

1995-09_stikstofrijke-retourstromen-membraan-
bioreactor

stowa

**Behandeling van stikstofrijke
retourstromen
op rioolwaterzuiveringsinrichtingen**

Praktijkonderzoek aan de membraan-bioreactor
bij het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk

95-09



Zuiveringschap Hollandse
Eilanden en Waarden

 **Grontmij**

Afdeling Procestechniek & Installaties

Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen

Praktijkonderzoek aan de membraan-bioreactor
bij het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk

95-09

Publicaties en het publicatieoverzicht
van de Stowa 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.
ISBN nr. 90.74476.33.3

Inhoudsopgave

	Ten geleide	i
	Samenvatting	1
1	Inleiding	4
2	Doelstelling	6
3	Membraan-bioreactor	7
	3.1 Achtergrond van de Membraan-bioreactor	7
	3.2 Technische specificaties van de proefinstallatie	9
	3.3 Referenties	10
4	Onderzoeksprogramma	11
	4.1 Algemeen	11
	4.2 Onderzoek	11
	4.2.1 Inregelen van de installatie en slibadaptatie	12
	4.2.2 Duurproeven	12
	4.2.3 Additioneel onderzoek	14
	4.3 Materialen en methoden	15
	4.3.1 Bemonstering	15
	4.3.2 Analyses	16
	4.3.3 Metingen	16
	4.3.4 Batchproeven en respiratiemetingen	16
5	Resultaten	17
	5.1 Het technisch functioneren	17
	5.2 Enting en adaptatie	18
	5.2.1 Opstart 1	18
	5.2.2 Opstart 2	19
	5.3 Duurproeven	20
	5.3.1 Duurproef 1 - lage influentconcentratie	20
	5.3.2 Duurproef 2 - normale influentconcentratie	25
	5.3.3 Duurproef 3 - verhoogde influentconcentratie	32
	5.4 Additioneel onderzoek	38
	5.4.1 Ultrafiltratiemembranen	38
	5.4.2 Zuurstoftoevoervermogen	41
	5.4.3 Temperatuurbeheersing	42
	5.4.4 Invloed van zwevend stof in het influent op de bedrijfsvoering	43

6	Evaluatie	45
6.1	Algemeen	45
6.2	Technologische aspecten	45
6.2.1	Opstart	45
6.2.2	Nitrificatie/denitrificatie	46
6.2.3	Verwijderingsrendementen	46
6.2.4	Slibgroei	47
6.2.5	Zuurstofoverdracht	47
6.2.6	Chemicaliënverbruik	50
6.2.7	Membraanfiltratie	51
6.2.8	Warmtebalans	53
6.3	Technische aspecten en bedrijfsvoeringsaspecten	54
6.3.1	Technische aspecten	54
6.3.2	Bedrijfsvoeringsaspecten	54
6.4	Dimensioneringsgrondslagen	55
6.5	Gevoeligheidsanalyse	56
6.5.1	Algemeen	56
6.5.2	Nitriet-/nitraatroute	56
6.5.3	Mate van denitrificatie	57
6.5.4	pH	57
6.6	Algemene toepasbaarheid van het systeem	58
7	Kosten	59
7.1	Varianten	59
7.2	Dimensionering	59
7.3	Stichtingskosten	60
7.4	Exploitatiekosten	60
8	Conclusies en aanbevelingen	63
8.1	Conclusies	63
8.2	Aanbevelingen	64
	Literatuurlijst	65
	Lijst van gebruikte symbolen	66
	Lijst van gebruikte afkortingen	68

BIJLAGEN

1	PFD Membraan-bioreactor
2	Referenties Membraanbioreactoren
3	Tijdplanning van het onderzoek
4	Analyseschema van het onderzoek
5	Analyseresultaten van de duurproeven
6	Bepaling van de yieldcoëfficiënten
7	Loogverbruik
8	Methanolverbruik
9	Membraanfiltratie
10	Simulaties met het IAWQ-model
11	Warmtebalans
12	Dimensionering van de varianten
13	Berekening van de stichtingskosten
14	Berekening van de exploitatiekosten

Ten geleide

Door de aangescherpte stikstofeis, die vanaf 1998 voor het effluent van bestaande rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) zal gelden, zal voor sommige rwzi's capaciteitsuitbreiding onvermijdelijk zijn. Voor andere rwzi's, die de eis van $N_{\text{tot}} \leq 10 \text{ mg/l}$ net niet halen, kunnen relatief kleine aanpassingen van het zuiveringssysteem wellicht al voldoende zijn.

De behandeling van interne stikstofrijke retourstromen, vrijkomend bij de slibverwerking na de slibgisting, biedt hier een mogelijkheid om met zo min mogelijk kosten en ruimtebeslag de stikstofeis alsnog te kunnen halen. Stikstofverwijdering uit dit retourwater - een relatief zeer geringe hoeveelheid met een relatief grote stikstofvracht - kan de stikstofbelasting op de bestaande rwzi met 10 tot 20% verlagen.

In 1994 is door een combinatie van waterkwaliteitsbeheerders, ingenieursbureaus en de STOWA een aantal behandelingsmethoden voor het stikstofrijke retourwater in de praktijk op pilot plant-schaal onderzocht:

- de membraanbioreactor op de slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk door het zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden en Grontmij N.V.;
- de driefasen-airliftreactor op de rwzi Utrecht door de provincie Utrecht, Paques en DHV;
- het lucht- en stoomstrippen van ammoniak op de rwzi Utrecht door de provincie Utrecht en DHV;
- het stoomstrippen van ammoniak op de rwzi Amsterdam-Oost door de Dienst Riolerings en Waterhuishouding Amsterdam (met financiële participatie van het hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier);
- het MAP/CAFR-proces op de rwzi Utrecht door de provincie Utrecht en DHV.

Het geheel van deze praktijkonderzoeken werd in opdracht van de STOWA gecoördineerd door DHV Water B.V. en gerapporteerd in STOWA-rapport 95 - 08 "Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rwzi's; evaluatie van Nederlandse praktijkonderzoeken".

Naast het onderhavige onderzoek aan de Membraan-bioreactor, zijn ook de overige onderzoeken in separate STOWA-rapporten gepubliceerd. Ook over de afzetmogelijkheden van de reststoffen, die met name bij de fysisch/chemische behandelingsmethoden vrijkomen, is in dit kader door de STOWA gerapporteerd.

Het onderhavige rapport beschrijft het onderzoek op de locatie Sluisjesdijk aan de Membraan-bioreactor, uitgevoerd door Grontmij N.V. (projectteam ir. L. van Dijk, ir. H.J.W. Postma en ing. G.C.G. Roncken). Uit het onderzoek komt de Membraan-bioreactor als een technisch en technologisch betrouwbaar en geschikt systeem naar voren.

De werkzaamheden werden namens de STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ir. J. Ebbenhorst (voorzitter), ir. S.G. van der Kooij, ir. A. Mulder, ing. G.B.J. Rijs, ing. A.A.J.C. Schellen, ir. P.C. Stamperius en mw. ir. M.J.L. van de Vondervoort.

Utrecht, mei 1995

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

Samenvatting

In opdracht van het Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden (ZHEW) heeft Grontmij Advies & Techniek bv onderzoek verricht naar de mogelijkheden van vergaande stikstofverwijdering uit interne stromen met de Membraan-bioreactor. Van het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk wordt met het centrifugaat (rejectiewater) van de ontwateringscentrifuges een aanzienlijke N-vracht teruggevoerd naar de rwzi Dokhaven. Behandeling van het N-rijke retourwater is een methode om verdergaande N-verwijdering bij de rwzi Dokhaven te bereiken.

De Membraan-bioreactor is een compact afvalwaterzuiveringssysteem waarbij biologische zuiveringsprocessen (CZV-verwijdering, nitrificatie, denitrificatie) worden gecombineerd met membraantechnologie.

Het ZHEW participeert met dit onderzoek in een STOWA project waarbij parallel onderzoek is verricht naar de stikstofverwijdering uit interne stromen, afkomstig van anaëroob vergist slib, op bestaande rwzi's. Met het onderzoek op de locatie Sluisjesdijk zijn de volgende doelstellingen nagestreefd:

- Het vaststellen van technologische, operationele en financieel economische kengetallen voor de behandeling van rejectiewater met de Membraan-bioreactor.
- Het vaststellen van dimensioneringsgrondslagen, bedrijfsvoeringsaspecten en stichtings- en exploitatiekosten.
- Het vaststellen van de algemene toepasbaarheid van de Membraan-bioreactor.

Het onderzoek te Sluisjesdijk is te verdelen in een inregelfase van de installatie, slibadaptatiefase, duurproeven en additioneel onderzoek. Binnen de duurproeven is afvalwater beproefd met verschillende N-concentraties (500-600 mg/l, 1.000-1.200 mg/l en 2000 mg/l), waardoor een representatief beeld is verkregen voor vrijwel alle slibverwerkingsinstallaties (met anaërobe gisting) in Nederland.

Ten aanzien van het functioneren van de Membraan-bioreactor is gebleken dat weinig technische storingen optreden. De installatie kan dagenlang zonder toezicht continu naar behoren functioneren. Door de stabiele bedrijfsvoering kan tijdens de opstart van de installatie in 6 dagen een maximale capaciteit worden bereikt.

Op basis van de resultaten van het onderzoek kan worden gesteld dat het rendement van de behandeling van rejectiewater met de Membraan-bioreactor in het onderzochte gebied onafhankelijk is van de stikstofconcentratie en daarmee algemeen toepasbaar is. De bioreactor wordt ontworpen op een N-belasting, de membraanfiltratie-unit wordt gedimensioneerd op basis van het debiet.

Bij de huidige prijzen voor loog en methanol is het voordeliger om bij de behandeling van rejectiewater in de Membraan-bioreactor zo ver mogelijk te denitrificeren, dan gebruik te maken van eventuele denitrificatiecapaciteit in de rwzi.

Tijdens het onderzoek zijn de volgende dimensioneringsgrondslagen vastgesteld:

Influentbehandeling

- mechanisch zelfspoelend filter (zeef)
 - . maaswijdte 1 mm
 - . oppervlaktebelasting 50 m/h

Bioreactor

- druk 3 bar ato
- temperatuur 33 °C
- pH 6,8 -
- stikstofbelasting 4,4 kg N/m³.d
- NO₃-N verwijderingscapaciteit 9,8 kg NO₃-N/m³.d
- drogestofgehalte 20 kg/m³

Beluchting

- α-factor 0,5 -
- β-factor 0,9 -
- zuurstofinbrengvermogen 1 kg O₂/m³.h

Chemicaliënverbruik

- loog 7,5 mol OH⁻/kg N
- methanol 2,6 kg MeOH/kg NO₃-N_{verw.}

Membraanfiltratie

- nominale membraanflux 116 l/m².h
- energieverbruik 4,6 kWh/m³_{afv.w.}

Verwijderingsrendementen

- CZV 84,6 %
- BZV 98,4 %
- N_{Kj} 99,8 %
- N-tot 85,0 %

Voor de situatie Sluisjesdijk is een Membraan-bioreactor gedimensioneerd met een totaal reactorvolume van 480 m³ en een membraanoppervlak van 220 m². Het oppervlaktebeslag van de installatie bedraagt 290 m². Hierbij is uitgegaan van een N-vracht van 1.200 kg/d en een debiet van 600 m³/d. De stichtings- en exploitatiekosten zijn als volgt vastgesteld:

stichtingskosten Sluisjesdijk: f 8.490.000,-

exploitatiekosten Sluisjesdijk: f 2.680.000,- / jaar
f 6,10 / kg N_{Kj}verw.

In het kader van het STOWA onderzoek zijn nog zes varianten voor rejectiewaterbehandeling doorgerekend op basis van de vastgestelde dimensioneringsgrondslagen. Hierbij is uitgegaan van drie N-concentratieniveau's van rejectiewater van een rwzi van 100.000 v.e. en drie N-concentratieniveau's van rejectiewater voor een rwzi van 400.000 v.e.. In tabel 1 worden de stichtings- en exploitatiekosten voor de verschillende varianten gepresenteerd:

Tabel 1 Stichtings en exploitatiekosten Membraan-bioreactor per variant

Variant	vuilvracht [v.e.]	NKj [mg/l]	debiet [m ³ /d]	stichtings- kosten [Hfl]	exploitatie [Hfl/j]	exploitatie [Hfl/kg N _{ij,versw}]
1	100.000	1.900	50	3.060.000,-	580.000,-	16,70
2	100.000	950	100	3.600.000,-	690.000,-	19,80
3	100.000	475	200	4.520.000,-	860.000,-	24,70
4	400.000	1.900	200	5.490.000,-	1.280.000,-	9,20
5	400.000	950	400	6.770.000,-	1.570.000,-	11,30
6	400.000	475	800	8.070.000,-	1.970.000,-	14,20

Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat de exploitatiekosten van de Membraan-bioreactor met ongeveer 13 % dalen wanneer het nitrificatie/denitrificatie-proces via nitriet loopt in plaats van via nitraat. De route via nitriet levert een besparing op voor methanol en zuurstof.

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat de Membraan-bioreactor in technisch en technologisch opzicht een geschikt systeem is voor de behandeling van rejectiewater. De installatie is zeer compact ten gevolge van hoge volumetrische biologische omzettingcapaciteiten en een efficiënte zuurstofoverdracht.

De Membraan-bioreactor wordt voordeliger bij toenemende stikstofvrachten (schaaleffect) en toenemende stikstofconcentraties. Verlaging van het energieverbruik voor de membraanfiltratie en het bedrijven van het nitrificatie/denitrificatieproces via de nitrietroute zullen leiden tot reductie van de kosten. Nader onderzoek in deze richtingen is aan te bevelen.

1 Inleiding

In het kader van de toekomstige eisen die worden gesteld aan de effluentlozingen van rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) voor stikstof- en fosfaatgehalten, wordt veel onderzoek verricht naar nieuwe technieken en aanpassingen aan de bestaande zuiveringsinstallaties om aan deze effluenteisen te kunnen voldoen. Vanaf 1998 zullen de bestaande rwzi's aan de volgende effluenteisen voor stikstof moeten voldoen:

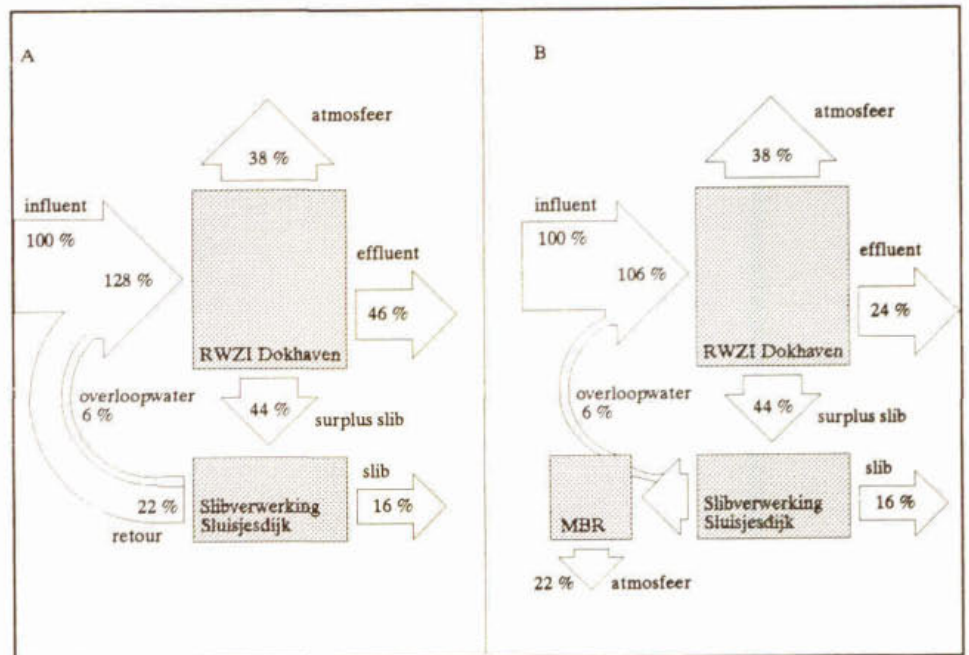
- 10 mg N_{totaal}/l voor rwzi's met een ontwerpcapaciteit > 20.000 v.e.;
- 15 mg N_{totaal}/l voor rwzi's met een ontwerpcapaciteit \leq 20.000 v.e..

Voor het bereiken van deze eisen zal een groot aantal installaties aangepast moeten worden. Separate nutriëntenverwijdering uit interne stromen op zuiveringsinstallaties kan een belangrijke bijdrage leveren aan het bereiken van deze effluenteisen. Met name de interne stromen die vrijkomen bij de slibontwatering van anaëroob vergist slib bevatten hoge concentraties nutriënten. Vooral het hoge ammoniumgehalte zorgt indirect voor een relatief grote stikstofbelasting van de rwzi's.

Op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk wordt het slib van rwzi Dokhaven te Rotterdam verwerkt. Van het slibverwerkingsbedrijf wordt met het centrifugaat (rejectiewater) van de ontwateringscentrifuges een aanzienlijke N-vracht teruggevoerd naar de rwzi Dokhaven. Deze stikstofvracht komt overeen met ruim 20 % van de normale stikstofvracht naar de zuivering. Het gaat bij Sluisjesdijk om een relatief kleine stroom van 1000 m³/d met een stikstofconcentratie van ongeveer 1200 mg N/l. In de toekomst zal door een aanpassing van de slibverwerkingsmethode de stikstofconcentratie in het decantaat ongeveer 2000 mg/l bedragen, waarbij het debiet dan ongeveer 600 m³/d zal gaan bedragen. Verbetering van de stikstofverwijdering bij de bestaande rwzi Dokhaven door uitbreiding van het aëratievolume is vanwege ruimtegebrek niet mogelijk. Behandeling van de N-rijke retourstroom op Sluisjesdijk is een methode om alsnog vergaande N-verwijdering bij rwzi-Dokhaven te bereiken.

In figuur 1.1 wordt met behulp van een N_{K_j} -balans een vergelijking gemaakt tussen de huidige situatie en de situatie waarbij stikstofverwijdering in de retourstroom vanuit Sluisjesdijk plaatsvindt. In situatie A wordt de rwzi hoger belast met stikstof door de relatief hoge stikstofvracht met de retourstroom. In situatie B wordt de stikstofbelasting gereduceerd door stikstofverwijdering in de retourstroom. Dit dient uiteindelijk te resulteren in lagere N_{K_j} -gehalten in het effluent van de rwzi.

In opdracht van het Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden (ZHEW) heeft Grontmij Advies & Techniek bv onderzoek verricht naar de mogelijkheden van vergaande stikstofverwijdering in de N-rijke retourstroom. Na evaluatie van diverse systemen, waarbij criteria als ruimtebeslag, te verwachten operationele kosten en full scale ervaringen is op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk een biologisch zuiveringssysteem (nitrificatie/denitrificatie) met slibscheiding door membranen beproefd, de zogenaamde Membraan-bioreactor.



Figuur 1.1: N_g -balans over de rwzi Dokhaven en het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk.
 A: huidige situatie
 B: behandeling van interne N-stroom met de MBR

Het ZHEW participeert met dit onderzoek in een STOWA project waarbij parallel onderzoek wordt verricht naar de stikstofverwijdering uit interne stromen op rwzi's. Hierbij is een aantal technieken getest en met elkaar vergeleken. Naast het ZHEW participeren de Provincie Utrecht, de Dienst Riolering en Waterhuishouding Amsterdam en het Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen in het STOWA project [13].

2 Doelstelling

Het nationale onderzoek had tot doel de mogelijkheden van stikstofverwijdering uit interne stromen, afkomstig van de ontwatering van anaëroob vergist slib, op bestaande rwzi's te onderzoeken. Separate stikstofverwijdering uit de interne stromen moet uiteindelijk een bijdrage leveren aan vergaande stikstofverwijdering op de rwzi. Bij het onderzoek op pilot plant schaal is gebruik gemaakt van een zuiveringssysteem dat aan de volgende voorwaarden voldoet [11]:

- Grote hoeveelheden stikstof moeten kunnen worden verwijderd.
- De installatie moet compact zijn.
- Strengere effluenteisen voor de installatie worden niet nagestreefd.
- Eenvoudige bediening en onderhoud.
- Het moet een bewezen techniek zijn.

Met het onderzoek op de locatie Sluisjesdijk zijn navolgende afgeleide doelstellingen nagestreefd:

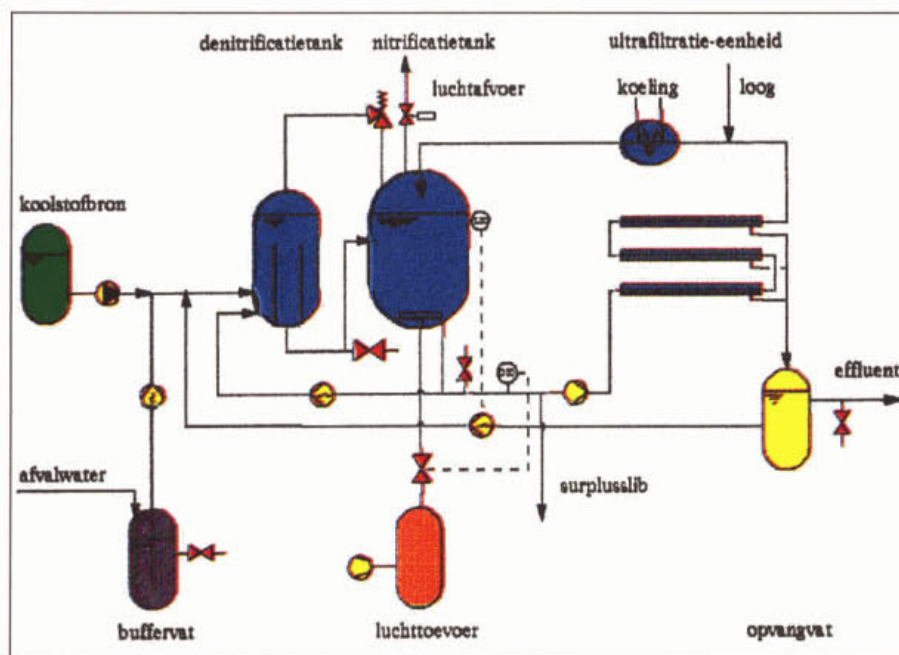
- 1 Aan de hand van het pilot plant onderzoek vaststellen van technologische, operationele en financieel-economische kengetallen voor de behandeling van interne stromen op rwzi's, waaronder de behandeling van de rejectiewaterstroom op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk met behulp van de Membraan-bioreactor.
- 2 Het vaststellen van dimensioneringsgrondslagen voor de Membraan-bioreactor.
- 3 Het vaststellen van stichtings- en exploitatiekosten voor de Membraan-bioreactor.
- 4 Op basis van de ervaringen tijdens het pilot plant onderzoek weergeven van bedrijfsvoeringsaspecten.
- 5 Het vaststellen van de algemene toepasbaarheid van de Membraan-bioreactor.

3 Membraan-bioreactor

3.1 Achtergrond van de Membraan-bioreactor

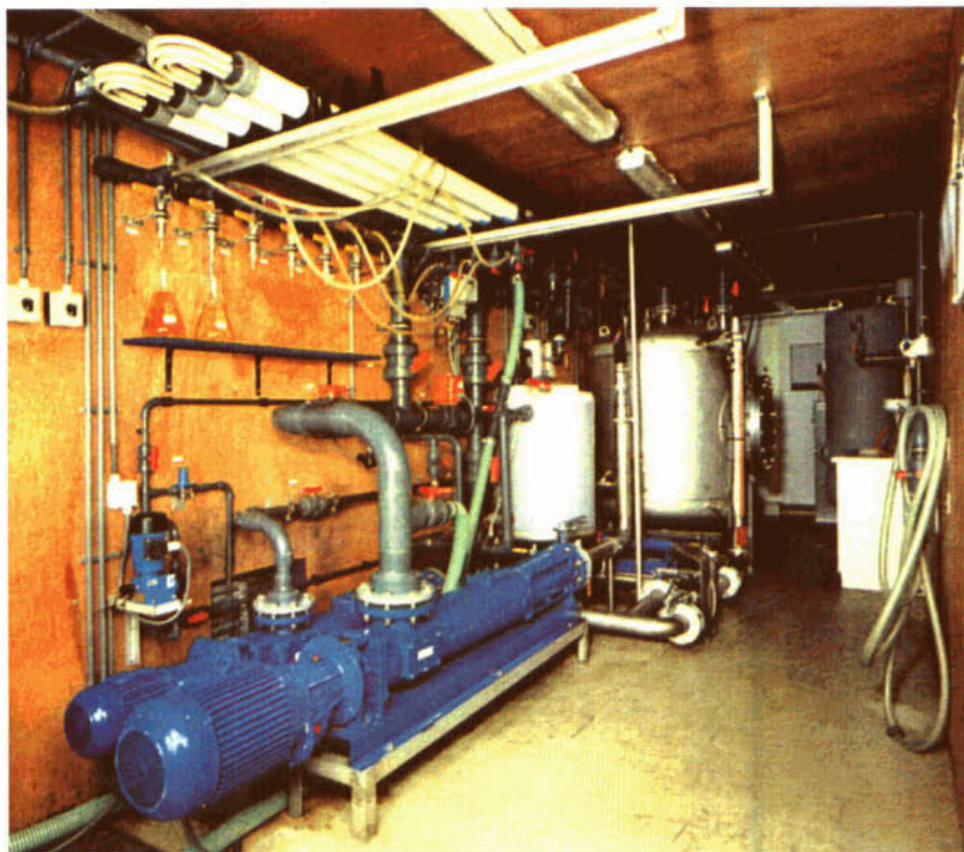
Compactsystemen voor de zuivering van sterk geconcentreerde afvalwaterstromen worden tegenwoordig steeds belangrijker. Met name waar ruimtegebrek is, zijn dit soort systemen toepasbaar. De zogenaamde Membraan-bioreactor is een compact afvalwaterzuiveringssysteem waarbij biologische zuiveringsprocessen (CZV-verwijdering, nitrificatie, denitrificatie) worden gecombineerd met membraantechnologie.

Een prinseschets van de Membraan-bioreactor, zoals toegepast tijdens dit onderzoek is weergegeven in afbeelding 3.1. In afbeelding 3.2 is een foto van de proefopstelling weergegeven. Het te zuiveren afvalwater wordt na passage van een voorgeschakelde denitrificatietank in een beluchtingstank gebracht, waar gereduceerde stikstofverbindingen geoxideerd worden. Een deel van het slib/watermengsel uit de beluchtingstank wordt gecirculeerd over de voorgeschakelde denitrificatietank, waar nitraat met organische stof tot stikstofgas wordt omgezet. De slibstroom wordt over een ultrafiltratie-eenheid geleid. Hier worden slib en water van elkaar gescheiden. Het filtraat wordt afgevoerd als effluent, het concentraat wordt teruggevoerd naar de beluchtingstank. Via een spuikraan kan surplusslib worden afgelaten.



Afbeelding 3.1: Principeschets Membraan-bioreactor

De Membraan-bioreactor onderscheidt zich als compact zuiveringssysteem op de navolgende punten van de conventionele systemen voor biologische afvalwaterzuivering.



Afbeelding 3.2: Proefopstelling Membraan-bioreactor Sluisjesdijk

Hoge biomassaconcentratie

De installatie kan worden bedreven met een hoge biomassaconcentratie. In principe zijn slibgehalten van 20 - 30 kg ds/m³ haalbaar. De hoge biomassaconcentratie wordt bereikt door de slibaf scheiding plaats te laten vinden over ultrafiltratiemembranen. Ultrafiltratie is een onder druk bedreven membraanfiltratietechniek. De bezinkeigenschappen van het slib hebben geen invloed op het afscheidingsrendement.

Verbeterde zuurstofoverdracht

De zuurstofoverdracht in de beluchtingstank is aanzienlijk efficiënter vergeleken met een conventioneel beluchtingstelsel doordat het systeem onder druk wordt bedreven. Hierdoor is het mogelijk om ondanks de hoge volumetrische belasting en daardoor hoge zuurstofbehoefte toch voldoende zuurstof toe te voeren aan het proces. Bij andere hoogbelaste systemen die niet onder druk worden bedreven kan de zuurstofoverdracht beperkend zijn voor de belasting van het systeem.

Hoge omzetsnelheden

Mede vanwege het feit dat hoge biomassaconcentraties worden gehandhaafd, ontstaat een hoge volumetrische omzettingssnelheid. Daarnaast wordt de specifieke activiteit van de biomassa geoptimaliseerd doordat het proces sterk exotherm verloopt en daardoor bij temperaturen van 33-38 °C kan worden bedreven. De groei en activiteit van met name nitrificerende bacteriën is optimaal binnen dit temperatuurtraject.

Vanwege de hoge volumebelasting vindt een relatief hoge biologische warmteproductie per volume-eenheid plaats. Daarnaast vindt een grote energiedissipatie plaats bij het membraanfiltratieproces. Eerder genoemde hoge temperaturen kunnen hierdoor relatief eenvoudig gehandhaafd worden.

NITRIFICATIE

. reactor	:	gemengd	
. reactorvolume	:	1000	l
. beluchting			
- luchttoevoer	:	0-40	Nm ³ /h
- toevoer zuivere O ₂	:	0-3	kg O ₂ /h
. systeemdruk	:	2-5	bar
. loogdosering	:	0.2-2	l/h

KOELINSTALLATIE

. type koeling	:	lucht	
. koelvermogen	:	0-30	kW

MEMBRAANUNIT

. membranen	:	cross flow ultrafiltratie	
. membraanoppervlakte	:	0.5-4.3	m ²
. recirculatie	:	10.000-30.000	l/h
. werkdruk	:	2-8	bar

3.3 Referenties

In Japan is in de jaren '80 onderzoek verricht naar Membraan-bioreactoren voor de toepassing van zowel aërobe als anaërobe afvalwaterzuivering van met name "night soil" in het kader van het Aqua Renaissance project. De Membraan-bioreactor wordt voor de behandeling van percolatiewater en verschillende soorten industrieel afvalwater (onder andere van de lederindustrie en farmaceutische industrie) veelvuldig in Duitsland toegepast [12]. In Nederland is op pilotschaal ervaring opgedaan met Membraan-bioreactoren door onder meer TNO, TU Twente en Grontmij Advies & Techniek bv. TNO heeft onderzoek verricht naar de mogelijkheden om met een Membraan-bioreactor "nul"-slibgroei te realiseren bij de behandeling van huishoudelijk afvalwater [4]. De TU Twente heeft met name onderzoek verricht naar de verwijdering van PAK's. Grontmij heeft onderzoek verricht naar de zuivering van percolatiewater met de Membraan-bioreactor [3].

In bijlage 2 is een overzicht opgenomen van full scale Membraan-bioreactoren die werken volgens het principe zoals in dit onderzoek is toegepast.

4 Onderzoeksprogramma

4.1 Algemeen

Het onderzoek is gericht op de toepassingsmogelijkheden van de Membraan-bioreactor voor de behandeling van interne stromen afkomstig van de slibverwerking op rwzi's. Het onderzoek met de Membraan-bioreactor heeft plaats gevonden met rejectiewater afkomstig van het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. De gemiddelde samenstelling van het rejectiewater te Sluisjesdijk gedurende het onderzoek staat in tabel 4.1 weergegeven.

Tabel 4.1 Gemiddelde samenstelling van het rejectiewater te Sluisjesdijk gedurende het onderzoek

CZV	1000	mg/l
BZV	300	mg/l
N_{Kj}	1200	mg/l
P_{tot}	40	mg/l
zwevende stof	300	mg/l
waterstofbicarbonaat	81	mmol/l

Gezien het feit dat de N_{Kj} -concentratie hoger is dan op enkele andere plaatsen in Nederland, is in het onderzoeksprogramma ook voorzien in proefnemingen met verdund afvalwater, om zodoende een stikstofconcentratie van 500 - 600 mg/l te simuleren.

Verwacht wordt dat in de nabije toekomst de stikstofconcentratie in het rejectiewater van Sluisjesdijk nog verder zal toenemen ten gevolge van een andere wijze van slibverwerking. De stikstofconcentratie zal dan ongeveer 2000 mg N/l bedragen. Door toevoeging van ureum is ook deze situatie tijdens het onderzoek gesimuleerd.

In dit hoofdstuk wordt het onderzoeksprogramma gepresenteerd en komen de toegepaste materialen en methoden aan de orde.

4.2 Onderzoek

Het onderzoek te Sluisjesdijk is te verdelen in drie onderdelen:

- 1 - Inregelen van de installatie en slibadaptatie.
- 2 - Duurproeven.
- 3 - Additioneel onderzoek.

Het onderzoek te Sluisjesdijk is gebaseerd op een gedetailleerd onderzoeksprogramma [7]. In bijlage 3 is de tijdplanning van het onderzoek weergegeven.

4.2.1 Inregelen van de installatie en slibadaptatie

De proefinstallatie is ingeregeld op de instellingen voor de snelheid over de membranen, de drukhandhaving, de niveauregeling, recirculatie voor de denitrificatie en de methanoldosering. Hierbij zijn de standaardcondities gehanteerd, zoals deze tijdens eerdere onderzoeken door Grontmij zijn gevonden [3].

De installatie is geënt met nitrificerend slib. Gezien de specifieke omstandigheden en de kwaliteit van het afvalwater is het noodzakelijk gebleken het slib te laten adapteren aan het afvalwater. Als externe koolstofbron voor de denitrificatie is gebruik gemaakt van methanol.

Tijdens de zogenaamde inregel- en adaptatiefase is gezocht naar de optimale procesomstandigheden, zoals temperatuur, druk, pH en recirculatie-debiet.

4.2.2 Duurproeven

Door het uitvoeren van duurproeven, waarbij de installatie gedurende langere tijd continu is belast, is inzicht verkregen in een aantal technologische en technische aspecten van het zuiveringsstelsel. Hierbij is de proefinstallatie met drie verschillende afvalwatertypen belast:

- 1 Rejectiewater met een relatief lage N-concentratie. Dit afvalwater is representatief voor een deel van de slibverwerkingsinstallaties in Nederland. Door verdunning van het rejectiewater dat vrijkomt op Sluisjesdijk met effluent van de Membraan-bioreactor-proefinstallatie is het rejectiewater verdund tot 500-600 mg/l.
- 2 Rejectiewater zoals op dit moment op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk vrijkomt. Het N_{Kj} -gehalte bedraagt 1000-1200 mg/l.
- 3 Rejectiewater met een hogere concentratie. Dit afvalwater is representatief voor de toekomstige situatie op de slibverwerking Sluisjesdijk. Door aan het rejectiewater dat vrijkomt in Sluisjesdijk ureum toe te voegen, is de N_{Kj} -concentratie verhoogd tot ongeveer 2000 mg/l.

Elk afvalwatertype is gedurende circa 2 maanden (9 weken) beproefd bij de optimale instellingen zoals vastgesteld bij de voorgaande proeven.

Tijdens de duurproeven is aandacht besteed aan het technologisch en technisch functioneren van de proefinstallatie:

- influentkarakterisering;
- stikstofbelasting;
- nitrificatie / denitrificatie;
- slibgehalte;
- verwijderingsrendementen / effluentkwaliteit;
- bedrijfsvoeringsaspecten;
- massa- en energiebalans.

Influentkarakterisering

Het influent is gekarakteriseerd door regelmatige bepaling van de waarden/concentraties van CZV, BZV, N_{Kj} , NH_4 -N, P-totaal, zwevende stof, alkaliteit en pH op basis van continue tijdsproportionale 24-uurs monsternamen van zowel ongefilterde als gefilterde rejectiewatermonsters.

Stikstofbelasting

Door het opvoeren van de stikstofbelasting is uiteindelijk een maximale volumetrische stikstofbelasting [$\text{kg N/m}^3 \cdot \text{d}$] en een maximale slibbelasting [$\text{kg N/kgDS} \cdot \text{d}$] bereikt. De maximale stikstofbelasting is onder meer afhankelijk van het drogestofgehalte, zuurstofoverdracht, temperatuur, slibleeftijd en de samenstelling van het influent (o.a. CZV/N-verhouding). Door regelmatige bemonstering van $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ en $\text{NO}_3\text{-N}$ is het influentdebiet zodanig ingesteld dat juist nog volledige nitrificatie en denitrificatie optreden. Met behulp van respiratiemetingen zijn deze instellingen vastgesteld.

Nitrificatie / denitrificatie

Tijdens het onderzoek is de proefinstallatie zodanig bedreven dat de nitrificatie volledig verliep ($> 99\%$ omzetting van $\text{NH}_4\text{-N}$ naar $\text{NO}_3\text{-N}$). De belasting van de installatie is gestuurd op een $\text{NH}_4\text{-N}$ gehalte in het effluent $< 5 \text{ mg/l}$ en een $\text{NO}_2\text{-N}$ gehalte in het effluent $< 2 \text{ mg/l}$.

De mate van denitrificatie wordt bepaald door de hoeveelheid nitraat dat wordt teruggevoerd van de nitrificatiereactor naar de denitrificatiereactor in verhouding tot de afvalwatertoevoer (recirculatiefactor) en de hoeveelheid beschikbaar gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal. De optimale recirculatiefactor en daarmee de mate van denitrificatie is afhankelijk van een aantal factoren:

- Het gewenste nitraatgehalte in het effluent.
Afhankelijk van de beschikbare denitrificatiecapaciteit van de rwzi waarop het effluent van de Membraan-bioreactor wordt geloosd, kan een verhoogd nitraatgehalte in het effluent van de Membraan-bioreactor een gewenste optie zijn.
- De hoeveelheid benodigde externe koolstofbron.
Afhankelijk van het gehalte aan snel afbreekbare organische verbindingen in het afvalwater kan het nodig zijn een extra hoeveelheid snel afbreekbaar organisch materiaal toe te voegen voor het bereiken van vergaande denitrificatie. Hiervoor is tijdens dit onderzoek methanol gebruikt.
- De noodzaak tot doseren van additionele alkaliteit.
Bij het nitrificatieproces komen H^+ -ionen in oplossing. Bij volledige denitrificatie wordt de helft van deze ionen weer verbruikt. Bij een onvolledige denitrificatie zullen minder H^+ -ionen verbruikt worden. De resterende hoeveelheid H^+ -ionen zullen geheel of gedeeltelijk door de buffercapaciteit van het afvalwater worden opgevangen, waardoor de pH van het systeem niet of slechts beperkt daalt. Indien de buffercapaciteit van het afvalwater wordt overschreden, is het doseren van additionele alkaliteit noodzakelijk.

Tijdens elke duurproef is de mate van denitrificatie gevarieerd om te komen tot het vaststellen van de optimale recirculatiefactor (mate van denitrificatie). Hierbij zijn in hoofdzaak de navolgende fasen te onderscheiden:

- Geen denitrificatie. Hierbij is geen aanvullende koolstofbron gedoseerd. Denitrificatie heeft alleen plaatsgevonden op basis van de in het influent aanwezige BZV.
- Denitrificatie. De denitrificatie is geleidelijk opgevoerd door dosering van aanvullende koolstofbron (methanol). Gezien het feit dat het actief slib moet adapteren aan methanol is geleidelijk opvoeren van de mate van denitrificatie noodzakelijk.

Tijdens de hierboven genoemde fasen is het verbruik van additionele alkaliteit en de benodigde verhouding methanol/ $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verwijderd}}$ continu geregistreerd.

Slibgehalte

De Membraan-bioreactor kan, vanwege het toepassen van membraanscheiding, worden bedreven met een hoge biomassaconcentratie. Een verhoogde slibconcentratie geeft een hogere slibleeftijd, hetgeen resulteert in een verhoogde slibmineralisatie. Door geen biomassa te spuien, zal de slibconcentratie echter te ver toenemen. Op grond van criteria als membraanflux, viscositeit, zuurstofinbrengvermogen, nitrificatiecapaciteit en slibmineralisatie is de optimale slibconcentratie vastgesteld.

Verwijderingsrendementen en effluentkwaliteit

De effluentkwaliteit is een maat voor het rendement van de zuiveringsinstallatie. De effluentkwaliteit is regelmatig beoordeeld om het functioneren van de installatie te beoordelen.

Bedrijfsvoeringsaspecten

Aangezien de installatie eenvoudig qua bediening en onderhoud moet zijn, is het van belang een goed inzicht te hebben in het technisch functioneren van de installatie. Hiertoe is een logboek bijgehouden met vermeldingen van storingen, proceshandelingen etc. Op basis van deze waarnemingen is vastgesteld welke onderdelen in de installatie eventueel storingsgevoelig zijn.

Massa- en energiebalans

Gedurende de duurproef zijn alle in- en uitgaande stromen nauwkeurig vastgesteld, zodat een energie(warmte)- en massabalans over de installatie kon worden opgesteld.

4.2.3 Additioneel onderzoek

Naast het technologisch en technisch functioneren van de proefinstallatie is specifiek onderzoek verricht om meer inzicht te verkrijgen in de deelprocessen van de Membraan-bioreactor. Het additioneel onderzoek liep parallel aan de inregel- en adaptatieperiode en de duurproeven. De volgende onderwerpen zijn aan de orde gekomen:

- membraanfiltratie;
- zuurstoftoevoervermogen;
- temperatuurbeheersing;
- invloed van zwevende stof in het influent op de bedrijfsvoering.

Membraanfiltratie

Het functioneren van de ultrafiltratiemembranen bij een is gegeven samenstelling van het afvalwater afhankelijk van een drietal parameters: temperatuur, stroomsnelheid en druk. Afhankelijk van het type afvalwater zijn diverse membraantypes meer of minder geschikt voor de slib/waterscheiding. Dit uit zich onder meer in de flux (uitgedrukt in $[\text{l}/\text{m}^2 \cdot \text{h}]$), het energieverbruik en de retentie van onder andere hoogmoleculaire verbindingen.

Tijdens het onderzoek zijn verschillende cross flow ultrafiltratiemembranen van het merk *Stork* getest. Voorafgaand aan de bedrijfsvoering van de proefinstallatie met actiefslib is het functioneren van de verschillende ultrafiltratiemembranen is via een aantal basismetingen gecontroleerd. Dit betreft metingen aan:

- de initiële membraanflux;
- de membraanflux ruw afvalwater;
- de CZV-, N_{Kj} -, P_{tot} - en SS-retentie over de membranen.

Voor het vaststellen van de juiste procesomstandigheden is aandacht besteed aan de invloed van de systeemdruk, temperatuur en de stroomsnelheid over de membranen op de flux en het energieverbruik.

Indien de flux over de membranen onder constante procescondities een minimaal geaccepteerde waarde bereikt, dienen de membranen te worden gespoeld. De maximaal toegestane membraanfouling wordt hierbij bereikt. De mate van membraanfouling is afhankelijk van het type membraan en het soort afvalwater. Tijdens het onderzoek is vastgesteld hoe snel membraanfouling optreedt.

Zuurstoftoevoervermogen

Er is een verschil tussen het zuurstoftoevoervermogen in schoon water en het zuurstoftoevoervermogen in een mengsel van actiefslib en afvalwater. Het zuurstoftoevoervermogen in schoon water is bij het inregelen van de installatie vastgesteld. De verhouding tussen het zuurstoftoevoervermogen in schoonwater en actief slib/afvalwater wordt weergegeven door de α -factor, die met name van belang is voor het bepalen van de benodigde beluchtingscapaciteit. De grootte van het volume water, de dimensie van de tank en het type beluchtingssysteem zijn mede bepalend voor het zuurstoftoevoervermogen. De α -factor is voor de situatie Sluisjesdijk vastgesteld.

Temperatuurbeheersing

Vanwege de hoge volumetrische belasting vindt een relatief hoge biologische warmteproductie per volume-eenheid plaats. Daarnaast vindt een hoge energiedissipatie plaats door het bedrijven van de ultrafiltratie-unit. Ten gevolge hiervan kan de temperatuur van het systeem zodanig oplopen dat koeling noodzakelijk is. Tevens is het influent, afkomstig van de slibgistingstank, vrij hoog van temperatuur (30 - 35°C).

De diverse energietermen in de warmtebalans (warmteproductie en warmteverlies) zijn bepaald, zodat een eventuele koeling voor een grootschalige installatie kan worden vastgesteld. Ook is de invloed van de temperatuur op de activiteit van het actiefslib bepaald.

Invloed van zwevend stof in het influent op de bedrijfsvoering

Met het influent kunnen polymeren (overmatige dosering bij de slibontwatering), zwevende stof (uitspoeling) en grove verontreinigingen zoals stukjes plastic en haren worden meegevoerd. Dit kan het zuiveringsproces in de Membraanbioreactor beïnvloeden. De invloed op de activiteit (organisch-slibgehalte, slibleeftijd) en slibscheiding (viscositeit, membraanfouling) zijn onderzocht. Hiervoor is de voorzuivering (zandfilter) tijdens de laatste duurproef kortgesloten.

4.3 Materialen en methoden

Tijdens het onderzoek is een groot aantal metingen verricht. De bemonstering, analyses, metingen en de batchproeven komen in deze paragraaf aan de orde.

4.3.1 Bemonstering

Het zogenaamde ruwe influent (vóór filtratie), het influent van de proefinstallatie na filtratie en het effluent zijn tijdsproportioneel bemonsterd. De overige monsternamen betreffen steekmonsters. Tijdens het onderzoek zijn monsters genomen op de volgende plaatsen:

- het ruwe influent is bemonsterd direct na toevoer vanuit de buffertank van het rejectiewater;
- het gefiltreerde influent is bemonsterd in het voorraadvat van de proefinstallatie;
- het slib uit de denitrificatietank is bemonsterd in de overstort naar de nitrificatietank;
- het slib uit de nitrificatietank is bemonsterd in de leiding tussen de nitrificatietank en de pomp voor de ultrafiltratie-unit;
- het effluent is bemonsterd uit het opvangvat voor het permeaat. Monsternamen voor bepalingen met betrekking tot afzonderlijke membranen zijn genomen direct na de membranen.

4.3.2 Analyses

Een deel van de analyses is uitgevoerd met behulp van een *DrLange photometer AQUA LASA* ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ en $\text{NO}_2\text{-N}$). Dit betreft analyses voor de procescontrole voor het instellen en bepalen van de stikstofbelasting en voor de bepaling van het denitrificatierendement. Bepaling van het methanolgehalte na de denitrificatieruimte is uitgevoerd door respiratiemetingen met behulp van de *Manotherm RA-1000*.

De overige analyses (voor het opstellen van balansen en voor de bepaling van verwijderingsrendementen) zijn volgens NEN-normen uitgevoerd.

4.3.3 Metingen

De proefinstallatie is voorzien van een aantal on-line metingen voor het meten van het zuurstofgehalte, temperaturen, pH, druk en debieten. Alle meetgegevens zijn direct geregistreerd en opgeslagen in een PC.

Het influent- en effluentdebiet zijn bepaald met behulp van een flowmeter. De recirculatie-debieten (ultrafiltratie, nitraat-terugvoer) zijn bepaald met behulp van het pomptoerental. De doseringen van alkaliteit, koolstofbron en ureum zijn via het volume in de voorraadtanks bepaald.

In het influent, de nitrificatietank, voor- en na de ultrafiltratie-unit en het effluent is de temperatuur bepaald. De pH is bepaald in de nitrificatietank en in het effluent. Voor- en na de ultrafiltratie-unit en voor het reduceerventiel van de luchtafslaat is de druk bepaald. Het zuurstofgehalte is bepaald in de nitrificatietank.

4.3.4 Batchproeven en respiratiemetingen

Ter ondersteuning van de bedrijfsvoering en voor het verkrijgen van meer inzicht in de biologische processen zijn respiratiemetingen uitgevoerd met de *Manotherm RA-1000* respirometer.

Voor het membraanonderzoek zijn batchproeven uitgevoerd met een pilot ultrafiltratie-unit voorzien van een terugspoelmembraan.

5 Resultaten

5.1 Het technisch functioneren

De Membraan-bioreactor-proefinstallatie is na installatie en "schoonwaterdraaien" op 12 januari 1994 in bedrijf genomen en is vervolgens tot aan het einde van het onderzoek (31 oktober 1994) continu in bedrijf geweest. Met betrekking tot het technisch functioneren van de proefinstallatie zijn een tweetal perioden te onderscheiden:

- de inregel- en opstartperiode;
- de duurproeven.

Tijdens de inregel- en opstartperiode zijn enkele technische storingen opgetreden op het gebied van lekkages, temperatuurbeheersing en de pH-regeling. Nadat de proefinstallatie volledig was ingeregeld zijn storingen gedurende de rest van het onderzoek (duurproeven) zo goed als uitgebleven.

Pompen

De afdichting van de voedingspomp van de membraanunit vertoonde aanvankelijk enkele malen lekkage. De lekkages aan de betreffende mohno-pomp hebben slibverlies tot gevolg gehad. Verschillende afdichtingen zijn getest. Uiteindelijk bleek de toepassing van een mechanische afdichting effectief.

Het effect op de bedrijfsvoering van de installatie kan worden teruggevoerd op de schaal van de proefinstallatie. Een lekkage van 250 liter slib heeft ongeveer een daling van 18 % aan droge stof tot gevolg.

pH-regeling

De proefinstallatie is voorzien van een pH-regeling. Aan de hand van een pH-meting wordt een loog-doseringspomp aangestuurd. De pH-meting is een aantal malen verstoord doordat vervuiling van het meetinstrument versneld optrad. De pH-electrode bleek uiteindelijk niet geschikt te zijn voor meting onder druk. Nadat de pH-electrode was opgesteld in de permeaatleiding (atmosferische druk), waren de problemen met de snelle vervuiling van het instrument verholpen.

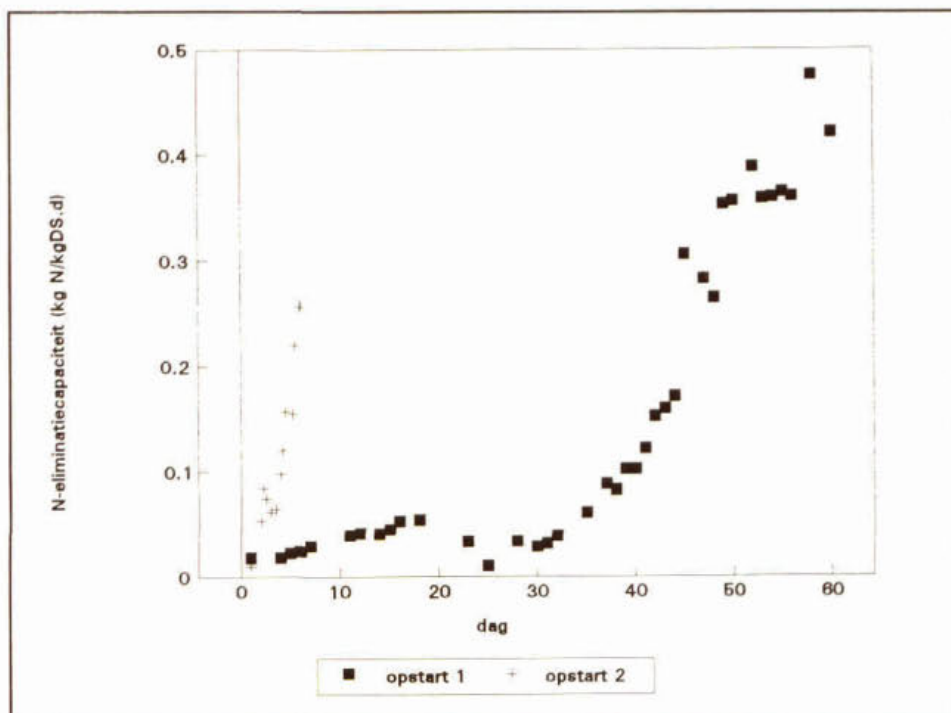
Beluchting

Tijdens het onderzoek bleek dat de biologische belasting van de Membraan-bioreactor dermate hoog kon worden opgevoerd, dat de beluchting toch nog beperkend was voor het bereiken van een maximale belasting. De maximale zuurstofoverdracht in de proefinstallatie werd gelimiteerd door de maximale capaciteit van de geïnstalleerde compressor. Tijdens de tweede duurproef ontstonden technische problemen met de compressor (olielekkage), waardoor de beluchtingselementen verstopt raakten.

5.2 Enting en adaptatie

Gedurende het gehele onderzoek is de Membraan-bioreactor-proefinstallatie twee keer geënt en opgestart met niet-geadapteerd actief slib. De tweede opstart was een gevolg van een pH-shock aan het einde van duurproef 1.

In dit hoofdstuk worden de resultaten en ervaringen gedurende deze twee opstarten gepresenteerd. In figuur 5.1 is het verloop van de specifieke N_{KJ} -omzetsnelheid (kg N/kgDS.d) voor beide opstarten weergegeven. Tijdens beide opstarten is gebruik gemaakt van verschillend maar in beide gevallen goed nitrificerend slib met vergelijkbare N_{KJ} -eliminatiecapaciteiten (0,010 kg N/kgDS.d).



Figuur 5.1: Verloop N -eliminatiecapaciteit - opstart 1 en 2

5.2.1 Opstart 1

De proefinstallatie is in week 2 (12 januari) geënt met nitrificerend actief slib. De daaropvolgende twee weken is een aantal testen op met name technisch gebied doorgevoerd. Op 31 januari (dag 1) is gestart met de slibadaptatie. Hiertoe is het verloop van de maximale nitrificatiecapaciteit dagelijks gevolgd met behulp van respiratiemetingen. Op basis van de resultaten uit de respiratiemetingen is de belasting van de proefinstallatie dagelijks ingesteld.

Tijdens de opstart is de proefinstallatie zodanig bedreven dat alleen denitrificatie op basis van het in het influent aanwezige BZV plaatsvond. De eerste vier weken van de opstart verliepen relatief langzaam. Vanwege het feit dat tijdens deze opstartperiode de proefinstallatie nog niet volledig was ingeregeld, was het proces op de volgende punten niet stabiel:

- temperatuurschommelingen;
- pH-schommelingen.

Daarnaast schommelde het drogestofgehalte in de proefinstallatie vanwege een drietal lekkages (dag 26, 42 en 44) tussen ongeveer 4 en 8 kg DS/m³.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de procesparameters en de duur van de opstart.

Tabel 5.1: Procesparameters en tijdsduur bij opstart 1

temperatuur	25-40	°C
pH	6.5-8.8	-
drogestofgehalte	4-8	kg/m ³
belasting begin	0.010	kg N/kg DS.d
belasting eind	0.421	kg N/kg DS.d
duur opstart	60	dagen

Met name de omzetting van nitriet naar nitraat (*Nitrobacter sp.*) werd geremd door de instabiele bedrijfsvoering.

Nadat de proefinstallatie volledig was ingeregeld, kon onder stabiele omstandigheden de proefinstallatie optimaal worden belast. Ongeveer vanaf dag 40 is dan ook een exponentiële toename van zowel de specifieke (kg N/kg DS.d) als de volumetrische (kg N/m³.d) N_{Kj}-eliminatiecapaciteit waar te nemen.

5.2.2 Opstart 2

Na het beëindigen van de tweede duurproef is de proefinstallatie opnieuw geënt met nitrificerend actief slib. Het drogestofgehalte in de installatie is gedurende de snelle opstart nagenoeg constant gebleven. Daarnaast konden de temperatuur en de pH gedurende de opstart constant worden gehouden. De maximaal toelaatbare belasting van de installatie werd, als tijdens de eerste opstart, bepaald aan de hand van (twee)dagelijkse respiratiemetingen. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de procesparameters en de duur van de opstart.

Tabel 5.2: Procesparameters en tijdsduur bij opstart 2

temperatuur	33	°C
pH	7	-
drogestofgehalte	6	g/l
belasting begin	0.010	kg N/kg DS.d
belasting eind	0.258	kg N/kg DS.d
duur opstart	6	dagen

Uit tabel 5.2 blijkt een toename van de eliminatiecapaciteit van 0,010 kg N/kg DS.d tot 0,258 kg N/kg DS.d (1,55 kg N/m³.d) met de Membraan Bioreactor te worden gerealiseerd. Dit geeft aan dat door met name het handhaven van een constante temperatuur en pH in de installatie (volledig gemengd systeem) een zeer snelle opstart mogelijk is.

5.3 Duurproeven

In deze paragraaf worden de resultaten van de duurproeven gepresenteerd. In bijlage 5 is een overzicht van de meet- en analyseresultaten opgenomen.

5.3.1 Duurproef 1 - lage influentconcentratie

Tijdens de eerste duurproef is de proefinstallatie bedreven met een relatief lage influentconcentratie aan stikstof ($500-600 \text{ mg N}_{\text{Kj}}/\text{l}$). Deze concentratie is gerealiseerd door het rejectiewater van Sluisjesdijk te verdunnen met effluent van de proefinstallatie. De duurproef is uitgevoerd in de periode van week 14 (dag 68) tot en met week 22 (dag 131) voor een duur van 9 weken.

Procesparameters

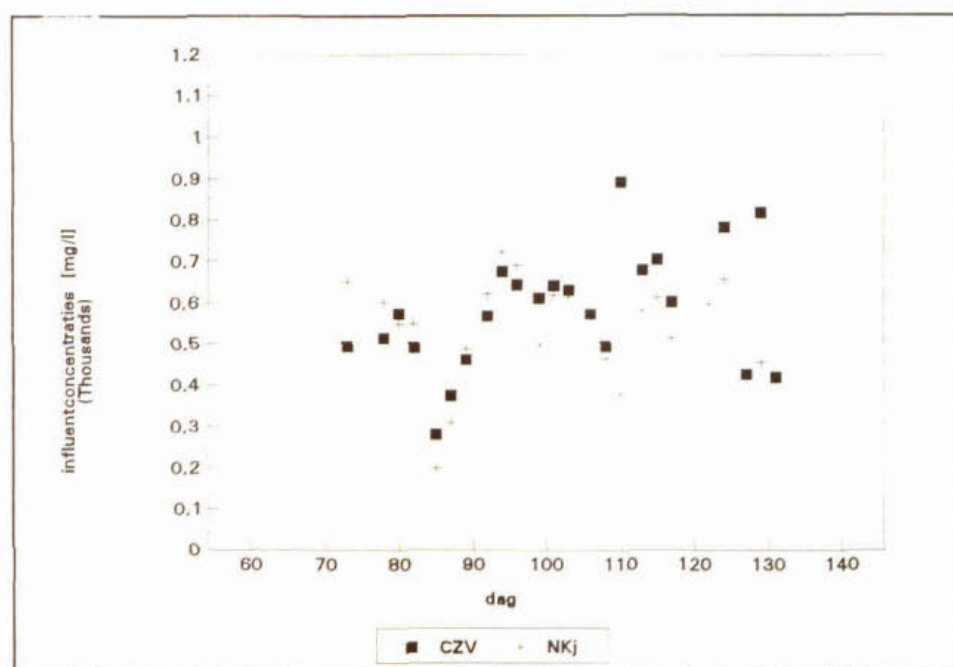
In tabel 5.3 is een overzicht gegeven van de procesparameters gedurende de eerste duurproef.

Tabel 5.3: Procesparameters - duurproef 1

temperatuur	33	°C
pH	8,2	-
druk	3	bar
drogestofgehalte (min)	3,9	kg/m ³
(max)	17,0	kg/m ³

Influentsamenstelling

In figuur 5.2 zijn het CZV en de N_{Kj} -concentratie in het influent van de proefinstallatie gedurende de eerste duurproef weergegeven.



Figuur 5.2: CZV en N_{Kj} -concentratie in het influent - duurproef 1

In tegenstelling tot het $\text{NH}_4\text{-N}$ -gehalte is de N_{Kj} niet op alle dagen bekend. Op dagen dat het N_{Kj} -gehalte niet is gemeten, is dit berekend aan de hand van het $\text{NH}_4\text{-N}$ -gehalte op basis van de gemiddelde verhouding $\text{N}_{\text{Kj}}/\text{NH}_4\text{-N}$.

De concentraties variëren gedurende de duurproef vanwege variaties in het N_{Kj} -gehalte en het CZV in het rejectiewater van Sluisjesdijk en variaties in het recirculatiedebiet van het effluent van de proefinstallatie.

In tabel 5.4 zijn de gemiddelde influent- en effluentconcentraties voor de eerste duurproef weergegeven.

Tabel 5.4: Influent- en effluentconcentraties - duurproef 1

parameter	eenheid	influent	effluent
CZV	mg/l	709	119
BZV	mg/l	168	4
N_{Kj}	mg/l	611	0,5
$\text{NH}_4\text{-N}$	mg/l	555	0,5
$\text{NO}_3\text{-N}$ zonder MeOH	mg/l	561 ¹	1.064 ²
$\text{NO}_3\text{-N}$ met MeOH	mg/l	92 ¹	269 ²
$\text{NO}_2\text{-N}$	mg/l	0	0,2
P-tot	mg/l	24	16
Zwevende stof	mg/l	161	< 10
Alkaliteit	mg/l	2.764	2.125
pH	-	8,3	8,2

¹ Door verdunning van het rejectiewater met het effluent van de proefinstallatie bevat het influent $\text{NO}_3\text{-N}$.

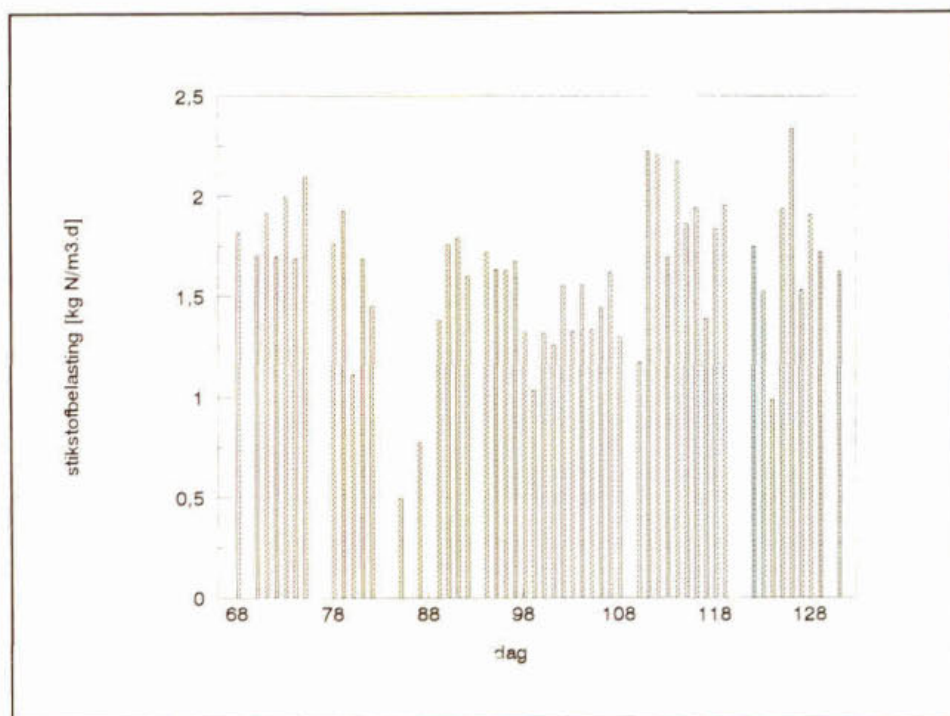
² De gepresenteerde gehalten aan effluent- $\text{NO}_3\text{-N}$ zijn gecorrigeerd voor het $\text{NO}_3\text{-N}$ -gehalte in het influent.

Stikstofbelasting

In figuur 5.3 is de volumetrische stikstofbelasting gedurende de duurproef 1 weergegeven.

De maximaal in te stellen stikstofbelasting werd tijdens de eerste duurproef gelimiteerd door de membraanflux. Mede vanwege onderzoek naar het type membraan en optimalisatie van de bedrijfsvoering van de membraanunit werd de hydraulische belasting van de proefinstallatie beperkt. In combinatie met de relatief lage influentconcentraties resulteerde dit in een gemiddelde belasting van 1,62 kg $\text{N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ waarbij een maximale stikstofbelasting van ongeveer 2,2 kg $\text{N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ is bereikt.

Gedurende het onderzoek is parallel aan de bedrijfsvoering van de proefinstallatie dagelijks de maximale N-eliminatiecapaciteit van het actief slib bepaald met behulp van de respiratiemeter. Hierbij zijn in de periode van 28 april tot 20 mei N-eliminatiecapaciteiten van 0,350 - 0,390 kg $\text{N}/\text{kgDS}\cdot\text{d}$ gemeten bij drogestofgehalten van 7-8 kg/m^3 . Dit komt overeen met een volumetrische belasting van ruim 3 kg $\text{N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$.



Figuur 5.3: Stikstofbelasting (betrokken op aëroob volume) - duurproef 1

Drogestofgehalte

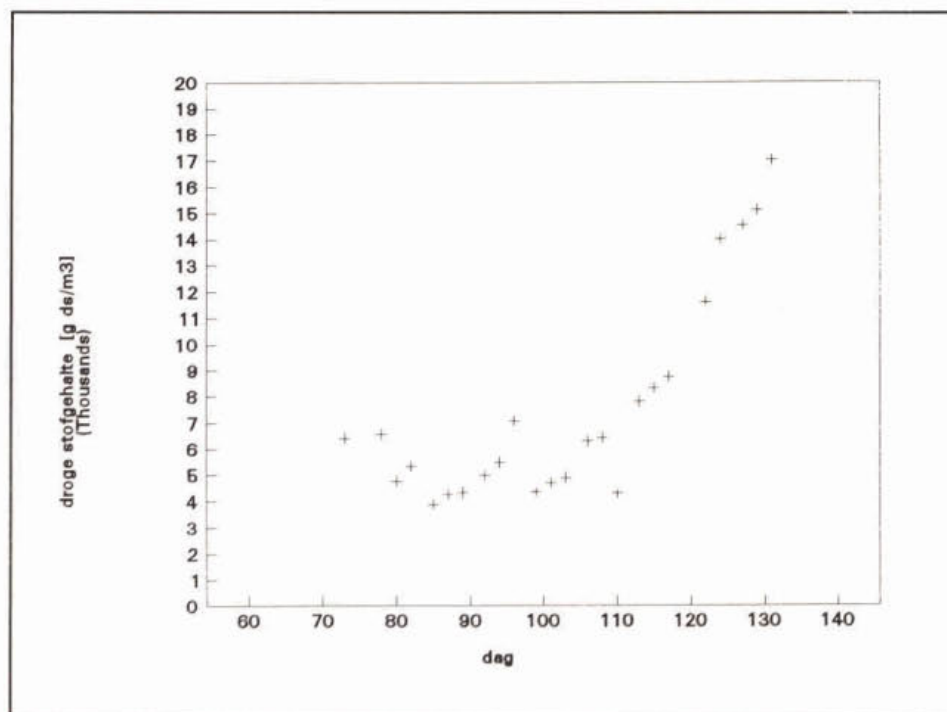
In figuur 5.4 is het drogestofgehalte in de proefinstallatie gedurende de duurproef 1 weergegeven.

Duurproef 1 is gestart met een drogestofgehalte van ongeveer $6,5 \text{ kg/m}^3$. Tot begin mei (dag 100) is door een tweetal lekkages het drogestofgehalte gedaald. Vanaf begin mei is het drogestofgehalte toegenomen tot uiteindelijk 17 kg/m^3 aan het einde van de duurproef. Het gemiddelde gehalte aan organische stof bedroeg 73,2 % van de droge stof.

De toename van het actief-slibgehalte in de bioreactor wordt veroorzaakt door de toevoer van zwevend stof met het influent en door de groei van micro-organismen in het actief-slib. Over twee perioden is de groei van het actief-slib in relatie tot de belasting berekend. In tabel 5.5 is de slibtoename door groei van micro-organismen gepresenteerd.

Tabel 5.5: Slibtoename - duurproef 1

periode	T [°C]	influent debiet [l/h]	influent CZV [mg/l]	influent N_{Kj} [mg/l]	netto slibgroei [kgDS/m ³ .d]
dag 72-82 (nitrificatie)	33,5	109,9	519	677	0,121
dag 111-130 (denitrificatie)	33,2	126,7	2726	564	0,308



Figuur 5.4: Drogestofgehalte - duurproef 1

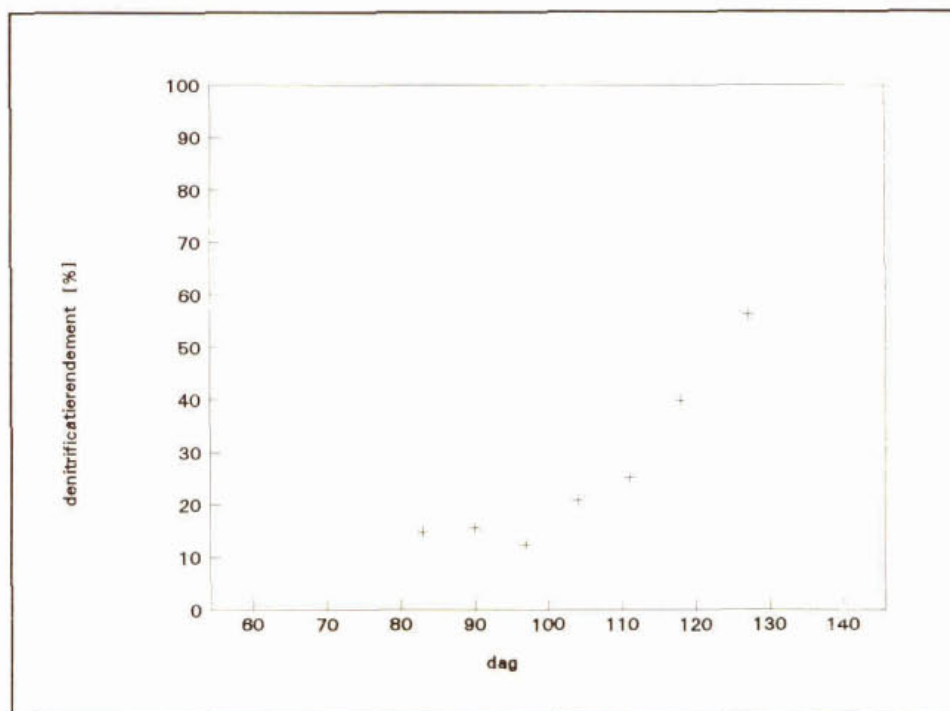
Denitrificatie

Voor vergaande denitrificatie van het rejectiewater is gebruik gemaakt van methanol (MeOH) als additionele koolstofbron. Het denitrificatierendement op basis van het in het rejectiewater aanwezige BZV bedroeg ongeveer 5-10%.

Gezien het feit dat de proefinstallatie is opgestart met niet aan methanol geadapteerd actief slib was adaptatie aan methanol noodzakelijk. Nadat conform het proefprogramma was gestart met denitrificatie (dag 90) bleek de adaptatieperiode nog ruim vier weken in beslag te nemen, alvorens een redelijke mate van denitrificatie kon worden geconstateerd. Tijdens de duurproef 1 is het denitrificatierendement gedurende de laatste week van de proef opgevoerd tot een gemiddelde van 56,3 %. Hierbij werd een $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijderingscapaciteit berekend van 0,193 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ /kg DS.d. De minimaal benodigde recirculatiefactor voor een denitrificatierendement van 56,3 % bedraagt 1,3.

Over de minimaal benodigde verhouding $\text{MeOH}/\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ kunnen op basis van de proefnemingen tijdens duurproef 1 nog geen uitspraken worden gedaan. Door het inregelen van de denitrificatie heeft een overdosering aan methanol plaatsgevonden; het effluent van de denitrificatiereactor bevatte nog methanol. De verhouding $\text{MeOH}/\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ varieerde van 2,9 kg/kg tot ruim 4 kg/kg.

In figuur 5.5 is het de toename van het denitrificatierendement gedurende duurproef 1 weergegeven.



Figuur 5.5: Denitrificatierendement - duurproef 1

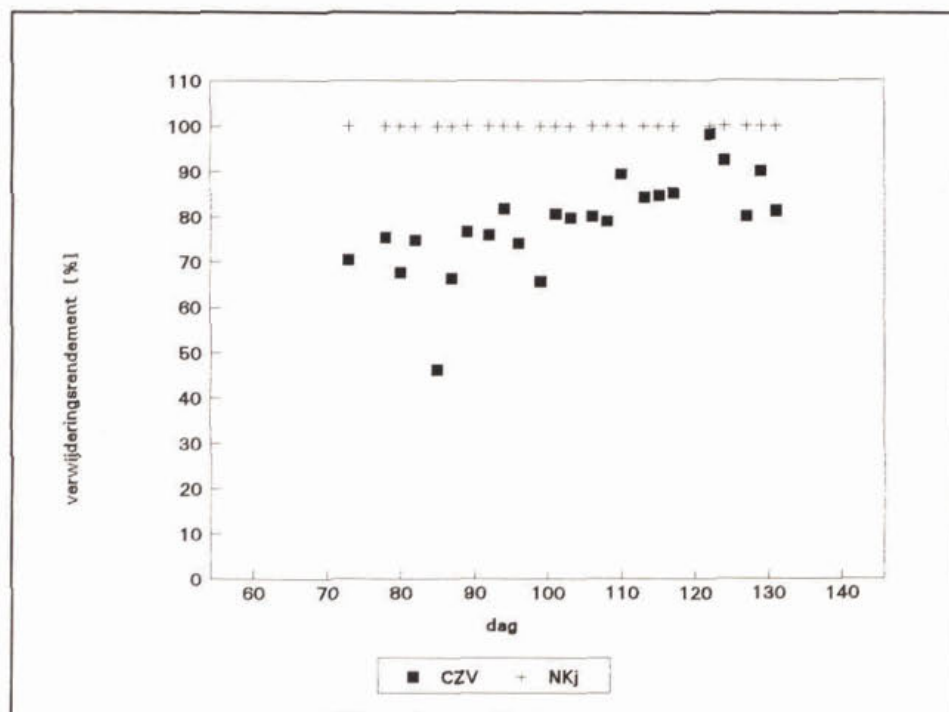
Verwijderingsrendementen

Het N_{Kj} -verwijderingsrendement bedroeg gedurende de gehele duurproef 99,9 %. Het CZV-verwijderingsrendement schommelde tijdens deze periode tussen 65 en 98 %. De gemiddelde verwijderingsrendementen voor CZV, BZV, N_{Kj} en NH_4 -N zijn weergegeven in tabel 5.6. De verwijderingsrendementen van CZV en N_{Kj} gedurende de gehele duurproef zijn grafisch weergegeven in figuur 5.6.

Tabel 5.6: Gemiddelde verwijderingsrendementen - duurproef 1

parameter	verwijderingsrendement [%]
CZV	83,2
BZV	97,6
N_{Kj}	99,9
NH_4 -N	99,9
N-tot	56,2 ¹

¹ - als maximum terwijl nog geen stabiel evenwicht is bereikt



Figuur 5.6: N_{Kj} - en CZV-verwijderingsrendement - duurproef 1

Chemicaliënverbruik

Het verbruik aan chemicaliën omvat het verbruik aan methanol (denitrificatie) en loog (pH-correctie). Vanwege overdosering aan methanol is de minimaal benodigde verhouding $\text{MeOH}/\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ moeilijk in te schatten.

Voor het loogverbruik kunnen op basis van de resultaten van de eerste duurproef geen representatieve gegevens worden verkregen. Indien geen denitrificatie door middel van een additionele koolstofbron plaatsvond, bedroeg het loogverbruik in de praktijk 120 - 150 mol $\text{OH}^-/\text{kg N}$. Bij een denitrificatierendement van ongeveer 50 % bedroeg het loogverbruik 40 - 60 mol $\text{OH}^-/\text{kg N}$. Het loogverbruik is hoog vanwege het feit dat de proefinstallatie bij een vrij hoge pH ($\text{pH} = 8$) is bedreven. Daarnaast is de pH in het systeem over de gehele proefperiode niet constant gebleven, waarover geen duidelijke relatie kon worden afgeleid tussen het loogverbruik en het denitrificatierendement.

5.3.2 Duurproef 2 - normale influentconcentratie

De tweede duurproef, waarbij de proefinstallatie is bedreven met een normale influentconcentratie van 1000-1200 mg $\text{N}_{\text{Kj}}/\text{l}$, is uitgevoerd in de periode van week 25 tot en met week 33 (9 weken).

Vanwege een pH-shock (defecte pH-electrode) in het weekend van 4/5 juni, na afronding van de eerste duurproef, is de proefinstallatie met nieuw actief slib geënt en is een opstartperiode van twee weken (week 23 en 24) in acht genomen (zie hoofdstuk 3).

Procesparameters

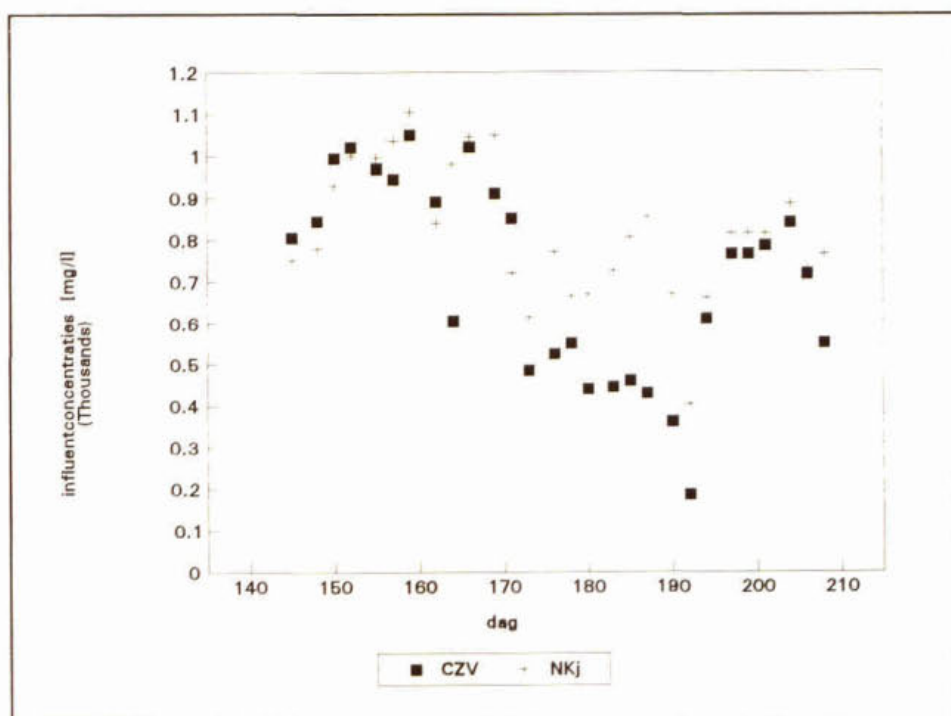
In tabel 5.7 is een overzicht gegeven van de procesparameters gedurende duurproef 2.

Tabel 5.7: Procesparameters - duurproef 2

temperatuur	33	°C
pH	6,8	-
druk	3	bar
drogestofgehalte (min)	7,0	kg/m ³
(max)	20,7	kg/m ³

Influentsamenstelling

In figuur 5.7 zijn het CZV en de N_{Kj} -concentratie in het influent van de proefinstallatie gedurende duurproef 2 weergegeven.



Figuur 5.7: CZV en N_{Kj} -concentratie in het influent - duurproef 2

De concentratie-schommelingen in het influent zijn ook tijdens de tweede duurproef vrij hoog, hetgeen een negatieve invloed heeft op de continuïteit van de belasting. De stikstof-verwijderingsrendementen (figuur 5.11) tonen echter aan dat deze schommelingen in de belasting geen invloed hebben op de zuiveringscapaciteit van de Membraan-bioreactor.

In tabel 5.8 zijn de gemiddelde influent- en effluentconcentraties voor duurproef 2 weergegeven.

Tabel 5.8: Influent- en effluentconcentraties - duurproef 2

parameter	eenheid	influent	effluent
CZV	mg/l	708	100
BZV	mg/l	185	2,2
NKj	mg/l	946	1,7
NH ₄ -N	mg/l	884	1,7
NO ₃ -N zonder MeOH	mg/l	0	915
NO ₃ -N met MeOH	mg/l	0	214 ¹
NO ₂ -N	mg/l	0	2,2
P-tot	mg/l	26	17
Zwevend stof	mg/l	49	< 10
Alkaliteit	mg/l	4.380	683
pH	-	8,2	6,8

¹ Laagst gemeten waarde gedurende duurproef 2

Stikstofbelasting

In de loop van duurproef 2 is de beluchtingscapaciteit van de proefinstallatie beperkend geweest voor de maximale stikstofbelasting door:

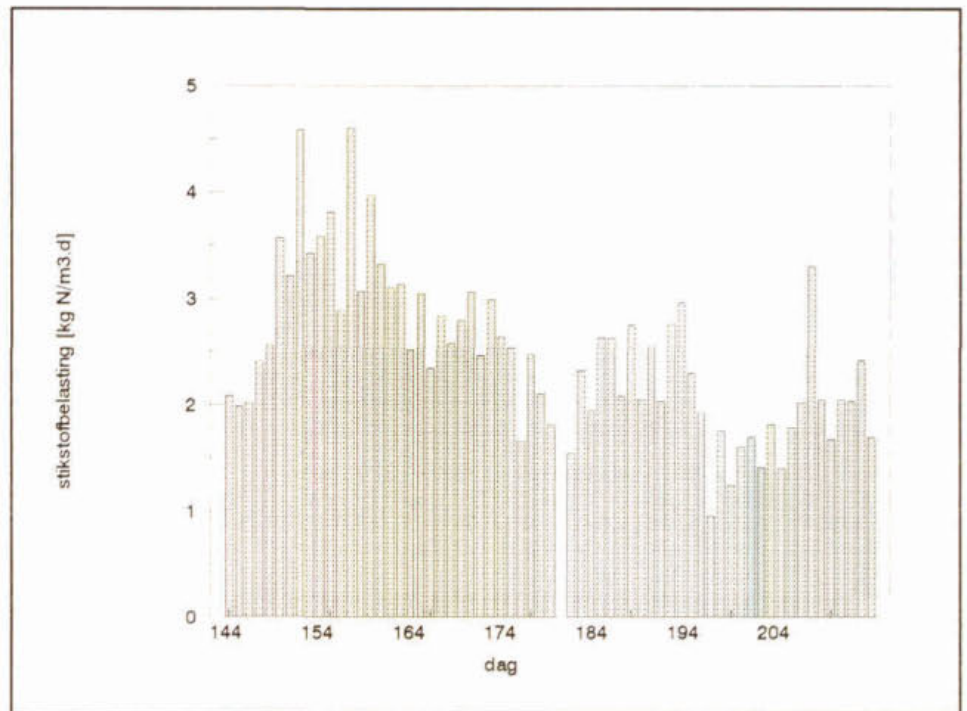
- technische problemen met de compressor (olielekkage), waardoor de beluchtingselementen verstopt raakten;
- de ongunstige geometrie van de beluchtingstank van de pilot-installatie (1 meter waterkolom);
- de relatief lage α -factor (zie paragraaf 5.4.2) bij hoge drogestofgehaltenes.

Naarmate de duurproef vorderde moest de belasting steeds verder worden verlaagd. In figuur 5.8 is de stikstofbelasting gedurende duurproef 2 weergegeven.

De relatief hoge belasting op dag 202 is een gevolg van het schoonmaken van de beluchtingselementen. De elementen raakten echter weer vrij snel vervuild met olie uit de compressor.

De gemiddelde stikstofbelasting, betrokken op het aërobe volume over de gehele periode bedroeg 2,5 kg N/m³.d, waarbij een maximale stikstofbelasting van ruim 4,4 kg N/m³.d is bereikt.

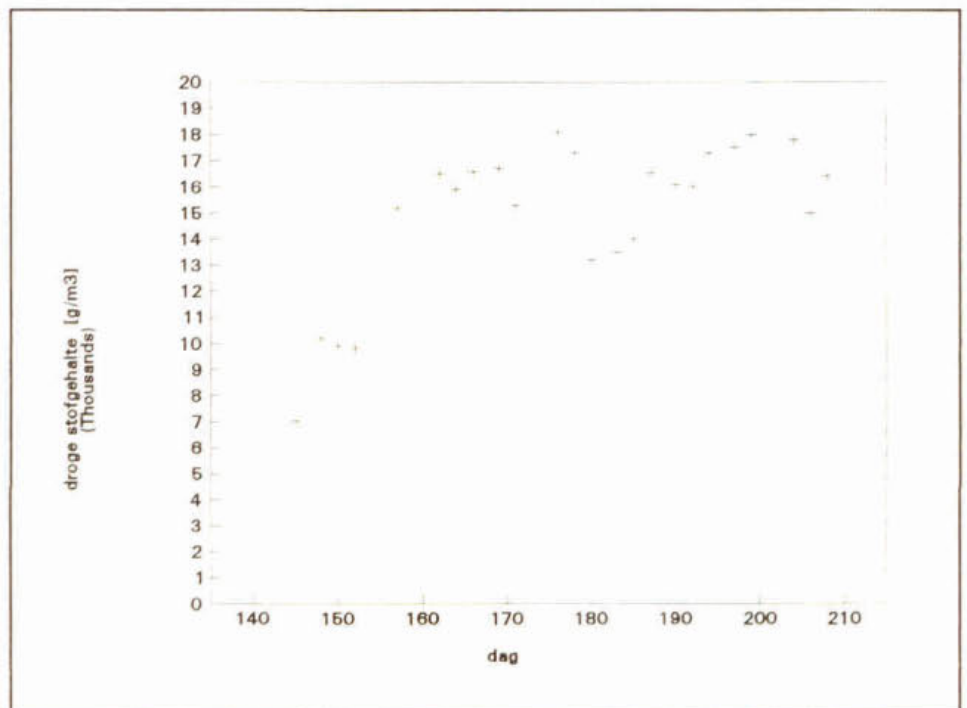
Ook tijdens duurproef 2 is parallel aan de bedrijfsvoering van de proefinstallatie dagelijks de maximale N-eliminatiecapaciteit van het actief slib bepaald. Hierbij zijn in de periode juni/juli N-eliminatiecapaciteiten van ruim 0,4 kg N/kg DS.d gemeten bij drogestofgehaltenes van 15-16 kg/m³. Hieruit blijkt dat op basis van de biologische activiteit in de proefinstallatie een belasting van ruim 6 kg N/m³.d mogelijk was.



Figuur 5.8: Stikstofbelasting (betrokken op aëroob volume) - duurproef 2

Drogestofgehalte

In figuur 5.9 is het drogestofgehalte in de proefinstallatie gedurende de tweede duurproef weergegeven.



Figuur 5.9: Drogestofgehalte - duurproef 2

Na toename van het drogestofgehalte in het begin van de duurproef is getracht het droge stofgehalte constant te houden op ongeveer 18-20 kg/m³. Een lekkage op 21 juli (dag 177) heeft echter geleid tot een daling van het droge stofgehalte tot 13,5 kg/m³. Na een daaropvolgende groei is het gehalte aan droge stof gehandhaafd op ongeveer 18 kg/m³. Het gemiddelde gehalte aan organische stof gedurende de tweede duurproef bedroeg 76,5%.

Over twee perioden is de groei van het actief-slib in relatie tot de belasting berekend. In tabel 5.9 is de slibtoename door groei van micro-organismen gepresenteerd.

Tabel 5.9: Netto slibtoename - duurproef 2

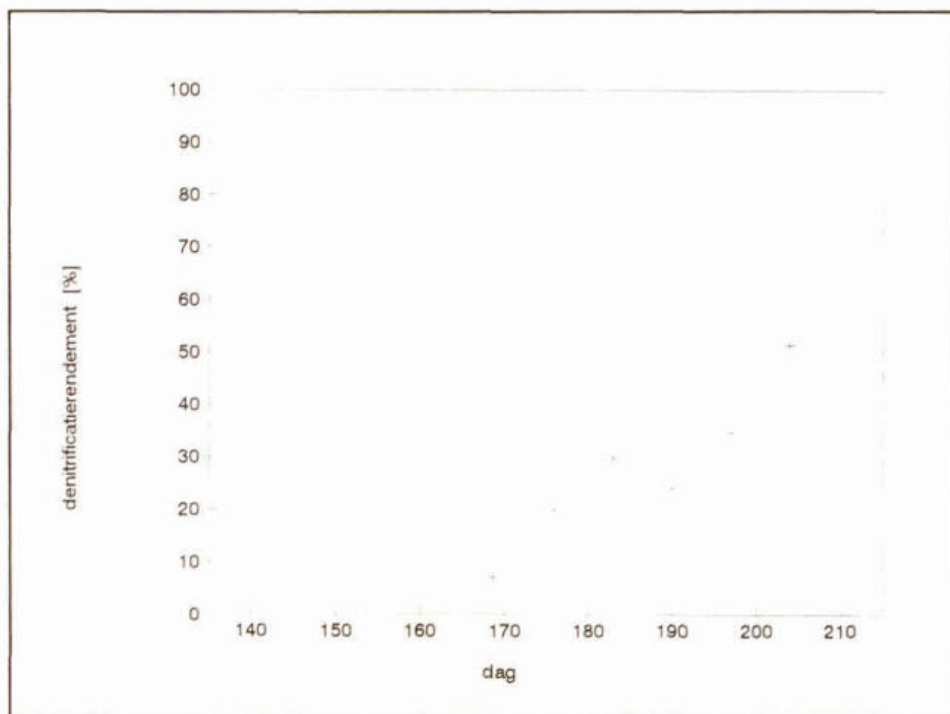
periode	T [°C]	influent debiet [l/h]	influent CZV [mg/l]	influent N _{Kj} [mg/l]	netto slibgroei [kgDS/m ³ _{ind}]
dag 159-170 (nitrificatie)	33,2	107,2	895	1124	0,086
dag 111-130 (denitrificatie)	33,3	98,4	2032	836	0,158

Denitrificatie

Net als in duurproef 1 is de proefinstallatie voor aanvang van duurproef 2 opgestart met actief slib dat niet geadapted was aan methanol. Conform het proefprogramma is vanaf dag 175 methanol gedoseerd aan de proefinstallatie. Door continue aandacht voor het denitrificatieproces (mede met behulp van parallel uitgevoerde batchproeven) kon de adaptatieperiode worden beperkt tot ongeveer 20 dagen.

Gedurende de adaptatie van het actief-slib aan methanol schommelde het denitrificatierendement tussen de 5 en 25%. Op basis van respiratiemetingen en denitrificatieproeven met het slib/watermengsel uit de afloop van de denitrificatietank bleek dat nog regelmatig overdosering van methanol plaatsvond. De verhouding MeOH/NO₃-N_{verw} bedroeg gedurende deze periode ruim 3,5 kg/kg. Uit batchproeven bleek echter dat met een verhouding MeOH/NO₃-N_{verw} < 3 kg/kg reeds volledige denitrificatie kon worden bereikt.

Na aanpassingen van de denitrificatiereactor, waarbij de reactor is omgebouwd van gemengde reactor tot een reactor waarbij het propstroomprincipe werd benaderd, werd het methanol efficiënter benut. De verhouding MeOH/NO₃-N_{verw} gedurende de laatste drie weken van de duurproef bedroeg gemiddeld 2,6 kg MeOH/kg NO₃-N. De toename van het denitrificatierendement tijdens de duurproef is weergegeven in figuur 5.10. Tijdens duurproef 3 is de denitrificatie verder opgevoerd tot 89% (zie § 5.3.3)



Figuur 5.10: Denitrificatierendement - duurproef 2

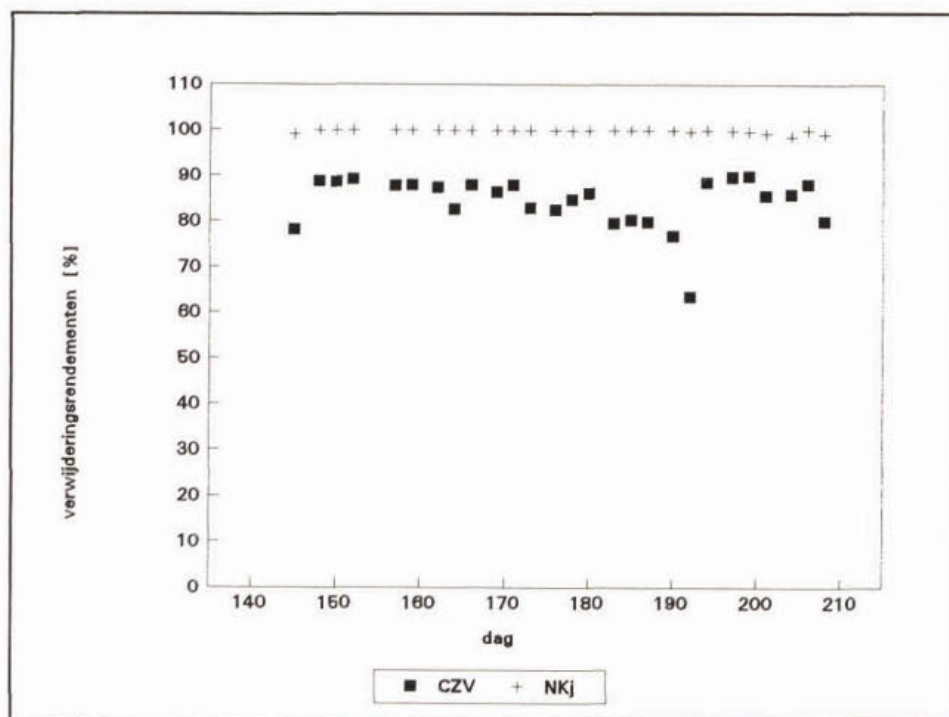
Verwijderingsrendementen

Het N_{Kj} -verwijderingsrendement bedroeg gedurende de gehele duurproef 99,9 %. Het CZV-verwijderingsrendement schommelde tijdens deze periode tussen 65 en 98 %. De gemiddelde verwijderingsrendementen voor CZV, BZV, N_{Kj} en NH_4-N zijn weergegeven in tabel 5.10. De verwijderingsrendementen van CZV en N_{Kj} gedurende de gehele duurproef zijn grafisch weergegeven in figuur 5.11.

Tabel 5.10: Verwijderingsrendementen - duurproef 2

parameter	verwijderingsrendement [%]
CZV	85,9
BZV	98,8
N_{Kj}	99,8
NH_4-N	99,8
N-tot	51,0 ¹

¹ - als maximum terwijl nog geen stabiel evenwicht is bereikt



Figuur 5.11 N_{Kj} - en CZV-verwijderingsrendement - duurproef 2

Chemicaliënverbruik

De MeOH/ NO_3 -N-verhouding bedroeg tijdens de tweede duurproef 2,6 kg/kg. Afhankelijk van de mate van denitrificatie kan hiermee het verbruik aan methanol worden berekend.

In tabel 5.11 worden het loogverbruik en het denitrificatierendement gedurende de tweede duurproef gepresenteerd. Het loogverbruik [mol OH/kg N] en het denitrificatierendement worden gepresenteerd als gemiddelde waarde over een gehele week.

Tabel 5.11: Verloop van het loogverbruik - duurproef 2

denitrificatierendement [%]	loogverbruik [molOH/kgN]
9,4	68,4
20,0	57,4
24,0	42,4
34,7	45,7
51,4	29,6

Uit de tabel blijkt dat bij toenemend denitrificatierendement het loogverbruik afneemt.

Het loogverbruik tijdens deze duurproef is aanzienlijk lager dan bij de eerste duurproef. Dit heeft als voornaamste oorzaak dat in plaats van ongeveer pH 8 tijdens de eerste duurproef de pH tijdens de tweede duurproef via regeling

gehandhaafd is op pH 6,8. De verhouding alkaliteit/ N_{Kj} (in mol/mol) in het influent is tijdens beide duurproeven vrijwel gelijk, respectievelijk 1,04 en 1,07. In bijlage 7 is de relatie tussen het loogverbruik (mol OH^- /kg N) en het denitrificatierendement uitgewerkt.

5.3.3 Duurproef 3 - verhoogde influentconcentratie

Tijdens duurproef 3 is de proefinstallatie bedreven met een verhoogde influentconcentratie van ongeveer 2000 mg N_{Kj} /l. Om deze hoge stikstofconcentratie te bereiken is ureum aan het influent toegevoegd. Duurproef 3 is uitgevoerd in de periode van week 36 tot en met week 43 (8 weken).

Procesparameters

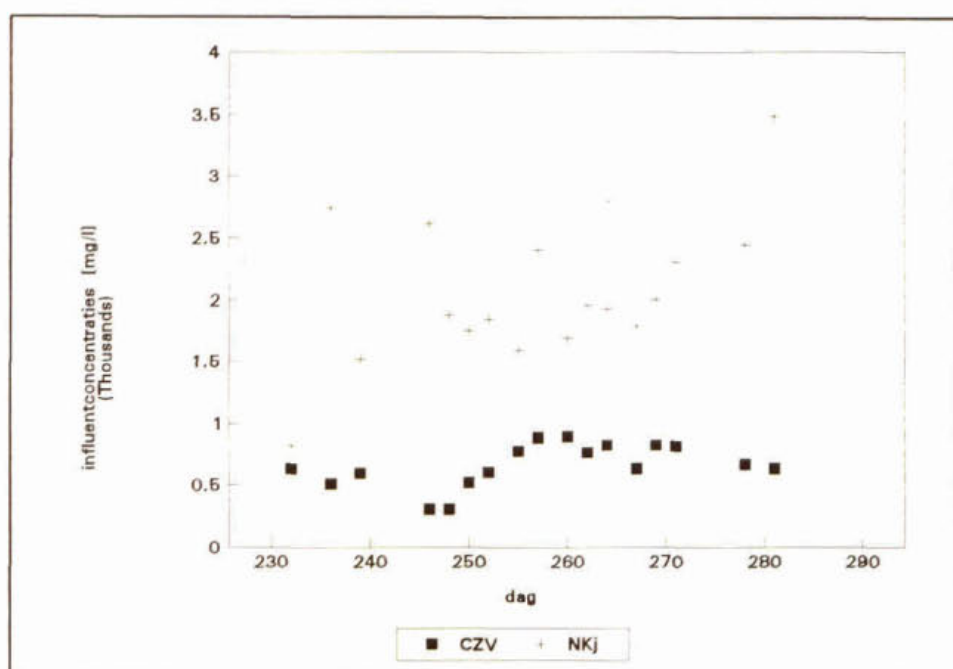
In tabel 5.12 is een overzicht gegeven van de procesparameters gedurende duurproef 3.

Tabel 5.12: Procesparameters - duurproef 3

temperatuur	33	°C
pH	6,8	-
druk	3	bar
drogestofgehalte (min)	14,1	kg/m ³
(max)	24,1	kg/m ³

Influentsamenstelling

In figuur 5.12 zijn het CZV en de N_{Kj} -concentratie in het influent van de proefinstallatie gedurende duurproef 3 weergegeven.



Figuur 5.12: CZV en N_{Kj} -concentratie in het influent - duurproef 3

Vanwege het feit dat de ureumdosering dagelijks op een nog niet vastgesteld influentgehalte aan N_{Kj} moest worden afgesteld, fluctueert de totale N_{Kj} -concentratie. In tabel 5.13 zijn de gemiddelde influent- en effluentconcentraties voor duurproef 3 weergegeven.

Het N_{Kj} -gehalte is aan het einde van de duurproef opgevoerd om de stikstofbelasting van de proefinstallatie te verhogen.

Tabel 5.13: Influent- en effluentconcentraties - duurproef 3

parameter	eenheid	influent	effluent
CZV	mg/l	659	101
BZV	mg/l	158	2,0
N_{Kj}	mg/l	2.040	8,6
NH_4-N	mg/l	1.937	7,8
NO_3-N zonder MeOH	mg/l	0	1.693
NO_3-N met MeOH	mg/l	0	137 ¹
NO_2-N	mg/l	0	9,5
P-tot	mg/l	24	16
Zwevend stof	mg/l	55	< 10
Alkaliteit	mg/l	3.081	948
pH	-	8,2	6,8

¹ Laagst gemeten waarde gedurende duurproef 3 bij volledige nitrificatie

Stikstofbelasting

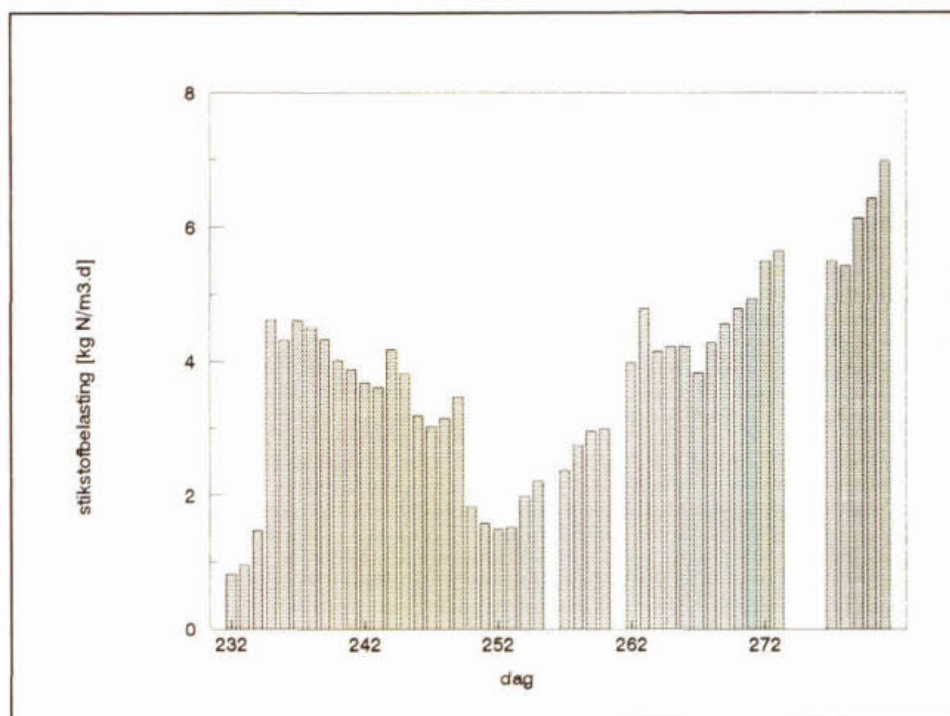
In de voorgaande duurproef was de beluchttingscapaciteit van de proefinstallatie beperkend voor de maximale stikstofbelasting. Op basis van berekeningen en op aangeven van leveranciers van beluchttingsapparatuur bleek een O_2 -inbrengcapaciteit van minstens 1 kg O_2/m^3 -reactorvolume per uur voor een full scale Membraan-bioreactor (optimale geometrie) mogelijk (§ 6.2.5). Dit komt voor het rejectiewater van Sluisjesdijk overeen met een stikstofbelasting van ongeveer 4,4 kg N/m^3 .d. De O_2 -inbrengcapaciteit van een full scale installatie op basis van bellenbeluchting is met de proefinstallatie bereikt door gebruikmaking van zuivere O_2 . Tijdens de dosering van zuivere O_2 heeft ook beluchting in de reactor plaatsgevonden.

Direct na de start van de derde duurproef is een stikstofbelasting van ongeveer 4,4 kg N/m^3 .d gehandhaafd. De duurproef is gestart met nitrificatie/denitrificatie onder toevoeging van methanol. Aan het einde van de denitrificatieperiode bleek uit de $MeOH/NO_3-N_{verw}$ dat het nitrificatie/denitrificatieproces deels via nitriet verliep. Dit bleek ook na stopzetting van de methanoldosering, aangezien het nitrietgehalte toen aanzienlijk toenam. Door het aanpassen van de bedrijfsvoering is vervolgens het aandeel aan *Nitrobacter sp.* (omzetting nitriet → nitraat) toegenomen. De belasting is gedurende het vervolg van de duurproef opgevoerd tot uiteindelijk 7,2 kg N/m^3 .d.

De gemiddelde stikstofbelasting over de gehele periode bedroeg 4,0 kg N/m^3 .d, waarbij een maximale stikstofbelasting van 7,2 kg N/m^3 .d is bereikt. Op basis van respirometingen met het actief slib uit de proefinstallatie zijn in september en

oktober nitrificatiecapaciteiten van ongeveer 0,5 kg N/kg DS.d gemeten bij drogestofgehalten van ongeveer 19 kg/m³. Hieruit blijkt dat op basis van de biologische activiteit in de proefinstallatie een belasting van 9,5 kg N/m³.d mogelijk moet zijn. De verwachting is dat door het geleidelijk opvoeren van de belasting de maximale capaciteit per m³ nog verder kan toenemen.

In figuur 5.13 is de stikstofbelasting gedurende de derde duurproef weergegeven.



Figuur 5.13: Stikstofbelasting (betrokken op aëroob volume) - duurproef 3

Drogestofgehalte

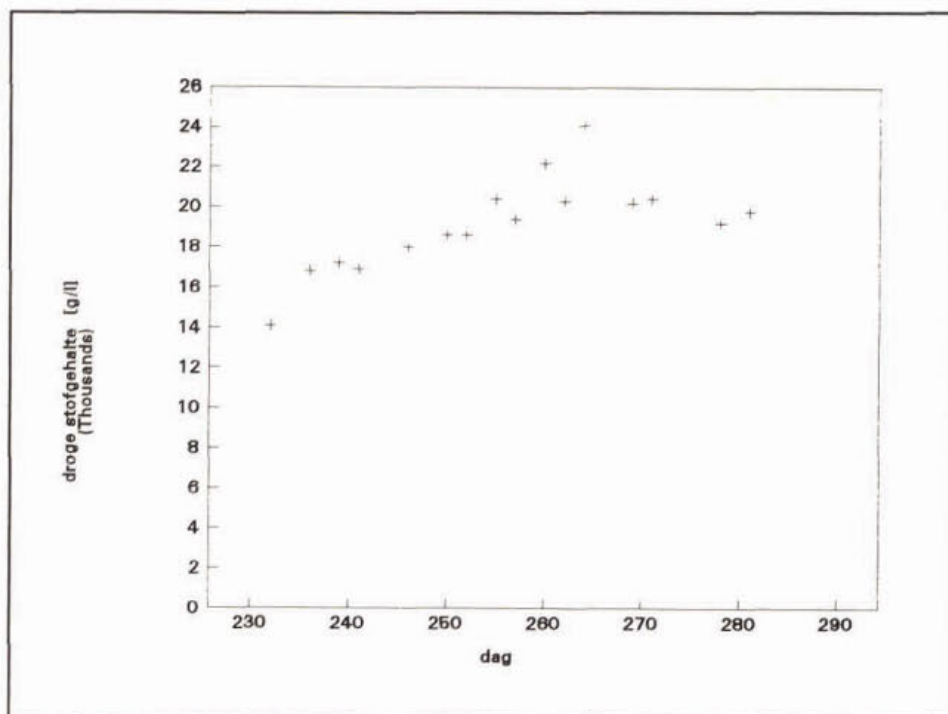
Gedurende de gehele duurproef is het drogestofgehalte tussen de 18 kg/m³ en 22 kg/m³ gehouden door regelmatig slib te spuien.

Over twee perioden is de groei van het actief-slib in relatie tot de belasting berekend. In tabel 5.14 is de slibtoename door groei van micro-organismen gepresenteerd.

Tabel 5.14: Netto slibtoename - duurproef 3

periode	T [°C]	influent debiet [l/h]	influent CZV [mg/l]	influent N _{Kj} [mg/l]	netto slibgroei [kgDS/m ³ .d]
dag 260-281 (nitrificatie)	33,3	86,6	776	2278	0,238
dag 232-242 (denitrificatie)	33,3	89,8	4538	1539	0,430

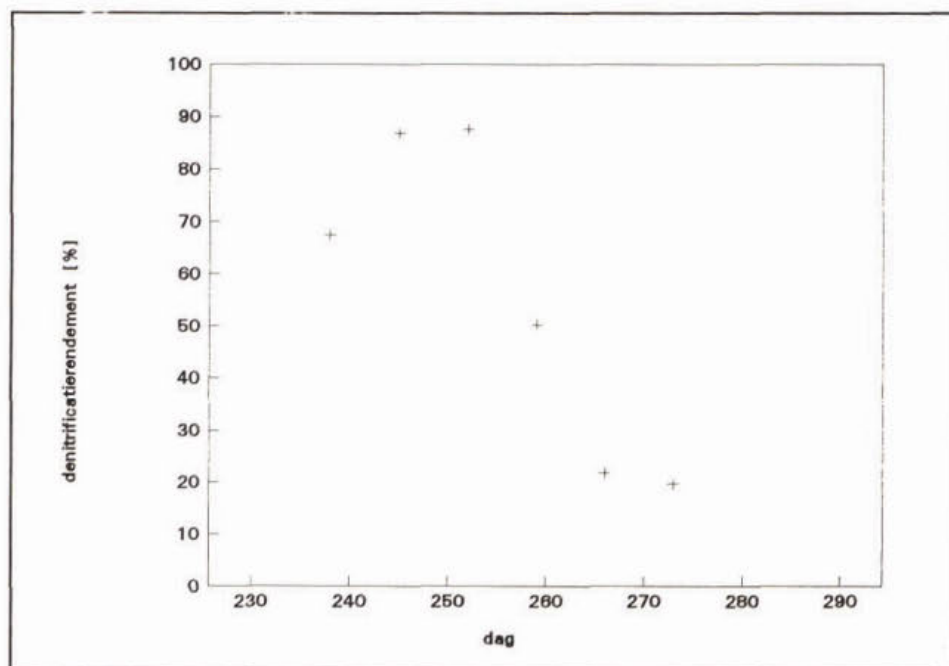
In figuur 5.14 is het drogestofgehalte in de proefinstallatie gedurende de duurproef 3 weergegeven.



Figuur 5.14: Drogestofgehalte - duurproef 3

Denitrificatie

Duurproef 3 is gestart met actief-slib dat inmiddels geadapted was aan methanol als koolstofbron (duurproef 2).



Figuur 5.15: Denitrificatierendement - duurproef 3

Door te starten met geadopteerd slib kon het denitrificatierendement en de $\text{NO}_3\text{-N}$ -afbraaksnelheid verder worden opgevoerd. Het denitrificatierendement (figuur 5.15) kende een maximum van gemiddeld 89 % gedurende twee weken. Hierbij werd een maximale afbraaksnelheid van 0,49 kg $\text{NO}_x\text{-N}/\text{kg DS.d}$ gemeten. De minimale recirculatiefactor voor het bereiken van een denitrificatierendement van 89 % bedroeg 8,1.

Vanaf dag 250 is de methanol dosering geleidelijk verlaagd tot 0.

De verhouding $\text{MeOH}/\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ daalde vanaf het begin van de duurproef tot aan het einde van de denitrificatieperiode van 2,5 kg/kg tot 1,9 kg/kg. De lage verhouding $\text{MeOH}/\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ aan het einde van de denitrificatieperiode werd veroorzaakt doordat het nitrificatie/denitrificatieproces deels via nitriet verliep. Uit batchproeven bleek de nitrificatie/denitrificatie voor 85 % via nitriet te verlopen.

Chemicaliënverbruik

Gedurende de denitrificatieperiode van de duurproef 3 daalde de verhouding $\text{MeOH}/\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ van 2,5 kg/kg naar uiteindelijk 1,9 kg/kg doordat het nitrificatie/denitrificatieproces deels via nitriet verliep.

In tabel 5.15 worden het loogverbruik en het denitrificatierendement gedurende de derde duurproef gepresenteerd. Het loogverbruik [mol $\text{OH}^-/\text{kg N}$] en het denitrificatierendement worden gepresenteerd als gemiddelde waarde over een gehele week.

Tabel 5.15: Verloop van het loogverbruik - duurproef 3

denitrificatierendement [%]	loogverbruik [mol OH^-/kgN]
19,8	82,1
21,8	71,7
50,2	66,3
86,7	12,9
87,6	12,5

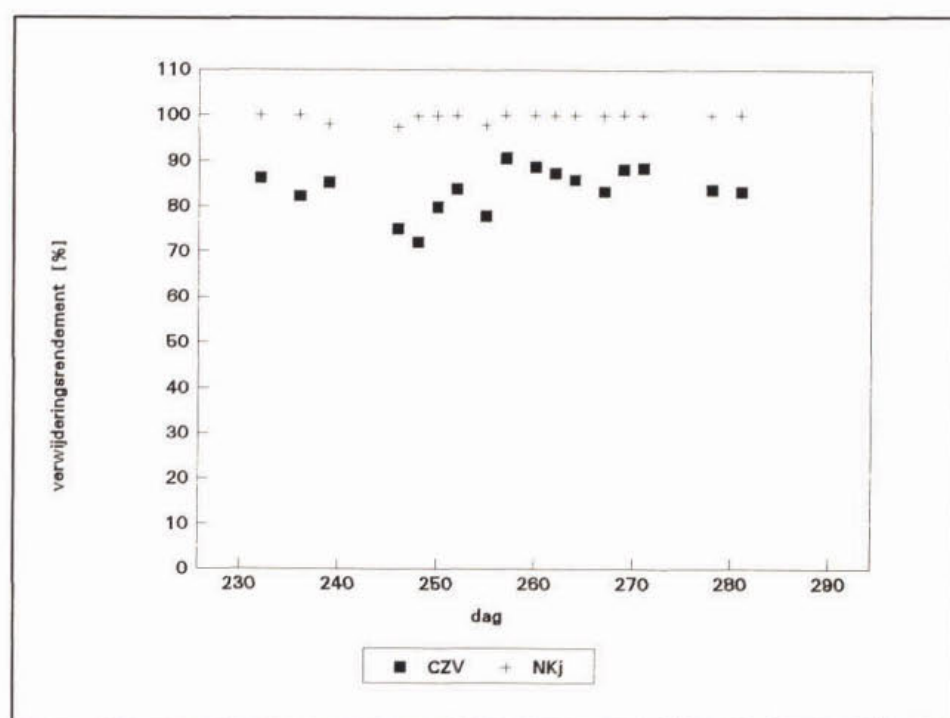
Het loogverbruik tijdens duurproef 3 is bij vergelijkbaar denitrificatierendement hoger dan bij duurproef 2. Dit heeft als voornaamste oorzaak dat de verhouding alkaliteit/ N_{Kj} (in mol/mol) in het influent tijdens duurproef 3 aanzienlijk ongunstiger was (0,35 mol/mol) ten opzichte van deze verhouding tijdens duurproef 2 (1,07 mol/mol). Dit vanwege de additionele dosering van ureum. Duurproef 3 is derhalve niet representatief voor het loogverbruik.

Verwijderingsrendementen

Het N_{Kj} -verwijderingsrendement bedroeg gedurende de gehele duurproef 99,6 %. Het CZV-verwijderingsrendement schommelde tijdens deze periode tussen 72,1 % en 90,6 %. De gemiddelde verwijderingsrendementen voor CZV, BZV, N_{Kj} en NH_4-N zijn weergegeven in tabel 5.16. De verwijderingsrendementen van CZV en N_{Kj} gedurende de gehele duurproef zijn grafisch weergegeven in figuur 5.16.

Tabel 5.16: Verwijderingsrendementen - duurproef 3

parameter	verwijderingsrendement [%]
CZV	84,7
BZV	98,7
N_{Kj}	99,6
NH_4-N	99,6
N-tot	89,0



Figuur 5.16: N_{Kj} - en CZV-verwijderingsrendement - duurproef 3

5.4 Additioneel onderzoek

5.4.1 Ultrafiltratiemembranen

Afhankelijk van het type afvalwater zijn diverse typen membranen meer of minder geschikt voor de slib/waterscheiding. In het kader van dit onderzoek is een aantal membranen getest. De geschiktheid van de membranen voor de slib/waterscheiding binnen deze toepassing uit zich in de flux ($l/m^2.h$), het energieverbruik en de levensduur. De retentie van hoogmoleculaire verbindingen speelt een ondergeschikte rol gezien het feit dat het effluent van de Membraan-bioreactor wordt teruggevoerd naar een rwzi.

Navolgende membraantypen zijn gedurende het onderzoek getest:

membraan	materiaal	kenmerken	membraan oppervlak per module [m^2]	oppervlak dwarsdoorsnede per module [cm^2]
MPB1	polysulfon	hydrofoob	0,54	11,4
MPL1	polysulfon	hydrofiel	0,54	11,4
MPB2	polysulfon	hydrofoob	0,54	11,4
MPL2	polysulfon	hydrofiel	0,61	7,3
MPLT	polysulfon	hydrofiel terugsp.baar	2,30	15,3

Afkortingen:

- M - membraan
- P - polysulfon
- B - hydrofoob
- L - hydrofiel
- T - terugspoelbaar

Alle in deze paragraaf genoemde fluxen (in $l/m^2.h$) zijn, behalve bij proeven waarin de temperatuur en/of de druk werd gevarieerd, gestandaardiseerd tot een flux bij 4,5 bar overdruk en een temperatuur van $33^\circ C$. De relatie van de flux met de druk en temperatuur is proefondervindelijk vastgesteld. Gekozen is voor een druk van 4,5 bar omdat dit de gemiddelde membraandruk in een full scale installatie zal zijn.

In bijlage 9 worden de resultaten gepresenteerd van de basismetingen en de invloed van de druk, temperatuur en stroomsnelheid op de membraanflux. Op basis van die resultaten is uiteindelijk gekozen voor twee membranen voor het verdere onderzoek en voor vergelijking op basis van een duurproef. De conclusies van het onderzoek naar de invloed van de druk, temperatuur en stroomsnelheid worden navolgend gepresenteerd.

Invloed van de druk op de membraanflux

Voor alle membranen is een lineaire toename van de flux waarneembaar bij toenemende druk tot ongeveer 4,5 bar. Boven de 4,5 bar vlt de fluxtoename af.

Invloed van de temperatuur op de membraanflux

Binnen het temperatuurtraject waarbij de Membraan-bioreactor vanuit biologisch oogpunt kan worden bedreven ($25^\circ C - 35^\circ C$), neemt de membraanflux voor elk type membraan toe bij toenemende temperatuur.

Invloed van de stroomsnelheid op de membraanflux

- Voor de MPL1-membranen geldt dat bij een stroomsnelheid $> 3,8$ m/s geen toename van de flux wordt bereikt.
- Voor de MPL2-membranen geldt dat bij een stroomsnelheid $> 4,8$ m/s geen toename van de flux wordt bereikt.

Duurproef voor de ultrafiltratiemembranen

In figuur 5.17 zijn de membraanfluxen van twee membraanmodules over de gehele proefperiode weergegeven. Het betreft een MPL1-moduul en een MPL2-moduul.

In navolgend overzicht is de standtijd voor deze twee membranen aangegeven.

membraan	ingezet	standtijd
MPL1	31 maart (dag 68)	30 weken
MPL2	7 juli (dag 165)	17 weken

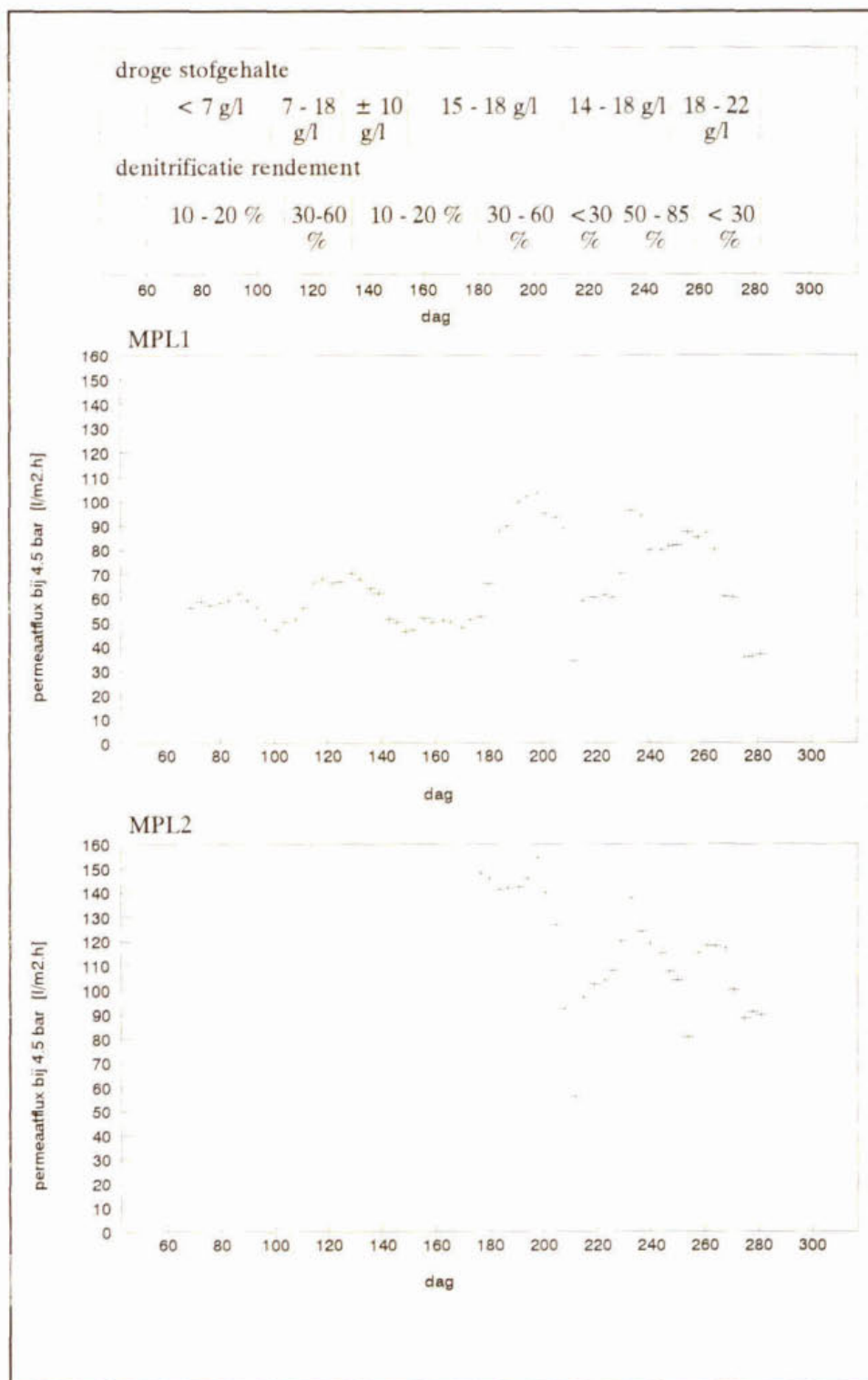
Gedurende het gehele onderzoek heeft een groot aantal veranderingen plaatsgevonden in de bedrijfsvoering van de membranen. Dit heeft tot gevolg gehad dat de membraanfluxen fluctuaties vertonen. De voornaamste veranderingen in de bedrijfsvoering worden navolgend genoemd:

- wisseling van de membraanvolgorde. De invloed (verandering van druk per moduul) op de membraanflux is meegenomen door de flux bij een druk van 4,5 bar uit te drukken;
- toe- en afname van het drogestofgehalte. Dit is aangegeven in figuur 5.17;
- mate van denitrificatie. Dit is aangegeven in figuur 5.17;
- toename van de stroomsnelheid over de membranen (vanaf begin juli).

Op basis van hetgeen is gepresenteerd in figuur 5.17 kunnen de volgende opmerkingen worden geplaatst:

- tot een drogestofgehalte van ongeveer $20-22$ kg/m³ in de Membraanbioreactor is nauwelijks invloed op de membraanflux waarneembaar;
- een laag denitrificatierendement (< 30 %) heeft een membraanfluxverlaging tot gevolg. Gedurende het onderzoek is dit fenomeen niet verder onderzocht.

Tevens wordt opgemerkt dat de membranen gedurende het gehele onderzoek slechts zijn gereinigd na het optreden van calamiteiten (stroomuitval). Ingeschat wordt dat bij continue bedrijfsvoering van de membraan-unit maximaal eens in de drie maanden een reiniging met behulp van loog of zuur (afhankelijk van het afvalwater) moet worden uitgevoerd. Membraanfouling als zodanig is niet geconstateerd.



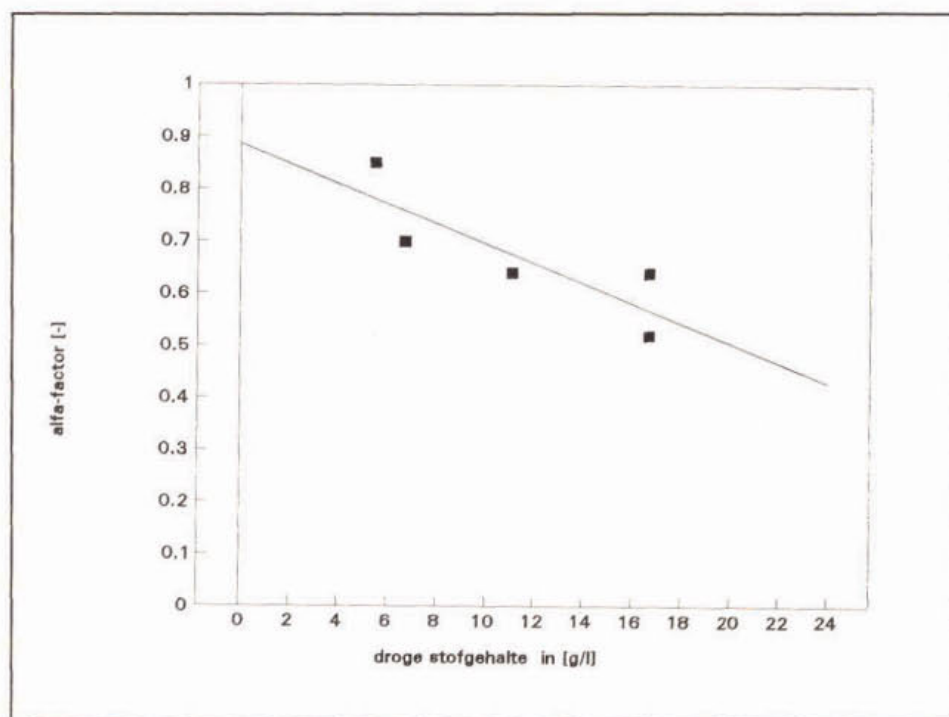
*Figuur 5.17: Verloop permeaatflux van het MPL1 en MPL2 modul gedurende het gehele onderzoek.
 Tevens aangegeven: - droge stofgehalte
 - denitrificatierendement*

De gemiddelde membraanflux van het MPL1-membraan gedurende het gehele onderzoek bedroeg 65 l/m².h. De gemiddelde membraanflux van het MPL2-membraan gedurende het onderzoek was 116 l/m².h. Met het MPL2-membraan is in perioden waarbij het denitrificatierendement lager dan 30 % bedroeg een minimale flux van 81 l/m².h waargenomen.

5.4.2 Zuurstoftoevoervermogen

De verhouding tussen het zuurstoftoevoervermogen van schoon water (drinkwater) en een mengsel van actief slib en afvalwater (zogenaamde α -factor) is bepaald om de minimaal benodigde beluchtingscapaciteit te kunnen berekenen. Het zuurstoftoevoervermogen is verder onder meer afhankelijk van het type beluchting, de grootte van het volume water en de geometrie van de beluchtings-tank en is derhalve niet te vertalen naar een full scale installatie. De α -factor is met name afhankelijk van het type afvalwater en het drogestofgehalte. De α -factor, zoals deze tijdens dit onderzoek is bepaald, kan derhalve worden toegepast voor de dimensionering van een full scale installatie.

Het zuurstoftoevoervermogen in schoon water is bepaald tijdens het inregelen van de proefinstallatie in het begin van het onderzoek. Het zuurstoftoevoervermogen in het mengsel actief slib/afvalwater is bepaald bij verschillende drogestofgehaltes in de loop van het onderzoek. In figuur 5.18 zijn de resultaten van deze proeven grafisch weergegeven. Hierbij wordt de α -factor in relatie tot het drogestofgehalte in de installatie weergegeven.



Figuur 5.18: α -factor in afhankelijkheid van het drogestofgehalte

Door de berekende α -waarden is lineair een regressielijn getrokken. Deze lijn wordt beschreven met behulp van de volgende functie:

$$\alpha = 0,885 - 0,019 \cdot DS$$

α	correctiefactor K_1A voor vuil water	[-]
DS	drogestofgehalte	[kg/m ³]

De β -factor (verschil tussen gemeten en theoretische zuurstofverzadigingswaarde) is in de proefinstallatie vastgesteld bij verschillende drukken. Deze gegevens zijn in tabel 5.17 weergegeven.

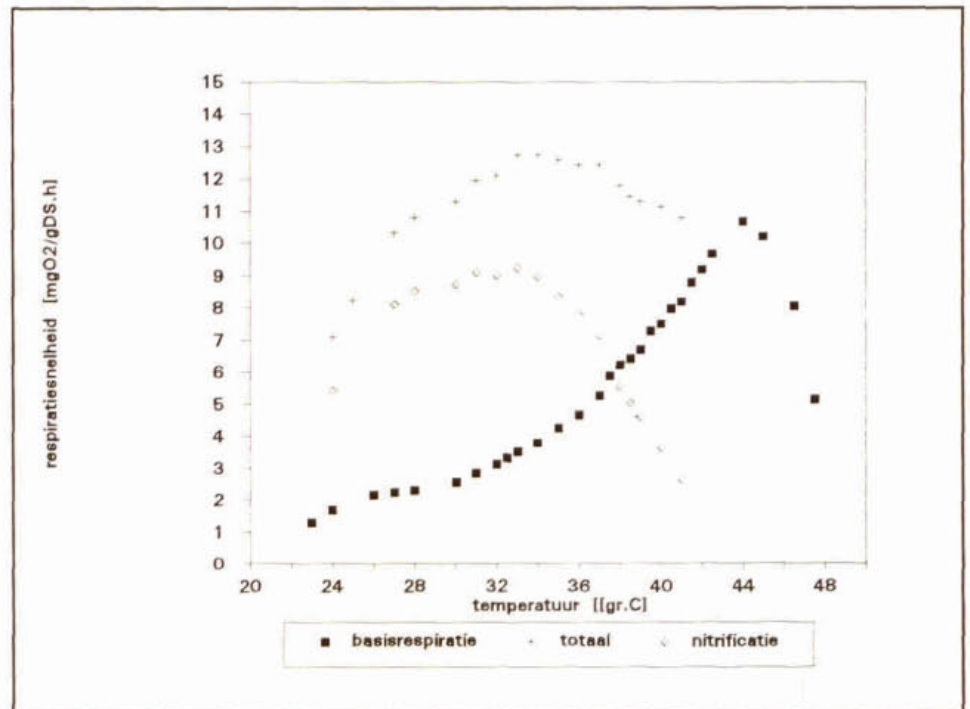
Tabel 5.17: Bepaling van de β -factor

Druk [bar]	C_s -gemeten [mg/l]	C_s -berekend [mg/l]	β -factor [-]
2	12.0	13.3	0.90
3	18.0	20.0	0.90
2.5	15.0	16.7	0.90
2	11.9	13.3	0.90
2	12.7	14.1	0.90

Uit bovenstaande tabel volgt een β -factor van 0.9.

5.4.3 Temperatuurbeheersing

De groeisnelheid (μ_{max}) en daarmee de activiteit van heterotrofe en autotrofe bacteriën is onder meer afhankelijk van de temperatuur. Om de optimale temperatuur vast te stellen voor het nitrificatieproces is met behulp van respiratiemetingen het temperatuuroptimum bepaald. Hiertoe is een temperatuur-activiteit relatie vastgesteld voor de endogene ademhaling en de maximale respiratiesnelheid. De resultaten zijn weergegeven in figuur 5.19.

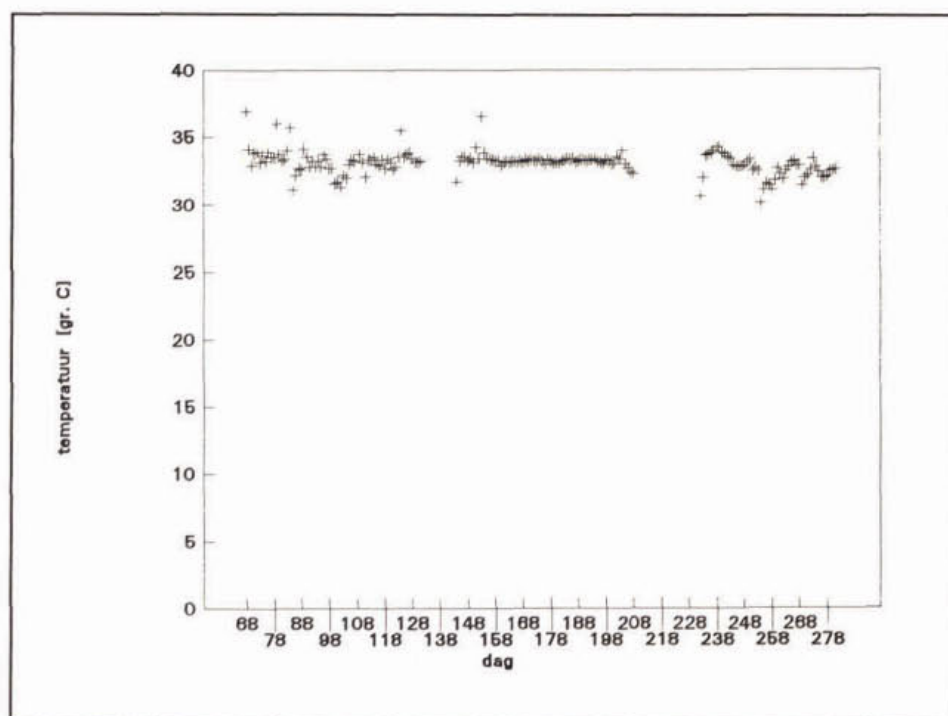


Figuur 5.19: Basisrespiratie, maximale respiratie en nitrificatieademhaling als functie van de temperatuur

Door beide relaties (temperatuur/endogene ademhaling en temperatuur/maximale respiratie) met elkaar te combineren kan de maximale nitrificatie capaciteit in afhankelijkheid van de temperatuur worden bepaald (tijdens de proef is alleen gebruik gemaakt van stikstof als substraat).

Uit figuur 5.19 blijkt dat de groeisnelheid voor nitrificerende bacteriën maximaal is bij een temperatuur van 33°C. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat, door de installatie bij een hogere temperatuur (tot 38°C) te bedienen, adaptatie mogelijk is waardoor het temperatuuroptimum kan verschuiven.

De proefinstallatie is gedurende het gehele onderzoek bedreven bij een temperatuur van ongeveer 33°C. Deze temperatuur kon relatief eenvoudig worden gehandhaafd. Een overschot aan warmte is afgevoerd met een koeler. In figuur 5.20 is het verloop van de temperatuur gedurende de gehele proef weergegeven.



Figuur 5.20: Temperatuur in de proefinstallatie

5.4.4 Invloed van zwevend stof in het influent op de bedrijfsvoering

De invloed van met het influent van de Membraan-bioreactor meegevoerde polymeren (overmatige dosering bij de slibontwatering), verontreinigingen zoals stukjes plastic en haren en suspended solids (uitspoeling slibontwatering) op de bedrijfsvoering is onderzocht.

Polymeren

Tijdens het onderzoek is geen effect van pieklozingen van polymeren op de membraanflux waargenomen. Gedurende het gehele onderzoek heeft regelmatig overdosering van polymeren plaatsgevonden bij het opstarten van de centrifuges. Hierdoor werd regelmatig een verhoogde hoeveelheid polymeren meegevoerd met het rejectiewater dat in de proefinstallatie moest worden behandeld. Dit heeft geen enkele keer geleid tot een verlaging van de membraanflux.

Verontreinigingen

De met het rejectiewater meegevoerde grove verontreinigingen zoals stukjes plastic en haren vormen een technisch probleem voor de Membraan-bioreactor indien deze niet vooraf worden verwijderd. Dit is onderzocht door de proefinstallatie gedurende twee weken met ruw (niet gefiltreerd) rejectiewater te belasten. Tijdens deze periode hoopten de verontreinigingen zich op in de installatie en

veroorzaakt vervuiling van meetsensoren (pH, O₂) en verstopping van membranen. Het weglaten van zeven/filtreren in het influent is derhalve niet verantwoord.

Zwevend stof

De invloed van zwevend stof op het nitrificatieproces is onderzocht door de proefinstallatie te bedienen met verschillende influent-filtratiemethoden. De volgende filtratiemethoden zijn toegepast:

- 1 - Fijnfiltratie - continu spoelend zandfilter.
- 2 - Groffiltratie - automatisch spoelend mechanisch filter (zeef).

Tijdens duurproef 2 is gebruik gemaakt van het zandfilter, terwijl tijdens duurproef 3 gebruik is gemaakt van de zeef. Gedurende het gehele onderzoek is de nitrificatie volledig geweest. Tijdens duurproef 3 (filtratie met zeef) is de stikstofbelasting zelfs aanzienlijk opgevoerd zonder dat problemen bij het nitrificatieproces zijn waargenomen.

Het feit dat de wijze van filtratie geen invloed heeft op het nitrificatieproces wordt verklaard uit het filtratierendement van beide filtratietechnieken. Gedurende de proefperiode zijn het ruwe influent en het gefiltreerde influent regelmatig bemonsterd en geanalyseerd op onder andere CZV, N_{Kj} en zwevend stof. In tabel 5.18 volgen de gemiddelde resultaten van deze analyses:

Tabel 5.18: CZV, N_{Kj} en zwevend stof in ruw en gefiltreerd afvalwater

	ruw afvalwater [mg/l]	gefiltreerd afvalwater zandfilter [mg/l]	gefiltreerd afvalwater zeef [mg/l]
CZV	1280	727	659
N _{Kj}	842	833	756
Zwevend stof	635	50	55

Het filtratierendement van het zandfilter en de zeef zijn nagenoeg gelijk (92 % op basis van zwevend stof).

De invloed van het gesuspendeerde materiaal in het ruwe influent op het nitrificatieproces is gesimuleerd met het IAWQ model. De resultaten van deze simulatie worden gepresenteerd in bijlage 10. Uit de simulaties blijkt dat de nitrificatie onder de gesimuleerde omstandigheden volledig is. Een verhoogd gehalte aan inert en langzaam afbreekbaar gesuspendeerd organisch materiaal heeft weliswaar een aanzienlijke invloed op de sibleeftijd, echter de groeisnelheid van nitrificerende bacteriën is onder de gegeven omstandigheden (T = 33°C) zodanig hoog dat de lagere sibleeftijd geen beperking vormt voor het nitrificatieproces.

6 Evaluatie

6.1 Algemeen

In deze evaluatie worden de resultaten nader geïnterpreteerd en vergeleken met de theoretische achtergrond. Tevens wordt een gevoeligheidsanalyse voor de diverse parameters vastgesteld die uitmondt in dimensioneringsgrondslagen voor de Membraan-bioreactor voor de zuivering van rejectiewater.

6.2 Technologische aspecten

6.2.1 Opstart

Nitrificatie

Gedurende het onderzoek is de proefinstallatie twee maal geënt en opgestart met nitrificerend slib. De tweede opstart was noodzakelijk vanwege een pH-shock, waardoor de nitrificatiecapaciteit sterk afgenomen was. De tweede opstart verliep aanzienlijk sneller dan de eerste opstart. Dit had met name te maken met het feit dat de technische (opstart) problemen waren verholpen en de installatie stabiel kon worden bedreven. De tweede opstart wordt derhalve als representatief beschouwd voor de opstart van een full scale installatie. Tijdens de tweede opstart bleek dat in 6 dagen de specifieke stikstofomzettingssnelheid kon worden opgevoerd van 0,01 kg N/kg DS.d tot 0,258 kg N/kg DS.d. Het drogestofgehalte gedurende de tweede opstart bedroeg 6 kg/m³. Uit het proefonderzoek is gebleken dat door het optimaliseren en constant houden van de procesparameters (pH, temperatuur, NH₄-N en NO₂-N) de opstart zeer sterk wordt bespoedigd.

Denitrificatie

Tijdens de eerste en de tweede duurproef is de denitrificatie opgestart met niet aan methanol geadapteerd slib. Gebleken is dat de adaptatie aan methanol ongeveer 20 dagen duurt; daarna komt de denitrificatie zeer snel op gang en kent de toename van de denitrificatiecapaciteit een exponentieel verloop. Belangrijk voor de mate van denitrificatie is de verhouding MeOH/NO₃-N_{verw} en de recirculatiefactor. De concentratie aan MeOH in het slib/watermengsel is aan een maximum (± 200 mg/l) gebonden vanwege mogelijke toxische effecten. De benodigde verhouding MeOH/NO₃-N_{verw} bedraagt 2,6 kg/kg. De recirculatiefactor is tijdens het onderzoek steeds voldoende hoog gehouden (RF > 10). De minimaal benodigde recirculatiefactor kan met navolgende formule worden berekend:

$$RF = \frac{\sigma_{dnt}}{100 - \sigma_{dnt}}$$

RF	recirculatiefactor	[-]
σ_{dnt}	denitrificatierendement	[%]

6.2.2 Nitrificatie/denitrificatie

Voor de nitrificatie- en denitrificatiecapaciteit voor rejectiewaterbehandeling met de Membraan-bioreactor is met name het gehalte aan droge stof (slibleeftijd) en het zuurstofinbrengvermogen van belang. Het drogestofgehalte voor een full scale installatie is, mede op basis van luchtinbrengvermogen (α -factor), vastgesteld op 20 kg/m^3 . Het zuurstofinbrengvermogen van een full scale Membraan-bioreactor bedraagt minimaal $1 \text{ kg O}_2/\text{m}^3\cdot\text{h}$ (zie paragraaf 6.2.5). Indien de nitrificatiecapaciteit niet wordt beperkt door de slibleeftijd, is deze in dit geval afhankelijk van het zuurstofinbrengvermogen. De denitrificatiecapaciteit is afhankelijk van het drogestofgehalte. Navolgende waarden zijn tijdens het onderzoek gevonden voor de nitrificatie- en denitrificatiecapaciteit:

nitrificatiecapaciteit: $4,4 \text{ kg NKj/m}^3\cdot\text{d}$

denitrificatiecapaciteit: $9,8 \text{ kg NO}_3\text{-N/m}^3\cdot\text{d}$

6.2.3 Verwijderingsrendementen

In tabel 6.1 zijn de gemiddelde verwijderingsrendementen weergegeven zoals deze in het onderzoek zijn gemeten. Het verwijderingsrendement voor N_{tot} is gebaseerd op het denitrificatierendement van duurproef 3.

Tabel 6.1: Verwijderingsrendementen van de Membraan-bioreactor

parameter	verwijderingsrendement [%]
CZV	84,6
BZV	98,4
N_{Kj}	99,8
$\text{NH}_4\text{-N}$	99,8
N-tot	89,0

In tabel 6.2 is op basis van de verwijderingsrendementen de stikstof- en CZV balans opgesteld voor de situatie Sluisjesdijk.

Tabel 6.2: Massabalans Membraan-bioreactor voor de situatie Sluisjesdijk

stroom	N _{kj} kg/d	NO ₃ N kg/d	CZV kg/d
influent	1200	0	600
MeOH dosering	0	0	3680
totaal toevoer	1200	0	4280
spuislib	25 ¹	7	499 ²
effluent	1	180	92
totaal afvoer	26	187	591
verwijdering	1147	987	3689

¹ - 5% N in spuislib

² - 1 kg DS ≈ 1 kg CZV

6.2.4 Slibgroei

Gedurende het gehele onderzoek is regelmatig de groei van het actief slib in relatie tot de belasting van de proefinstallatie bepaald. Aan de hand van deze groei en de CZV- en N_{kj}-belasting kan de netto heterotrofe yield (Y_H , op basis van CZV) en de netto autotrofe yield (Y_A , op basis van N_{kj}) worden berekend. In bijlage 6 zijn de berekeningen van de Y-coëfficiënten als functie van de slibbelasting opgenomen. De relaties tussen yield en de slibbelasting worden door de volgende functies beschreven:

Heterotrofe yield (bereik 0,17 - 0,41 kg CZV/kg DS.d)

$$Y_H = 0,046 + 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot S_{b-CZV}$$

Y_H	heterotrofe yield	[kg DS/kg CZV]
S_{b-CZV}	slibbelasting op basis van CZV	[kg CZV/kg DS.d]

Autotrofe yield (bereik 0,15 - 0,26 kg N_{kj}/kg DS.d)

$$Y_A = 7,95 \cdot 10^{-4} \cdot S_{b-NKj} - 0,101$$

Y_A	autotrofe yield	[kg DS/kg NKj]
S_{b-NKj}	slibbelasting op basis van NKj	[kg NKj/kg DS.d]

6.2.5 Zuurstofoverdracht

Doordat de Membraan-bioreactor onder druk wordt bedreven, is de zuurstofoverdracht aanzienlijk efficiënter dan bij conventionele systemen. Hierdoor is het mogelijk om met een geringere hoeveelheid lucht meer zuurstof in te brengen.

De zuurstofoverdracht wordt als volgt beschreven:

$$OTR = K_L A (20^\circ C) \theta^{T-20} \alpha (C_s^* - C)$$

OTR	oxygen transfer rate	[kg O ₂ /m ³ .h]
K _L A	overdrachtsconstante	[h ⁻¹]
θ	temperatuurcorrectiecoëfficiënt	[-]
T	temperatuur	[°C]
α	correctiefactor K _L a voor vuilwater	[-]
C _s [*]	verzadigingswaarde voor zuurstof	[kg O ₂ /m ³]
C	zuurstofconcentratie	[kg O ₂ /m ³]

Uit bovenstaande formule blijkt dat de zuurstofoverdracht door de volgende factoren kan worden beïnvloed:

- deficiet (C_s^{*}-C);
- α-factor;
- beluchtingssysteem/reactorgeometrie K_LA.

Deficiet

De verzadigingswaarde voor zuurstof (C_s^{*}) is afhankelijk van de druk. De gemiddelde druk in de bioreactor wordt als volgt gedefinieerd:

$$P = P_0 + P_{ext} + \frac{1}{2} \rho_{vl} g H$$

P	gemiddelde druk in de bioreactor	[bar]
P ₀	atmosferische druk	[bar]
P _{ext}	extern opgelegde druk	[bar]
ρ _{vl}	dichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]
g	valversnelling	[m/s ²]
H	waterhoogte	[m]

De gemiddelde oplosbaarheid voor zuurstof bij T = 33°C wordt dan:

$$C_s^* = C_s^{33} \beta \frac{P}{P_0}$$

C _s ³³	zuurstofoplosbaarheid bij 33°C	[kg O ₂ /m ³]
β	correctiefactor O ₂ -oplosbaarheid in water	[-]

Uit het voorgaande blijkt dat C_s ongeveer rechtevenredig toeneemt met de toenemende druk. Tevens is gebleken dat de OTR rechtevenredig afhankelijk is van C_s^{*} en dus rechtevenredig toeneemt bij toenemende druk.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de β-factor voor de behandeling van rejectiewater 0,9 bedraagt. Tevens is vastgesteld dat de theoretische verhoging van C_s met toenemende druk geldig is.

Voor een zo hoog mogelijke zuurstofoverdracht is het tevens van belang om de actuele zuurstofconcentratie (C) zo laag mogelijk te houden in verband met de term (C_s-C). De minimum waarde voor C wordt bepaald door de K_s voor zuurstof voor nitrificerende bacterien. Deze K_s is voor het slib uit de Membraan-bioreactor vastgesteld op 0,49 mg O₂/l [1].

α -factor

De α -factor is een correctiefactor voor de $K_L A$ voor vuil water. Ook het slibgehalte heeft invloed op de $K_L A$. Omdat de Membraan-bioreactor bij een relatief hoog drogestofgehalte wordt bedreven is dit van wezenlijk belang.

In paragraaf 5.4.2 is de bepaling van de α -factor als functie van het slibgehalte weergegeven voor de behandeling van N-rijke retourstromen. De volgende relatie is gevonden:

$$\alpha = 0,885 - 0,019DS$$

$$DS \quad \text{drogestofgehalte} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Hieruit volgt voor een drogestofgehalte van 20 kg/m^3 : α -factor = 0,5.

 $K_L A$

Op grond van de vergelijking voor de zuurstofoverdracht kan een relatie opgesteld worden voor de $K_L A$. Deze relatie luidt:

$$K_L A = \frac{OTR}{(\beta C_s^* - C)\theta^{(T-20)}\alpha}$$

Op basis van de gevonden parameters voor de β - en de α -factor en de heersende procescondities kan de volgende relatie tussen de $K_L A$ en de OTR gedefinieerd worden:

$$\begin{aligned} P_{\text{ext}} &= 3 \text{ bar ato} \\ \alpha &= 0,5 - (D.S. 20 \text{ kg/m}^3) \\ \beta &= 0,9 - \\ T &= 33 \text{ }^\circ\text{C} \\ H &= 15 \text{ m} \end{aligned}$$

$$K_L A = 0,0076 * OTR$$

De $K_L A$ voor luchtinbrengsystemen varieert tussen [6]:

$$0 < K_L A [\text{s}^{-1}] < 0,05$$

Hieruit volgt dat de OTR varieert tussen:

$$0 < OTR [\text{kg O}_2/\text{m}^3.\text{h}] < 2,3$$

Voor het ontwerp van Membraan-bioreactoren wordt uitgegaan van de navolgende waarde voor het zuurstofinbrengvermogen. Gebaseerd op [6] is dit een veilige ontwerpgrondslag.

$$OTR = 1 \text{ kg O}_2/\text{m}^3.\text{h}$$

6.2.6 Chemicaliënverbruik

Het verbruik aan chemicaliën omvat voor de Membraan-bioreactor het verbruik aan methanol en loog. Het methanol- en loogverbruik wordt door een aantal factoren bepaald. De belangrijkste factoren zijn in tabel 6.3 opgenomen.

Tabel 6.3: Factoren die loog- en methanolverbruik beïnvloeden

loogverbruik	methanolverbruik
mate van nitrificatie	mate van denitrificatie
mate van denitrificatie	denitrificatie via nitriet of nitraat
alkaliteit van het afvalwater	bruto yield denitrificeerders
verandering in alkaliteit t.g.v. procescondities (luchtdebiet, druk, pH)	over-/onderdosering van methanol of methanol-opslag als reservestof

Uit tabel 6.3 blijkt dat zowel het methanol- als het loogverbruik wordt bepaald door de mate van denitrificatie.

Methanolverbruik

De mate van denitrificatie is onafhankelijk van de schaal van het proces, wanneer het menggedrag min of meer gelijk blijft. De gegevens uit de proefinstallatie kunnen dus direct vertaald worden naar full-scale toepassingen. In bijlage 8 wordt een berekening gegeven voor het methanolverbruik (op grond van de factoren genoemd in tabel 6.3). Voor het methanolverbruik geldt de volgende algemene formule:

$$\phi_{\text{methanol}} = Q_{\text{infl}} * [N_{\text{Kj}}] * \frac{\sigma}{100} * \left(\frac{\eta_{\text{NO}_2} \rho_{\text{NO}_2}^{\text{tot}} + \eta_{\text{NO}_3} \rho_{\text{NO}_3}^{\text{tot}}}{100} \right) - \delta_{\text{methanol}}$$

ϕ_{methanol}	methanolverbruik	[kg MeOH/h]
$[N_{\text{Kj}}]$	concentratie	[kg N/m ³]
Q_{infl}	afvalwaterdebiet	[m ³ /h]
σ_{dnt}	denitrificatierendement	[%]
η_{NO_2}	percentage nitrietvorming	[%]
η_{NO_3}	percentage nitraatvorming	[%]
ρ^{tot}	C/N-verhouding	[kg MeOH/kg N]
δ	verlies aan koolstofbron	[kg MeOH/h]

Voor de Membraan-bioreactor zijn de volgende parameters gevonden:

$\rho_{\text{NO}_3}^{\text{tot}}$	2,6	kg methanol/kg NO ₃ -N
$\rho_{\text{NO}_2}^{\text{tot}}$	1,8	kg methanol/kg NO ₂ -N
δ	0	kg methanol/uur

Loogverbruik

In tegenstelling tot het verbruik aan methanol is het loogverbruik wel afhankelijk van schaaleffecten, doordat de verandering van alkaliteit onder andere wordt bepaald door het luchtdebiet. In bijlage 7 is nader uitgewerkt hoe het loogverbruik zich verhoudt tot de factoren zoals genoemd in tabel 6.2. Tevens wordt aangetoond dat op grond van een theoretische benadering het loogverbruik voor Membraan-bioreactoren kan worden uitgerekend. Voor de berekening van de benodigde loogconcentratie per m³ afvalwater kan de volgende algemene formule worden toegepast:

$$[OH] = 2[N_{Kj}] \frac{(\eta_{NO_2} + \eta_{NO_3})}{100} - [HCO_3^-]_{inft} - Q_{inft} [N_{Kj}] \frac{(\eta_{NO_2} + \eta_{NO_3})}{100} * \frac{\sigma_{dnt}}{100} +$$

$$+ \frac{Q_{inft} ([HCO_3^-]_{inft} + Q_{inft} [N_{Kj}] \frac{(\eta_{NO_2} + \eta_{NO_3})}{100} * \frac{\sigma_{dnt}}{100}}{\frac{Q_{lucht}}{0.024 * 10^{pH - pK} \frac{10^5}{mRT} (P_{ext} + 0.005H)}} + Q_{inft}$$

[X]	concentratie	[mol/m ³]
Q _{lucht}	luchtdebiet	[Nm ³ /h]
m	verdelingscoëfficiënt	[-]
R	gasconstante	[J/mol.K]
T	temperatuur	[K]
H	waterhoogte	[m]
P _{ext}	extern opgelegde druk	[bar]

Het loogverbruik uitgedrukt in mol OH⁻/h wordt berekend met behulp van de volgende formule.

$$\Phi_{OH} = Q_{inft} * [OH]$$

Φ _{OH}	loogverbruik	[mol OH ⁻ /h]
[OH]	loogconcentratie	[mol OH ⁻ /m ³ _{afv.w.}]

6.2.7 Membraanfiltratie

Het is gebleken dat na een snelle daling van de flux bij het inzetten van nieuwe membranen de membraanflux zich na ongeveer een week stabiliseert. Irreversibele membraanfouling lijkt niet op te treden. Op basis van de duurproeven wordt ingeschat dat bij continue bedrijfsvoering van de membraan-unit maximaal eens in de drie maanden een reiniging met behulp van loog of zuur (afhankelijk van het afvalwater) moet worden uitgevoerd. Daarnaast blijkt dat een drogestofgehalte tot ongeveer 20-22 kg/m³ in de Membraan-bioreactor nauwelijks van invloed is op de membraanflux. Wel is gebleken dat een laag denitrificatierendement (< 30 %) een membraanfluxverlaging tot gevolg heeft. Gedurende het onderzoek is niet onderzocht waardoor de lagere membraanflux bij een laag denitrificatierendement wordt veroorzaakt.

Membraanflux

In navolgende tabel zijn de membraanfluxen voor twee membranen aangegeven voor de bedrijfsvoering met en zonder denitrificatie.

Tabel 6.4: Membraanfluxen door MPL1 en MPL2 membranen

membraan	flux	flux
	[l/m ² .h] $\sigma_{\text{dnt}} < 30\%$	[l/m ² .h] $\sigma_{\text{dnt}} > 30\%$
MPL1	38	72
MPL2	81	116

Energieverbruik van de membraanfiltratie

Tijdens het onderzoek is de drukval over de membranen regelmatig bepaald. De drukval bij de ideale stroomsnelheid is berekend met behulp van de Reynolds-formule en Fanningvergelijking. Voor de drukval over één MPL1 moduul wordt bij een minimale stroomsnelheid van 4,0 m/s (15,6 m³/h) een drukval van 520 mbar berekend. Voor de drukval over één MPL2 moduul wordt bij een minimale stroomsnelheid van 5,0 m/s (13,1 m³/h) een drukval van 580 mbar berekend. Voor de drukval over het verloopstuk en bocht kan daarbij nog 40 mbar worden opgeteld.

Met navolgende vergelijkingen kan de hoeveelheid energie per m³ gefiltreerd afvalwater worden berekend.

$$PV = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_{\text{eff}}}$$

PV	vermogen	[kW]
Q	debiet	[m ³ /h]
Δp	drukval	[bar]
η_{eff}	effectief rendement (70 %)	[-]

en

$$E_{UF} = \frac{PV}{F \cdot A}$$

E_{UF}	energieverbruik voor ultrafiltratie per m ³ afvalwater	[kWh/m ³]
F	membraanflux	[l/m ² .h]
A	membraanoppervlak per module	[m ²]

De resultaten van de berekeningen worden gegeven in tabel 6.5.

Tabel 6.5: Energieverbruik bij membraanfiltratie per m³ gefiltreerd afvalwater

membraan		drukval /moduul [mbar]	debiet [m ³ /h]	membraan- oppervlak [m ²]	flux [l/m ² .h]	energie- verbruik [kWh/m ³ _{afv.w.}]
MPL1	$\sigma > 30\%$	540	15,6	0,54	72	8,9
	$\sigma < 30\%$				38	16,9
MPL2	$\sigma > 30\%$	580	13,1	0,61	116	4,6
	$\sigma < 30\%$				81	6,6

δ = denitrificatierendement

Op basis van de gemiddelde membraanflux en het energieverbruik voor membraanfiltratie per m³ gefiltreerd afvalwater gaat de voorkeur uit naar het MPL2-membraan voor toepassing in een praktijkinstallatie.

De volgende gemiddelde membraanflux wordt aangehouden voor de dimensionering van de filtratie-unit:

$$\text{membraanflux} = 116 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}$$

Uit de ervaring met praktijkinstallaties blijkt voor beide type membranen een levensduur van 3 à 4 jaar.

6.2.8 Warmtebalans

De temperatuur in de Membraan-bioreactor wordt constant gehouden door overtollige warmte af te voeren door koeling van het slib/watermengsel. Vanwege de hoge volumebelasting en de hoge energiedissipatie bij de ultra-filtratie vindt een relatief hoge warmteproductie per volume-eenheid plaats, waardoor bij normale bedrijfsvoering altijd een overschot aan warmte ontstaat. De warmtebalans is opgebouwd uit navolgende componenten:

- E_l energie inhoud van de vloeistofstromen (influent, effluent, spuislib);
- E_g energie inhoud van de gasstromen (lucht, afgas);
- E_p energiedissipatie door pompen (recirculatie, membraanfiltratie);
- E_b reactiewarmte die vrijkomt bij biologische omzettingen (nitrificatie, CZV-oxidatie);
- E_v verdamping;
- E_w warmteverlies door wanden;
- E_k koeling.

In bijlage 11 is de warmtebalans nader uitgewerkt.

In tabel 6.6 is de warmtebalans opgesteld voor de situatie Sluisjesdijk. De gehanteerde uitgangspunten zijn opgenomen in bijlage 11.

Tabel 6.6: Warmtebalans Membraan-bioreactor voor de situatie Sluisjesdijk

energieterm	
E_l - vloeistofstromen	-233 kW
E_g - gasstromen	22 kW
E_p - pompenergie	121 kW
E_b - CZV-oxidatie (incl.den.)	685 kW
E_b - N-oxidatie	360 kW
E_w - wanden	0 kW
E_v - verdamping	-215 kW
E_k - koeling	740 kW

6.3 Technische aspecten en bedrijfsvoeringsaspecten

6.3.1 Technische aspecten

Technische storingen blijken bij een Membraan-bioreactorproefinstallatie weinig op te treden. Dit wordt ook bevestigd door de ervaringen met de full-scale Membraan-bioreactoren. De technische storingen door de lekkage van de pompafdichting en door de beluchting tijdens het proefonderzoek zijn veroorzaakt door de schaal van de pilot plant en zullen bij een full-scale installatie geen problemen veroorzaken.

Het toegepaste type pH-electrode bleek niet onder druk te kunnen werken. Het plaatsen van de pH-electrode in de drukloze effluentleiding bleek een afdoende oplossing. Deze oplossing kan bij full-scale installaties ook worden toegepast. Bij de proefinstallatie bleek de beluchting beperkend voor de belasting. Een niet goed werkend olie-filter en een te korte afstand tussen compressor en beluchtingselement zorgde voor verstopping van de beluchtingsmembranen. Bij full scale installaties zullen deze problemen niet voorkomen. Bij full-scale installaties zal door middel van beluchting minimaal 1 kg O₂/m³.h ingebracht moeten kunnen worden (zie § 6.2.5). Dit blijkt bij full-scale installaties realiseerbaar.

6.3.2 Bedrijfsvoeringsaspecten

De pilot plant-installatie is volledig geautomatiseerd. Het is gebleken dat de installatie zonder toezicht dagenlang volcontinu naar behoren functioneerde. Alarmmeldingen bleven beperkt tot maximaal 1 maal per maand. Ook op basis van full-scale ervaringen is bekend dat toezicht zeer beperkt kan zijn. Circa 1,5 mensdag per week aan toezicht is voldoende om de installatie naar behoren te laten werken. Ammonium-, nitraat- en nitrietgehalten in het effluent kunnen eenvoudig door een on-line meting worden bewaakt. De on-line meting geeft zeer weinig problemen bij het voorgefilterde effluent.

6.4 Dimensioneringsgrondslagen

De dimensioneringsgrondslagen voor de Membraan-bioreactor zijn vastgesteld op basis van de resultaten uit de evaluatie zoals gepresenteerd § 6.2. In navolgend overzicht worden de dimensioneringsgrondslagen samengevat.

Influentbehandeling

- mechanisch zelfspoelend filter (zeef):

maaswijdte	1 mm
oppervlaktebelasting	50 m/h

Bioreactor

- druk 3 bar ato
- temperatuur 33 °C
- pH 6,8 -
- stikstofbelasting 4,4 kg N/m³.d
- NO₃-N verwijderingscapaciteit 9,8 kg NO₃-N/m³.d
- drogestofgehalte 20 kg/m³

Beluchting

- α -factor 0,5 -
- β -factor 0,9 -
- zuurstofinbrengvermogen 1 kg O₂/m³.h

Chemicaliënverbruik

- loog zie § 6.2.6
- methanol 2,6 kg MeOH/kg NO₃-N_{verw}

Membraanfiltratie

- nominale membraanflux 116 l/m².h
- energieverbruik 4,6 kWh/m³_{afv.w}

Verwijderingsrendementen

- CZV 84,6 %
- BZV 98,4 %
- N_{Kj} 99,8 %
- N-tot 85,0 %

De dimensioneringsgrondslagen zijn met inachtneming van voldoende veiligheid gekozen. Voor het ontwerp van de membraanfiltratie-unit kan worden opgemerkt dat voor de kostenberekening uitgegaan wordt van ongeveer 20 % overcapaciteit in verband met de mogelijkheid om 1 à 2 straten uit bedrijf te nemen voor onderhoud.

6.5 Gevoeligheidsanalyse

6.5.1 Algemeen

Voor een aantal parameters is de gevoeligheid onderzocht voor de exploitatiekosten van de Membraan-bioreactor. De gevoeligheidsanalyse is gebaseerd op de situatie voor een full scale Membraan-bioreactor voor het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. Hierbij is van de volgende basis uitgegaan, waarbij de exploitatiekosten op 100 % zijn gesteld:

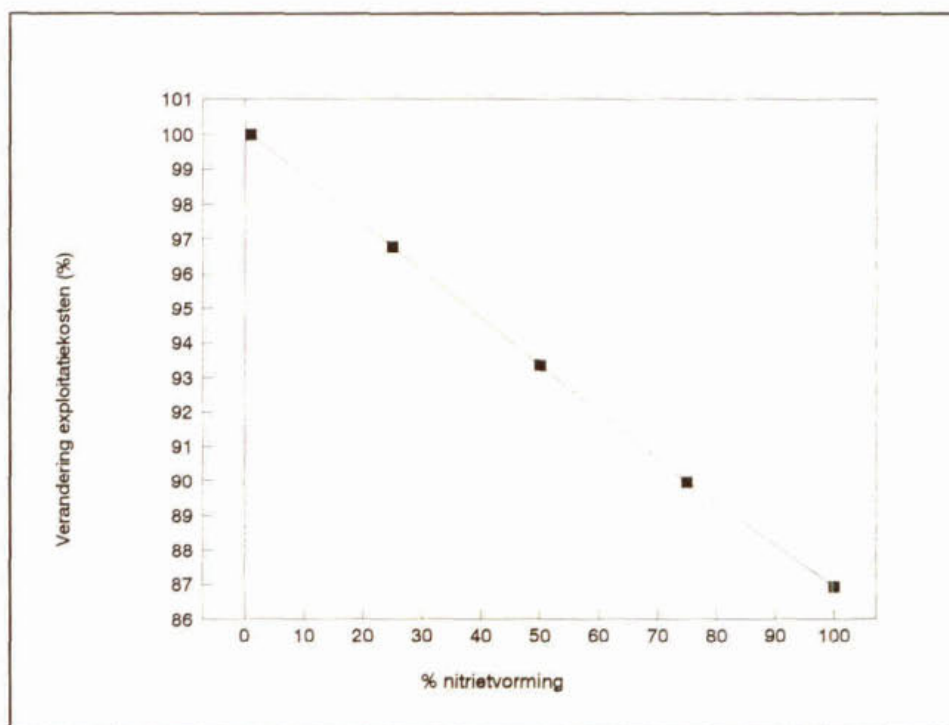
- nitrificatie volledig tot nitraat;
- denitrificatiegraad 85 %;
- proces pH = 6,8;
- loogprijs (33%) = f 270,-/ton;
- methanolprijs = f 650,-/ton.

Onderzocht is de gevoeligheid van de exploitatiekosten voor de nitriet- of de nitraatroute, de denitrificatiegraad, de methanolprijs en de pH in de bioreactor.

Bij de bepaling van de kosten is rekening gehouden met afschrijving van extra investeringen, chemicaliënverbruik, extra onderhoud (vervanging van membranen) en energieverbruik.

6.5.2 Nitriet-/nitraatroute

Tijdens de derde duurproef is geconstateerd dat het nitrificatie/denitrificatieproces deels via nitriet is gaan verlopen. Bekend is dat de route via nitriet een besparing oplevert voor methanol en zuurstof. De relatieve verandering in exploitatiekosten van (gedeeltelijke) nitrificatie/denitrificatie volgens de zogenaamde nitrietroute is in figuur 6.1 weergegeven.



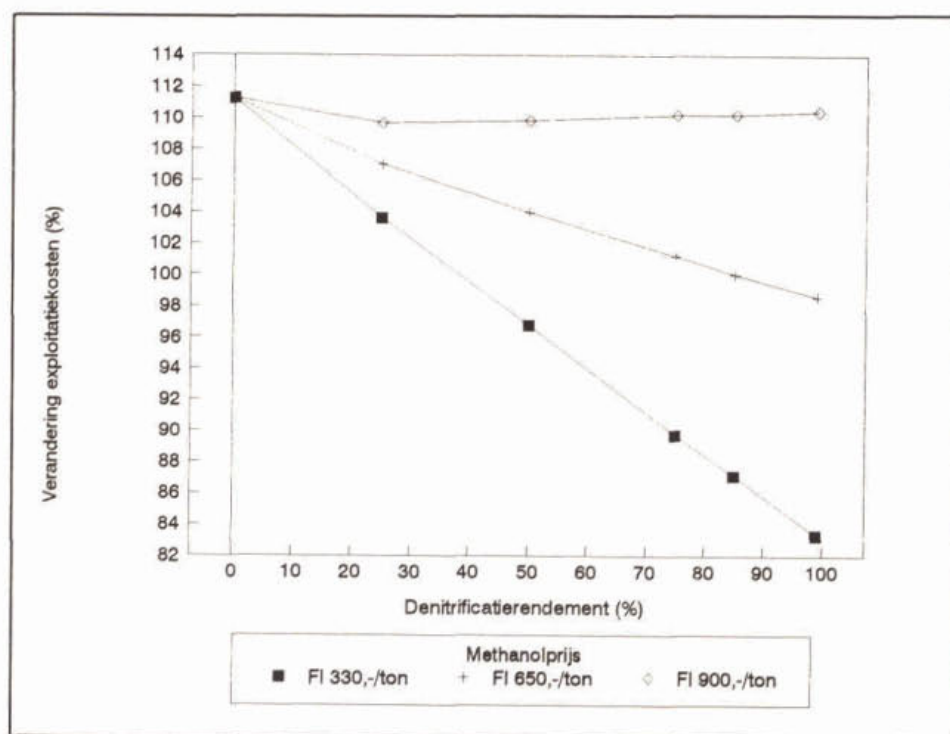
Figuur 6.1: Verandering van de totale exploitatiekosten als functie van de nitrietvorming

Uit figuur 6.1 blijkt dat de exploitatiekosten ongeveer met 13 % dalen wanneer de nitrificatie volledig via nitriet verloopt.

6.5.3 Mate van denitrificatie

De mate van denitrificatie heeft een direct effect op de exploitatiekosten. Indien geen denitrificatie door middel van additionele koolstofdosering plaatsvindt, is het loogverbruik maximaal en het methanolverbruik uiteraard nul. Tevens heeft een lage denitrificatiegraad een lagere membraanflux tot gevolg. Als koolstofbron is gekozen voor methanol, op dit moment de goedkoopste koolstofbron. De methanolprijs is sterk aan wisselingen onderhevig en is van grote invloed op de exploitatiekosten. In figuur 6.2 is voor verschillende methanolprijzen de verandering van exploitatiekosten uitgezet tegen de denitrificatiegraad. Hierbij is gebruik gemaakt van drie kostenniveau's voor methanol:

- minimum prijs f 330,-/ton MeOH;
- actuele prijs f 650,-/ton MeOH;
- maximale prijs f 900,-/ton MeOH.

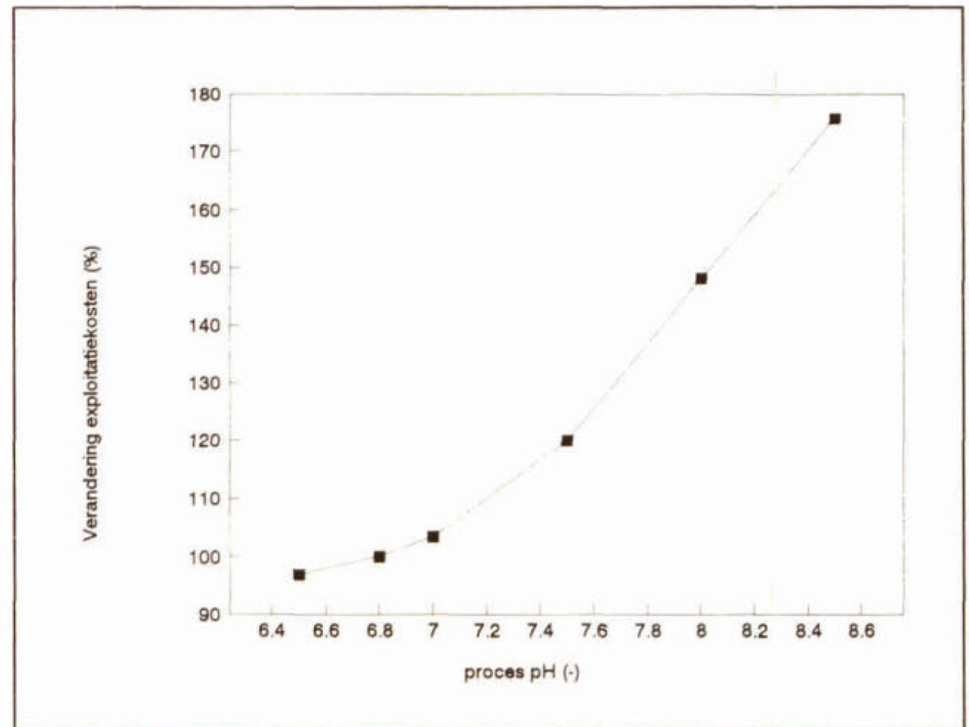


Figuur 6.2 Verandering van de totale exploitatiekosten als functie van de denitrificatiegraad bij verschillende methanolprijzen

De methanolprijs heeft een zeer sterke invloed op de exploitatielast. Bij methanolprijzen lager dan f 900,-/ton is het voordelig om vergaand te denitrificeren.

6.5.4 pH

De pH in het systeem heeft effect op de mate van CO₂-stripping in de beluchte bioreactor. Bij pH-verandering verandert de alkaliteit en daarmee het loogverbruik. In figuur 6.3 staat de pH uitgezet tegen de verandering in de exploitatiekosten. Het blijkt dat de pH-verandering in de bioreactor een sterke invloed heeft op de exploitatiekosten en dat het voordelig is om bij een zo laag mogelijke pH te werken.



Figuur 6.3: Verandering van de totale exploitatiekosten als functie van de proces-pH

6.6 Algemene toepasbaarheid van het systeem

Op basis van de resultaten van het onderzoek kan worden gesteld dat behandeling van rejectiewater in het onderzochte gebied onafhankelijk is van de stikstofconcentratie. Omdat de reactor ontworpen wordt op een N-belasting, is het $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijderingsrendement bij eenzelfde N-belasting onafhankelijk van de stikstofconcentratie. De membraanunit wordt op debiet gedimensioneerd en moet dus voor elk debiet afzonderlijk worden vastgesteld.

7 Kosten

7.1 Varianten

In het kader van dit onderzoek zijn zeven varianten voor rejectiewaterbehandeling doorgerekend. Drie concentratieniveau's van rejectiewater voor een rwzi van 100.000 v.e., drie concentratieniveau's van rejectiewater voor een rwzi van 400.000 v.e. en de situatie Sluisjesdijk. In tabel 7.1 staan de uitgangspunten van deze varianten weergegeven.

Tabel 7.1 Varianten voor de rejectiewaterbehandeling

Varianten →		1	2	3	4	5	6	7
								Sluisjesdijk
vuilvracht	[v.e.]	100.000	100.000	100.000	400.000	400.000	400.000	500.000
debiet	[m ³ /d]	50	100	200	200	400	800	600
NKj	[kg/d]	95	95	95	380	380	380	1.200
	[mg/l]	1.900	950	475	1.900	950	475	2.000
CZV	[mg/l]	900	900	900	900	900	900	900
zwevende stoffen	[mg/l]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
alkaliteit	[mmol/l]	136	686	34	136	68	34	143
pH (influent)	[-]	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2

7.2 Dimensionering

De verschillende varianten zijn gedimensioneerd op basis van de in § 6.5 gepresenteerde dimensionering voor de Membraan-bioreactoren. De hoofddimensies van de verschillende varianten zijn in bijlage 12 weergegeven.

In tabel 7.2 staat het benodigde oppervlak per variant weergegeven (incl. gebouw, buffertank, reactoren en chemicaliënopslag):

Tabel 7.2 Oppervlaktebeslag van Membraan-bioreactoren voor de verschillende varianten

Varianten →		1	2	3	4	5	6	7
								Sluisjesdijk
tankfundering	[m ²]	50	50	50	70	70	70	110
chemicaliënopsl.	[m ²]	50	50	50	60	60	60	60
gebouw	[m ²]	70	70	70	90	90	90	120
totaal	[m²]	170	170	170	220	220	220	290

7.3 Stichtingskosten

Op grond van de dimensionering van de diverse varianten zijn de stichtingskosten berekend. De stichtingskosten zijn als volgt opgebouwd:

Bouwsom

De bouwsom inclusief de onvolledigheidstoeslag wordt bepaald op basis van bij Grontmij gehanteerde kentallen en eenheidsprijzen en opgaven van leveranciers.

Bijkomende kosten

Onder de bijkomende kosten vallen onder andere kosten van verzekeringen, heffingen, vergunningen, uitbreiding van nutsvoorzieningen, grondonderzoek en leges. Deze kosten worden op 10 % van de aanneemsom plus de onvolledigheidstoeslag gesteld.

Onvoorzien

De post onvoorzien wordt gesteld op 10 % en wordt gerekend over het totaal van de bovengenoemde posten.

Advieskosten

De advieskosten worden gesteld op 10 % en worden gerekend over het totaal van bovengenoemde posten.

BTW

Alle genoemde kosten zijn inclusief 17,5 % BTW.

De stichtingskosten voor de diverse varianten staan in bijlage 13 nader uitgewerkt. In tabel 7.3 staan de totale stichtingskosten per variant vermeld.

Tabel 7.3 Stichtingskosten per variant

Variant	vuilvracht [v.e.]	NKj [mg/l]	debiet [m ³ /d]	stichtingskosten [Hfl]
1	100.000	1.900	50	3.060.000,-
2	100.000	950	100	3.600.000,-
3	100.000	475	200	4.520.000,-
4	400.000	1.900	200	5.490.000,-
5	400.000	950	400	6.770.000,-
6	400.000	475	800	8.070.000,-
7 (Sluisjesdijk)	500.000	2.000	600	8.490.000,-

7.4 Exploitatiekosten

De jaarlijkse lasten per variant betreffen de exploitatiekosten voor het behandelen van het afvalwater. Voor het berekenen van de jaarlijkse lasten is uitgegaan van het prijspeil van januari 1995. De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

Afschrijvingstermijn

Voor de afschrijvingstermijn van civieltechnische werken wordt een periode van 30 jaar aangehouden. Voor mechanische en elektrotechnische werken wordt een periode van 15 jaar aangehouden.

Kapitaallasten

De kapitaallasten worden berekend met behulp van de annuïteitenmethode. Als rentepercentage wordt 8% aangehouden. De kapitaallasten worden berekend over de stichtingskosten.

Onderhoudskosten

De onderhoudskosten voor civieltechnische werken worden gesteld op 0,5 % per jaar. De onderhoudskosten voor mechanisch en electrotechnische werken worden gesteld op 3% per jaar. De percentages worden berekend over de stichtingskosten inclusief BTW.

Energiekosten

De energiekosten worden op f 0,15 kWh (inclusief BTW) gesteld.

Chemicaliën

Voor het verbruik van natronloog (33% w/w) wordt uitgegaan van f 270,- per ton (inclusief BTW) en voor het verbruik van methanol (100% w%) wordt uitgegaan van f 650,- per ton (inclusief BTW).

Membraanvervanging

Bij de kosten voor membraanvervanging wordt uitgegaan van f 800,-/m² en een standtijd van 2 jaar.

Bediening

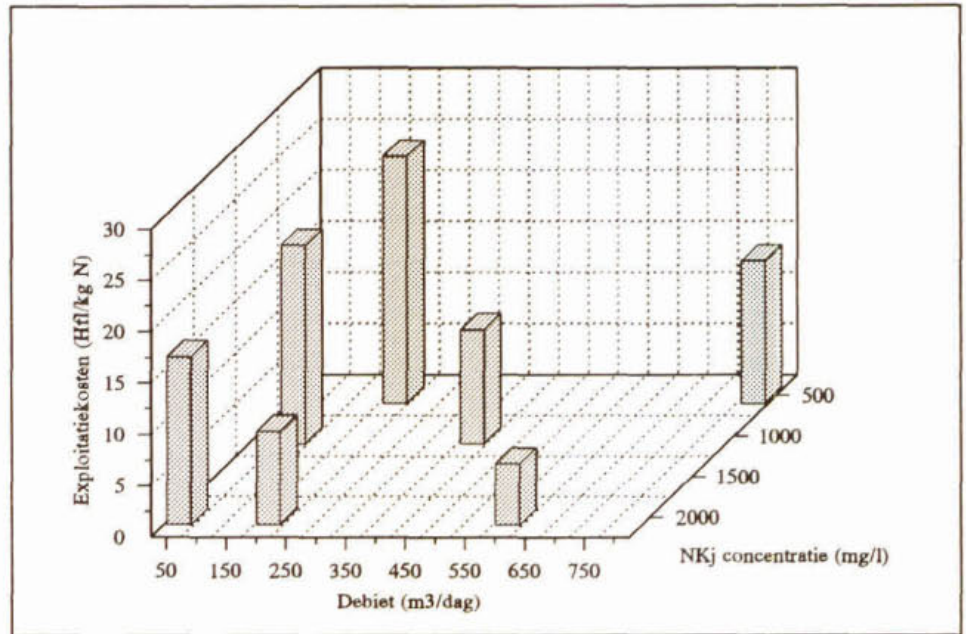
Voor bediening wordt uitgegaan van personeelslasten van f 80.000,- per jaar en een bezetting van 0,5 manjaar.

De exploitatiekosten voor de diverse varianten staan in bijlage 14 nader uitgewerkt. In tabel 7.4 staan de exploitatiekosten per variant vermeld.

Tabel 7.4 Exploitatiekosten per variant

Variant	vuilvracht [v.e.]	NKj [mg/l]	debiet [m ³ /d]	exploitatie [Hfl/jaar]	exploitatie [Hfl/kg N]
1	100.000	1.900	50	580.000,-	16,70
2	100.000	950	100	690.000,-	19,80
3	100.000	475	200	860.000,-	24,70
4	400.000	1.900	200	1.280.000,-	9,20
5	400.000	950	400	1.570.000,-	11,30
6	400.000	475	800	1.970.000,-	14,20
7 (Sluisjesdijk)	500.000	2.000	600	2.680.000,-	6,10

In figuur 7.1 staan de exploitatielasten per kg N_{Kj} -verwijderd als functie van het debiet en de N-concentratie weergegeven.



Figuur 7.1: De exploitatielasten per kg N_{Kj} -verwijderd als functie van het rejectiewaterdebiet en N_{Kj} -concentratie

Uit figuur 7.1 blijkt dat exploitatiekosten voor de membraanbioreactor afnemen met toenemende vracht en toenemende concentratie.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Algemeen

- De Membraan-bioreactor blijkt een geschikt systeem in technisch en technologisch opzicht voor de behandeling van rejectiewater. De installatie is zeer compact als gevolg van hoge volumetrische biologische omzettingen en een efficiënte zuurstofoverdracht. De Membraan-bioreactor kan een factor 20 kleiner gebouwd worden dan conventionele biologische zuiveringen voor stikstofverwijdering.

Dimensioneringsgrondslagen

- Tijdens het onderzoek hebben zich relatief weinig storingen voorgedaan. Deze konden gedurende het onderzoek alle afdoende worden opgelost en hingen voornamelijk samen met de schaal van het pilot experiment. Er worden geen belemmeringen voorzien voor full scale toepassingen.
- De stikstofbelasting van de Membraanbioreactor is vastgesteld op 4,4 kg N/m³.d voor de nitrificatie. Door een verdergaande verbetering van de zuurstofoverdracht kan de stikstofbelasting nog verder worden opgevoerd. De stikstofbelasting voor de denitrificatie is vastgesteld op 9,8 kg N/m³.d.
- De keuze van de juiste membranen is van belang voor de minimalisering van de kosten voor energieverbruik. Over de proefperiode blijkt membraanfouling bij biomassa-afscheiding geen probleem. Reiniging van de membranen is nauwelijks noodzakelijk om een gemiddelde membraanflux van 116 l/m².h te handhaven.

Proces

- Het loogverbruik wordt sterk beïnvloed door de denitrificatiegraad, de lucht/waterverhouding (schaaleffect) en de proces-pH.
- Bij de huidige prijzen voor loog en methanol is het het voordeligst om bij de behandeling van rejectiewater in de Membraan-bioreactor zo ver mogelijk te denitrificeren, boven het gebruik van eventuele denitrificatiecapaciteit in de rwzi.
- De kostenpost voor loogverbruik kan een relatief groot aandeel vormen van de exploitatiekosten. Om deze kostenpost te minimaliseren, is het van belang om bij een zo laag mogelijke pH te werken (pH = 6,8).

- Voor de situatie Sluisjesdijk zijn de volgende kosten vastgesteld voor de behandeling van rejectiewater met de Membraan-bioreactor:
 - stichtingskosten: f 8.490.000,-
 - exploitatie kosten: f 2.680.000,- /jaar
 - kosten per kg N_{verwijderd} f 6,10

Voor de diverse varianten worden de exploitatiekosten in tabel 8.1 opgenomen.

- De Membraan-bioreactor wordt qua kosten voordeliger naarmate de stikstofvrachten en stikstofconcentraties toenemen.
- Een besparing van ongeveer 13 % op de exploitatiekosten kan worden bereikt door het nitrificatie/denitrificatieproces volgens de zogenaamde nitrietroute te laten verlopen.

Tabel 8.1 Exploitatiekosten per variant

Variant	vuilvracht [v.e.]	NK _j [mg/l]	debiet [m ³ /d]	exploitatie [Hfl/jaar]	exploitatie [Hfl/kg N]
1	100.000	1.900	50	580.000,-	16,70
2	100.000	950	100	690.000,-	19,80
3	100.000	475	200	860.000,-	24,70
4	400.000	1.900	200	1.280.000,-	9,20
5	400.000	950	400	1.570.000,-	11,30
6	400.000	475	800	1.970.000,-	14,20

8.2 Aanbevelingen

- Nader onderzoek naar de Membraan-bioreactor zal zich moeten richten op:
 - Minimalisatie van het energieverbruik voor de membraanfiltratietechnologie.
 - Nitrificatie en denitrificatie via de zogenaamde nitrietroute.

Literatuurlijst

- [1] Brouwer, M.W.J. (1994). *Flankerend onderzoek Stikstofverwijdering Sluisjesdijk*. In voorbereiding.
- [2] Dijk, L. van en G.C.G. Roncken (1994). *Membraan bioreactor wordt volwassen*. Milieumarkt, september 1994, p 38 - 39.
- [3] Dijk, L. van en G.C.G. Roncken (1994), *Combinatie van biologische afvalwaterzuivering en membraantechnologie*. H₂O, (27), p 41 - 48.
- [4] Eikelboom, D.H. et al. (1993). *High performance bioreator: a physiological approach to wastewater treatment with zero sludge production by complete retention*. Japan-Netherlands Workshop on integrated water management, Miyazaki Japan, october 1993.
- [5] Harada, H. et al. *Application of anaerobic-UF-membrane reactor for treatment of a wastewater containing high strength particulate organics*. Water Science and Technology.
- [6] Heijnen J.J, et al. *Mass Transfer, Mixing and heat transfer Phenomena in Low Viscosity Bubble Column Reactors*. The chemical engineering journal, vol 28, 1984, p B21-B42
- [7] Grontmij Advies & Techniek bv (1994). *Interne stikstofverwijdering op rwzi's, gedetailleerd onderzoeksprogramma*. Grontmij Advies & Techniek bv, De Bilt, januari 1994.
- [8] RWZI 2000 (1991). *Perspectives for the utilization of membrane-assisted sludge retention in municipal waste water treatment plants*. rwzi 2000 91-03.
- [9] Rautenbach, R.(1992). *Membranverfahren. Vorlesung an die Rheinisch Westfälische Hochschule Aachen*.
- [10] Rautenbach, R. et al (1994). *Ammoniakrecycling aus dem Prozeßwasser der Schlammwässerung*. Korrespondenz Abwasser 4-94, p576 -584.
- [11] RWZI 2000 (1992). *Stikstofverwijdering uit interne stromen op rwzi's*. rwzi 2000 92-09.
- [12] Wagner, F und H. Wienands (1992). *Biologie und Membrantechnik zur Abwasserreinigung*. Wasser Abwasser Praxis, 2/92.
- [13] *Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen. Evaluatie van Nederlandse praktijkonderzoeken*. STOWA-rapport 95-08.

Lijst van gebruikte symbolen

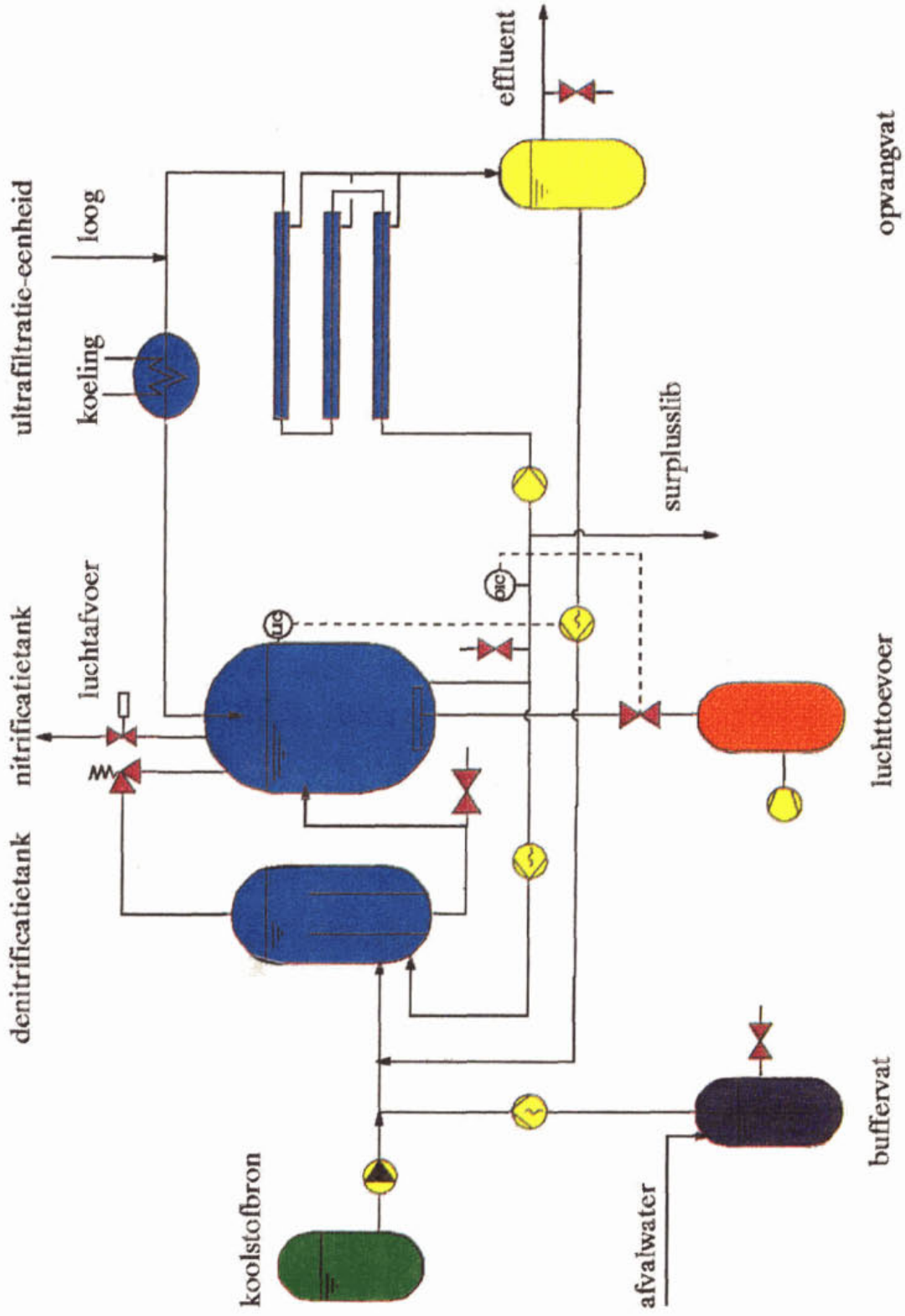
A	membraanoppervlak per module	m^2
A_w	warmte-overdragend oppervlak	m^2
c	soortelijke warmte	J/kg.K
C	zuurstofconcentratie	$kg\ O_2/m^3$
C_s^*	verzadigingswaarde voor zuurstof	$kg\ O_2/m^3$
C_s^{33}	zuurstofoplosbaarheid bij 33°C	$kg\ O_2/m^3$
DS	drogestofgehalte	kg/m^3
E_b	biologische warmteproductie	J/s
E_{CZV}	biologische warmteproductie CZV-oxidatie	J/kg CZV
E_g	energie-inhoud van de gasstromen	J/s
E_k	koeling	J/s
E_l	energie-inhoud van de vloeistofstromen	J/s
E_{NKj}	biologische warmteproductie N-oxidatie	J/kg N
E_p	energiedissipatie door pompen	J/s
E_v	verdamping	J/s
E_w	warmteverlies door wanden	J/s
E_{UF}	energieverbruik voor ultrafiltratie per m^3 afvalwater	kWh/m^3
F	membraanflux	$l/m^2.h$
g	valversnelling	m/s^2
H	waterhoogte	m
K_fA	overdrachtsconstante	h^{-1}
LV	loogverbruik	mol OH ⁻ /kg N
m	verdelingcoëfficiënt CO ₂ lucht/water	1,4 -
M	massa	kg
OTR	oxygen transfer rate	$kg\ O_2/m^3.h$
p_w	H ₂ O concentratie in lucht	kg/m^3
p_{w-ver}	verzadigingswaarde H ₂ O in lucht	kg/m^3
P	gemiddelde druk in de bioreactor	bar
P_{ext}	extern opgelegde druk	bar
P_O	atmosferische druk	bar
PV	vermogen	kW
Q	debiet	m^3/h
Q_{inf}	afvalwaterdebiet	m^3/h
Q_{lucht}	luchtdebiet	m^3/h
R	gasconstante	8,314 J/mol.K
RF	recirculatiefactor	-
S_{b-CZV}	slibbelasting op basis van CZV	kg CZV/kg DS.d
S_{b-NKj}	slibbelasting op basis van NKj	kg NKj/kg DS.d
T	temperatuur	°C
T	temperatuur	K
U	warmte-overdrachtscoëfficiënt	$W/m^2.K$
V_{aer}	aëroob reactorvolume	m^3
V_{tot}	totaal reactorvolume	m^3
Y_A	autotrofe yield	kg DS/kg NKj
Y_H	heterotrofe yield	kg DS/kg CZV
X_{CO_2}	molfractie CO ₂	-
[X]	concentratie	kg/m^3
[X]	concentratie	mol/m^3

α	correctiefactor K_pA voor vuil water	-
β	correctiefactor O_2 -oplosbaarheid in water	-
ΔH_v	verdampingsenthalpie water	J/kg
Δp	drukval	bar
ΔT	temperatuurverschil	K
δ	verlies aan koolstofbron	kg MeOH/h
η_{eff}	effectief rendement	%
η_{NO_2}	percentage nitrietvorming	%
η_{NO_3}	percentage nitraatvorming	%
θ	temperatuur correctiecoëfficiënt	1,024 -
ρ^{tot}	C/N-verhouding	kg MeOH/kg N
ρ_{vl}	dichtheid van de vloeistof	kg/m ³
σ_{dnt}	denitrificatierendement	%
ϕ_{methanol}	methanolverbruik	kg MeOH/h
ϕ_{OH}	loogverbruik	mol OH ⁻ /h

Lijst van gebruikte afkortingen

ato	atmosferische overdruk
AWF	afvalwaterflux
BTW	bruto toegevoegde waarde
BZV	biologisch zuurstof verbruik
CO ₂	kooldioxide
CZV	chemisch zuurstof verbruik
H ₂ O	water
IAWQ	International Association on Water Quality
MeOH	methanol
N	stikstof
NH ₄ -N	ammoniumstikstof
NKj	Kjeldahl stikstof
NO ₂ -N	nitrietstikstof
NO ₃ -N	nitraatstikstof
O ₂	zuurstof
P	fosfor
PAK	polycyclische aromatische koolwaterstoffen
PC	personal computer
PFD	proces flow diagram
rwzi	rioolwaterzuiveringsinrichting
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
SWF	schoonwaterflux
TU	Technische Universiteit
v.e.	vervuilingseenheden
Y	yield
ZHEW	Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden

Bijlagen

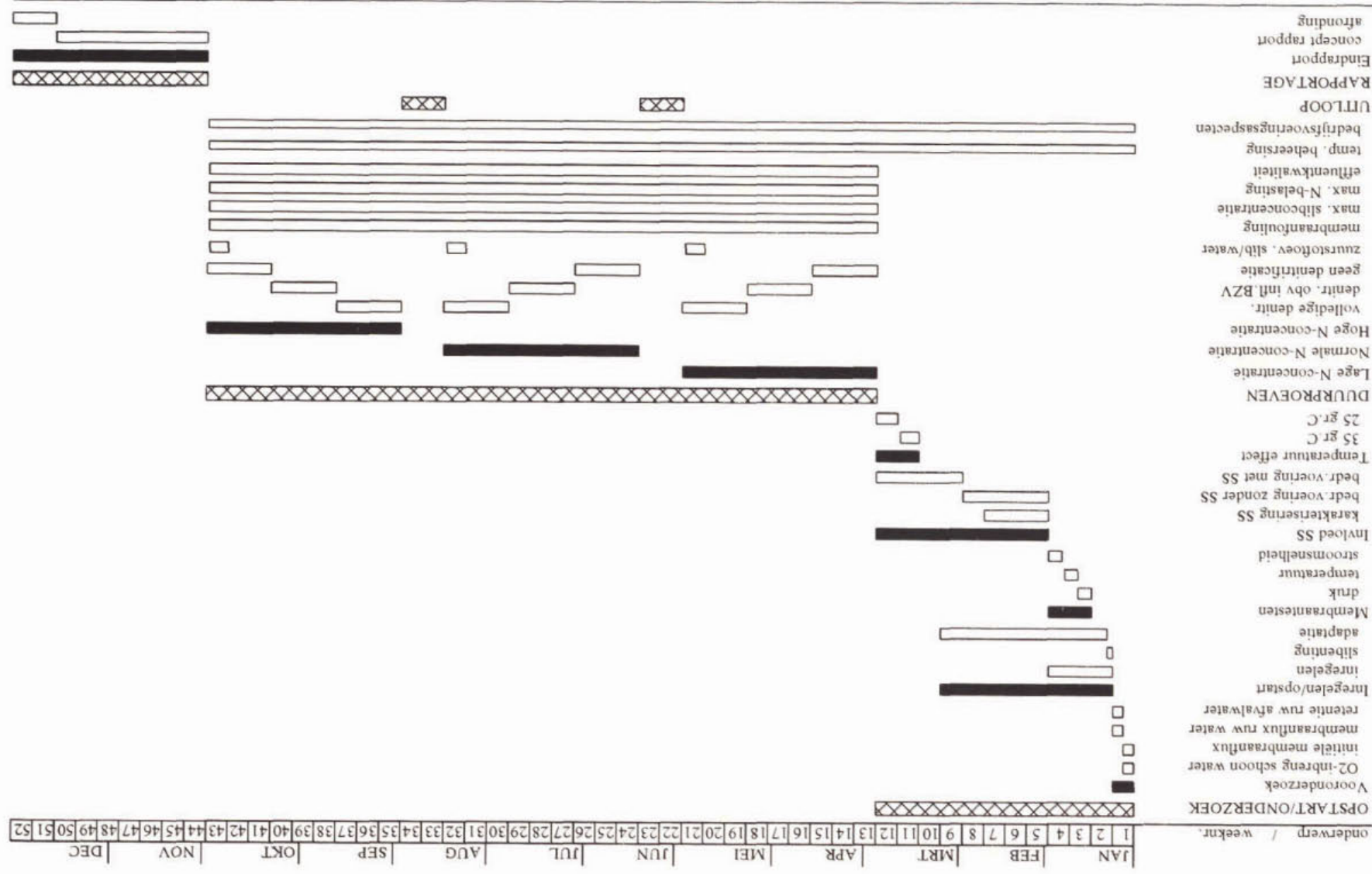


Bijlage 2

Referenties Membraan- bioreactoren

Jaar	Project	Capaciteit
1990	Merckle GmbH, Ulm, pharmaceutische industrie	550 m ³ /j
1990	SBW Sonderabfallbeseitigungsgesellschaft Württemberg, Fellbach Schmiden, percolatiewater	27.000 m ³ /j
1990	Thor Chemie GmbH, Speyer, chemieafvalwater	45.000 m ³ /j
1991	Zweckverband Abfallbeseitigung Kahlenberg, Emmendingen, percolatiewater	45.000 m ³ /j
1992	Abfallensorgungsgesellschaft Ruhrgebiet, Essen, percolatiewater	36.000 m ³ /j
1992	Abfallwirtschaft Kreis und Stadt Aachen, Aachen, percolatiewater	65.000 m ³ /j
1992	Entsorgungs-Gesellschaft Dortmund, Dortmund, percolatiewater	60.000 m ³ /j
1992	Mercedes Benz AG, Sindelfingen, industrieel afvalwater	8.800 m ³ /j
1993	Kreisverwaltung Fulda, Fulda, percolatiewater	37.200 m ³ /j
1993	Werra-Meißner-Kreis, Eschwege, percolatiewater	20.000 m ³ /j
1993	Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet, Essen percolatiewater	88.000 m ³ /j
1993	Bayer-Leder GmbH, Neutraubling, leerlooierij- afvalwater	250.000 m ³ /j
1993	Kreisverwaltung Germersheim, Germersheim, percolatiewater	14.600 m ³ /j
1993	Kölsch GmbH, Siegen, vloeibaar chemisch afval	17.600 m ³ /j
1994	Abfallwirtschaftsgesellschaft des Rems-Murr-Kreises, Waiblingen, percolatiewater	100.000 m ³ /j
1994	Bundesbaudirektion/Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Berlin, Laboratoriumafvalwater	1.800 m ³ /j

Jaar	Project	Capaciteit
1994	Abfallwirtschaftsgesellschaft Warendorg, percolatiewater	73.000 m ³ /j
1994	Gesellschaft für Abfallwirtschaft Lüneburg mbH, percolatiewater	27.000 m ³ /j
1994	Rudolf Ernst GmbH, Gunzenhausen, percolatiewater	15.000 m ³ /j



Bijlage 4

Analyseschema van het onderzoek

De volgende analyses zijn 3 x per week verricht:

	Influent	Proces	Effluent
CZV	x		x
BZV	x		x
N _{kj}	x		x
NH ₄ -N	x		x
NO ₂ -N			x
NO ₃ -N			x
P _{tot}	x		x
Zwevend stof	x		x
alkaliteit	x		
drogestofgehalte		x	
organische stofgehalte		x	
pH	x		x
methanol		x	

De bemonstering van het afvalwater vindt plaats door middel van volumeproportionele monsternameapparatuur.

De volgende analyses zijn dagelijks verricht. De bemonstering vindt plaats door middel van steekmonsters, de analyses door middel van een sneltest of directe aflezing.

	Denitrificatietank	Nitrificatietank
NH ₄ -N	x	x
NO ₂ -N	x	x
NO ₃ -N	x	x
pH	x	x

Bijlage 5

Analyseresultaten van de duurproeven

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u u r p r o e f 1 (verdund afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	*** RUW INFLUENT ***							*** INFLUENT VERHOUDINGEN ***				
		CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4 mg/l	NPtot mg/l	SS mg/l	alkal mg/l	pH	BZV/CZV ruw	CZV/N-KJ ruw	BZV/CZV gefiltr.	CZV/N-KJ gefiltr.
01-Apr-94	68												
02-Apr-94	69												
03-Apr-94	70												
04-Apr-94	71												
05-Apr-94	72												
06-Apr-94	73	785	220	705	657	30	52	1697	7.9	0.28	1.11	0.23	0.76
07-Apr-94	74												
08-Apr-94	75												
09-Apr-94	76												
10-Apr-94	77												
11-Apr-94	78	1040	230	850	776	35	43	2202	7.9	0.22	1.22	0.44	0.85
12-Apr-94	79												
13-Apr-94	80	1130	320	1180	1051	32	287	3545	8.5	0.28	0.96	0.24	1.05
14-Apr-94	81												
15-Apr-94	82	1100	290	760	696	38	377	2653	8.5	0.26	1.45	0.22	0.89
16-Apr-94	83												
17-Apr-94	84												
18-Apr-94	85	1500	690	740	658	40	130	2472	7.7	0.46	2.03	0.17	1.41
19-Apr-94	86												
20-Apr-94	87	1020	280	1090	952	32	163	3760	8.4	0.27	0.94	0.24	1.21
21-Apr-94	88												
22-Apr-94	89	930	235	1105	1028	28	83	4140	8.4	0.25	0.84	0.24	0.95
23-Apr-94	90												
24-Apr-94	91												
25-Apr-94	92	1320	355	1235	1134	33	217	4220	8.5	0.27	1.07	0.24	0.92
26-Apr-94	93												
27-Apr-94	94	1420	330	1170	1046	47	209	4290	8.4	0.23	1.21	0.25	0.94
28-Apr-94	95												
29-Apr-94	96	1170	300	1035	928	36	257	3890	8.6	0.26	1.13	0.26	0.93
30-Apr-94	97												
01-May-94	98												
02-May-94	99	1510	400	1070	957	40	222	2310	8.4	0.26	1.41	0.23	1.22
03-May-94	100												
04-May-94	101	1200	395	910	787	30	379	2780	8.7	0.33	1.32	0.27	1.04
05-May-94	102												
06-May-94	103												
07-May-94	104												
08-May-94	105												
09-May-94	106	875	235	740	703	25	147	2280	8.6	0.27	1.18	0.21	1.01
10-May-94	107												
11-May-94	108	1040	245	880	838	28	317	2800	8.2	0.24	1.18	0.20	1.06
12-May-94	109												
13-May-94	110	1020	245	1045	951	22	193	3880	8.3	0.24	0.98	0.18	2.37
14-May-94	111												
15-May-94	112												
16-May-94	113	1080	240	880	816	33	265	2210	8.6	0.22	1.23	0.26	1.17
17-May-94	114												
18-May-94	115	1440	295	1075	973	30	3240	3680	8.2	0.20	1.34	0.22	1.15
19-May-94	116												
20-May-94	117				814			3350				0.25	1.17
21-May-94	118												
22-May-94	119												
23-May-94	120												
24-May-94	121												
25-May-94	122				676			2260				0.18	6.12
26-May-94	123												
27-May-94	124												
28-May-94	125												
29-May-94	126												
30-May-94	127				757			1940				0.20	1.03
31-May-94	128												
01-Jun-94	129				950			4520				0.17	1.80
02-Jun-94	130												
03-Jun-94	131				301			2460				0.22	1.01

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u r p r o e f 1 (verdund afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	*** GEFILTREERD INFLUENT ***									*** AKTIEFSLIB ***			
		debiet l/h	CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4N mg/l	NO3N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal. mg/l	pH	DS mg/l	gloeir. %	oDS mg/l
01-Apr-94	68	81					850							
02-Apr-94	69													
03-Apr-94	70	126					512							
04-Apr-94	71	134					540							
05-Apr-94	72	124					521							
06-Apr-94	73	128	494	116	651	598	376	19	32	1918	8.3	6430	24	4887
07-Apr-94	74	116				553								
08-Apr-94	75	138				579								
09-Apr-94	76	127												
10-Apr-94	77	94												
11-Apr-94	78	122	514	225	602	577	513	17	11	2389	8.3	6580	29	4672
12-Apr-94	79	76				964								
13-Apr-94	80	85	574	135	549	497	541	21	77	3229	8.3	4780	26	3537
14-Apr-94	81	89				718								
15-Apr-94	82	110	492	110	549	488	501	18	53	3599	8.3	5340	30	3738
16-Apr-94	83													
17-Apr-94	84	85												
18-Apr-94	85	104	281	47	199	185	1057	26	19	3799	8.3	3880	32	2638
19-Apr-94	86	97												
20-Apr-94	87	104	375	89	310	303	713	23	19	3665	8.3	4240	32	2883
21-Apr-94	88	116												
22-Apr-94	89	119	461	112	487	452	540	20	10	3817	8.2	4340	31	2995
23-Apr-94	90	109				612								
24-Apr-94	91	102				664								
25-Apr-94	92	108	568	136	620	574	507	16	24	3803	8.3	4980	29	3536
26-Apr-94	93	100												
27-Apr-94	94	99	676	168	722	667	427	18	21	3369	8.3	5480	30	3836
28-Apr-94	95	98				631								
29-Apr-94	96	99	644	169	690	604	437	25	131	4052	8.2	7070	39	4313
30-Apr-94	97	91				701								
01-May-94	98	87				577								
02-May-94	99	86	611	143	499	472	573	27	48	3184	8.4	4360	38	2703
03-May-94	100	89				565								
04-May-94	101	85	642	171	618	564	588	22	47	2366	8.3	4700	34	3102
05-May-94	102	90				653								
06-May-94	103	90	631	167	613	593	476	19	60	2546	8.4	4900	29	3479
07-May-94	104	99				597								
08-May-94	105	100				506								
09-May-94	106	106	573	123	567	537	439	22	41	2421	8.4	6310	28	4543
10-May-94	107	116				532								
11-May-94	108	117	494	99	464	435	461	18	68	2599	8.2	6440	26	4766
12-May-94	109													
13-May-94	110	130	894	164	377	318	506	30	94	1887	8.4	4300	24	3268
14-May-94	111	125				675								
15-May-94	112	123				678								
16-May-94	113	121	679	175	582	554	339	22	98	2674	8.2	7800	20	6240
17-May-94	114	122				675								
18-May-94	115	127	705	153	613	544	328	21	1894	2659	8.2	8330	19	6747
19-May-94	116	100				739								
20-May-94	117	113	603	153	513	464	227	18	62	2214	8.2	8740	22	6817
21-May-94	118	109				637								
22-May-94	119	112				663								
23-May-94	120	108												
24-May-94	121	113												
25-May-94	122	122	3653	646	597	392	55	99	778	1449	7.9	11600	19	9396
26-May-94	123	129				449								
27-May-94	124	63	783	412	657	618	0	26	60	2284	8.1	14000	21	11060
28-May-94	125	154				477								
29-May-94	126	156				568								
30-May-94	127	155	426	85	414	382	327	18	43	1808	8.3	14500	19	11745
31-May-94	128	158				458								
01-Jun-94	129	158	819	137	455	392	318	26	154	2381	8.5	15100	21	11929
02-Jun-94	130	166												
03-Jun-94	131	163	420	94	415	371	217	17	30	2218	8.2	17000	22	13260

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u r p r o e f 1 (verdund afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

**** E F F L U E N T ****

datum	dag	debiet l/h	CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4-N mg/l	NOX-N mg/l	NO3-N mg/l	NO2-N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal mg/l	pH
01-Apr-94	68	81											
02-Apr-94	69												
03-Apr-94	70	126											
04-Apr-94	71	134											
05-Apr-94	72	124											
06-Apr-94	73	128	146	2	0.2	0.2	998	996	2.2	16	10	1674	8.1
07-Apr-94	74	116											
08-Apr-94	75	138											
09-Apr-94	76	127											
10-Apr-94	77	94											
11-Apr-94	78	122	127	2	0.2	0.4	1120	1113	7.4	11	10	2391	8.8
12-Apr-94	79	76											
13-Apr-94	80	85	186	3	0.2	0.7	1054	1053	1	20	10	2634	8
14-Apr-94	81	89											
15-Apr-94	82	110	124	2	0.2	0.2	978	975	2.9	17	17	3526	8.8
16-Apr-94	83												
17-Apr-94	84	85											
18-Apr-94	85	104	151	2	0.2	0.4	1284	1280	4.2	27	10	3904	8.5
19-Apr-94	86	97											
20-Apr-94	87	104	126	2	0.2	0.2	1030	1024	5.9	22	10	3540	8.3
21-Apr-94	88	116											
22-Apr-94	89	119	108	2	0.2	0.3	962	955	7.2	15	10	3414	8.5
23-Apr-94	90	109											
24-Apr-94	91	102											
25-Apr-94	92	108	137	2	0.8	0.2	1080	1078	1.8	12	10	2600	8.6
26-Apr-94	93	100											
27-Apr-94	94	99	124	2	0.2	0.2	1098	1093	4.6	11	10	3290	8.5
28-Apr-94	95	98											
29-Apr-94	96	99	167	2	0.2	0.3	1070	1065	4.6	23	22	4070	9.2
30-Apr-94	97	91											
01-May-94	98	87											
02-May-94	99	86	210	49	0.3	3.8	1048	1033	14.5	28	10	3580	9.3
03-May-94	100	89											
04-May-94	101	85	125	2	0.2	0.6	1252	1251	1.3	19	11	1470	7.9
05-May-94	102	90											
06-May-94	103	90	128	2	0.2	0.3	1048	1046	2	14	10	1450	8
07-May-94	104	99											
08-May-94	105	100											
09-May-94	106	106	115	2	0.2	0.2	912	911	1.4	15	10	1540	7.9
10-May-94	107	116											
11-May-94	108	117	104	2	0.5	0.5	864	863	1.1	13	28	1690	8.2
12-May-94	109												
13-May-94	110	130	95	2	0.2	0.3	792	792	0.1	11	10	1440	7.9
14-May-94	111	125											
15-May-94	112	123											
16-May-94	113	121	107	2	0.2	0.7	812	811	0.6	11	10	1220	7.8
17-May-94	114	122											
18-May-94	115	127	108	2	0.2	0.2	750	750	0.2	10	10	1180	7.8
19-May-94	116	100											
20-May-94	117	113	89	2	0.2	0.2	532	532	0.1	10	10	1280	8.3
21-May-94	118	109											
22-May-94	119	112											
23-May-94	120	108											
24-May-94	121	113											
25-May-94	122	122	66	2	0.2	0.4	269	269	0.1	15	10	742	7.7
26-May-94	123	129											
27-May-94	124	63	59	2	0.2	0.1	406	406	0.4	18	10	919	7.8
28-May-94	125	154											
29-May-94	126	156											
30-May-94	127	155	85	3	0.2	0.3	561	561	0.2	14	10	1010	7.8
31-May-94	128	158											
01-Jun-94	129	158	82	2	0.4	0.2	545	545	0.1	14	10	1130	8.2
02-Jun-94	130	166											
03-Jun-94	131	163	79	2	0.4	0.5	407	406	1.1	12	10	1310	7.9

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u r p r o e f 1 (verdund afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

**** STIKSTOF ****

**** CZV ****

datum	dag	**** STIKSTOF ****				**** CZV ****			
		N-vr g/dag	N-sb kg/kgO ₂ .d	N-vb kg/m ³ .d	N-rd %	CZV-vr g/dag	CZV-sb kg/kgO ₂ .d	CZV-vb kg/m ³ .d	CZV-rd %
01-Apr-94	68	1818							
02-Apr-94	69								
03-Apr-94	70	1706							
04-Apr-94	71	1916							
05-Apr-94	72	1700							
06-Apr-94	73	2002	0.410	2.00	99.97	1520	0.230	1.13	70.45
07-Apr-94	74	1692							
08-Apr-94	75	2105							
09-Apr-94	76								
10-Apr-94	77								
11-Apr-94	78	1766	0.378	1.77	99.97	1510	0.239	1.12	75.31
12-Apr-94	79	1926							
13-Apr-94	80	1115	0.315	1.12	99.96	1166	0.244	0.86	67.61
14-Apr-94	81	1692							
15-Apr-94	82	1453	0.389	1.45	99.96	1300	0.258	0.96	74.77
16-Apr-94	83								
17-Apr-94	84								
18-Apr-94	85	498	0.189	0.50	99.90	703	0.197	0.52	46.21
19-Apr-94	86								
20-Apr-94	87	776	0.269	0.78	99.94	938	0.241	0.69	66.37
21-Apr-94	88								
22-Apr-94	89	1387	0.463	1.39	99.96	1313	0.325	0.97	76.58
23-Apr-94	90	1762							
24-Apr-94	91	1792							
25-Apr-94	92	1606	0.454	1.61	99.87	1469	0.308	1.09	75.87
26-Apr-94	93								
27-Apr-94	94	1721	0.449	1.72	99.97	1612	0.311	1.19	81.66
28-Apr-94	95	1641							
29-Apr-94	96	1634	0.379	1.63	99.97	1524	0.262	1.13	74.05
30-Apr-94	97	1677							
01-May-94	98	1322							
02-May-94	99	1035	0.383	1.04	99.94	1268	0.347	0.94	65.62
03-May-94	100	1321							
04-May-94	101	1261	0.406	1.26	99.97	1310	0.313	0.97	80.53
05-May-94	102	1555							
06-May-94	103	1327	0.381	1.33	99.97	1365	0.291	1.01	79.70
07-May-94	104	1561							
08-May-94	105	1339							
09-May-94	106	1447	0.319	1.45	99.96	1463	0.238	1.08	79.95
10-May-94	107	1622							
11-May-94	108	1301	0.273	1.30	99.89	1383	0.215	1.02	78.94
12-May-94	109								
13-May-94	110	1174	0.359	1.17	99.95	2784	0.631	2.06	89.37
14-May-94	111	2225							
15-May-94	112	2207							
16-May-94	113	1696	0.272	1.70	99.97	1978	0.235	1.47	84.24
17-May-94	114	2174							
18-May-94	115	1863	0.276	1.86	99.97	2143	0.235	1.59	84.68
19-May-94	116	1946							
20-May-94	117	1391	0.204	1.39	99.96	1634	0.178	1.21	85.23
21-May-94	118	1837							
22-May-94	119	1958							
23-May-94	120								
24-May-94	121								
25-May-94	122	1751	0.186	1.75	99.97	10706	0.844	7.93	98.19
26-May-94	123	1529							
27-May-94	124	986	0.089	0.99	99.97	1175	0.079	0.87	92.46
28-May-94	125	1937							
29-May-94	126	2337							
30-May-94	127	1535	0.131	1.53	99.95	1578	0.100	1.17	80.03
31-May-94	128	1907							
01-Jun-94	129	1723	0.144	1.72	99.91	3104	0.193	2.30	89.99
02-Jun-94	130								
03-Jun-94	131	1624	0.122	1.62	99.90	1643	0.092	1.22	81.17

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u r p r o e f 2 (normaal afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	*** RUW INFLUENT ***								**** INFLUENT VERHOUDINGEN ****			
		CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4 N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal	pH	BZV/CZV ruw	BZV/N-KJ ruw	BZV/CZV gefilt.	BZV/N-KJ gefilt.
16-Jun-94	144												
17-Jun-94	145	1300	360	1130	993	42	350	4590	8.1	0.277	0.319	0.354	0.380
18-Jun-94	146												
19-Jun-94	147												
20-Jun-94	148	980	225	1075	1002	31	230	4390	8.2	0.230	0.209	0.302	0.327
21-Jun-94	149												
22-Jun-94	150	1230	230	1025	915	33	492	4220	8.2	0.187	0.224	0.251	0.269
23-Jun-94	151												
24-Jun-94	152	4130	560	1005	783	120	3470	6640	8.3	0.136	0.557	0.260	0.265
25-Jun-94	153												
26-Jun-94	154												
27-Jun-94	155										0.299	0.291	
28-Jun-94	156												
29-Jun-94	157	1350	305	1050	912	40	360	6890	8.2	0.226	0.290	0.270	0.246
30-Jun-94	158												
01-Jul-94	159	1240	360	1065	1011	30	158	8570	8.2	0.290	0.338	0.271	0.258
02-Jul-94	160												
03-Jul-94	161												
04-Jul-94	162	810	190	670	666	22	131	7130	8.4	0.235	0.284	0.270	0.286
05-Jul-94	163												
06-Jul-94	164	1380	335	1020	876	40	354	7260	8.2	0.243	0.328	0.479	0.296
07-Jul-94	165												
08-Jul-94	166	2240	460	1025	851	58	671	7040	8.3	0.205	0.449	0.284	0.278
09-Jul-94	167												
10-Jul-94	168												
11-Jul-94	169	850	105	995	904	27	46	4420	8.2	0.124	0.106	0.258	0.224
12-Jul-94	170												
13-Jul-94	171	275	57	240	237	16	48	1460	8.1	0.207	0.238	0.182	0.215
14-Jul-94	172												
15-Jul-94	173	3940	510	945	628	160	5510	2630	8.4	0.129	0.540	0.268	0.211
16-Jul-94	174												
17-Jul-94	175												
18-Jul-94	176	1240	180	765	717	39	548	888	8.8	0.145	0.235	0.210	0.143
19-Jul-94	177												
20-Jul-94	178	1410	250	680	595	37	759	5000	8.3	0.177	0.368	0.245	0.203
21-Jul-94	179												
22-Jul-94	180	620	135	895	884	36	30	5490	8.2	0.218	0.151	0.205	0.134
23-Jul-94	181												
24-Jul-94	182												
25-Jul-94	183	1010	100	875	820	39	613	5940	8.4	0.099	0.114	0.211	0.130
26-Jul-94	184												
27-Jul-94	185	465	65	850	812	24	16	3600	8.4	0.140	0.076	0.128	0.073
28-Jul-94	186												
29-Jul-94	187	500	95	820	754	23	62	3460	8.3	0.190	0.116	0.195	0.098
30-Jul-94	188												
31-Jul-94	189												
01-Aug-94	190	174	32	225	204	11	18	1060	8.4	0.184	0.142	0.175	0.094
02-Aug-94	191												
03-Aug-94	192	10900	2270	995	408	310	10600	1430	8.3	0.208	2.281	0.091	0.042
04-Aug-94	193												
05-Aug-94	194	2420	300	735	604	73	1180	1980	8.3	0.124	0.408	0.262	0.242
06-Aug-94	195												
07-Aug-94	196												
08-Aug-94	197	945	255	825	808	26	127	3380	8.3	0.270	0.309	0.261	0.245
09-Aug-94	198												
10-Aug-94	199	890	250	830	770	26	113	3490	8.1	0.281	0.301	0.275	0.258
11-Aug-94	200												
12-Aug-94	201	805	190	770	718	25	133	3370	8.2	0.236	0.247	0.274	0.264
13-Aug-94	202												
14-Aug-94	203												
15-Aug-94	204	1570	260	880	807	46	772	5420	8.3	0.166	0.295	0.238	0.226
16-Aug-94	205												
17-Aug-94	206	900	215	735	642	34	182	3100	8.1	0.239	0.293	0.259	0.253
18-Aug-94	207												
19-Aug-94	208	615	130	765	714	26	130	3450	8.5	0.211	0.170	0.227	0.163

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u u r p r o e f 2 (normaal afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	*** GEFILTREERD INFLUENT ***								*** AKTIEFSLIB ***			
		debiet l/h	CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4-N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal mg/l	pH	DS mg/l	gloeir. %	oDS mg/l
16-Jun-94	144	109				742							
17-Jun-94	145	110	805	285	750	677	40	34	3210	8.1	7010	32	4767
18-Jun-94	146	95				826							
19-Jun-94	147	118				795							
20-Jun-94	148	137	845	255	780	738	25	59	3330	8.2	10200	28	7344
21-Jun-94	149	134				1034							
22-Jun-94	150	144	995	250	930	844	25	99	3800	8.2	9920	27	7242
23-Jun-94	151	155				1148							
24-Jun-94	152	143	1020	265	1000	951	22	137	8170	8.3	9850	26	7289
25-Jun-94	153	121				1148							
26-Jun-94	154	131				1130							
27-Jun-94	155	121	970	290	995	963	22	290	5510	8.2			
28-Jun-94	156	150				1188							
29-Jun-94	157	124	945	255	1035	917	21	57	8090	7.2	15200	26	11248
30-Jun-94	158	124				1240							
01-Jul-94	159	126	1050	285	1105	1033	25	43	7740	8.2			
02-Jul-94	160	103				1170							
03-Jul-94	161	103				1180							
04-Jul-94	162	125	890	240	840	793	26	97	6630	8.2	16500	24	12540
05-Jul-94	163	107				1106							
06-Jul-94	164	100	605	290	980	893	21	16	6740	8.3	15900	24	12084
07-Jul-94	165	106				1038							
08-Jul-94	166	103	1020	290	1045	921	28	63	7520	8.2	16550	24	12578
09-Jul-94	167	100				1092							
10-Jul-94	168	97				1220							
11-Jul-94	169	98	910	235	1050	976	20	88	4090	8.1	16700	23	12859
12-Jul-94	170	119				980							
13-Jul-94	171	153	850	155	720	667	17	10	2250	8.4	15300	24	11628
14-Jul-94	172	139				708							
15-Jul-94	173	112	485	130	615	558	18	31	2630	8.4	20700	18	16974
16-Jul-94	174	102				938							
17-Jul-94	175	99				826							
18-Jul-94	176	98	525	110	770	750	18	12	1300	8.4	18100	24	13756
19-Jul-94	177	112											
20-Jul-94	178	97	550	135	665	611	16	37	4520	8.3	17300	21	13667
21-Jul-94	179	112				806							
22-Jul-94	180	121	440	90	670	512	19	29	3010	8.2	13200	23	10164
23-Jul-94	181	122				840							
24-Jul-94	182	116				880							
25-Jul-94	183	120	445	94	725	673	19	45	3790	8.3	13500	23	10395
26-Jul-94	184	114				942							
27-Jul-94	185	106	460	59	805	766	17	22	3280	8.4	14000	23	10780
28-Jul-94	186	101				978							
29-Jul-94	187	99	430	84	855	816	16	49	3360	8.3	16500	23	12705
30-Jul-94	188	99				1080							
31-Jul-94	189	115				998							
01-Aug-94	190	143	360	63	670	630	16	10	2960	8.4	16100	21	12719
02-Aug-94	191	156				478							
03-Aug-94	192	98	186	17	405	355	13	10	1810	8.3	16000	20	12800
04-Aug-94	193	89				766							
05-Aug-94	194	79	610	160	660	654	20	29	2850	8.3	17300	21	13667
06-Aug-94	195	69				910							
07-Aug-94	196	68				972							
08-Aug-94	197	72	765	200	815	814	150	10	3280	8.3	17500	20	14000
09-Aug-94	198	72				986							
10-Aug-94	199	72	765	210	815	800	19	10	3740	8.3	18000	21	14220
11-Aug-94	200	68				1020							
12-Aug-94	201	104	785	215	815	801	20	11	3800	8.3			
13-Aug-94	202	95				1356							
14-Aug-94	203	85				940							
15-Aug-94	204	79	840	200	885	839	23	33	6360	8.5	17800	24	13528
16-Aug-94	205	101				786							
17-Aug-94	206	116	715	185	730	684	19	10	5250	8.2	15000	24	11400
18-Aug-94	207	120				785							
19-Aug-94	208	92	550	125	765	761	19	19	3630	8.4	16400	24	12464

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE

d u u r p r o e f 2 (normaal afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

**** E F F L U E N T ****

datum	dag	debiet l/h	CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4-N mg/l	NOX-N mg/l	NO3-N mg/l	NO2-N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal mg/l	pH
16-Jun-94	144	109											
17-Jun-94	145	110	176	2	7.2	9	675	673	2.9	11	10	1070	7.8
18-Jun-94	146	95											
19-Jun-94	147	118											
20-Jun-94	148	137	95	2	0.2	0.2	694	693	0.7	20	10	330	7.1
21-Jun-94	149	134											
22-Jun-94	150	144	113	2	0.2	0.2	826	825	1	19	10	402	7.1
23-Jun-94	151	155											
24-Jun-94	152	143	110	2	0.2	0.3	936	936	0.4	17	10	716	7.3
25-Jun-94	153	121											
26-Jun-94	154	131											
27-Jun-94	155	121											
28-Jun-94	156	150											
29-Jun-94	157	124	115	3	0.2	0.9	1014	1014	0.1	19	10	552	7.1
30-Jun-94	158	124											
01-Jul-94	159	126	127	2	0.2	0.6	1254	1254	0.2	21	10	554	7.3
02-Jul-94	160	103											
03-Jul-94	161	103											
04-Jul-94	162	125	112	2	0.2	0.6	1008	1008	0.1	45	10	559	7.2
05-Jul-94	163	107											
06-Jul-94	164	100	105	2	0.2	0.5	916	916	0.1	16	10	564	7.2
07-Jul-94	165	106											
08-Jul-94	166	103	123	2	0.3	0.4	912	912	0.1	24	10	557	7.3
09-Jul-94	167	100											
10-Jul-94	168	97											
11-Jul-94	169	98	124	2	0.2	0.4	1000	1000	0.2	24	10	235	7
12-Jul-94	170	119											
13-Jul-94	171	153	102	2	0.2	0.8	719	719	0.1	21	10	175	7.1
14-Jul-94	172	139											
15-Jul-94	173	112	83	3	0.2	0.9	566	566	0.3	19	10	176	7.3
16-Jul-94	174	102											
17-Jul-94	175	99											
18-Jul-94	176	98	92	2	0.2	0.3	782	782	0.1	19	10	100	7
19-Jul-94	177	112											
20-Jul-94	178	97	84	6	0.9	0.3	316	316	0.1	14	10	210	6.8
21-Jul-94	179	112											
22-Jul-94	180	121	61	2	0.2	0.8	462	462	0.3	16	10	400	7.3
23-Jul-94	181	122											
24-Jul-94	182	116											
25-Jul-94	183	120	91	2	0.3	0.5	695	694	0.2	16	10	468	7.2
26-Jul-94	184	114											
27-Jul-94	185	106	91	2	0.2	0.3	766	764	2.1	16	10	555	7.1
28-Jul-94	186	101											
29-Jul-94	187	99	87	2	0.2	1.2	782	781	0.8	17	10	528	7.4
30-Jul-94	188	99											
31-Jul-94	189	115											
01-Aug-94	190	143	84	2	0.2	0.4	537	553	0.5	17	10	239	7
02-Aug-94	191	156											
03-Aug-94	192	98	68	2	1.3	0.5	214	214	0.4	11	10	334	7.3
04-Aug-94	193	89											
05-Aug-94	194	79	70	2	0.30	1	432	431	0.5	14	10	588	7.3
06-Aug-94	195	69											
07-Aug-94	196	68											
08-Aug-94	197	72	79	2	1.9	0.4	262	262	0.1	13	10	269	7.2
09-Aug-94	198	72											
10-Aug-94	199	72	77	2	2.7	3.3	295	295	0.5	9.2	10	1370	7.9
11-Aug-94	200	68											
12-Aug-94	201	104	113	2	6.7	4.9	341	334	7.3	11	10	1020	8
13-Aug-94	202	95											
14-Aug-94	203	85											
15-Aug-94	204	79	119	2	13.4	16	563	544	18.5	11	10	2620	7.9
16-Aug-94	205	101											
17-Aug-94	206	116	85	2	0.2	0.4	573	471	1.8	11	10	2160	7.8
18-Aug-94	207	120											
19-Aug-94	208	92	110	2	6.9	4.8	242	222	20	11	10	1680	8.3

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u u r p r o e f 2 (normaal afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	**** STIKSTOF ****				**** CZV ****			
		N-vr g/dag	N-sb kg/kgO ₂ .d	N-vb kg/m ³ .d	N-rd %	CZV-vr g/dag	CZV-sb kg/kgO ₂ .d	CZV-vb kg/m ³ .d	CZV-rd %
16-Jun-94	144	2081							
17-Jun-94	145	1988	0.417	1.988	99.04	2134	0.448	1.581	78.14
18-Jun-94	146	2021							
19-Jun-94	147	2408							
20-Jun-94	148	2570	0.350	2.570	99.97	2784	0.379	2.062	88.76
21-Jun-94	149	3577							
22-Jun-94	150	3214	0.444	3.214	99.98	3439	0.475	2.547	88.64
23-Jun-94	151	4586							
24-Jun-94	152	3427	0.470	3.427	99.98	3496	0.480	2.589	89.22
25-Jun-94	153	3591							
26-Jun-94	154	3813							
27-Jun-94	155	2891		2.891					
28-Jun-94	156	4601							
29-Jun-94	157	3077	0.274	3.077	99.98	2810	0.250	2.081	87.83
30-Jun-94	158	3974							
01-Jul-94	159	3329		3.329	99.98	3163		2.343	87.90
02-Jul-94	160	3108							
03-Jul-94	161	3136							
04-Jul-94	162	2523	0.201	2.523	99.98	2673	0.213	1.980	87.42
05-Jul-94	163	3051							
06-Jul-94	164	2349	0.194	2.349	99.98	1450	0.120	1.074	82.64
07-Jul-94	165	2838							
08-Jul-94	166	2582	0.205	2.582	99.97	2520	0.200	1.867	87.94
09-Jul-94	167	2801							
10-Jul-94	168	3066							
11-Jul-94	169	2470	0.192	2.470	99.98	2140	0.166	1.585	86.37
12-Jul-94	170	2995							
13-Jul-94	171	2650	0.228	2.650	99.97	3129	0.269	2.317	88.00
14-Jul-94	172	2542							
15-Jul-94	173	1659	0.098	1.659	99.97	1309	0.077	0.969	82.89
16-Jul-94	174	2473							
17-Jul-94	175	2109							
18-Jul-94	176	1814	0.132	1.814	99.97	1237	0.090	0.916	82.48
19-Jul-94	177								
20-Jul-94	178	1547	0.113	1.547	99.86	1280	0.094	0.948	84.73
21-Jul-94	179	2325							
22-Jul-94	180	1949	0.192	1.949	99.97	1280	0.126	0.948	86.14
23-Jul-94	181	2636							
24-Jul-94	182	2632							
25-Jul-94	183	2083	0.200	2.083	99.96	1278	0.123	0.947	79.55
26-Jul-94	184	2759							
27-Jul-94	185	2053	0.190	2.053	99.98	1173	0.109	0.869	80.22
28-Jul-94	186	2550							
29-Jul-94	187	2030	0.160	2.030	99.98	1021	0.080	0.756	79.77
30-Jul-94	188	2768							
31-Jul-94	189	2964							
01-Aug-94	190	2297	0.181	2.297	99.97	1234	0.097	0.914	76.67
02-Aug-94	191	1926							
03-Aug-94	192	956	0.075	0.956	99.68	439	0.034	0.325	63.44
04-Aug-94	193	1760							
05-Aug-94	194	1249	0.091	1.249	99.95	1154	0.084	0.855	88.52
06-Aug-94	195	1608							
07-Aug-94	196	1700							
08-Aug-94	197	1415	0.101	1.415	99.77	1328	0.095	0.984	89.67
09-Aug-94	198	1820							
10-Aug-94	199	1405	0.099	1.405	99.67	1319	0.093	0.977	89.93
11-Aug-94	200	1791							
12-Aug-94	201	2025		2.025	99.18	1950		1.445	85.61
13-Aug-94	202	3304							
14-Aug-94	203	2048							
15-Aug-94	204	1674	0.124	1.674	98.49	1589	0.117	1.177	85.83
16-Aug-94	205	2048							
17-Aug-94	206	2033	0.178	2.033	99.97	1992	0.175	1.475	88.11
18-Aug-94	207	2418							
19-Aug-94	208	1698	0.136	1.698	99.10	1221	0.098	0.904	80.00

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u u r p r o e f 3 (geconcentreerd afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	**** INFLUENT ****									*** AKTIEFSLIB ***		
		debiet l/h	CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4-N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal.	pH	DS mg/l	gloeir. %	oDS mg/l
12-Sep-94	232	42	630	135	820	794	31	228	3040	8.4	14100	26	10434
13-Sep-94	233	53				719							
14-Sep-94	234	81				726							
15-Sep-94	235	108				1692							
16-Sep-94	236	66	510	120	2743	2605	18	60	3130	8.2	16800	23	12936
17-Sep-94	237	95				1927							
18-Sep-94	238	108				1654							
19-Sep-94	239	119	595	145	1517	1441	23	95	3130	8.2	17200	24	13072
20-Sep-94	240	131				1216							
21-Sep-94	241	115				1333					16900	23	13013
22-Sep-94	242	70				2132							
23-Sep-94	243	94				1764							
24-Sep-94	244	82				2013							
25-Sep-94	245	102				1518							
26-Sep-94	246	56	305	54	2611	2479	17	16	2680	8.3	18000	20	14400
27-Sep-94	247	59				2126							
28-Sep-94	248	71	305	51	1878	1784	17	10	2280	8.2			
29-Sep-94	249	62				2208							
30-Sep-94	250	44	520	94	1754	1666	21	10	2580	8.3	18600	21	14694
01-Oct-94	251	34				1845							
02-Oct-94	252	34	605	115	1844	1752	21	15	3550	8.3	18600	22	14508
03-Oct-94	253	33				1846							
04-Oct-94	254	43				1835							
05-Oct-94	255	60	775	190	1594	1514	25	40	3480	8.1	20400	23	15708
06-Oct-94	256	44											
07-Oct-94	257	41	885	205	2405	2284	28	46	3400	8.1	19400	26	14356
08-Oct-94	258	56				1962							
09-Oct-94	259	52				2249							
10-Oct-94	260	74	895	220	1691	1606	27	39	3700	8.2	22200	28	15984
11-Oct-94	261	76											
12-Oct-94	262	85	765	215	1958	1860	24	121	3310	8.2	20300	27	14819
13-Oct-94	263	90				2116							
14-Oct-94	264	90	825	255	1924	1827	26	60	3290	8.2	24100	33	16147
15-Oct-94	265	88				1896							
16-Oct-94	266	88				1914							
17-Oct-94	267	90	635	150	1786	1696	23	16	3420	8.2			
18-Oct-94	268	96				1768							
19-Oct-94	269	95	825	220	2008	1907	25	76	3210	8.1	20200	31	13938
20-Oct-94	270	96				1983							
21-Oct-94	271	89	815	170	2304	2188	27	47	1900	8.1	20400	34	13464
22-Oct-94	272	96				2270							
23-Oct-94	273	68				3309							
24-Oct-94	274	79											
25-Oct-94	275	71											
26-Oct-94	276	88											
27-Oct-94	277	95				2299							
28-Oct-94	278	93	670	190	2443	2320	27	46	3630	8.1	19200		
29-Oct-94	279	90				2706							
30-Oct-94	280	82				3119							
31-Oct-94	281	86	635	160	3491	3315	25	10	2660	8.2	19800	36	12672

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u r p r o e f 3 (geconcentreerd afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

**** EFFLUENT ****

datum	dag	debiet l/h	CZV mg/l	BZV mg/l	N-Kj mg/l	NH4-N mg/l	NOX-N mg/l	NO3-N mg/l	NO2-N mg/l	Ptot mg/l	SS mg/l	alkal. mg/l	pH
12-Sep-94	232	42	87	2	0.8	0.5	527	525	1.6	18	<10	288	7
13-Sep-94	233	53											
14-Sep-94	234	81											
15-Sep-94	235	108											
16-Sep-94	236	66	91	2	0.9	0.9	587	585	1.9	6.6	<10	1380	7.5
17-Sep-94	237	95											
18-Sep-94	238	108											
19-Sep-94	239	119	88	2	29.5	29.5	45	36.5	8	6.4	<10	1000	7.4
20-Sep-94	240	131											
21-Sep-94	241	115											
22-Sep-94	242	70											
23-Sep-94	243	94											
24-Sep-94	244	82											
25-Sep-94	245	102											
26-Sep-94	246	56	76	3	69	64	18.5	11.5	7.2	2	<10	1170	7.2
27-Sep-94	247	59											
28-Sep-94	248	71	85	2	3	0.2	190	186	3.6	3.7	<10	696	7.8
29-Sep-94	249	62											
30-Sep-94	250	44	105	2	3.8	0.7	140	137	3.5	12	<10	527	7.5
01-Oct-94	251	34											
02-Oct-94	252	34	98	2	3.2	0.3	335	327	7.6	15	<10	910	7.5
03-Oct-94	253	33											
04-Oct-94	254	43											
05-Oct-94	255	60	172	2	34	34	666	584	82	20	<10	748	7.1
06-Oct-94	256	44											
07-Oct-94	257	41	83	2	0.2	0.2	1564	1561	2.9	21	<10	524	7.4
08-Oct-94	258	56											
09-Oct-94	259	52											
10-Oct-94	260	74	101	2	0.2	0.2	1524	1517	6.6	23	<10	612	7.1
11-Oct-94	261	76											
12-Oct-94	262	85	97	2	0.2	0.2	1044	1042	1.9	22	<10	734	7.3
13-Oct-94	263	90											
14-Oct-94	264	90	117	2	0.2	0.2	1552	1532	19.5	21	<10	922	7.3
15-Oct-94	265	88											
16-Oct-94	266	88											
17-Oct-94	267	90	106	2	0.2	0.2	1615	1611	3.4	21	<10	1180	7.1
18-Oct-94	268	96											
19-Oct-94	269	95	97	2	0.2	0.2	1640	1636	4.3	20	<10	961	7.2
20-Oct-94	270	96											
21-Oct-94	271	89	94	2	0.2	0.2	1464	1459	4.4	21	<10	1140	7.7
22-Oct-94	272	96											
23-Oct-94	273	68											
24-Oct-94	274	79											
25-Oct-94	275	71											
26-Oct-94	276	88											
27-Oct-94	277	95											
28-Oct-94	278	93	110	2	0.2	0.2	2529	2528	1	23	<10	1770	7.6
29-Oct-94	279	90											
30-Oct-94	280	82											
31-Oct-94	281	86	107	2	0.2	0.2	2356	2354	1.6	24	<10	1550	7.5

REJECTIEWATERBEHANDELING SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK
 MET BEHULP VAN BIOMEMBRAANTECHNOLOGIE
 d u r p r o e f 3 (geconcentreerd afvalwater)

Grontmij Advies & Techniek bv

datum	dag	**** STIKSTOF ****				**** CZV ****			
		N-vr g/dag	N-sb kg/kgO ₂ .d	N-vb kg/m ³ .d	N-rd %	CZV-vr g/dag	CZV-sb kg/kgO ₂ .d	CZV-vb kg/m ³ .d	CZV-rd %
12-Sep-94	232	827	0.079	0.83	99.90	635	0.045	0.47	86.19
13-Sep-94	233	960							
14-Sep-94	234	1481							
15-Sep-94	235	4619							
16-Sep-94	236	4322	0.334	4.32	99.97	804	0.046	0.60	82.16
17-Sep-94	237	4610							
18-Sep-94	238	4516							
19-Sep-94	239	4345	0.332	4.35	98.06	1704	0.097	1.26	85.21
20-Sep-94	240	4019							
21-Sep-94	241	3888							
22-Sep-94	242	3755							
23-Sep-94	243	4182							
24-Sep-94	244	4183							
25-Sep-94	245	3923							
26-Sep-94	246	3509	0.244	3.51	97.36	410	0.021	0.30	75.08
27-Sep-94	247	3180							
28-Sep-94	248	3215		3.22	99.84	522		0.39	72.13
29-Sep-94	249	3480							
30-Sep-94	250	1839	0.125	1.84	99.78	545	0.027	0.40	79.81
01-Oct-94	251	1587							
02-Oct-94	252	1495	0.103	1.49	99.83	490	0.025	0.36	83.80
03-Oct-94	253	1532							
04-Oct-94	254	1982							
05-Oct-94	255	2277	0.145	2.28	97.87	1107	0.052	0.82	77.81
06-Oct-94	256								
07-Oct-94	257	2373	0.165	2.37	99.99	873	0.045	0.65	90.62
08-Oct-94	258	2753							
09-Oct-94	259	2965							
10-Oct-94	260	2987	0.187	2.99	99.99	1581	0.073	1.17	88.72
11-Oct-94	261								
12-Oct-94	262	3983	0.269	3.98	99.99	1556	0.078	1.15	87.32
13-Oct-94	263	4789							
14-Oct-94	264	4170	0.258	4.17	99.99	1788	0.082	1.32	85.82
15-Oct-94	265	4226							
16-Oct-94	266	4234							
17-Oct-94	267	3838		3.84	99.99	1365		1.01	83.31
18-Oct-94	268	4288							
19-Oct-94	269	4578	0.328	4.58	99.99	1881	0.100	1.39	88.24
20-Oct-94	270	4807							
21-Oct-94	271	4945	0.367	4.95	99.99	1749	0.096	1.30	88.47
22-Oct-94	272	5511							
23-Oct-94	273	5660							
24-Oct-94	274								
25-Oct-94	275								
26-Oct-94	276								
27-Oct-94	277	5507							
28-Oct-94	278	5439		5.44	99.99	1492		1.10	83.58
29-Oct-94	279	6142							
30-Oct-94	280	6439							
31-Oct-94	281	7167	0.566	7.17	99.99	1304	0.076	0.97	83.15

Op grond van de slibgroei gedurende de diverse duurproeven kunnen de yields voor autotrofe en heterotrofe organismen worden vastgesteld als functie van de slibbelasting.

De yields die hier worden berekend, zijn direct gerelateerd aan de CZV- en N_{Kj} -vracht in het rejectiewater.

Uit tabel 5.5 (slibtoename duurproef 1), tabel 5.9 (slibtoename duurproef 2) en tabel 5.14 (slibtoename duurproef 3) kunnen de volgende vergelijkingen worden opgesteld.

Duurproef 1

$$\begin{aligned} 677 * Y_A + 519 * Y_H &= & 120,9 & \text{ g DS/m}^3 \\ 564 * Y_A + 2.726 * Y_H &= & 307,9 & \text{ g DS/m}^3 \end{aligned}$$

Duurproef 2

$$\begin{aligned} 1124 * Y_A + 895 * Y_H &= & 86,2 & \text{ g DS/m}^3 \\ 836 * Y_A + 2.032 * Y_H &= & 158,2 & \text{ g DS/m}^3 \end{aligned}$$

Duurproef 3

$$\begin{aligned} 2.278 * Y_A + 776 * Y_H &= & 238,0 & \text{ g DS/m}^3 \\ 1.539 * Y_A + 4.538 * Y_H &= & 429,9 & \text{ g DS/m}^3 \end{aligned}$$

Uit deze drie sets van vergelijkingen volgen de yields zoals aangegeven in tabel 1. In deze tabel is tevens de gemiddelde CZV- en N_{Kj} -slibbelasting over de betreffende periodes meegenomen.

Tabel 1: Berekende autotrofe en heterotrofe yields

duurproef	T [°C]	DS [g/l]	N_{Kj} [g/kgDS.d]	CZV [g/kgDS.d]	Y_A [g/g]	Y_H [g/g]
1	33,4	5-10	265	411	0,11	0,09
2	33,3	15-17	152	169	0,02	0,07
3	33,3	15-17	228	221	0,08	0,06

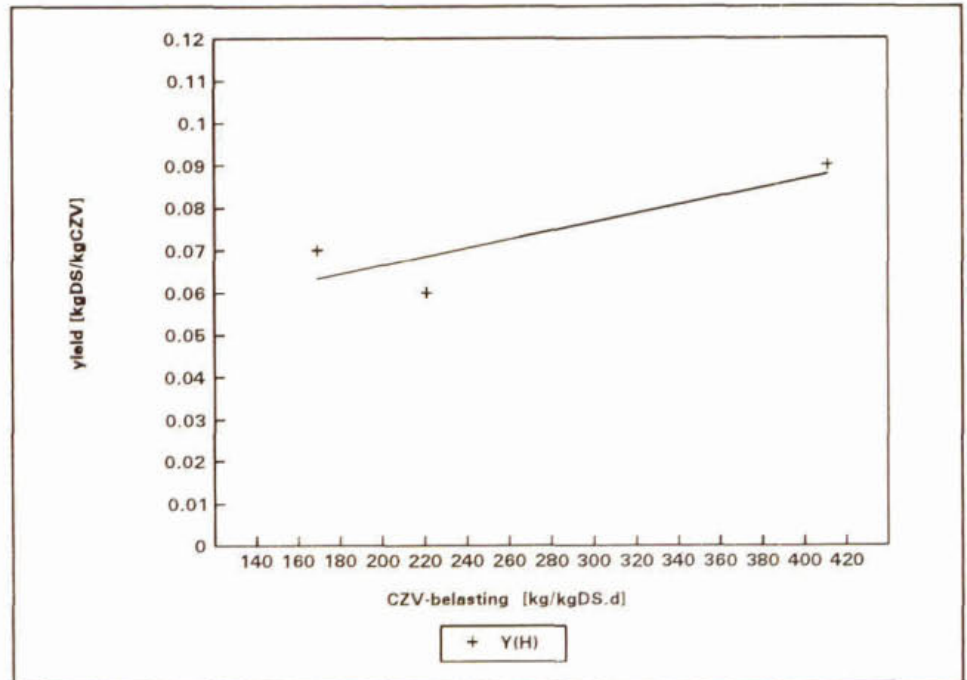
Uit bovenstaande tabel blijkt dat bij toenemende N_{Kj} -slibbelasting de netto heterotrofe en autotrofe yield toenemen. Binnen de bereiken van de slibbelasting waarin de yields zijn berekend, is in figuur 1 en 2 door middel van lineaire regressie een relatie gelegd tussen de slibbelasting en de yield. Deze relaties worden door de volgende functies beschreven:

Heterotrofe yield (voor 170 - 410 g CZV/kg DS.d)

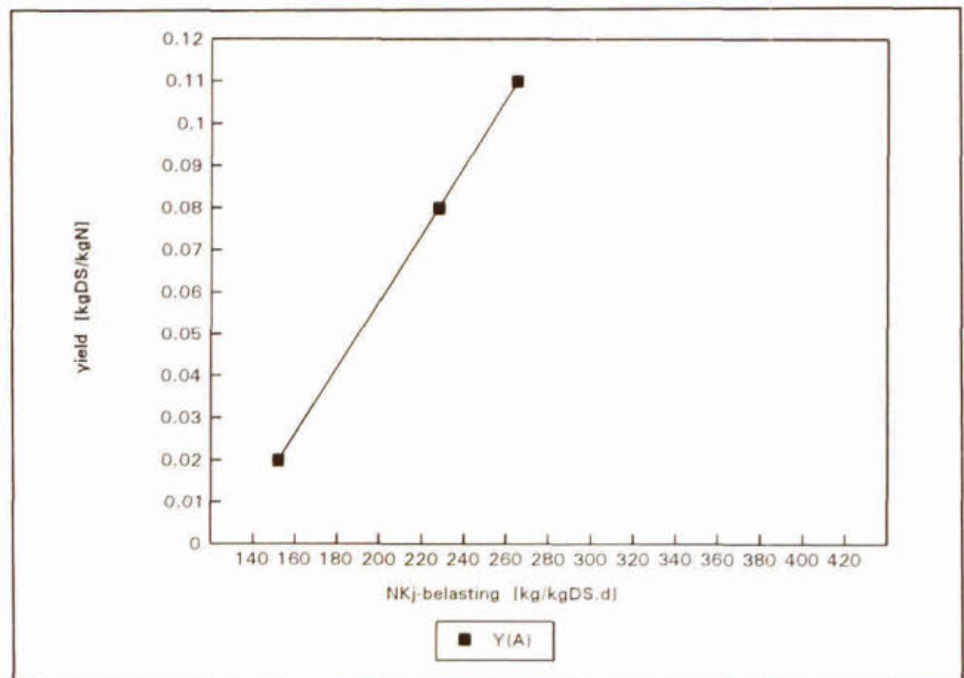
$$Y_H = 0,046 + 1,02 \times 10^{-4} \times S_{b-CZV}$$

Autotrofe yield (vor 150 - 260 g N/kg DS.d)

$$Y_A = 7,95 \times 10^{-4} \times S_{b-NKj} - 0,101$$



Figuur 1: De relatie tussen de heterotrofe yield en de CZV-slibbelasting.



Figuur 2: De relatie tussen de autotrofe yield en de N-slibbelasting.

Bijlage 7 Loogverbruik

Het loogverbruik bij het nitrificatie/denitrificatieproces kan worden berekend op grond van de protonenbalans en de CO₂-balans.

Bij het opstellen van de protonenbalans moet rekening worden gehouden met de alkaliteit in het influent, de protonenproductie bij de nitrificatie (2 mol protonen per genitrificeerde mol stikstof) en de alkaliteitsproductie bij de denitrificatie (er wordt 1 proton per mol stikstof geconsumeerd).

Protonenbalans:

$$[HCO_3^-]_{infl} + [HCO_3^-]_{dnt} - [HCO_3^-] + [OH^-]_{loog} = 2[H^+]_{nitr}$$

$$[HCO_3^-]_{dnt} = Q_{infl} * [N_{kj}] * \frac{(\eta_{NO2} + \eta_{NO3})}{100} * \frac{\sigma_{dnt}}{100}$$

$$[H^+]_{nitr} = 2Q_{infl} * [N_{kj}] * \frac{(\eta_{NO2} + \eta_{NO3})}{100}$$

Bij het opstellen van de CO₂-balans wordt de hoeveelheid CO₂ die in de vloeistof-fase zit, verwaarloosd en wordt uitgegaan van evenwicht tussen de gas- en vloeistof-fase.

$$Q_{infl} * ([HCO_3^-]_{infl} + [HCO_3^-]_{dnt} - [HCO_3^-]) = Q_{lucht} * \frac{X_{CO_2}}{0.0224}$$

$$[HCO_3^-] = (10^{pH-pK} * \frac{10^5}{mRT} * (P_{ext} + 0.05 * H)) * X_{CO_2}$$

Q _{infl}	influentdebiet	[m ³ /h]
Q _{lucht}	luchtdebiet	[Nm ³ /h]
[X]	concentratie	[mol/m ³]
η _{NO3}	percentage nitraatvorming	[%]
η _{NO2}	percentage nitrietvorming	[%]
σ _{dnt}	denitrificatierendement	[%]
X _{CO2}	molfractie CO ₂	[-]
m	verdelingscoefficient	[-]
R	gasconstante	[J/mol.K]
T	temperatuur	[K]
H	waterhoogte	[m]
P _{ext}	extern opgelegde druk	[bar]

Uit voorgaande formules blijkt dat het loogverbruik ook afhankelijk is van het luchtdebiet. Voor het luchtdebiet zijn schaaleffecten aanwezig. Bij full-scale installaties zal het luchtdebiet relatief kleiner zijn dan bij de proefinstallatie.

Voor het loogverbruik kan nu de volgende algemene formule worden afgeleid:

$$[OH] = 2[N_{Kj}] \frac{(\eta_{NO_2} + \eta_{NO_3})}{100} - [HCO_3^-]_{infl} - Q_{infl} [N_{Kj}] \frac{(\eta_{NO_2} + \eta_{NO_3})}{100} * \frac{\sigma_{dnt}}{100} +$$

$$\frac{Q_{infl} ([HCO_3^-]_{infl} + Q_{infl} [N_{Kj}]) \frac{(\eta_{NO_2} + \eta_{NO_3})}{100} * \frac{\sigma_{dnt}}{100}}{\frac{Q_{lucht}}{0.024 * 10^{pH-pK} \frac{10^5}{mRT} (P_{ext} + 0.005H)}} + Q_{infl}$$

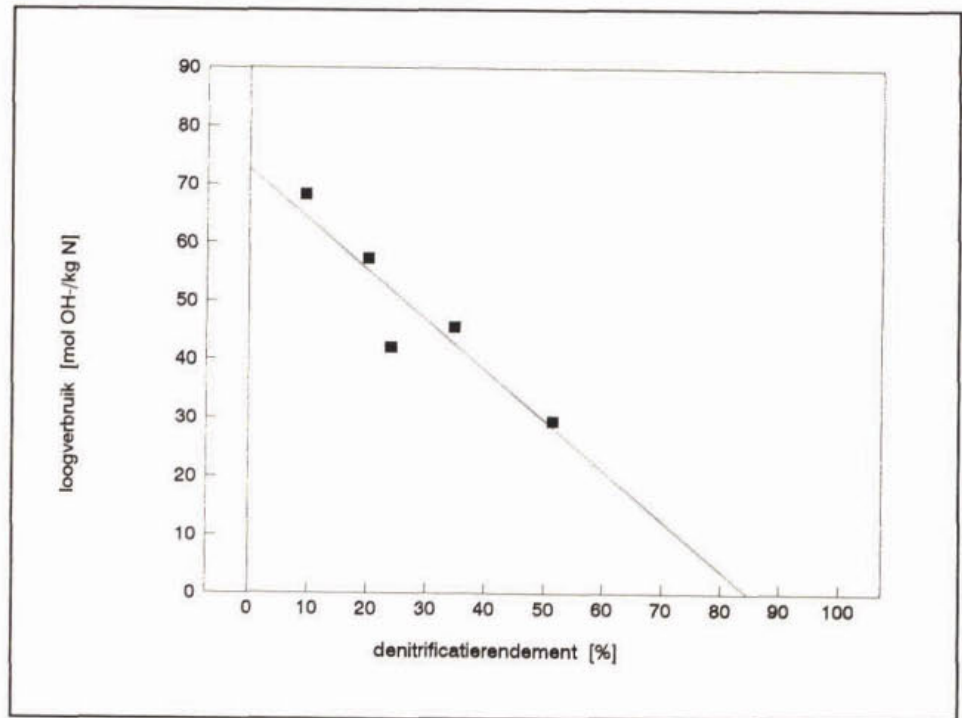
[X]	concentratie	[mol/m ³]
Q _{lucht}	luchtdebiet	[Nm ³ /h]
m	verdelingscoëfficiënt	[-]
R	gasconstante	[J/mol.K]
T	temperatuur	[K]
H	waterhoogte	[m]
P _{ext}	extern opgelegde druk	[bar]

Het loogverbruik tijdens de tweede duurproef was aanzienlijk lager in vergelijking met de eerste eerste duurproef. Dit heeft als voornaamste oorzaak dat in plaats van ongeveer pH 8 tijdens de eerste duurproef de pH tijdens de tweede duurproef werd gehandhaafd op pH 6,8. De verhouding alkaliteit/N_{Kj} (in mol/mol) in het influent is tijdens beide duurproeven vrijwel gelijk, respectievelijk 1,04 en 1,07. Bij de derde duurproef is de alkaleit/N_{Kj}-verhouding veel lager, doordat additioneel ureum is gedoseerd. Tevens is gedeeltelijk gebruik gemaakt van zuivere zuurstof, zodat met een zeer laag luchtdebiet is gewerkt. De eerste duurproef wordt niet verder in beschouwing genomen van wege de wisselende pH.

In figuur 1 is het loogverbruik (mol OH/kg N) als functie van het denitrificatierendement weergegeven, zoals dit gevonden is voor de tweede duurproef in de proefinstallatie. Met behulp van lineaire regressie is uit de meetresultaten van de tweede duurproef de volgende relatie berekend:

$$LV = 73 - 0,86 * \sigma_{dnt}$$

LV	loogverbruik	[mol OH/kg N]
----	--------------	---------------



Figuur 1: Loogverbruik - duurproef 2

Op grond van de theoretische formules voor het loogverbruik is het loogverbruik in relatie tot de denitrificatiegraad berekend.

Hierbij is voor duurproef 2 uitgegaan van:

•	$[N_{kj}]$	947	mg/l
•	$[HCO_3^-]$	72	mmol/l
•	pH	6,8	-
•	P_{ext}	3	bar
•	H	1	m
•	Q_{infl}	120	l/h
•	Q_{lucht}	45	Nm ³ /h

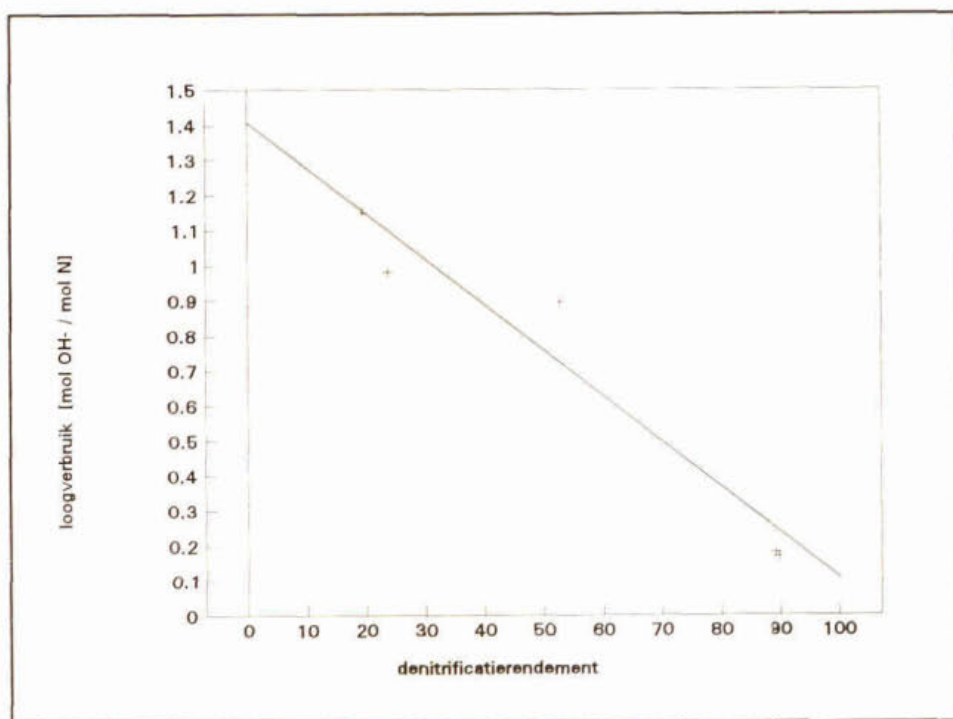
Hieruit volgt:

$$LV = 67 - 0.7 * \sigma_{dnt}$$

Deze relatie komt redelijk goed overeen met de in de praktijk gevonden relatie.

Het loogverbruik (mol OH⁻/kg N) als functie van het denitrificatierendement is in figuur 2 voor duurproef 3 weergegeven. Met behulp van lineaire regressie is uit de meetresultaten voor de derde duurproef de volgende relatie berekend:

$$LV = 101 - 0.98 * \sigma_{dnt}$$



Figuur 2: Loogverbruik - duurproef 3

Bij duurproef 3 is voor de theoretische berekening van het volgende uitgegaan:

•	$[N_{kj}]$	2040	mg/l
•	$[HCO_3^-]$	51	mmol/l
•	pH	6,8	-
•	P_{ext}	3	bar
•	H	1	m
•	Q_{infl}	120	l/h
•	Q_{lucht}	12	Nm ³ /h

Hieruit volgt:

$$LV = 118 - 0.68 * \sigma_{dnt}$$

Het blijkt dat hier de afwijking tussen theorie en praktijk groter is dan bij duurproef 2. Door de alkaliteit in het influent gelijk te stellen aan die in duurproef 2 (72 mmol/l) blijkt de theorie wel weer overeen te komen met de praktijk. Het zou kunnen zijn dat de gemeten alkaliteit bij duurproef 3 lager ligt dan de werkelijke alkaliteit.

Concluderend kan gesteld worden dat het loogverbruik met behulp van de theoretische formules vrij goed benaderd kan worden.

Bijlage 8 Methanolverbruik

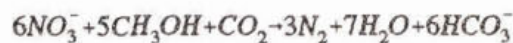
De volgende algemene formule voor het methanolverbruik ten gevolge van denitrificatie kan opgesteld worden.

$$\phi_{\text{methanol}} = Q_{\text{infl}} * [N_{\text{kj}}] * \frac{(\eta_{\text{NO}_2} \rho_{\text{NO}_2}^{\text{tot}} + \eta_{\text{NO}_3} \rho_{\text{NO}_3}^{\text{tot}})}{100} * \frac{\sigma_{\text{dnt}}}{100} - \delta_{\text{methanol}}$$

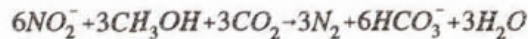
ϕ_{methanol}	methanolverbruik	[kg/h]
Q_{infl}	afvalwaterdebiet	[m ³ /h]
$[N_{\text{kj}}]$	concentratie	[kg N/m ³]
σ_{dnt}	denitrificatierendement	[%]
η_{NO_2}	percentage nitrietvorming	[%]
η_{NO_3}	percentage nitraatvorming	[%]
ρ^{tot}	C/N-verhouding	[kg MeOH/kg N]
δ	verlies aan koolstofbron	[kg/h]

Voor de denitrificatie met methanol via nitraat en nitriet geldt de volgende relatie:

Via nitraat



Via nitriet



Op grond van het bovenstaande kan de stochiometrische CZV/N-verhouding (ρ^{stoch}) berekend worden:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{NO}_3\text{-N}}^{\text{stoch}} &: 1.90 \text{ kg MeOH/kg NO}_3\text{-N} = 2.85 \text{ kg CZV/kg NO}_3\text{-N} \\ \rho_{\text{NO}_2\text{-N}}^{\text{stoch}} &: 1.14 \text{ kg MeOH/kg NO}_2\text{-N} = 1.71 \text{ kg CZV/kg NO}_2\text{-N} \end{aligned}$$

De totale CZV/N-verhouding (ρ^{tot}) wordt echter bepaald door de bruto yield van de denitrificeerders:

$$\rho_{\text{NO}_x}^{\text{tot}} = \frac{\rho_{\text{NO}_2}^{\text{stoch}}}{1 - Y_{\text{NO}_2}^{\text{bruto}}} * \frac{\eta_{\text{NO}_2}}{100} + \frac{\rho_{\text{NO}_3}^{\text{stoch}}}{1 - Y_{\text{NO}_3}^{\text{bruto}}} * \frac{\eta_{\text{NO}_3}}{100}$$

Op basis van duurproef 2, waarbij de denitrificatie volledig via nitraat verliep, is een methanol/NO₃-N verhouding gevonden van 2.6 kg MeOH/kg NO₃-N (=3.9 kg CZV/kg NO₃-N). Hieruit volgt een bruto yield voor de nitraatreductie van $Y^{\text{bruto}} = 0,34 \text{ kg slib/kg MeOH} (= 0,51 \text{ kg slib/kg CZV})$.

Gedurende duurproef 3 bedroeg de methanol N/verhouding 1.9 kg MeOH/kg N (2.85 kg CZV/kg N). Uit nitrificatie-batchexperimenten bleek de nitrificatie voor 85% via nitriet te verlopen. Hieruit volgt een bruto yield voor de nitrietreductie van $Y^{bruto} = 0,24$ kg slib/ kg MeOH (= 0,36 kg slib/kg CZV). In tabel 1 staan de waarden samengevat.

Tabel 1: C/N verhoudingen voor nitraat- en nitrietreductie

	ρ^{stoch} kg MeOH/kg N	ρ^{tot} kg MeOH/kg N	Y^{bruto} kg DS/kg MeOH
NO ₃ -N reductie	1,90	2,6	0,34
NO ₂ -reductie	1,14	1,8	0,24

Uit duurproef 3 is gebleken dat door voldoende propstroomcondities te handhaven en geen methanol over te doseren er geen verlies aan methanol plaats vindt door aerobe oxidatie.

Het denitrificatierendement is vrij instelbaar met behulp van de recirculatiefactor, maar zal in de praktijk niet meer dan 90 % bedragen.

De verschillende toegepaste membranen zijn gedurende het onderzoek uitgebreid gestest op diverse parameters. De resultaten van dit onderzoek zijn hier weergegeven.

Voorafgaand aan het pilot onderzoek (met actief slib) is met een drietal membranen een aantal basismetingen uitgevoerd ter bepaling van het meest geschikte type membraan (hydrofoob of hydrofiel). Hiertoe zijn de schoonwaterflux (swf), de afvalwaterflux (awf) en de retentie voor CZV, N_{Kj} , P_{tot} en zwevend stof (ruw afvalwater) bepaald. De resultaten van deze proefnemingen zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Basismetingen aan de membraaneigenschappen
P = 4,5 bar(ato) en T = 33°C

		MPB hydrofoob	MPL1 hydrofiel	MPB2 hydrofoob
swf	[l/m ² .h]	82,4	225,5	249,5
awf	[l/m ² .h]	67,7	121,8	167,6
retentie				
CZV		89,6	91,8	92,2
N_{Kj}		5,1	9,6	8,4
P_{tot}		52,1	39,5	62,8
Zwevend stof		100	100	100

swf = schoonwaterflux

awf = afvalwaterflux

Uit de resultaten van tabel 1 lijkt in eerste instantie het MPB2 membraan het meest geschikt. Echter nadat de proefinstallatie was opgestart met actief slib bleek de flux door het MPB2 membraan snel te dalen tot < 15 l/m².h. Dit in tegenstelling tot de flux door het MPL1 membraan (> 40 l/m².h). Op basis hiervan wordt het MPL1 membraan (hydrofiel) het meest geschikt geacht voor het te onderzoeken afvalwater. Het vervolgonderzoek is derhalve uitgevoerd met dit type membraan. Gedurende het onderzoek zijn nog twee andere hydrofiële membranen onderzocht: MPLT (terugspoelbaar) en MPL2.

Invloed van de druk, temperatuur en stroomsnelheid

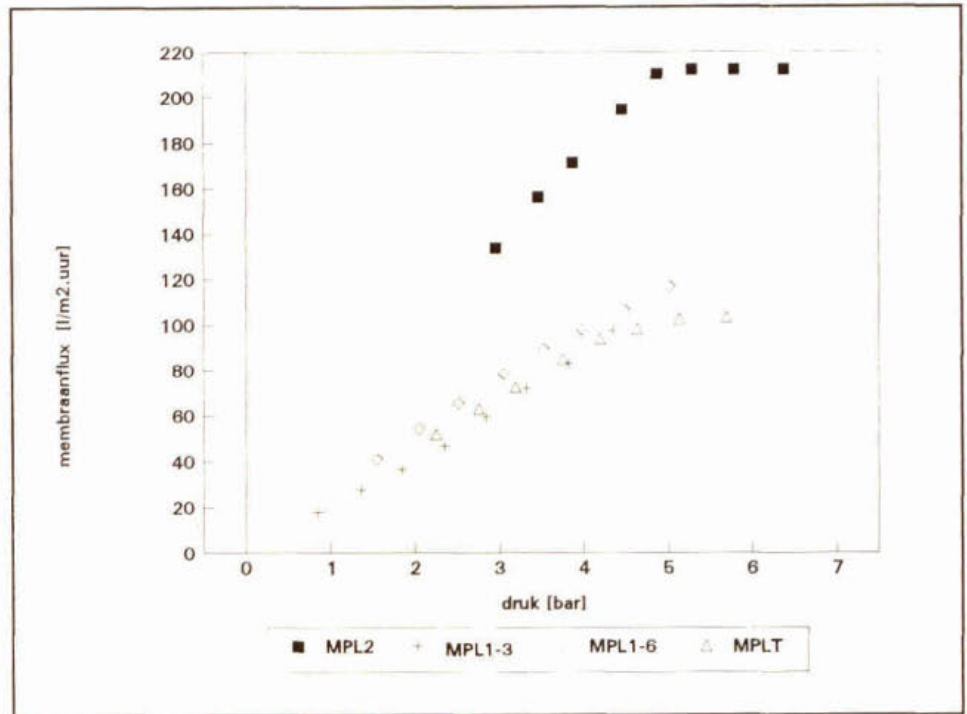
Voor de eigenschappen van de diversen typen ultra-filtratie membranen zijn de invloed van de druk, temperatuur en de stroomsnelheid op de membraanflux nader bekeken. Vier modules zijn hiervoor getest:

- MPL1 (2 stuks: MPL1-3 en MPL1-6)
- MPLT
- MPL2

Aan het eind van de experimenten bleek 20 % van de membranen van het MPLT-moduul verstopt. Dit vertekent het beeld van de resultaten voor het MPLT-membraan. De resultaten van het MPLT-membraan kunnen derhalve niet als representatief worden beschouwd.

Drukafhankelijkheid

In figuur 1 wordt de invloed van de druk op de membraanflux weergegeven.



Figuur 1: Invloed van de druk op de membraanflux

Vanwege het feit dat de modules in serie zijn geschakeld, volgens navolgend aangegeven serie, was het niet mogelijk de membranen te testen over hetzelfde drukbereik.

serieschakeling:

voedingspomp → MPL2 → MPLT → MPL1-6 → MPL1-3 → bioreactor

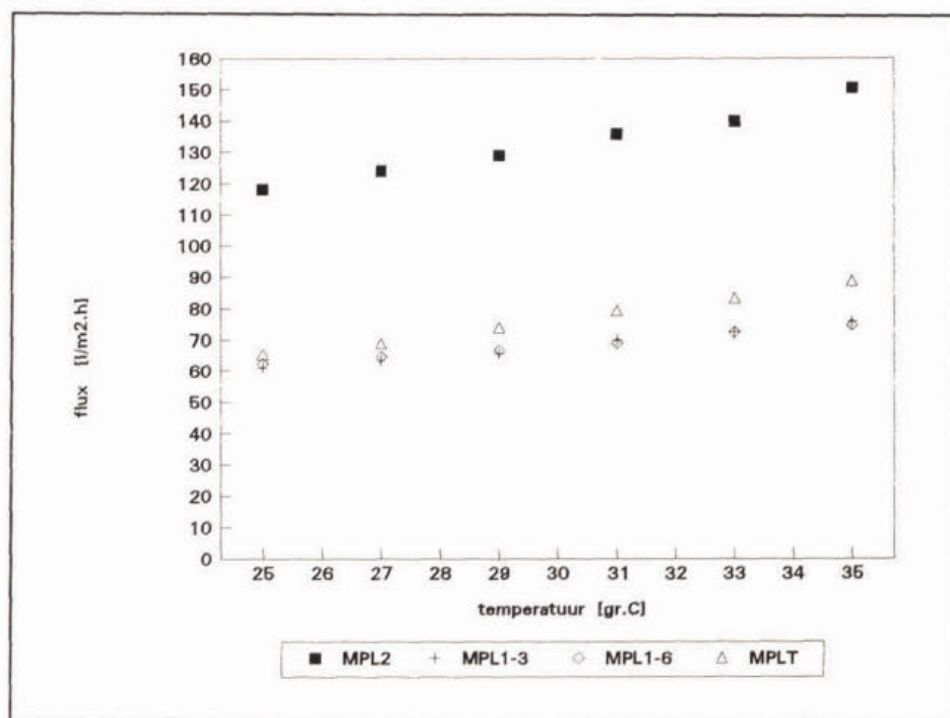
Tijdens deze proefnemingen bedroeg het gemiddelde drukverlies per module 0,675 bar (inclusief het drukverlies over verloopstukken en bochten). Als gevolg van deze drukverliezen zijn de membranen over de volgende drukbereiken getest:

- MPL2 3,0 - 6,4 bar (ato)
- MPLT 2,3 - 5,7 bar (ato)
- MPL1-6 1,6 - 5,0 bar (ato)
- MPL1-3 0,9 - 4,3 bar (ato)

Voor alle membranen is een lineaire toename van de flux waarneembaar bij toenemende druk tot ongeveer 4,5 bar. Boven 4,5 bar gaat de fluxtoename minder snel bij toenemende druk.

Temperatuurafhankelijkheid

In figuur 2 is de gevonden afhankelijkheid van de membraanflux van de temperatuur weergegeven.



Figuur 2: Invloed van de temperatuur op de membraanflux

Tussen de temperatuur en de membraanflux lijkt een lineair verband te bestaan. Uit de literatuur [9] is echter bekend dat het verband tussen de temperatuur en de flux voor behandeling van 'schoon' water kan worden beschreven door onderstaande vergelijking:

$$F_{[T]} = \frac{F_{[25^{\circ}C]}}{\theta^{(25-T)}}$$

F	membraanflux	[l/m².h]
T	temperatuur	[°C]
θ	temperatuurcorrectiefactor	[1,024 -]

Met behulp van regressie is voor de vier membraanmodules de correctiefactor op basis van bovengenoemde vergelijking bepaald. In navolgend overzicht zijn de resultaten van deze berekening weergegeven:

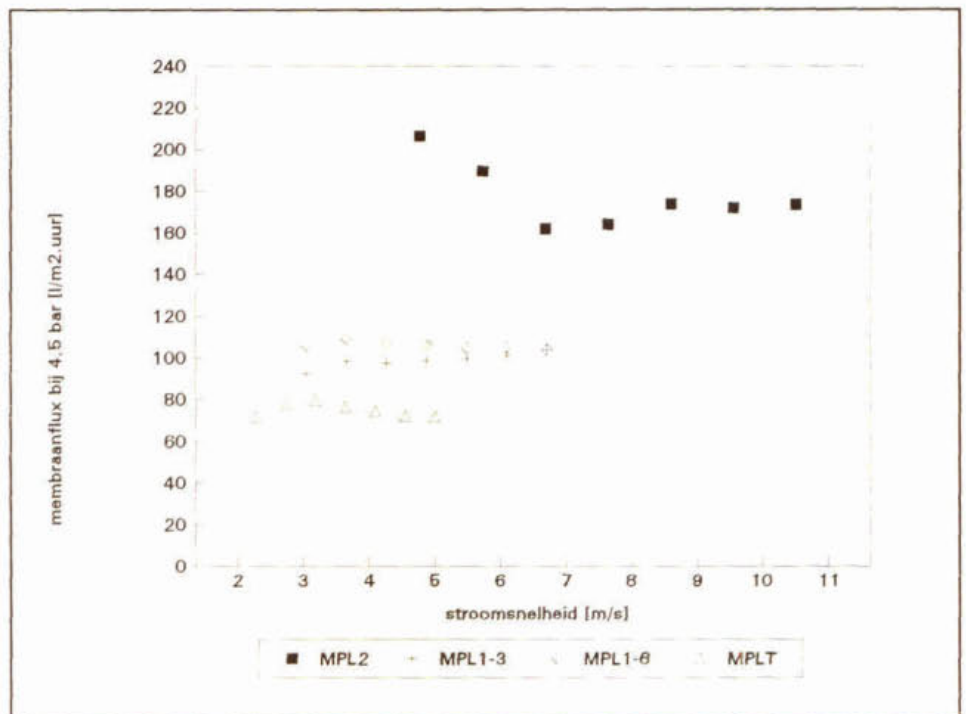
membraan	correctiefactor
MPL2	1,020
MPLT	1,024
MPL1-3	1,017
MPL1-6	1,014

Stroomsnelheidsafhankelijkheid

Vanwege een verschil in doorstroomoppervlak van de verschillende modules was het technisch niet mogelijk de membranen te testen voor dezelfde stroomsnelheden. De membranen zijn getest voor de onderstaande bereiken:

- MPL2 4,8 - 10,5 m/s
- MPLT 2,3 - 5,0 m/s
- MPL1-6 3,1 - 6,7 m/s
- MPL1-3 3,1 - 6,7 m/s

Indien alle fluxen worden gestandaardiseerd naar een druk van 4,5 bar blijkt bij toenemende stroomsnelheden geen toename van de flux op te treden. In figuur 3 worden de gestandaardiseerde membraanfluxen als functie van de stroomsnelheid weergegeven.



Figuur 3: Invloed van de stroomsnelheid op de gestandaardiseerde membraanflux

Voor de invloed van de stroomsnelheid op de membraanflux kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- voor de MPL1-membranen geldt dat bij een stroomsnelheid > 3,8 m/s geen toename van de flux wordt bereikt;
- voor de MPL2-membranen geldt dat bij een stroomsnelheid > 4,8 m/s geen toename van de flux wordt bereikt.

Gezien het feit dat naar alle waarschijnlijkheid tijdens de stroomsnelheidsproeven een gedeelte van de MPLT-membranen verstopt was, kan geen uitspraak worden gedaan over de minimale stroomsnelheid over dit membraan.

Met het IAWQ model is een simulatie uitgevoerd van de Membraan-bioreactor waarbij het influent is gesimuleerd met gefiltreerd en ongefiltreerd (ruw) rejectiewater. Hierbij is het bedienen van de installatie zonder filtratie van het influent op haalbaarheid onderzocht.

Ten behoeve van de simulaties zijn de CZV- en stikstoffracties in het gefiltreerde en ongefiltreerde afvalwater op analytische en biologische (respiratiemetingen) wijze bepaald. Op basis hiervan is navolgende gemiddelde afvalwatersamenstelling vastgesteld.

Samenstelling van gefiltreerd afvalwater

CZV fracties:

inert gesuspendeerd	37 mg/l
inert opgelost	424 mg/l
langzaam afbreekbaar gesuspendeerd	28 mg/l
langzaam afbreekbaar opgelost	509 mg/l
snel afbreekbaar opgelost	2 mg/l

CZV totaal: 1.000 mg/l

N-fracties:

N-organisch gesuspendeerd	52 mg/l
N-organisch opgelost	2 mg/l
NH ₄ -N	945 mg/l
NO ₂ -N / NO ₃ -N	1 mg/l

N-totaal: 1.000 mg/l

Samenstelling van ongefiltreerd (ruw) afvalwater

CZV fracties:

inert gesuspendeerd	252 mg/l
inert opgelost	424 mg/l
langzaam afbreekbaar gesuspendeerd	121 mg/l
langzaam afbreekbaar opgelost	509 mg/l
snel afbreekbaar opgelost	2 mg/l

CZV totaal: 1.308 mg/l

N-fracties:

N-organisch gesuspendeerd	78 mg/l
N-organisch opgelost	2 mg/l
NH ₄ -N	945 mg/l
NO ₂ -N / NO ₃ -N	1 mg/l

N-totaal: 1.026 mg/l

Uit voorgaand overzicht blijkt dat de totale gesuspendeerde fractie CZV in het ruwe afvalwater (28,5 %) aanzienlijk hoger is dan in het gefiltreerde afvalwater (6,5 %). In het rejectiewater komen vrijwel geen snel biodegradeerbare organische stoffen voor (< 0,2 %). Het gehalte aan stikstof is vrijwel volledig in de vorm van NH₄-N aanwezig.

De simulaties zijn uitgevoerd onder de volgende procesomstandigheden:

influentdebiet	150	l/h
interne recirculatie	3.000	l/h
recirculatie over membranen	20.000	l/h
zuurstofconcentratie	2	mg/l
temperatuur	33	°C
drogestofgehalte	3	%

De volgende situaties zijn gesimuleerd:

situatie	influent	MeOH dosering [mgCZV/l]
1	gefiltreerd	0
2	gefiltreerd	4500
3	gefiltreerd	5000
4	gefiltreerd	5500
5	ruw	0
6	ruw	4500
7	ruw	5000
8	ruw	5500

Tijdens de simulaties is de slibleeftijd onder de betreffende omstandigheden berekend. Daarnaast zijn de CZV- en stikstofconcentraties in het effluent berekend. De resultaten worden gepresenteerd in tabel 1:

Tabel 1: Simulaties met het IAWQ model

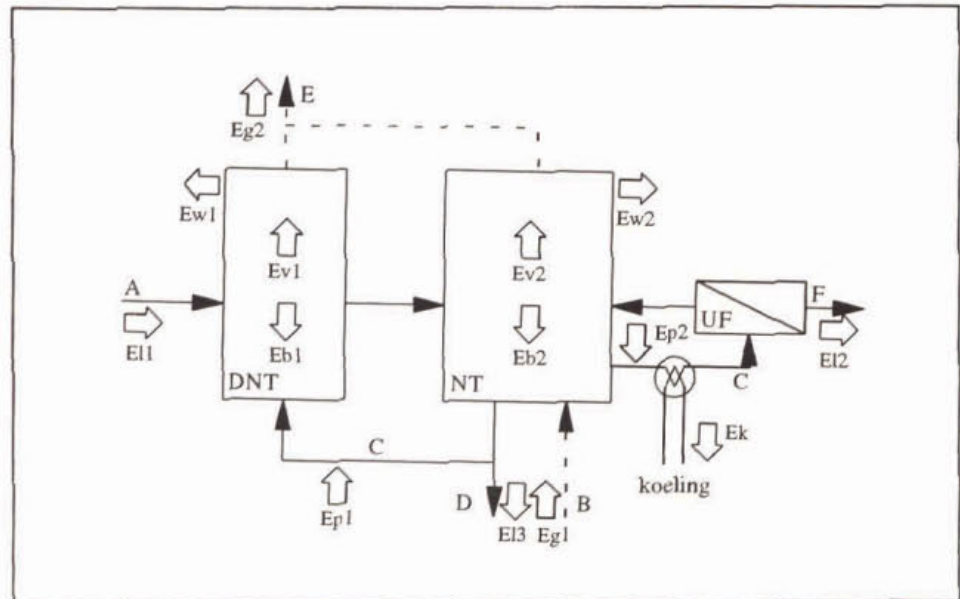
situatie	slib- leeftijd [dag]	effluentconcentraties				
		N-org [mg/l]	NH ₄ -N [mg/l]	NO ₃ -N [mg/l]	CZV _{kt} [mg/l]	CZV _{inert} [mg/l]
1	70	1,1	0,9	939	4,8	424
2	10	0,7	1,3	222	2,5	424
3	9	0,7	1,5	143	2,3	424
4	8	0,7	1,5	62	2,3	424
5	28,5	1,2	1,0	956	4,8	424
6	8	0,7	1,4	231	2,4	424
7	7	0,7	1,6	151	2,4	424
8	6,5	0,7	1,6	72	2,4	424

CZV_{kt} = snel afbreekbaar CZV

Uit de simulaties blijkt dat de nitrificatie onder de gesimuleerde omstandigheden volledig is. Een verhoogd gehalte aan inert en langzaam afbreekbaar gesuspenderd organisch materiaal heeft een aanzienlijke invloed op de sibleeftijd. De groeisnelheid van nitrificerende bacteriën is onder de gegeven omstandigheden ($T = 33^{\circ}\text{C}$) echter zodanig hoog dat de lagere sibleeftijd geen beperking vormt voor het nitrificatieproces.

In figuur 1 is in een principeschets van de Membraan-bioreactor een schematische voorstelling van de energiebalans aangegeven. In deze balans zijn de volgende onderdelen opgenomen:

- E_i energie-inhoud vloeistofstromen (influent, effluent, spuislib);
- E_g energie-inhoud gasstromen (lucht, afgas);
- E_p energiedissipatie door pompen (recirculatie, membraanfiltratie);
- E_b reactiewarmte die vrijkomt bij biologische omzettingen (nitrificatie, CZV-oxidatie);
- E_v verdamping;
- E_w warmteverlies door wanden;
- E_k koeling.



Figuur 1: Schematische voorstelling energiebalans Membraan-bioreactor

- A - influent*
- B - beluchting*
- C - recirculatie*
- D - spuislib*
- E - afgas*
- F - effluent*

De verschillende energietermen kunnen op de volgende wijze worden berekend [VDI Wärmeatlas].

E_l - vloeistofstromen

$$E_l = M * c * \Delta T$$

M	massavracht	[kg/s]
c	soortelijke warmte	[J/kg.K]
ΔT	verschil t.o.v. standaard T	[K]

$$E_l = E_{l1} - E_{l2} - E_{l3}$$

E_g - gasstromen

$$E_g = M * c * \Delta T$$

$$E_g = E_{g1} - E_{g2}$$

E_p - dissipatie door pompen

$$E_p = P * \frac{\eta_{eff}}{100}$$

PV	geïnstalleerd vermogen	[kW]
η_{eff}	effectief rendement	[%]

E_b - biologische warmteproductie

Voor nitrificatie geldt navolgende formule:

$$E_{b-nit} = \frac{S_{b-NKj}}{86400} * DS * V_{aer} * E_{nit}$$

S_{b-NKj}	stikstofbelasting	[kg N/kg DS.d]
DS	drogestofgehalte	[kg/m ³]
V_{aer}	aëroob reactorvolume	[m ³]
E_{nit}	biologische warmtepr. N-oxid.	[J/kg N]

Voor CZV-oxidatie geldt navolgende formule:

$$E_{b-CZV} = \frac{S_{b-CZV}}{86400} * DS * V_{tot} * E_{CZV}$$

S_{b-CZV}	CZV-belasting	[kg CZV/kg DS.d]
V_{tot}	totaal reactorvolume	[m ³]
E_{CZV}	biologische warmtepr. CZV-oxid.	[J/kg CZV]

E_v verdamping

$$E_v = \frac{Q_{\text{lucht}}}{3600} * \Delta H_v * (p_w - p_{w\text{-uit}})$$

Q_{lucht}	luchtdebiet	[m ³ /h]	
ΔH_v	verdampingsenthalpie water		[J/kg]
p_w	H ₂ O-conc. ingaande luchtstroom	[kg/m ³]	
$p_{w\text{-uit}}$	verzadigingswaarde H ₂ O in lucht	[kg/m ³]	

E_w warmteverlies door de wanden

$$E_w = U * A * \Delta T$$

U	warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W/m ² .K]
A	warmte-overdragend oppervlak	[m ²]
ΔT	temperatuurverschil	[K]

E_k koeling

Uitgaande van een constante temperatuur in de Membraan-bioreactor geldt volgende relatie:

$$E_k = E_l + E_g + E_p + E_b - E_v - E_w$$

Voor de berekening van het benodigde koelvermogen worden de volgende uitgangspunten aangehouden (zomersituatie: meest extreme temperatuur):

- de omgevingstemperatuur is 33 °C;
- de reactortemperatuur is 33 °C;
- de influenttemperatuur is 25 °C;
- de temperatuur van de ingaande lucht is 60 °C;
- energie door biologische omzettingsreactie:
 - nitrificatie $E_{\text{nit}} = 26660 \text{ kJ/kgN}$;
 - CZV-oxidatie $E_{\text{CZV}} = 14065 \text{ kJ/kgO}_2$;
- het verschil in H₂O-verzadigingswaarde van de in en uitgaande lucht is 60%.

Bijlage 12 Dimensionering varianten

Variant 1 (100.000 v.e., 1900 mg N/l, 50 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	37	m ³
Denitrificatiereactor	:	16	m ³
Membraan oppervlak	:	19	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	183	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	15.3	kW
Energie membraanfiltratie	:	9.6	kW
Koeling	:	52	kW
Energie koeling	:	0.5	kW
Methanolverbruik	:	0.19	ton/d
Loogverbruik	:	0.22	ton/d

Variant 2 (100.000 v.e., 950 mg N/l, 100 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	37	m ³
Denitrificatiereactor	:	16	m ³
Membraan oppervlak	:	37	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	189	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	15.9	kW
Energie membraanfiltratie	:	19.3	kW
Koeling	:	52	kW
Energie koeling	:	0.5	kW
Methanolverbruik	:	0.18	ton/d
Loogverbruik	:	0.34	ton/d

Variant 3 (100.000 v.e., 475 mg N/l, 200 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	37	m ³
Denitrificatiereactor	:	16	m ³
Membraan oppervlak	:	74	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	203	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	17.0	kW
Energie membraanfiltratie	:	38.5	kW
Koeling	:	53	kW
Energie koeling	:	0.5	kW
Methanolverbruik	:	0.16	ton/d
Loogverbruik	:	0.52	ton/d

Variant 4 (400.000 v.e., 1900 mg N/l, 200 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	93	m ³
Denitrificatiereactor	:	54	m ³
Membraan oppervlak	:	74	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	731	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	61.3	kW
Energie membraanfiltratie	:	38.5	kW
Koeling	:	230	kW
Energie koeling	:	2.3	kW
Methanolverbruik	:	0.77	ton/d
Loogverbruik	:	0.88	ton/d

Variant 5 (400.000 v.e., 900 mg N/l, 400 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	93	m ³
Denitrificatiereactor	:	54	m ³
Membraan oppervlak	:	147	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	756	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	63.5	kW
Energie membraanfiltratie	:	77.0	kW
Koeling	:	232	kW
Energie koeling	:	2.3	kW
Methanolverbruik	:	0.73	ton/d
Loogverbruik	:	1.36	ton/d

Variant 6 (400.000 v.e., 475 mg N/l, 800 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	93	m ³
Denitrificatiereactor	:	54	m ³
Membraan oppervlak	:	293	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	811	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	68.0	kW
Energie membraanfiltratie	:	154.0	kW
Koeling	:	235	kW
Energie koeling	:	2.4	kW
Methanolverbruik	:	0.65	ton/d
Loogverbruik	:	2.08	ton/d

Variant 7 (500.000 v.e., 2000 mg N/l, 600 m³/d):

Nitrificatiereactor	:	2 x 160	m ³
Denitrificatiereactor	:	1 x 160	m ³
Membraan oppervlak	:	220	m ²
Beluchttingscapaciteit	:	2304	Nm ³ /h
Energie beluchting	:	193.1	kW
Energie membraanfiltratie	:	115.5	kW
Koeling	:	742	kW
Energie koeling	:	7.4	kW
Methanolverbruik	:	2.43	ton/d
Loogverbruik	:	2.71	ton/d

Bijlage 13 Berekening stichtingskosten

Voor de diverse varianten is bij de berekening van de stichtingskosten van de volgende uitgangspunten uitgegaan:

Bijkomende kosten	:	10 %
Onvoorzien	:	10 %
Advieskosten	:	10 %
BTW	:	17,5 %

Variant 1 (100.000 v.e., 1900 mg N/l, 50 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 1770.000,-
Bouwsom civiel	f 190.000,-
Bouwsom totaal	f 1.960.000,-
bijkomende kosten	f 195.000,-
Onvoorzien	f 215.000,-
Advieskosten	f 235.000,-
BTW	f 455.000,-
Totaal	f 3.060.000,-

Variant 2 (100.000 v.e., 950 mg N/l, 100 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 2.110.000,-
Bouwsom civiel	f 200.000,-
Investering totaal	f 2.310.000,-
bijkomende kosten	f 230.000,-
Onvoorzien	f 250.000,-
Advieskosten	f 275.000,-
BTW	f 535.000,-
Totaal	f 3.600.000,-

Variant 3 (100.000 v.e., 475 mg N/l, 200 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 2.680.000,-
Bouwsom civiel	f 210.000,-
Bouwsom totaal	f 2.890.000,-
bijkomende kosten	f 290.000,-
Onvoorzien	f 320.000,-
Advieskosten	f 350.000,-
BTW	f 670.000,-
Totaal	f 4.520.494,-

Variant 4 (400.000 v.e., 1900 mg N/l, 200 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 3.270.000,-
Bouwsom civiel	f 250.000,-
Investering totaal	f 3.520.000,-
bijkomende kosten	f 345.000,-
Onvoorzien	f 385.000,-
Advieskosten	f 425.000,-
BTW	f 815.000,-
Totaal	f 5.490.000,-

Variant 5 (400.000 v.e., 950 mg N/l, 400 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 4.070.000,-
Bouwsom civiel	f 260.000,-
Bouwsom totaal	f 4.330.000,-
bijkomende kosten	f 430.000,-
Onvoorzien	f 480.000,-
Advieskosten	f 520.000,-
BTW	f 1.010.000,-
Totaal	f 6.770.000,-

Variant 6 (100.000 v.e., 475 mg N/l, 800 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 4.880.000,-
Bouwsom civiel	f 280.000,-
Bouwsom totaal	f 5.160.000,-
bijkomende kosten	f 520.000,-
Onvoorzien	f 570.000,-
Advieskosten	f 620.000,-
BTW	f 1.200.000,-
Totaal	f 8.070.000,-

Variant 7 (500.000 v.e., 2000 mg N/l, 600 m³/d)

Bouwsom electromechanisch	f 5.170.000,-
Bouwsom civiel	f 260.000,-
Bouwsom totaal	f 5.430.000,-
bijkomende kosten	f 540.000,-
Onvoorzien	f 600.000,-
Advieskosten	f 660.000,-
BTW	f 1.260.000,-
Totaal	f 8.490.000,-

Bijlage 14 Berekening exploitatiekosten

Voor de diverse varianten is bij de exploitatieberekening is van de volgende uitgangspunten uitgegaan:

Afschrijving electromechanisch	:	15 j
Afschrijving civiel	:	30 j
Rente percentage	:	8 %
Electriciteitskosten	:	f 0,15/kWh
Methanol (100 %)	:	f 0,65/kg
Loog (33%)	:	f 0,27/kg
Membraanvervangng	:	f 400,-/m ² /j
Onderhoud	:	3 % electromechanisch 0,5 % civiel
Personeel	:	f 80.000,-/j
Bezetting	:	2,5 mensdag/week

Variant 1 (100.000 v.e., 1900 mg N/l, 50 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 322.488,-/j	f 9.30/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 26.881,-/j	f 0.78/kg N
Electriciteitskosten	f 33.459,-/j	f 0.96/kg N
Methanolkosten	f 53.542,-/j	f 1.54/kg N
Loogkosten	f 20.861,-/j	f 0.60/kg N
Membraanvervangng	f 7.310,-/j	f 0.21/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 1.15/kg N
Onderhoud E-M	f 75.281,-/j	f 2.17/kg N
Onderhoud civiel	f 1.376,-/j	f 0.04/kg N
Totaal	f 581.171,-/j	f 16.70/kg N

Variant 2 (100.000 v.e., 950 mg N/l, 100 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 385.341,-/j	f 11.11/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 27.228,-/j	f 0.79/kg N
Electriciteitskosten	f 46.845,-/j	f 1.35/kg N
Methanolkosten	f 50.728,-/j	f 1.46/kg N
Loogkosten	f 31.996,-/j	f 0.92/kg N
Membraanvervangng	f 14.620,-/j	f 0.42/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 1.15/kg N
Onderhoud E-M	f 89.954,-/j	f 2.59/kg N
Onderhoud civiel	f 1.394,-/j	f 0.04/kg N
Totaal	f 688.106,-/j	f 19.80/kg N

Variant 3 (100.000 v.e., 475 mg N/l, 200 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 490.035,-/j	f 14.13/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 28.617,-/j	f 0.83/kg N
Electriciteitskosten	f 73.618,-/j	f 2.12/kg N
Methanolkosten	f 38.428,-/j	f 1.11/kg N
Loogkosten	f 41.736,-/j	f 1.20/kg N
Membraanvervangng	f 29.240,-/j	f 0.84/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 1.15/kg N
Onderhoud E-M	f 114.395,-/j	f 3.29/kg N
Onderhoud civiel	f 1.464,-/j	f 0.04/kg N
Totaal	f 857.533,-/j	f 24.70/kg N

Variant 4 (400.000 v.e., 475 mg N/l, 800 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 597.105,-/j	f 4.31/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 44.947,-/j	f 0.32/kg N
Electriciteitskosten	f 134.130,-/j	f 0.97/kg N
Methanolkosten	f 214.062,-/j	f 1.54/kg N
Loogkosten	f 83.444,-/j	f 0.60/kg N
Membraanvervangng	f 29.240,-/j	f 0.21/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 0.29/kg N
Onderhoud E-M	f 139.388,-/j	f 1.01/kg N
Onderhoud civiel	f 1.748,-/j	f 0.01/kg N
Totaal	f 1.284.064,-/j	f 9.20/kg N

Variant 5 (400.000 v.e., 950 mg N/l, 400 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 743.823,-/j	f 5.36/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 36.258,-/j	f 0.26/kg N
Electriciteitskosten	f 187.676,-/j	f 1.35/kg N
Methanolkosten	f 202.911,-/j	f 1.46/kg N
Loogkosten	f 127.985,-/j	f 0.92/kg N
Membraanvervangng	f 58.480,-/j	f 0.42/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 0.29/kg N
Onderhoud E-M	f 173.637,-/j	f 1.25/kg N
Onderhoud civiel	f 1.855,-/j	f 0.01/kg N
Totaal	f 1.572.625,-/j	f 11.30/kg N

Variant 6 (400.000 v.e., 1900 mg N/l, 200 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 891.455,-/j	f 6.43/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 39.453,-/j	f 0.28/kg N
Electriciteitskosten	f 294.769,-/j	f 2.13/kg N
Methanolkosten	f 180.609,-/j	f 1.30/kg N
Loogkosten	f 196.160,-/j	f 1.41/kg N
Membraanvervangning	f 116.959,-/j	f 0.84/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 0.29/kg N
Onderhoud E-M	f 208.102,-/j	f 1.50/kg N
Onderhoud civiel	f 2.019,-/j	f 0.01/kg N
Totaal	f 1.969.526,-/j	f 14.20/kg N

Variant 7 (500.000 v.e., 2000 mg N/l, 600 m³/d)

	Jaarlasten	Kosten per kg N verwijderd
Rente & afschrijving E-M	f 945.355,-/j	f 2.16/kg N
Rente & afschrijving civiel	f 35.424,-/j	f 0.08/kg N
Electriciteitskosten	f 415.326,-/j	f 0.95/kg N
Methanolkosten	f 677.168,-/j	f 1.55/kg N
Loogkosten	f 255.715,-/j	f 0.58/kg N
Membraanvervangning	f 87.719,-/j	f 0.20/kg N
Personele kosten	f 40.000,-/j	f 0.09/kg N
Onderhoud E-M	f 220.685,-/j	f 0.50/kg N
Onderhoud civiel	f 1.813,-/j	f 0.00/kg N
Totaal	f 2.679.206,-/j	f 6.10/kg N

