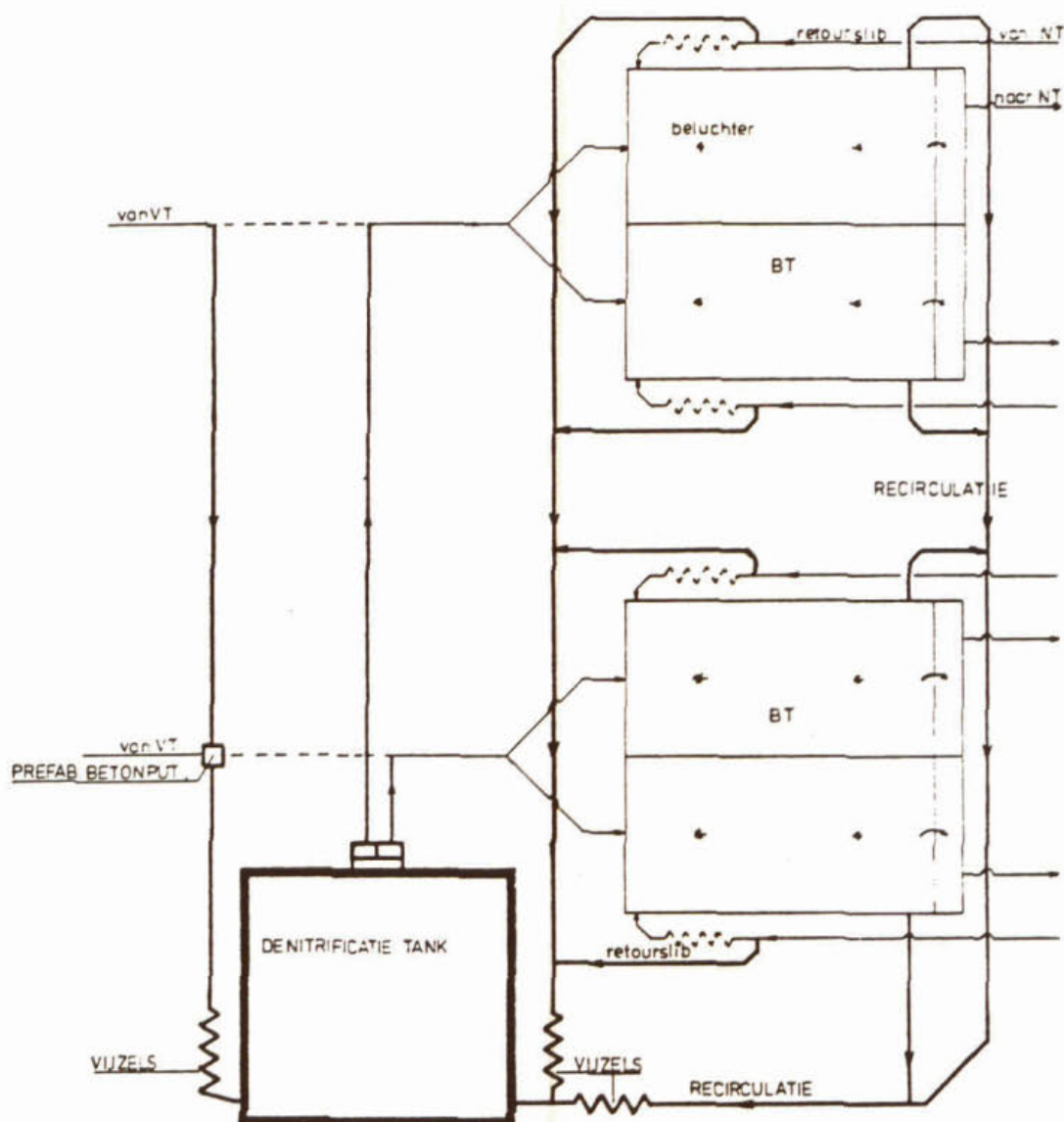
De dimensioneringsgrondslagen zijn als volgt:

bestaande beluchtingstank:

- belasting	100.000 i.e.
- BZV-toevoer	3.500 kg BZV/d
- N-Kj-toevoer	1.040 kg N-Kj/d
- slibbelasting	0,15 kg BZV/kg d.s.d
- slibgehalte beluchting	3,0 kg d.s/m ³
- inhoud beluchtingstank	7.780 m ³
- BZV-verwijdering in beluchting	90%
- N-Kj-verwijdering in beluchting	80%
- N-totaalverwijdering in beluchting	30%
- N-Kj in effluent	208 kg N/d
- N-opname in slib*	123 kg N/d
- NO ₃ -N in effluent	520 kg N/d
- NO ₃ -N-verwijdering in beluchting	189 kg N/d

na optimalisatie

- grootte denitrificatieruimte (m ³)	3000	4000	5000
- grootte den. ruimte in % van totaal	28%	34%	39%
- slibbelasting op totaal volume	0,11	0,10	0,09
- slibgehalte kg d.s/m ³	3	3	3



Figuur 16. Bouw van een aparte denitrificatietank
(met hoofdletters zijn de aanpassingen aangegeven)

BZV-verwijdering in beluchting	90%	90%	90%
N-Kj-verwijdering in beluchting	80%	80%	80%
N-opname in slib* (kg N/d)	100	96	91
N-Kj in effluent (kg N/d)	208	208	208
NO ₃ -N-verwijdering door denitrificatie* (kg N/d)			
- zomer	561	648	674**
- winter	474	565	626
NO ₃ -N in effluent (kg N/d)			
- zomer	171	88	67**
- winter	258	171	115
- gemiddeld	215	130	91

benodigde recirculatiefactor zomer/winter	3,3/1,8	7,4/3,3	10**/5,4
N-totaalverwijdering in beluchting (gemiddeld)	59%	68%	71%
besparing O ₂ -verbruik, gemiddeld (kg O ₂ /d)	872	1115	1227
besparing energieverbruik (kWh/d)			
- bij puntbeluchting (1,6 kg O ₂ /kWh)	545	697	767
- bij bellenbeluchting (2,3 kg O ₂ /kWh)	379	485	533

* volgens berekening bijlage 3

** in principe is volledige denitrificatie hierbij haalbaar, de recirculatiefactor dient dan echter oneindig groot te zijn; uitgegaan is daarom van een maximale reële recirculatiefactor van 10.

Uit de bovenstaande gegevens volgt dat met een voor-denitrificatie-tank een vergaande denitrificatie is te bereiken. Het verschil in de denitrificatiecapaciteit tussen een tank met een denitrificatieruimte van 34% en van 28% is nog aanzienlijk. Dit verschil is veel kleiner bij een toename van de inhoud van de denitrificatieruimte van 34% naar 39%. De optimale grootte van de denitrificatieruimte zal dan ook in de orde van 35% liggen. Boven deze waarde zal ook de nitraattoevoer door recirculatie bepalend worden, omdat het niet reëel is om recirculatiefactoren groter dan circa 10 toe te passen.

6.7.3 kosten

De aanpassingen omvatten de volgende maatregelen:

- tank, civieltechnisch, mechanisch en elektrisch;
- aanpassingen van de aanvoerleidingen, retourslibleidingen en afvoerleidingen;
- retourslibvijzel en recirculatievijzels;
- recirculatieleidingen.

De investeringskosten bedragen bij een tankinhoud van:

	<u>3000 m³</u>	<u>4000 m³</u>	<u>5000 m³</u>
- civieltechnisch	900.000,-	1.150.000,-	1.350.000,-
- werktuigbouwkundig (60% van C)	540.000,-	690.000,-	810.000,-
- elektrotechnisch (20% van W)	108.000,-	230.000,-	270.000,-
- aan- en afvoerleidingen	105.000,-	105.000,-	105.000,-
- retourslibleidingen	90.000,-	90.000,-	90.000,-
- retourslibvijzels	100.000,-	100.000,-	100.000,-
- recirculatievijzels	150.000,-	250.000,-	325.000,-
- leidingen voor recirculatie	107.000,-	135.000,-	150.000,-
	<u>2.300.000,-</u>	<u>2.750.000,-</u>	<u>3.200.000,-</u>
bijkomende kosten 60%	<u>1.400.000,-</u>	<u>1.650.000,-</u>	<u>1.900.000,-</u>
Totale investering	<u>f 3.700.000,-</u>	<u>f 4.400.000,-</u>	<u>f 5.100.000,-</u>

De bedrijfskosten zijn:

	<u>3000 m3</u>	<u>4000 m3</u>	<u>5000 m3</u>
- jaarlijkse onderhoudskosten	24.000,-	33.000,-	39.000,-
- energie voor recirculatie en menging	15.000,-	24.000,-	36.000,-
- energiebesparing beluchting			
. puntbeluchting	50.000,-	64.000,-	70.000,-
. bellenbeluchting	<u>35.000,-</u>	<u>44.000,-</u>	<u>49.000,-</u>
Totale netto besparing bedrijfskosten			
- puntbeluchting	+ 11.000,-	+ 7.000,-	- 5.000,-
- bellenbeluchting	- 4.000,-	- 13.000,-	- 26.000,-

Contante waarde over 15 jaar:

- investering (minus restwaarde)	3.100.000,-	3.700.000,-	4.300.000,-
- extra bedrijfskosten			
. puntbeluchting	- 130.000,-	- 80.000,-	60.000,-
. bellenbeluchting	50.000,-	160.000,-	310.000,-

Totale contante waarde

- puntbeluchting	f 2.970.000,-	f 3.620.000,-	f 4.360.000,-
- bellenbeluchting	f 3.150.000,-	f 3.860.000,-	f 4.610.000,-

6.7.4 conclusies

De bouw van een extra denitrificatietank is vooral toepasbaar bij bellenbeluchtungs- of puntbeluchtingssystemen met een zodanig hoge slibbelasting dat bij denitrificatie in de bestaande beluchtingstank problemen met de nitrificatie zullen optreden.

In deze paragraaf is het één-slibsoortensysteem met voor-denitrificatie uitgewerkt voor verschillende grootten van de denitrificatieruimte.

Een optimale denitrificatie wordt verkregen met een denitrificatietank van circa 35% van het totale systeem. Boven deze waarde moet de recirculatiefactor zeer hoog zijn (meer dan 10).

Vanwege het slechtere zuurstofinbrengrendement bij puntbeluchters zal de besparing op energieverbruik bij deze systemen groter zijn dan bij bellenbeluchting. De totale besparing op de bedrijfskosten is echter zeer gering of zelfs negatief, terwijl de investeringskosten hoog zijn.

Deze methode biedt voordelen door de goede controle- en regelmo- gelijkheden van het systeem.

6.8 Actief-slibstelsysteem: ombouw van een voorbezinktank

6.8.1 maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

Bij actief-slibinstallaties met voorbezinking zijn veelal meerdere voorbezinktanks aanwezig. Deze voorbezinktanks zijn gedimensioneerd op de regenweeraanvoer, zodat in perioden met droogweeraanvoer een effectieve bezinking kan plaatsvinden in minder bezinktanks. In deze perioden zou dus één van de voorbezinktanks als denitrificatieruimte kunnen worden gebruikt.

De bedrijfsvoering moet dan als volgt worden aangepast:

Wanneer twee voorbezinktanks (per straat) aanwezig zijn, wordt bij lage aanvoer (vast te stellen aan de hand van het aantal aanvoer-vijzels of -pompen in bedrijf) al het inkomend afvalwater naar één voorbezinktank gevoerd en van hieruit naar de andere voorbezinktank, die als denitrificatieruimte wordt gebruikt. In deze periode wordt het retourslib naar de tweede voorbezinktank gepompt. De retourslib-stroom moet zo groot mogelijk zijn. In de denitrificatieruimte moet een menger worden aangebracht.

Wanneer de aanvoer stijgt boven een bepaalde waarde wordt de retour-slibstroom weer in de beluchtingstank gevoerd, de menger blijft in werking en de aanvoer blijft nog enige tijd op de dwa-stand plaatsvinden, zodat een deel van het aanwezige actiefslib wordt teruggevoerd naar de beluchtingstank. Na een bepaalde tijd wordt omgeschakeld naar de rwa-stand, die gelijk is aan de actuele bedrijfsvoering. Er treedt verlies van actiefslib op, omdat niet alle actiefslib kan worden teruggevoerd naar de beluchtingstank. Dit verlies is -afhankelijk van de wachttijd voor overschakeling naar de rwa-stand- circa 3,5 - 10% (wachttijd 45 resp. 15 minuten). De normale spuislibafvoer moet dus worden beperkt en de totale aanwezige slibhoeveelheid tijdens dwa-stand moet worden vergrroot.

Bij terugschakeling naar de dwa-stand is eveneens een wachttijd nodig om primair slib te laten bezinken en af te voeren.

In figuur 17 is het principeschema van dit alternatief weergegeven.

6.8.2 uitwerking van een voorbeeld

Voor dit alternatief wordt uitgegaan van dezelfde rwzi als in paragraaf 6.7.2. Voor de dimensioneringsgrondslagen van de bestaande situatie wordt hiernaar verwezen.

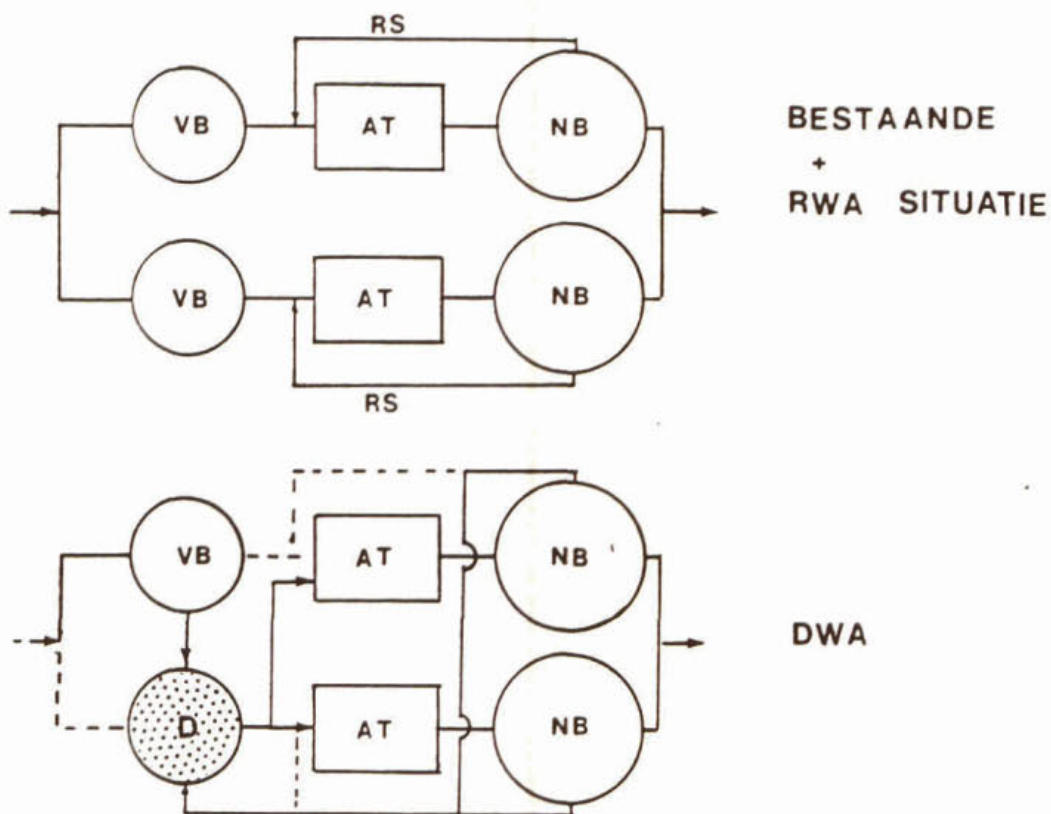
De aanpassingen die moeten worden aangebracht zijn:

- regelschuiven in de aanvoer naar de voorbezinktanks;
- leiding tussen afvoer voorbezinktank 1 en bezinktank 2 met regelschuiven en opvoervijzel;
- leiding tussen afvoer voorbezinktank 2 en aanvoer beluchtingstank 1 met verdeelwerk en regelschuiven;
- retourslibleiding naar voorbezinktank 2 met extra retourslibvijzel;
- menger in voorbezinktank 2.

In figuur 18 zijn deze aanpassingen weergegeven.

De dimensioneringsgrondslagen na optimalisatie zijn:

- volume denitrificatietank 1250 m³ = 14% van totaal
- duur in bedrijf als denitrificatietank 80%

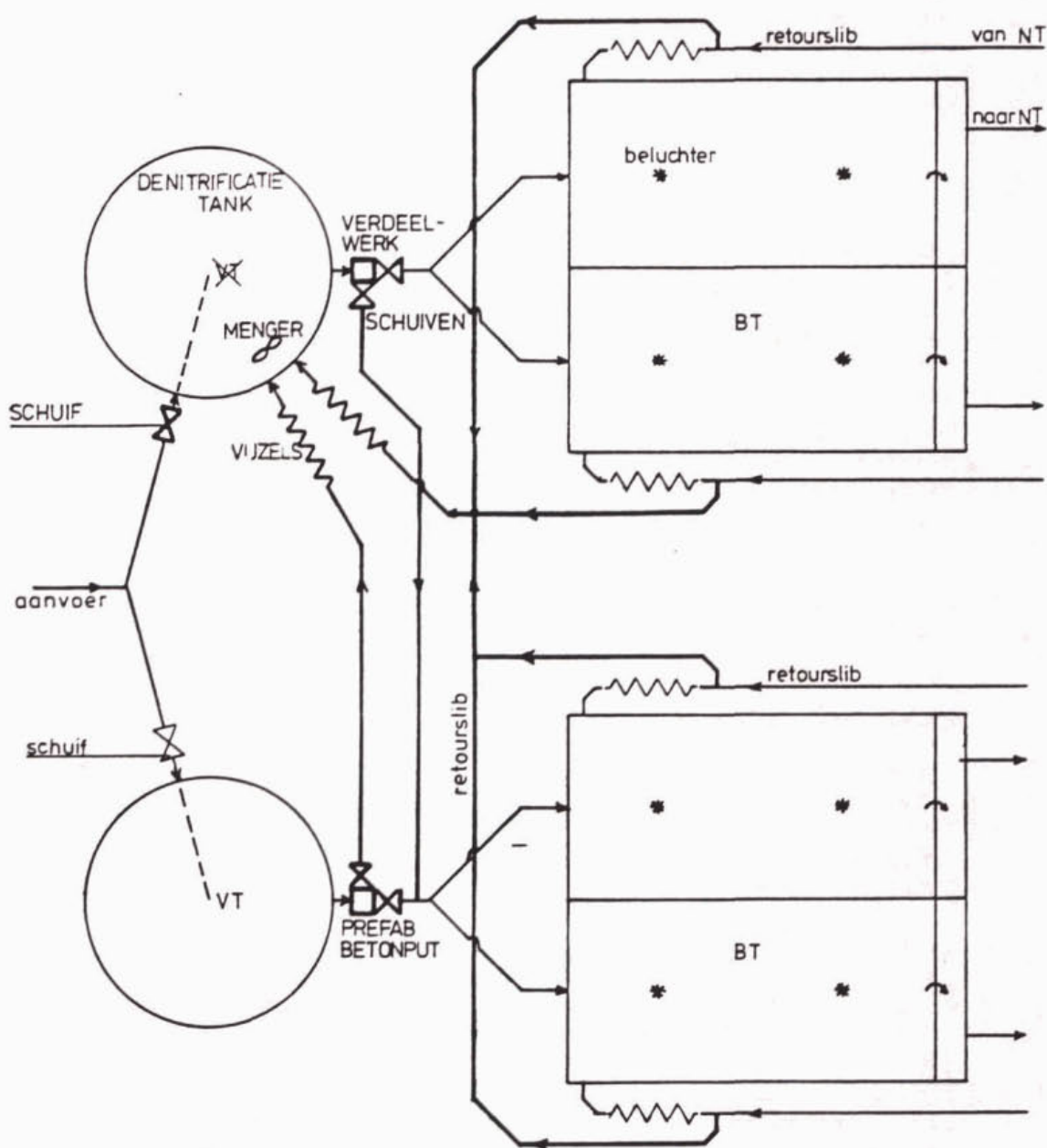


Figuur 17. Principeschema ombouw van een voorbezinktank tot voor-denitrificatietank tijdens dwa

- slibbelasting tijdens dwa	0,13 kg BZV/kg d.s.d
- slibgehalte tijdens dwa	3,0 kg d.s./m ³
- N-Kj-verwijdering in beluchting	80%
- N-opname in slib tijdens dwa*	116 kg N/d
- N-Kj in effluent	208 kg N/d
- NO ₃ -N-verwijdering door denitrificatie*	
gemiddeld	275 kg N/d
- NO ₃ -N in effluent (gem.)	441 kg N/d
- benodigde recirculatiefactor, gemid.	0,6 (via retourslib)
- N-totaalverwijdering in beluchting	38%
- besparing O ₂ -verbruik	226 kg O ₂ /d
- besparing energieverbruik	
. puntbeluchting	141 kWh/d
. bellenbeluchting	98 kWh/d

De hierboven aangegeven energiebesparing en denitrificatiecapaciteiten gelden alleen in de periode dat een voorbezinktank in gebruik is als denitrificatieruimte, dus voor circa 80% van de tijd.

* volgens berekening bijlage 3



Figuur 18. Het gebruik van één voorbezinkingstank tijdens dwa als denitrificatieruimte (in de figuur zijn met hoofdletters de aanpassingen aangegeven)

6.8.3 kosten

De aanpassingen omvatten de volgende maatregelen:

- aanpassen van aanvoerleidingen en retourslibleidingen;
- prefab betonput met twee elektrisch bediende schuiven;
- verdeelwerk met elektrisch bediende schuiven;
- menger;
- slibretourvizel en aanvoervizel;
- elektrische schakeling.

De investeringskosten bedragen:

- aanvoervijzel	f	200.000,-
- leidingwerk + betonput	f	200.000,-
- verdeelwerk	f	80.000,-
- retourslibvijzel	f	100.000,-
- menger	f	30.000,-
- elektrische schakeling	f	10.000,-
	f	619.000,-
bijkomende kosten (60%)	f	371.000,-
Totale investeringskosten	f	990.000,-

De bedrijfskosten zijn:

- jaarlijkse onderhoudskosten	f	8.200,-
- extra energieverbruik menging en vijzels (80% van de tijd)	f	6.200,-
- energiebesparing door denitrificatie		
. puntbeluchting	f	12.900,-
. bellenbeluchting	f	8.900,-
Totale netto stijging bedrijfskosten		
. puntbeluchting	f	1.500,-
. bellenbeluchting	f	5.500,-

Contante waarde over 15 jaar:

- investering (minus restwaarde)	f	850.000,-
- extra bedrijfskosten		
. puntbeluchting	f	18.000,-
. bellenbeluchting	f	66.000,-
Totale contante waarde		
. puntbeluchting	f	868.000,-
. bellenbeluchting	f	916.000,-

6.8.4 conclusies

In bepaalde situaties is het mogelijk om tijdens dwa-condities (tenminste 80% van de tijd) een voorbezinktank te gebruiken als denitrificatieruimte, omdat de dimensionering van de bezinking is gebaseerd op de veel hogere rwa-omstandigheden.

Er moet hiervoor een aantal wijzigingen in de processtromen plaatsvinden. Tijdens het omschakelen gaat een deel van het aanwezige slib, dat in de voorbezink-/denitrificatietank aanwezig is, verloren.

Omdat de omgebouwde voorbezinktank slechts een beperkt deel van de totale beluchtingsruimte uitmaakt (circa 14%) is de denitrificatiecapaciteit vrij gering, zodat op de bedrijfskosten netto niet wordt bespaard.

6.9 Evaluatie aanpassingsmogelijkheden

In tabel 17 is een overzicht gegeven van de verbetering in de totaal-N-verwijdering en de extra kosten die voor de uitgewerkte voorbeelden van de verschillende aanpassingsmogelijkheden zijn gevonden.

uitgewerkte voorbeelden				resultaten uitgewerkte voorbeelden			
type rwzi	methode	capaciteit (i.e.)	slibbelasting kg BZV/kg d.s.d	N-totaal verwijdering totale rwzi		extra kosten* (f/i.e.)	opmerkingen
				voor-optima- lisatie	na-optima- lisatie		
circuit	optimalisatie zuurstoftoevoer	20.000	0,05	50% 60% 70%	80% 80% 80%	-0,73(br)/-0,96(p) -0,44(br)/-0,20(p) -0,06(br)/-0,26(p)	50% belast 70% belast 90% belast
circuit met den. ruimte	vergroten recirculatie	20.000	0,05	63% 62% 62%	78% 85% 85%	0,09(bl) 0,07(bl) 0,06(bl)	den.ruimte 15% den.ruimte 20% den.ruimte 25%
propstroom- systeem	optimalisatie zuurstoftoevoer	100.000	0,10	43%	70%	0,38(bl)	anoxische zone 33%
volledig gemengd systeem	alternerend beluchten	100.000	0,10	43%	54%	0,56(p)	anoxische zone 50% duur 50%
volledig gemengd systeem	compartimentering	100.000	0,10	43%	60%	0,32(p)	anoxische zone 25%
alle systemen	extra denitrifi- catietank	100.000	0,15	38% 38% 38%	64% 71% 75%	1,98(p)/2,10(bl) 2,41(p)/2,57(bl) 2,91(p)/3,07(bl)	den.tank 28% den.tank 34% den.tank 39%
actiefslib- systemen	ombouw voorbezinkingstank	100.000	0,15	38%	45%	0,58(p)/0,61(bl)	den.tank 14% duur 80%

Tabel 17. Verbetering totaal-N-verwijdering en extra kosten van de maatregelen ter verbetering van de denitrificatie

* extra kosten = $\frac{\text{contante waarde over 15 jaar}}{\text{ontwerpcapaciteit (i.e.)} \times 15}$

br = borstelbeluchting
p = puntbeluchting
bl = bellenbeluchting

Bij de interpretatie van tabel 17 moet ermee rekening worden gehouden, dat de uitwerking is geschied voor een bepaalde gekozen uitvoeringsvorm, ontwerpcapaciteit, belastingsgraad en denitrificatiecapaciteit vóór optimalisatie.

De resultaten geven dan ook slechts een orde van grootte van de te verwachten extra kosten of besparingen. Voor iedere specifieke situatie zullen de mogelijke alternatieven apart moeten worden uitgewerkt om een goede beoordeling van de mogelijkheden en kosten te kunnen maken.

Uit de resultaten kan het volgende globale beeld worden verkregen. Door een zodanige zuurstoftoevoerregeling toe te passen, dat een ruime anoxische zone (30 - 35%) kan worden gehandhaafd, kan bij circuits en propstroomssystemen met een slibbelasting van maximaal circa 0,10 kg BZV/kg d.s.d een goede denitrificatie worden verkregen.

De investeringskosten voor de aanpassingen zijn vrij beperkt, terwijl vooral bij onderbelaste circuits een aanzienlijke energiebesparing door de optimalisatie van de zuurstoftoevoer wordt verkregen, zodat netto mogelijk zelfs nog enige kostenbesparing is te bereiken.

Bij propstroomssystemen is de energiebesparing geringer, vooral vanwege de benodigde energie voor recirculatie van nitraathoudend afvalwater naar de anoxische zone aan het begin van de tank, zodat netto een geringe toename van de kosten zal optreden. In beide typen installaties moet ervoor worden gezorgd, dat in de gehele tank een goede menging gehandhaafd blijft. Bij propstroomssystemen zullen daarom enige beluchtungsstrengen gehandhaafd moeten blijven of een mechanische menger moeten worden geplaatst. Bij circuits moet om een voldoende stroomsnelheid te bereiken mogelijk een voortstuwingspropeller worden geplaatst.

Bij circuits met bellenbeluchting is soms een denitrificatieruimte aanwezig. Op eenvoudige wijze kan een verdergaande denitrificatie door een optimale recirculatie van nitraat worden verkregen. De te bereiken totaal-N-verwijdering hangt af van de grootte van de denitrificatieruimte, die voor een goed resultaat tenminste 20 - 25% van de totale beluchtingstank moet bedragen.

De netto extra kosten zijn in het algemeen zeer gering.

Bij volledig gemengde systemen met een slibbelasting van maximaal circa 0,1 kg BZV/kg d.s.d is verbetering van denitrificatie door alternerend beluchten of door compartimentering te verkrijgen. Bij alternerend beluchten is het resultaat sterk afhankelijk van de grootte van de periodiek niet-beluchte zone en het deel van de tijd waarin niet wordt belucht. Wanneer een voor nitrificatie veilige, dus beperkte denitrificatieduur en -ruimte wordt toegepast is de verbetering van de N-totaalverwijdering in verhouding tot de extra kosten gering. Als de specifieke situatie het toelaat een grotere denitrificatieduur en -ruimte te creëren, kan deze methode zeker wel aantrekkelijk zijn.

Indien in de beluchtingstank compartimentering mogelijk is, dan is door een goede regeling van de zuurstoftoevoer een redelijke N-totaalverwijdering te realiseren. De extra kosten zijn vrij beperkt. Bij dit systeem is weer van belang het handhaven van een goede menging in het niet-beluchte compartiment en een voldoende recirculatie van nitraathoudend afvalwater.

Wanneer de slibbelasting van het biologisch zuiveringssysteem zodanig hoog is, dat vooral in de winter geen ruimte voor een anoxische zone in de bestaande beluchtingstanks beschikbaar is, dan zal een aparte denitrificatietank nodig zijn. Wanneer vergaande denitrificatie het gehele jaar gewenst is, geldt dit voor slibbelastingen vanaf circa 0,15 kg BZV/kg d.s.d en bij denitrificatie alleen in de zomer vanaf circa 0,20 kg BZV/kg d.s.d.

Als aparte denitrificatietank kan in bepaalde situaties ook een van de voorbezinkingstanks worden gebruikt. De kosten zijn aanzienlijk lager dan een extra tank.

De verbetering van de N-totaalverwijdering is echter zeer gering terwijl een gecompliceerde bedrijfsvoering ontstaat.

Een extra denitrificatietank geeft wel goede resultaten. De kosten zijn echter zeer hoog. De N-totaalverwijdering is afhankelijk van de grootte van de denitrificatietank, waarbij het optimum ligt bij een inhoud van circa 35% ten opzichte van de totale inhoud van denitrificatie- en beluchtingstank.

CONCLUSIES

1. Denitrificatie vindt plaats in een anoxische zone, waarin het O_2 -gehalte lager is dan circa 0,5 mg O_2 /l en nitraat als zuurstofbron aanwezig is. Om tot een goede totaal-stikstofverwijdering te komen zal dus een goede nitrificatie moeten plaatsvinden.

De maatregelen ter verbetering van de denitrificatie mogen de nitrificatie niet verstoren. Hiervoor zal in het algemeen in de winter een slibbelasting van ten hoogste 0,15 kg BZV/kg d.s.d en in de zomer 0,25 kg BZV/kg d.s.d aangehouden moeten worden in de aërobe zone van de beluchtingstank; het O_2 -gehalte in deze zone moet tenminste 1,0 mg/l bedragen.

Bij het creëren van een anoxische zone moet de slibbelasting, berekend op de aërobe zone, onder deze grenzen blijven.

Bij rwzi's met een slibbelasting van 0,15 kg BZV/kg d.s.d of hoger zijn er dus geen mogelijkheden om in de bestaande beluchtingstank te komen tot een goede denitrificatie gedurende het gehele jaar. Hiervoor moet dan ook een extra tank worden gebouwd, of alleen in de zomer gedenitrificeerd worden.

2. In de praktijk gevonden denitrificatiesnelheden geven in het algemeen geen goed beeld van de te bereiken snelheden bij optimale denitrificatie.

De gemeten waarden zijn veelal gevonden op rwzi's met voor denitrificatie niet-optimale procesomstandigheden, zoals een beperkte hoeveelheid nitraat of koolstof, of een niet op vergaande denitrificatie afgestemde slibkwaliteit.

De denitrificatiesnelheid is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals de slibbelasting, het nitraataanbod, de aard en hoeveelheid van de C-bron, de pH en de temperatuur. Alleen Kayser verschaft een berekeningswijze voor de denitrificatiecapaciteit die met deze procesomstandigheden rekening houdt. In bijlage 3 wordt deze berekeningswijze weergegeven.

3. Bij toepassing van simultane defosfatering zal de activiteit van de slibmassa verminderen en dus van invloed zijn op de nitrificatie en denitrificatie. Hiermee zal rekening moeten worden gehouden bij de bedrijfsvoering van de rwzi. Bepaalde defosfateringsmiddelen zoals AVR werken remmend op de nitrificatie. Een invloed op de denitrificatiesnelheid, gebaseerd op het organische stofgehalte, is nog niet geconstateerd.

Biologische defosfatering behoeft de denitrificatie niet te beïnvloeden, echter de voor biologische defosfatering benodigde anaërobe ruimte kan niet als denitrificatieruimte worden gebruikt, omdat nitraat remmend werkt op de anaërobe fase van de biologische defosfatering. Er is dus zowel een anoxische denitrificatiezone als een anaërobe defosfateringszone nodig.

4. Er bestaan verschillende methoden voor de optimalisatie van de denitrificatie. Zij zijn gebaseerd op het al dan niet scheiden van de slibsoorten voor de verschillende biologische processen (BZV-verwijdering, nitrificatie en denitrificatie) en de plaats

waar de denitrificatie plaatsvindt (voor, na of simultaan met de aërobe processen).

Op basis van de praktische toepasbaarheid, kosten en eenvoud van bedrijfsvoering bieden de volgende systemen de beste perspectieven:

- voor-denitrificatie met één slibsoort of eventueel twee slibsoorten;
- alternerend beluchten;
- simultane nitrificatie - denitrificatie.

Nitrificatie en denitrificatie gedurende het gehele jaar zijn bij een slibbelasting van circa 0,15 kg BZV/kg d.s.d uitsluitend te bereiken met voor-denitrificatie in een extra te bouwen tank. Bij lagere slibbelastingen kunnen in het algemeen de aanpassingen in de bestaande beluchtingstank plaatsvinden. Voor optimalisatie van de denitrificatie komen circuits en laagbelaste actief-slibinstallaties in aanmerking. In Nederland maken deze systemen ongeveer 70% van het aantal rwzi's en ruim 50% van de zuiveringscapaciteit uit.

Een verbetering van de denitrificatie levert een energiebesparing voor de beluchting op van circa 6% voor rwzi's met een slibbelasting van 0,05 kg BZV/kg d.s.d en van circa 17% voor rwzi's met een slibbelasting van 0,15 kg BZV/kg d.s.d ten opzichte van de huidige gemiddelde praktijksituatie.

5. In de Nederlandse praktijksituatie zijn met goed gevolg op enkele circuits reeds aanpassingen in de bedrijfsvoering aangebracht zoals alternerend beluchten, regeling zuurstofinbreng en influenttoevoer in een anoxische zone. Verder zijn vijf rwzi's met een aparte denitrificatieruimte in bedrijf, alle van het type circuit met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing, die bij dezelfde belastingsgraad 20 à 25% meer N-totaalverwijdering hebben dan hetzelfde type zonder denitrificatieruimte. De belastingsgraad van de rwzi bepaalt sterk de N-totaalverwijdering, vooral vanwege de onvoldoende mogelijkheden om de zuurstoftoevoer aan de lagere belastingsgraad aan te passen.

Op circa 40% van de rwzi's in Nederland vindt een goede nitrificatie plaats (meer dan 80% N-Kj-verwijdering). Op ongeveer de helft van deze installaties treedt ook een vergaande denitrificatie op (meer dan 70% N-totaalverwijdering).

Op rwzi's die meer dan 80% zijn belast en waarbij een goede nitrificatie optreedt, is de denitrificatie in de meeste gevallen ook goed.

Voor verbetering van de denitrificatie komen vooral in aanmerking oxydatiesloten met borstelbeluchting, laagbelaste actief-slibinstallaties en onderbelaste circuits met puntbeluchting en bellenbeluchting.

6. Op basis van de in conclusie 4 genoemde optimalisatiemogelijkheden voor de in conclusie 5 genoemde zuiveringssystemen zijn 7

verschillende methoden voor aanpassing geselecteerd voor nadere uitwerking.

Deze uitwerking is geschied voor een bepaalde gekozen uitvoeringsvorm, ontwerpcapaciteit, belastingsgraad, denitrificatiecapaciteit e.d.

Opgemerkt zij, dat de resultaten uitsluitend een orde van grootte aangeven van de effecten en bijbehorende kosten. Voor iedere specifieke situatie zullen de mogelijke alternatieven moeten worden uitgewerkt voor een goede beoordeling van de mogelijkheden en kosten.

Hieruit is gebleken dat vooral bij onderbelaste circuits door aanpassing van de regeling van de zuurstoftoevoer een aanzienlijke verbetering van de N-totaalverwijdering is te realiseren, waarbij een beperkte kostenbesparing kan worden gerealiseerd. Ook bij propstroomsystemen met een slibbelasting van circa 0,10 kg BZV/kg d.s.d is een verbetering van de N-totaalverwijdering te realiseren door aanpassing van het zuurstoftoevoersysteem. Mede voor de noodzakelijke recirculatie van het afvalwater treedt een beperkte verhoging van de kosten op. Bij circuits met bellenbeluchting en gescheiden voortstuwing waarbij een aparte denitrificatieruimte aanwezig is, kan door een aanzienlijke verhoging van de recirculatie een verbetering van de N-totaalverwijdering worden gerealiseerd, wanneer deze denitrificatieruimte tenminste 20% van de totale beluchtingstank vormt.

Bij volledig gemengde systemen met een slibbelasting van circa 0,10 kg BZV/kg d.s.d is door altemnerend beluchten alleen een aantrekkelijke situatie te verkrijgen, wanneer zonder de nitrificatie te beïnvloeden een aanzienlijk deel van de beluchtingstank gedurende een belangrijk deel van de tijd niet wordt belucht. In het uitgewerkte voorbeeld zijn deze optimale omstandigheden niet aanwezig.

Compartimentering van de beluchtingstank is in dat geval een aantrekkelijker alternatief, zowel wat betreft de N-totaalverwijdering als de kosten.

Bij een slibbelasting van circa 0,15 kg BZV/kg d.s.d is veelal alleen door de bouw van een extra denitrificatietank een verbetering van de denitrificatie gedurende het gehele jaar te bereiken. Dit systeem brengt aanzienlijke kosten met zich mee.

Bij een denitrificatietank met een inhoud van circa 35% van het totale volume van beluchtingstank en denitrificatietank is bij voldoende recirculatie een goede denitrificatie te verkrijgen.

In bepaalde gevallen kan ook een voorbezinktank worden omgebouwd tot denitrificatietank. De kosten zijn aanzienlijk lager. Echter er ontstaat een gecompliceerde bedrijfsvoering en de grootte van de voorbezinkingstank is veelal onvoldoende om een duidelijke verbetering van de denitrificatie te verkrijgen.

1. Bij de uitwerking van de maatregelen voor optimalisatie van de denitrificatie is gebruik gemaakt van de berekeningsmethode "Kayser" voor de berekening van het effect van de optimalisatie op de N-totaalverwijdering. Hierbij is gebruik gemaakt van een aantal randvoorwaarden, die zijn gebaseerd op praktijkresultaten op Duitse rwzi's. Slechts een beperkte toetsing van de Nederlandse situatie was mogelijk. Aanbevolen wordt om deze toegepaste berekeningsmethode te onderzoeken onder de omstandigheden op Nederlandse rwzi's.
2. Bij de uitwerking van de optimalisatie van de denitrificatie in circuits met oppervlaktebeluchting is ervan uitgegaan dat verplaatsing van de toevoer van influent naar het begin van de anoxische zone een positief effect heeft op de denitrificatie. Gezien de snelle menging en verdunning van het influent over de gehele tank kan de vraag worden gesteld of het effect van deze maatregel groot is. Het is aan te bevelen dit in een Nederlandse praktijksituatie na te gaan.
3. Sturing van de beluchting is een belangrijk onderdeel van de optimalisatiemogelijkheden voor denitrificatie. De sturing geschiedt voorsnog op basis van het zuurstofgehalte. Meting van het nitraatgehalte in het effluent zou mede een bijdrage aan de sturing kunnen geven.
Een continue analyse biedt hiertoe mogelijkheden. Nader onderzoek is echter nodig naar de beschikbare methoden waarbij tevens aspecten als betrouwbaarheid, reproduceerbaarheid en wijze van sturing aan de orde moeten komen.
4. Een kritisch aspect bij de optimalisatie van de denitrificatie is de mogelijke beïnvloeding van de nitrificatie, ondermeer door de slibbelasting, temperatuur, grootte van anoxische zone e.d. Onderzoek op praktijkschaal kan op dit punt aanvullende informatie leveren.
5. Een voor-denitrificatie in een twee-slibsoortensysteem is momenteel gezien de kosten niet aantrekkelijk. Toepassing van een opstroomreactor biedt wel goede mogelijkheden, vanwege het hoge slibgehalte dat kan worden toegepast en het ontbreken van een tussenbezinktank.
Een verdere uitwerking van dit systeem op praktijkschaal kan zinvol zijn.

- 1 Barnard, J.L. - Biological Denitrification, Water Pollution Control, 1973: 705 - 720.
- 2 Barnes, D. & Buss, P.J. - Biological Control of Nitrogen in Wastewatertreatment, London 1983.
- 3 Christensen, M.H. - Denitrification of sewage by alternating process operation, Prog. Wat. Technology, 7 (1974) 2: 339 - 347.
- 4 Christensen, M.H. & Harremoës, P. - Biological denitrification of sewage - A literature review, Prog. Wat. Technology, 8 (1977) 4/5: 509 - 555.
- 5 Damiecki, R. - Stand der Nitrifikation und Denitrifikation in kommunalen Kläranlagen - statistische Auswertung, GWF-Wasser/Abwasser, 125 (1984) 10: 492 - 496.
- 6 Dawson, R.N. & Murphy, K.L. - The temperature dependency of biological denitrification, Water Research, 6 (1972): 71 - 83.
- 7 Diering, B. - Biologische Verfahren der Weitgehenden Abwasserreinigung, Nitrifikation und Denitrifikation, Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, 43 (1980): 11 - 47.
- 8 Dijkstra, F. - De verwijdering van stikstofverbindingen uit afvalwater, H₂O, 7 (1984) 22: 489 - 496.
- 9 E.P.A. - Process Design Manual for Nitrogen Control, U.S. Environmental Protection Agency, USA, 1975.
- 10 Ermel, G. - Steuerung des simultanen Denitrifikation über den Nitratgehalt des Belebtschlammes, GWF - Wasser/Abwasser, 124 (1983) 10: 484 - 487.
- 11 Geest, A.T. van der & Witvoet, W.C. - Nitrification and Denitrification in carrousel systems, Prog.Wat.Techn., 8 (1977) 4/5: 653 - 660.
- 12 Gemeenschappelijke technologische dienst Oost-Brabant - Jaarverslag 1982, Waterschappen de Aa, de Dommel en de Maaskant, Boxtel, 1983.
- 13 Giffen, A.E. van - Mogelijkheden voor energiebesparing bij oxidatiesloten. Deel 1: Nitrificatie-Denitrificatie, De klaarmeester, (1976) 2: 2 - 6.
- 14 Graaf, J.H.J.M. van der - Laten biologische zuiveringsprocessen zich naar temperatuur optimaliseren?, H₂O, 9 (1976) 5 : 87 - 94.
- 15 Graaf, J.H.J.M. van der - Beproevingen van het RotoFlow systeem, H₂O, 9 (1976) 25: 512 - 517.
- 16 Heide, B.A. - Aërobe en verdergaande zuivering van afvalwater in zeer laagbelaste actief-slibsystemen, Delft, IG-TNO, Rapport A 76.
- 17 Heide, B.A. - Aërobe en verdergaande zuivering van afvalwater in zeer laagbelaste actief-slibsystemen, Delft, IG-TNO, Rapport A 77.
- 18 Heide, B.A. - Afbreekbaarheid van NTA en effecten van NTA op de zware metalenhuishouding in biologische zuiveringsinrichtingen onder Nederlandse omstandigheden, Delft, IMG - TNO, rapport A 147, 1983.

- 19 Heide, B.A. & Kampf, R. - Aërobe en verdergaande zuivering van afvalwater in zeer laagbelaste actief-slibsystemen.
Stikstof en fosfaatverwijdering bij simultane precipitatie met AVR. Slibeigenschappen en verwerking, Delft, IG-TNO, 1977, rapport A 88.
- 20 Heide, B.A. - Biologische denitrificatie in zeer laagbelaste actief-slibsystemen, H_2O , 10 (1977) 3: 62 - 70.
- 21 Heide, B.A. - Zeer laagbelaste actief-slibsystemen, Delft, IG-TNO, Publikatie 607.
- 22 Heide, B.A. & Kruize, R.R. - Zuurstofoverdracht en denitrificatie in actief-slib, H_2O , 12 (1979) 15: 337 - 343.
- 23 Henze, M. & Bungaard, E. - Bemessung von kombinierten Nitrifikations- und Denitrifikationsanlagen, GWF-Wasser/Abwasser, 123 (1982) 5: 240 - 246.
- 24 Hoogheemraadschap van Delfland - Technisch Jaarverslag 1982, Delft, 1983.
- 25 Hoogheemraadschap van Rijnland - Zuiveringsproces in cijfers 1983, Leiden, 1984.
- 26 Hoogheemraadschap van West-Brabant - Bedrijfsresultaten zuiveringstechnische werken 1982, Breda, 1983.
- 27 Hutton, W.C. & La Rocca, S.A. - Biological treatment of concentrated ammonia wastewaters, J.W.P.C.F., 47 (1975) 5: 989 - 977.
- 28 Kayser, R. & Ermel, G. - Simultane Stickstoffelimination - Beiträge zur praktischen Anwendung auf Kläranlagen, Wasser und Boden, (1982) 5: 186 - 193.
- 29 Kayser, R. - Ein Ansatz zur Bemessung einstufigen Belebungsanlagen für Nitrifikation-Denitrifikation, GWF-Wasser/Abwasser, 124 (1983): 420 - 427.
- 30 Kayser, R. & Ermel, G. - Nitrifikation und Denitrifikation in ein- und zweistufigen Belebungsanlagen, Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, 59, (1983): 275 - 300.
- 31 Kienzle, K.H. - Anwendung und Anordnung von Denitrifikationsbecken, Korrespondenz Abwasser, 27 (1980) 4: 229 - 236.
- 32 Kienzle, K.H. - Vorschläge zur Gestaltung und Bemessung von Denitrifikationsbecken, Korrespondenz Abwasser, 27 (1980) 7: 447 - 446.
- 33 Klapwijk, A. & Jacobs, J.A. - Nitrificatie en Denitrificatie, H_2O , 7 (1974) 19: 399 - 400.
- 34 Klapwijk, A. - Eliminatie van stikstof uit afvalwater door denitrificatie, Proefschrift, Wageningen, Centrum voor landbouwpublikaties en landbouwdocumentatie, 1978.
- 35 Klapwijk, A. & Smit, H. & Moore, A. - Denitrification of domestic wastewater in an upflow sludge-blanket reactor without carrier material for the biomass. In: Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater, Cooper, P.C. & Atkinson, B., Chichester England, Horwood, E., 1981: 205 - 220.
- 36 Koot, A.C.J. - Behandeling van afvalwater, 2^e druk, Delft, Waltman, 1980.
- 37 Krauth, Kh. - Stellungnahme zur Veröffentlichung von R. Damiecki "Stand der Nitrifikation und Denitrifikation in kommunalen Kläranlagen - statistische Auswertung", GWF Wasser/Abwasser, 125 (1984) 10: 469 - 498.

- 38 Mandt, M.G. & Bell, B.G. - Oxidation Ditches in Wastewater treatment, Michigan, Ann Arbor Science Publisher, 1982.
- 39 Matsché, N.F. & Spatzierer, G. - Investigations towards a control of simultaneous nitrogen elimination in the treatment plant Vienna - Blumenthal, Prog. Wat. Techn., 8 (1977) 6: 501 -508.
- 40 Murakami, T. & Ishida T. - Full scale experiences with the anaerobic - aerobic biological phosphorus removal process, Research and Technology Development Division, Japan Sewage Works Agency, 1984.
- 41 Nicolls, H.A. - Modification of extended aëration plants in Johannesburg, South Africa, to achieve denitrification, Prog. Wat. Techn., 8 (1977) 4/5: 639 - 652.
- 42 Nicolls, H.A. - Modification of the operating procedure of the Johannesburg Alexandra plant to achieve phosphate removal without chemical addition, Prog. Wat. Tech., 8 (1977) 6: 183 -185.
- 43 Provinciale Waterstaat Friesland - Beheers- en bedrijfsresultaten rapport 1980 - 1982, Leeuwarden, 1983.
- 44 Rensink, J.H. & Donker, H.J. & Brons, H.J. - Biologische fosfaatverwijdering in een actief-slibinstallatie, H₂O, 12 (1979) 13: 296 -300.
- 45 De Renzo, D.J. - Nitrogen control and Phosphorus removal in sewage treatment, Noyes Data Corporation, USA, Park Ridge, New Jersey, 1978.
- 46 Rijksinstituut voor de Zuivering van Afvalwater (RIZA) - Literatuurstudie betreffende stikstofverwijdering uit afvalwater (Nitrificatie-Denitrificatie), 1980.
- 47 Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater -Afvalwaterzuiveringsinrichtingen voor gemeentelijke kernen in gebruik per 1-1-1983.
- 48 Schlegel, S. & Heesen, D. te - Untersuchungen zur Nitrifikation und Denitrifikation in einer Versuchsanlage, Korrespondenz Abwasser, 25 (1978) 7: 229 - 234.
- 49 Schlegel, S. - Nitrifikation und Denitrifikation in einstufigen Belebungsanlagen - Betriebsergebnisse der Kläranlage Lüdinghausen, GWF-Wasser/Abwasser, 124 (1983) 9: 428 - 434.
- 50 Schneider, M. - Denitrifikationsverfahren und deren Bedeutung für den Betrieb von Kläranlagen, Anaërobe Abwasser und Schlammbehandlung Biogastechnologie, Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, 36 (1983): 65 - 80.
- 51 Schneider, N. & Graaf, J.H.J.M. van der, & Zink, J. - United States Patent nr, 4, 452.708, 5 juni 1984.
- 52 Spierts, G. - Optimalisering van de bedrijfsresultaten van onderbelaste oxydatiecircuits van het type carrousel door een aangepaste procesvoering, De klaarmeester (1978) 2: 9 - 13.
- 53 Technologische Dienst Zeeuwse Waterschappen - Verslag zuiveringstechnische werken 1982, Terneuzen, 1983.
- 54 Tholander, B. - An example of design of activated sludge plants with denitrification, Prog. Wat. Techn., 8 (1977) 4/5: 665 - 672.
- 55 Trentelman, C.C.M. - Statistische verwerking van effluentgegevens van Nederlandse afvalwaterzuiveringsinstallaties, DHV

rapp. 4 - 5107 - 04 - 36.

- 56 Vliet, H. van - De mogelijkheden van nitrificatie en denitrificatie in de "Schreiber installaties" te Nieuw Lekkerland, De Klaarmeeester, (1972) 2: 3 - 6.
- 57 Water Pollution Controll Federation - Nutrient Control Manual of Practice FD-7, W.P.C.F., Washington D.C., USA, 1980.
- 58 Waterschap Regge en Dinkel - Waterkwaliteitsbeheer 1982, Verslag over het jaar 1982 van de technologische dienst, Almelo, 1983.
- 59 Witteveen+Bos, raadgevend ingenieursbureau, Zuurstofbehoefte en energieverbruik in beluchtingstanks, Technologisch Rapport 2, Deventer, 1978.
- 60 Wolf, P. - Stellungname zur Veröffentlichung von R. Damiecki "Stand der Nitrifikation und Denitrifikation in kommunalen Kläranlagen - statistische Auswertung", GWF Wasser/Abwasser, 125 (1984) 10: 499 - 500.
- 61 Zeper, J. & De Man, A. - Grote oxydatiesloten, type "Carrousel"-R, H₂O, 3 (1970) 19: 467 - 472.
- 62 Zuiveringschap Amstel- en Gooiland - Voortgangsverslag 1982, Hilversum 1983.
- 63 Zuiveringsschap Drenthe - Jaarverslag werking rioolwaterzuiveringsinrichtingen 1982, Assen, 1983.
- 64 Zuiveringsschap Drenthe - Laboratoriumonderzoek naar de nitrificatie- en denitrificatiesnelheid van het zuiveringsslib van de rioolwaterzuiveringsinrichting Gieten. Rapport technische Dienst Z.S. Drenthe, Assen, 1983.
- 65 Zuiveringsschap Drenthe - Memorandum over de stikstofverwijdering bij de uitbreiding van de rwzi-Gieten, Assen, 1983.
- 66 Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden - Jaarverslag technische gegevens 1982, Dordrecht, 1983.
- 67 Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden - Jaarverslag technische gegevens 1983, Dordrecht, 1984.
- 68 Zuiveringsschap Veluwe - Technologische jaargegevens 1982, Apeldoorn 1983.
- 69 Zuiveringschap West-Overijssel - Overzicht werking rioolwaterzuiveringsinstallaties 1982, Zwolle, 1983.

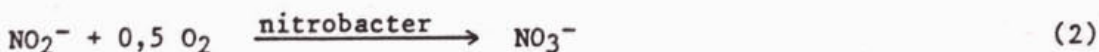
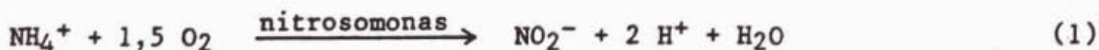
bijlagen

BIOLOGISCHE STIKSTOFVERWIJDERING

1.1 Microbiologische processen

De verwijdering van organische stoffen uit afvalwater in een actief-slibinrichting wordt bepaald door stofwisseling van chemo-heterotrofe bacteriën. Deze bacteriën gebruiken zuurstof om biologisch afbreekbare stoffen te oxyderen (dissimilatie). De energie die hierbij vrijkomt, wordt gebruikt voor de synthese van celmateriaal uit andere opgenomen organische stoffen (assimilatie).

Biologische stikstof-eliminatie wordt bewerkstelligd door nitrificatie en denitrificatie. Organisch gebonden stikstofverbindingen worden door chemo-heterotrofe bacteriën eerst omgezet in ammonium. Ammonium wordt vervolgens door bacteriën van het geslacht *Nitrosomonas* omgezet in nitriet. Nitriet wordt weer omgezet in nitraat door bacteriën van het geslacht *Nitrobacter*.

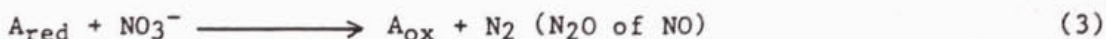


De nitrificerende bacteriën zijn chemo-autotroof. Zij gebruiken CO_2 als koolstofbron voor de celopbouw en zij verkrijgen de hiervoor benodigde energie uit de oxydatie van anorganische verbindingen, zoals in dit geval NH_4^+ . Dit in tegenstelling tot "normale" autotrofe organismen, die eveneens CO_2 als C-bron voor de celopbouw gebruiken, maar de benodigde energie via chlorofyl-a uit het zonlicht verkrijgen.

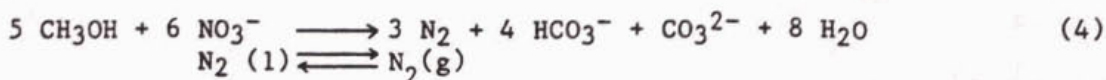
Onder normale procesomstandigheden verloopt reactie (2) veel sneller dan reactie (1). De omzetting van ammonium in nitriet is de snelheidsbepalende stap. Onder normale omstandigheden wordt dan ook geen of weinig nitriet in het effluent aangetroffen.

Eén van de belangrijkste eigenschappen van chemo-autotrofe nitrificerende bacteriën is hun trage groeisnelheid.

Verdere omzetting van nitraat vindt plaats door denitrificerende bacteriën. Denitrificerende bacteriën kunnen organische stoffen oxyderen met behulp van opgeloste zuurstof, maar ook via de zuurstof uit nitraat. Deze bacteriën zijn chemo-heterotroof. Dit houdt in dat zij organische stof gebruiken voor de celopbouw en de benodigde energie halen uit de oxydatie van gereduceerde organische verbindingen (dissimilatorische nitraatreductie). Het nitraat wordt dan via nitriet omgezet in distikstof en soms in stikstofoxyden ^{34, 46}.



Dezelfde reactie voor bijvoorbeeld methanol als gereduceerde organische stof ziet er dan als volgt uit:



Welke produkten (N_2 , N_2O of NO) uiteindelijk worden gevormd hangt af van de pH. Bij lage pH-waarden neemt de vorming van stikstofoxiden toe ⁴.

In tegenstelling tot de nitrificatie, is het vermogen om te denitrificeren een vrij algemene eigenschap van bacteriën die in het actief-slibproces voorkomen. Denitrificerende soorten behoren bijvoorbeeld tot de geslachten *Achromobacter*, *Alcaligines*, *Bacillus*, *Micrococcus* en *Pseudomonas*. Nitraat wordt door deze bacteriën tevens gebruikt als stikstofbron voor de celopbouw. In dit geval spreken we van assimilatorische nitraatreductie.

1.2 Nitrificatie

De slibleeftijd is de bepalende factor voor de nitrificatie. *Nitrosomonas* heeft als specifieke eigenschap dat de verdubbelingstijd zeer lang is. Vooral vergeleken met de groeisnelheid van de micro-organismen in het actief-slib, die verantwoordelijk zijn voor de biodegradatie van organische stof, groeit *Nitrosomonas* zeer langzaam. In een actief-slibinrichting kan nitrificatie pas dan plaatsvinden als de nitrificerende bacteriën niet uitspoelen. Hiermee wordt bedoeld dat er per tijdseenheid meer bacteriën moeten worden gevormd, dan er via het spuislib verdwijnen.

De slibleeftijd dient zo hoog te zijn dat de *Nitrosomonas*-concentratie tenminste gehandhaafd blijft.

Over het algemeen wordt de grens, waarbij nog volledige nitrificatie mogelijk is, gelegd bij een slibbelasting van 0,15-0,2 kg BZV/kg d.s.d ⁶.

temp. (°C)	slibleeftijd in dagen			
	Jones*	Stawkewich*	Marais*	Kayser ^{2 9} ** ***
5	20	20	18	12 18
7				
10	6	10	10	7 10
15		6	6	4 6
20	3	3	3	1,2 2
25		2	2	1 1,2
* RIZA Rapport ^{4 6} ** met zekerheidsfactor 2 *** met zekerheidsfactor 3				

Tabel 18. Minimale slibleeftijd voor nitrificatie bij verschillende temperaturen

1.2.1 zuurstofconcentratie

Nitrificerende bacteriën zijn obligaat aëroob. Een langdurig verblijf in anaëroob milieu (denitrificatieruimte of nabezinktank) is echter niet dodelijk voor deze bacteriën. Nitrificerende bacteriën kunnen na een anaërobe periode vrijwel momentaan starten met nitrificatie⁸.

De activiteit van nitrificerende bacteriën daalt sterk bij zuurstofconcentraties lager dan 0,5 mg/l. In de praktijk wordt meestal een zuurstofconcentratie van 1 mg/l gehandhaafd.

De nitrificatiesnelheid is maximaal bij een zuurstofconcentratie van 2 mg/l. Bij hogere zuurstofconcentraties neemt de nitrificatiesnelheid niet verder toe. Uit oogpunt van de nitrificatie is het dan ook niet zinvol om hogere zuurstofconcentraties in de beluchtingstank te handhaven^{4,6}.

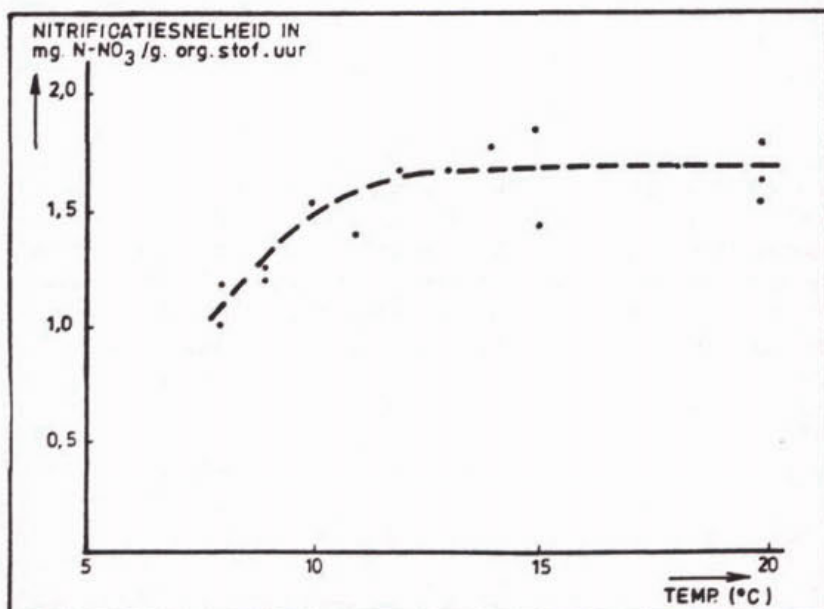
1.2.2 temperatuur

De temperatuur beïnvloedt niet alleen de groeisnelheid van de nitrificerende bacteriën en daardoor de benodigde slibleeftijd, maar ook de nitrificatiesnelheid²⁵.

De optimale temperatuur is 30° C. Beneden 5° C is de activiteit van nitrificerende bacteriën te verwaarlozen. Binnen de genoemde grenzen volgt de nitrificatiesnelheid ongeveer de van 't Hoff en Arrhenius wet. Dit houdt in dat de verhouding tussen de omzettingssnelheden bij 20° C en 10° C ongeveer een factor 2 bedraagt.

Heide¹⁷ heeft van de 10° C tot 20° C vrijwel geen toename gevonden van de nitrificatiesnelheid (zie figuur 19). Deze waarden zijn gemeten aan het laagbelaste oxydenitroproces.

In de zomermaanden kan daarbij de stikstof-belasting beperkend zijn geweest, zodat geen hogere nitrificatiesnelheid mogelijk was.

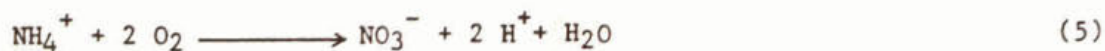


Figuur 19. Nitrificatiesnelheid als functie van de temperatuur

1.2.3 pH

Het optimale pH-gebied voor Nitrosomonas en Nitrobacter ligt tussen 7 en 8.

Het nitrificatieproces zelf kan de pH verlagen. De overall-vergelijking is:



De alkaliteit neemt door de oxydatie van ammonium af, zodat een pH-daling optreedt als de alkaliniteit-buffercapaciteit van de vloeistof in de beluchtingstank gering is.

Beneden een pH van 6,5 neemt de reactiesnelheid sterk af.

1.2.4 inhibitie

De nitrificatie wordt door diverse onderzoekers ^{16, 34} als een nulde orde reactie beschreven, zolang de concentratie ammonium boven 1-2 mg/l blijft.

Dit betekent dat de reactiesnelheid onafhankelijk is van de ammoniumconcentratie. Bij zeer hoge concentraties kan echter remming optreden. Zowel ammonium als nitriet zijn in niet-gedissocieerde vorm toxisch (respectievelijk NH_3 en HNO_2). De remming is dus pH-afhankelijk. Normale concentraties ammonium en nitriet in huishoudelijk afvalwater vallen echter ruim onder de toxiciteitsgrenzen. Voor ammonium ligt deze in de grootte-orde van 400-1000 mg N/l ^{27, 46}.

Bij simultane defosfatering met AVR wordt de nitrificatie sterk geremd. Beneden een temperatuur van 10°C valt de nitrificatiesnelheid terug tot zeer lage waarden ¹⁹.

In de winterperiode is de nitrificatie te verwaarlozen. Defosfateren met kalk heeft geen invloed op de nitrificatie.

1.3 Denitrificatie

Slibbelasting

Het vermogen van een actief-slibinrichting om te denitrificeren is veel minder afhankelijk van de slibbelasting dan de nitrificatie. Bacteriën, die de zuurstof uit nitraat als waterstofacceptor kunnen gebruiken, komen altijd in actiefeslib voor. Klapwijk ³⁴ vond voor verschillende typen rioolwaterzuiveringsinrichtingen een BZV-eliminerend vermogen van 20-40 % onder anaërobe omstandigheden en bij aanwezigheid van voldoende nitraat. Dit betekent dat een gedeelte van het slib tot denitrificatie in staat is.

Het percentage denitrificerende bacteriën in het actiefeslib is wel afhankelijk van de slibbelasting, met name de slibbelasting op basis van stikstofaanbod (uitgedrukt in kg N-Kj/kg d.s.d).

Volgens Klapwijk ³⁴ kunnen gemeten kinetische constanten alleen bij dezelfde slibbelasting, met name de stikstof-slibbelasting, worden gebruikt.

Klapwijk heeft ook onderzocht onder welke omstandigheden een zo hoog mogelijk percentage denitrificerende bacteriën in het slib kan worden verkregen en dus een zo hoog mogelijk denitrificerend vermogen. Het blijkt, dat aanvoer van de C-bron in een anaërobe - denitrificatie - periode wezenlijk is voor het verkrijgen van een goed denitrificerend slib.

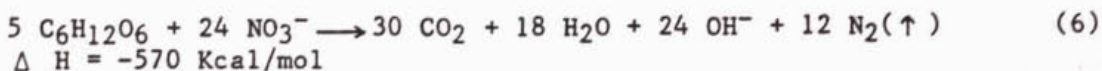
1.3.1 C-bron

Voor het goed verlopen van het denitrificatieproces moet aan twee voorwaarden worden voldaan, namelijk het tegelijkertijd aanwezig zijn van nitraat en een gereduceerde C-bron. Theoretisch is 2,86 g BZV nodig voor de reductie van 1 g NO_3^- -N. In de praktijk heeft men een BZV/N-verhouding van 4 à 5 nodig. Ten eerste om een acceptabele omzettingssnelheid te bereiken en ten tweede omdat een gedeelte van de BZV ook voor de slibproductie wordt gebruikt⁸. Christensen en Harremoës⁴ geven als BZV/totaal-N-verhouding, bij gebruik van influent als C-bron een waarde op van 4 à 5; bij het gebruik van de endogene ademhaling van het slib, waarbij reservevoedsel wordt verbruikt voor de energievoorziening, zelfs een BZV/N-verhouding van 5 à 6. Klapwijk³⁴ heeft uit zijn experimenten met huishoudelijk afvalwater een N/CZV-verhouding bepaald van 0,12 bij influent als C-bron. Omgerekend naar een BZV/N-verhouding is dat ongeveer 4 à 5.

1.3.2 zuurstof

De dissimilatorische nitraatreductie wordt sterk geremd door de aanwezigheid van zuurstof. Dit staat in nauw verband met het feit dat een lage redox-potentiaal voor dit proces een vereiste is; O_2 neemt anders de functie van NO_3^- over bij de oxydatie van organische stof. Als illustratie hiervan dient de oxydatie van bijvoorbeeld glucose:

denitrificatie



zuurstofademhaling



De reactie met O_2 levert per mol meer energie op (ΔH is meer negatief). Het verschil is groot genoeg om bij aanwezigheid van zuurstof de denitrificatie te verhinderen.

Toch treedt ook in een altijd aëroob actief-slibproces denitrificatie op. Dit is een gevolg van het feit dat door onvoldoende menging anaërobe zones in de beluchtingstank kunnen voorkomen en vanwege het feit dat in de slibvlok zelf anaërobie kan optreden²².

Volgens Christensen en Harremoës⁴ treedt in gesuspenderde cultures pas remming op boven een O_2 -gehalte van 0,5 mg/l.

Tijdens een aërobe periode gaat de stofwisseling van de heterotrofe denitrificerende bacteriën gewoon door, alleen nu met zuurstof in plaats van nitraat. Over de snelheid waarmee kan worden omgeschakeld van zuurstof naar nitraat als H-acceptor bestaat in de literatuur geen eensgezindheid.

Dijkstra⁸ beschrijft een onderzoek bij DSM, waaruit blijkt dat denitrificatie vrijwel direct start in de anaërobe periode.

Uit onderzoek van Klapwijk^{3,4} daarentegen blijkt dat het 40 - 60 minuten duurt voordat enzymen, nodig voor de denitrificatie, gevormd zijn na omschakeling van een aëroob naar anaëroob milieu; deze proeven werden met de bacteriestam *Pseudomonas perfectomarinus* uitgevoerd.

Het vermogen om te kunnen denitrificeren heeft volgens beide genoemde onderzoekers niets te lijden van een aërobe periode. Volgens Christensen en Harremoës⁴ wordt de denitrificatiecapaciteit zelfs verhoogd door afwisselend aërobe en anaërobe perioden.

1.3.3 Temperatuur

De denitrificatiesnelheid wordt sterker dan bij andere biologische processen in het actiefslib beïnvloed door de temperatuur. De optimale temperatuur ligt bij circa 40° C. Bij lagere temperaturen vindt echter ook nog denitrificatie plaats, zelfs beneden 5° C, tot een minimum van ongeveer 0° C⁴.

De denitrificatiesnelheid kan als functie van de temperatuur worden beschreven met een vereenvoudigde Arrheniusvergelijking.

$$RD_T = RD_{20} \cdot \Theta^{(T-20)} \quad (8)$$

met RD_T = denitrificatiesnelheid bij T° C
 RD_{20} = denitrificatiesnelheid bij 20° C
 Θ = temperatuursconstante (= 1,06 - 1,12)
 T = temperatuur in °C.

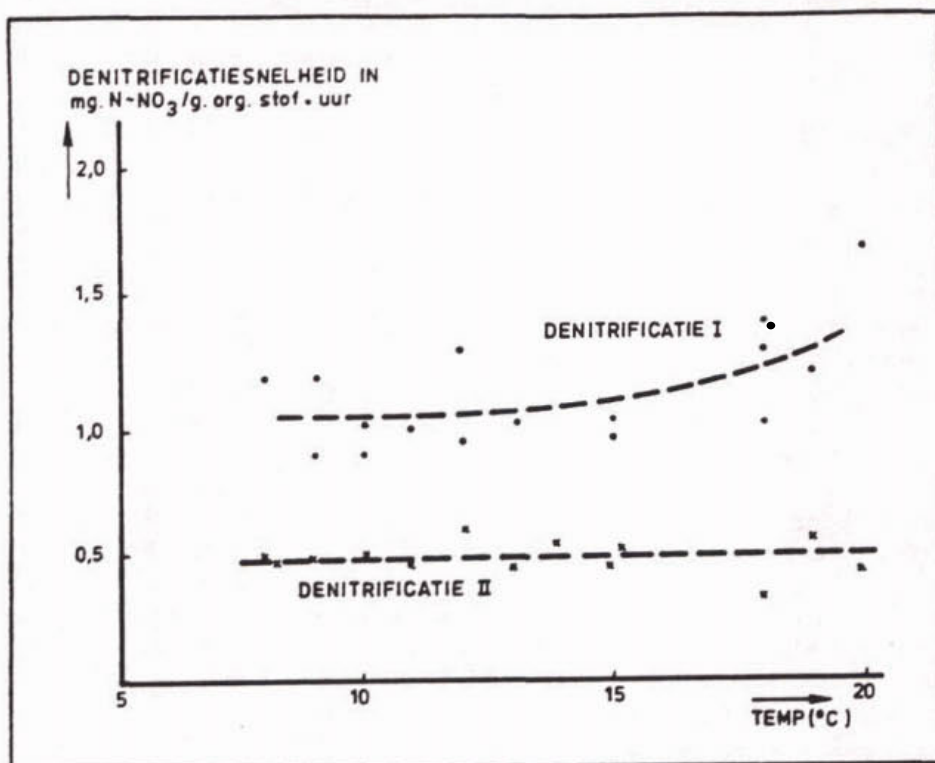
Bij 10° C is de maximale denitrificatiesnelheid gedaald tot 30 % van de waarde bij 20° C.

Heide¹⁷ vindt in het oxydenitroproces een heel ander beeld van de denitrificatiesnelheid als functie van de temperatuur (figuur 20). De invloed blijkt gering.

In het oxydenitroproces vindt denitrificatie plaats met influent als C-bron (denitrificatie I) en met endogene ademhaling (denitrificatie II). Met name de endogene ademhaling van het slib dat gevormd is bij lage temperaturen is hoger dan van slib gevormd bij 20°C, zodat denitrificatie II vrijwel onafhankelijk van de temperatuur is.

1.3.4 pH

Het optimale pH-gebied voor denitrificatie ligt tussen pH 7 en 9. Nodig is een pH tussen de 5,8 en 9,2⁸. Denitrificatie verhoogt de pH (zie vergelijking 4).



Figuur 20. Denitrificatiesnelheid als functie van de temperatuur

In het nitrificatieproces daalt de pH. Door een gecombineerd nitrificatie-denitrificatieproces wordt in de praktijk de pH in evenwicht gehouden.

1.3.5 inhibitie

De denitrificatie wordt omschreven als een nulde orde reactie, wat wil zeggen dat de reactiesnelheid boven een bepaalde ondergrens onafhankelijk is van de nitraatconcentratie. Christensen en Harremoës⁴ geven als ondergrens 0,1 mg NO₃-N/l. Hierboven is de invloed van nitraat verwaarloosbaar, eronder neemt de reactiesnelheid sterk af. Heide¹⁶ noemt als ondergrens 1-2 mg NO₃-N/l.

Behalve de remming door de zuurgraad en de zuurstofconcentratie zou er een substraatremming kunnen optreden door ammoniak, nitriet of methanol.

In de literatuur worden echter geen schadelijke effecten van ammoniak of methanol vermeld, terwijl nitriet pas remmend optreedt bij zeer hoge en zelden voorkomende concentraties groter dan 30 mg NO₂⁻-N/l⁴.

In tegenstelling tot de nitrificatie wordt de denitrificatie niet geremd door chemische defosfatering met AVR¹⁹. Ook defosfateren met kalk heeft geen negatieve invloed op de denitrificatie.

DENITRIFICATIE IN COMBINATIE MET DEFOSFATEREN

1

CHEMISCH DEFOSFATEREN

Bij chemisch defosfateren bestaat het actiefslib voor een groter deel uit anorganisch materiaal. In de oxydenitro-installatie van TNO werd bij defosfateren met kalk een asgehalte (als % van de drogestof) gemeten van 42%.

Bij defosfateren met AVR was het asgehalte 37%, terwijl in een vergelijkbare oxydatiesloot dit 24% was¹⁹.

Door een hoger drogestofgehalte in de beluchtingsruimte te handhaven kan een nadelig effect op BZV-afbraak, nitrificatie en denitrificatie worden gecompenseerd.

Bij simultane defosfatering met AVR ($Al^{3+}/Fe^{3+} = 4,8$) vindt er een sterke remming plaats van de nitrificatiesnelheid (uitgedrukt als mg N/g o.d.s.d.). De nitrificatiesnelheid neemt af tot 60% van die bij defosfateren met kalk¹⁹. Beneden een temperatuur van 10-11°C valt de nitrificatiesnelheid zelfs terug tot zeer lage waarden. In de winterperiode is de nitrificatie, zelfs in een rwzi met een slibbelasting van 0,05 kg BZV/kg d.s.d. dan te verwaarlozen.

Bovendien is gebleken dat de denitrificatie niet wordt beïnvloed door de AVR-dosering. In de praktijk zal de denitrificatie teruglopen als gevolg van de slechte nitrificatie.

Bij simultane denitrificatie met kalk ($Ca(OH)_2$ of CaO) worden de nitrificatie en denitrificatie niet geremd.

2

BIOLOGISCH DEFOSFATEREN

Het processchema van een biologisch defosfateringssysteem (zoals o.a. Rensink dat aan de L.H. te Wageningen onderzoekt⁴⁴) lijkt sterk op het processchema van vóór-denitrificatie. In beide gevallen wordt de beluchtingsruimte opgedeeld in twee delen. Een eerste deel waarin de zuurstofconcentratie nul moet zijn en een tweede aëroob deel. Toch is er een essentieel verschil, waardoor de zuurstofloze zone niet tegelijk kan fungeren als denitrificatiezone en anaërobe zone in het defosfateringsproces. Bij denitrificatie is er sprake van een recirculatie van nitraat en een anoxische zone. Bij biologisch defosfateren is er sprake van een anaërobe zone en stoort de aanwezigheid van nitraat het proces.

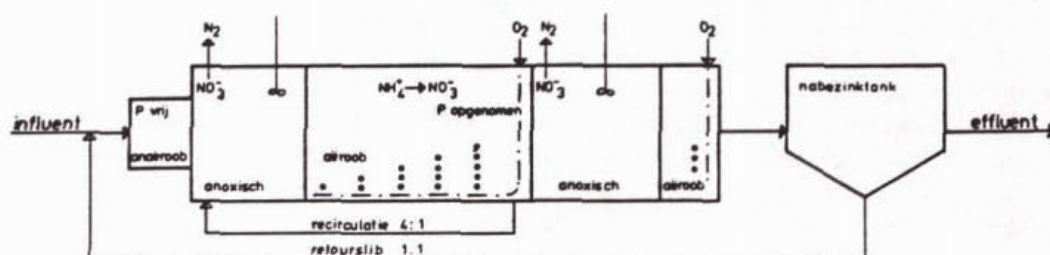
Het principe van het biologisch defosfateren is, dat de bacterie *Acinetobacter* in de anaërobe zone polyfosfaten, die opgeslagen zijn in de cel, gebruikt voor de energievoorziening. Fosfaat, in de vorm van ortho-fosfaat, komt hierbij vrij in de oplossing. *Acinetobacter* gebruikt in deze fase lagere vetzuren voor de opslag van reserve-materiaal.

In de aërobe zone wordt zuurstof gebruikt voor de energievoorziening en wordt fosfaat opgenomen en opgeslagen in de cel in de vorm van polyfosfaten. Deze opname van fosfaat is groter dan de hoeveelheid, die in de anaërobe zone vrijkwam: "de zogenaamde luxury uptake".

Indien in de anaërobe zone nitraat aanwezig is, wordt het vrijkomen van fosfaat verstoord, waardoor ook de opname in de aërobe zone sterk vermindert.

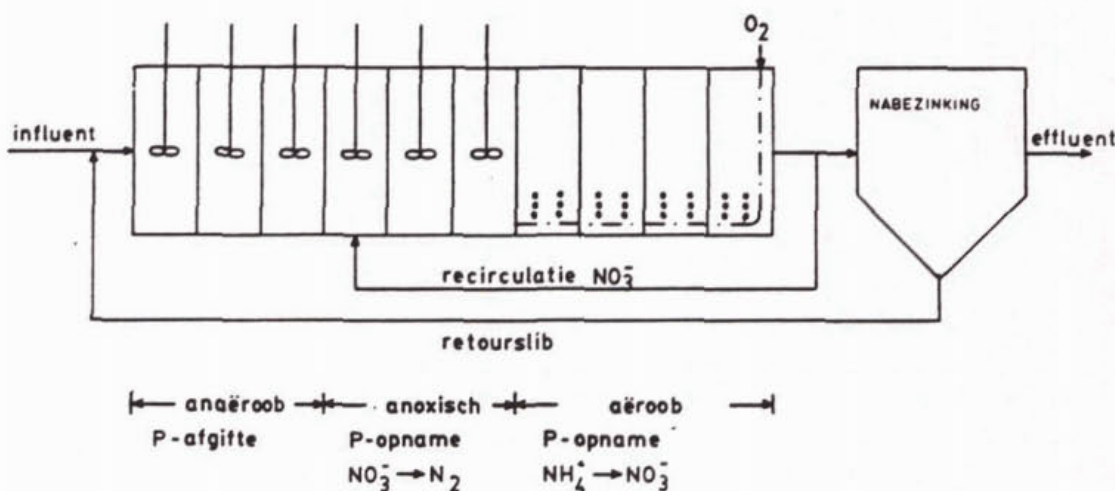
Toepassing van biologisch defosfateren in combinatie met denitrificatie betekent dat 2 zuurstofloze zones gecreëerd moeten worden, een anoxische zone met recirculatie van nitraat voor denitrificatie en een anaërobe zone met alleen retourslib voor het defosfateringsproces. Dit wordt toegepast in het Bardenpho-proces en in het A/O-proces.

Het principe van het Bardenpho-proces staat in figuur 21 weergegeven⁵⁷. Het nitraatgehalte in de anaërobe zone moet laag zijn om de P-afgifte niet te verstoren. Om te voorkomen dat nitraat in het retourslib aanwezig is, is een tweede denitrificatiestap opgenomen om een vergaande denitrificatie te waarborgen.



Figuur 21. Schematische weergave van het Bardenpho-proces

Het A/O-proces (figuur 22) is vergelijkbaar met het Bardenpho-proces. Er is echter geen tweede denitrificatiezone aanwezig.



Figuur 22. Schematische weergave van het A/O systeem

Van beide systemen zijn nog weinig praktijkgegevens bekend. Een systeem vergelijkbaar met het A/O-proces is in Japan onderzocht⁴⁰. De beluchtingstank was hierbij opgedeeld in 4 zones: een anaërobe zone (1/4 deel), een anoxische zone (1/4 deel) en twee aërobe zones

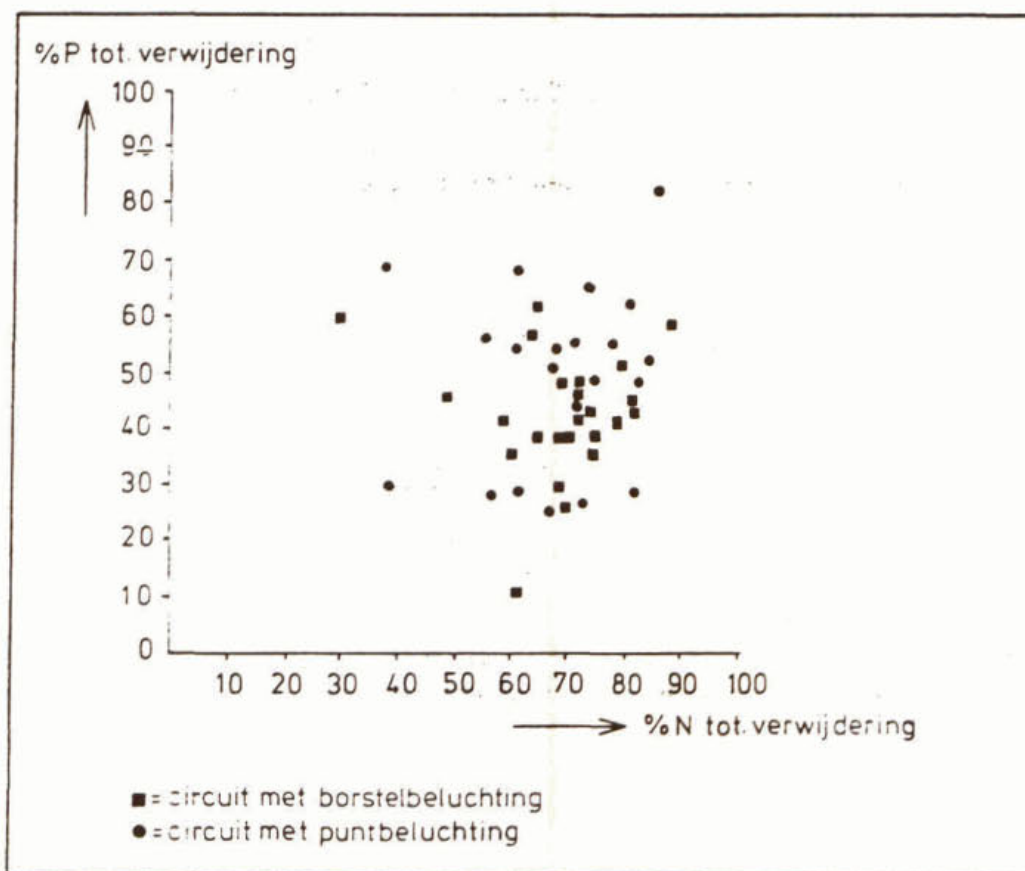
(2/4 deel). Bij een slibbelasting die varieerde tussen 0,06 en 0,14 kg BZV/kg d.s.d., werd een totaal-P-verwijderingspercentage gemeten tussen 73 - 94%. Het totaal-N-verwijderingsrendement bedroeg 45 - 71%. Bij dit experiment is gebleken dat in de anoxische zone fosfaat wordt opgenomen. Door de aanwezigheid van nitraat fungeert deze zone als een "beluchte" zone, zodat de anoxische denitrificatiezone niet tevens kan worden gebruikt als anaërobe defosfateringsstap.

PRAKTIJKGEGEVENS P- EN N-VERWIJDERING

Incidenteel is op rwzi's met een slibbelasting van 0,05 kg BZV/kg d.s.d. een hoge fosfaatverwijdering gemeten in combinatie met een hoge N-totaalverwijdering (rwzi-Bunnik, rwzi-Oude Schild). Op deze inrichtingen is sprake van een alternerende beluchting.

De vraag is derhalve in hoeverre maatregelen ter verbetering van denitrificatie ook de biologische defosfatering zullen verbeteren. Over het toepassen van alternerend beluchten zijn te weinig gegevens bekend om conclusies te kunnen trekken. Wel zijn gegevens voorhanden van oxydatiesloten en carrousels. In principe kan bij volledige belasting hierin een zonering in zuurstofgehalte optreden.

In figuur 23 is van 47 oxydatiesloten en carrousels de P-verwijdering uitgezet tegen de N-totaalverwijdering.



Figuur 23. P-verwijdering en N-totaalverwijdering in oxydatiesloten en carrousels

Er blijkt geen correlatie te bestaan tussen denitrificatie en biologisch defosfateren.

Verbetering van denitrificatie zal dus niet zondermeer leiden tot een betere fosfaatverwijdering.

BEREKENING DENITRIFICATIE

Onderstaande berekening is voor een groot deel gebaseerd op een artikel van prof.dr.ing. R. Kayser (Ein Ansatz zur Bemessung einstufiger Belebungsanlagen für Nitrifikation-Denitrifikation, GWF-Wasser/Abwasser, 124 (1983) 9: 419-427).

GEGEVENS

debiet	Q	(m ³ /d)
influent of voorbezonken afvalwater:		
BZV-vracht		(kg BZV/d)
N-Kj-vracht		(kg N-Kj/d)
NO ₃ -N-vracht		(kg NO ₃ -N/d)
drogestofgehalte	Ga	(kg/m ³)
slibbelasting	k	(kg BZV/kg d.s.d)
volume beluchtingstanks	V	(m ³)
volume nitrificatieruimte	VN	(m ³)
volume denitrificatieruimte	VD	(m ³)

NITRIFICATIE

Bij de bouw van een extra denitrificatietank blijft de beluchtingstank geheel beschikbaar voor nitrificatie.

Bij aanleg van een anoxische zone in de beluchtingstank kan maar een bepaald deel gereserveerd worden voor denitrificatie. In tabel 19 staat aangegeven welk deel minimaal nodig is voor nitrificatie en welk deel derhalve resteert voor denitrificatie.

temperatuur °C	k	minimaal nitrificatiedeel	maximaal denitrificatiedeel
8	0,05	33%	67%
	0,10	67%	33%
	0,125	83%	17%
	0,15	100%	0%
15	0,05	20%	80%
	0,10	40%	60%
	0,125	50%	50%
	0,15	60%	40%
	0,20	80%	20%
	0,25	100%	0%

Tabel 19. Maximale denitrificatiezone bij verschillende slibbelastingen

BEREKENING

De berekening is gebaseerd op een iteratie.

Uitgangspunt is het volume van de denitrificatieruimte. Bij de bouw van een extra denitrificatietank kan het volume vrij worden gekozen.

Bij toepassing van een anoxische zone in de bestaande beluchtings-tank is het gebonden aan een maximum (zie tabel 19).

Met het volume van de denitrificatieruimte wordt de hoeveelheid nitraat in het effluent en de benodigde recirculatiefactor berekend. Als één van beide niet aan de gestelde eisen voldoet kan het volume van de denitrificatieruimte worden vergroot of verkleind en de berekening worden herhaald.

De berekening zelf is opgenomen in tabel 20.

Toelichting:

- slibbelasting (1) en slibleeftijd (2) worden berekend over het totale volume. Bij de bouw van een extra tank is dit het volume van die tank (VD) plus het volume van de bestaande beluchtings-tank (VN). Bij aanleg van een anoxische zone in een bestaande tank blijft het totale volume ongewijzigd (volume beluchtings-tank);
- de slibleeftijd kan als een gegeven in de berekening worden ingevoerd, of worden berekend uit de slibbelasting en figuur 24. Hierbij is een factor nodig:

zwevende stof (mg/l)

BZV (mg/l)

Een vuistregel voor de waarde van deze factor is 0,375 - 0,5 bij voorbezonken afvalwater en 1,25 bij niet voorbezonken afvalwater. Door deze factor wordt de slibleeftijd in figuur 24 gecorrigeerd voor het anorganisch materiaal dat eventueel in de beluchtings-tank terecht komt;

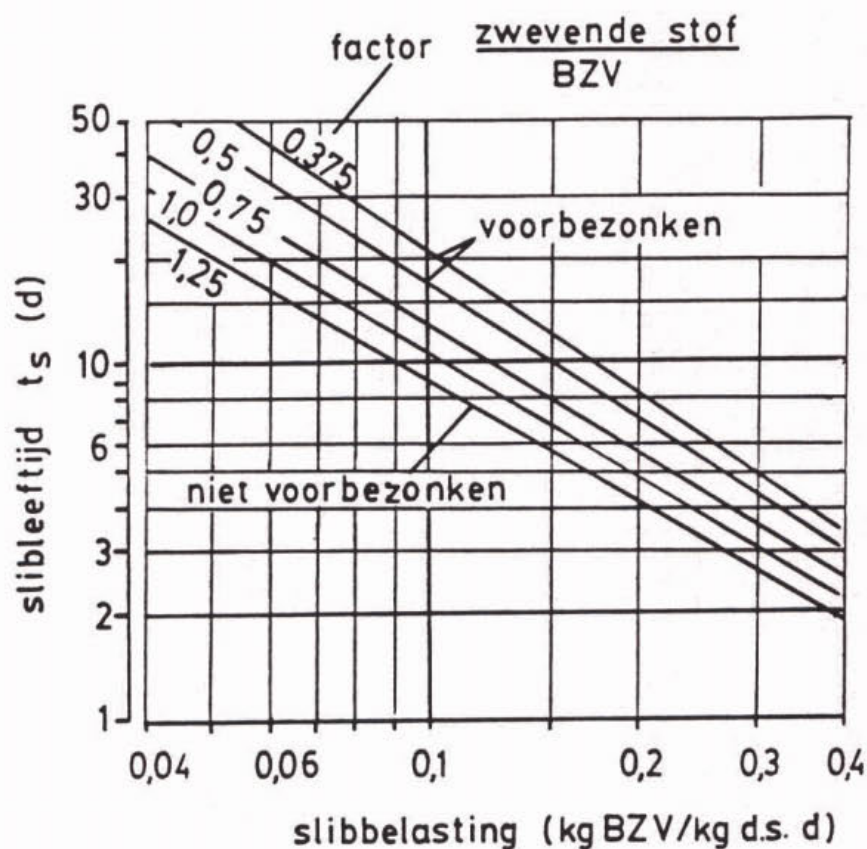
- de $\text{NO}_3\text{-N}$ -omzettingssnelheid (7) wordt in figuur 26 en 27 opgegeven per m³. Dit is de inhoud van de gehele beluchtingstank, inclusief denitrificatieruimte. De denitrificatiesnelheid in de denitrificatieruimte zelf kan hieruit worden berekend volgens:

$$\frac{(8)}{\text{VD} \times \text{Ga}} \quad \text{in kg N/kg d.s.d;}$$

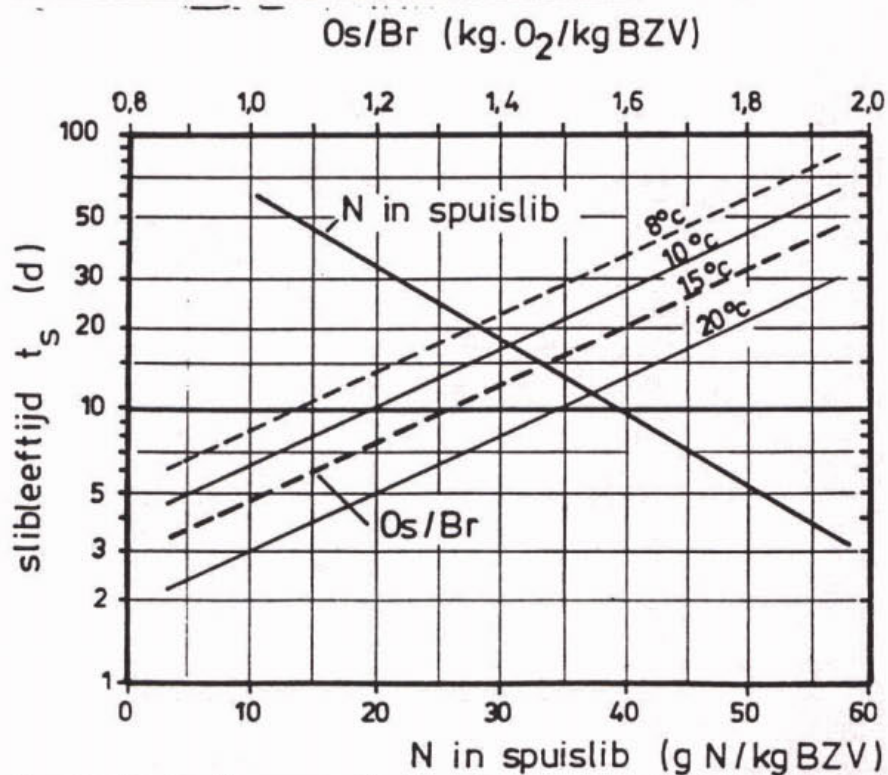
- de N-Kj-verwijdering (10) is alleen van belang voor de berekening van de recirculatiefactor. Als de concentratie N-Kj = 0 is de recirculatiefactor minimaal.

	symbool	eenheid	berekening
(1) slibbelasting	k	kg BZV/kg d.s.d	bij anoxische zone: over gehele B.T. bij extra tank : over B.T. + extra tank
(2) slibleeftijd (na bouw extra tank)	ts	dagen	gegeven of uit figuur 24
(3) zuurstofverbruik voor C-afbraak per kg BZV	$\frac{O_s}{Br}$	kg O ₂ /kg BZV	met slibleeftijd en temperatuur uit figuur 25
(4) zuurstofverbruik voor C-afbraak	$\frac{O_s}{N \text{ in slib}}$	kg O ₂ /m ³ .d	(3) x (1) x Ga
(5) N-opname in spuislib	$\frac{Br}{Br}$	g N/kg BZV	met slibleeftijd uit figuur 25
(6) keuze tussen voor-denitrificatie (figuur 26) of simultane denitrificatie (figuur 27)			
(7) NO ₃ -omzettingssnelheid betrokken op gehele B.T. + extra tank	NO ₃ -NRD	kg N/m ³ .d	met O _s uit figuur 26 of 27
(8) NO ₃ -N-omzetting	-	kg NO ₃ -N/d	(7) x V-tot
(9) N in spuislib	-	kg N/d	(5) x BZV-vracht
(10) N-Kj-verwijdering	-	Σ	gegeven op basis van nitrificatie en temperatuur
(11) NO ₃ -N in effluent	-	kg NO ₃ -N/d	$\frac{(10)}{100} \times N\text{-influent}-(8)-(9)$
(12) recirculatiefactor $\frac{QR + Q}{Q}$	rf	-	$\frac{(8)}{(11)}$

Tabel 20. Berekeningsschema denitrificatie

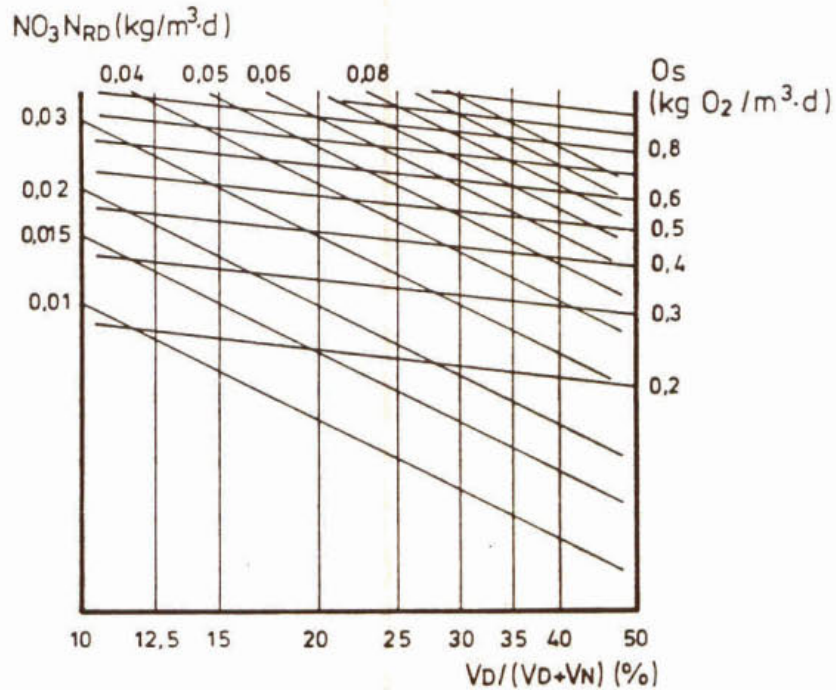


Figuur 24. Berekeningsdiagram voor de slibleeftijd



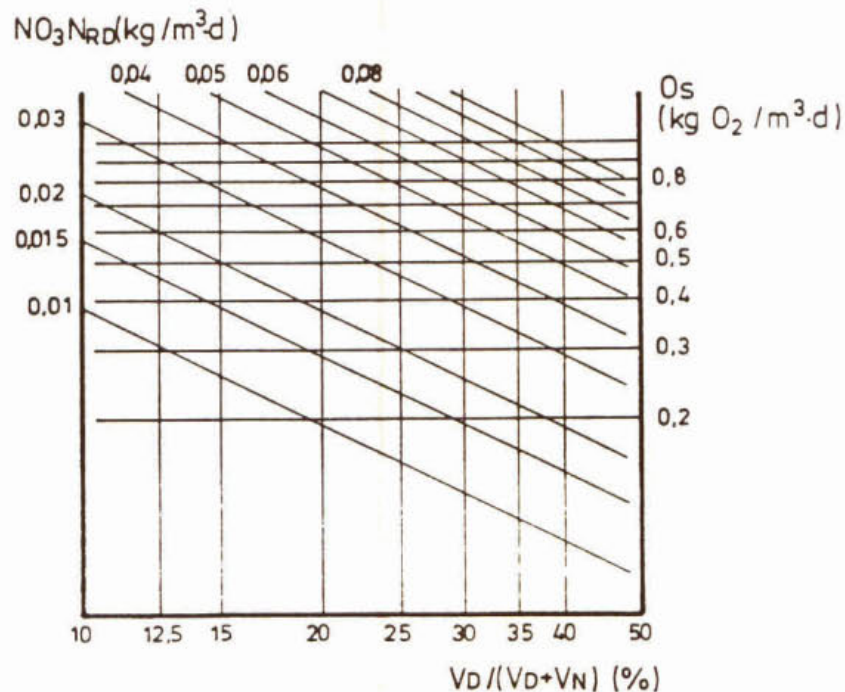
Figuur 25. Zuurstofverbruik voor C-afbraak en de stikstofopname in het spuislib als functie van de slibleeftijd

VOOR-DENITRIFICATIE



Figuur 26. Nomogram voor de berekening van de denitrificatie bij een gegeven denitrificatievolume bij voor-denitrificatie

SIMULTANE DENITRIFICATIE



Figuur 27. Nomogram voor de berekening van de denitrificatie bij een gegeven denitrificatievolume bij simultane denitrificatie

VOORBEELD BEREKENING

Gegevens bestaande installatie:

capaciteit rwzi		100.000	i.e.
debiet	Q	18.800	m ³ /d
BZV-vracht (voorbezonken)		3.500	kg BZV/d
N-Kj-vracht (voorbezonken)		1.040	kg N-Kj/d
NO ₃ -N (voorbezonken)		0	kg NO ₃ -N/d
drogestofgehalte	Ga	3	kg d.s/m ³
slibbelasting	k	0,15	kg BZV/kg d.s.d
volume beluchtingstanks		7.780	m ³

Gezien de huidige slibbelasting (0,15) is de gehele beluchtingstank nodig voor nitrificatie.

Berekend wordt de stikstofverwijdering voor de situatie met een extra denitrificatietank die 25% van het totale volume vormt, bij een temperatuur van 15°C.

volume huidige beluchtingstanks	: VN = 7.780 m ³
totaal volume beluchting + denitrificatie	: VN + VD = 10.380 m ³
volume extra denitrificatietank	: VD = 2.600 m ³

Berekening:

- (1) slibbelasting: $\frac{7.780}{10.380} \times 0,15 = 0,112 \text{ kg BZV/kg d.s.d}$
- (2) slibleeftijd: 15 - 18 dagen
zie figuur 24; k = 0,112; factor = 0,375; (voorbezonken afvalwater)
- (3) zuurstofverbruik: 1,5 kg O₂/kg BZV
Os/Br (kg O₂/kg BZV) zie figuur 25; ts = 15-18 dagen;
temp. = 15°C;
- (4) zuurstofverbruik (Os): $1,5 \times 0,112 \times 3 = 0,50 \text{ kg O}_2/\text{m}^3.\text{d}$
- (5) N-opname in spuislib: 32 g N/kg BZV
zie figuur 25; ts = 15-18 dagen
- (6) keuze tussen vóór-denitrificatie of simultane denitrificatie:
bij bouw van een extra tank (of propstroom): vóór-denitrificatie.
- (7) NO₃-N-omzettingssnelheid: 0,045 kg N/m³.d
zie figuur 26; Os = 0,50 kg O₂/m³.d;
VD/(V + VD) = 25%
- (8) NO₃-N-omzetting: $0,045 \times 10.380 = 467 \text{ kg NO}_3\text{-N/d}$
- (9) N-opname in spuislib: $\frac{32 \times 3500}{1000} = 112 \text{ kg N/d}$

(10) N-Kj-verwijdering gegeven nodig om de recirculatie te bepalen; stel op 90% bij 15 °C

(11) NO₃-N in effluent: 0,9 x 1040 - 112 - 467 = 357 kg NO₃-N/d

(12) recirculatiefactor: $rf = \frac{467}{357} = 1,3$

De denitrificatiesnelheid in de denitrificatietank onder de gegeven omstandigheden (VD = 25% van V-totaal; k = 0,112; T = 15°C, enz.) is dan:

$$\frac{467}{2600 \times 3} = 0,060 \text{ kg N/kg d.s.d}$$

De slibbelasting van het slib in deze denitrificatietank is:

$$\frac{3500}{2600 \times 3} = 0,45 \text{ kg BZV/kg d.s.d}$$

De nitraatconcentratie in het effluent is $357 \times 1000/18.000 = 20 \text{ mg NO}_3\text{-N/l}$. Als een lagere waarde gewenst is, moet de denitrificatietank groter worden gemaakt, bijvoorbeeld 35% van het totale volume. V-totaal wordt dan 11.970 m³ en VD wordt 4010 m³.

De slibbelasting over de gehele beluchtingstank + denitrificatieruimte wordt 0,097 kg BZV/kg d.s.d.

De nitraatconcentratie in het effluent wordt + 11 mg/l bij een recirculatiefactor van 3,1. De denitrificatiesnelheid is circa 0,053 kg N/kg d.s.d bij een slibbelasting van 0,29 kg BZV/kg d.s.d in de denitrificatietank.

