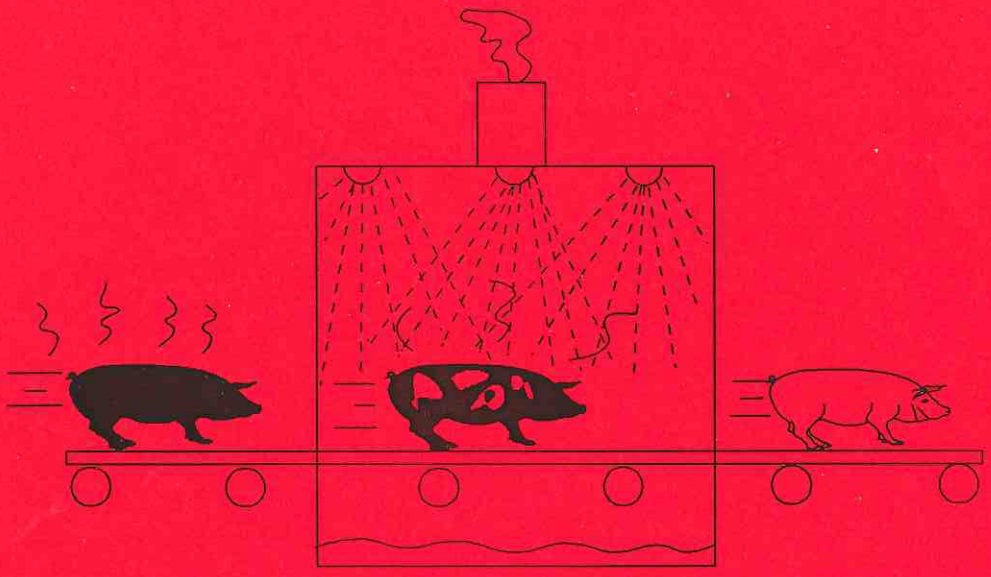
BIOWASSERS IN NEDERLAND



I. H. G. Satter

IMAG-DLO

Landbouwuniversiteit Wageningen

Vakgroep Agrotechniek & -fysica LMBU & TN

Scriptie nr.

BIOWASSERS IN NEDERLAND

I. H. G. Satter
72 - 01 - 28 - 728 - 020

april 1996

Examenvak	:	Afstudeervak Landbouwtechniek, A550 - 709
Hoogleraar	:	Prof. dr ir L. Speelman
Belasting	:	520 sbu
Examenvak	:	Afstudeervak Natuurkunde, A550 - 701
Hoogleraar	:	Prof. dr ir G. P. A. Bot
Belasting	:	520 sbu
Begeleiding	:	ir R. Scholtens
		ir G. J. Monteny

L a n d b o u w u n i v e r s i t e i t W a g e n i n g e n

Vakgroep Agrotechniek & -fysica LMBU & TN

Scriptie nr.

SYMBOLENLIJST A

$C_{s,me}$	is de concentratie van stof s in de bulk van het medium me	[mol i/m^3]
$C_{s,i,me}$	is de concentratie van stof s aan het grensvlak i in het medium me	[mol/m^3]
$C_{s,e,me}$	is de concentratie van stof s in het medium me die in evenwicht is met de concentratie van stof s in de bulk, $C_{s,me}$	
$X_{s,me}$	is de verhouding tussen het aantal molen van stof s en het aantal molen van het media me	[-]
$Y_{s,me}$	is de verhouding tussen het aantal molen van stof s en het aantal molen van het media me	[-]
ϕ_{me}	is het debiet van het medium me	[m^3/s]
L_v	is het volumetrische vloeistofdebiet per dwarsoppervlak	[m^3/m^2·s]
L_m	is het molaire vloeistofdebiet per dwarsoppervlak	[mol/m^2·s]
L'	is het massadebiet van de vloeistof	[kg/s]
G_m	is het molaire gasdebiet per dwarsoppervlak	[mol/m^2·s]
G'	is het massadebiet van het gas	[kg/s]
v_{me}	is de snelheid van het medium me	[m/s]
$N_{s,me}$	is de molaire flux van stof s in het medium me per overdrachtsoppervlak	[mol/m^2·s]
$N'_{s,me}$	is de molaire flux van stof s in het medium me	[mol/s]
$N^*_{s,me}$	is de molaire flux van stof s in het geval van absorptie met een chemische reactie in het medium me per overdrachtsoppervlak	[mol/m^2·s]
$D_{s,me}$	is de diffusiecoëfficiënt van stof s in het medium me	[m^2/s]
$k_{s,me}$	is de stofoverdrachtscoëfficiënt van stof s in medium me	[m/s]
$K_{s,me}$	is de overall-stofoverdrachtscoëfficiënt van stof s in het medium me	[m/s]
H_s	is de verdelingscoëfficiënt tussen de concentraties van stof s in twee verschillende media	[-]
m_s	is de verdelingscoëfficiënt tussen de molaire fracties van stof s in twee verschillende media	[-]
N_{me}	is het aantal overdrachtseenheden gebaseerd op het medium me	[-]
H_{me}	is de hoogte van een overdrachtseenheid gebaseerd op het medium me	[m]
N_{Ome}	is het aantal overall overdrachtseenheden gebaseerd op het medium me	[-]
H_{Ome}	is de hoogte van een overall-overdrachtseenheid gebaseerd op het medium me	[m]
ρ_{me}	is de dichtheid van het medium me	[kg/m^3]
μ_{me}	is de dynamische viscositeit van het medium me	[Pa·s]
ϵ_{me}	is de porositeit van het medium me	[-]
V_{me}	is het volume van het medium me	[m^3]
M_s	is het molecuulgewicht van stof s	[g/mol]
Q_s	is de omzettingssnelheid van substraat s	[mol/s]
Q_{spec}	is de specifieke omzetting van stof s naar andere stoffen in een bepaald medium m	[mol/m^3·s]

Subscripten:

s	NH_3, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, H_2O, lucht
me	ga voor gas, vl voor vloeistof, lu voor lucht en wa voor water

VOORWOORD

Voor u ligt het verslag van een gecombineerd 6 maands afstudeervak naar biowassers dat uitgevoerd is bij het IMAG-DLO. Alhoewel ik in het begin meermalen gedacht heb, waar ben ik aan begonnen, kijk ik op dit moment toch tevreden terug op dit onderzoek. Tijdens dit afstudeervak is mij steeds duidelijker geworden hoe en wanneer een biowasser functioneert. Ik hoop dat ook voor u, na het lezen van dit verslag, de biowasser niet langer een black-box is.

Dit afstudeervak zou ik niet voltooid kunnen hebben zonder de begeleiding van de heren Speelman, Bot, Scholtens en Monteny.

Het houden van de enquête was niet mogelijk geweest als de fabrikanten en de boeren niet meegewerkt hadden. Ik hoop dan ook van harte dat deze mensen iets aan het resultaat van dit afstudeervak kunnen hebben.

Verder wil ik alle mensen bedanken die mij bewust of onbewust aan het denken zetten over de ammoniakproblematiek en het noodzakelijk zijn van een oplossing daarvoor. Hierbij denk ik vooral aan de collega's van de afdeling Milieutechniek van het IMAG, mede-studenten, afdelingsgenoten, vrienden en familie.

Nu is de "spons" eindelijk leeggeknepen en wordt het dus tijd om het verslag te gaan lezen.

Inge Satter
(april '96)

SAMENVATTING

De Nederlandse overheid heeft gesteld dat in het jaar 2000 de NH_3-emissie met 70% gereduceerd moet zijn ten opzichte van het jaar 1980. De NH_3-emissie uit stal en opslag blijkt op dit moment binnen de landbouw de grootste bron te zijn. Een biowasser is één van de mogelijke technieken om de NH_3-emissie uit stal en opslag te reduceren.
Als de biowasser wordt toegepast in de veehouderij dan wordt NH_3 vanuit lucht overgedragen naar water. Deze overdracht vindt plaats als er een intensief contact heerst tussen lucht en water, dit kan gerealiseerd worden door een pakkingsmateriaal. Als NH_3 opgelost is in water dan dissocieert NH_3 bij lage pH volledig tot NH_4^+. Deze NH_4^+ kan door de bacteriën Nitrosomonas en Nitrobacter onder de juiste omstandigheden omgezet worden in nitriet en nitraat. Dit proces wordt nitrificatie genoemd. Ammonia, ammonium, nitriet en nitraat zijn dus terug te vinden in het water van de biowasser. Als de concentraties in het water van deze componenten te hoog worden dan neemt het rendement van de biowasser af. Daarom is het nodig dat een bepaalde hoeveelheid water uit de biowasser wordt gevoerd, het spuiwater. Door kwanitificatie van de processen uit de biowasser is het mogelijk om het volume van de wassectie van de biowasser bij een bepaald rendement te schatten.
In de praktijk worden biowassers toegepast die een gemiddeld rendement van 70 - 80 %. Door middel van een enquête is informatie verkregen over de tevredenheid van de gebruiker over het functioneren van deze biowassers. Het bleek dat vooral de hoge aanschafkosten van de biowasser en de kosten voor het afvoeren van het vele spuiwater de grootste nadelen aan het gebruik van de biowasser zijn. De biowasser functioneert technisch goed en blijkt een gemiddeld rendement van 80% te halen.
Om het rendement van de biowasser te kunnen voorspellen zijn de processen absorptie, dissociatie en nitrificatie fysisch beschreven. Het model dat deze processen beschrijft wordt BIOWAS genoemd. Het model BIOWAS voorspelt de NH_3-reductie van de biowasser als deze in evenwicht is. Als bekend is wat de debieten zijn en wat de ingaande NH_3-concentratie in de lucht is dan berekent BIOWAS de uitgaande NH_3-concentratie in de lucht en de concentraties NH_4-N, NO_2-N en NO_3-N in het spuiwater. Een aantal parameters blijken de uitkomst van het model sterk te beïnvloeden. De waarde van deze parameters moet dus van te voren nauwkeurig bekend zijn.
Indien de technische en de praktische werking van de biowasser voldoen aan bijvoorbeeld de eis om 70% NH_3-reductie te halen, dan kan de biowasser wettelijk worden opgenomen als ammoniakemissiebeperkende maatregel. De potentiële NH_3-reductiecapaciteit van een biowasser kan op grond van de ontwerptheorie en het model BIOWAS geschat worden.

INHOUDSOPGAVE

SYMBOLENLIJST A

VOORWOORD x

SAMENVATTING xx

INHOUDSOPGAVE xxx

1 INLEIDING 1 - 1
1.1 De biowasser 1 - 2
1.2 Voorgaand onderzoek naar de biowasser 1 - 3
1.3 Doel van dit onderzoek 1 - 3

2 PROCESSEN IN DE BIOWASSER 2 - 1
2.1 Stromingsprincipe van gas en vloeistof in de wassectie 2 - 2
2.2 Verdeling van vloeistof en gas in de wassectie 2 - 3
2.2.1 De vloeistofverdeling in de wassectie 2 - 4
2.2.2 Drukval in wassectie 2 - 6
2.3 Absorptie in de biowasser 2 - 7
2.3.1 Bepaling van de snelheid van de absorptie 2 - 9
2.3.2 Toepassing van de wet van Henry 2 - 11
2.3.3 Bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënten voor ammonia 2 - 14
2.3.4 Bepaling van de Henry-constante voor ammonia 2 - 16
2.4 Chemische reactie in de wassectie 2 - 18
2.4.1 Bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënt k_{aNtot} 2 - 20
2.4.2 Bepaling van de verdelingscoëfficiënt, H_{aNtot} 2 - 20
2.5 Nitrificatie 2 - 21
2.5.1 De groei van Nitrosomonas en Nitrobacter 2 - 22
2.5.2 Factoren die de nitrificatie beïnvloeden 2 - 25
2.5.2.1 De remming door de aanwezigheid van substraten en produkten 2 - 25
2.5.2.2 De remming door zuurstof 2 - 26
2.5.2.3 De remming door de temperatuur 2 - 26
2.5.2.4 De remming door de pH 2 - 27
2.5.2.5 De remming in de biofilm 2 - 27

3 ONTWERPEN VAN EEN BIOWASSER 3 - 1
3.1 Theorie over het ontwerpen van de biowasser op basis van absorptie 3 - 2
3.1.1 Ontwerpeisen voor de ventilatie door de biowasser 3 - 2
3.1.2 Ontwerpeisen voor de hoeveelheid reductie van de verontreiniging 3 - 3
3.1.2.1 Keuze van de wasvloeistof 3 - 3
3.1.2.2 Keuze van het pakkingsmateriaal 3 - 3
3.1.2.3 Keuze van de diameter van de wassectie, door het dwarsoppervlak te bepalen 3 - 5
3.1.2.4 Bepaling van de hoogte van de wassectie 3 - 7
3.1.2.4.1 Bepaling van N_{OG} 3 - 12
3.1.2.4.2 Bepaling van H_G en H_{VL} 3 - 13

3.1.2.5 Samenvatting van de stappen in het ontwerpproces van de wassectie 3 - 14
3.1.3 Andere aspecten die een rol spelen bij het ontwerpen van de biowasser 3 - 14
3.1.3.1 Uitvoeringsvorm van de druppelvanger 3 - 15
3.1.3.2 Uitvoeringsvorm van de vloeistofverdeler 3 - 15
3.1.3.3 Uitvoeringsvorm van de pakketondersteuning 3 - 15
3.2 Voorbeeld van het ontwerpen van de wassectie van de biowasser op grond van absorptiegegevens 3 - 15
3.2.1 Keuze van het pakkingsmateriaal 3 - 16
3.2.2 Gegevens over de oplosbaarheid van NH_3 van lucht naar water 3 - 16
3.2.3 Bepalen van N_{OG} 3 - 17
3.2.4 Bepalen van het dwarsoppervlak A 3 - 17
3.2.5 Bepalen van de hoogte Z van de wassectie 3 - 18
3.3 Het instellen van de hoeveelheid spuiwater 3 - 19
3.4 Aanpassing van het ontwerp met betrekking tot dissociatie 3 - 19
3.5 Voorbeeldontwerp van de wassectie op basis van absorptie en dissociatie 3 - 19
3.6 Nitrificatie en het ontwerp van de biowasser 3 - 20
3.7 Mogelijkheden voor het verwerken van het spuiwater 3 - 21
3.8 Uitvoeringsvormen van diverse typen biowassers 3 - 21

4 ENQUÊTE 4 - 1
4.1 Het opstellen van de enquête 4 - 1
4.2 Informatie over de respondenten 4 - 5
4.3 Installatie van de biowasser 4 - 8
4.3.1 Installatie in een nieuwe stal 4 - 9
4.3.2 Installatie in een bestaande stal 4 - 9
4.4 Periodiek onderhoud aan de biowasser 4 - 10
4.4.1 Reinigen van het pakkingsmateriaal 4 - 10
4.4.2 Andere onderhoudswerkzaamheden 4 - 12
4.5 Storingen aan de biowasser 4 - 13
4.5.1 Storingen aan de ventilator 4 - 13
4.5.2 Storingen aan de circulatiepomp 4 - 13
4.5.3 Storingen aan de sproeiers 4 - 14
4.5.4 Storingen aan de spuiafvoer 4 - 14
4.5.5 Andere storingen aan de biowasser 4 - 15
4.6 Controles aan de biowasser 4 - 15
4.6.1 Controle van de NH_3-reductie van de biowasser 4 - 16
4.6.2 Controle van de geurreductie 4 - 17
4.6.3 Controle van de pH van het waswater 4 - 17
4.6.4 Controleren van de technische werking 4 - 17
4.7 Opstarten van de biowasser na stilstand 4 - 18
4.7.1 Opstarten van de biowasser na installatie 4 - 18
4.7.2 Opstarten van de biowasser na onderhoud 4 - 19
4.8 Tevredenheid respondenten over de biowasser 4 - 20
4.8.1 Tevredenheid over het technisch functioneren van de biowasser 4 - 20
4.8.2 Tevredenheid over het biologisch functioneren van de biowasser 4 - 20
4.8.3 Arbeidsuren voor het laten functioneren van de biowasser 4 - 21
4.8.4 Voor- en nadelen van het gebruik van de biowasser 4 - 21
4.9 Conclusie van de enquête 4 - 21

5 FYSISCH MODEL VAN DE PROCESSEN IN DE BIOWASSER 5 - 1

5.1 **Fysische beschrijving van de overdracht van NH_3 van lucht naar water** 5 - 2
5.1.1 NH_3-balans van het volume-element lucht 5 - 2
5.1.2 NH_3-balans van het volume-element water 5 - 3
5.1.3 Toepassing van de wet van Henry op de NH_3-balans van lucht en water 5 - 5
5.1.4 Discretiseren van de NH_3-balans van lucht en water met Euler-Forward 5 - 6
5.1.5 Het bepalen van de tijdsconstantes van het absorptieproces 5 - 7
5.2 **Fysische beschrijving van de absorptie van NH_3 van lucht naar water met het optreden van dissociatie** 5 - 9
5.3 **Modelleren van de nitrificatie in het fysisch model van absorptie en dissociatie** 5 - 10
5.3.1 Modelleren van het onderhoud van Nitrosomonas 5 - 10
5.3.2 Modelleren van het onderhoud van Nitrobacter 5 - 11
5.3.3 Het opstellen van de ammonium-, nitriet- en de nitraatbalans in water 5 - 11
5.4 **Modelleren van het reservoir** 5 - 12
5.5 **Definitieve model "BIOWAS"** 5 - 14

6 **VALIDATIE VAN HET MODEL BIOWAS** 6 - 1
6.1 **Methode van validatie** 6 - 1
6.2 **Resultaten van de validatie van het model BIOWAS** 6 - 3

7 **GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN HET MODEL BIOWAS** 7 - 1
7.1 **Gevoeligheid voor de concentraties NH_3 en NH_4^+ in het reservoir** 7 - 1
7.2 **Gevoeligheid voor de pH** 7 - 2
7.3 **Gevoeligheid voor het luchtdebiet** 7 - 3
7.4 **Gevoeligheid voor de watercirculatie** 7 - 4
7.5 **Gevoeligheid voor de temperatuur** 7 - 5
7.6 **Gevoeligheid voor de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in lucht, k_{lu}** 7 - 6
7.7 **Gevoeligheid voor de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in water, k_{wa}** 7 - 7
7.8 **Gevoeligheid voor het specifieke pakkingsoppervlak, A_{spec}** 7 - 7
7.9 **Gevoeligheid van de vrije ruimte voor lucht en water in de wassectie** 7 - 8
7.10 **Gevoeligheid voor de beginconcentratie** 7 - 8
7.11 **Gevoeligheid voor het dwarsoppervlak A van de wassectie** 7 - 9
7.12 **Gevoeligheid van de omzetting op diverse parameters** 7 - 10
7.12.1 Consumptiesnelheid van Nitrosomonas 7 - 10
7.12.2 Consumptiesnelheid van Nitrobacter 7 - 12

8 **BEOORDELINGSCRITERIA** 8 - 1
8.1 **Beoordelen van de potentiële NH_3-reductie van de biowasser** 8 - 1
8.2 **Beoordelen van de NH_3-reductie van de biowasser in de praktijk** 8 - 2

9 **CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN** 9 - 1

10 **LITERATUURLIJST** 10 - 1

BIJLAGEN:

Bijlage A **Theorie van de stofoverdracht aan het grensvlak met inachtname van de wet van Henry**

Bijlage B **Benaderingen voor de bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënt van een stof A in een vloeistof in een gepakte kolom**

Bijlage C **Benaderingen voor de bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënt van een stof A in een gas in een gepakte kolom**

Bijlage D Benaderingen voor de bepaling van diffusiecoëfficiënten
Bijlage E Berekening van het verloop van de dissociatie in afhankelijkheid van de pH en de temperatuur
Bijlage F Namen en adressen van fabrikanten van biowassers
Bijlage G Enquête: Biowassers in Nederland
Bijlage H Antwoorden van de enquête: 'Biowassers in Nederland'
Bijlage I Codetabel voor het analyseren van de antwoorden van de enquête
Bijlage J NH_3-overdracht in bondgrafen
Bijlage K Discretiseren van differentiaalvergelijkingen met Euler-Forward
Bijlage L Implementatie van het model BIOWAS in Matlab

SYMBOLENLIJST B

1 INLEIDING

In de jaren tachtig is de Nederlandse overheid gestart met beleid te maken tegen de verzuring door ammoniak uit de landbouw. Ammoniak is een verbinding tussen een stikstofatoom (N) en drie waterstofatomen (H) en is chemisch gezien een base.
Meestal wordt ammoniak op een geringe hoogte in de atmosfeer gebracht. Omdat in de atmosfeer de droge depositiesnelheid van ammoniak ook nog eens vrij hoog is, is de verblijftijd van ammoniak in de atmosfeer klein. Als ammoniak gedeponeerd wordt en in contact komt met water, vindt er omzetting plaats naar ammonium:

$$NH_3(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons NH_4^+(aq) + OH^-(aq)$$

Als ammoniak in de atmosfeer aanwezig is kan er ook een vrij snelle omzetting naar ammonium plaatsvinden. Bijvoorbeeld door het neutraliseren van zure stoffen in de atmosfeer, zoals zwavelzuur en salpeterzuur, waarbij ammoniumzouten ontstaan. Deze ammoniumzouten hebben een lagere depositiesnelheid dan ammoniak en worden dus over een groter afstand in de atmosfeer getransporteerd. Op dit moment kan dus gezegd worden dat ammoniak er juist voor zorgt dat zure stoffen worden geneutraliseerd.
Echter in de bodem kan ammonium via nitrificatie omgezet worden naar nitraat. Bij deze bacteriële omzetting worden twee molen zuur geproduceerd. De nitrificatie ziet er als volgt uit:

$$NH_4^+(aq) + 2O_2 \rightarrow NO_3^-(aq) + H_2O(l) + 2H^+(aq)$$

Eén mol zuur is afkomstig van het binden van de zure stoffen uit de atmosfeer, maar één mol zuur is afkomstig van ammoniak zelf. Ammoniak draagt via deze omzetting dus bij aan de verzuring van de bodem in Nederland. Tevens kan ammoniak direct inwerken op bovengrondse delen van planten als er hoge concentraties van ammoniak in de lucht heersen. In bepaalde gebieden in Nederland is een overmaat aan stikstof (dus ook aan ammoniak) aanwezig, hetgeen tot eutrofiëring (= overbemesting) in deze gebieden kan leiden. In de literatuur heerst er vrij veel onduidelijkheid over de afstand waarover ammoniak en ammonium in de atmosfeer worden getransporteerd. De depositie van deze twee stoffen is in gebieden van 5 bij 5 km gevolgd. Op grond van deze resultaten is bepaald dat een boerderij op minimaal 300 m afstand van een verzuringsgevoelig gebied moet staan.
De Nederlandse overheid wil met het gevoerde ammoniakbeleid bereiken dat in het jaar 2000 de totale ammoniak-emissie met 70% gereduceerd is ten opzichte van de totale ammoniak-emissie van het jaar 1980. In tabel 1.1 is te zien dat de ammoniak-emissie in het jaar 1993 pas met 19% gereduceerd was ten opzichte van de ammoniak-emissie in het jaar 1980. Er moet dus nog heel wat gebeuren wil de ammoniak-emissie in het jaar 2000 aan de gestelde eisen voldoen.
In tabel 1.1 is te zien dat de dierlijke mest de belangrijkste bron voor ammoniak-emissie is. De daling van de absolute hoeveelheid ammoniak-emissie uit dierlijke mest in het jaar 1993 komt vooral door de reductie van de ammoniak-emissie bij mestaanwending. De absolute hoeveelheid ammoniak-emissie uit stal en opslag is van het jaar 1980 tot en met 1993 toegenomen van 82 tot 98 miljoen kg NH_3 per jaar. In het jaar 1993 had de bron stal en opslag het grootste aandeel in de totale ammoniak-emissie.

Tabel 1.1 *Ammoniak-emissie in Nederland in 1980, 1990 en 1993 (milj. kg NH_3). Bron: Lekkerkerk et al., 1995.*

Bron	1980	1990	Procenten van 1980	1993	Procenten van 1980
Dierlijke mest	224	222	99.1	181	80.8
- Stal en opslag	*82*	*94*	*114.6*	*98*	119.5
- Beweiding	*31*	*15*	*48.4*	*15*	48.4
- Mestaanwending	*111*	*113*	*10.3*	*68*	61.3
Kunstmestaanwending	10	10	100.0	9	90.0
Industrie	10	6	60.0	6	60.0
Huishoudens	10	11	110.0	11	110.0
Totaal	254	249	98.0	207	81.5

Door onderzoek te verrichten naar de mogelijkheden om de emissie uit deze bron te beperken zijn er diverse technieken ontwikkeld. Eén van deze technieken is het gebruik van luchtzuiveringstechnieken, waarbij ammoniak uit de stallucht wordt verwijderd. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden beschikbaar, namelijk biofiltratie, biowassing en chemische wassing van de stallucht. Toepassing van deze systemen is alleen mogelijk in mechanisch geventileerde stallen (Lekkerkerk et al., 1995). Biowassing is een techniek die NH_3 uit de lucht wast met water, waardoor de NH_3-emissie dus afneemt. Biowassing is een zogenaamde "end-of-pipe" techniek, waardoor deze toegepast kan worden zonder dat veel aanpassingen in de stal nodig zijn. Dit maakt het interessant om de biowasser nader te bekijken.

1.1 De biowasser

Een biowasser is een installatie om de ammoniak uit de stallucht te verwijderen met de techniek biowassing. In de biowasser worden stallucht en water op een bepaalde manier met elkaar in contact gebracht. Door dit contact vindt er stofoverdracht plaats van ammoniak van de stallucht naar het water:

$$NH_3(g) \rightleftharpoons NH_3(aq)$$

Na de overdracht naar het water wordt de ammoniak voor een deel gesplitst in ammonium en loog volgens reactie:

$$NH_3(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons NH_4^+(aq) + OH^-(aq)$$

Het ammonium wordt door de bacterie Nitrosomonas omgezet in nitriet:

$$2\ NH_4^+(aq) + 3\ O_2 \rightarrow 2\ NO_2^-(aq) + 4\ H^+(aq) + H_2O(l)$$

Vervolgens wordt nitriet omgezet in nitraat door de bacterie Nitrobacter:

$$2\ NO_2^-(aq) + O_2 \rightarrow 2\ NO_3^-(aq)$$

Deze twee reacties worden samen nitrificatie genoemd. In feite maakt de biowasser dus gebruik van het proces dat in de natuur plaatsvindt.
In het water dat uit de biowasser komt zijn dus nog steedts dezelfde hoeveelheden verzurende componenten aanwezig als in de natuur voorkomen. De NH_3-emissie uit stal en opslag is echter wel verminderd en tevens is het proces nu beter regelbaar. Hoge concentraties ammonium, nitriet en nitraat verstoren de processen in de biowasser, het is daarom noodzakelijk dat deze concentraties in het water laag blijven. Dit kan door regelmatig een deel van het water af te voeren, ofwel te spuien. Het overige deel van het water wordt opnieuw gebruikt in de biowasser (Uenk et al., 1993). In hoofdstuk 2 en 3 wordt de werking van de biowasser uitvoerig behandeld en tevens worden enkele uitvoeringen van biowassers behandeld.

1.2 Voorgaand onderzoek naar de biowasser

In 1971 is door het IMAG-DLO voor het eerst onderzoek uitgevoerd naar het toepassen van biowassers om de stallucht te zuiveren van ammoniak en geurcomponenten en men is daarmee opnieuw gestart in 1988. Uit dit laatste onderzoek kwam naar voren dat de biowassers een aanzienlijke hoeveelheid spuiwater hebben. Doordat de nitrificatie in de biowassers slechts verliep tot nitriet is het spuiwater ook nog eens giftig (Demmers, 1989).
Na dit onderzoek zijn in het kader van PROPRO (= PRaktijk Onderzoek PROject) drie typen biowassers gevolgd gedurende de periode oktober 1990 tot en met september 1992. Deze biowassers waren geplaatst bij twee praktijkbedrijven. Dit project werd uitgevoerd door het IMAG-DLO en het Proefstation voor de Varkenshouderij. Uit dit onderzoek werd geconcludeerd dat de biowassers hoge ammoniakverwijderingsrendementen tot 90% kunnen halen als de installatie technisch goed functioneert. Om de installatie technisch goed te laten functioneren moet deze regelmatig worden schoongemaakt, hetgeen een negatieve invloed heeft op het rendement van de biowasser. In dit onderzoek werd bevestigd dat er hoge kosten verbonden zijn aan het opslaan en afvoer van de grote hoeveelheid spuiwater. Verder bleken de vaste en variabele kosten van een biowasser hoog te zijn voor de boer (Sande-Schellekens et al., 1993);(Uenk et al., 1993). Om de hoeveelheid spuiwater beter te kunnen verwerken heeft het IMAG-DLO in 1992 onderzoek gedaan naar de verwerking van het spuiwater door denitrificatie. Uit dit onderzoek bleek dat het mogelijk was om het spuiwater met denitrificatie te verwerken, maar dat de sturing van de denitrificatie moeilijk was (Demmers, 1992). Op grond van deze resultaten en het feit dat een biowasser een "end-of-pipe" techniek is werd de prioriteit van onderzoek verlegd naar andere methoden en technieken om de ammoniak-emissie uit stal en opslag te beperken. Op dit moment is echter voor sommige diersoorten, zoals vleesvarkens, de biowasser de enige rendabele optie om de ammoniak-emissie uit stal en opslag te beperken. Daarom is besloten om in dit afstudeervak nog eens kritisch te kijken naar de biowasser.

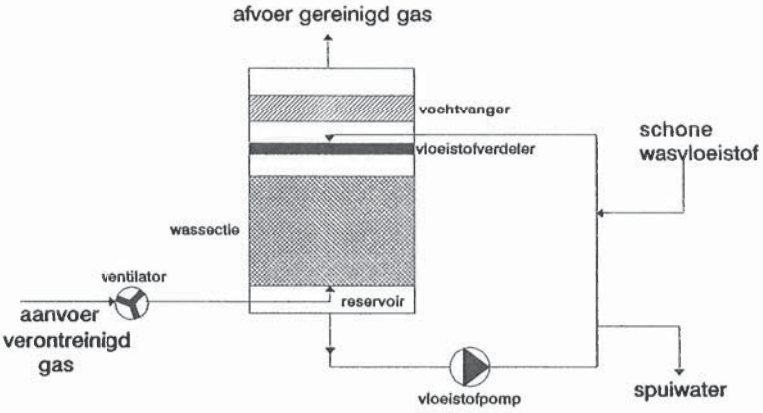
1.3 Doel van dit onderzoek

Het doel van dit afstudeervak is te onderzoeken of een biowasser een haalbare optie is om de NH_3-emissie uit stal en opslag te reduceren. De haalbaarheid zal worden getoetst door te kijken naar de kosten, de milieubelasting, het technisch en het biologisch functioneren van de biowasser. Als dit het geval is dan kan in een wettelijk kader worden opgenomen dat de biowasser een bepaalde NH_3-

reductie bewerkstelligd. Om een techniek wettelijk te kunnen opnemen moet deze technisch en praktisch voldoende functioneren. De controle op deze twee zaken moet op een eenvoudige manier plaats kunnen vinden via een aantal beoordelingscriteria.
Het uiteindelijke resultaat van dit verslag is dan ook het opstellen van criteria voor de het beoordelen van de werking van de biowasser. Deze beoordelingscriteria zijn te vinden in hoofdstuk 8 en hebben als doel een handvat aan te reiken voor een eenvoudige maar goede methode om het rendement van de biowasser te controleren.
In hoofdstuk 2 is uitgelegd welke processen in de biowasser plaatsvinden en hoe deze processen gekwantificeerd kunnen worden. De parameters die een rol spelen bij het ontwerpen van een biowasser voor een bepaald rendement zijn beschreven in hoofdstuk 3.
Om te achterhalen hoe de biowasser op dit moment technisch functioneert is een enquête gehouden onder boeren met een biowasser. In hoofdstuk 4 staan de resultaten van deze enquête vermeld.
Omdat de grenzen waarbinnen een biowasser goed werkt op grond van de theorie van hoofdstuk 2 en 3 niet gemakkelijk zijn vast te stellen, is besloten om een fysisch model te maken van de processen die plaatsvinden in de biowasser. In hoofdstuk 5 is dit fysisch model beschreven en het model heeft de naam BIOWAS gekregen. Om te testen in hoeverre het model BIOWAS de werkelijkheid beschrijft is het model gevalideerd met gegevens van twee praktijkbiowassers, dit staat vermeld in hoofdstuk 6.
De gevoeligheid van de uitkomst van het model BIOWAS is in hoofdstuk 7 voor diverse parameters beschreven.

2 PROCESSEN IN DE BIOWASSER

Uit hoofdstuk 1 blijkt dat het doel van de Nederlandse overheid het reduceren van de hoeveelheid ammonia en stankcomponenten uit de stallucht is. Omdat ammonia en stankcomponenten goed respectievelijk redelijk oplosbaar zijn in water, is het toepassen van stalluchtwassen een mogelijkheid om dit doel te bereiken.
Stalluchtwassen is gebaseerd op het principe dat bij intensief contact tussen stallucht en vloeistof de oplosbare verontreinigingen uit de lucht oplossen in de vloeistof. Door de vloeistof over een groot oppervlak te verdelen en de lucht hier langs te leiden, wordt er intensief contact verkregen tussen de lucht en de vloeistof. Zo is de luchtwasser ontstaan, een kolom waarvan de wassectie gevuld is met pakkingsmateriaal, ook wel een gepakte kolom genoemd. Pakkingsmateriaal is een materiaal dat het contactoppervlak tussen de lucht en vloeistof vergroot. In hoofdstuk 3 wordt meer informatie gegeven over pakkingsmateriaal. In figuur 2.1 is een luchtwasser getekend (van Geelen et al., 1982).



Figuur 2.1 Algemeen uiterlijk van een luchtwasser. Bron: Gaswassers, 1984.

Een luchtwasser werkt in het algemeen op de volgende manier. De verontreinigde lucht wordt met een ventilator in de luchtwasser geblazen of door de luchtwasser gezogen. In de wassectie, die gevuld is met pakkingsmateriaal, lossen de verontreinigingen uit de lucht op in de vloeistof. Aan het einde van de wassectie verlaat de gezuiverde lucht de luchtwasser en de eventueel door de lucht meegevoerde vloeistofdruppels worden hier door de vochtvanger afgescheiden. In de luchtwasser is een vloeistofreservoir aanwezig en vanuit deze plaats wordt de vloeistof over de wassectie rondgepompt met een circulatiepomp. De vloeistof die wordt gecirculeerd over de wassectie wordt wasvloeistof genoemd. Als de vloeistof niet ververst wordt, dan wordt de concentratie opgeloste verontreinigingen in de vloeistof zo hoog dat het rendement van de luchtwasser afneemt. Met de term rendement wordt dan de hoeveelheid verwijderde verontreinigingen uit de lucht door de luchtwasser bedoeld. Om afname van het rendement te voorkomen wordt een gedeelte van de vloeistof via de spuiwatervoorziening afgevoerd en wordt tegelijkertijd verse vloeistof aan het vloeistofreservoir toegevoegd (Gaswassers, 1984).
Vanaf februari 1971 experimenteert het IMAG met luchtwassers in mechanisch geventileerde stallen. Tijdens deze experimenten bleek dat zich na verloop van tijd een bacterieflora ontwikkelt op het pakkingsmateriaal. Deze bacterieflora oxideert de geabsorbeerde stankcomponenten en ammonia. Door het optreden van dit proces kreeg de luchtwasser de naam biologische wasser, ofwel biowasser (van Geelen et al., 1982).

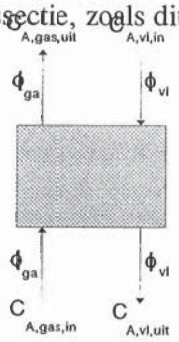
In dit verslag is de biowasser (Eng. bio-trickling filter, bioscrubber) als volgt gedefinieerd:

Een biowasser is een installatie waarin verontreinigingen (gasvormig of aërosolen) met een vloeistof uit de lucht worden gewassen. Dit proces wordt gasabsorptie of stofoverdracht genoemd. Voor het verloop van dit proces is het van belang dat de verontreinigingen redelijk goed oplosbaar zijn in de vloeistof. De in de vloeistof opgeloste verontreinigingen worden aeroob afgebroken door micro-organismen die geïmmobiliseerd zijn op een pakkingsmateriaal. Voor dit proces moeten de opgeloste verontreinigingen biologisch afbreekbaar zijn (Diks et al., 1991);(van de Sande-Schellekens et al., 1993);(Verein Deutscher Ingenieure, 1985).

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste aspecten van de processen die in de wassectie van een biowasser plaatsvinden worden besproken. De theorie zal zoveel mogelijk in algemene termen, dat wil zeggen met betrekking tot gas en vloeistof, worden behandeld.

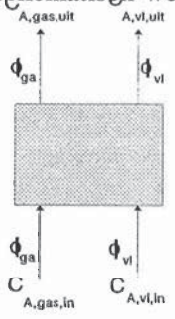
2.1 Stromingsprincipe van gas en vloeistof in de wassectie

In het algemeen kan in de wassectie van een biowasser de verontreinigde gasstroom op drie verschillende manieren ten opzichte van de vloeistofstroom bewegen. Dit is het bewegen volgens het tegenstroom-, meestroom- en het kruisstroomprincipe.
Bij het tegenstroomprincipe bewegen de vloeistof en het verontreinigde gas in tegenovergestelde richting in de wassectie, zoals dit te zien is in figuur 2.2. In figuur 2.2 worden met $C_{A,ga,uit}$ en $C_{A,vl,uit}$ de concentraties van stof A in de uitgaande gas- en vloeistofstroom bedoeld. Met $C_{A,ga,in}$ en $C_{A,vl,in}$ worden de concentraties van stof A in de ingaande gas- en vloeistofstroom bedoeld. De debieten van gas en vloeistof worden weergegeven met ϕ_{ga} respectievelijk ϕ_{vl}.



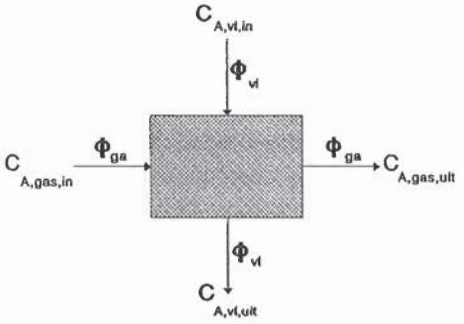
Figuur 2.2 Tegenstroomprincipe in de wassectie. Bron: Sectie Proceskunde, 1990.

Het grote voordeel van het tegenstroomprincipe is dat naarmate het verontreinigde gas schoner wordt ook de concentratie van opgeloste verontreinigingen in de vloeistof afneemt. Het gevolg is dat er gedurende het gehele proces een bijna constante drijvende kracht voor stofoverdracht aanwezig is. De wassectie, waarin gas en vloeistof volgens het tegenstroomprincipe bewegen, heeft een hoog rendement.
Bij het meestroomprincipe bewegen de vloeistof en het verontreinigde gas in dezelfde richting in de wassectie. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2.3. Bij het meestroomprincipe is de drijvende kracht voor stofoverdracht aan het begin van de wassectie vrij groot en neemt de drijvende kracht af tot een kleine waarde aan het einde van de wassectie. De totale drijvende kracht voor stofoverdracht in de wassectie is bij het meestroomprincipe lager dan bij het tegenstroomprincipe. De voordelen van het meestroomprincipe zijn dat het geschikt is voor hoge gas- en vloeistofbelastingen en dat er geen grote wassectie nodig is voor het bereiken van een niet te hoog rendement. Het wassen volgens het meestroomprincipe wordt dus vooral toegepast als er beperkte ruimte beschikbaar is en een lager rendement acceptabel is.



Figuur 2.3 Meestroomprincipe in de wassectie. Bron: Sectie Proceskunde, 1990.

Bij het kruis- of dwarsstroomprincipe staat de stromingsrichting van het verontreinigde gas loodrecht op de stromingsrichting van de vloeistof in de wassectie. In figuur 2.4 is dit schematisch weergegeven.

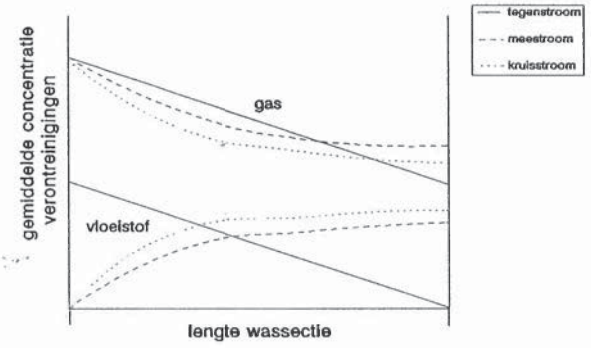


Figuur 2.4 Kruisstroomprincipe in de wassectie. Bron: Sectie Proceskunde, 1990.

Het rendement van de wassectie, waarin lucht en vloeistof bewegen volgens het kruisstroomprincipe, is lager dan het rendement van de wassectie met een tegenstroomprincipe. Dit komt doordat de totale drijvende kracht voor stofoverdracht bij het kruisstroomprincipe lager is, dan bij het tegenstroomprincipe het geval is. Wanneer het verontreinigde gas veel stofdeeltjes bevat die verwijderd moeten worden, dan wordt het kruisstroomprincipe toegepast in de wassectie.

In figuur 2.5 is samengevat wat het effect is van de drie mogelijke stromingsprincipes in de wassectie op het rendement van de biowasser. Om dit effect weer te geven is de concentratie verontreiniging in gas en vloeistof uitgezet tegen de lengte van de wassectie. In deze figuur zijn de lengtes waarover gas en vloeistof bewegen volgens het kruisstroomprincipe aan elkaar gelijk gesteld.

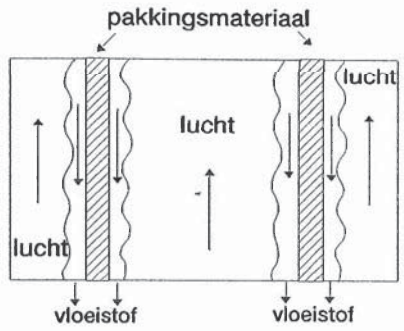
Uit figuur 2.5 blijkt dat bij het wassen van het gas volgens het tegenstroomprincipe de meeste verontreinigingen uit het gas worden verwijderd, het rendement is dan dus het hoogst (Gaswassers, 1984);(Sectie Proceskunde, 1990).
Aangezien het ook de bedoeling is om een zo hoog mogelijk rendement te bereiken wordt in het vervolg van dit verslag alleen de theorie van het wassen van gas volgens het tegenstroomprincipe behandeld.



Figuur 2.5 Effect van de verschillende stromingsprincipes op het rendement van de luchtwasser. Bron: Gaswassers, 1984.

2.2 Verdeling van vloeistof en gas in de wassectie

De verdeling van vloeistof en gas in de wassectie zijn parameters die het rendement van de biowasser in belangrijke mate beïnvloeden. Het rendement van een biowasser is maximaal als de biowasser onder ideale omstandigheden werkt. Onder ideale omstandigheden is onder andere al het pakkingsmateriaal bevochtigd met een gelijke vloeistoflaag en vindt de doorgang van de gasstroom plaats bij een niet te grote optredende drukval over de wassectie. In figuur 2.6 is schematisch weergegeven hoe het gas en de vloeistof stromen in de wassectie. Daartoe is een gedeelte van de wassectie uitvergroot.



Figuur 2.6 *Weergave van het stromen van gas en vloeistof in de wassectie.*

In de praktijk zijn er echter tal van factoren te vinden die deze ideale gas- en vloeistofverdeling over de wassectie verstoren. In de onderstaande paragrafen zullen deze factoren behandeld worden (Coulson et al., 1993a);(McCabe et al., 1967).

2.2.1 De vloeistofverdeling in de wassectie

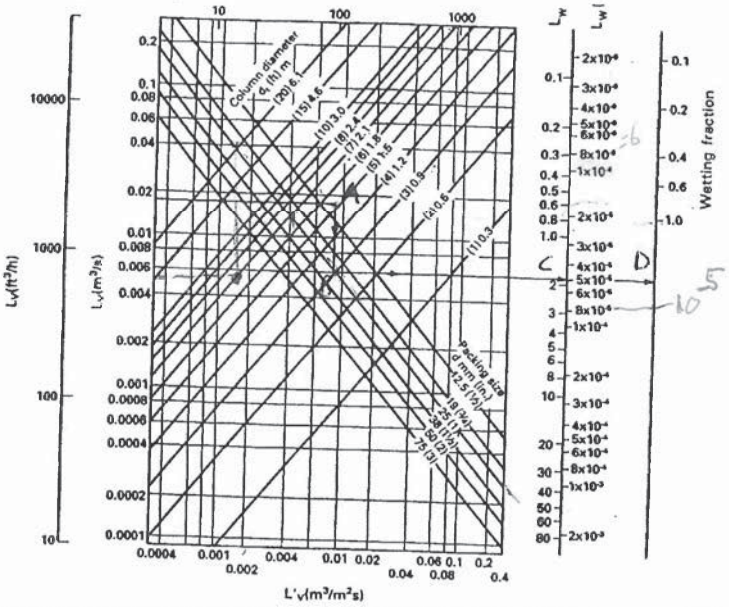
Als de vloeistof uniform wordt verdeeld over de wassectie, dan stroomt de vloeistof in dunne filmpjes over het pakkingsmateriaal naar beneden. In werkelijkheid zijn de vloeistoffilmpjes die over het pakkingsmateriaal stromen soms dik en soms dun (McCabe et al., 1967). De vloeistofstroom bundelt zich hierdoor geleidelijk in kleine kanaaltjes die sneller stromen dan de rest van de vloeistof. Dit verschijnsel wordt kanaalvorming genoemd (Gaswassers, 1984). Het optreden van kanaalvorming wordt gezien als één van de belangrijkste oorzaken voor een slecht rendement van de biowasser.
Het blijkt dat kanaalvorming het meest voorkomt in wassecties met een gestapeld pakkingsmateriaal en het minst voorkomt in een wassectie met een gestort pakkingsmateriaal van regelmatige eenheden (bv. ringen) (McCabe et al., 1967).
Langs de wand van de wassectie stroomt ook meer vloeistof, omdat daar de gassnelheid laag is. Door deze lage gassnelheid is de weerstand tegen het stromen van de vloeistof klein langs de wand. Het verschijnsel kanaalvorming treedt dus ook langs de wand op.
Voor het bereiken van een zo hoog mogelijk rendement van de biowasser is het dus noodzakelijk om dit verschijnsel te minimaliseren. Een vuistregel hiervoor is de diameter van de wassectie minstens 8 maal zo groot te kiezen dan de diameter van het pakkingsmateriaal. Een andere methode is om het pakkingsmateriaal in een aantal segmenten op te delen, waarbij de vloeistof tussen deze segmenten wordt herverdeeld. De maximale verhouding van de hoogte van deze segmenten en de kolomdiameter is aangegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 *Ervaringsgetallen voor de maximale verhouding tussen de segmenthoogte en de kolomdiameter van willekeurig gepakte kolommen bij een minimale vloeistofbehandeling van 5 $m^3/m^2.uur$. Bron: Gaswassers, 1984.*

Aard van het pakkingsmateriaal	segment-hoogte / kolomdiameter
Raschig-ringen	≤ 2.5 - 3
Berl-zadels	≤ 5 - 8
Pall-ringen	≤ 5 - 10

Tenslotte blijkt het erg belangrijk te zijn om een juiste vorm van het pakkingsmateriaal te kiezen. Op dit feit wordt uitgebreid ingegaan in hoofdstuk 3 (Gaswassers, 1984).

Ook al voldoet de wassectie van een biowasser aan de bovenstaande eisen, dan nog kan er kanaalvorming optreden. Het optreden van kanaalvorming blijkt namelijk ook afhankelijk te zijn van de vloeistofsnelheid die in de wassectie heerst. Bij lage vloeistofsnelheden treedt kanaalvorming in hoge mate op, waardoor een groot deel van het pakkingsoppervlak niet bevochtigd wordt. Als de vloeistofsnelheid in de wassectie toeneemt, dan neemt de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak ook toe totdat een kritieke vloeistofsnelheid bereikt wordt. Bij deze kritieke vloeistofsnelheid is het gehele pakkingsoppervlak bevochtigd en is het effect van kanaalvorming te verwaarlozen. De vloeistof is dan uniform verdeeld over het pakkingsoppervlak (McCabe et al., 1967).
Het is dus nuttig om te weten hoe groot de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak F_{bp} is. De F_{bp} kan bepaald worden met behulp van figuur 2.7.



Figuur 2.7 *Nomogram voor het schatten van de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak. Bron: Coulon et al., 1993.*

In deze figuur kan op basis van het vloeistofdebiet, de diameter van de wassectie (ook wel kolomdiameter genoemd) en de diameter van het pakkingsmateriaal de bevochtigingshoeveelheid L_w worden geschat. De bevochtigingshoeveelheid L_w is de volumetrische vloeistofsnelheid per lengte-omtrek van de gepakte kolom, danwel de wassectie. Als L_w bekend is uit figuur 2.7 dan kan F_{bp} in dezelfde figuur worden afgelezen. De bevochtigingshoeveelheid L_w kan tevens berekend worden met formule 2.1.

$$L_w = \frac{\phi_{vl}}{A_{dwars} * A_{spec}} \qquad (2.1)$$

Met: L_w is de bevochtigingshoeveelheid in m^2/s
ϕ_{vl} is het vloeistofdebiet in m^3/s
A_{dwars} is het dwarsoppervlak van de wassectie in m^2
A_{spec} is het pakkingsoppervlak per volume-eenheid pakkingsmateriaal in m^2/m^3

In voorbeeld 2.1 zal uitgelegd worden hoe uit figuur 2.7 F_{bp} bepaald kan worden. Als de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak F_{bp} groter is dan 1 betekent dit dat al het pakkingsoppervlak bevochtigd is en de kritieke vloeistofsnelheid is bereikt. Als F_{bp} groter is dan 1, dan betekent dit dat de

vloeistoflaag op het pakkingsmateriaal steeds dikker wordt (Coulson et al., 1993a).

Voorbeeld 2.1

Gegeven is:
ϕ_{vl} = 0.018 m³/s
D_{was} = 1.6 m (= diameter van de wassectie)
d = 25 mm (= diameter van het pakkingsmateriaal)

In figuur 2.7 wordt eerst het snijpunt gezocht van het vloeistofdebiet en de lijn met de gegeven diameter van de wassectie, dit is punt A. In punt A kan afgelezen worden wat de waarde is van het volumetrische vloeistofdebiet per m² dwarsoppervlak van de wassectie, L_v. Dit oppervlak is bij een cylindervormige wassectie gelijk aan: $\pi \cdot r_{was}^2$.
Hier geldt dus:

$$L_v = \frac{\phi_{vl}}{\pi \cdot r_{was}^2} = \frac{0.018}{\pi \cdot (0.8)^2} = 0.009 \frac{m^3}{m^2 \cdot s}$$

Dit resultaat blijkt overeen te komen met de grafisch bepaalde L. Vanuit punt A wordt bij een constante L een lijn getrokken die snijdt met de lijn van de gegeven pakkingsdiameter, dit is punt B. Van punt B kan op de rechtse binnenste y-as de bevochtigingshoeveelheid L_w en op de rechtse buitenste y-as de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak F_{bp} worden afgelezen, dit zijn respectievelijk de punten C en D. De afgelezen waarden zijn gelijk aan: $L_w \approx 5*10^{-5}$ m²/s en $F_{bp} > 1$.
Omdat F_{bp} groter is dan 1 betekent dit dat al het pakkingsoppervlak bevochtigd is en dat de kritieke vloeistofsnelheid is bereikt.

Voor een gelijke vloeistofverdeling in de wassectie moet de wassectie dus voldoen aan de volgende eisen:

a. de kolomdiameter moet minimaal 10 maal zo groot zijn dan de diameter van het pakkingsmateriaal;
b. de wassectie kan opgedeeld worden in segmenten, waarbij tussen de segmenten herverdeling van de vloeistof plaatsvindt;
c. de vorm van het pakkingsmateriaal moet op de juiste manier gekozen worden;
d. de fractie bevochtigd oppervlak F_{bp} moet groter zijn dan 1.

(Coulson et al., 1993a);(Gaswassers, 1984);(McCabe et al., 1967).

2.2.2 *Drukval in wassectie*

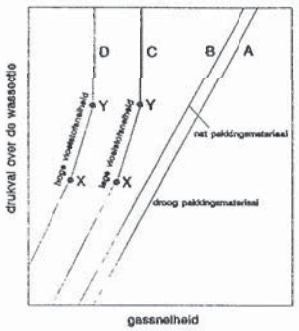
Als de gasstroom door de wassectie wordt geleid moet er een weerstand worden overwonnen, waardoor er een bepaalde drukval ΔP optreedt over de wassectie. De grootte van de drukval die optreedt is afhankelijk van de gassnelheid v_{ga} door de wassectie (Postma, 1980).
In figuur 2.8 is de drukval ΔP die optreedt over de wassectie uitgezet tegen de gassnelheid v_{ga} op dubbellogaritmisch papier.
Curve A uit figuur 2.8 geeft het verband aan tussen ΔP en v_{ga} als het gas geleid wordt door een wassectie met droog pakkingsmateriaal. Experimenteel is gevonden dat voor ΔP bij turbulente stroming van het gas de volgende relatie geldt:

$$\Delta P \sim (v_{ga})^{1.8} \Rightarrow \log \Delta P \sim 1.8 \cdot \log v_{ga} \qquad (2.2)$$

Op dubbellogaritmisch papier is deze relatie dus een rechte lijn met richtingscoëfficiënt 1.8.
Als het gas door een wassectie met bevochtigd pakkingsmateriaal wordt geleid, zal in figuur 2.8 curve

B gelden. Het verschil met curve A is dat bij een bepaalde v_{ga} de ΔP groter is.
Als het pakkingsmateriaal in de wassectie bevochtigd wordt met hogere vloeistofsnelheden dan worden in figuur 2.8 curve C en D verkregen. Bij deze curves is te zien dat vanaf het punt X er een andere relatie geldt tussen ΔP en v_{ga} (Coulson et al., 1993a). Deze relatie is ook experimenteel gevonden en ziet er als volgt uit:

$$\Delta P \sim (v_{ga})^{2.5} \Rightarrow \log \Delta P \sim 2.5 \log v_{ga} \qquad (2.3)$$

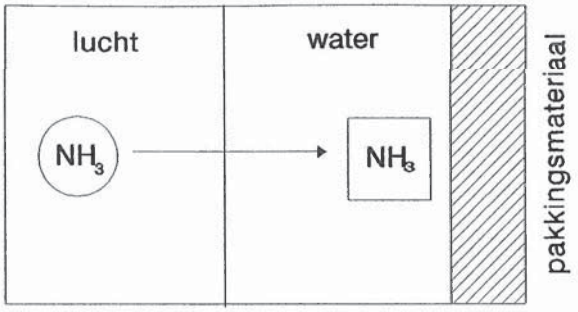


Figuur 2.8 *Drukval in de wassectie uitgezet tegen de gassnelheid. Bron: Coulson et al., 1993a.*

In het punt X treedt er dus een knik op in de relatie tussen ΔP en v_{ga} (McCabe et al., 1967). Het punt X wordt het "loading-punt" genoemd. Vanaf dit punt treedt er interactie op tussen de vloeistofstroom en de gasstroom en kan de vloeistofstroom niet langer ongehinderd omlaag stromen. Door deze interactie zal de hoeveelheid vloeistof in de wassectie, dit wordt hold-up genoemd, snel toenemen. De vrije ruimte in de wassectie wordt dus kleiner en de weerstand tegen de gasstroom wordt dus groter. Hierdoor neemt de drukval ΔP, die optreedt over de wassectie, ook snel toe (Coulson et al., 1993a).
In het punt Y uit figuur 2.8 treedt er ook een knik op in de relatie tussen ΔP en v_{ga} (McCabe et al., 1967). Vanaf punt Y is de interactie tussen de vloeistofstroom en de gasstroom zo groot geworden dat de luchtstroom de vloeistof als het ware gaat dragen. De vloeistof kan niet meer naar beneden stromen en er ontstaat een gesloten vloeistoflaag in de wassectie. Deze vloeistoflaag wordt steeds dikker, todat op een gegeven moment de vloeistof uit de wassectie wordt geblazen. Het punt Y wordt het "flooding-punt" genoemd. Uit het voorgaande volgt dat de drukval ΔP vanaf het flooding-punt Y zeer snel toeneemt bij een bijna constante gassnelheid v_{ga} (Coulson et al., 1993a).
Zoals in het begin van deze paragraaf werd vermeld is het belangrijk dat de drukval ΔP, die optreedt over de wassectie, niet te groot wordt. In de praktijk komt het er op neer dat de gassnelheid v_{ga}, bij een gegeven vloeistofsnelheid, tussen het loading-punt en het flooding-punt in wordt gekozen. Het blijkt namelijk dat als v_{ga} onder het loading-punt wordt gekozen, de wassectie niet goed kan functioneren door een te lage v_{ga}. Als v_{ga} boven het flooding-punt wordt gekozen, wordt ten eerste de optredende drukval ΔP te groot. Ten tweede gaan, door het ontstaan van de gesloten vloeistoflaag, de gunstige eigenschappen van het pakkingsmateriaal verloren (Gaswassers, 1984).
Als vuistregel geldt dat de optimale gassnelheid v_{ga} in een wassectie gelijk is aan de helft van de gassnelheid v_{ga} die heerst bij het flooding-punt (McCabe et al., 1967). Een tweede benadering die gebruikt wordt is, dat in de wassectie van de biowasser de drukval ΔP tussen de 15 en 50 mm water kolom per m wassectie met pakkingsmateriaal moet liggen (Sinnott, 1993).
In hoofdstuk 3 zal worden uitgelegd hoe de drukval ΔP in de wassectie van de biowasser moet worden meegenomen tijdens het ontwerpen.

2.3 Absorptie in de wassectie

In de wassectie vindt de overdracht van de verontreinigingen vanuit het gas naar de vloeistof via absorptie plaats. In figuur 2.9 is te zien hoe dit proces plaatsvindt als ammonia van lucht naar water wordt overgedragen. Dit is het geval als de biowasser wordt geplaatst in de veehouderij.

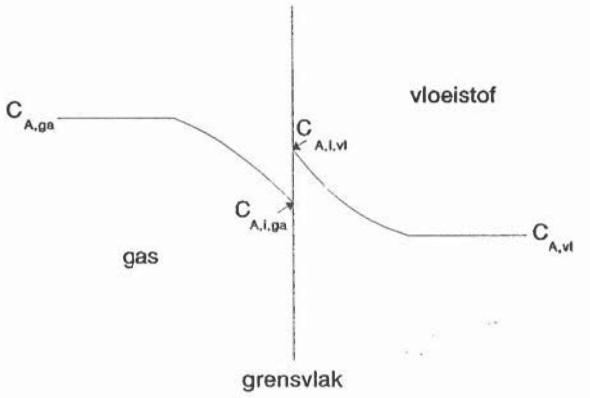


Figuur 2.9 Schematische weergave van de overdracht van NH_3 van lucht naar water.

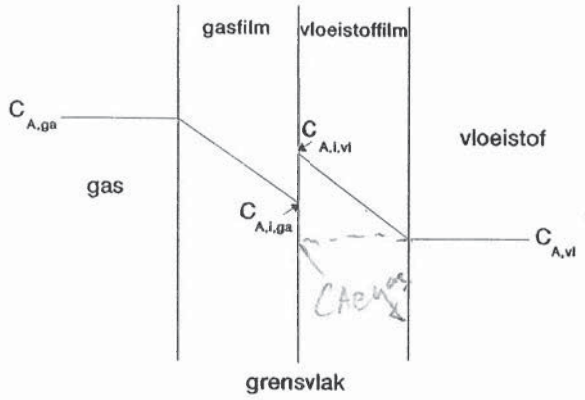
Het is de bedoeling dat de reductie van verontreinigingen uit de gasfase door de wassectie zo hoog mogelijk is. Het is dus noodzakelijk om er voor te zorgen dat de snelheid van de absorptie hoog is. In deze paragraaf wordt de theorie over de absorptie van een stof A vanuit een gas naar een vloeistof in een wassectie behandeld. Deze theorie zal zich toespitsen op situaties waarbij lage concentraties van stof A in de gasfase heersen. Er is voor deze weg gekozen omdat de wassectie in dit geval wordt geplaatst in de veehouderij. Stof A, in dit geval ammonia, komt in de veehouderij in lage concentraties in de gasfase (hier: lucht) voor.

Op een willekeurige plaats in de wassectie van de biowasser staat op een zeker tijdstip een hoeveelheid gas in contact met een hoeveelheid vloeistof. In de bulk van de gasfase, dat wil zeggen in het gemengde deel van het gas, heerst een bepaalde concentratie van stof A, $C_{A,ga}$. Als stof A oplosbaar is in de vloeistof dan zal stof A diffunderen vanuit de bulk gas naar het contactoppervlak dat aanwezig is tussen gas en vloeistof. Daar aangekomen lost stof A op in de vloeistof en vervolgens diffundeert stof A naar de bulk van de vloeistof. Het zojuist beschreven proces is de overdracht van stof A vanuit het gas naar de vloeistof via absorptie. In figuur 2.10 zijn de concentratieprofielen van stof A in gas en vloeistof getekend als er stof A wordt overgedragen.

In figuur 2.10 stellen $C_{A,ga}$ en $C_{A,vl}$ de concentraties van stof A in de bulk van de gas- en vloeistoffase voor in mol A/m^3. $C_{A,i,ga}$ en $C_{A,i,vl}$ zijn de concentraties van stof A aan de gas- respectievelijk aan de vloeistofzijde van het contactoppervlak tussen het gas en de vloeistof. Om de absorptie van stof A vanuit het gas naar de vloeistof te kunnen beschrijven wordt de "two-film-theory" van Whitman (1923) toegepast. Whitman neemt aan dat de weerstand tegen stofoverdracht in een dunne film langs het contactoppervlak tussen gas en vloeistof ligt. Hij veronderstelt dat de beide bulklagen door turbulentie volledig gemengd zijn en dat daar dus geen verschillen in concentratie van stof A heersen. Whitman stelt dat de stofoverdracht in de film volgens een steady-state proces van moleculaire diffusie verloopt. In feite lineariseert Whitman de gekromde curves uit figuur 2.10. In figuur 2.11 is te zien hoe de overdracht van stof A tussen het gas en de vloeistof er uitziet met de "two-film-theory" van Whitman (Coulson et al., 1993b).



Figuur 2.10 Het absorptieproces. Bron: Coulson et al., 1993b.



Figuur 2.11 Gelineariseerde gas- en vloeistoffilmmodel naar Whitman. Bron: Coulson et al., 1993b.

2.3.1 Bepaling van de snelheid van de absorptie

In figuur 2.11 is te zien dat er moleculaire diffusie van stof A plaatsvindt in de gasfilm. De snelheid waarmee de moleculaire diffusie verloopt wordt uitgedrukt in het aantal molen van stof A die per tijdseenheid door een bepaald oppervlak van de gasfilm diffunderen, ofwel de molaire flux van stof A.

De molaire flux van stof A kan worden bepaald met de wet van Fick, die in de gasfilm gelijk is aan:

$$N_{A,ga} = -D_{A,ga} \cdot \frac{dC_{A,ga}}{dy} \qquad (2.4)$$

Met: $N_{A,ga}$ is de molaire flux van stof A in de gasfilm in mol/m^2.s
$D_{A,ga}$ is de diffusiecoëfficiënt van stof A in het gas in m^2/s
$C_{A,ga}$ is de concentratie van stof A in de bulk van het gas in mol/m^3
y is de dikte van de gasfilm in m

De wet van Fick mag alleen toegepast worden als stof A in lage concentraties voorkomt in de gasfase. Als vergelijking 2.4 geïntegreerd wordt tussen de grenzen die in de gasfilm heersen, dan volgt:

$$\int_{y_1}^{y_2} N_{A,ga} \cdot dy = -\int_{C_{A,ga}}^{C_{A,i,ga}} D_{A,ga} \cdot dC_{A,ga} \Leftrightarrow N_{A,ga} \cdot (y_2 - y_1) = -D_{A,ga} \cdot (C_{A,i,ga} - C_{A,ga}) \qquad (2.5)$$

Uit deze vergelijking volgt dat de molaire flux in de gasfilm gelijk is aan:

$$N_{A,ga} = \frac{D_{A,ga}}{\delta y} \cdot (C_{A,ga} - C_{A,i,ga}) \qquad (2.6)$$

Met: δy is de dikte van de gasfilm in m
$C_{A,i,ga}$ is de concentratie van stof A aan de gaszijde van het contactoppervlak tussen gas en vloeistof in mol/m^3

Omdat de gelineariseerde dikte van de gasfilm δy moeilijk te bepalen is wordt de stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in het gas, $k_{A,ga}$, gedefinieerd. De molaire flux in de gasfilm is dan gelijk aan:

$$N_{A,ga} = k_{A,ga} \cdot (C_{A,ga} - C_{A,i,ga}) \qquad (2.7)$$

Met: $k_{A,ga}$ is de stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in het gas in m/s

Uit formule 2.7 blijkt dat de molaire flux van stof A groot is als $k_{A,ga}$ groot is of als het verschil tussen de concentraties van stof A in de bulk van de gasfase en aan het contactoppervlak groot is. Deze twee factoren hebben dus een positieve invloed op de snelheid van de absorptie.
De reciproke van de stofoverdrachtscoëfficiënt $k_{A,ga}$ wordt de weerstand van de gasfase tegen de stofoverdracht genoemd.
Op dezelfde manier kan nu worden afgeleid dat de molaire flux van stof A in de vloeistoffilm gelijk is aan:

$$N_{A,vl} = k_{A,vl}\cdot(C_{A,i,vl}-C_{A,vl}) \qquad (2.8)$$

Met: $N_{A,vl}$ is de molaire flux van stof A in de vloeistoffilm in mol/m^2.s
$k_{A,vl}$ is de stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in de vloeistof in m/s
$C_{A,i,vl}$ is de concentratie van stof A aan de vloeistofzijde van het contactoppervlak tussen gas en vloeistof in mol/m^3
$C_{A,vl}$ is de concentratie van stof A in de bulk van de vloeistof in mol/m^3

Aan het contactoppervlak tussen gas en vloeistof vindt geen opslag van stof A plaats. De hoeveelheid van stof A die uit het gas diffundeert is dus gelijk aan de hoeveelheid van stof A die in de vloeistof diffundeert. De molaire fluxen van stof A uit formule 2.7 en 2.8 zijn dus aan elkaar gelijk. Voor de overdracht van stof A van gas naar vloeistof geldt dus:

$$N_{A,ga\to vl} = N_{A,ga} = k_{A,ga}\cdot(C_{A,ga}-C_{A,i,ga}) = N_{A,vl} = k_{A,vl}\cdot(C_{A,i,vl}-C_{A,vl}) \qquad (2.9)$$

Met: $N_{A,ga\to vl}$ is de molaire flux van stof A van gas naar vloeistof in mol/m^2.s

In veel gevallen is men ook geïnteresseerd in de molaire flux van stof A in mol/s, $N'_{A,ga\to vl}$. Hiertoe wordt vergelijking 2.9 met het oppervlak vermenigvuldigd waarover de overdracht van stof A plaatsvindt. Dit oppervlak is gelijk aan het contactoppervlak tussen het gas en de vloeistof, $A_{contact}$. Formule 2.9 wordt dan:

$$N'_{A,ga\to vl} = k_{A,ga}\cdot A_{contact}\cdot(C_{A,ga}-C_{A,i,ga}) = k_{A,vl}\cdot A_{contact}\cdot(C_{A,i,vl}-C_{A,vl}) \qquad (2.10)$$

Met: $N'_{A,ga\to vl}$ is de molaire flux van stof A van gas naar vloeistof in mol/s
$A_{contact}$ is het contactoppervlak tussen het gas en de vloeistof in m^2

De parameters $k_{A,g}\cdot A_{contact}$ en $k_{A,vl}\cdot A_{contact}$ worden de volumetrische stofoverdrachtscoëfficiënten genoemd. In deze relatie is duidelijk terug te vinden dat de molaire flux van stof A groter wordt als het contactoppervlak vergroot wordt (Coulson et al., 1993b).

Voor de berekening van de molaire flux van stof A uit formule 2.9 of 2.10 moeten de concentraties van stof A in de bulk van het gas en de vloeistof en aan het contactoppervlak bekend zijn. De concentraties van stof A in de bulk van het gas en de vloeistof zijn meetbaar. Dit is echter niet of moeilijk mogelijk bij de concentraties van stof A die heersen aan het contactoppervlak tussen gas en vloeistof. Met de wet van Henry kunnen de concentraties van stof A aan het contactoppervlak tussen gas en vloeistof grafisch bepaald worden of geëlimineerd worden uit formule 2.9 en 2.10. Deze theorie wordt behandeld in de nu volgende subparagraaf.

2.3.2 *Toepassing van de wet van Henry*

Aan het contactoppervlak zijn de concentraties van stof A in het gas en in de vloeistof met elkaar in evenwicht. In een evenwichtssituatie mag de wet van Henry worden toegepast, waarbij de volgende relaties gelden dan:

$$H_A = \frac{C_{A,i,ga}}{C_{A,i,vl}} = \frac{C_{A,e,ga}}{C_{A,vl}} = \frac{C_{A,ga}}{C_{A,e,vl}} \qquad (2.11)$$

Met: H_A is de verdelingscoëfficiënt tussen de concentraties van stof A in het gas en in de vloeistof (-)

$C_{A,e,g}$ is de concentratie van stof A in de gasfase die in evenwicht is met de concentratie van stof A in de bulk vloeistof, $C_{A,vl}$, in mol/m^3

$C_{A,e,vl}$ is de concentratie van stof A in de vloeistoffase die in evenwicht is met de concentratie van stof A in de bulk gas, $C_{A,ga}$, in mol/m^3

De wet van Henry mag alleen worden toegepast als de concentraties van stof A in het gas en in de vloeistof laag zijn.

Vaak wordt ook gebruik gemaakt van de verdelingscoëfficiënt die de verdeling aangeeft van de molaire fracties van stof A tussen het gas en de vloeistof. Deze verdelingscoëfficiënt ziet er als volgt uit:

$$m_A = \frac{Y_{A,i}}{X_{A,i}} = \frac{Y_{A,e}}{X_A} = \frac{Y_A}{X_{A,e}} \qquad (2.12)$$

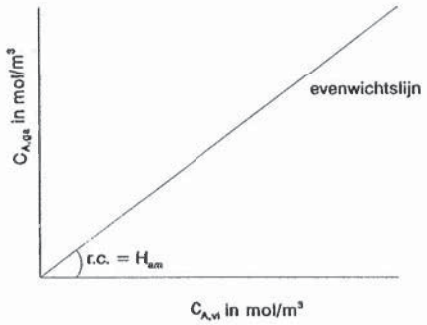
Met: m_A is de verdelingscoëfficiënt tussen de molaire fracties van stof A tussen het gas en de vloeistof (-)

Y_A is de verhouding tussen het aantal molen van stof A en het aantal molen van het inerte gas plus het aantal molen van stof A

X_A is de verhouding tussen het aantal molen van stof A en het aantal molen van de vloeistof plus het aantal molen van stof A

Bij verdunde concentraties van stof A in gas en vloeistof wordt het aantal molen van stof A klein verondersteld ten opzichte van het aantal molen gas en vloeistof. Y_A en X_A zijn dan de verhoudingen tussen het aantal molen van stof A en het aantal molen gas respectievelijk vloeistof.

Met de wet van Henry kan voor iedere concentratie van stof A in de gasfase de evenwichtsconcentratie van stof A in de vloeistof worden bepaald, en andersom. Als deze concentraties tegen elkaar worden uitgezet wordt een rechte lijn verkregen met richtingscoëfficiënt H_A. Dit wordt de evenwichtslijn voor het oplossen van stof A vanuit gas naar vloeistof genoemd en deze is getekend in figuur 2.12.



Figuur 2.12 Evenwichtslijn van stof A met verdelingscoëfficiënt H_A. Bron: Coulson et al., 1993.

In werkelijkheid is de evenwichtslijn meestal niet geheel recht, maar kan de evenwichtslijn in een bepaald gebied worden benaderd met een rechte lijn.
De richtingscoëfficiënt H_A van de evenwichtslijn geeft de mate van oplosbaarheid van stof A vanuit het gas naar de vloeistof aan. Als de H_A een hoge waarde heeft, dan wil dit zeggen dat stof A vanuit het gas slecht oplosbaar is in de vloeistof. Heeft H_A daarentegen een lage waarde dan is stof A vanuit het gas goed oplosbaar in de vloeistof, hetgeen dus noodzakelijk is voor een hoge snelheid van absorptie.

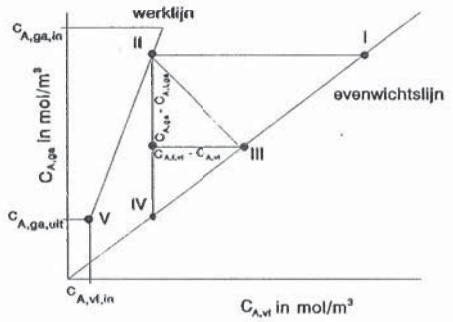
Als nu figuur 2.2 weer voor de geest wordt gehaald dan moet over de wassectie gelden dat de ingaande flux van stof A gelijk is aan de uitgaande flux van stof A, ofwel:

$$\phi_{ga} \cdot C_{A,ga,in} + \phi_{vl} \cdot C_{A,vl,in} = \phi_{ga} \cdot C_{A,ga,uit} + \phi_{vl} \cdot C_{A,vl,uit} \qquad (2.13)$$

Uit formule 2.13 kan worden afgeleid dat geldt:

$$\frac{(C_{A,ga,in} - C_{A,ga,uit})}{(C_{A,vl,uit} - C_{A,vl,in})} = \frac{\phi_{vl}}{\phi_{ga}} \qquad (2.14)$$

Als de debieten van het gas en de vloeistof constant zijn, dan is de lijn tussen de punten ($C_{A,vl,in}$,$C_{A,ga,uit}$) en ($C_{A,vl,uit}$,$C_{A,ga,in}$) een rechte lijn met richtingscoëfficiënt ϕ_{vl}/ϕ_{ga}. Deze lijn wordt de werklijn genoemd, omdat deze lijn de situatie weergeeft die in de wassectie heerst. In figuur 2.13 is deze werklijn tezamen met de evenwichtslijn getekend voor stof A.



Figuur 2.13 Werklijn en evenwichtslijn van stof A. Bron: Coulson et al., 1993.

In figuur 2.13 geeft punt II de concentraties van stof A weer die op een bepaald tijdstip in de bulk van het gas en de vloeistof heersen. Stel dat de concentraties van stof A aan het contactoppervlak worden weergegeven door het punt III, dan kan grafisch de drijvende kracht voor overdracht van stof A vanuit het gas naar de vloeistof worden weergegeven. Zoals uit formule 2.9 blijkt is de drijvende kracht voor overdracht van stof A in de gasfase gelijk aan ($C_{A,ga}$-$C_{A,i,ga}$), dit is het lijnstuk tussen de punten II en V uit figuur 2.13. Op dezelfde manier wordt de drijvende kracht voor overdracht van stof A in de vloeistoffase weergegeven door het lijnstuk V en III. Het quotiënt van deze twee drijvende krachten is volgens formule 2.9 gelijk aan de verhouding tussen de stofoverdrachtscoëfficiënten, namelijk:

$$\frac{(C_{A,ga} - C_{A,i,ga})}{(C_{A,i,vl} - C_{A,vl})} = \frac{k_{A,vl}}{k_{A,ga}} \qquad (2.15)$$

In dit geval was er een bepaald punt op de evenwichtslijn aangewezen dat de concentraties van stof A aan het contactoppervlak weergeeft. Uit formule 2.15 blijkt dat deze concentraties ook grafisch bepaald kunnen worden. Door vanuit het bekende punt II een rechte lijn met richtingscoëfficiënt - $k_{A,vl}/k_{A,ga}$ te laten snijden met de evenwichtslijn wordt het punt III gevonden. Zoals bekend geeft het punt III de concentraties van stof A aan het contactoppervlak aan.
Meestal moeten de concentraties van stof A aan het contactoppervlak bij meerdere bulkconcentraties bekend zijn. Het is dan slimmer om de concentraties van stof A aan het contactoppervlak uit formule 2.9 te vervangen door andere termen. Dit kan gerealiseerd worden met de wet van Henry. In bijlage A is uitgelegd hoe de eliminatie van de concentraties aan het contactoppervlak plaatsvindt. Als de concentraties van stof A in de vloeistof genormeerd worden naar de concentraties van stof A in het gas, dan geldt:

$$N_{A,ga\rightarrow vl} = K_{A,ga}\cdot(C_{A,ga}-H_A\cdot C_{A,vl}) = K_{A,ga}\cdot(C_{A,ga}-C_{A,e,ga}) \qquad (2.16)$$

Waarbij geldt dat $K_{A,ga}$ gelijk is aan:

$$K_{A,ga} = \left(\frac{1}{k_{A,ga}}+\frac{H_A}{k_{A,vl}}\right)^{-1} \qquad (2.17)$$

Met: $K_{A,ga}$ is de overall-stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in de gasfase in m/s

Als de concentraties van stof A in het gas genormeerd worden naar de concentraties van stof A in de vloeistof, dan geldt:

$$N_{A,ga\rightarrow vl} = K_{A,vl}\cdot\left(\frac{C_{A,ga}}{H_A}-C_{A,vl}\right) = K_{A,vl}\cdot(C_{A,e,vl}-C_{A,vl}) \qquad (2.18)$$

Waarbij geldt dat $K_{A,vl}$ gelijk is aan:

$$K_{A,vl} = \left(\frac{1}{H_A\cdot k_{A,ga}}+\frac{1}{k_{A,vl}}\right)^{-1} \qquad (2.19)$$

Met: $K_{A,vl}$ is de overall-stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in de vloeistoffase in m/s

Uit formule 2.17 en 2.19 is af te leiden dat tussen de beide overall-stofoverdrachtscoëfficiënten de volgende relatie geldt:

$$K_{A,vl} = H_A\cdot K_{A,ga} \qquad (2.20)$$

Zoals te zien is in formule 2.20 zijn de overall-stofoverdrachtscoëfficiënten aan elkaar gerelateerd via de verdelingscoëfficiënt H_A (Perry et al., 1985). Hieruit blijkt dat de oplosbaarheid van stof A de grootte van de overall-stofoverdrachtscoëfficiënten beïnvloedt. De volgende relaties gelden:

- als stof A goed oplosbaar is in de vloeistof, ofwel H_A is klein, dan is $k_{A,ga}$ ongeveer gelijk aan $K_{A,ga}$. De weerstand tegen de overdracht van stof A vanuit gas naar vloeistof ligt bijna geheel in de gasfase.
- als stof A slecht oplosbaar is in de vloeistof, ofwel H_A is groot, dan is $k_{A,vl}$ ongeveer gelijk aan $K_{A,vl}$. De weerstand tegen de overdracht van stof A vanuit gas naar vloeistof ligt bijna geheel in de vloeistoffase.

- als stof A middelmatig oplosbaar is in de vloeistof dan leveren zowel de gas- als de vloeistoffase weerstand tegen de overdracht van stof A vanuit gas naar vloeistof.

De overall-stofoverdrachtscoëfficiënt mag alleen gebruikt worden als voldaan is aan de volgende voorwaarden:

a. de verdelingscoëfficiënt H_A moet een constante waarde hebben, of de juiste waarde moet worden gebruikt.
b. in de gas- en in de vloeistoffilm wordt de overdracht van stof A alleen bepaald door de stofoverdrachtscoëfficiënten $k_{A,ga}$ en $k_{A,vl}$.
c. de omstandigheden waaronder de waarden van $k_{A,ga}$ en $k_{A,vl}$ zijn bepaald moeten dezelfde zijn als de omstandigheden die heersen tijdens het werken met de biowasser.
d. de stofoverdrachtscoëfficiënten mogen elkaar niet beïnvloeden, ofwel de grootte van $k_{A,ga}$ mag niet afhankelijk zijn van de grootte van $k_{A,vl}$, en andersom.
e. de verhouding $H_A \cdot K_{A,ga}/K_{A,vl}$ moet een constante waarde hebben op het gehele pakkingsmateriaal van de wassectie.

Deze criteria blijken vooral van belang te zijn in gepakte kolommen, zoals biowassers (Coulson et al., 1993a).

Met de theorie die tot nu toe beschreven is kan de molaire flux van stof A vanuit een gas naar een vloeistof worden berekend. Voor deze berekening blijken de waarden van de stofoverdrachtscoëfficiënten en de verdelingscoëfficiënt bekend te moeten zijn. Als de biowasser wordt toegepast in de veehouderij dan vindt in de wassectie de absorptie van ammonia vanuit lucht naar water plaats. Van NH_3 is nog niet bekend of het redelijk of goed oplosbaar is in water, daarom worden beide stofoverdrachtscoëfficiënten bekeken. In de volgende twee subparagrafen zullen de stofoverdrachtscoëfficiënten en de verdelingscoëfficiënt voor deze situatie bepaald worden.

2.3.3 Bepaling van de stofoverdrachtscoefficienten voor ammonia

Zoals uit formule 2.6 en 2.7 blijkt is stofoverdrachtscoëfficiënt gelijk aan de verhouding tussen de diffusiecoëfficiënt en de dikte van de film. De waarde van de diffusiecoëfficiënt kan experimenteel of via een empirische relatie bepaald worden. De dikte van de film is echter niet zo eenvoudig te bepalen, er is namelijk alleen bekend dat de dikte van de film in het algemeen afneemt als de turbulentie toeneemt. De stofoverdrachtscoëfficiënten zullen bij een toenemende turbulentie dus groter worden (Coulson et al., 1993b).
De stofoverdrachtscoëfficiënten volgen ook uit een relatie tussen het getal van Sherwood (Sh), het getal van Reynolds (Re) en het getal van Schmidt (Sc). Voor de gas- of de vloeistoffase blijkt te gelden:

$$Sh = c \cdot Re^{s} \cdot Sc^{t} \qquad (2.21)$$

Met: Sh is het dimensieloze getal van Sherwood
Re is het dimensieloze getal van Reynolds
Sc is het dimensieloze getal van Schmidt
c is een constante
s,t zijn coëfficiënten

Het getal van Sherwood is de verhouding tussen een diffusieweerstand (X/D) en de weerstand in de film (1/k), ofwel:

$$Sh = \frac{k \cdot X}{D} \tag{2.22}$$

Met: k is de stofoverdrachtscoëfficiënt in m/s
X is een karakteristieke lengte van het pakkingsmateriaal in m
D is de diffusiecoëfficiënt in m^2/s

Het getal van Reynolds geeft de verhouding weer tussen de traagheids- en wrijvingskrachten die optreden in een bepaald medium. Boven een kritieke waarde van Reynolds treedt turbulentie op. Er geldt:

$$Re = \frac{\rho_{med} v_{med} \cdot X}{\mu_{med}} \tag{2.23}$$

Met: ρ_{med} is de dichtheid van het medium in kg/m^3
v_{med} is de aanstroomsnelheid van het medium in m/s
μ_{med} is de viscositeit van medium in Pa·s

Het getal van Schmidt is een stofgrootheid die de verhouding van de grenslaagdikten voor impuls- en stofoverdracht aangeeft. Er geldt:

$$Sc = \frac{\mu_{med}}{\rho_{med} \cdot D} \tag{2.24}$$

In elke situatie gelden weer andere waarden voor de stofoverdrachtscoëfficiënten. Door middel van experimenten probeert men de constante c en de coëfficiënten s en t van formule 2.21 te bepalen en zo zijn vele empirische relaties afgeleid voor de stofoverdrachtscoëfficiënten.
In bijlage II en III zijn diverse relaties te zien voor de overdracht van NH_3 van lucht naar water in gepakte kolommen. Hieronder volgen de relaties die gekozen zijn om in de rest van dit verslag de stofoverdrachtscoëfficiënten te beschrijven.
De stofoverdrachtscoëfficiënt voor NH_3 in water in een gepakte kolom, k_{wa}, wordt gegeven door Onda et al. (1968) en luidt:

$$k_{wa} = 0.0051 \cdot \left(\frac{L}{A_{spec} \mu_{wa}}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_{wa}}{\rho_{wa} \cdot D_{wa}}\right)^{-0.5} \cdot (A_{spec} \cdot D_p)^{0.4} \cdot \left(\frac{\rho_{wa}}{\mu_{wa} \cdot g}\right)^{\frac{-1}{3}} \tag{2.25}$$

Met: k_{wa} is de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in water in m/s
L is het massadebiet van de vloeistof (hier: water) per dwarsoppervlak in $kg/m^2 \cdot s$
A_{spec} is het totale pakkingsoppervlak per volume-eenheid pakkingsmateriaal in m^2/m^3
μ_{wa} is de dynamische viscositeit van water in Pa·s
ρ_{wa} is de dichtheid van water in kg/m^3
D_{wa} is de diffusiecoëfficiënt van NH_3 in water in m^2/s
D_p is de diameter van een bol die hetzelfde oppervlak heeft als een eenheid pakkingsmateriaal in m
g is de gravitatieconstante in m/s^2

In formule 2.25 zijn duidelijk de getallen van Reynolds en Schmidt terug te vinden, het getal van Sherwood komt niet voor in deze formule. In vergelijking met formule 2.21 is aan formule 2.25 nog

een karakteristieke bedafmeting $A_{spec} \cdot D_p$ aan de relatie toegevoegd.

De stofoverdrachtscoëfficiënt voor NH_3 in lucht in een gepakte kolom, k_{lu}, wordt gegeven door Semmelbauer (1967) en is geldig in het Reynolds-gebied [100 - 10000] en bij een D_p die ligt tussen 0.01 m en 0.05 m. De relatie ziet er als volgt uit:

$$k_{lu} = \beta \cdot \left(\frac{D_p \cdot G}{\mu_{lu}}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{\mu_{lu}}{\rho_{lu} \cdot D_{lu}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{D_{lu}}{D_p}\right) \qquad (2.26)$$

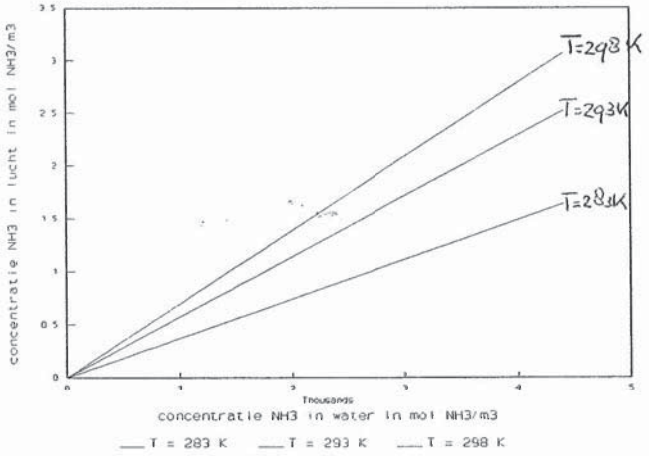
Met: k_{lu} is de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in lucht in m/s
G is het massadebiet van het gas (hier: lucht) per dwarsoppervlak in kg/m^2·s
μ_{lu} is de dynamische viscositeit van lucht in Pa·s
ρ_{lu} is de dichtheid van lucht in kg/m^3
D_{lu} is de diffusiecoëfficiënt van NH_3 in lucht in m^2/s

In formule 2.26 zijn duidelijk de getallen van Reynolds, Schmidt en Sherwood terug te vinden (Coulson et al., 1993a);(Perry et al., 1985);(Sinnott, 1993).

In bijlage II en III wordt onderscheid gemaakt tussen bevochtigd en totaal beschikbaar pakkingsmateriaal. In de rest van dit verslag is aangenomen dat deze twee aan elkaar gelijk zijn. In bijlage IV zijn twee relaties gegeven voor het berekenen van de diffusiecoëfficiënten van een stof in gas en vloeistof. Deze relaties kunnen ook gebruikt worden voor het berekenen van D_{wa} en D_{lu} uit formule 2.25 en 2.26.

2.3.4 Bepaling van de Henry-constante voor ammonia

De Henry-constante H_A kan afgeleid worden uit de evenwichtsoplosbaarheid van stof A uit een gas in de desbetreffende vloeistof. Met behulp van H_A kan dan de evenwichtslijn getekend worden.
In figuur 2.14 is dit gedaan voor het oplossen van ammonia vanuit lucht naar water bij de temperaturen 10°C, 20°C en 25°C bij lage NH_3-concentraties in lucht en water.



Figuur 2.14 Verdeling van NH_3 tussen lucht en water bij verschillende temperaturen. Bron: Perry et al., 1985.

Voor figuur 2.14 is gebruik gemaakt van oplosbaarheidstabellen van NH_3 vanuit lucht naar water uit

Perry's Chemical Engineer's Handbook. Echter in deze tabellen was de verdeling van NH_3 tussen lucht en water weergegeven als verhouding van partiële spanning van NH_3 in lucht en gewichtsbasis NH_3 in water. De partiële spanning van NH_3 in lucht is als volgt omgerekend naar concentratie van NH_3 in lucht in mol/m^3:

$$C_{lu} = \frac{131.58 \cdot \rho}{R \cdot T} \qquad (2.27)$$

Met: C_{lu} is de concentratie van NH_3 in lucht in mol/m^3
ρ is de partiële spanning van NH_3 in lucht in mm Hg
R is de gasconstante in J/mol.K
T is de temperatuur in K

De hoeveelheid NH_3 in water op gewichtsbasis is omgerekend naar de concentratie van NH_3 in mol/m^3 via de volgende methode:

$$C_{wa} = \frac{10^4}{M_{am} \cdot W_{am,wa}} \qquad (2.28)$$

Met: C_{wa} is de concentratie van NH_3 in water in mol/m^3
M_{am} is het molecuulgewicht van NH_3 in g/mol
$W_{am,wa}$ is de hoeveelheid NH_3 in water op gewichtsbasis in g NH_3/100g H_2O

Uit figuur 2.14 blijkt dat de gevonden relaties bij een bepaalde temperatuur zeer goed benaderd kunnen worden met een rechte lijn met als richtingscoëfficiënt de verdelingscoëfficiënt van NH_3 tussen lucht en water, H_{am}, bij die temperatuur. Onder de omstandigheden die gelden in de veehouderij kan H_{am} dus beschouwd worden als een constante die afhangt van de temperatuur (Perry et al., 1985).

Hashimoto en Ludington (1971) hebben een relatie afgeleid om H_{am} te kunnen berekenen als functie van de temperatuur. Als deze relatie wordt omgerekend naar de eenheden van H_{am} dan geldt de volgende relatie:

$$H_{am} = \frac{1}{4.88 \cdot T \cdot (1.053)^{(293-T)}} \qquad (2.29)$$

(Hashimoto en Ludington, 1971).
Een andere relatie voor H_{am} is afgeleid door Dasgupta en Dong (1986). In de eenheden die in dit verslag gebruikt worden voor H_{am} is deze relatie gelijk aan:

$$H_{am} = \frac{1.013 \cdot 10^2}{R \cdot T \cdot e^{(\frac{4092}{T} - 9.7)}} \qquad (2.30)$$

(Betterton, 1992)

In tabel 2.2 staan de waarden van H_{am} vermeld, dit bepaald zijn uit formule 2.29, 2.30 en figuur 2.14, bij de temperaturen 10°C, 20°C en 25°C.

Tabel 2.2 *H_{am} volgens Hashimoto en Ludington (1971), Perry et al. (1985), Dasgupta en Dong (1986).*

T in °C	H_{am}, Hashimoto en Ludington (1971)	H_{am}, Perry et al. (1985)	H_{am}, Dasgupta en Dong (1986)
10	$4.32*10^{-4}$	$3.71*10^{-4}$	$3.69*10^{-4}$
20	$6.99*10^{-4}$	$5.71*10^{-4}$	$5.84*10^{-4}$
25	$8.90*10^{-4}$	$6.95*10^{-4}$	$7.26*10^{-4}$

Uit tabel 2.2 blijkt dat, als aangenomen wordt dat H_{am} volgens Perry et al. (1985) de juiste waarde geeft, de relatie van Dasgupta en Dong (1986) H_{am} het best benadert. In de rest van dit verslag zal daarom gebruik worden gemaakt van de relatie van Dasgupta en Dong om H_{am} te berekenen.

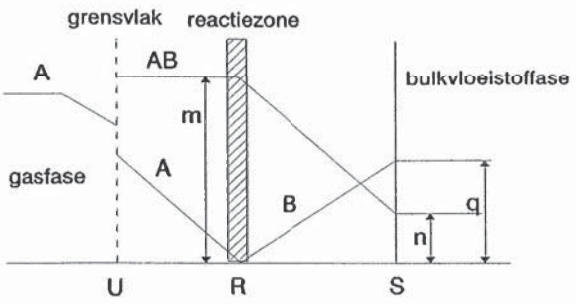
Uit tabel 2.2 blijkt dat de verdelingscoëfficiënt van NH_3 tussen lucht en water een kleine waarde heeft. Dit is een indicatie voor een goede oplosbaarheid van NH_3 van lucht naar water. Uit paragraaf 2.4.2 blijkt dat als een stof goed oplosbaar is de overall-stofoverdrachtscoëfficiënt gebaseerd op de luchtfase ongeveer gelijk is aan de stofoverdrachtscoëfficiënt van de gasfase.

2.4 Chemische reactie in de wassectie

Tot nu toe is het proces van absorptie van stof A vanuit een gas naar een vloeistof alleen nog maar fysisch beschreven. Er zijn echter genoeg voorbeelden te noemen waarbij stof A chemisch reageert met een component uit de vloeistof. Als stof A chemisch reageert met een component uit de vloeistof veranderen de condities die in de gasfase gelden niet. In de vloeistoffase wordt de vloeistoffilm nu gevolgd door een reactiegebied. In dit reactiegebied treedt de chemische reactie op tussen component B uit de vloeistof en de opgeloste stof A. De volgende reactie vindt bijvoorbeeld plaats:

$$A + B \rightarrow AB$$

Stof A lost dus op in de vloeistof en reageert dan meteen met stof B tot het produkt AB. Dit gevormde produkt diffundeert naar de bulk van de vloeistof. Door deze produktvorming neemt de concentratie van B aan het contactoppervlak af. Hierdoor vindt er diffusie van B van de bulk van de vloeistof naar het contactoppervlak plaats. Als de chemische reactie snel verloopt, en B dus snel wegreageert, is het noodzakelijk voor A om eerst door een laagje water te diffunderen voordat gereageerd kan worden met B. Er is dus een reactiezone aanwezig tussen A en B, die zich verplaatst van het contactoppervlak richting een positie in de bulk van de vloeistof. De uiteindelijke positie van de reactiezone zal zo zijn dat de hoeveelheid gediffundeerde stof A vanuit het contactoppervlak gelijk is aan de gediffundeerde hoeveelheid van component B uit de bulk van de vloeistof. Als deze toestand wordt bereikt heerst er dus een evenwicht in de vloeistof, dit is te zien in figuur 2.15.
Stof A diffundeert dus naar het contactoppervlak door de drijvende kracht ($C_{A,ga}$-$C_{A,i,ga}$) en diffundeert dan naar de reactiezone door de drijvende kracht $C_{A,i,vl}$. Component B diffundeert vanuit de bulk naar de reactiezone door de drijvende kracht q en AB diffundeert naar de bulk van de vloeistof door de drijvende kracht (m-n), zoals dit te zien is in figuur 2.15.



Figuur 2.15 Absorptie van stof A met een chemische reactie. Bron: Coulson et al., 1993.

Het effect van de chemische reactie is dus dat de verwijdering van stof A van het contactoppervlak versneld wordt.

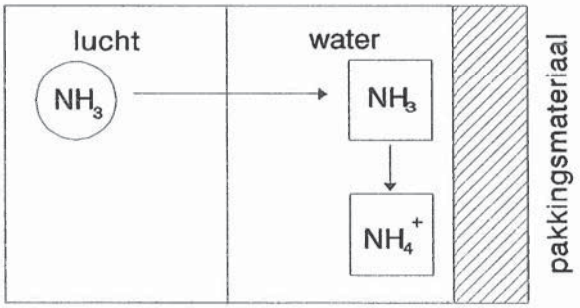
De verwijdering wordt volgens van Krevelen en Hoftijzer versneld met een factor r, er geldt dan:

$$N^*_{A,ga-vl} = r\,k_{A,vl}(C_{A,i,vl} - C_{A,vl}) \qquad (2.31)$$

Met: $N^*_{A,ga-vl}$ is de molaire flux van stof A in het geval van absorptie met een chemische reactie in $mol/m^2.s$
r is een constante (-)

De waarde van de constante r wordt bepaald door experimenten (Coulson et al., 1993a).

Als nu gekeken wordt naar de situatie waarin de biowasser wordt toegepast in de veehouderij, dan blijkt dat daar ook een chemische reactie optreedt met de geabsorbeerde stof ammonia. Het opgeloste ammonia reageert met water tot ammonium, dit noemt men dissociatie. In figuur 2.16 is aangegeven hoe de absorptie van NH_3 er uit ziet als er dissociatie optreedt.



Figuur 2.16 Schematische weergave van de absorptie met dissociatie van NH_3 van lucht naar water.

De dissociatiereactie gaat als volgt:

$$NH_3(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons NH_4^+(aq) + OH^-(aq)$$

De molaire flux van NH_3 van lucht naar water wordt dus bepaald door het verloop van de dissociatie. Als de dissociatie goed verloopt dan is de overdracht van NH_3 van lucht naar water groter omdat de concentratie NH_3 in het water afneemt.
In bijlage E is aangetoond dat de dissociatie van NH_3 tot NH_4^+ volledig verloopt bij een pH kleiner dan 7. In dit geval is er dus alleen NH_4^+ aanwezig in het water. Als de pH hoger wordt dan 11 dan verloopt de dissociatie bijna niet meer met het gevolg dat er alleen opgelost NH_3 in het water

aanwezig is (Srinath en Loehr, 1974).

In het geval van absorptie van NH_3 met het optreden van dissociatie zijn geen experimentele waarden van de constante r bekend. Daarom is gesteld dat de molaire flux van NH_3 in het water bij het optreden van dissociatie vervangen wordt door de molaire flux van NH_3 en NH_4^+ in water. De volgende relatie geldt dan:

$$N_{aNtot,lu\rightarrow wa} = k_{aNtot,wa}\cdot(C_{aNtot,i,wa} - C_{aNtot,wa}) \qquad (2.32)$$

Met: $N_{aNtot,lu\rightarrow wa}$ is de molaire flux van NH_3 en NH_4^+ in water in mol/m^2.s
$k_{aNtot,wa}$ is de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 en NH_4^+ in water in m/s
$C_{aNtot,i,wa}$ is de concentratie van NH_3 en NH_4^+ aan het contactoppervlak in mol/m^3
$C_{aNtot,wa}$ is de concentratie van NH_3 en NH_4^+ in de bulk water in mol/m^3

Door vanaf nu te praten over de molaire flux van NH_3 en NH_4^+ in water veranderen de stofoverdrachtscoëfficiënt en de verdelingscoëfficiënt ten opzichte van de definities die gegeven zijn in formule 2.25 en 2.30. De stofoverdrachtscoëfficiënt zegt nu iets over de overdracht van NH_3 en NH_4^+ in water en wordt dus $k_{aNtot,wa}$ in plaats van k_{wa} genoemd. De verdelingscoëfficiënt zegt nu iets over de verdeling tussen NH_3 in lucht en NH_3 en NH_4^+ in water en wordt H_{aNtot} in plaats van H_{am} genoemd. Als men de overall-stofoverdracht op bijvoorbeeld luchtbasis bekijkt dan geldt nu:

$$N_{aNtot,lu\rightarrow wa} = K_{lu}\cdot(C_{lu} - H_{aNtot}\cdot C_{aNtot}) \qquad (2.33)$$

Met:

$$K_{lu} = \left(\frac{1}{k_{lu}} + \frac{H_{aNtot}}{k_{aNtot,wa}}\right)^{-1} \qquad (2.34)$$

2.4.1 Bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënt $k_{aNtot,wa}$

Zoals gezegd verandert de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in water door het optreden van dissociatie in de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 en NH_4^+ in water, $k_{aNtot,wa}$. Uit formule 2.6 en 2.7 bleek dat een willekeurige stofoverdrachtscoëfficiënt wordt bepaald door de verhouding tussen de diffusiecoëfficiënt en de dikte van de grenslaag.
Aangenomen wordt dat de dikte van de grenslaag door het optreden van de dissociatie niet wordt beïnvloedt. En als de diffusiecoëfficiënten van NH_3 en NH_4^+ in water met elkaar vergeleken worden, dan blijkt dat deze bijna aan elkaar gelijk zin. De stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 en NH_4^+ in water kan dus gelijk worden gesteld aan de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in water, k_{wa} (Coulson et al., 1993a).

2.4.2 Bepaling van de verdelingscoëfficiënt, H_{aNtot}

Als er alleen fysische absorptie van NH_3 vanuit lucht naar water optreedt dan is de verdelingscoëfficiënt gelijk aan H_{am} volgens formule 2.30. Als ammonia echter in water tot ammonium dissocieert, dan wordt niet langer gebruik gemaakt van H_{am} maar van de

verdelingscoëfficiënt H_{aNtot}. H_{aNtot} is gelijk aan:

$$H_{aNtot} = \frac{C_{lu}}{C_{aNtot}} = \frac{[NH_3](g)}{[NH_3](aq) + [NH_4^+](aq)} \qquad (2.35)$$

Met: $[NH_3](g)$ is de concentratie NH_3 in de lucht in mol/m³
$[NH_3](aq)$ is de concentratie NH_3 in het water in mol/m³
$[NH_4^+](aq)$ is de concentratie NH_4^+ in het water in mol/m³

De relatie tussen H_{am} en H_{aNtot} kan afgeleid worden uit bijlage E en ziet er als volgt uit:

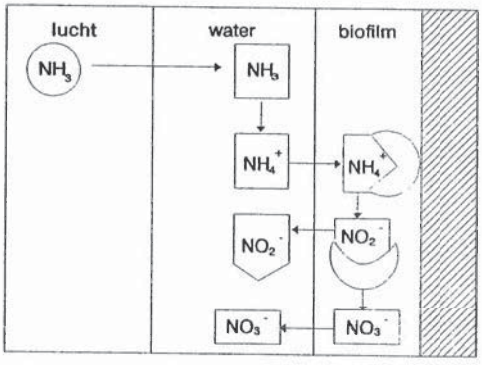
$$H_{aNtot} = H_{am}(1 + K_b[OH^-]) = H_{am}(1 + K_b \cdot 10^{(14-pH)})^{-1} \qquad (2.36)$$

Met: K_b is de baseconstante van de dissociatie in mol/l
pH is de pH van het water

Uit formule 2.36 blijkt dat H_{aNtot} afhankelijk is van de pH en van de grootte van K_b. Als aangenomen wordt dat K_w gelijk is aan 10^{-14} mol²/l² dan kan K_b berekend worden met formule E8 uit bijlage E (Betterton, 1992).

2.5 Nitrificatie

Toen het IMAG in 1971 voor het eerst experimenteerde met de biowasser bleek dat zich op het pakkingsmateriaal een bacterieflora ontwikkelde. Deze bacterieflora bleek onder andere te bestaan uit de nitrificerende bacteriën, Nitrosomonas en Nitrobacter. Het ontwikkelen van deze bacteriën op het pakkingsmateriaal van de wassectie is niet verrassend, omdat ze chemo-autotroof zijn. Chemo-autotroof zijn wil zeggen dat de bacteriën een anorganische stof als energiebron en koolstofdioxide als koolstofbron gebruiken. Als ammonia oplost in water en dan dissocieert tot ammonium, kan ammonium dus benut worden als anorganische energiebron. Verder blijken de omstandigheden die heersen in de biowasser overeen te komen met de omstandigheden waaronder deze nitrificerende bacteriën gewoonlijk groeien. In figuur 2.17 is schematisch weergegeven hoe de nitrificatie verloopt in de wassectie.



Figuur 2.17 Schematische weergave van het absorptieproces met dissociatie en nitrificatie van NH_3 van lucht naar water.

De bacteriën Nitrosomonas en Nitrobacter leven, zoals te zien is in figuur 2.17, in een biofilm die

gehecht is aan het pakkingsmateriaal. Als ammonium vanuit het water in de biofilm diffundeert dan kan Nitrosomonas ammonium oxideren tot nitriet:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 4H^+ + 2H_2O + E$$

Met: $240 \leq E \leq 350$ kJ

De biomassa, het aantal Nitrosomonas-bacteriën in de vorm van $C_5H_7NO_2$, dat gevormd wordt volgt uit de energie die nodig is voor de opbouw en het onderhoud van de bacteriën. Bij Nitrosomonas geldt daarvoor de volgende reactie:

$$55NH_4^+ + 76O_2 + 109HCO_3^- \rightarrow C_5H_7NO_2 + 54NO_2^- + 57H_2O + 104H_2CO_3$$

Er kan een opbrengstcoëfficiënt Y worden gedefinieerd die aangeeft hoeveel g biomassa er gevormd kan worden door de oxidatie van 1 gram substraat.
In de tweede stap oxideert Nitrobacter nitriet tot nitraat, hiervan is de reactievergelijking:

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- + E$$

Met: $65 \leq E \leq 90$ kJ

De biomassa, het aantal Nitrobacter-bacteriën, dat gevormd wordt door de oxidatie van nitriet is rekening houdend met de energie die nodig is voor onderhoud en opbouw, gelijk aan de reactievergelijking:

$$400NO_2^- + NH_4^+ + 4H_2CO_3 + HCO_3^- + 195O_2 \rightarrow C_5H_7NO_2 + 3H_2O + 400NO_3^-$$

Uit de reactievergelijkingen volgt dat bij de oxidatie van 1 mol NH_4^+ meer biomassa gevormd kan worden dan het geval is bij de oxidatie van 1 mol NO_2^-. Dit komt doordat bij de oxidatie van 1 mol ammonium meer energie vrijkomt (circa 300 kJ) dan bij de oxidatie van 1 mol nitriet het geval is (circa 80 kJ).
Ondanks het feit dat er grotere groeiopbrengsten zijn bij de oxidatie van ammonium hoeft dit niet te betekenen dat in de natuur het aantal ammonium-oxiderende bacteriën groter is dan het aantal nitriet-oxiderende bacteriën. Het voorkomen van de bacteriën in de natuur wordt namelijk ook bepaald door tal van andere omstandigheden, zoals het voorkomen van substraat.
De gevormde produkten, nitriet en nitraat, diffunderen vanuit de biofilm weer terug naar het water. Het water dat uit de wassectie komt kan dus NH_3(aq), NH_4^+(aq), NO_2^-(aq) en NO_3^-(aq) bevatten. In het resterende gedeelte van deze paragraaf zullen enkele eigenschappen van Nitrosomonas en Nitrobacter worden besproken (Sharma en Ahlert, 1977);(Wiesman, 1994).

2.5.1 De groei van Nitrosomonas en Nitrobacter

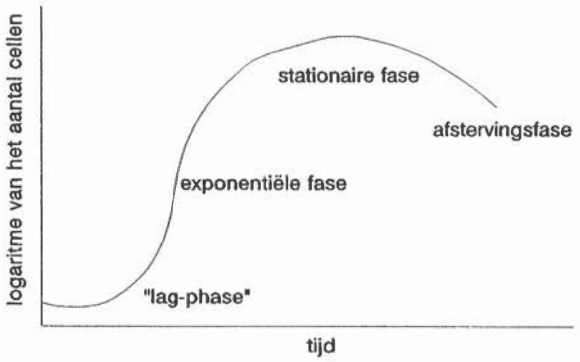
Als de groei van nitrificeerders wordt vergeleken met de groei van de meeste heterotrofe bacteriën dan groeien nitrificeerders langzaam. Een korte generatietijd, dit is de tijd die verstrijkt tussen twee delingen, van 8 uur voor zowel Nitrosomonas als Nitrobacter is gesignaleerd in reincultures. In de natuur zijn generatietijden van 20-40 uur voor beide bacteriën veel realistischer (Focht en Verstraete, 1977).
Als aan een bepaalde voedingsoplossing een klein aantal (nitrificerende) bacteriën wordt toegevoegd

(= enten), dan wordt een groeikromme zoals in figuur 2.18 te zien is verkregen.

Na een periode met vertraagde celdeling, de "lag-phase", komt de exponentiële fase waar de celdeling verloopt volgens de generatietijd g van de bacterie. Tijdens deze exponentiële fase geldt dat het aantal celdelingen gelijk is aan:

$$n = \frac{t}{g} \qquad (2.37)$$

Met: n is het aantal celdelingen tijdens de exponentiële fase
t is de tijdsduur van de exponentiële fase in hr
g is de generatietijd van de bacterie in hr



Figuur 2.18 Groeikromme van een bacterie in batch. Bron: Dictaat Microbiologie, 19??.

Doordat bijvoorbeeld de voeding niet toereikend is komt de groei van de bacteriën in de stationaire fase. In de stationaire fase blijft het aantal cellen constant. Tijdens de laatste fase, de "death-phase", vindt exponentiële afname plaats van het aantal cellen. De optredende afstervingssnelheid is evenals de generatiesnelheid afhankelijk van het type bacterie.
De duur van de "lag-phase" hangt behalve van het type bacterie ook af van de conditie van de cellen die en van het aantal cellen dat toegevoegd wordt en van de samenstelling van de voedingsoplossing. Het is namelijk zo dat cellen die zich bevinden in de exponentiële fase sneller gaan delen dan cellen uit andere fasen. De "lag-phase" moet dus gezien worden als een aanpassingsperiode van de toegevoegde bacterie.
De groeisnelheid die optreedt tijdens de exponentiële fase is afhankelijk van uitwendige groeifactoren en van de generatietijd van de bacterie. De uitwendige groeifactoren worden onder andere bepaald door de aanwezigheid van groeiremmende stoffen en van de hoeveeheid aanwezige voedingsoplossing. In de exponentiële fase geldt dat de biomassa verandert volgens de volgende relatie:

$$\frac{dx}{dt} = \mu^m \cdot x \qquad (2.38)$$

Met: dx/dt is de verandering van de biomassa in de tijd in mg/l.hr
μ^m is de specifiek groeisnelheid of de groeisnelheid per eenheid gevormde biomassa in hr^{-1}
x is de hoeveelheid biomassa in mg d.s./l, met d.s. is het droge stofgehalte

Als formule 2.38 geïntegreerd wordt over de tijdsduur van de exponentiële fase, dan geldt:

$$x_t = x_0 \cdot e^{\mu^m \cdot t} \qquad (2.39)$$

Dit kan herleid worden naar een uitdrukking voor de specifieke groeisnelheid, namelijk:

$$\mu^m = \frac{\ln x_t - \ln x_0}{t} \qquad (2.40)$$

Met: x_t is de biomassa op tijdstip t in mg d.s./l

x_0 is de biomassa op tijdstip 0 in mg d.s./l
t is de tijdsduur die verstrijkt tussen x_0 en x_t in hr

Als voor t in formule 2.40 de generatietijd g wordt ingevuld, dan geldt $x_t = 2 \cdot x_0$, dus:

$$\mu^m = \frac{\ln 2x_0 - \ln x_0}{g} = \frac{0.69}{g} \qquad (2.41)$$

De specifieke groeisnelheid volgt dus uit de generatietijd g van de bacterie.
In de exponentiële fase, zie figuur 2.18, is μ^m gelijk aan de maximale specifieke groeisnelheid, $\mu_{max}{}^m$.
In groeisystemen, zoals de biowasser, verkeren de bacteriën niet constant in deze exponentiële fase.
De groeisnelheid van de bacteriën kan dan beschreven worden met de kinetiek van Monod:

$$\mu^m = \mu^m_{max} \cdot \frac{S^i}{K_s^{i,m} + S^i} \qquad (2.42)$$

Met: S^i is de concentratie van het substraat van de bacteriën
$K_s{}^{i,m}$ is de substraatconcentratie waarbij $\frac{1}{2} \cdot \mu^m{}_{max}$ wordt gehaald

De enige eis die wordt gesteld aan de eenheden van S en K_s is dat ze aan elkaar gelijk moeten zijn.
Bij Nitrosomonas is het substraat S ammonium en bij Nitrobacter is het substraat S nitriet.

In de Monod-kinetiek uit formule 2.42 treedt alleen maar remming van de groeisnelheid op als het substraat limiterend is. De groeisnelheid van de bacteriën wordt echter ook nog door andere factoren beïnvloedt zoals pH en temperatuur(van Egeraat, 1991).
In subparagraaf 2.5.2 zullen een aantal van deze factoren worden behandeld.
Naast de benodigde energie voor het groeien heeft de bacterie ook energie nodig voor zijn onderhoud. De consumptiesnelheid van het substraat is dus niet alleen afhankelijk van de groei zoals vermeld staat in formule 2.42, maar is ook afhankelijk van de mate van onderhoud. Hunik (1993) heeft de Monod-kinetiek zo aangepast dat de substraatconsumptiesnelheid als volgt geschreven kan worden:

$$q^{i,m} = \frac{\mu^m \cdot X^m}{Y^m} + m_s^m \cdot X^m \left[\frac{S^i}{(K_s^{i,m} + S^i) \cdot K_I} \right] \qquad (2.43)$$

Met: $q^{i,m}$ is de substraatconsumptiesnelheid door bacterie m in mol N/m^3 biofilm.s
X^m is de biomassaconcentratie in kg biomassa/m^3 biofilm
m_s^m is de onderhoudscoëfficiënt van bacterie m in mol N/kg biomassa.s
K_I is een gecombineerde remmingsconstante in mol N/m^3

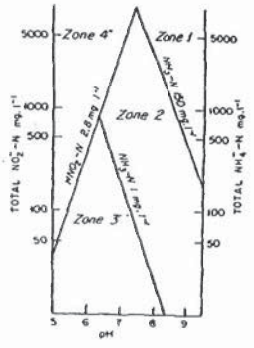
De eerste term uit het rechterlid van formule 2.43 is de substraatconsumptiesnelheid als gevolg van groei van de bacterie. De tweede term uit formule 2.43 geeft dus de substraatconsumptiesnelheid voor het onderhoud van de bacterie aan. Als er een evenwicht heerst in de biowasser is vooral de onderhoudsterm uit formule 2.43 belangrijk voor de consumptiesnelheid. Bij de opbouw van de biomassa wordt de consumptiesnelheid vooral beïnvloedt door de groeiterm uit formule 2.43. De waarden van de parameters uit formule 2.43 zijn afhankelijk van de omstandigheden waaronder de bacteriën leven. De activiteit van de bacteriën is daarmee ook afhankelijk van deze omstandigheden (Hunik, 1993).

2.5.2 *Factoren die de nitrificatie beïnvloeden*

Voor het halen van een hoog rendement van de biowasser is het noodzakelijk dat er zo min mogelijk NH_3 en NH_4^+ in het water zit, zodat de drijvende kracht voor overdracht van NH_3 van lucht naar water hoog blijft. Het is dus belangrijk dat de nitrificatie zo optimaal mogelijk verloopt blijft er weinig NH_4^+ in het water achter.
Het is dus belangrijk om te weten welke parameters de groei en activiteit (= substraatconsumptiesnelheid) van de nitrificerende bacteriën beïnvloeden. De belangrijkste parameters die dit beïnvloeden zijn temperatuur, pH, O_2, substraten en produkten. De invloed is veelal alleen bekend voor gesuspendeerde nitrificeerders en niet voor nitrificeerders die leven in een biofilm, ofwel geïmmobiliseerd zijn. De genoemde invloeden moeten dus met voorzichtigheid gehanteerd worden voor geïmmobiliseerde nitrificeerders.

2.5.2.1 *De remming door de aanwezigheid van substraten en produkten*

Zowel Nitrosomonas als Nitrobacter worden geremd door hun eigen substraat en door het substraat van de ander. Volgens Anthonissen (1974) hangt de mate van remming af van de ligging van het ammonia-ammonium en het nitriet-salpeterzuur evenwicht (Anthonissen et al., 1976). De ligging van deze evenwichten wordt beïnvloedt door de pH (Sharma en Ahlert, 1977).
Bij een hoge pH is er veel vrij ammonia aanwezig en bij een lage pH is de concentratie van salpeterzuur relatief hoog. Het is aangetoond dat bij een bepaalde concentratie vrije ammonia (FA) complete remming van Nitrosomonas en Nitrobacter optreedt. Bij lagere concentraties van FA is de remming van Nitrosomonas lager dan deze bij Nitrobacter is. De laatste situatie zorgt voor een ophoping van nitriet. Ook is er aangetoond dat vrij gasvormig salpeterigzuur (FNA) bij bepaalde concentraties remmend kan werken op Nitrobacter. In figuur 2.19 is de remming van de nitrificatie door FA en FNA aangegeven in afhankelijkheid van de pH.



Figuur 2.19 De tolerantie van de nitrificatie ten aanzien van FA en FNA in afhankelijkheid van de pH. Bron: Focht en Verstraete, 19???.

In figuur 2.19 geeft zone 1 de condities weer waarbij FA zo hoog is dat zowel Nitrosomonas als Nitrobacter geremd worden. In deze zone vindt dus geen nitrificatie plaats en treedt er ophoping van FA op. Bij lagere concentraties van FA wordt alleen Nitrobacter geremd en treedt er ophoping op van nitriet, dit is zone 2. Bij nog lagere concentraties van FA en niet te hoge concentraties van FNA vindt er geen remming plaats en zal de nitrificatie volledig tot nitraat verlopen, zone 3. In zone 4 wordt Nitrobacter geremd door een te hoge concentratie van FNA en zal nitriet zich ophopen.
De remming door FA en FNA vindt plaats bij bepaalde concentraties, die beïnvloedt worden door acclimatisering van de nitrificerende bacteriën tegen FA en FNA, temperatuur en het aantal actieve nitrificeerders (Anthonissen et al., 1976).
Volgens Hunik (1993) speelt bij geïmmobiliseerde cellen van Nitrosomonas de remming door het substraat NH_3/NH_4^+ geen rol als de pH ongeveer 7 à 8 is. De remming van de activiteit door het produkt nitriet treedt alleen op bij een pH lager dan 7. De activiteit van Nitrosomonas wordt niet beïnvloedt door de aanwezigheid van het produkt nitraat van Nitrobacter. Aangezien de pH in een biowasser tussen 7 en 8 ligt wordt Nitrosomonas in de

biowasser niet geremd door produkten en substraten. De remmingsconstante K_I uit formule 2.43 is voor Nitrosomonas dus gelijk aan 1.
Geïmmobiliseerde cellen van Nitrobacter worden wel geremd door het eigen produkt nitraat en tevens treedt remming op van de activiteit door het substraat nitriet. Van Hunik (1993) zegt dat de activiteit van geïmmobiliseerde cellen van Nitrobacter niet-competitief geremd wordt door het substraat nitriet en het produkt nitraat. Dit komt tot uiting in de remmingsconstante K_I die is toegevoegd aan de kinetiek van Monod, zoals te zien is in formule 2.43.

De remmingsconstante K_I is voor Nitrobacter gelijk aan:

$$K_I = [1 + \frac{S_{NO_2^-}}{I_{NO_2^-}}] \cdot [1 + \frac{S_{NO_3^-}}{I_{NO_3^-}}] \qquad (2.44)$$

Met: I_i is de remmingsconstante voor het produkt i
(Hunik, 1993)

2.5.2.2 De remming door zuurstof

Nitrosomonas en Nitrobacter zijn aeroob, dit betekent dat ze zuurstof nodig hebben voor de oxidatie van ammonium en nitriet, zoals volgt uit de reacties. De O_2-consumptie door Nitrosomonas en Nitrobacter is vergeleken met heterotrofe bacteriën vrij hoog. Dit betekent dat Nitrosomonas en Nitrobacter slechte concurrenten voor andere bacteriën zijn bij lage zuurstofconcentraties.
Voor een actieve nitrificatie is dus een adequate beluchting nodig. Ondanks dat de wassectie continue belucht wordt treedt er in de biofilm toch zuurstoflimitatie op. De diffusie van O_2 naar de biofilm is in een praktische toepassing namelijk vaak onvoldoende. Het kan dus zo zijn dat er voldoende substraat aanwezig is voor de bacterie om actief te functioneren, echter door gebrek aan zuurstof kan de bacterie toch niet optimaal functioneren. In dit geval is zuurstof dus het limiterend substraat en is de substraatconsumptiesnelheid in dit geval afhankelijk van de concentratie van zuurstof (Hunik, 1993).

2.5.2.3 De remming door de temperatuur

De groei van nitrificerende bacteriën blijkt optimaal te zijn bij temperaturen tussen 28°C en 36°C (Sharma en Ahlert, 1977). Er wordt verwacht dat er geen nitrificatie optreedt bij temperaturen hoger dan 40°C en temperaturen lager dan 5°C (Focht en Verstraete, 1977). Vaak wordt de vergelijking van Arrhenius en van't Hoff, die gebruikt wordt om de temperatuursafhankelijkheid van chemische reacties te beschrijven, ook gebruikt voor de temperatuursafhankelijkheid van nitrificatie. De Arrheniusvergelijking is als volgt gedefinieerd:

$$k = k_0 \cdot e^{-(\frac{E_a}{R \cdot T})} \qquad (2.45)$$

Met: k is hierin de snelheidsconstante (-)
E_a is de activeringsenergie in kJ

Bij chemische reacties is de activeringsenergie een constante, echter bij bacteriën neemt de activeringsenergie af bij een toenemende temperatuur. Bij temperaturen lager dan 30°C kan de reactiesnelheid van de bacteriën in voldoende mate beschreven worden met formule 2.45 (Smits, 1996).

2.5.2.4 De remming door de pH

Nitrosomonas kan groeien in een pH-bereik van 5.8-9.5 en Nitrobacter groeit in het pH-bereik van 5.7-10.2. Het is aangetoond dat de groei en het metabolisme van Nitrosomonas en Nitrobacter optimaal is bij een pH tussen 7 en 8. De pH waarbij volledige nitrificatie plaatsvindt wordt bepaald door de toxiciteit van FA en van FNA. Dit fenomeen is behandeld bij de remming van de nitrificatie door substraten en produkten in paragraaf 2.5.2.1 (Focht en Verstraete, 1977).

2.5.2.5 De remming in de biofilm

De biofilm, waarin de bacteriën leven, is te zien als een dun laagje dat ligt op het pakkingsmateriaal. In deze biofilm kunnen ook andere bacteriën dan nitrificeerders leven, dit is afhankelijk van de omstandigheden die heersen in de biofilm.
De meeste bacteriën zijn gelocaliseerd aan de rand van de biofilm. Dit komt omdat daar de beste omstandigheden met betrekking tot substraat, O_2 en pH heersen. Er is namelijk aangetoond dat de substraat- en de O_2-concentraties en de pH afnemen met de diepte van de biofilm.
Er wordt daarom veel gesproken over een actief gedeelte van de biofilm en een niet-actief gedeelte van de biofilm. Door Smits (1996) is voorgesteld om de dikte van deze actieve laag 300 μm te nemen (Smits, 1996). Als de totale biofilm bekeken wordt, dan zijn de minimale dichtheden 13 en 6.5 kg biomassa per m^3 biofilm voor respectievelijk Nitrosomonas en Nitrobacter (Wijffels et al., 1991).

3 ONTWERPEN VAN EEN BIOWASSER

De biowasser die ontworpen gaat worden, moet de ammoniak-emissie uit mechanisch geventileerde stallen reduceren. Om uit te vinden welke onderdelen van de biowasser erg belangrijk zijn bij het ontwerpen wordt een lijst gemaakt van primaire en secundaire functies van de biowasser. In tabel 3.1 zijn de primaire en secundaire functies van de biowasser samengevat.

Tabel 3.1 *Primaire en secundaire functies van de biowasser.*

Primaire functie
- reduceren van de ammoniak-emissie uit mechanisch geventileerde stallen
Secundaire functies
- voldoen aan maximale ventilatiebehoefte
- veilig zijn voor mens en dier
- continue kunnen werken
- bestendig zijn tegen omgeving
- goedkoop zijn
- weinig onderhoud nodig
- afvalstromen mogen niet belastend voor het milieu zijn
- moet inpasbaar zijn in de stal
- uiterlijk moet in stal passen
- niet veel lawaai maken

De functies uit tabel 3.1 kunnen samengevat worden in de volgende algemene termen:

- *Uiterlijk (U)*
  (uiterlijk moet in stal passen, bestendig zijn tegen omgeving, moet inpasbaar zijn in de stal)
- *Prestatie (P)*
  (reduceren NH_3-emissie, voldoen aan maximale ventilatiebehoefte, afvalstromen mogen niet belastend voor het milieu zijn)
- *Veiligheid (V)*
  (veilig zijn voor mens en dier)
- *Betrouwbaarheid (B)*
  (weinig onderhoud nodig, continue werken)
- *Kosten (K)*
  (goedkoop zijn)

In tabel 3.2 worden deze algemene termen in belangrijkheid ten opzichte van elkaar beoordeeld. Hierbij wordt uitgegaan dat een term met maximaal 100 punten kan worden gewaardeerd.

Tabel 3.2 *Beoordelingstabel voor ontwerpen van een biowasser.*

	U	P	V	B	K	Gemiddeld:
U	X	20	30	20	20	22.5
P	80	X	70	60	60	67.5
V	70	30	X	50	60	52.5
B	80	40	50	X	60	57.5
K	80	40	40	40	X	50

In tabel 3.2 geeft bijvoorbeeld het getal 80 uit de 1e kolom en de 2e rij de waardering aan van de term prestatie ten opzichte van de term uiterlijk. Uit de score 80 blijkt dat de term prestatie belangrijker

is dan de term uiterlijk.
In de laatste kolom van tabel 3.2 staat de gemiddelde score met betrekking tot belangrijkheid van alle termen. Hieruit blijkt dat bij het ontwerpen van de biowasser de belangrijkste parameter de prestatie moet zijn. Bij het ontwerpen moet dus rekening worden gehouden met de volgende parameters, die gerangschikt zijn in afnemende mate van belangrijkheid:

1. de prestatie van de biowasser;
2. de betrouwbaarheid van de biowasser;
3. de veiligheid van de biowasser;
4. de kosten van de biowasser;
5. het uiterlijk van de biowasser.

In de volgende paragrafen zal de biowasser eerst worden ontworpen op basis van absorptiegegevens. Daarna zal de invloed van de dissociatie van NH_3 op het ontwerp van de biowasser worden beschreven. En als laatste zal worden aangegeven hoe de nitrificatie het ontwerp van de biowasser beïnvloedt.
In dit hoofdstuk zal tevens vermeld worden welke mogelijkheden er zijn voor het verwerken van de afvalstromen van de biowasser en zullen er een aantal typen biowassers worden behandeld (Starkey, 1988).

3.1 Theorie over het ontwerpen van de biowasser op basis van absorptie

Zoals uit het voorgaande blijkt is de prestatie de belangrijkste parameter waarmee rekening wordt gehouden in het ontwerpen van een biowasser. Er zal nu eerst gekeken worden naar de ventilatie door de wassectie van de biowasser.

3.1.1 Ontwerpeisen voor de ventilatie door de biowasser

Zoals is vermeld in hoofdstuk 2 treedt er een bepaalde drukval op over de wassectie als er gas en vloeistof doorheen stromen. In hoofdstuk 2 werd uitgelegd dat deze drukval binnen bepaalde grenzen dient te blijven, in het geval van absorptie is de grens gelijk aan waarden die liggen tussen 15 en 50 mm H_2O per m wassectie.
Bij toepassing van de biowasser in de veehouderij gelden er echter nog andere eisen voor de ventilatie. Elke diersoort kent namelijk een maximale ventilatiebehoefte. In tabel 3.3 zijn voor een aantal diersoorten deze maximale ventilatiebehoeften gegeven.

Tabel 3.3 *Maximale ventilatiebehoefte van een aantal diersoorten.*

Diersoort	Maximale ventilatiebehoefte in m^3/hr·dierplaats
Zeug met biggen	200 - 250
Gespeende biggen (10 dgn)	250 - 300
Guste/dragende zeugen	150
Opfokzeug/vleesvarken (100kg)	80 - 100

De maximale ventilatie die gerealiseerd kan worden met de biowasser wordt bepaald door de ventilatiecapaciteit van de ventilator. De capaciteit van de ventilator moet dus zo gekozen worden dat

de maximale ventilatiebehoefte gehaald wordt. Tevens moet de drukval die optreedt over de wassectie door de ventilator overwonnen worden zonder dat de ventilaticapaciteit afneemt tot een waarde die niet meer voldoende is. Het is namelijk een gegeven dat als de te overwinnen drukval toeneemt de capaciteit van de ventilator afneemt.
De drukval die optreedt in de wassectie is afhankelijk van de lengte en de diameter van de aan- en afvoerleidingen van en naar de biowasser en de hoogte en de diameter van de wassectie. In dit verslag zal bij het kiezen van een ventilator alleen rekening worden gehouden met de drukval die optreedt in de wassectie. In de veehouderij past men vaak een ventilator toe van de firma FANCOM. De ventilatiecapaciteit van deze ventilatoren wordt, tot een totale drukval over de wassectie van 5 mm H_2O, niet of nauwelijks beïnvloedt.
Er zijn nog enkele andere eisen waaraan een ventilator van een biowasser moet voldoen, dit zijn:

- de ventilator moet bestendig zijn tegen het gas dat ermee wordt verpompt;
- de geluidsproduktie van de ventilator moet binnen de aangegeven grenzen blijven.

(Gaswassers, 1984)

3.1.2 Ontwerpeisen voor de hoeveelheid reductie van de verontreiniging

De mate van reductie, van de verontreinigingen uit het gas, is afhankelijk van onder andere de soort wasvloeistof, het soort pakkingsmateriaal, de diameter en de hoogte van de wassectie, de vloeistofverdeling en de drukval over de wassectie. De drukval die optreedt over de wassectie is behandeld in paragraaf 2.2.2.

3.1.2.1 Keuze van de wasvloeistof

De wasvloeistof is de vloeistof waarmee de verontreinigingen uit de gasstroom worden gewassen. Het is belangrijk om een wasvloeistof te kiezen waarin de verontreinigingen vanuit de gasstroom redelijk tot goed in oplossen. De oplosbaarheid van een bepaalde stof staat vaak vermeld in chemische handboeken zoals Perry's Chemical Engineer's Handbook. Door de verdelingscoëfficiënt H te bepalen kan een uitspraak worden gedaan over de mate van oplosbaarheid. Voor een hoge reductie is het belangrijk dat de verontreiniging goed oplosbaar is in de wasvloeistof en H moet dus klein zijn (Perry et al., 1985).
Vanuit milieu-oogpunt is het ook belangrijk om een wasvloeistof te kiezen die geen milieuvervuiling creëert, doordat er chemicaliën aan toegevoegd moeten worden (van Geelen et al., 1982).
Uit paragraaf 2.4 blijkt dat op grond van bovenstaande criteria water een goede wasvloeistof is voor NH_3.

3.1.2.2 Keuze van het pakkingsmateriaal

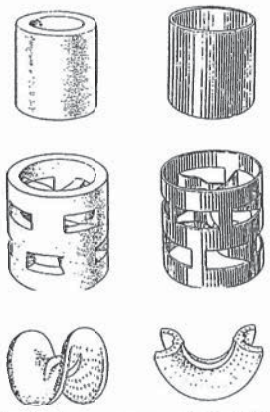
Het soort pakkingsmateriaal beïnvloedt de vloeistofverdeling en de drukval over de wassectie. Een pakkingsmateriaal is een materiaal dat een groot oppervlak heeft per volume-eenheid, dit wordt specifiek oppervlak genoemd. Als een pakkingsmateriaal wordt toegepast in de wassectie dan stroomt de vloeistof langs dit pakkingsmateriaal naar beneden. Door het grote specifieke oppervlak van het pakkingsmateriaal wordt het contactoppervlak tussen het gas en de vloeistof ook groot. Dit heeft een positieve invloed op de overdracht van de verontreinigingen van gas naar vloeistof. De verschillende soorten pakkingsmateriaal kunnen verdeeld worden in twee groepen:

1. pakkingsmateriaal met een uniforme vorm: in de wassectie is dit terug te vinden als

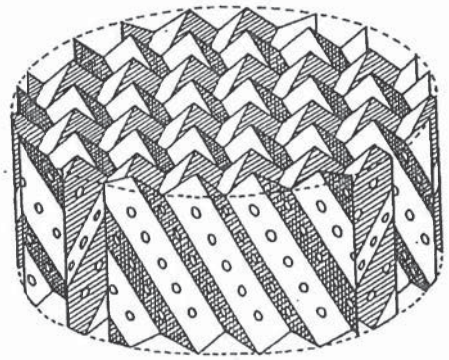
gestapelde ringen en modulaire vaste pakkingen;

2. pakkingsmateriaal van willekeurige vormen, zoals ringen, zadels, etc. Dit pakkingsmateriaal wordt los gestort in de wassectie.

In figuur 3.1 en 3.2 staan diverse soorten pakkingsmateriaal weergegeven.



Figuur 3.1 *Eenheden van verschillende soorten pakkingsmateriaal. Bron: Sinnott, 1993.*



Figuur 3.2 *Modulair pakkingsmateriaal. Bron: Sinnott, 1993.*

De verschillende soorten pakkingsmateriaal zijn verkrijgbaar in verschillende diameters en zijn gemaakt van diverse materialen - zoals kunststof, keramiek en metaal. Ieder soort pakkingsmateriaal wordt gekenmerkt door onder andere verschillen in bulkgewicht, specifiek oppervlak, pakkingsfactor, vrij volume en aantal eenheden pakkingsmateriaal dat in een volume van 1 m^3 past. De definities van deze kenmerken zijn:

1. Bulkgewicht (B): aantal kg pakkingsmateriaal per m^3 volume gevuld met pakkingsmateriaal (kg/m^3);
2. Specifiek oppervlak (a_t): pakkingsoppervlak van een eenheid pakkingsmateriaal (m^2/m^3);
3. Pakkingsfactor (F_p): pakkingsoppervlak van een volume met daarin gestort pakkingsmateriaal (m^2/m^3);
4. Vrij volume (ϵ): het vrije volume ten opzichte van het totale volume van een eenheid pakkingsmateriaal (-);
5. Aantal eenheden pakkingsmateriaal per m^3 (N_v).

Deze gegevens zijn verkrijgbaar bij de fabrikant van een pakkingsmateriaal.

De eisen waaraan een pakkingsmateriaal moet voldoen in een biowasser zijn:

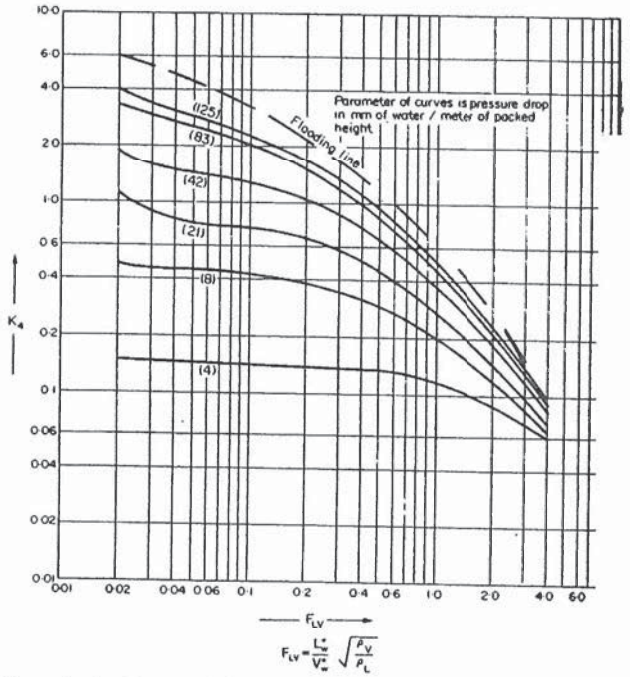
a. het pakkingsmateriaal moet een groot contactoppervlak bewerkstelligen tussen vloeistof en gas, zodat de absorptie goed kan verlopen.
b. het pakkingsmateriaal moet chemisch inert zijn tegen de gas- en vloeistofstromen in de biowasser.
c. het pakkingsmateriaal moet zorgen voor een uniforme gas- en vloeistofverdeling langs de dwarsdoorsnede van de wassectie.
d. de drukval die optreedt over de wassectie moet laag zijn.
e. het pakkingsmateriaal moet sterk zijn zonder overmatig gewicht.
f. de eigenschappen van het pakkingsmateriaal moet gunstig zijn voor de gewenste stofoverdracht. Deze informatie is vaak bij de fabrikant te verkrijgen.
g. de kosten per eenheid pakkingsmateriaal moeten zo laag mogelijk blijven.

De keuze voor een bepaald pakkingsmateriaal is dus een afweging tussen de technische eisen en de

toelaatbare kosten. Deze afweging moet voor elke soort stofoverdracht weer opnieuw gemaakt worden. Tevens is het zo dat bij een bepaalde stofoverdracht niet één uniek pakkingsmateriaal bestaat, maar meerdere pakkingsmaterialen toegepast kunnen worden. De fabrikant van het pakkingsmateriaal kan benaderd worden om de keuze voor een bepaald pakkingsmateriaal te begeleiden (Coulson et al., 1993a);(Gaswassers, 1984);(McCabe et al., 1967);(Perry et al., 1985);(Sinnott, 1993).

3.1.2.3 Keuze van de diameter van de wassectie, door het dwarsoppervlak te bepalen

Het dwarsoppervlak van de wassectie kan bepaald worden uit de drukval-correlatiecurve die algemeen geldig is. Deze curve wordt weergegeven in figuur 3.3.



Figuur 3.3 Algemeen geldige drukval-correlatiecurve. Bron: Sinnott, 1993.

De drukval-correlatiecurve uit figuur 3.3 is ontwikkeld om te helpen bij het ontwerpen van de wassectie van een gepakte kolom oftewel een biowasser. In deze figuur zitten gegevens verwerkt met betrekking tot debieten, fysische eigenschappen van de vloeistof, het pakkingsmateriaal en de drukval. Deze gegevens zijn verwerkt in de flowfactor F_{gavl}, de factor K_4 en de drukval die uitgezet zijn in figuur 3.3. De flowfactor kan pas berekend worden als de absorptiefactor bepaald is. Deze absorptiefactor is gelijk aan:

$$Absorptiefactor = \frac{m \cdot G_m}{L_m} \qquad (3.1)$$

Met: m is de verdelingscoëfficiënt gebaseerd op de molfracties (-)
G_m is het molaire gasdebiet per dwarsoppervlak in mol/m^2·s
L_m is het molaire vloeistofdebiet per dwarsoppervlak in mol/m^2·s

Hoe deze absorptiefactor bepaald kan worden is uitgelegd in paragraaf 3.1.2.5.
De flow-factor kan nu bepaald worden uit het volumetrische gas- en vloeistofdebiet, G' en L'. De

flow-factor is namelijk gelijk aan:

$$F_{gavl} = \frac{L}{G} * \sqrt{\frac{\rho_{ga}}{\rho_{vl}}} = \frac{L' * A}{G' * A} * \sqrt{\frac{\rho_{ga}}{\rho_{vl}}} = \frac{L'}{G'} * \sqrt{\frac{\rho_{ga}}{\rho_{vl}}} \qquad (3.2)$$

Met: A is het dwarsoppervlak van de wassectie in m^2
F_{gavl} is de dimensieloze flowfactor (-)

Met de berekende flowfactor en de gewenste drukval ΔP in mm H_2O per m wassectie kan de factor K_4 worden afgelezen uit figuur 3.3. Door bij dezelfde flowfactor de factor K_4 af te lezen bij flooding kan het percentage flooding worden bepaald met formule 3.3.

$$\%flooding = \left[\frac{K_4 \text{ bij gewenste ontwerpdrukval}}{K_4 \text{ bij flooding}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.3)$$

Als het percentage flooding ligt tussen 50 en 75 % dan is de juiste drukval gekozen.
Nu K_4 bekend is kan het massadebiet van het gas per m^2 dwarsoppervlak, G, berekend worden met formule 3.4:

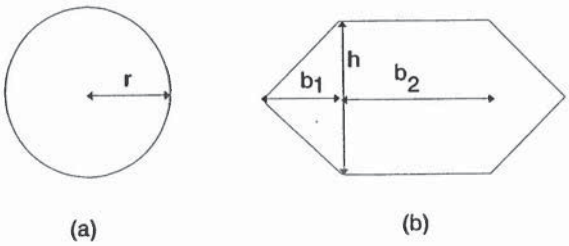
$$G = \left[\frac{K_4 * \rho_{ga} * (\rho_{vl} - \rho_{ga})}{13.1 * F_p * (\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl}})^{0.1}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.4)$$

Het dwarsoppervlak A van de wassectie volgt nu uit de verhouding tussen G' en G, en is dus gelijk aan:

$$A = \frac{G'}{G} \qquad (3.5)$$

Uit formule 3.5 volgt een waarde voor het dwarsoppervlak A, deze kan desgewenst afgerond worden. Als men het dwarsoppervlak sterk afrondt dan moet het percentage flooding nog een keer gecontroleerd worden. De diameter van de wassectie kan nu berekend worden uit het dwarsoppervlak. De diameter is afhankelijk van de gekozen vorm van het dwarsoppervlak. De vorm van het dwarsoppervlak kan zelf gekozen worden en in figuur 3.4 zijn twee voorbeeldvormen gegeven.

De diameter van de wassectie die volgt uit het dwarsoppervlak moet voldoen aan de vuistregel die gesteld is in paragraaf 2.2. Deze vuistregel bepaald dat de verhouding tussen de diameter van de wassectie en de diameter van het pakkingsmateriaal minimaal 8 moet zijn. Als deze verhouding kleiner is dan 8 dan moet het dwarsoppervlak opnieuw ontworpen worden. Door de diameter van het pakkingsmateriaal kleiner en/of de gewenste drukval kleiner te nemen kan er voor gezorgd worden dat het nieuwe dwarsoppervlak wel aan deze eis voldoet.

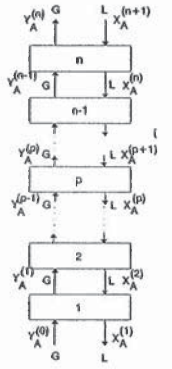


Figuur 3.4 Mogelijke dwarsoppervlakken van de biowasser.

Als de verhouding groter is dan 8 kan er overwogen worden om de diameter van het pakkingsmateriaal en/of de gewenste drukval groter te nemen. De voor het ontwerp bepalende diameter is altijd de kleinste diameter van de wassectie (Sinnott, *1993*).

3.1.2.4 Bepaling van de hoogte van de wassectie

In de wassectie van de biowasser vindt een continu verlopend tegenstroomproces plaats. De kenmerken hiervan zijn dat de gasstroom en de vloeistofstroom continu intensief contact met elkaar hebben en dus ook continu stof aan elkaar overdragen. Als de stofoverdracht, die plaatsvindt in de wassectie, opgedeeld wordt in een aantal niet werkelijk bestaande evenwichtssituaties wordt figuur 3.5 verkregen.



Figuur 3.5 *Wassectie opgedeeld in N evenwichtstrappen. Bron: Postma, 1980.*

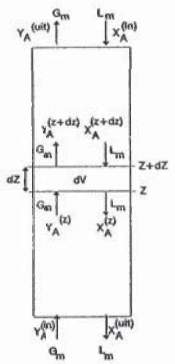
De evenwichtssituaties worden evenwichtstrappen genoemd. In één evenwichtstrap kan een bepaalde mate van scheiding tot stand worden gebracht. Deze mate van scheiding beïnvloedt de hoogte van één evenwichtstrap. De HETP is de hoogte-equivalent van een evenwichtstrap die nodig is om een bepaalde scheiding tot stand te brengen. Onder ideale omstandigheden is de HETP het kleinst. De HETP is gelijk aan de hoogte van de wassectie gedeeld door het aantal evenwichtstrappen dat nodig is om de totale gewenste scheiding te bewerkstelligen.

In formulevorm ziet dit er als volgt uit:

$$HETP = \frac{Z}{N} \tag{3.6}$$

Met: Z is de totale hoogte van de wassectie in m
N is het aantal evenwichtstrappen

De benadering om een wassectie in evenwichtstrappen op te splitsen wordt vaakt toegepast bij schotelkolommen, waarin de wassectie werkelijk uit evenwichtstrappen bestaat. De indeling in evenwichtstrappen is niet mogelijk bij de wassectie van de biowasser, omdat dit een continue tegenstroomproces is, zie figuur 3.6.
In het getekende volumedeeltje dV vindt, net zoals bij een evenwichtstrap, een bepaalde scheiding plaats. Het volumedeeltje dV is dus te vergelijken met een evenwichtstrap en de hoogte dZ is te vergelijken met de HETP. Het volumedeeltje dV wordt daarom wel een overdrachtseenheid genoemd. De totale hoogte Z van de wassectie is dus te bepalen door de integraal te nemen over alle volume-elementen met hoogte dZ uit de wassectie. Hiertoe wordt eerst de massabalans opgesteld over het volumedeeltje dV (Postma, 1980).



Figuur 3.6 *Continu verlopende stofoverdracht in de wassectie. Bron: Postma, 1980.*

Als er evenwicht wordt verondersteld in het volume-deeltje dV dan is de ingaande hoeveelheid van stof A gelijk aan de uitgaande hoeveelheid van stof A.

De balans over het volume-deeltje dV is dus gelijk aan:

$$A \cdot G_m \cdot dY_A = A \cdot L_m \cdot dX_A \tag{3.7}$$

Met: A is het dwarsoppervlak van de wassectie in m^2
G_m is het molaire debiet van het inerte gedeelte van het gas per dwarsoppervlak in $mol/m^2.s$
L_m is het molaire debiet van het inerte gedeelte van de vloeistof per dwarsoppervlak in $mol/m^2.s$
Y_A is de molfractie van stof A in het inerte gas in mol A/mol gas
X_A is de molfractie van stof A in de inerte vloeistof in mol A/mol vloeistof

Als alleen wordt gekeken naar de heersende condities in de gasfilm dan kan worden afgeleid dat geldt:

$$A \cdot G_m \cdot dY_A = N_A \cdot (A_{spec} \cdot dV) = k_{A,ga} \cdot A_{spec} \cdot (C_{A,ga} - C_{A,i,ga}) \cdot A \cdot dZ \tag{3.8}$$

Met: A_{spec} is het specifieke pakkingsoppervlak in m^2/m^3
Z is de totale hoogte van de wassectie in m

Formule 3.8 is afgeleid uit formule 2.10 uit hoofdstuk 2. Tevens is bekend dat geldt voor de molfractie van stof A in het inerte gas:

$$Y_A = \frac{C_{A,ga}}{C_{T,ga} - C_{A,ga}} \Leftrightarrow C_{A,ga} = \frac{Y_A}{1 + Y_A} \cdot C_{T,ga} \tag{3.9}$$

Met: $C_{T,ga}$ is de totale concentratie van alle deeltjes uit de gasfase in mol/m^3

$C_{T,ga}$ kan ook uitgedrukt worden in de totale druk die heerst in de gasfase via de algemene gaswet, namelijk:

$$P_{T,ga} = C_{T,ga} \cdot R \cdot T$$

Als formule 3.9 nu wordt ingevuld in formule 3.8 dan geldt:

$$A \cdot G_m \cdot dY_A = k_{A,ga} \cdot a_t \cdot C_{T,ga} \left[\frac{Y_A}{1+Y_A} - \frac{Y_{A,i}}{1+Y_{A,i}} \right] \cdot A \cdot dZ \tag{3.10}$$

Uit formule 3.10 kan worden afgeleid dat geldt:

$$G_m \cdot dY_A = k_{A,ga} \cdot a_t \cdot C_{T,ga} \left[\frac{Y_A - Y_{A,i}}{(1+Y_A)\cdot(1+Y_{A,i})} \right] \tag{3.11}$$

De hoogte Z van de totale wassectie die nodig is om y_1 (molfractie A aan de onderkant van de wassectie) te laten afnemen tot y_2 (molfractie A aan de bovenkant van de wassectie) is gelijk aan:

$$\int_0^Z dZ = Z = \frac{G_m}{k_{A,ga} \cdot a_t \cdot C_{T,ga}} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1+Y_A)\cdot(1+Y_{A,i})}{Y_A - Y_{A,i}} \cdot dY \tag{3.12}$$

Formule 3.12 kan voor verdunde concentraties van stof A in het gas nog vereenvoudigd worden tot:

$$1 + Y_{A(,i)} \approx 1 \tag{3.13}$$

De hoogte Z van de wassectie wordt voor verdunde concentraties van stof A in het gas dus gelijk aan:

$$Z = \frac{G_m}{k_{A,ga} \cdot a_t \cdot C_{T,ga}} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{dY}{Y_A - Y_{A,i}} = H_G \cdot N_G \tag{3.14}$$

Met H_G is de hoogte van een overdrachtseenheid gebaseerd op de gasfase in m en deze is gelijk aan:

$$H_G = \frac{G_m}{k_{A,ga} \cdot a_t \cdot C_{T,ga}} \tag{3.15}$$

En N_G uit formule 3.14 is het aantal overdrachtseenheden gebaseerd op de gasfase en deze is gelijk aan:

$$N_G = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dY}{Y_A - Y_{A,i}} \tag{3.16}$$

De hoogte van de overdrachtseenheid H_G is te vergelijken met de HETP die gebruikt wordt bij de beschrijving van schotelkolommen. In een overdrachtseenheid met hoogte H_G wordt dus een bepaalde scheiding gerealiseerd. Na N_G overdrachtseenheden van hoogte H_G is deze scheiding gelijk aan de reductie van y_1 tot y_2.

Door de drijvende kracht (Y_A-$Y_{A,i}$) uit vergelijking 3.14 te vervangen door (Y_A-$Y_{A,e}$) wordt de overdrachtscoëfficiënt $k_{A,ga}$ vervangen door de overall-stofoverdrachtscoëfficiënt $K_{A,ga}$, er geldt dan:

$$Z = \frac{G_m}{K_{A,ga} \cdot a_t \cdot C_{T,ga}} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{dY}{Y_A - Y_{A,e}} = H_{OG} \cdot N_{OG} \qquad (3.17)$$

Met H_{OG} is de hoogte van een overdrachtseenheid gebaseerd op de overall-gasfase in m en deze wordt bepaald als H_G uit formule 3.15 door $k_{A,ga}$ te vervangen door $K_{A,ga}$. N_{OG} is het aantal overdrachtseenheden gebaseerd op de overall-gasfase en is gelijk aan N_G als $Y_{A,i}$ uit formule 3.16 vervangen wordt door $Y_{A,e}$.

Op precies dezelfde manier kan uitgaand van de condities in de vloeistof worden afgeleid dat de hoogte van de wassectie gelijk is aan:

$$Z = \frac{L_m}{k_{A,vl} \cdot a_t \cdot C_{T,vl}} \cdot \int_{x_2}^{x_1} \frac{dX}{X_{A,i} - X_A} = H_{VL} \cdot N_{VL} \qquad (3.18)$$

Met H_{VL} is de hoogte van een overdrachtseenheid gebaseerd op de vloeistoffase in m en N_{VL} is het aantal overdrachtseenheden gebaseerd op de vloeistoffase. Op overall-basis geldt voor de hoogte van de wassectie:

$$Z = \frac{L_m}{K_{A,vl} \cdot a_t \cdot C_{T,vl}} \cdot \int_{x_2}^{x_1} \frac{dX}{X_{A,e} - X_A} = H_{OVL} \cdot N_{OVL} \qquad (3.19)$$

Met H_{OVL} is de hoogte van een overdrachtseenheid gebaseerd op de overall-vloeistoffase in m en N_{OVL} is het aantal overdrachtseenheden gebaseerd op de overall-vloeistoffase. De vergelijkingen 3.14, 3.17, 3.18 en 3.19 kunnen alleen gebruikt worden als verondersteld wordt dat de debieten en de stofoverdrachtscoëfficiënten in de wassectie constant zijn.
Voor het bepalen van de hoogte van de wassectie wordt in het algemeen N_{OG}, H_G en H_{VL} bepaald. Voor het berekenen van de hoogte Z van de wassectie is het belangrijk om de relatie tussen H_{OG} en H_G en H_{VL} te weten. Uit formule 3.14 en 3.17 volgt dat geldt:

$$\frac{H_{OG}}{Y_A - Y_{A,e}} = \frac{H_G}{Y_A - Y_{A,i}} \qquad (3.20)$$

Uit formule 3.20 volgt dat H_{OG} dus gelijk is aan:

$$H_{OG} = H_G \left[\frac{Y_A - Y_{A,i} + Y_{A,i} - Y_{A,e}}{Y_A - Y_{A,i}} \right] = H_G \left[1 + \frac{Y_{A,i} - Y_{A,e}}{Y_A - Y_{A,i}} \right] \qquad (3.21)$$

Als de evenwichtslijn nu een rechte lijn is met richtingscoëfficiënt m_A, dan geldt bij evenwicht de wet van Henry:

$$Y_{A,i} = m_A \cdot X_{A,i} \qquad (3.22)$$

INHOUDSOPGAVE

SYMBOLENLIJST A

VOORWOORD x

SAMENVATTING xx

INHOUDSOPGAVE xxx

1 INLEIDING 1 - 1
1.1 De biowasser 1 - 2
1.2 Voorgaand onderzoek naar de biowasser 1 - 3
1.3 Doel van dit onderzoek 1 - 3

2 PROCESSEN IN DE BIOWASSER 2 - 1
2.1 Stromingsprincipe van gas en vloeistof in de wassectie 2 - 2
2.2 Verdeling van vloeistof en gas in de wassectie 2 - 3
2.2.1 De vloeistofverdeling in de wassectie 2 - 4
2.2.2 Drukval in wassectie 2 - 6
2.3 Absorptie in de biowasser 2 - 7
2.3.1 Bepaling van de snelheid van de absorptie 2 - 9
2.3.2 Toepassing van de wet van Henry 2 - 11
2.3.3 Bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënten voor ammonia 2 - 14
2.3.4 Bepaling van de Henry-constante voor ammonia 2 - 16
2.4 Chemische reactie in de wassectie 2 - 18
2.4.1 Bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënt k_{aNtot} 2 - 20
2.4.2 Bepaling van de verdelingscoëfficiënt, H_{aNtot} 2 - 20
2.5 Nitrificatie 2 - 21
2.5.1 De groei van Nitrosomonas en Nitrobacter 2 - 22
2.5.2 Factoren die de nitrificatie beïnvloeden 2 - 25
2.5.2.1 De remming door de aanwezigheid van substraten en produkten 2 - 25
2.5.2.2 De remming door zuurstof 2 - 26
2.5.2.3 De remming door de temperatuur 2 - 26
2.5.2.4 De remming door de pH 2 - 27
2.5.2.5 De remming in de biofilm 2 - 27

3 ONTWERPEN VAN EEN BIOWASSER 3 - 1
3.1 Theorie over het ontwerpen van de biowasser op basis van absorptie 3 - 2
3.1.1 Ontwerpeisen voor de ventilatie door de biowasser 3 - 2
3.1.2 Ontwerpeisen voor de hoeveelheid reductie van de verontreiniging 3 - 3
3.1.2.1 Keuze van de wasvloeistof 3 - 3
3.1.2.2 Keuze van het pakkingsmateriaal 3 - 3
3.1.2.3 Keuze van de diameter van de wassectie, door het dwarsoppervlak te bepalen 3 - 5
3.1.2.4 Bepaling van de hoogte van de wassectie 3 - 7
3.1.2.4.1 Bepaling van N_{OG} 3 - 12
3.1.2.4.2 Bepaling van H_G en H_{VL} 3 - 13

3.1.2.5 Samenvatting van de stappen in het ontwerpproces van de wassectie 3 - 14
3.1.3 Andere aspecten die een rol spelen bij het ontwerpen van de biowasser 3 - 14
3.1.3.1 Uitvoeringsvorm van de druppelvanger 3 - 15
3.1.3.2 Uitvoeringsvorm van de vloeistofverdeler 3 - 15
3.1.3.3 Uitvoeringsvorm van de pakketondersteuning 3 - 15
3.2 Voorbeeld van het ontwerpen van de wassectie van de biowasser op grond van absorptiegegevens 3 - 15
3.2.1 Keuze van het pakkingsmateriaal 3 - 16
3.2.2 Gegevens over de oplosbaarheid van NH_3 van lucht naar water 3 - 16
3.2.3 Bepalen van N_{OG} 3 - 17
3.2.4 Bepalen van het dwarsoppervlak A 3 - 17
3.2.5 Bepalen van de hoogte Z van de wassectie 3 - 18
3.3 Het instellen van de hoeveelheid spuiwater 3 - 19
3.4 Aanpassing van het ontwerp met betrekking tot dissociatie 3 - 19
3.5 Voorbeeldontwerp van de wassectie op basis van absorptie en dissociatie 3 - 19
3.6 Nitrificatie en het ontwerp van de biowasser 3 - 20
3.7 Mogelijkheden voor het verwerken van het spuiwater 3 - 21
3.8 Uitvoeringsvormen van diverse typen biowassers 3 - 21

4 ENQUÊTE 4 - 1
4.1 Het opstellen van de enquête 4 - 1
4.2 Informatie over de respondenten 4 - 5
4.3 Installatie van de biowasser 4 - 8
4.3.1 Installatie in een nieuwe stal 4 - 9
4.3.2 Installatie in een bestaande stal 4 - 9
4.4 Periodiek onderhoud aan de biowasser 4 - 10
4.4.1 Reinigen van het pakkingsmateriaal 4 - 10
4.4.2 Andere onderhoudswerkzaamheden 4 - 12
4.5 Storingen aan de biowasser 4 - 13
4.5.1 Storingen aan de ventilator 4 - 13
4.5.2 Storingen aan de circulatiepomp 4 - 13
4.5.3 Storingen aan de sproeiers 4 - 14
4.5.4 Storingen aan de spuiafvoer 4 - 14
4.5.5 Andere storingen aan de biowasser 4 - 15
4.6 Controles aan de biowasser 4 - 15
4.6.1 Controle van de NH_3-reductie van de biowasser 4 - 16
4.6.2 Controle van de geurreductie 4 - 17
4.6.3 Controle van de pH van het waswater 4 - 17
4.6.4 Controleren van de technische werking 4 - 17
4.7 Opstarten van de biowasser na stilstand 4 - 18
4.7.1 Opstarten van de biowasser na installatie 4 - 18
4.7.2 Opstarten van de biowasser na onderhoud 4 - 19
4.8 Tevredenheid respondenten over de biowasser 4 - 20
4.8.1 Tevredenheid over het technisch functioneren van de biowasser 4 - 20
4.8.2 Tevredenheid over het biologisch functioneren van de biowasser 4 - 20
4.8.3 Arbeidsuren voor het laten functioneren van de biowasser 4 - 21
4.8.4 Voor- en nadelen van het gebruik van de biowasser 4 - 21
4.9 Conclusie van de enquête 4 - 21

5 FYSISCH MODEL VAN DE PROCESSEN IN DE BIOWASSER 5 - 1

De wet van Henry is te schrijven als:

$$Y_{A,i}-Y_{A,e} = m_A \cdot X_{A,i}-Y_{A,e} \tag{3.23}$$

Uit paragraaf 2.3.2 bleek dat de wet van Henry ook de verdeling aangeeft tussen de evenwichtsconcentraties, formule 3.23 kan dus geschreven worden als:

$$Y_{A,i}-Y_{A,e} = m_A \cdot (X_{A,i}-X_A) \tag{3.24}$$

Als formule 3.24 wordt ingevuld in formule 3.21 dan geldt dat H_{OG} gelijk is aan:

$$H_{OG} = H_G \left[1 + \frac{m_A \cdot (X_{A,i}-X_A)}{Y_A-Y_{A,i}}\right] \tag{3.25}$$

Uit formule 3.14 volgt dat $(Y_A - Y_{A,i})$ gelijk is aan:

$$Y_A-Y_{A,i} = \frac{H_G \cdot dY}{dZ} \tag{3.26}$$

En uit formule 3.18 volgt dat $(X_{A,i} - X_A)$ gelijk is aan:

$$X_{A,i}-X_A = \frac{H_{VL} \cdot dX}{dZ} \tag{3.27}$$

Als formule 3.26 en 3.27 ingevuld worden in formule 3.25 volgt hieruit de relatie die geldt tussen H_{OG}, H_G en H_{VL}, deze is gelijk aan:

$$H_{OG} = H_G \left[1 + \frac{m_A \cdot H_{VL} \cdot dX}{H_G \cdot dY}\right] \tag{3.28}$$

Uit formule 3.7 volgt dat de verhouding dX/dY gelijk is aan de verhouding tussen het molaire vloeistofdebiet per dwarsoppervlak L_m en het molaire gasdebiet per dwarsoppervlak G_m. Als deze verhouding wordt ingevuld in formule 3.28 dan geldt dat H_{OG} gelijk is aan:

$$H_{OG} = H_G + \frac{m_A \cdot G_m}{L_m} \cdot H_{VL} \tag{3.29}$$

De factor $m_A.G_m/L_m$ wordt de absorptiefactor van dit proces genoemd. Op dezelfde manier kan worden afgeleid dat voor H_{OVL} geldt:

$$H_{OVL} = H_{VL} + \frac{L_m}{m_A \cdot G_m} \cdot H_G \tag{3.30}$$

Nu bekend is dat de hoogte Z van de wassectie bepaald kan worden uit de termen N_{OG}, H_G en H_{VL} wordt in de volgend subparagrafen besproken hoe deze parameters bepaald worden (Coulson et al., 1993).

3.1.2.4.1 Bepaling van N_{OG}

Als de wassectie uit figuur 3.6 bekeken wordt dan kan de massabalans over de gehele wassectie worden opgesteld. Volgens formule 3.7 geldt er dan:

$$G_m \cdot (y_1 - y_2) = L_m \cdot (x_1 - x_2) \tag{3.31}$$

Als de vloeistof die aan de bovenkant van de biowasser de wassectie instroomt geen verontreiniging bevat, dus $x_2 \approx 0$, dan is de massabalans van formule 3.31 gelijk aan:

$$G_m \cdot (y_1 - y_2) = L_m \cdot x_1 \tag{3.32}$$

Stel dat de massabalans niet opgesteld wordt over de gehele wassectie, maar over de top van de biowasser en een willekeurige plaats in de biowasser met heersende molfracties x en y, dan geldt:

$$G_m \cdot (y - y_2) = L_m \cdot x \tag{3.33}$$

Als de molfracties x en y met elkaar in evenwicht zijn, dan mag de wet van Henry daar worden toegepast, formule 3.33 wordt nu:

$$y_e = \frac{m_A \cdot G_m}{L_m} \cdot (y - y_2) \tag{3.34}$$

Als formule 3.34 ingevuld wordt in de formule die geldt voor N_{OG} dan blijkt te gelden:

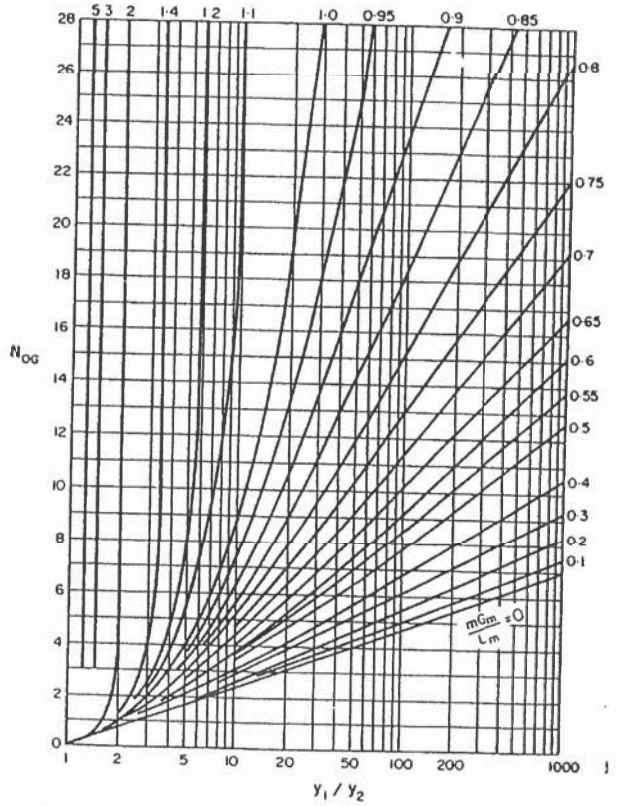
$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{\frac{m_A \cdot G_m}{L_m} \cdot (y - y_2) - y} \tag{3.35}$$

Als deze integratie wordt opgelost dan is N_{OG} gelijk aan:

$$N_{OG} = \frac{1}{1 - \frac{m_A \cdot G_m}{L_m}} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{m_A \cdot G_m}{L_m} \right) \cdot \frac{y_1}{y_2} + \frac{m_A \cdot G_m}{L_m} \right] \tag{3.36}$$

Formule 3.36 mag alleen gebruikt worden als de richtingscoëfficiënten van de evenwichtslijn en de werklijn constant zijn en als de toegevoerde vloeistof geen verontreiniging bevat (Coulson et al., 1993).

In figuur 3.7 is formule 3.36 uitgezet voor diverse waarden van de absorptiefactor.
Het aantal overdrachtseenheden N_{OG} kan nu bij verschillende waarden van de absorptiefactor bepaald worden als de reductie van stof A in de gasfase, y_1/y_2 bekend is. Colburn heeft gesteld dat het optimale aantal overdrachtseenheden N_{OG} ligt bij een waarde van de absorptiefactor tussen 0.7 en 0.8 (Sinnott, 1993).



Figuur 3.7 *Aantal overdrachtseenheden N_{OG}. Bron: Sinnott, 1993.*

3.1.2.4.2 Bepaling van H_G en H_{VL}

Zoals blijkt uit formule 3.15 en 3.18 kunnen H_G en H_{VL} bepaald worden uit de stofoverdrachtscoëfficiënten van stof A in respectievelijk de gas- en de vloeistoffase. Het is altijd belangrijk om H_G en H_{VL} te bepalen met diverse relaties die de stofoverdracht beschrijven, omdat dan de gemiddelde waarde voor H_G en H_{VL} genomen kan worden.
In het geval van de absorptie van NH_3 vanuit lucht in water kunnen voor het berekenen van de stofoverdrachtscoëfficënten de relaties uit bijlage B en C gebruikt worden. In dit verslag is er voor gekozen om de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in lucht te beschrijven met formule C4 van Semmelbauer (1967), deze luidt:

$$k_{lu} = \beta \cdot \left(\frac{D_p \cdot G}{\mu_{lu}}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{\mu_{lu}}{\rho_{lu} \cdot D_{lu}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{D_{lu}}{D_p}\right) \qquad (3.37)$$

De stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in water wordt in dit verslag beschreven door formule B4 van Onda et al. (1968) en deze luidt:

$$k_{wa} = 0.0051\left(\frac{L}{a_t \cdot \mu_{wa}}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\mu_{wa}}{\rho_{wa} \cdot D_{wa}}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot (a_t \cdot D_p)^{0.4}\left(\frac{\rho_{wa}}{\mu_{wa} \cdot g}\right)^{-\frac{1}{3}} \qquad (3.38)$$

Op grond van k_{lu} en k_{wa} uit formule 3.37 en 3.38 kunnen dus H_G en H_{VL} berekend worden. Met behulp van formule 3.29 kan daaruit de H_{OG} worden berekend. De hoogte van de wassectie is nu gelijk aan het aantal overdrachtseenheden N_{OG} vermenigvuldigd met de hoogte van een overdrachtseenheid H_{OG}, zie formule 3.17.
Het volume van de wassectie kan nu berekend worden door het dwarsoppervlak, dat berekend is in paragraaf 3.1.2.4, te vermenigvuldigen met de hoogte van de wassectie (Sinnott, 1993).

3.1.2.5 Samenvatting van de stappen in het ontwerpproces van de wassectie

In tabel 3.4 zijn alle stappen en keuzes die plaats moeten vinden bij het ontwerpen van een wassectie van de biowasser op grond van absorptiegegevens samengevat.

Tabel 3.4 Stappen in het ontwerpproces van de wassectie.

Stap	Gemaakte keuzes in stap
1	- ventilatiebehoefte bepalen - pakkingsmateriaal kiezen - wasvloeistof kiezen - beginconcentratie verontreiniging in gas weten - gewenste reductie kiezen
2	- oplosbaarheidsgegevens van stof A in de wasvloeistof bij evenwicht verzamelen - tekenen van de evenwichtslijn - m_A bepalen
3	- bepalen van het aantal overdrachtseenheden N_{OG} gebaseerd op de overall-gasfase
4	- bepalen van het benodigde dwarsoppervlak van de wassectie
5	- bepalen van de H_{OG} - bepalen van de totale benodigde hoogte van de wassectie
6	- controle van flooding, drukval en volume wassectie

3.1.3 Andere aspecten die een rol spelen bij het ontwerpen van de biowasser

Bij het ontwerpen van een biowasser spelen behalve aspecten die de wassectie bepalen ook andere aspecten een rol. Deze aspecten zijn onder andere de spuiwatervoorziening, druppelvanger, etc. Als deze aspecten niet goed ontworpen zijn zullen ze de reductie door de wassectie beïnvloeden. Daarom is het van belang dat ook aandacht wordt besteed aan deze punten tijdens de ontwerpfase.

3.1.3.1 Uitvoeringsvorm van de druppelvanger

De druppelvanger wordt geïnstalleerd om vloeistofdruppels, die in de gasstroom worden meegevoerd, af te scheiden. Er zijn vele uitvoeringsvormen mogelijk en de keuze daarvan hangt af van de grootte van de druppels die men tegen wenst te houden en de vereiste effectiviteit. Een goede druppelvanger is erg belangrijk voor het totale rendement van een biowasser. De combinatie wassectie en druppelvanger bepaalt namelijk het uiteindelijke rendement van de biowasser. De belangrijkste uitvoeringsvormen van druppelvangers in wassers zijn cyclonen, lamellenafscheider en afscheiders van metaalgaas of kunststofpakking (Gaswassers, 1984).
Bij hoge gassnelheden kan de bovenkant van de wassectie bevochtigd worden. Onder deze condities kunnen deeltjes van het pakkingsmateriaal stuk gaan of meegeblazen worden. De vochtvanger wordt dus steeds geïnstalleerd om de toplagen van de pakking tegen te houden en bevochtiging tegen te gaan (Sinnott, 1993).

3.1.3.2 Uitvoeringsvorm van de vloeistofverdeler

Bij de biowasser, is het van belang dat de vloeistof goed verdeeld wordt over het gehele oppervlak van de wassectie. Hiervoor zijn verscheidene systemen beschikbaar. De vloeistofverdelers worden altijd toegepast aan de bovenkant van de wassectie. Zoals vermeld is in paragraaf 2.1 kunnen vloeistofverdelers ook in de wassectie worden toegepast om de vloeistof her te verdelen (Gaswassers, 1984) (Sinnott, 1993).

3.1.3.3 Uitvoeringsvorm van de pakketondersteuning

Het losse en ook het vaste pakkingsmateriaal rust op een draagrooster. De functie van dit draagrooster is enerzijds het dragen van het bevochtigde pakkingsmateriaal en anderzijds het toelaten van een vrije doorgang van gas en vloeistof. Het beste ontwerp van een draagrooster is er één waarbij de inlaat van het gas boven het niveau ligt van waar de vloeistof de wassectie verlaat (Gaswassers, 1984) (Sinnott, 1993).

3.2 Voorbeeld van het ontwerpen van de wassectie van de biowasser op grond van absorptiegegevens

In dit voorbeeld wordt de wassectie van een biowasser ontworpen voor de absorptie van NH_3 uit de stallucht van een mechanisch geventileerde varkensstal. Het is de bedoeling dat de biowasser geplaatst wordt in een afdeling met 60 vleesvarkens. De maximale ventilatiebehoefte is daar gelijk aan 6000 m^3/uur. Aangenomen wordt dat de concentratie NH_3 in de stallucht ongeveer gelijk is aan 10 ppm, dit is 10 ml NH_3 per m^3 lucht. De temperatuur die heerst in de biowasser is 20 °C en de druk die heerst is de buitendruk, 1 atm.
De bedoeling is om een reductie van NH_3 van 95% te bewerkstelligen. Uit het hoofdstuk 2 bleek dat NH_3 goed oplosbaar is in water, dus dit is de wasvloeistof in de biowasser. In tabel 3.5 staan de andere gegevens vermeld die nodig zijn voor het ontwerpen van deze wassectie.

Tabel 3.5 *Gegevens voor het ontwerpen van de wassectie voor het verwijderen van NH_3 uit lucht met water.*

parameter	waarde bij 20 °C	dimensie
ρ_{wa}	1000	kg/m^3
μ_{wa}	$0.98 \cdot 10^{-3}$	Pa.s
ρ_{lu}	1.3	kg/m^3
μ_{lu}	$1.8 \cdot 10^{-5}$	Pa.s
M_{lu}	28.1	g/mol
M_{wa}	18	g/mol
M_{am}	17	g/mol
y_1	$9.08 \cdot 10^{-6}$	mol N/mol lucht
$s.g._{am}$	0.042	mol NH_3/l
maximale oplosbaarheid NH_3 in water	0.5634	mol NH_3/mol H_2O
g	9.81	m/s^2
D_{lu}	$2.38 \cdot 10^{-5}$	m^2/s (appendix A, hoofdstuk 2)
D_{wa}	$2.01 \cdot 10^{-9}$	m^2/s (appendix A, hoofdstuk 2)
Sc_{lu}	0.58	-
Sc_{wa}	487.6	-

3.2.1 Keuze van het pakkingsmateriaal

Het pakkingsmateriaal dat hier gekozen wordt is Telpac 2", waarvan de maat $51 \cdot 10^{-3}$ m is. Dit pakkingsmateriaal is gemaakt van poly-ethyleen en bestand tegen de stromen in de biowasser. De belangrijkste gegevens van dit pakkingsmateriaal zijn te vinden in tabel B3 van bijlage B.
De diameter van een bol met een evengroot oppervlak als één Telpac-eenheid, D_p, volgt uit het aantal stuks dat in 1 m^3 past, in dit geval 7770 stuks. Het oppervlak van één Telpac-eenheid is dus gelijk aan het specifiek oppervlak van Telpac gedeeld door dit aantal stuks, het oppervlak is dan gelijk aan 0.016 m^2. Het oppervlak van een bol is gelijk aan $4\pi \cdot r^2$, dus D_p is gelijk aan 0.071 m.

3.2.2 Gegevens over de oplosbaarheid van NH_3 van lucht naar water

In paragraaf 2.3.2 werd duidelijk dat de evenwichtslijn van de oplosbaarheid van NH_3 vanuit lucht in water een rechte lijn is bij lage NH_3-concentraties in de lucht. De verdelingscoëfficiënt H_{am} wordt nu berekend met formule 2.30 van Dasgupta en Dong. Bij 20°C en een druk van 1 atm is H_{am} gelijk aan $5.84 \cdot 10^{-4}$.
Voor het bepalen van het aantal overall-overdrachtseenheden gebaseerd op de luchtfase, N_{OG}, is echter de verdelingscoëfficiënt gebaseerd op molfracties, m_{am}, nodig.

Als aangenomen wordt dat het aantal mol NH_3 in lucht en water heel klein is ten opzichte van het totaal aantal molen in lucht respectievelijk water, dan is m_{am} gelijk aan:

$$m_{am} = \frac{H_{am} \cdot M_{lu} \cdot \rho_{wa}}{M_{wa} \cdot \rho_{lu}} = 0.70 \qquad (3.39)$$

De benodigde gegevens voor de berekening van m_{am} staan vermeld in tabel 3.5 aan het begin van paragraaf 3.2.

3.2.3 Bepalen van N_{OG}

Het aantal overdrachtseenheden N_{OG} wordt bepaald uit figuur 3.7. N_{OG} wordt afgelezen bij de verhouding y_1/y_2 en een aantal verschillende absorptiefactoren. Hier is de gewenste reductie gelijk aan 95%, dus y_1/y_2 is gelijk aan 20.
In tabel 3.6 staat N_{OG} vermeld bij een aantal waarden van de absorptiefactor.

Tabel 3.6 N_{OG} bij een aantal absorptiefactoren.

$m \cdot G_m/L_m$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
N_{OG}	4.1	4.8	5.2	6.3	8	10.5	19

Uit tabel 3.6 blijkt dat de optimale N_{OG} inderdaad ligt bij een absorptiefactor van 0.7 à 0.8. Bij een kleinere absorptiefactor verandert N_{OG} bijna niet, terwijl het tegenovergestelde gebeurt bij een grotere absorptiefactor. Er moet dus gekozen worden tussen de absorptiefactoren 0.7 of 0.8.
Uit de balans die opgesteld kan worden over de wassectie van figuur 3.6 kan worden afgeleid dat geldt:

$$x_1 = \frac{G_m}{L_m} \cdot (y_1 - y_2)$$

Dit kan worden herschreven tot:

$$x_1 = \frac{m_{am} \cdot G_m}{0.7 \cdot L_m} \cdot (y_1 - y_2) = \frac{m_{am} \cdot G_m}{L_m} \cdot 6.48 \cdot 10^{-7} \quad \frac{mol\ NH_3}{mol\ H_2O}$$

Als de absorptiefactor gelijk is aan 0.7, dan is x_1 dus gelijk aan $4.36 \cdot 10^{-7}$ mol NH_3/mol H_2O. Als de absorptiefactor gelijk is aan 0.8, dan is x_1 gelijk aan 5.19E-7 mol NH_3/mol H_2O.
Uit tabel 3.5 volgt dat bij beide absorptiefactoren x_1 bij lange na niet zo groot is als de maximale oplosbaarheid van NH_3 bij 20° C. De keuze van de absorptiefactor is dus vrij. In dit voorbeeld wordt de absorptiefactor gelijk aan 0.8 gekozen, zodat N_{OG} gelijk is aan 8.

3.2.4 Bepalen van het dwarsoppervlak A

Het debiet van lucht is 6000 m^3/hr. Het luchtdebiet op molaire basis volgt hieruit en is gelijk aan 77.1 mol lucht per seconde, dit is G_m'. Uit paragraaf 3.2.3 volgde dat de absorptiefactor gelijk is aan 0.8 en tezamen met G_m' volgt hieruit dat L_m' gelijk is aan 67.5 mol H_2O/s.
Voor het berekenen van de flowfactor F_{luwa} uit paragraaf 3.1.2.3 zijn echter G' en L' nodig en deze

zijn respectievelijk 2.17 kg/s en 1.22 kg/s. De flowfactor is dan gelijk aan:

$$F_{luwa} = \frac{L'}{G'}\cdot\sqrt{\frac{\rho_{lu}}{\rho_{wa}}} = 0.02$$

Als bij een drukval van 42 mm H_2O per m wassectie wordt ontworpen dan volgt uit figuur 3.3 dat K_4 gelijk is aan 2 en K_4 bij flooding gelijk is aan 6. Het percentage flooding is dus gelijk aan 58% en dit is dus acceptabel.
Het massadebiet van de lucht per dwarsoppervlak kan nu berekend worden met formule 3.4, G is gelijk aan:

$$G = \left[\frac{2\cdot 1.3\cdot(1000-1.3)}{13.1\cdot 44\left(\frac{0.98E-3}{1000}\right)^{0.1}}\right]^{\frac{1}{2}} = 4.24\ \frac{kg}{m^2\cdot s}$$

Het dwarsoppervlak A van de wassectie is dus gelijk aan:

$$A = \frac{G'}{G} = \frac{2.17}{4.24} = 0.51\ m^2$$

Het afgeronde dwarsoppervlak is dan 0.5 m^2. Stel dat de wassectie een cylindervorm heeft, dan is A gelijk aan $\pi\cdot r^2$. De diameter van de wassectie is dan dus gelijk aan 0.8 m.
Als laatste wordt nu de verhouding tussen de diameter van de wassectie en de diameter van het pakkingsmateriaal gecontroleerd, deze is ongeveer gelijk aan 16 en deze waarde voldoet aan de eisen.

3.2.5 Bepalen van de hoogte Z van de wassectie

De hoogte Z van de wassectie wordt berekend door k_{lu} en k_{wa} met formule 3.37 respectievelijk 3.38 te berekenen. Als de gegevens uit tabel 3.5 worden gebruikt dan is k_{lu} gelijk aan 0.030 m/s en k_{wa} is gelijk aan $8.61\cdot10^{-5}$ m/s. H_G volgt nu uit formule 3.15 en is gelijk aan:

$$H_G = \frac{G_m}{k_{lu}\cdot A_{spec}\cdot C_{T,lu}} = \frac{151}{0.030\cdot 124.67\cdot 46.3} = 0.87\ m$$

H_{VL} wordt berekend met formule 3.18 en is gelijk aan:

$$H_{VL} = \frac{L_m}{k_{wa}\cdot A_{spec}\cdot C_{T,wa}} = \frac{135.6}{8.61\cdot10^{-5}\cdot 124.67\cdot 5.56\cdot10^{4}} = 0.23\ m$$

De H_{OG} kan nu berekend worden met formule 3.29 en deze is gelijk aan 1.05 m. De hoogte Z van de wassectie is dus gelijk aan N_{OG} vermenigvuldigd met H_{OG} en heeft de waarde van 8.4 m. Hieruit volgt dat het volume van de ontworpen wassectie gelijk is aan 4.28 m^3.

Het volume van de wassectie kan nauwkeuriger worden bepaald door k_{lu} en k_{wa} volgens verschillende relaties te berekenen en hiervan de gemiddelde waarde te nemen. Als de installatie in de praktijk wordt toegepast dan wordt de wassectie meestal een aantal malen groter gemaakt, dan op basis van de ontwerptheorie is voorgesteld.

3.3 Het instellen van de hoeveelheid spuiwater

In de ontwerptheorie die wordt behandeld in paragraaf 3.1 wordt aangenomen dat aan het begin van de wassectie schoon water wordt toegevoegd. In de werkelijkheid is dit echter geen haalbare zaak, omdat dan erg veel water geloosd zou moeten worden. En vooral bij toepassing van de biowasser in de veehouderij is dit een extra kostenpost waarop de veehouder niet zit te wachten.
Daarom is besloten om een gedeelte van het water dat uit de wassectie stroomt te recirculeren. Aan het einde van de wassectie loopt het water in een reservoir, waaruit water gepompt wordt naar het begin van de wassectie. Uit het reservoir wordt een waterstroom afgevoerd, dit wordt het spuien van water genoemd, die vervangen wordt door water zonder stikstof.
In verband met de geldende lozingsnormen is het noodzakelijk dat de concentratie N en de samenstelling van de stikstofhoudende stoffen in het spuiwater bekend is. Als in de biowasser met reservoir een evenwicht heerst dan moet de ingaande stikstofstroom gelijk zijn aan de uitgaande stikstofstroom. In formulevorm moet dus gelden:

$$\phi_{lu} \cdot C_{lu,in} = \phi_{lu} \cdot C_{lu,uit} + \phi_{spui} \cdot C_{spui} \qquad (3.40)$$

Met: Θ_{spui} is het spuidebiet in m^3/s
C_{spui} is de concentratie N in het spuiwater, danwel reservoir in mol N/m^3

Als het luchtdebiet, het spuidebiet, de reductie van NH_3 in lucht en de ingaande NH_3-concentratie in de lucht bekend zijn dan kan uitgerekend worden hoe hoog de concentratie stikstof in de spui wordt. Als de gegevens uit tabel 3.5 genomen worden en het spuidebiet gelijk is aan 24 l/hr, dan is C_{spui} gelijk aan 24.3 mol N/m^3. Als het spuidebiet 100 l/hr zou zijn dan is C_{spui} gelijk aan 0.58 mol N/m^3. Uit deze waarden is af te leiden dat de concentraties van stikstof in het spuiwater afhankelijk zijn van het spuidebiet.
Een tweede gevolg van het terugvoeren van waswater is het feit dat de NH_3-reductie door de wassectie afneemt. Dit komt doordat de beginconcentratie van N aan het begin van de wassectie hoger is dan nul, waardoor de drijvende kracht voor stofoverdracht afneemt. Deze materie zal behandeld worden in hoofdstuk 7.
Als er dus water uit de wassectie wordt gecirculeerd, dan is er dus een grotere wassectie nodig voor het bereiken van de gewenste reductie uit paragraaf 3.2.

3.4 Aanpassing van het ontwerp met betrekking tot dissociatie

Als het geabsorbeerde ammonia in het water dissocieert tot ammonium dan verandert de verdelingscoëfficiënt H_{am} in H_{aNtot}, zoals blijkt uit paragraaf 2.4. H_{aNtot} kan dan berekend worden met formule 2.36 uit hoofdstuk 2.
Als de dissociatie goed verloopt wordt H_{aNtot} kleiner dan H_{am}, dit betekent dat de drijvende kracht voor stofoverdracht groter wordt. Dit betekent dat er bij het optreden van zowel absorptie als dissociatie een kleiner volume van de wassectie nodig is dan het geval was bij alleen absorptie.

3.5 Voorbeeldontwerp van de wassectie op basis van absorptie en dissociatie

De biowasser die ontworpen moet worden is weer dezelfde als die in paragraaf 3.2. Er wordt dus wederom aangenomen dat de ingaande vloeistofstroom geen stikstof bevat. De keuze van pakkingsmateriaal en wasvloeistof blijven gelijk en de biowasser wordt ontworpen bij een pH van het

water gelijk aan 7. De waarde van de baseconstante wordt gelijk aan $1.7 \cdot 10^{-5}$ mol/l genomen.
De verdelingscoëfficiënt H_{aNtot} is op basis van deze gegevens gelijk aan $3.42 \cdot 10^{-6}$ en dit is dus zoals verwacht werd een kleinere waarde dan H_{am}. In tabel 3.7 staan de uitkomsten vermeld van de de belangrijkste stappen in het ontwerpproces als wederom ontworpen wordt bij N_{OG} is 8 en een drukval van 42 mm H_2O per m wassectie.
Zoals op grond van paragraaf 3.4 verwacht werd is het benodigde volume van de wassectie inderdaad kleiner bij het optreden van zowel absorptie als dissociatie. In dit voorbeeld bleek de flowfactor zo klein te zijn dat de waarde van K_4 door extrapolatie bepaald is.

Tabel 3.7 *Uitkomsten van de belangrijkste stappen uit het ontwerpproces.*

parameter	waarde bij gegeven omstandigheden	dimensie
m_{aNtot}	$4.1 \cdot 10^{-3}$	-
x_l	$8.86 \cdot 10^{-5}$	mol $NH_4^+ + NH_3$/mol H_2O
L_m'	0.40	mol H_2O/s
F_{luvl}	$1.87 \cdot 10^{-4}$	-
K_4	4	-
K_4, bij flooding	6	-
percentage flooding	58	%
G	5.99	kg/m^2·s
A	0.4	m^2
D_{was}	0.7	m
k_{lu}	0.036	m/s
H_G	1.02	m
k_{wa}	$2.31 \cdot 10^{-6}$	m/s
H_{VL}	$7.37 \cdot 10^{-4}$	m
H_{OG}	1.02	m
Z	8.16	m

3.6 Nitrificatie en het ontwerp van de biwoasser

Door het optreden van nitrificatie wordt er nog meer NH_4^+ weggenomen uit het water, waardoor de drijvende kracht voor overdracht van NH_3 van lucht naar water nog groter wordt dan het geval was bij absorptie en dissociatie. Daardoor kan het volume van de wassectie waarschijnlijk nog kleiner worden genomen als bij paragraaf 3.5 het geval was. Het is echter niet te kwantificeren hoeveel kleiner de wassectie gekozen kan worden.

Samenvattend kan dus gezegd worden dat het volume van de wassectie voor een gewenste NH_3-reductie het grootst is als alleen rekening wordt gehouden met de absorptie en een bepaald spuidebiet. Door het optreden van dissociatie en nitrificatie en het groter worden van het spuidebiet kan het volume van de wassectie verkleind worden, terwijl nog steeds de gewenste NH_3-reductie gehaald wordt. Het volume van de wassectie kan nauwkeurig bepaald worden als de benodigde parameters,

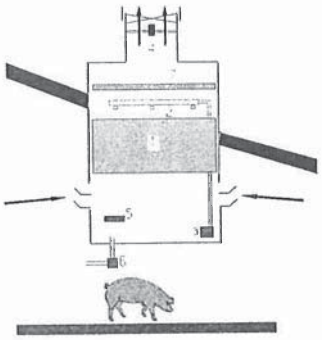
zoals k_{lu}, k_{wa} en H_{aNtot}, nauwkeurig bekend zijn.

3.7 Mogelijkheden voor het verwerken van het spuiwater

Als de biowasser wordt toegepast in de praktijk dan wordt er altijd een hoeveelheid spuiwater geloosd. Zoals blijkt uit paragraaf 3.3 is de hoeveelheid stikstof die in het spuiwater aanwezig is afhankelijk van de NH_3-reductie en het spuidebiet.
Om het spuiwater te mogen lozen moet het spuidebiet zo ingesteld worden dat de lozingsnorm voor stikstof niet overschreden wordt. Ook al wordt aan deze eis voldaan dan nog kan het spuiwater steeds een gevaar opleveren voor mens en dier. De aanwezigheid van nitriet en nitraat in het water brengt namelijk een aanzienlijk risico met zich mee, omdat nitriet giftig is voor mens en dier. Nitriet is dodelijk bij een dosis van 3 mg per kg lichaamsgewicht en nitraat is dodelijk bij een dosis van 3 g per kg lichaamsgewicht. Daarnaast kunnen hoge concentraties nitriet in combinatie met onder andere amines aanleiding geven tot de vorming van de eveneens toxische stoffen, zoals nitrosamines.
Het blijkt dus noodzakelijk te zijn om te kijken naar methoden die nitriet en nitraat uit het spuiwater verwijderen. Eén van deze methoden is denitrificatie waarbij bacteriën in staat zijn om bij de oxidatie van organische stof nitriet of nitraat in plaats van zuurstof als electronenacceptor te gebruiken. Denitrificerende bacteriën leven onder anaërobe omstandigheden en zetten nitriet en nitraat om in stikstofgas, N_2. Bij een goed verloop van zowel nitrificatie en denitrificatie bevat het spuiwater minder stikstof. Het kan zelfs zo zijn dat het spuiwater zo weinig stikstof bevat dat het spuiwater teruggevoerd kan worden naar de wassectie zonder dat hierdoor de NH_3-reductie terugloopt. Door Demmers (1992) is onderzoek uitgevoerd naar het toepassen van een denitrificatiestap bij de biowasser door een aparte reactor aan de biowasser te koppelen. Op laboratoriumschaal bleek de denitrificatie in deze reactor goed te verlopen als aan de voorwaarden voor het leven van denitrificerende bacteriën werd voldaan. Volgens hem biedt het toepassen van denitrificatie veel perspectief en er zal dus meer onderzoek naar gedaan moeten worden (Demmers, 1992).

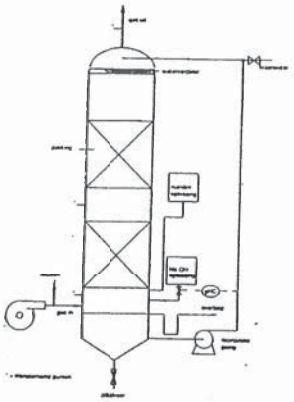
3.8 Uitvoeringsvormen van diverse typen biowassers

De fabrikant die in Nederland de meeste biowassers in de veehouderij heeft geplaatst is de firma Matthëus Milieutechniek uit Wageningen. De firma Matthëus heeft in zijn assortiment twee typen biowassers: de biologische kruisstroomwasser (MKS) en de biologische tegenstroomwasser (BTW). In deze paragraaf zal een korte beschrijving worden gegeven van de biologische tegenstroomwasser die een maximale ventilatiecapaciteit van 6000 m^3/hr heeft, de BTW-6. De BTW-6 is schematisch weergegeven in figuur 3.8.
De omkasting van de biowasser is gemaakt van 2.5 mm staalplaat dat eerst gestraald wordt en daarna is voorzien van een zinkcompound. Op de zinkcompound is eerst een laag zinkfosfaatprimer aangebracht en daarna nog twee lagen ijzerglimmer. De spuiafvoer wordt geregeld door een magneetklep die aangestuurd wordt met een klokschakelaar.
Het pakkingsmateriaal in de wassectie is van het type Telpac 2". Telpac is een rozetvormig pakkingsmateriaal en het wordt in zakken in de



Figuur 3.8 Schematische weergave van een BTW-6.

wassectie gedaan. De wassectie heeft een volume van 0.91 m^3 en de dwarsdoorsnede van de wassectie heeft de vorm van een zeskant. De hoogte van de wassectie is 0.75 m. De fabrikant garandeert een NH_3-reductie van 70%.
Tauw Milieu heeft in samenwerking met Dorset staltechniek ook een biowasser op de markt gebracht, te weten het biotrickling-filter. Hiervan is een prototype opgesteld bij een varkenshouder in Aalten. In het biotrickling-filter wordt NH_3 uit de luchtstroom verwijderd volgens het tegenstroomprincipe. Het pakkingsmateriaal van het biotrickling-filter bestaat uit polyurethaan en dit is een volledig rotvrij kunststof. Het biotrickling-filter wordt schematisch weergegeven in figuur 3.9.



Figuur 3.8 Schematische weergave van het biotricklingfilter.

Bij het biotrickling-filter wordt een methode toegepast die het vervuilen van het pakkingsmateriaal voorkomt.

De fabrikant RIMU heeft al vrij veel biowassers geïnstalleerd in Duitsland, in Nederland heeft RIMU echter pas 1 biowasser geplaatst. Ook de biowasser van RIMU werkt volgens het tegenstroomprincipe. De wassectie is gevuld met een modulair pakkingsmateriaal dat uit twee verschillende structuren bestaat. De NH_3-reductie die volgens de fabrikant bereikt kan worden is ongeveer 80%.
De fabrikant Eurochemie, Produktie en Innovatie heeft één prototype, dat volgens het tegenstroomprincipe werkt, staan op een veehouderijbedrijf. Een opvallend kenmerk van dit systeem is dat er geen water gespuid wordt, doordat er een denitrificatiestap aanwezig is. Deze biowasser is dus op te vatten als gesloten systeem. Het is niet bekend of er in de wassectie gebruik gemaakt wordt van pakkingsmateriaal. De fabrikant garandeert een NH_3-reductie van 70%.
In bijlage F staan van deze vier fabrikanten de adressen vermeld. De in deze paragraaf vermelde informatie is samengesteld uit produktfolders en rapporten.

4 ENQUÊTE

Na de technische en biologische aspecten van de biowasser te hebben gelezen in hoofdstuk 2 en 3 borrelt vast bij veel mensen de vraag op: Hoe functioneert de biowasser nu eigenlijk in de praktijk? Meestal wordt deze vraag kwantitatief onderzocht door te bepalen wat de reductie van NH_3 door de biowasser is. Het is echter ook interessant om te weten wat de gebruiker van het functioneren van de biowasser vindt.
Tijdens het project PROPRO werd al een tipje van de sluier opgelicht door te kijken naar het optreden van technische storingen, onderhoud, etcetera aan drie typen biowassers. Eén type was afkomstig van de firma Bionet, de andere twee waren affkomstig van Mattheus Milieutechniek. De conclusie van het project PROPRO was dat biowasers toegepast kunnen worden op de boerderij maar dat er wel een aantal haken en ogen aan verbonden is. Ten eerste zijn dit de kosten die een biowasser met zich meebrengt. Dit betreft aanschaf- en installatiekosten en kosten die gemaakt worden tijdens het in bedrijf zijn van de biowasser. Hierbij valt te denken aan electriciteitskosten en kosten voor het afvoeren van de grote hoeveelheid spuiwater. Behalve dat de kosten een nadeel zijn wordt ook het reinigen en controleren van de biowasser als nadelig ervaren. Als het reinigen van het pakkingsmateriaal gemiddeld 3 à 4 keer per jaar gebeurt, dan treedt er geen storing op door vervuild pakkingsmateriaal. Het reinigen van het pakkingsmateriaal neemt ongeveer 1 uur per keer in beslag en de arbeidsomstandigheden tijdens dit reinigen worden als bezwaarlijk ervaren. Controle van het functioneren van de biowasser is iedere dag noodzakelijk. Bij deze controle wordt vooral gekeken naar het feit of het water nog wordt rondgepompt. Verder trad er regelmatig vervuiling op van leidingen, sproeiers en vlotters en ook deze onderdelen zouden dus gecontroleerd moeten worden. De controle wordt echter bemoeilijkt door het feit dat de bereikbaarheid van de verschillende onderdelen slecht is. Tevens is aan de buitenzijde van de biowasser niet te zien of er iets kapot is. Het grootste probleem van de biowasser is de hoeveelheid spuiwater en het afvoeren ervan (van de Sande-Schellekens et al., 1993).
Tijdens het project PROPRO bleek de biowasser nog onvoldoende ontwikkeld te zijn en dit heeft er misschien voor gezorgd dat het vooral veel aanloopproblemen waren. Het is dus interessant om informatie te krijgen over het functioneren van biowassers die de kinderschoenen zijn ontgroeid. Op dit moment zijn bij circa 20 veehouderijbedrijven biowassers geplaatst die al een aantal jaren functioneren. Het zou dus erg interessant zijn om te weten te komen hoe deze veehouders over het functioneren van de biowasser denken. Het idee is om middels een enquête de gevraagde informatie bij de boeren te verkrijgen. Vanaf dit moment wordt de boer dus de respondent van de enquête genoemd. Bij het opstellen van de enquête is uitgegaan van de richtlijnen die gegeven zijn in het boek Enquêteren, het opstellen en gebruiken van vragenlijsten door Bartelds et al. (1989).

4.1 Het opstellen van de enquête

Het doel van elke enquête is zoveel mogelijk informatie te verkrijgen over de gestelde vraag, in dit geval dus het functioneren van de biowasser. Het verkrijgen van deze gewenste informatie is afhankelijk van het meetniveau van het antwoord, het type vraag en de antwoordmogelijkheden. Nu zal eerst op het meetniveau van de antwoorden worden ingegaan. Een willekeurig antwoord is in principe meetbaar op 4 niveau's te weten:

a. Nominaal meetniveau
   De antwoorden hebben alleen de betekenis dat ze ongelijk aan elkaar zijn. Het betreft dus alleen een classificatie. Een voorbeeld van een vraag waarvan de antwoorden te meten zijn op dit niveau is:
   Wat is je geslacht? *a = man*

b = vrouw

b. Ordinaal meetniveau

De antwoorden geven naast overeenkomsten of verschillen tussen respondenten, zoals bij het nominale niveau, ook aan wat hoger of lager is. De antwoorden geven dus een rangorde-relatie aan. Er is geen maatstaf om de afstand tussen de antwoorden te bepalen. Een voorbeeld van een vraag op ordinaal meetniveau is:

Wat is de hoogste technische opleiding, waarvan u een diploma heeft?

a = lts
b = mts
c = hts
d = tu

c. Intervalniveau

De antwoorden vormen een rangorde, hun onderlinge verschillen (intervallen) en de verhoudingen daartussen zijn zinvol. Een interval is een vaste meeteenheid. Een voorbeeld van een vraag op intervalniveau is:

Wat is je lengte in centimeters? .... *cm*

d. Rationiveau

De antwoorden op rationiveau vormen een rangorde, hun onderlinge verschillen zijn zinvol en hun verhoudingen (ratio's) hebben betekenis. Het laatste veronderstelt dat er een absoluut of natuurlijk nulpunt is aan te geven. Een voorbeeld van een vraag op rationiveau is:

Hoeveel kinderen heeft u?

geen kinderen
1 kind
2 kinderen
3 kinderen
4 kinderen

Uit een antwoord op rationiveau kan meer informatie verkregen worden dan uit een antwoord op nominaal niveau. Dit komt omdat met antwoorden op rationiveau meer rekenkundige bewerkingen uitgevoerd mogen worden. In tabel 4.1 staan de rekenkundige bewerkingen vermeld die gedaan kunnen worden met de antwoorden van een bepaald meetniveau.

Tabel 4.1 *Toegestane rekenkundige bewerkingen per meetniveau.*

Toegestane bewerking	Nominaal	Ordinaal	Interval	Ratio
Tellingen	+	+	+	+
Percentages berekenen	+	+	+	+
Rangorden	-	+	+	+
Verschil tussen afstanden bepalen	-	-	+	+
Gemiddelde berekenen	-	-	+	+
Verhoudingen bepalen	-	-	-	+

Het tweede belangrijke item bij het opstellen van een enquête is het vraagtype. Het vraagtype is de vorm waarin een vraag wordt voorgelegd aan de respondent. Een vraagtype is het open of gesloten zijn van een vraag. De definitie van een open vraag is:

de respondent moet zelf het antwoord bedenken en opschrijven.

De definitie van een gesloten vraag is:

de respondent moet kiezen tussen een aantal antwoordmogelijkheden.

Open vragen moeten zoveel mogelijk vermeden worden op een enquête, omdat ze door iedere respondent weer anders begrepen kunnen worden. Gesloten vragen kunnen gesteld worden door het opstellen van meerkeuzevragen met twee of meer antwoordmogelijkheden.

Als laatste is het belangrijk om de juiste antwoordmogelijkheden voor de respondent te creëren. Antwoordmogelijkheden zijn als volgt in te delen:

1. Antwoordmogelijkheden die feiten weergeven kunnen:
   a. cijfermatig zijn, bijvoorbeeld: Mijn inkomen bedraagt ....
   b. zakelijk zijn, bijvoorbeeld: Van de volgende sporten bedrijf ik actief ....
2. Antwoordmogelijkheden die een mening weergeven, dit kunnen antwoordmogelijkheden zijn:
   a. op vragen en uitspraken met betrekking tot concrete omstandigheden, bijvoorbeeld: Ik ben tevreden met ...
   b. op vragen en uitspraken waarin een wens of een voorkeur wordt uitgedrukt, bijvoorbeeld: Mijn voorkeur gaat uit naar ....
   c. op vragen en uitspraken waarin een bereidheid of verwachting wordt uitgedrukt, bijvoorbeeld: Ik verwacht vaker naar de bioscoop te gaan indien ....

Het is dus belangrijk om te weten of er naar een feit of een mening wordt gevraagd. In deze enquête zal het een mengsel zijn van beide.

Als de vraag wordt gesteld in de vorm van een meerkeuzevraag dan moeten vantevoren de antwoordmogelijkheden bekend zijn. De eisen aan antwoordmogelijkheden van meerkeuze vragen zijn verder:

1. De antwoordmogelijkheden moeten elkaar uitsluiten;
2. De antwoordmogelijkheden mogen niet suggereren (dit kan door een suggestieve vraagstelling, of door twee vragen achter elkaar te stellen, waarbij het antwoord op de eerste vraag de beantwoording van de tweede vraag beïnvloedt);
3. De antwoordmogelijkheden moeten in een logische volgorde staan;
4. De antwoordmogelijkheden moet het gestelde in de vraag dekken.

Na al deze technische zaken met betrekking tot het opstellen van een enquête kan de enquête nu daadwerkelijk gemaakt worden. Daartoe is eerst geïnventariseerd welke informatie uit de enquête moet komen. In tabel 4.2 zijn alle te behandelen aspecten in de enquête weergegeven. Deze aspecten zijn verder gespecificeerd, zodat het gemakkelijker is om de vragen op te stellen.

Op grond van tabel 4.2 en alle technische eisen in het achterhoofd is de enquête 'Biowassers in Nederland' gemaakt, deze is opgenomen in bijlage G. In deze enquête was het de bedoeling om zoveel mogelijk gebruik te maken van meerkeuzevragen. Het bleek echter al snel dat de antwoordmogelijkheden in vrij veel situaties niet of niet volledig bekend waren. In die situaties moest dus wel gebruik worden gemaakt van open vragen. Na de enquête zijn deze de antwoorden op deze open vragen in categoriën ingedeeld.

Omdat de enquête zeer volumineus is en niet eenvoudig zonder hulp van ondergetekende in te vullen is, is er gekozen om de enquête persoonlijk af te nemen bij de respondenten (Bartelds et al., 1989).

Tabel 4.2 *Behandelde aspecten met specificaties van de enquête.*

Aspecten van de enquête		Specificaties
1.	Kenmerken	stromingsprincipe, fabrikant, hoeveelheid, plaats in stal, reden aanschaf, levensduur, jaar van aanschaf, elektriciteitsverbruik, waterverbruik, hoeveelheid spuiwater, opslag en afvoer van spuiwater, diersoort, aantal dierplaatsen, andere kenmerken
2.	Installatie	inpassen in nieuwbouw of bestaande bouw, bouwaanpassingen stal, tijdsduur installatie, problemen tijdens installatie
3.	Opstarten	soort werkzaamheden, uitvoerende persoon, benodigde tijd, optredende problemen
4.	Onderhoud	soort werkzaamheden, uitvoerende persoon, benodigde tijd, optredende problemen
5.	Functioneren	biologisch, technisch, tevredenheid
6.	Storingen	soort storing, oorzaak storing, oplossing storing, aantal keer, tijdsduur storing, optredende problemen
7.	Controles	soort controle, aantal keer, soort werkzaamheden, benodigde tijd, uitvoerende persoon, opdrachtgever

De namen van de respondenten zijn gegeven door de fabrikanten van biowassers te weten Matthëus Milieutechniek, RIMU, Tauw Milieu en Eurochemie, produktie en innovatie. Als de juiste gegevens verstrekt zijn is de gehele populatie biowassers van deze fabrikanten onderzocht.
De antwoorden die gegeven zijn door de respondenten zijn verwerkt in een spreadsheet (zie bijlage H). De codes van de antwoorden zijn te vinden in bijlage I. Hierbij wil een * aangeven dat de vraag niet beantwoord is en geeft een - aan dat de vraag niet van toepassing was voor de respondent.
In de volgende paragrafen zijn de resultaten van de enquête weergegeven. Realiseer u goed dat de resultaten van deze enquête alleen de mening van de respondenten weergeven en niet door mij gecheckt zijn op juistheid. Getallen en dergelijke moeten dus met voorzichtigheid gehanteerd worden.

4.2. Informatie over de respondenten

De enquête is bij 16 respondenten afgenomen, waarbij totaal 19 verschillende soorten biowassers zijn onderscheiden. Biowassers behoren tot één soort als ze allemaal dezelfde kenmerken bezitten. In figuur 4.1 is te zien waar de bedrijven van de respondenten gelocaliseerd zijn.

Figuur 4.1 *Woonplaats van de respondenten.*

Alle respondenten zijn werkzaam in de veehouderij of hebben te maken met de veehouderij. Respondent 4, 7 en 8 zijn werknemers van bedrijven met biowassers in proefstallen. Respondent 13 is een werknemer van een slachterij, waarbij de biowasser is geplaatst in de ruststal. In deze ruststal komen de dieren 2 uur tot rust voordat ze geslacht worden.

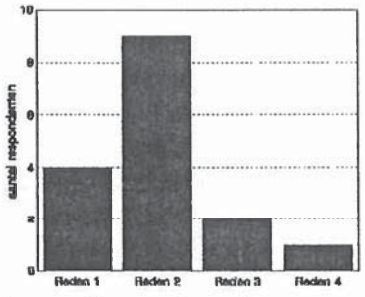
De ondervraagde bedrijven bestaan gemiddeld uit 4 stallen. Gemiddeld is in één van het totaal aantal stallen één of meerdere biowassers geplaatst. De redenen voor aanschaf van de biowassers varieerde nogal onder de respondenten. De door de respondenten genoemde redenen zijn samengevat in tabel 4.3.

Tabel 4.3 *Redenen voor aanschaf van de biowasser.*

Reden	Omschrijving reden van aanschaf
1	De biowasser is aangeschaft om de stank die uit de stal komt te reduceren. De eis tot stankreductie kwam voort uit de hinderwet, geurklachten of door woonhuizen die binnen de stankcirkel van de stal kwamen te liggen.
2	De biowasser is aangeschaft om de NH_3-emissie uit een bestaande of nieuwe stal te reduceren door eisen die voortkwamen uit de hinderwet.
3	De biowasser is aangeschaft om medewerking te verlenen aan een onderzoeksproject. Het idee is dat na het onderzoeksproject met de biowassers emissie-arm gebouwd mag worden.
4	De biowasser is aangeschaft om stof en stank af te vangen uit de stallucht, omdat de stallucht gezondheidsproblemen bij de omwonenden veroorzaakte.

In figuur 4.2 is te zien welke redenen de respondenten hadden voor het toepassen van een biowasser op hun bedrijf.

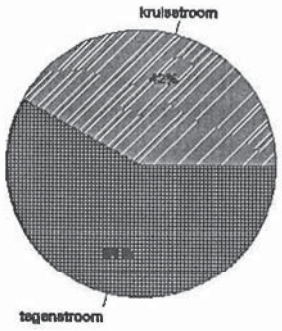
De respondent, die de biowasser heeft aangeschaft om reden 4, had met zijn gezin al jarenlang last van stallucht die tot in het woonhuis doordrong. Door de binnendringende stallucht werden kinderen ziek en stonk het in huis altijd naar ammoniak. Een vriend van de familie en de respondent zelf hebben toen een oplossing hiervoor bedacht, hetgeen uiteindelijk leidde tot de biowasser. Dit concept is toen overgenomen door de fabrikant Eurochemie, produktie en innovatie. In figuur 4.2 is te zien dat de



Figuur 4.2 *Genoemde redenen voor aanschaf biowasser.*

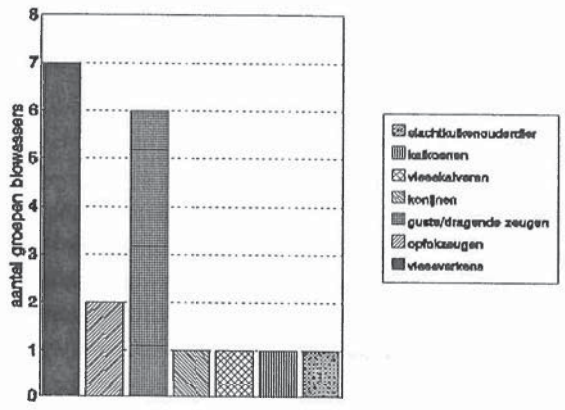
meeste respondenten de biowasser aangeschaft hebben voor de reductie van NH_3- en geuremissie. Dit is logisch omdat de biowasser hiervoor ontwikkeld is.
Bij de meeste respondenten zijn er per stal één tot drie *biowassers* geplaatst. Een uitschieter is respondent 16 die 24 biowassers in de stal heeft geplaatst. De gemeente had dit aan hem verplicht op basis van de hinerwet.
Totaal zijn er 67 biowassers geplaatst bij de 16 respondenten en deze zijn zoals eerder vermeld in te delen in 19 soorten. In figuur 4.3 is te zien wat het stromingsprincipe is van de geplaatste biowassers.

Uit figuur 4.3 blijkt dat er bij de respondenten meer tegenstroomwassers geplaatst zijn dan kruisstroomwassers. Dit is op grond van de behandelde theorie in paragraaf 2.1 logisch, omdat tegenstroomwassers een hoger rendement geven.
Bij dertien van de negentien groepen biowassers zijn de biowassers in de afdeling geplaatst, in de andere gevallen behandelt de biowasser de lucht uit de totale stal en is dus centraal geplaatst. In de toekomst hebben waarschijnlijk de centraal geplaatste systemen het meeste perspectief, omdat tegenwoordig steeds meer centrale luchtafzuiging in stallen wordt toegepast.



Figuur 4.3 *Stromingsprincipes van de biowassers.*

Bij de respondenten stamt de oudste biowasser uit het jaar 1983. De nieuwste biowasser is geplaatst in april 1995. Gemiddeld zijn de biowassers afkomstig uit het jaar 1991 en zijn ze dus op dit moment ongeveer 5 jaar oud. Nog geen enkele biowasser hoefde geheel vervangen te worden.
De maximale ventilatiecapaciteit van de geplaatste biowassers varieert van minimaal 3000 m^3/hr tot maximaal 55000 m^3/hr, met een gemiddelde waarde van 29000 m^3/hr. Bij het bepalen van de maximale ventilatiecapaciteit van één biowasser wordt gekeken naar de maximale ventilatiebehoefte van de dieren in de stal. De maximale ventilatiebehoefte varieert per diersoort, zoals blijkt uit paragraaf 3.1. In figuur 4.4 is te zien bij welke diersoorten de verschillende groepen biowassers zijn geplaatst.



Figuur 4.4 *Diersoort per groep biowassers.*

Uit figuur 4.4 blijkt dat de meeste groepen biowassers zijn geplaatst bij stallen met varkens. Dit is niet verrassend, omdat juist in deze stallen nog geen andere adequate geur- en ammoniak-emissiebeperkende technieken aanwezig zijn. Bij het toepassen van andere technieken moet de stal vaak aangepast worden, dit in tegenstelling tot het toepassen van de biowasser.
Het gemiddeld aantal dierplaatsen per biowasser is afhankelijk van de plaats van de biowasser in de stal, afdeling of centraal en van de diersoort. Bij biowassers die in afdelingen met varkens zijn geplaatst is het gemiddeld aantal dierplaatsen per afdeling 77. Een uitzondering hierop is respondent 13 waar 1200 dierplaatsen per afdeling zijn. Dit is echter een slachterij en deze stal heeft dus een andere indeling.

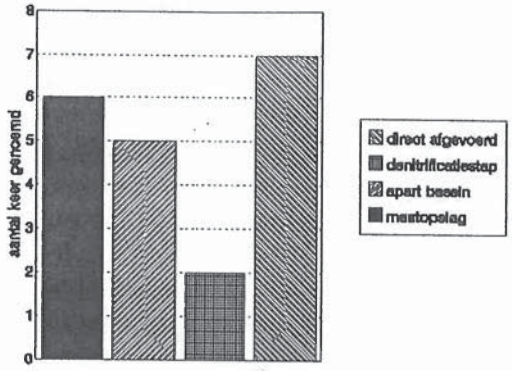
Bij biowassers op afdelingen met kalkoenen en slachtkuikenouderdieren zijn er 750 respectievelijk 400 dierplaatsen in een afdeling. Bij de centraal geplaatste biowassers varieert het aantal dierplaatsen van minimaal 48 tot maximaal 3150 (konijnen). Het aantal dierplaatsen is afhankelijk van de grootte van de stal waarin de biowasser is geplaatst.
Bij twee groepen biowassers is een denitrificatiestap geplaatst die het nitriet en nitraat uit het spuiwater omzet naar luchtstikstof. In beide gevallen heeft de respondent de denitrificatiestap zelf gebouwd en is er dus niet gecontroleerd door bijvoorbeeld het IMAG of deze ook daadwerkelijk werkt. Deze beide respondenten hoeven ook weinig tot geen spuiwater te lozen, omdat het water uit de denitrificatiestap weer naar de wassectie teruggevoerd kan worden. De biowasser met een denitrificatiestap is dus een gesloten systeem.
Bij 9 groepen biowassers is er pH-buffering aanwezig. Deze pH-buffering zorgt voor een zoveel mogelijke constante pH van het water van de biowasser, waardoor de nitrificatie waarschijnlijk beter verloopt.
Alleen respondent 11 had behalve de biowasser nog andere emissiebeperkende maatregel genomen. Eén keer per maand wordt de mest gemengd met houtkrullen, waardoor de mest droger wordt en volgens hem de NH_3-emissie uit de stal lager wordt. Dit is echter niet wetenschappelijk bewezen.

Respondent 3 heeft een biowasser van de firma Eurochemie, produktie en innovatie. De biowasser van respondent 4 is ontwikkeld door Tauw Milieu en geplaatst door Dorset Staltechniek en de biowasser van respondent 15 is van RIMU. De andere biowassers zijn allemaal geplaatst door Matthëus Milieutechniek.
De levensduur van de biowasser zonder ventilator en circulatiepomp wordt bij goed onderhoud als onbeperkt gezien. De ventilator en circulatiepomp hebben een kortere levensduur dan de biowasser, deze wordt op 10 jaar geschat.
De hoeveelheid spuiwater van de biowasser wordt normaliter ingesteld door de fabrikant, in tabel 4.4 staan de instellingen van de fabrikant vermeld. Door lineair te extrapoleren kan de hoeveelheid spuiwater bij een andere maximale ventilatiecapaciteit worden berekend. De hoeveelheid spuiwater is afhankelijk van de grootte van de biowasser.

Tabel 4.4 *Gemiddelde instellingen met betrekking tot het spuiwater*

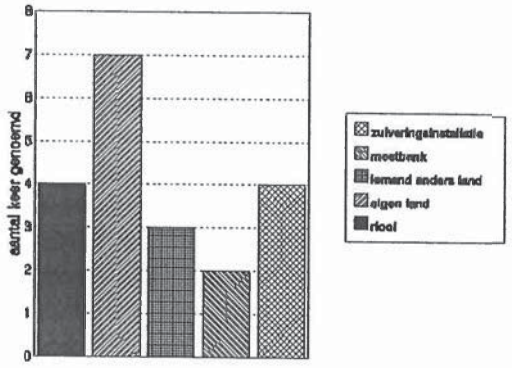
Fabrikant	Spuidebiet bij bepaalde ventilatiecapaciteit
Mattheus	1500 l/dag bij 50000 m^3/uur (lineair interpoleren)
RIMU	1500 l/dag bij 55000 m^3/uur
Tauw Milieu	1200 l/dag bij 50000 m^3/uur
Eurochemie, produktie en innovatie	geen spuiwater, namelijk denitrificatiestap

Het spuiwater wordt in de meeste gevallen eerst opgeslagen voordat het afgevoerd wordt. In figuur 4.5 is te zien welke plaatsen van opslag voor spuiwater genoemd zijn bij de verschillende groepen biowassers. Nadat het spuiwater is opgeslagen wordt het spuiwater op een gegeven moment afgevoerd. In figuur 4.6 is weergegeven welke afvoerplaatsen voor het spuiwater genoemd zijn bij de verschillende groepen biowassers.



Figuur 4.5 *Genoemde plaatsen voor het opslaan van spuiwater.*

Uit figuur 4.6 blijkt dat het spuiwater zoveel mogelijk wordt afgevoerd op eigen land, dit komt waarschijnlijk doordat hier geen tot weinig kosten aan verbonden zijn. Ook het riool is een favoriete plaats om het spuiwater naar af te voeren. Op dit moment zijn aan deze afvoerplaats nog geen kosten verbonden, maar op sommige plaatsen is het afvoeren van het spuiwater naar het riool niet toegestaan.
Aan het afvoeren van spuiwater naar iemand anders zijn land of naar de mestbank zijn wel kosten verbonden, dit varieert van 4 tot 14 gulden per m^3 spuiwater. In de situaties waarin het spuiwater naar een zuiveringsinstallatie wordt afgevoerd waren er meestal ook geen kosten aan verbonden. In één situatie bedroegen de kosten voor het afvoeren van het spuiwater naar de zuiveringsinstallatie 10 gulden per m^3. Dit komt doordat de zuiveringsinstallatie al op het bedrijf aanwezig is en het aangevoerde spuiwater procentueel een kleine hoeveelheid inneemt van het totaal te zuiveren water.



Figuur 4.6 *Genoemde plaatsen voor het afvoeren van het spuiwater.*

Er kan dus geconcludeerd worden dat iedere biowasser weer onder andere omstandigheden staat opgesteld. Ze hebben verschillende kenmerken qua diersoort, stromingsprincipe, etcetera. het is dus moeilijk om een vergelijking te maken tussen de verschillende groepen biowassers. De resultaten zullen dus zoveel mogelijk als feiten en meningen worden weergegeven.

4.3 Installatie van de biowasser

Uit het project PROPRO bleek dat bij installatie de biowasser standaard voorzien wordt van een electriciteits- en een wateraansluiting. Tevens moet de ventilatie van de stal of afdeling worden aangesloten op de biowasser. Ook bij de installatie van de groepen biowassers uit deze enquête zijn deze drie dingen standaard. In het project PROPRO beperkten de andere bouwkundige voorzieningen zich tot het maken van een gat in de muur, het demonteren van golfplaten of het storten van een betonnen voet waar de biowasser op steunt.
In deze enquête zijn 8 van de 19 groepen biowassers geïnstalleerd in een nieuwe stal. De rest van de biowassers is dus geïnstalleerd in een bestaande stal en zal later behandeld worden

4.3.1 Installatie in een nieuwe stal

In twee situaties is de groep biowassers geplaatst op de zolder van de stal. De extra voorziening die getroffen moet worden, in vergelijking met een nieuwe stal zonder biowassers, is alleen het verstevigen van de zolderconstructie. Om een biowasser in deze situatie te installeren is er gemiddeld 1 dag nodig. De kosten van de bouwkundige voorzieningen zijn in 1 geval niet bekend in het andere geval waren ze 10000,= excl. BTW per biowasser.
In drie situaties is de biowasser geplaatst in de afdeling. De extra bouwkundige voorziening die getroffen moet worden was het aanpassen van de dakconstructie, zodat de gereinigde lucht naar buiten geblazen kan worden. De kosten hiervan waren in twee gevallen niet bekend en in één geval bedroeg deze kostenpost 10.000,= excl. BTW per biowasser. De duur van de installatie van deze biowassers varieerde van 2 uur tot 3 dagen. Deze variatie is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat de tijdsduur van de installatie afhankelijk is van de mate van gereed zijn voor plaatsing van de biowasser.
In één situatie is de biowasser buiten op een ijzeren constructie geplaatst. Hieraan waren behalve de kosten van de standaardvoorzieningen geen extra kosten verbonden. De installatie van een gemiddelde biowasser uit deze groep duurde 1 dag.
Bij twee groepen zijn de biowassers in een gebouwtje buiten de stal geplaatst. Bij één groep werden de biowassers geplaatst in een bestaand gebouw en de hieraan verbonden kosten waren dus nihil. In het andere geval moest dit gebouwtje opgetrokken worden en de geschatte kosten hiervan zijn 34.000,= excl. BTW. De installatie duurde in de eerste situatie 8 uur per biowasser en in de tweede situatie 4 uur per biowasser.
De kosten van de biowasser zelf zijn niet opgenomen in de resultaten, omdat dit afhankelijk is van soort, jaar van aanschaf en fabrikant. De prijzen kunnen voor iedere situatie worden opgevraagd bij de fabrikant.

4.3.2 Installatie in een bestaande stal

Van de 11 groepen die geïnstalleerd zijn in een bestaande stal is de groep biowassers in één situatie geplaatst in een bestaand gebouw. In dit gebouw hoefden alleen maar de standaardvoorzieningen te worden getroffen. Deze groep biowassers is geïnstalleerd in 2 dagen en dit vond plaats tijdens de produktiecyclus. Met produktiecyclus wordt bedoeld de periode dat er dieren in de stal of afdeling aanwezig zijn. Dit was mogelijk omdat er geen verrichtingen getroffen moesten worden bij de dieren zelf.
Tweemaal werden groepen biowassers geplaatst in een nieuw gebouw buiten de stal. Kosten hiervan werden eenmaal geschat op 15.000,= excl. BTW per biowasser. In de andere situatie waren de kosten onbekend. Ook in deze situatie konden de groepen biowassers geïnstalleerd worden tijdens de produktiecyclus. De benodigde tijd voor installatie varieerde van 2 maanden tot 1 dag. In de eerste situatie is waarschijnlijk de benodigde tijd voor het bouwen meegenomen in de tijdsduur van de installatie.
In drie situaties is de groep biowassers geplaatst op een betonnen voet buiten de stal. De kosten zijn eenmaal geschat op 10.000,= excl. BTW per biowasser. De gemiddelde installatieduur in deze situatie is 1 dag en de installatie vindt in het algemeen plaats tijdens de produktiecyclus.
In één situatie is de biowasser in de afdeling geplaatst, waarbij de dakconstructie aangepast moest worden. Alhoewel nu rekening gehouden moet worden met de dieren is de groep biowassers toch geplaatst tijdens de produktiecyclus. De dieren die tijdens de installatie in de weg stonden werden dan even ergens anders neergezet. De benodigde installatieduur was ongeveer 2 dagen per biowasser. Er waren geen kosten verbonden aan de installatie en aanschaf omdat het in het kader

van het project PROPRO was.
In drie situaties is de groep biowassers geplaatst in een tussenruimte tussen de stallen, waarvan eventueel de tussenruimte moet worden gebouwd of worden aangepast. De kosten van deze bouwkundige voorzieningen varieren daarom nogal van 0 tot 20.000,= excl. BTW per biowasser. De installatie vond in één situatie plaats tijdens de produktiecyclus en duurde toen 14 dagen. In de andere twee situaties nam de installatie 1 tot 3 dagen in beslag.
In één situatie is de groep biowassers op een verstevigde zolderconstructie geplaatst. De kosten van het verstevigen van de zolderconstructie zijn onbekend. De biowasser werd tijdens de produktiecyclus geïnstalleerd en dit duurde 7 dagen per biowasser.
Tijdens de installatie van de biowasser in een bestaande stal heeft de produktie niet eenmaal langer dan normaal stilgelegen. Tijdens de installatie zijn er geen problemen (bv. met de dieren of anderszins) opgetreden.

In het algemeen kan dus gezegd worden dat als alle bouwkundige voorzieningen reeds getroffen zijn een biowasser in 1 dag geplaatst en aangesloten kan worden. Dit geldt voor zowel een nieuwe als voor een bestaande stal. De kosten van de getroffen bouwkundige voorzieningen variëren nogal omdat de respondent soms zelf meegewerkt heeft en ook iedereen het op zijn eigen manier doet. Hierover is dus geen betrouwbare uitspraak te doen. Sommige respondenten hebben nog subsidies gekregen bij de aanschaf van biowassers, maar tegenwoordig is dit niet meer het geval. Dit komt omdat biowassers niet wettelijk erkend zijn als ammoniak-emissiebeperkende maatregel. Bij één respondent staat de gemeente biowassers niet meer toe als emissiebeperkende maatregel. In een plaatselijke krant was te lezen dat dit kwam doordat biowassers werden toegepast om de veestapel uit te breiden. Dit was echter niet het idee achter emissie beperken.

4.4 Periodiek onderhoud aan de biowasser

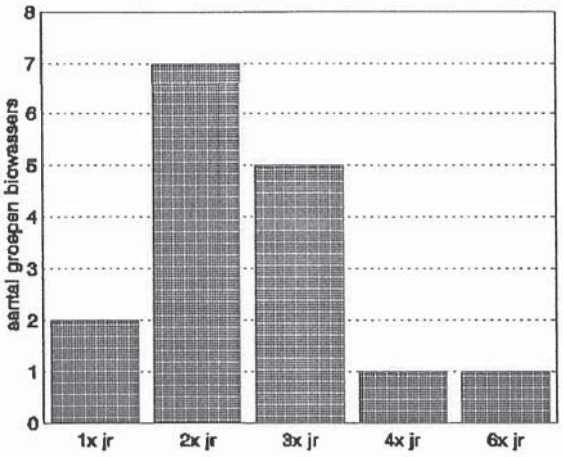
In de enquête is periodiek onderhoud als volgt gedefinieerd:

> In een bepaald tijdsbestek worden steeds dezelfde handelingen verricht aan de biowassers. Deze handelingen hebben betrekking op onderhoudswerkzaamheden, zoals het reinigen van het pakkingsmateriaal. Een periodieke controle wordt niet gezien als periodiek onderhoud.

In de enquête is er onderscheid gemaakt tussen groot en klein periodiek onderhoud aan de biowasser. Groot periodiek onderhoud is periodiek onderhoud dat minder dan 1x per 2 maanden plaatsvindt. Klein periodiek onderhoud vindt meer dan 1x per 2 maanden plaats. In de resultaten wordt alleen gesproken over de algemene term periodiek onderhoud.
Alleen aan de groep biowassers van respondent 13 wordt geen periodiek onderhoud verricht. Dit komt waarschijnlijk doordat deze biowassers pieksgewijs worden belast waardoor geen vervuiling optreedt.

4.4.1 Reinigen van het pakkingsmateriaal

Het periodiek onderhoud dat aan de meeste biowassers plaatsvindt is vooral het reinigen van het pakkingsmateriaal. Het pakkingsmateriaal wordt bij 16 groepen biowassers periodiek onderhouden. In figuur 4.7 is te zien met welke frequenties het pakkingsmateriaal van een gemiddelde biowasser uit een groep wordt schoongemaakt.



Figuur 4.7 *Frequentieverdeling van het reinigen van het pakkingsmateriaal.*

Gemiddeld wordt het pakkingsmateriaal 2 à 3 keer per jaar schoongemaakt, dit wordt in de meeste situaties ook geadviseerd door de fabrikant. De methoden van reinigen variëren en in tabel 4.5 worden de verschillende methoden beschreven in een afnemende gebruiksmate.

Tabel 4.5 *Methode van reiniging vulmateriaal*

No.	Omschrijving werkzaamheden	Benodigde reinigingstijd (uren)
1	De biowasser wordt stopgezet. Pakkingsmateriaal wordt eruitgehaald en gereinigd met een hogedrukspuit. De rest van de biowasser wordt met de hogedrukspuit zoveel mogelijk gereinigd (zoals opvangbak, ventilator, etc.). Het pakkingsmateriaal wordt weer teruggeplaatst en de biowasser wordt aangezet.	1.5-10, gemiddeld 5
2	De biowasser wordt stopgezet. Het pakkingsmateriaal wordt er uit gehaald en wordt gespoeld en geweekt met spuiwater. De rest van de biowasser wordt ook zoveel mogelijk schoongespoeld en het pakkingsmateriaal wordt weer teruggeplaatst. De biowasser wordt nu weer aangezet.	0.75-16, gemiddeld 5.7
5	De biowasser wordt stopgezet. Het vulmateriaal wordt in de biowasser gereinigd met een hogedrukspuit. De biowasser wordt weer aangezet.	0.5-6, gemiddeld 4.2
3	Het vulmateriaal wordt uit de biowasser gehaald en gereinigd met de hogedrukspuit, tijdens deze reiniging blijft de biowasser aanstaan.	2
4	De biowasser wordt stopgezet. Het pakkingsmateriaal wordt vervangen door een reservepakket. De biowasser plus de ventilator worden gereinigd met een hogedrukspuit. De opvangbak wordt niet gereinigd. De biowasser wordt nu weer aangezet. Het vervuilde pakkingsmateriaal laat men eerst een tijdje drogen en daarna wordt het uitgeklopt en eventueel schoongespoten met een hogedrukspuit.	3.5
6	Het pakkingsmateriaal wordt in de biowasser gereinigd met een hogedrukspuit. De biowasser blijft aanstaan.	0.5

De tijd die nodig is om het pakkingsmateriaal te reinigen blijkt afhankelijk te zijn van een aantal factoren:

- de grootte van de biowasser;
- de stofconcentratie van de aangevoerde lucht;

- de mate van reiniging, ofwel hoeveel % biomassa wordt er verwijderd;
- de reinigingsmethode.

Het pakkingsmateriaal wordt meestal gereinigd volgens een vasstaand tijdschema, maar soms wordt er ook gekeken of het echt wel nodig is. In dit laatste geval kan het besluit tot reiniging van het pakkingsmateriaal worden uitgesteld of naar voren worden gehaald.
Het reinigen van het pakkingsmateriaal vindt in de meeste gevallen plaats tijdens de produktiecyclus. In vier situaties probeert men het zo te regelen dat de afdeling leegstaat als het pakkingsmateriaal gereinigd moet worden.
Bij vijf groepen biowassers wordt het pakkingsmateriaal gereinigd door de fabrikant. Bij twee groepen biowassers zijn hier kosten aan verbonden te weten 420,= per biowasser per jaar. Bij de andere drie groepen biowassers maakt de fabrikant het pakkingsmateriaal volgens een onderhoudscontract schoon. De kosten van dit onderhoudscontract zitten verwerkt in de aanschafsprijs. In de andere situaties maakt de respondent en/of een werknemer het pakkingsmateriaal schoon. Aan het reinigen zijn dan alleen arbeid en materiaalkosten verbonden.
Bij 7 van de 16 groepen functioneerde de biowasser technisch beter na de reiniging van het pakkingsmateriaal. Dit kwam doordat de ventilatiecapaciteit na reiniging sterk verbeterde.
Door het reiningen van het pakkingsmateriaal zijn er tweemaal problemen opgetreden. Doordat spoelwater bij de dieren kwam gingen er een aantal dieren na het drinken ervan dood of ze werden ziek. Het water uit de biowasser is namelijk giftig door de aanwezigheid van nitriet.
Bij respondent 16 kon het pakkingsmateriaal in de beginfase moeilijk tot niet gereinigd worden. Dit kwam doordat het pakkingsmateriaal moeilijk bereikbaar was en los in de biowasser was gestort. De fabrikant heeft toen het pakkingsmateriaal in zakken gedaan en de constructie zodanig verbeterd dat het pakkingsmateriaal goed gereinigd kan worden. Het totale oplossen van deze storing duurde 1 produktiecyclus, dat wil zeggen 17 weken. Dit kwam doordat een biowasser pas werd aangepast als de afdeling leegstaat. Door deze storing zijn er geen andere problemen opgetreden.
Bij respondent 3 en 4 wordt het pakkingsmateriaal niet gereinigd. Bij respondent 4 is het sinds de aanschaf, 3/4 jaar geleden, nog niet nodig geweest om het pakkingsmateriaal te reinigen. Bij respondent 3 is de oorzaak van het niet reinigen van het pakkingsmateriaal onbekend.

4.4.2 Andere onderhoudswerkzaamheden

Bij respondent 3 wordt 1x 2,5 jaar de vochtvanger gereinigd met de hogedrukspuit, hetgeen 1,5 uur duurt. Dit onderhoud wordt uitgevoerd door de respondent en de biowasser kan gewoon aan blijven staan. Bij respondent 4 wordt 1x per 3 maanden de stofafvang met de hogedrukspuit gereinigd. Ook nu blijft de biowasser aanstaan. Het schoonmaken kost gemiddeld 6 uur en wordt uitgevoerd tijdens de produktiecyclus. Behalve arbeid en materiaal zijn er aan deze twee onderhoudsmethoden geen kosten verbonden.
Bij drie groepen biowassers wordt naast het reinigen van het pakkingsmateriaal nog ander onderhoud uitgevoerd. Bij twee groepen worden de luchtgeleidingsschotten van de biowasser gereinigd met een hogedrukspuit. Dit wordt bij de kalkoenen 2x per maand en bij de slachtkuikenouderdieren 1x per maand gedaan. De frequentie van reiniging is afhankelijk van het stofgehalte in de stal en dit is dus bij kalkoenen hoger. Het onderhoud wordt verricht door een werknemer en het neemt circa een 1/2 uur tijd in beslag. Na dit onderhoud functioneert de biowasser door de verbeterde ventilatiecapaciteit beter. Behalve arbeid en materiaal zijn er geen kosten aan dit onderhoud verbonden.
Bij één groep biowassers wordt het zeefje dat voor de circulatiepomp zit schoongemaakt door het zeefje eruit te halen en schoon te kloppen. Dit onderhoud wordt 3x per week verricht door de

respondent en duurt ongeveer 1 minuut.
Tijdens het onderhoud anders dan het reinigen van het pakkingsmateriaal zijn er nooit problemen opgetreden.

Er kan geconcludeerd worden dat het reinigen van het pakkingsmateriaal het belangrijkste onderhoud is.

4.5 Storingen aan de biowasser

Een door de respondent genoemde storing is alleen opgenomen als het een storing betreft die veroorzaakt wordt door iets van de biowasser. Als er bv. een ventilator kapot is gegaan door een electriciteitsstoring dan wordt dit in dit verhaal niet meegenomen. De tijdsduur van een storing is de tijd die verstrijkt tussen het opmerken en het oplossen van de storing.
Bij acht groepen biowassers is er sinds de aanschaf van de groep biowassers nog nooit een storing opgetreden die veroorzaakt werd door de biowasser.

4.5.1 Storingen aan de ventilator

Bij 5 groepen biowassers zijn er storingen opgetreden aan de ventilatoren. Bij al deze groepen biowassers is deze storing maar 1x sinds aanschaf bij alle biowassers opgetreden.
Bij 1 van de 5 groepen biowassers was de ventilator nat geworden door spatwater van de biowasser. Bij de andere groepen was de ventilator kapot gegaan doordat het water van de biowasser de ventilator had aangetast.
In alle situaties is de storing opgelost door de ventilator te vervangen door een andere ventilator. Bij één groep biowassers is de ventilator ook hoger gehangen, zodat het water niet meer in contact kan komen met de ventilator.
In twee situaties heeft de fabrikant de storing opgelost hieraan waren geen kosten verbonden vanwege een garantieclausule. In deze situaties duurde de storing ongeveer 2 tot 7 dagen. Bij respondent 16 ging de ventilator kapot bij enkele van het totaal aantal biowassers. Hij heeft toen samen met de fabrikant besloten om alle ventilatoren te vervangen. De ventilator werd pas vervangen als de afdeling leegstond en de storing was dus feitelijk pas na één produktiecyclus opgelost, dat wil zeggen 17 weken.
Bij de andere drie groepen heeft de respondent de storing zelf opgelost. De kosten waren nu gelijk aan die van het nieuw aangeschafte deel van de ventilator. Dit is dus afhankelijk van het type ventilator en/of het te vervangen onderdeel. De storing duurde bij deze groepen ongeveer een uur. Het verschil met de vorige situatie is waarschijnlijk dat de storing korter duurt omdat de respondent de storing zelf heeft opgelost.
In 1 van de 5 situaties traden er problemen op door het kapotgaan van de ventilator, dit was bij respondent 4. Doordat 4 uur lang niet geventileerd kon worden zijn er een aantal dieren gestikt.

4.5.2 Storingen aan de circulatiepomp

Bij drie respondenten is de circulatiepomp kapot gegaan. Bij respondent 6 en 16 trad deze storing 1x sinds aanschaf op bij alle biowassers uit de groepen. Bij respondent 10 is de circulatiepomp kapot gegaan bij 2 van de 6 biowassers uit deze groep sinds aanschaf.
Bij respondent 6 ging de circulatiepomp kapot doordat het water de circulatiepomp had aangetast.

Bij de twee andere groepen ging de circulatiepomp kapot doordat er vuil uit de biowasser in de circulatiepomp gekomen was. Bij alle drie de respondenten is deze storing opgelost door de motor van de circulatiepomp opnieuw te laten wikkelen. Bij *respondent 16 zijn* niet alle circulatiepompen tegelijk vervangen, maar vervangen als een afdeling leegstaat. Dus na circa 17 weken (1 produktiecyclus) zijn alle circulatiepompen vervangen en was bij hem de storing verholpen. Bok respondent 6 duurde de storing 24 uur dit in tegenstelling tot respondent 10 waarbij de storing een 1/2 uur duurde. Dit kwam doordat respondent 10 een reservepomp kon installeren en de biowasser dus gelijk weer kon functioneren. Respondent 6 en 10 hebben de storing zelf opgelost en de kosten hiervan waren die van een nieuwe circulatiepomp, circa 200,=. Respondent 10 had namelijk wel een nieuwe reservepomp nodig. Bij respondent 16 is de storing opgelost door de fabrikant en hier waren voor hem geen kosten aan verbonden. Er zijn geen andere problemen opgetreden door de storing aan de circulatiepomp.

4.5.3 Storingen aan de sproeiers

Bij drie respondenten zijn soms enkele sproeiers van de wateraanvoer verstopt. Bij respondent 4 treedt deze storing 1x per 2 maanden op bij de biowasser en bij respondent 5 is dit 1x per jaar. Bij respondent 15 is deze storing pas 2x sinds aanschaf opgetreden.
De sproeiers raken bij alle groepen verstopt door vuil uit de biowasser, meestal pakkingsmateriaal. Door de sproeiers schoon te maken is deze storing verholpen en dit wordt gedaan door de respondent of een werknemer. Alleen het schoonmaken van een sproeier kost circa 1 minuut, maar om deze handeling te kunnen uitvoeren moet bijvoorbeeld de biowasser opengemaakt worden. De tijdsduur van de voorbereidingen zitten dus niet opgesloten in de schoonmaaktijd van de sproeiers. Voordat deze storing ontdekt wordt kan er enige tijd verstrijken, omdat de biowasser ondanks de storing technisch goed blijft functioneren. Er zijn namelijk nog een aantal sproeiers over die het wel functioneren. Dit verklaart het antwoord op een tijdsduur van de storing van 2 dagen bij respondent 15. Aan het schoonmaken van de sproeiers zijn, behalve arbeid, geen andere kosten verbonden. Omdat de biowasser normaal blijft functioneren is het niet verrassend dat er geen andere problemen optreden.

4.5.4 Storingen aan de spuiafvoer

Bij respondent 7 is bij alle biowassers de spuiafvoer 2x sinds aanschaf verstopt geweest door vuil uit de biowasser. Als de spuiafvoer verstopt is kan het reservoir van de biowasser overlopen, waardoor er water vrijkomt. Direct na de eerste keer dat de storing optrad is er een opvangbak om de biowasser heen geplaatst, de kosten hiervan waren 1000,= per opvangbak. De opvangbak is geplaatst omdat er tijdens deze storing 2 zeugen dood zijn gegaan door het drinken van dit spoelwater. De tweede keer dat deze storing optrad bij deze respondent is de diameter van de spuiafvoer groter gemaakt. De storing werd beide keren opgelost door de respondent in samenwerking met de fabrikant. In beide situaties was de spuiafvoer ongeveer een week verstopt. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat de biowasser ondanks de storing kan blijven functioneren. De storing wordt pas opgemerkt als het reservoir overstroomt.
Bij respondent 13 raakt de spuiafvoer 1x per half jaar verstopt bij elke biowasser en dit hangt samen met een niet functionerende vlotter. De vlotter functioneert niet meer doordat vuil afkomstig van de biowasser terechtkomt op de stemvork van de vlotter. Hierdoor is de spui ontregeld en stroomt het water uit het reservoir over. Door de stemvork van de vlotter en de spuiafvoer door een werknemer schoon te laten maken wordt de storing opgelost. De storing duurt gemiddeld 2 uur

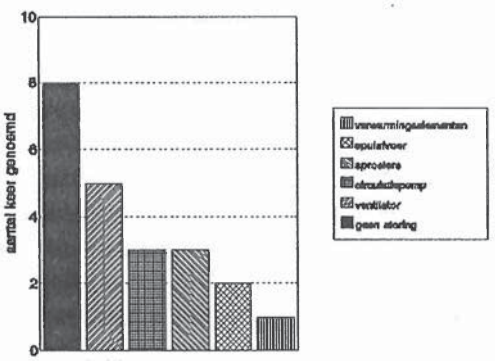
en er zijn nog nooit andere problemen door opgetreden.

4.5.5 Andere storingen aan de biowasser

Eveneens zijn bij respondent 13 1x per jaar de verwarmingselementen kapot die dan door een werknemer vervangen worden. De verwarmingselementen gaan kapot doordat ze aangetast worden door het water uit de biowasser. De storing duurt ongeveer 4 uur en de kosten bedragen circa 100,= per nieuw verwarmingselement. Ondanks de kapotte verwarmingselementen kan de biowasser blijven functioneren en er treden dus geen andere problemen op.
Bij respondent 7 is er 2x per jaar schuimvorming te zien op het waswater van alle biowassers. Door slaolie toe te voegen wordt dit probleem verholpen.

In figuur 4.8 is de verdeling te zien van de genoemde storing over de groepen biowassers.

Tijdens PROPRO traden er vooral storingen op aan leidingen, sproeiers en vlotters door vervuiling. In deze enquête worden deze storing maar bij 5 groepen biowasser genoemd. Echter in drie situaties treedt deze storing regelmatig op, in de andere twee situaties trad het probleem maar 1 of 2x sinds aanschaf op en betrof het een probleem uit de beginfase.
Tijdens PROPRO werd ook duidelijk dat het water van de biowasser de ventilator aan kon tasten. Ook uit deze enquête blijkt dat het water diverse elemenenten aantast, te weten ventilatoren, circulatiepompen en verwarmingselementen. Bij de eerste twee elementen worden deze maar 1x sinds aanschaf aangetast, hierna is namelijk de constructie zodanig verandert dat er geen contact meer is tussen het element en het water. Bij de verwarmingselementen blijft de storing zich herhalen.



Figuur 4.8 *Verdeling van het aantal genoemde storingen over het aantal categorieën.*

Bij het schatten van de duur van de storing moet in het algemeen opgemerkt worden dat deze tijdsduur vaak niet bekend is. Dit komt doordat aan de buitenkant van de biowasser niet te zien is of er een storing is.
Concluderend kan gezegd worden dat in de meeste gevallen een storing maar 1 of 2 keer opgetreden is sinds aanschaf en veelal verholpen kon worden door de constructie van de biowasser te verbeteren. Bij 7 groepen biowassers zijn het echter storingen die terug blijven keren en dus blijvend zijn.

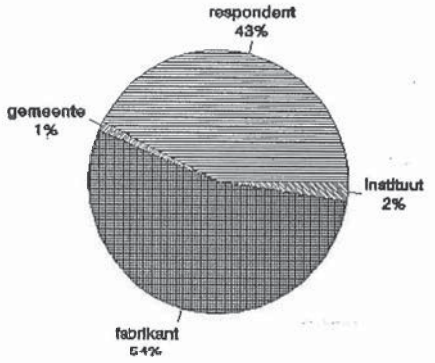
4.6 Controles aan de biowasser

Als de biowasser wettelijk geaccepteerd wordt als emissiebeperkende maatregel, dan is het de bedoeling dat de NH_3-reductie een aantal keren per jaar gecontroleerd wordt. Omdat hier kosten aan verbonden zijn is aan de respondenten gevraagd hoeveel geld ze hieraan willen besteden op jaarbasis. Bij de meeste respondenten was het antwoord op deze vraag NIETS! Sommige respondenten wilden eventueel geld beschikbaar stellen als ze bv. groen-label kregen voor de

biowasser. De respondenten die wel geld voor deze jaarlijkse controles wilden betalen dachten aan een bedrag van 500,= per jaar.
De controles die aan de biowasser plaats kunnen vinden variëren van de controle van de NH_3-reductie tot de controle van de technische werking van de circulatiepomp.

4.6.1 Controle van de NH_3-reductie van de biowasser

Controle van de NH_3-reductie van de biowasser heeft bij bijna alle respondenten, op vijf na, plaatsgevonden. Bij respondent 5, 10, 13 en 14 is de NH_3-reductie niet gecontroleerd omdat de groep biowassers was aangeschaft om de geur te reduceren. Respondent 9 had de groep biowassers wel aangeschaft om de NH_3-emissie uit de stal te reduceren, maar dit is nooit gecontroleerd. Door de vragen uit de enquête werd hij echter wel nieuwsgierig naar de NH_3-reductie van de groep biowassers.
De NH_3-reductie is gecontroleerd met drägerbuisjes, de nat-chemische methode of met een speciale ammoniakmeter. Bij deze controles vinden ook (vaak) controles van temperatuur, ventilatiedebiet, pH en concentratie van NH_4^+, NO_2^- en NO_3^- in het waswater plaats. De tijd die nodig om de NH_3-reductie te controleren varieert nogal en is onder andere afhankelijk van het aantal meetpunten.
De gemiddelde NH_3-reductie van de biowassers is 81% met een standaardafwijking van 8.8%. Deze gemiddelde NH_3-reductie is hoger dan de meeste fabrikanten voorspellen. De hoogst gemeten reductie is 98% bij de biowasser van de fabrikant Eurochemie, produktie en innovatie. Deze NH_3-reductie is door de fabrikant zelf gemeten met een speciale ammoniakmeter.
Het aantal keer dat de NH_3-reductie gecontroleerd wordt verschilt nogal per respondent. Bij respondent 8 wordt de NH_3-reductie uit onderzoeksoogpunt continue gemeten. Bij andere respondenten varieert dit van een aantal keer per jaar tot 1x per jaar. Ook is bij sommige respondenten de NH_3-reductie maar een aantal keer gedurende een bepaalde periode gemeten. Er is dus geen conclusie te trekken over het gemiddeld aantal controles van de NH_3-reductie die plaatsvinden bij de respondent.
Bij 7 groepen is de NH_3-reductie gecontroleerd door de fabrikant van de biowasser, deze was ook de opdrachtgever voor de controle van de NH_3-reductie. Bij de andere groepen is de NH_3-reductie gemeten door een onafhankelijk instituut, zoals bijvoorbeeld het IMAG. Alleen respondent 15 meet drie keer per jaar zelf de NH_3-reductie met drägerbuisjes. In figuur 4.9 is te zien wie de opdrachtgevers waren voor het controleren van de NH_3-reductie van de biowassers.



Figuur 4.9 *Genoemde opdrachtgevers voor het controleren van de NH_3-reductie.*

In figuur 4.9 is te zien dat bij de meeste groepen de fabrikant of de respondent (of het bedrijf waarvoor de respondent werkt) de opdrachtgevers zijn voor het controleren van de NH_3-reductie. Het is dus opvallend dat ondanks het feit dat de gemeente, de respondent in de meeste gevallen verplicht heeft de groep biowassers aan te schaffen, zij niet geïnteresseerd is in de hoogte van de NH_3-reductie van de biowassers.
De kosten van het controleren van de NH_3-reductie variëren zeer sterk, zodat hiervan geen eenduidige schatting is te geven.
Op grond van de gemeten NH_3-reductie is acht keer besloten om acties te ondernemen om de NH_3-reductie te laten toenemen. Dit is gebeurd door de biowasser te enten met bacterieslib, het

toevoegen van kalk aan het water (pH hoger), het vergroten van het volume pakkingsmateriaal of er is besloten om de NH_3-reductie beter te controleren. Meestal is bij een respondent maar één van deze acties uitgevoerd.

4.6.2 Controle van de geurreductie

Bij 7 respondenten is de geurreductie van de biowasser gecontroleerd. Bij twee respondenten is de geurreductie bepaald door een olfactometer van het IMAG. Het bepalen van de geurreductie met een geurpanel is bij respondent 12 totaal drie keer uitgevoerd in het kader van het project PROPRO. Bij respondente 16 is dit 1x uitgevoerd in opdracht van de fabrikant. Het vangen van luchtmonsters voor het geurpanel neemt ongeveer 1 dag in beslag. In deze twee situaties waren er geen kosten aan verbonden voor de respondent. Normaal gesproken is het controleren van de geur met een geurpanel een vrij kostbare zaak.
Bij de andere respondenten is er door te ruiken aan de lucht die uit de biowasser komt een schatting van de geurreductie gemaakt. Door aan de uitlaat van de biowasser te ruiken kan gezegd worden of er geur is waar te nemen ja of nee. Deze controle kan door iedereen uitgevoerd worden en is hier uitgevoerd door de respondent, gemeente of fabrikant. Aan het zelf ruiken zijn natuurlijk geen kosten verbonden.

4.6.3 Controle van de pH van het waswater

De pH van het waswater wordt gecontroleerd met een pH-meter of lakmoespapier. Doordat bekend is dat de pH van het waswater ongeveer moet liggen in het bereik 7-8 voor een optimaal verloop van absorptie, dissociatie en nitrificatie kan door het meten van de pH bekeken worden of de biowasser goed werkt. Bij de respondenten waarbij de pH gemeten is ligt de pH van het waswater in het gewenste bereik. De respondent of een werknemer kunnen zelf de pH meten en de uitslag wordt meestal teruggekoppeld naar de fabrikant. Het aantal keer dat de pH werd gemeten varieert van 1x per maand tot 2x per dag. De kosten die aan deze controle zijn verbonden zijn de kosten van het lakmoespapier of de pH-meter. De pH-meter is in enkele gevallen in overleg gekocht met de fabrikant.
Eén respondent beweert het gehalte aan ammonium, nitriet en nitraat te contoleren met lakmoespapier.

4.6.4 Controleren van de technische werking

Op respondent 13 en 16 na controleren alle respondenten regelmatig de technische werking van de biowasser. In tabel 4.6 zijn de drie gebruikte methoden van controleren weergegeven.

Tabel 4.6 *Methoden voor het controleren de technische werking van de biowasser*

Methode	Beschrijving
A	Het controleren van de technische werking door aan de buitenkant van de biowasser te kijken of alles nog functioneert. Tevens wordt er geluisterd of het water nog stroomt.
B	Het controleren van de technische werking door in de biowasser te kijken of het water nog stroomt en het pakkingsmateriaal nog schoon genoeg is.
C	Het controleren van de technische werking door de werking van de ventilator, circulatiepomp en spuipomp te controleren via een computeralarm.

Als de technische werking wordt gecontroleerd met methode C uit tabel 4.6, dan wordt de biowasser dus continu in de gaten gehouden.
Bij het gebruik van de andere twee methoden vindt methode A elke dag plaats en methode B vindt gemiddeld ongeveer 1x per maand plaats. Een uitzondering hierop is respondent 7 waarbij de technische werking 1x per 2 weken wordt gecontroleerd met methode A. Dit komt waarschijnlijk door het feit dat dit proefstallen zijn. Het is niet vreemd dat methode A dagelijks plaatsvindt, omdat deze controle plaats kan vinden op het moment dat de respondent langs de biowasser loopt. De controle op technische werking wordt in alle situaties uitgevoerd door de respondent of door een werknemer van het bedrijf. De tijd die methode A in beslag neemt is gemiddeld 1 minuut. Methode B neemt gemiddeld een kwartier in beslag.

4.7 Opstarten van de biowasser na stilstand

Als de biowasser een tijdje heeft stilgestaan dan moet de biowasser opnieuw opgestart worden. Dit kan variëren van het aanzetten van de watertoevoer tot het enten van de biowasser met bacteriën. De biowasser moet opgestart worden na installatie en na stilstand tijdens periodiek onderhoud. De meest gebruikte methoden van opstarten zijn terug te vinden in tabel 4.7.

Tabel 4.7 *Methoden van opstarten van de biowasser*

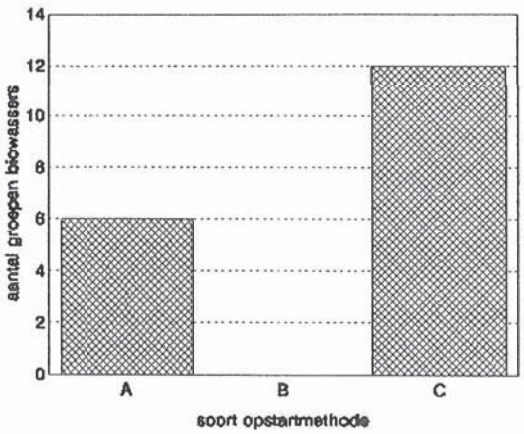
Methode	Beschrijving
A	De biowasser wordt opgestart met alleen leidingwater.
B	De biowasser wordt opgestart met een deel waswater en een deel leidingwater.
C	De biowasser wordt opgestart door deze te enten met bacteriën.

Het doel van het opstarten is dat de biowasser weer zo snel mogelijk biologisch functioneert.

4.7.1 Opstarten van de biowasser na installatie

In figuur 4.10 wordt weergegeven met welke methoden de groepen biowassers worden opgestart na de installatie.

Uit figuur 4.10 blijkt dat in de meeste gevallen is gekozen voor het opstarten van de biowasser door deze te enten met bacteriën, bijvoorbeeld afkomstig uit rioolslib. Hierbij moet opgemerkt worden dat het slib allerlei bacteriën bevat. Het enten met bacteriën is een logische keuze, omdat bekend is dat als de initiële concentratie bacteriën groot en actief is de vermeerdering onder goede omstandigheden beter verloopt. NH_3-reductie vindt echter, als het goed is, meteen bij het opstarten plaats doordat er absorptie van NH_3 optreedt. Het bereiken van een maximale NH_3-reductie kan echter pas gerealiseerd worden bij een systeem met een actief nitrificerende biomassa. De antwoorden dat de biowasser meteen goed functioneerde zijn dus met deze theorie te verklaren.



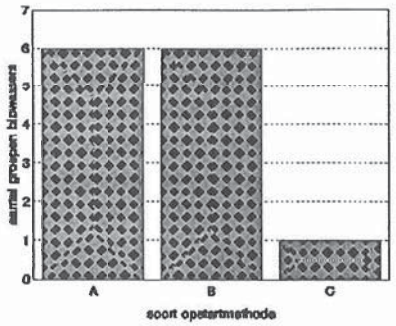
Figuur 4.10 *Verdeling van de methoden van opstarten van de biowasser na installatie.*

De maximale NH_3-reductie wordt bij methode A na circa 2-8 weken en na methode C na circa 2-4 weken bereikt. In deze enquête is dus geen duidelijk verschil geconstateerd tussen deze twee tijdsduren. Het kan zijn dat er inderdaad geen verschil is tussen de twee methoden, omdat via de stallucht ook bacteriën worden aangevoerd. Tevens is bekend dat de respondent moeilijk in kan schatten wanneer de NH_3-reductie maximaal is. Het tijdstip van het bereiken van de maximale NH_3-reductie kan alleen gekwantificeerd worden als de NH_3-reductie regelmatig gecontroleerd wordt.
Als de biowasser wordt geënt met bacteriën dan wordt dit bij 11 van de 13 groepen biowassers gedaan door de fabrikant. Bij de 2 andere groepen ent de respondent de biowasser met bacteriën. Het opstarten van de biowasser met methode A wordt uitgevoerd door de respondent of een werknemer van het bedrijf. Dit is mogelijk omdat het alleen aanzetten van het water betreft.
Tijdens het opstarten van de biowasser met methode A zijn er bij de ondervraagde respondenten nooit problemen opgetreden. Bij 1 respondent was dit wel het geval na het opstarten van de biowasser volgens methode C. Bij deze respondent was na 6 weken de NH_3-reductie nog steeds te laag en dit kwam waarschijnlijk door een te laag aanbod van NH_3, teveel spuiwater en schuimvorming op het water.
Geconcludeerd kan worden dat na installatie de biowasser meestal wordt opgestart door deze te enten met bacterieslib.

4.7.2 Opstarten van de biowasser na onderhoud

Na onderhoud is de verdeling van de opstartmethoden te zien in figuur 4.11.

Het valt op dat maar één groep biowassers wordt opgestart door deze te enten met bacterieslib. Dit wordt verklaard door het feit dat na onderhoud nog voldoende bacteriemateriaal aanwezig is op het pakkingsmateriaal om op te kunnen starten. Het pakkingsmateriaal wordt namelijk niet voor 100% schoongemaakt. Na onderhoud duurt het volgens de respondent gemiddeld een week voordat de biowasser weer aan zijn maximale NH_3-reductie zit.
Na de stilstand tijdens onderhoud wordt bij alle groepen de biowasser opgestart door de respondent of de werknemer. Bij één respondent zijn bij beide groepen biowassers 1x problemen opgetreden tijdens het opstarten na onderhoud. Het betrof een probleem in de beginfase, na 6 maanden bleek



Figuur 4.11 *Verdeling van de methoden van opstarten van de biowasser na onderhoud.*

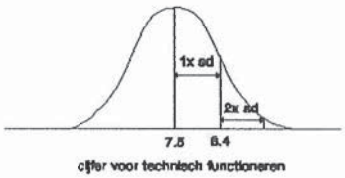
dat het pakkingsmateriaal nog te vervuild was waardoor de ventilatiecapaciteit niet voldoende was.
De conclusie is dus dat na onderhoud de biowasser meestal simpelweg wordt aangezet met alleen leidingwater of ook nog met een gedeelte waswater.

4.8 Tevredenheid respondenten over de biowasser

De tevredenheid van de respondenten is gemeten door hun mening te vragen over het technisch en biologisch functioneren van de biowasser. Tevens is gevraagd naar de voor- en nadelen van het toepassen van de biowasser op boerderijschaal.

4.8.1 Tevredenheid over het technisch functioneren van de biowasser

Twaalf respondenten vinden dat een gemiddelde biowasser van hun bedrijf technisch goed functioneert. Onder technisch goed functioneren wordt verstaan dat de biowasser in gebruik is zonder dat er regelmatig technische storingen optreden en dat de technische werking van de biowasser voldoet aan de opgave van de fabrikant.
Vier respondenten zijn van mening dat een gemiddelde biowasser op hun bedrijf matig functioneert. In drie situaties is dit te wijten aan het feit dat het maximale ventilatiedebiet niet wordt bereikt. In de andere situatie komt dit doordat de biowasser een prototype was en veel problemen heeft gehad. Het technisch functioneren werd gemiddeld met het cijfer 7.5 beoordeeld door de respondenten. Als dit cijfer normaal verdeeld zou zijn, dan ziet de frequentieverdeling er als figuur 4.12 uit.



Figuur 4.12 *Normale verdeling van het cijfer voor het technisch functioneren van de biowasser.*

Uit figuur 4.12 blijkt dat er een kleine spreiding, namelijk de standaardafwijking is 0.9, in de cijfers waar te nemen is. Er kan dus geconcludeerd worden dat het technisch functioneren van de biowasser in deze enquête ruim voldoende te noemen is.

4.8.2 Tevredenheid over het biologisch functioneren van de biowasser

Bij 14 respondenten reduceert een gemiddelde biowasser de NH_3-emissie uit de stal. Van deze respondenten zijn er 13 tevreden over de mate van de NH_3-reductie, omdat de eisen die aan de NH_3-reductie werden gesteld ook daadwerkelijk gehaald worden. In sommige situaties waren er in het geheel geen eisen gesteld aan de NH_3-reductie en voor deze respondenten is de NH_3-reductie dus een presentje.
Eén respondent is ontevreden over de NH_3-reductie die circa 60% is en 70% had moeten zijn op laste van de hinderwet. Twee van het totaal aantal respondenten weet niet hoeveel de NH_3-reductie van de biowasser bedraagt, doordat dit nooit gemeten is. Bij de ene respondent is dit niet belangrijk

omdat de biowasser is aangeschaft om de geur te reduceren. De andere respondent zou tevreden zijn als de eisen voor NH_3-reductie, dat wil zeggen 65%, gehaald worden.
Het biologisch functioneren, dat wil zeggen de NH_3-reductie, wordt gemiddeld beoordeeld met het cijfer 7.8 met een standaardafwijking van 1.2. De standaardafwijking is nu groter dan bij de waardering van het technisch functioneren het geval was. Echter bijna 95% van de scores komen nog uit op een voldoende tot een ruim voldoende waardering van het biologisch functioneren van de biowasser.

4.8.3 Arbeidsuren voor het laten functioneren van de biowasser

Bij de onderzochte groepen biowassers moet de respondent gemiddeld 24 uur per biowasser per jaar met een standaardafwijking van 22.6 uur werken aan de biowasser. De spreiding in deze getallen is erg groot en de tijdsbesteding varieert dus nogal.
De maximale tijdsbesteding is 85 uur door respondent 4, waarschijnlijk komt dit doordat de biowasser nog in de beginfase verkeert en er veel onderzoek naar de biowasser wordt gedaan. Het minimum in tijdsbesteding is 1 uur door respondent 3 en 14. In het geval van respondent 14 komt dit doordat de gemeente de biowassers onderhoudt.

4.8.4 Voor- en nadelen van het gebruik van de biowasser

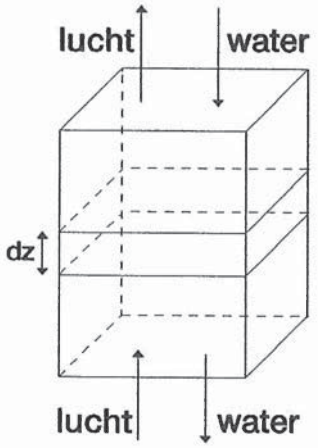
Het belangrijkste voordeel van de biowasser dat genoemd wordt is het feit dat er reductie van NH_3 en geur optreedt. Een bijkomend voordeel is volgens een aantal respondenten dat door de aanschaf van de biowasser het aantal stuks vee behouden bleef of zelfs uitgebreid kon worden. Als de biowasser vergeleken wordt met andere emissie-beperkende technieken, dan is het voordeel dat de stalconstructie niet hoeft worden aangepast bij de installatie van de biowasser. De biowasser is volgens enkele respondenten ook één van de goedkoopste aanwezige technieken en slijt zelf niet zo snel. Eén respondent vindt dat er aan het gebruik van de biowasser geen voordelen zitten.
Het belangrijkste genoemde nadeel van het gebruik van biowassers zijn de extra kosten die gemaakt moeten worden. Dit zijn ten eerste de hoge aanschafkosten en ten tweede de kosten tijdens werking, zoals electriciteit, onderhoud en afvoer van spuiwater. Een tweede nadeel dat vaak genoemd is is het feit dat er veel spuiwater vrijkomt per biowasser. Verder zijn de respondenten van mening dat een biowasser alleen maar kosten en geen baten met zich meebrengt. Eén respondent is van mening dat er geen nadelen zijn aan het gebruik van de biowasser. Een aantal respondenten zou de tweede keer liever minder dieren houden, dan opnieuw een biowasser aanschaffen.
Nu de nadelen op een rijtje zijn gezet is het niet verwonderlijk dat het kostenplaatje van de biowasser met het cijfer 4.4 wordt beoordeeld met een standaardafwijking van 2.6. Dit komt overeen met de conclusie uit PROPRO dat de biowasser een duur systeem is.
Sommige respondenten kregen nog subsidies bij de aanschaf van de biowasser en zouden op dit moment zonder de subsidies de biowasser niet meer aanschaffen. Respondent 14 heeft het helemaal goed geregeld. Zijn gemeente wilde huizen bouwen binnen de stankcirkel van zijn bedrijf. De gemeente kocht daarom voor hem biowassers en onderhoud deze ook. De gekochte biowassers staan echter alleen aan in de periode mei - oktober. Volgens de gemeente is dan namelijk het stankprobleem al opgelost!

4.9 Conclusie van de enquête

Als alle resultaten van de enquête worden samengenomen dan kan gesteld worden dat de respondenten redelijk tevreden zijn over het gebruik van de biowasser. Alleen is er nog wel onderzoek nodig naar het verminderen van de kosten van de biowasser. De kostenpost spuiwater kan verminderd worden door een denitrificatiestap toe te voegen, zoals twee respondenten al gedaan hebben. Het is echter niet bekend wat de kosten van het toepassen van de denitrificatiestap zijn.
De tweede grote kostenpost is de aanschafprijs van de biowasser. Deze kosten zouden kunnen dalen door de omkasting van de biowasser te vervangen door een polyester materiaal. Het reservoir van de biowasser moet dan naast de biowasser worden geplaatst in verband met de dragende capaciteit van het polyester. Het plaatsen van het reservoir naast de biowasser heeft als voordeel dat de circulatie- en de spuipomp nu veel beter bereikbaar zijn. Respondent 5 opperde dat het misschien wel mogelijk was om de biowasser te maken in de voersilo.
Sommige respondenten blijken erg inventief te zijn, zoals als bleek uit het zelf ontwikkelen van de biowasser door respondent 3 en het ontwikkelen van de denitrificatiestap door respondent 5.
Respondent 5 heeft ook nog een periode geprobeerd mest te verdampen met de biowasser door in plaats van water verdunde mest uit de sproeiers te laten komen. De mest kon in de biowasser verdampt worden, echter het pakkingsmateriaal raakte snel vervuild en de proef is gestopt.
Het bedrijf van respondent 8 onderzoekt een materiaal dat NH_3 en stof absorbeerd zonder dat hierbij water benodigd is. Op dit moment onderzoekt men hoe het materiaal als het geen NH_3 meer opneemt verwerkt moet worden.
Zoals altijd tijdens een onderzoek gebeurt heb ik ook overbodige of verkeerde vragen gesteld. De gegevens over de huisvesting van de dieren in de stallen zijn niet meegenomen. Dit komt omdat de emissiefactor alleen bepaald is bij enkele stalsystemen en er dus geen onderscheid te maken is tussen verschillende emissiefactoren.
Het scheiden van de levensduur van de biowasser in een technische en economische levensduur kon door de respondenten niet beantwoord worden. Ook was het niet mogelijk voor de respondent om een schatting te geven van het electriciteitsverbruik van de biowasser. De meeste respondenten gaven aan dat het electriciteitsverbruik gelijk was aan dat van de ventilator.
Verder is er in de enquête niet gevraagd naar arbeidsomstandigheden omdat dit moeilijk was om te vragen.

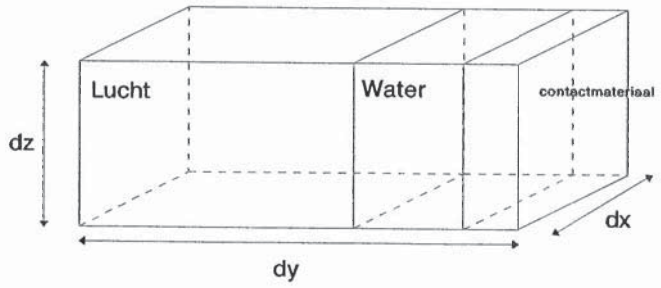
5 FYSISCH MODEL VAN DE PROCESSEN IN EEN BIOWASSER

In een biowasser vindt NH_3-overdracht plaats tussen water en lucht. Tevens vindt in de waterfase nitrificatie plaats door bacteriën. Deze processen vinden plaats *in een volume* gevuld met een oppervlaktevergrotend contactmateriaal, de wassectie. Door dit oppervlaktevergrotend contactmateriaal stromen stallucht en water via een tegenstroomprincipe naar boven respectievelijk naar beneden. In figuur 5.1 is het volume van de biowasser waarin de processen plaatsvinden schematisch getekend.



Figuur 5.1 Schematische weergave van het volume van de biowasser waar de processen in plaatsvinden.

In figuur 5.1 is in de biowasser een klein volume-element getekend met een volume gelijk aan dx·dy·dz.
In het volume-elementje uit figuur 5.1 zit een bepaalde hoeveelheid lucht, water en oppervlaktevergrotend contactmateriaal.
In figuur 5.2 zijn deze hoeveelheden lucht, water en oppervlaktevergrotend contactmateriaal gesommeerd tot één volume-element met lucht, één volume-element met water en één volume-element met oppervlaktevergrotend contactmateriaal.



Figuur 5.2 Schematische weergave van de gesommeerde volume-elementen lucht, water en oppervlaktevergrotend contactmateriaal.

De processen die in het volume-element van figuur 5.2 plaatsvinden, zullen in de volgende paragrafen wiskundig worden beschreven.

5.1 Fysische beschrijving van de overdracht van NH_3 van lucht naar water

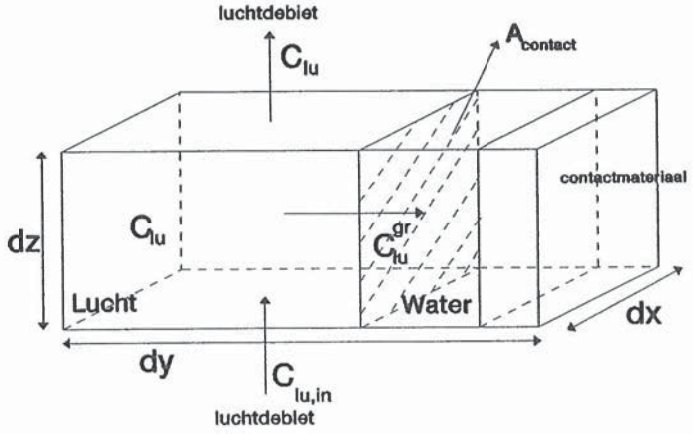
Er wordt aangenomen dat in de biowasser alleen overdracht van NH_3 tussen lucht en water plaatsvindt, volgens de reactie:

$$NH_3(g) \rightarrow NH_3(aq)$$

In bijlage J is dit proces beschreven met behulp van bondgrafen. Met bondgrafen is eenvoudig in te zien hoe het proces verloopt. Hierdoor wordt de fysische modellering van de NH_3-overdracht eenvoudiger. Om de NH_3-overdracht in een biowasser fysisch te beschrijven wordt de NH_3-balans opgesteld van de volume-elementen lucht en water uit figuur 5.2.

5.1.1 NH_3-balans van het volume-element lucht

In figuur 5.3 is te zien welke NH_3-stromen er zijn in het volume-element lucht.
Aan de onderkant van het volume-element lucht stroomt lucht het volume-element binnen met een snelheid ϕ_{lu} en een NH_3-concentratie $C_{in,lu}$. In de bulk van het volume-element lucht heerst een NH_3-concentratie C_{lu}. Vanuit de bulk vindt er convectieve NH_3-overdracht plaats naar het contactoppervlak tussen lucht en water, volgens formule 2.9 uit hoofdstuk 2. Aan de luchtzijde van het contactoppervlak tussen lucht en water heerst een NH_3-concentratie C_{lu}^{gr}. Aan de bovenkant van het volume-element lucht stroomt er lucht naar buiten met een snelheid ϕ_{lu} en een NH_3-concentratie C_{lu}.



Figuur 5.3 Schematische weergave van de NH_3-stromen in het volume-element lucht.

Van het volume-element lucht uit figuur 5.3 wordt de NH_3-balans met als eenheid mol/s opgesteld. Voor de NH_3-balans van het volume-element lucht geldt:

$$\text{opslag} = \text{in} - \text{uit} + \text{produktie}$$

Aangezien er geen NH_3 wordt afgebroken of geproduceerd in het volume-element lucht is de produktieterm gelijk aan nul. De NH_3-balans van het volume-element lucht wordt dan:

opslag = in - uit

In formulevorm is de NH_3-balans van het volume-element lucht gelijk aan:

$$V_{lu} \cdot \frac{dC_{lu}}{dt} = \phi_{lu} \cdot C_{in,lu} - \left(\phi_{lu} \cdot C_{lu} + A_{contact} \cdot N_{lu \rightarrow wa}\right) \qquad (5.1)$$

Met: V_{lu} is het volume van het volume-element lucht in m^3
C_{lu} is de NH_3-concentratie in de bulk van het volume-element lucht in mol/m^3
t is de tijd in s
ϕ_{lu} is het luchtdebiet in m^3/s
$C_{in,lu}$ is de NH_3-concentratie die het volume-element lucht ingaat in mol/m^3
$A_{contact}$ is het contactoppervlak waarover de overdracht van NH_3 tussen lucht en water plaatsvindt in m^2
$N_{lu \rightarrow wa}$ is de de stofstroomdichtheid van NH_3 tussen lucht en water in $mol/m^2 \cdot s$

Alle termen uit vergelijking 5.1 worden gedeeld door het totale volume van het gehele volume-element V_{tot} uit figuur 5.3.

De NH_3-balans van het volume-element lucht is dan gelijk aan:

$$\frac{V_{lu}}{V_{tot}} \cdot \frac{dC_{lu}}{dt} = \frac{\phi_{lu}}{V_{tot}} \cdot (C_{in,lu} - C_{lu}) - \frac{A_{contact} \cdot N_{lu \rightarrow wa}}{V_{tot}} \qquad (5.2)$$

Met: V_{tot} is het totale volume van het gehele volume-element in m^3 (ofwel $V_{tot} = dx \cdot dy \cdot dz$)

De term $A_{contact}/V_{tot}$ uit vergelijking 5.2 wordt het specifieke contactoppervlak, A_{spec}, van het gehele volume-element $dx \cdot dy \cdot dz$ genoemd. Als A_{spec} wordt ingevuld in vergelijking 5.2, dan wordt de NH_3-balans van het volume-element lucht gelijk aan:

$$\frac{V_{lu}}{V_{tot}} \cdot \frac{dC_{lu}}{dt} = \frac{\phi_{lu}}{V_{tot}} \cdot (C_{in,lu} - C_{lu}) - A_{spec} \cdot N_{lu \rightarrow wa} \qquad (5.3)$$

Met: A_{spec} is het specifieke contactoppervlak van het gehele volume-element in m^2/m^3

Alle termen uit vergelijking 5.3 worden vermenigvuldigd met V_{tot}/V_{lu} ($= 1/\epsilon_{lu}$). De NH_3-balans van het volume-element lucht is nu gelijk aan:

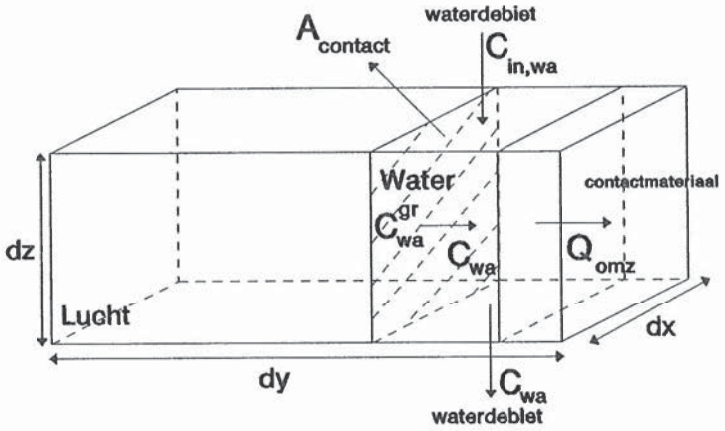
$$\frac{dC_{lu}}{dt} = \frac{\phi_{lu}}{V_{lu}} \cdot (C_{in,lu} - C_{lu}) - \frac{A_{spec}}{\varepsilon_{lu}} \cdot N_{lu \rightarrow wa} \qquad (5.4)$$

Met: ϵ_{lu} is de luchtporositeit, ofwel de verhouding tussen het volume lucht van het gehele volume-element en het totale volume van het gehele volume-element (-)

5.1.2 NH_3-balans van het volume-element water

In figuur 5.4 is te zien welke NH_3-stromen er zijn in het volume-element water.
Aan de bovenkant van het volume-element water stroomt water het volume-element binnen met een snelheid ϕ_{wa} en een NH_3-concentratie $C_{in,wa}$. In de bulk van het volume-element water heerst een NH_3-

concentratie C_{wa}. Aan de waterzijde van het contactoppervlak tussen lucht en water heerst de NH_3-concentratie C_{wa}^{gr}. Vanuit het contactoppervlak tussen lucht en water vindt er convectieve NH_3-overdracht plaats naar de bulk water toe, volgens formule 2.9 uit hoofdstuk 2. Aan de onderkant van het volume-element water stroomt er water naar buiten met een snelheid ϕ_{wa} en een NH_3-concentratie C_{wa}. In het volume-element water wordt $NH_3(aq)$ omgezet naar NH_4^+, NO_2^- en NO_3^- met een snelheid Q_{omz}.



Figuur 5.4 Schematische weergave van de NH_3-stromen in het volume-element water.

Van het volume-element water uit figuur 5.4 wordt een NH_3-balans met als eenheid mol/s opgesteld. Voor de NH_3-balans van het volume-element water geldt:

opslag = in - uit + produktie

In het volume-element water wordt NH_3 omgezet in NH_4^+, NO_2^- en NO_3^-, er is dus sprake van een negatieve produktie van NH_3.

In formulevorm is de NH_3-balans van het volume-element water gelijk aan:

$$V_{wa} \cdot \frac{dC_{wa}}{dt} = \phi_{wa} \cdot C_{in,wa} - \phi_{wa} \cdot C_{wa} + A_{contact} \cdot N_{lu \to wa} - Q_{am} \qquad (5.5)$$

Met: V_{wa} is het volume van het volume-element water in m^3
C_{wa} is de NH_3-concentratie in de bulk van het volume-element water in mol/m^3
t is de tijd in s
ϕ_{wa} is het waterdebiet in m^3/s
$C_{in,wa}$ is de NH_3-concentratie die het volume-element water ingaat in mol/m^3
$A_{contact}$ is het contactoppervlak waarover de overdracht van NH_3 tussen lucht en water plaatsvindt in m^2
$N_{lu \to wa}$ is de stofstroomdichtheid van NH_3 tussen lucht en water in mol $N/m^3 \cdot s$
Q_{am} is de omzetting in het volume-element water van NH_3 naar andere stoffen in mol/s

Alle termen van vergelijking 5.5 worden gedeeld door het totale volume V_{tot} van het gehele volume-element uit figuur 5.4. De NH_3-balans van het volume-element water is dan gelijk aan:

$$\frac{V_{wa}}{V_{tot}} \cdot \frac{dC_{wa}}{dt} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{tot}} \cdot (C_{in,wa} - C_{wa}) + \frac{A_{contact}}{V_{tot}} \cdot N_{lu \rightarrow wa}) - \frac{Q_{am}}{V_{tot}} \qquad (5.6)$$

Met: V_{tot} is het totale volume van het gehele volume-element in m^3 (ofwel $V_{tot} = dx \cdot dy \cdot dz$)

De term $A_{contact}/V_{tot}$ uit vergelijking 5.6 wordt het specifieke contactoppervlak, A_{spec}, van het gehele volume-element dx·dy·dz genoemd. Als A_{spec} ingevuld wordt in vergelijking 5.6, dan wordt de NH_3-balans van het volume-element water gelijk aan:

$$\frac{V_{wa}}{V_{tot}} \cdot \frac{dC_{wa}}{dt} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{tot}} \cdot (C_{in,wa} - C_{wa}) + A_{spec} \cdot N_{lu \rightarrow wa} - \frac{Q_{am}}{V_{tot}} \qquad (5.7)$$

Alle termen van vergelijking 5.7 worden vermenigvuldigd met V_{tot}/V_{wa} ($= 1/\epsilon_{wa}$). De NH_3-balans van het volume-element water is nu gelijk aan:

$$\frac{dC_{wa}}{dt} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{wa}} \cdot (C_{in,wa} - C_{wa}) + \frac{A_{spec}}{\varepsilon_{wa}} \cdot N_{lu \rightarrow wa} - \frac{Q_{am}}{V_{wa}} \qquad (5.8)$$

Met: ϵ_{wa} is de waterporositeit, ofwel de verhouding tussen het volume water van het gehele volume-element en het totale volume van het gehele volume-element (-)

De term Q_{am}/V_{wa} wordt de specifieke omzetting Q_{spec} in de waterfase genoemd. Als deze term ingevuld wordt in vergelijking 5.8, dan wordt de NH_3-balans van het volume-element water gelijk aan:

$$\frac{dC_{wa}}{dt} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{wa}} \cdot (C_{in,wa} - C_{wa}) + \frac{A_{spec}}{\varepsilon_{wa}} \cdot N_{lu \rightarrow wa} - Q_{spec} \qquad (5.9)$$

Met: Q_{spec} is de specifieke omzetting van NH_3 naar andere stoffen in het volume-element water in $mol/(m^3.s)$

5.1.3 Toepassing van de wet van Henry op de NH_3-balans van lucht en water

Het probleem is dat voor de berekening van de NH_3-flux ($N_{lu \rightarrow wa}$) uit vergelijking 5.4 en 5.9 de concentraties aan het contactoppervlak tussen lucht en water bekend moeten zijn. In de meeste situaties zijn de concentraties aan het contactoppervlak tussen lucht en water geen bekende waarden. Met behulp van de wet van Henry kunnen de concentraties aan het contactoppervlak tussen lucht en water aan elkaar worden gerelateerd, zie hoofdstuk 2 en bijlage A.
Als de waterconcentraties nu aan de luchtconcentraties worden gerelateerd, dan geldt:

$$N_{lu \rightarrow wa} = \left(\frac{1}{H_{am} \cdot k_{lu}} + \frac{1}{k_{wa}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{C_{lu}}{H_{am}} - C_{wa}\right) = k_{lu} \cdot (C_{lu} - H \cdot C_{wa}) \quad (5.10)$$

Als vergelijking 5.10 ingevuld wordt in vergelijking 5.4, dan wordt de NH_3-balans van het volume-element lucht gelijk aan:
Als vergelijking 5.10 ingevuld wordt in vergelijking 5.9, dan wordt de NH_3-balans van het volume-

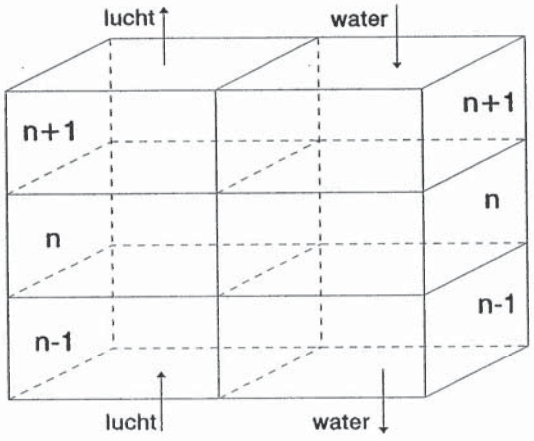
$$\frac{dC_{lu}}{dt} = \frac{\Phi_{lu}}{V_{lu}} \cdot (C_{in,lu} - C_{lu}) - \frac{A_{spec}}{\varepsilon_{lu}} \cdot \left(\frac{1}{H_{am} \cdot k_{lu}} + \frac{1}{k_{wa}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{C_{lu}}{H_{am}} - C_{wa}\right) \qquad (5.11)$$

element water gelijk aan:

$$\frac{dC_{wa}}{dt} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{wa}} \cdot (C_{in,wa} - C_{wa}) + \frac{A_{spec}}{\varepsilon_{wa}} \cdot \left(\frac{C_{lu}}{H_{am}} - C_{wa}\right) \cdot \left(\frac{1}{H_{am} \cdot k_{lu}} + \frac{1}{k_{wa}}\right)^{-1} - Q_{spec} \qquad (5.12)$$

5.1.4 *Discretiseren van de NH_3-balans van lucht en water met Euler-Forward*

De continue NH_3-overdracht van lucht naar water is met vergelijking 5.11 en 5.12 beschreven voor één volume-element van de biowasser. Om de NH_3-concentraties van lucht en water in dit volume-element te kunnen berekenen worden deze vergelijkingen met Euler-Forward gediscretiseerd. In bijlage K is de discretisatie-methode Euler-Forward beschreven. De discretisatie wordt uitgevoerd volgens het schema dat in figuur 5.5 getekend is.



Figuur 5.5 Discretisatieschema voor volume-elementen van de biowasser.

Een biowasser is opgebouwd uit een aantal volume-elementen lucht en water. Er wordt verondersteld dat op een bepaalde hoogte z de NH_3-concentraties in lucht en water in de x- en y-richting gelijke waarden hebben. De NH_3-concentraties in lucht en water variëren dus alleen met de hoogte z. De biowasser wordt dus verdeeld in volume-elementen die een zelfde oppervlak hebben als de biowasser. Het aantal volume-elementen is afhankelijk van het aantal lagen waarin de biowasser wordt verdeeld. Tevens variëren de NH_3-concentraties in lucht en water met de tijd. Dit betekent dat de vergelijkingen 5.11 en 5.12 tijds- en plaatsafhankelijk (in de z-richting) zijn. De vergelijkingen zullen dus naar de plaats met de teller n worden gediscretiseerd en naar de tijd met de teller i worden gediscretiseerd. In eerste instantie worden alle andere parameters constant in de tijd verondersteld.

De met Euler-Forward gediscretiseerde NH_3-balans van het volume-element lucht (vergelijking 5.11) wordt dus:

$$\frac{C_{lu,n,i+1} - C_{lu,n,i}}{\Delta t} = \frac{\Phi_{lu}}{V_{lu}} \cdot (C_{lu,n-1,i} - C_{lu,n,i}) - \frac{A_{spec} \cdot K_{tot,wa}}{\varepsilon_{lu}} \cdot \left(\frac{C_{lu,n,i}}{H_{am}} - C_{wa,n,i} \right) \tag{5.13}$$

Ofwel:

$$C_{lu,n,i+1} = C_{lu,n,i} \cdot \left(1 - \frac{\Phi_{lu} \cdot \Delta t}{V_{lu}} - \frac{A_{spec} \cdot \Delta t \cdot K_{tot,wa}}{H_{am} \cdot \varepsilon_{lu}} \right) + C_{lu,n-1,i} \cdot \left(\frac{\Phi_{lu} \cdot \Delta t}{V_{lu}} \right) + C_{wa,n,i} \cdot \left(\frac{A_{spec} \cdot \Delta t \cdot K_{tot,wa}}{\varepsilon_{lu}} \right) \tag{5.14}$$

De met Euler-Forward gediscretiseerde NH_3-balans van het volume-element water (vergelijking 5.12) wordt dus:

$$\frac{C_{wa,n,i+1} - C_{wa,n,i}}{\Delta t} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{wa}} \cdot (C_{wa,n+1,i} - C_{wa,n,i}) + \frac{A_{spec} \cdot K_{tot,wa}}{\varepsilon_{wa}} \cdot \left(\frac{C_{lu,n,i}}{H_{am}} - C_{wa,n,i} \right) - Q_{spec} \tag{5.15}$$

Ofwel:

$$C_{wa,n,i+1} = C_{wa,n,i} \cdot \left(1 - \frac{\Phi_{wa} \cdot \Delta t}{V_{wa}} - \frac{A_{spec} \cdot \Delta t \cdot K_{tot,wa}}{\varepsilon_{wa}} \right) + C_{wa,n+1,i} \cdot \left(\frac{\Phi_{wa} \cdot \Delta t}{V_{wa}} \right) + C_{lu,n,i} \cdot \left(\frac{A_{spec} \cdot \Delta t \cdot K_{tot,wa}}{H_{am} \cdot \varepsilon_{wa}} \right) - Q_{spec} \cdot \Delta t \tag{5.16}$$

Voor het simuleren van het absorptieproces wordt de specifieke omzetting gelijk aan nul gesteld.

5.1.5 *Het bepalen van de tijdsconstantes van het absorptieproces*

Zowel de NH_3-balans over het luchtdeel als die van het waterdeel zijn eerste orde differentiaalvergelijkingen van de vorm:

$$a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y = b \cdot f(t) \tag{5.17}$$

Met f(t) is de inputfunctie. Als a_0 niet gelijk is aan nul dan geldt:

$$\frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{dy}{dt} + y = \frac{b}{a_0} \cdot f(t) \tag{5.18}$$

Vergelijking 5.18 kan geschreven worden als:

$$\tau_p \cdot \frac{dy}{dt} + y = K_p \cdot f(t) \tag{5.19}$$

Met τ_p is de tijdsconstante van dit proces en K_p is de statische versterking van dit proces.

Op dezelfde manier als hierboven gedaan is kan worden afgeleid dat de absorptie van NH_3 van lucht naar water vier tijdsconstantes heeft. De eerste tijdsconstante $\tau_{1,lu}$ voor lucht is gelijk aan:

$$\tau_{1,lu} = \frac{V_{lu}}{\phi_{lu}} \tag{5.20}$$

De tweede tijdsconstante voor lucht, $\tau_{2,lu}$, is gelijk aan:

$$\tau_{2,lu} = \frac{H_{am} \cdot \varepsilon_{lu}}{A_{spec} \cdot k_{tot,wa}} \tag{5.21}$$

De eerste tijdsconstante voor water, $\tau_{1,wa}$, is gelijk aan:

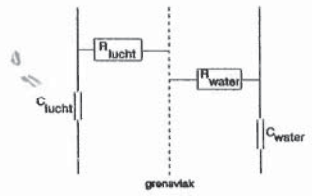
$$\tau_{1,wa} = \frac{V_{wa}}{\phi_{wa}} \tag{5.22}$$

De tweede tijdsconstante voor water, $\tau_{2,wa}$, is gelijk aan:

$$\tau_{2,wa} = \frac{\varepsilon_{wa}}{A_{spec} \cdot k_{tot,wa}} \tag{5.23}$$

De tijdsconstanten uit formule 5.20 en 5.22 kunnen gezien worden als een maat voor de capaciteit C, ofwel de opslag. De tijdsconstanten uit formule 5.21 en 5.23 worden gezien als maat voor de weerstandswaarden R van de stofoverdracht, dit zijn namelijk de reciproken van de stofoverdrachtscoëfficiënt. Daarom worden tijdsconstanten ook wel RC-waarden genoemd. In figuur 5.6 is de betekenis van de tijdsconstanten schematisch weergegeven.

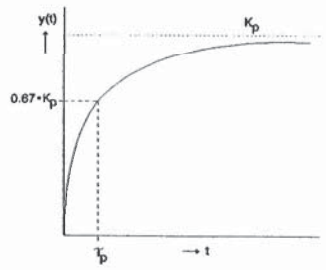
Een tijdsconstante geeft aan hoe snel een eerste orde differentiaalvergelijking reageert op een stap van de inputfunctie. Des te kleiner de tijdsconstante τ_p uit formule 5.19 is, des te beter de outputfunctie y de stap volgt, dit is weergegeven in figuur 5.7.



Figuur 5.6 Schematische weergave van de tijdsconstanten.

Als de tijdsconstante τ_p dus heel klein is wil dit zeggen dat de outputfunctie de stap van de inputfunctie meteen volgt. De outputfunctie y uit formule 5.17 reageert dus lineair op de inputfunctie f(t). Dit betekent dat a_1 uit formule 5.17 dus gelijk aan nul kan worden gesteld. Er wordt wel gezegd dat de differentiaalvergelijking algebraïsch opgelost wordt, er geldt:

$$a_0 y = b f(t) \qquad (5.24)$$



Figuur 5.7 Stapresponsie van een eerste orde differentiaalvergelijking.

Tijdens de simulaties van de absorptie van NH_3 van lucht naar water bleek $\tau_{1,lu}$ klein te zijn ten opzichte van de andere tijdsconstanten. De differentiaalvergelijking over het luchtdeel (5.1) kan dus ook algebraïsch worden opgelost. Er geldt dan:

$$0 = \Phi_{lu} \cdot C_{in,lu} - \Phi_{lu} \cdot C_{lu}(t) - A_{contact} \cdot N''_{lu\text{-}wa} \qquad (5.25)$$

Het algebraïsch maken van de luchtvergelijking kan schematisch weergegeven worden door de capaciteit van de lucht uit figuur 5.6 te verwijderen.
Voor de concentratie NH_3 in de lucht geldt dan:

$$C_{lu}(t) = \frac{\Phi_{lu}}{\left(\Phi_{lu} + \frac{A_{spec} \cdot V_{tot} \cdot K_{tot,wa}}{H_{am}}\right)} \cdot C_{in,lu} + \left(\frac{\frac{A_{spec} \cdot V_{tot} \cdot K_{tot,wa}}{H_{am}}}{\Phi_{lu} + \frac{A_{spec} \cdot V_{tot} \cdot K_{tot,wa}}{H_{am}}}\right) \cdot C_{wa}(t) \qquad (5.26)$$

In het vervolg van dit verslag wordt de overdracht van NH_3 in het volumedeel lucht dus weergegeven door vergelijking 5.26.

Een ander kenmerk van de tijdsconstante is, zoals aangegeven is in figuur 5.7, dat na het verstrijken van één keer de tijdsconstante ongeveer 67% van de eindwaarde bereikt wordt. De filosofie is dat na circa 5 keer het verstrijken van de tijdsconstante de eindwaarde bereikt is en het systeem dus in evenwicht is. Als er meerdere tijdsconstanten zijn dan is het systeem in evenwicht na 5 maal het verstrijken van de grootste tijdsconstante (Stephanopoulos, 1984).

5.2 Fysische beschrijving van de absorptie van NH_3 van lucht naar water met het optreden van dissociatie

Bij het optreden van absortpie met dissociatie blijft de situatie in de lucht gelijk, zoals beschreven is in paragraaf 2.4. Als er dissociatie optreedt dan verandert volgens paragraaf 2.4 de verdelingscoëfficiënt H_{am} in H_{aNtot} door formule 2.36 toe te passen. Tevens geeft de balans van vergelijking 5.12 niet langer de concentraties NH_3 in water aan, maar de concentratie van NH_3 en NH_4^+ in het water, C_{aNtot}.

De balans voor het volumedeel water wordt dus:

$$\frac{dC_{aNtot}}{dt} = \frac{\Phi_{wa}}{V_{wa}} \cdot (C_{in,aNtot} - C_{aNtot}) + \frac{A_{spec} \cdot k_{tot,wa}}{\varepsilon_{wa}} \cdot (\frac{C_{lu}}{H_{aNtot}} - C_{aNtot}) - Q_{spec} \qquad (5.27)$$

De concentratie NH_4^+ in C_{aNtot} kan berekend worden door formule E9 uit bijlage E toe te passen.

5.3 Modelleren van de nitrificatie in het fysisch model van absorptie en dissociatie

In het waterdeel van figuur 5.4 bevindt zich een biofilm waarop nitrificerende bacteriën groeien. Normaal gesproken diffundeert NH_4^+ vanuit water de biofilm in waarna het omgezet wordt naar NO_2^- en NO_3^-, die op hun beurt de biofilm weer uit diffunderen. Bij het modelleren van de nitrificatie is aangenomen dat in het water en in de biofilm dezelfde concentraties aan NH_4^+, NO_2^- en NO_3^- heersen. Verder wordt aangenomen dat er een constante hoeveelheid biomassa aanwezig is op het pakkingsmateriaal, ofwel in het water, waardoor de netto groei van de biomassa dus nul verondersteld kan worden. De substraatconsumptiesnelheid van de bacteriën is dan gelijk aan de hoeveelheid substraat die nodig is voor het onderhoud van de biomassa. Deze substraatconsumptiesnelheid wordt beschreven door een gedeelte over te nemen uit formule 2.43 uit het proefschrift van Hunik (1993). De laatste aanname die wordt gedaan is het feit dat de nitrificatie alleen plaatsvindt in de actieve biofilm. Er vindt dus geen nitrificatie plaats door gesuspendeerde bacteriën in het water van bijvoorbeeld het reservoir.

5.3.1 Modelleren van het onderhoud van Nitrosomonas

De ammoniumconsumptiesnelheid van Nitrosomonas is gelijk aan:

$$Q_{am}(t) = m_s^{Ns} \cdot X^{Ns} \left(\frac{C_{am}(t)}{K_s^{Ns} + C_{am}(t)} \right) \cdot V_{biofilm} \qquad (5.28)$$

Met: $V_{biofilm}$ is het volume van de actieve biofilm in m^3
C_{am} is de concentratie NH_4^+ in het water in mol N/m^3

Aangenomen is dat onder de omstandigheden die in de biowasser heersen de consumptiesnelheid van Nitrosomonas alleen geremd wordt door de pH, het substraat en de temperatuur. De remming door het substraat zit al opgesloten in formule 5.28.
De remming van Nitrosomonas door de pH komt tot uiting in de verandering van de verzadigingsconstante K_s^{Ns}, er geldt volgens Hunik (1993) in het pH-gebied 6.5 - 8.5:

$$K_s^{Ns} = K_s^{Ns,0} \left[\frac{1}{1 + \frac{10^{-pH}}{K_{mo}^{Ns}}} \right] \left[1 + \frac{10^{-pH} \cdot K_b}{K_w} \right] \qquad (5.29)$$

Met: $K_s^{Ns,0}$ is de pH-onafhankelijke verzadigingsconstante in mol NH_4^+/m^3
K_{mo}^{Ns} geeft het zuur-base evenwicht aan van Nitrosomonas in mol/l

De remming van de temperatuur wordt aangegeven door de waarden van m_s^{Ns} en K_s^{Ns} te variëren, zie hoofdstuk 7 (Hunik, 1993).

5.3.2 *Modelleren van het onderhoud van Nitrobacter*

Op dezelfde manier als voor Nitrosomonas wordt de consumptiesnelheid van nitriet door Nitrobacter gemodelleerd. Echter bij het beschrijven van de remming van de consumptiesnelheid van Nitrobacter wordt aangenomen dat Nitrobacter geremd wordt door pH, substraten, temperatuur en het produkt nitraat. De nitrietconsumptiesnelheid Q_{et} van Nitrobacter is dan gelijk aan:

$$Q_{et}(t) = m_s^{Nb} \cdot X^{Nb} \left(\frac{C_{et}(t)}{(K_s^{Nb} + C_{et}(t)) \cdot K_I} \right) \cdot V_{biofilm} \tag{5.30}$$

Met: Q_{et} is de consumptiesnelheid van nitriet in mol N/s
C_{et} is de concentratie van nitriet in het water in mol N/m^3

De remmingsconstante K_I ziet er volgens Hunik (1993) als volgt uit:

$$K_I = \left[1 + \frac{C_{et}(t)}{I_{et}} \right] \left[1 + \frac{C_{at}(t)}{I_{at}} \right] \tag{5.31}$$

Met: C_{at} is de concentratie van nitraat in het water in mol N/m^3.

De remming van Nitrobacter door de pH in het bereik 6.5 - 8.5 wordt volgens Hunik (1993) gegeven door:

$$K_s^{Nb} = K_s^{Nb,0} \left[1 + K_{mo}^{Nb} \cdot 10^{pH} \right] \tag{5.32}$$

Met: $K_s^{Nb,0}$ is de pH-onafhankelijke verzadigingsconstante in mol N/m^3
K_{mo}^{Nb} geeft het zuur-base evenwicht van Nitrobacter aan in mol/l

De remming van de consumptiesnelheid van Nitrobacter door de temperatuur komt tot uiting in het veranderen van de waarden van de parameters m_s^{Nb} en K_s^{Nb}, zie hoofdstuk 7 (Hunik, 1993).

5.3.3 *Het opstellen van de ammonium-, nitriet- en de nitraatbalans in water*

De ammonium-balans wordt weergegeven door vergelijking 5.27, deze vergelijking geeft namelijk de concentratie NH_3 en NH_4^+ weer. De term Q_{spec} is gelijk aan Q_{am} uit formule 5.28 gedeeld door het volume van het water V_{wa}, ofwel:

$$Q_{spec} = Q_{am} \cdot V_{wa} \tag{5.33}$$

Voor het nitriet in water kan de volgende balans worden opgesteld:

opslag = in - uit + produktie - afbraak

In formulevorm ziet de balans er als volgt uit:

$$V_{wa} \cdot \frac{dC_{et}}{dt} = \Phi_{wa} \cdot C_{et,in} - \Phi_{wa} \cdot C_{et} + \frac{Q_{am}}{V_{wa}} - \frac{Q_{et}}{V_{wa}} \qquad (5.34)$$

Voor nitraat in water geldt de volgende balans:

opslag = in - uit + produktie

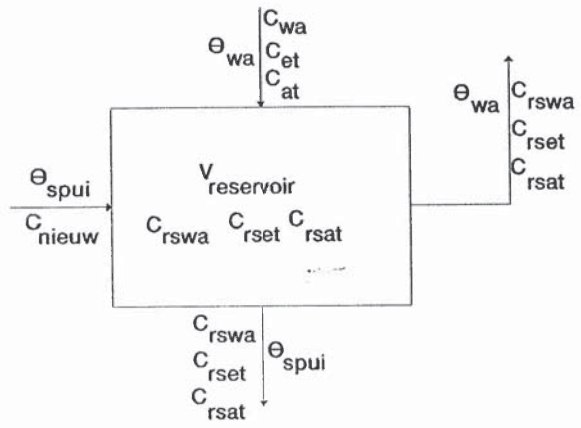
In formulevorm is deze balans als volgt weer te geven:

$$V_{wa} \cdot \frac{dC_{at}}{dt} = \Phi_{wa} \cdot C_{et,in} - \Phi_{wa} \cdot C_{et} + \frac{Q_{et}}{V_{wa}} \qquad (5.35)$$

Als vergelijking 5.27, 5.34 en 5.35 gediscretiseerd worden met Euler-Forward dan kunnen deze opgenomen worden in het totale model.

5.4 Modelleren van het reservoir

Onder de biowasser is vaak een reservoir opgesteld, waarin het water uit de wassectie terechtkomt. Uit dit reservoir wordt een gedeelte van het water ververst en een gedeelte wordt teruggevoerd naar de wassectie. In het reservoir vindt dus een netto opslag van water uit de wassectie plaats. In figuur 5.8 zijn de in- en uitgaande stikstofstromen van het reservoir weergegeven.



Figuur 5.8 Schematische weergave van de in- en uitgaande N-stromen in het reservoir.

In figuur 5.8 worden met C_{rswa}, C_{rset} en C_{rsat} respectievelijk de concentraties van NH_4^+ en NH_3, NO_2^- en NO_3^- bedoeld die in het reservoir heersen. Deze concentraties worden ook wel de spuiwaterconcentraties genoemd. Er wordt aangenomen dat het reservoir volledig gemengd is en dat de spuiwaterconcentraties in het gehele reservoir constant zijn. Tevens wordt aangenomen dat in de verversingsstroom geen stikstof aanwezig is, deze concentratie kan dus gelijk aan nul worden gesteld.

Over het reservoir uit figuur 5.8 kan een balans worden opgesteld voor bijvoorbeeld de concentratie NH_4^+ en NH_3, er geldt:

$$V_{rs} \cdot \frac{dC_{rswa}}{dt} = \Phi_{wa} \cdot C_{wa} - \Phi_{wa} \cdot C_{rswa} - \Phi_{spui} \cdot C_{rswa} \qquad (5.36)$$

Met: V_{rs} is het volume van het reservoir in m^3

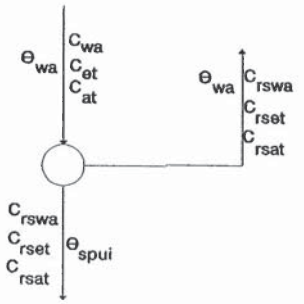
Door de C_{rswa} en C_{wa} te vervangen door bijvoorbeeld C_{rset} en C_{et} wordt de balans van nitriet in het reservoir opgesteld.
Uit vergelijking 5.36 blijkt dat deze eerste orde differentiaalvergelijking twee tijdsconstantes heeft, namelijk $\tau_{1,rs}$ is gelijk aan:

$$\tau_{1,rs} = \frac{V_{rs}}{\Phi_{wa}} \tag{5.37}$$

De tweede tijdsconstante is gelijk aan $\tau_{2,rs}$:

$$\tau_{2,rs} = \frac{V_{rs}}{\Phi_{spui}} \tag{5.38}$$

Uit formule 5.38 blijkt dat als het spuidebiet klein is de tweede tijdsconstante erg groot wordt, het duurt dus lang voordat het systeem in evenwicht is. Het bereiken van het evenwicht duurt zo lang omdat het reservoir een grote buffercapaciteit heeft.
Om ervoor te zorgen dat in het model het evenwicht sneller bereikt wordt is er voor gekozen om net te doen alsof het reservoir oneindig klein is, zie figuur 5.9.



Figuur 5.9 *Schematische weergave van de in- en uitgaande N-stromen in een oneindig klein reservoir.*

Als voor figuur 5.9 de balans wordt opgesteld voor de concentraties aan NH_4^+ en NH_3 in het reservoir, dan geldt:

$$\Phi_{wa} \cdot C_{wa} = \Phi_{spui} \cdot C_{rswa} + \Phi_{wa} \cdot C_{rswa} \tag{5.39}$$

De concentratie NH_4^+ en NH_3 in het reservoir, C_{rswa}, is dus gelijk aan:

$$C_{rswa}(t) = \frac{\Phi_{wa}}{\Phi_{wa} + \Phi_{spui}} \cdot C_{wa}(t) \tag{5.40}$$

De concentratie van NH_4^+ en NH_3 in het reservoir is dus te zien als een percentage van de concentratie van NH_4^+ en NH_3 in het water dat uit de wassectie komt.
De concentratie aan NH_4^+ en NH_3 die de wassectie binnengaat is ook nu nog steeds gelijk aan de concentratie van NH_4^+ en NH_3 in het reservoir, C_{rswa}. Uit formule 5.40 blijkt dat als ϕ_{spui} groot wordt

de concentratie van NH_4^+ en NH_3 in het reservoir een kleiner gedeelte worden van de concentraties van NH_3 en NH_4^+ die in het waswater heersen.
Voor de concentraties van NO_2^- en NO_3^- in het reservoir kunnen op dezelfde manier als vergelijking 5.40 worden opgesteld.
Als vergelijking 5.40 gediscretiseerd wordt volgens Euler-Forward dan kan deze opgenomen worden in het definitieve model.

5.5 Definitieve model "BIOWAS"

De modellen voor absorptie, dissociatie, nitrificatie en het reservoir worden samengevat in het model "BIOWAS". De parameters die nodig zijn voor de berekening van C_{lu}, C_{wa}, C_{et}, C_{at}, C_{rswa}, C_{rset}, C_{rsat}, Q_{am} en Q_{et} zullen in de volgende paragrafen bij iedere simulatie vermeld worden.
In het model BIOWAS zijn de relaties die gebruikt worden voor k_{lu}, k_{wa}, H_{aNtot} en K_b dezelfde relaties die gebruikt zijn in hoofdstuk 2.
In bijlage L staat de implementatie van het model BIOWAS in Matlab vermeld, als de wassectie van de biowasser in drie lagen verdeeld wordt.
In tabel 5.1 staan de parameters vermeld die het model BIOWAS nodig heeft als inputwaarden. Tevens staat in tabel 5.1 vermeld welke outputs het model BIOWAS na simulatie geeft.

Tabel 5.1 Inputs en outputs van het model BIOWAS

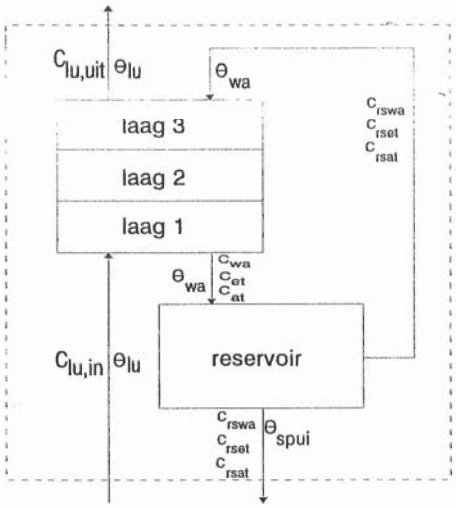
	Parameters
Model-inputs	Θ_{lu}, Θ_{wa}, pH, T, k_{lu}, k_{wa}, H_{aNtot}, X^m, m_s^m, $K_s^{i,m}$, K_I, $C_{lu}(0)$, $C_{wa}(0)$, $C_{et}(0)$, $C_{at}(0)$, $C_{rswa}(0)$, $C_{rset}(0)$, $C_{rsat}(0)$, AT (= aantal tijdstappen), dt (= tijdstap)
Model-outputs	$C_{lu}(AT)$, $C_{wa}(AT)$, $C_{et}(AT)$, $C_{at}(AT)$, $C_{rswa}(AT)$, $C_{rset}(AT)$, $C_{rsat}(AT)$

6 VALIDATIE VAN HET MODEL BIOWAS

Elk model dat gemaakt wordt is slechts een beschrijving van de werkelijkheid. Het is dus noodzakelijk om te testen hoe goed het model de werkelijkheid benadert, dit wordt validatie genoemd.

6.1 Methode van validatie

Het model BIOWAS beschrijft de processen absorptie, dissociatie en nitrificatie in de biowasser, tevens is het spuien van water in dit model meegenomen. In figuur 6.1 is de situatie die het model BIOWAS beschrijft weergegeven. Aangenomen wordt dat in elke lucht- en waterlaag dezelfde omstandigheden heersen. Er zijn alleen verschillen in N-concentratie waar te nemen tussen de verschillende lagen. De uitgaande luchtconcentratie is gelijk aan de NH_3-concentratie die heerst in luchtlaag 3 en de spuiwaterconcentraties worden weergegeven door C_{rswa} , C_{rset}, en C_{rsat}.



Figuur 6.1 Schematische weergave van de situatie die door het model BIOWAS gesimuleerd wordt

De stippellijn in figuur 6.1 geeft de grens van het systeem aan. Op deze grens kunnen de ingaande en de uitgaande stikstofstromen met elkaar vergeleken worden. In een evenwichtsituatie zijn deze twee stromen aan elkaar gelijk, dan moet gelden:

$$\phi_{lu} \cdot C_{lu,in} = \phi_{lu} \cdot C_{lu,uit} + \phi_{spui} \cdot (C_{rswa} + C_{rset} + C_{rsat}) \qquad (6.1)$$

In woorden betekent formule 6.1 dat de hoeveelheid stikstof die verwijderd is uit de lucht terug te vinden moet zijn in de hoeveelheid stikstof die in het spuiwater aanwezig is.
Het model BIOWAS is in staat om, bij luchtdebiet, waterdebiet, spuidebiet, pH, temperatuur en een gegeven ingaande NH_3-concentratie in de lucht, uit te rekenen wat de concentraties NH_4-N, NO_2-N en NO_3-N in het spuiwater zijn. Voor deze berekening wordt verondersteld dat er een constante hoeveelheid biomassa aanwezig is die nitrificeert.
Tijdens het project PROPRO zijn tegenstroomwassers van de firma Mattheus gevolgd tijdens een periode van ruim een jaar. Tijdens dit onderzoek zijn de gegevens die nodig zijn voor het model BIOWAS tweewekelijks gemeten. Er wordt verondersteld dat de gemiddelde waarden uit deze dataset de evenwichtssituatie nabootsen. In tabel 6.1 zijn deze gemiddelde waarden van het project PROPRO weergegeven voor een BTW-6.

Tabel 6.1 *Gemiddelde gegevens uit het project PROPRO.*

parameter	gemiddelde waarde	dimensie
ϕ_{lu}	0.7711	m^3/s
$C_{lu,in}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	mol N/m^3
$C_{lu,uit}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	mol N/m^3
rendement	75.7	%
ϕ_{spui}	$2.67 \cdot 10^{-6}$	m^3/s
C_{rswa} (NH_4-N)	53.3	mol N/m^3
C_{rset} (NO_2-N)	45.9	mol N/m^3
C_{rsat} (NO_3-N)	13.8	mol N/m^3
pH	7.3	-
Temperatuur waswater	14.6	°C
W.C.	3.8	$m^3/m^2 \cdot hr$
pakkingsmateriaal	Telpac 2"	-
D_p	0.143	m
$V_{wassectie}$	0.85	m^3
$H_{wassectie}$	0.75	m

Een snelle rekensom met formule 6.1 leert dat de biowasser uit tabel 6.1 inderdaad in evenwicht verkeerd. De gegevens van deze biowasser kunnen dus als validatie dienen voor het model BIOWAS.
De gegevens van de bacteriën Nitrosomonas en Nitrobacter zijn te vinden in tabel 6.2. De waarden van de verzadigingsconstanten K_s^{Ns} en K_s^{Nb} zijn berekend volgens de formules 5.29 en 5.32. De rest van de constanten voor de bacteriën zijn gelijk aan de waarden die Hunik (1993) gebruikt in zijn proefschrift bij een temperatuur van 30°C.

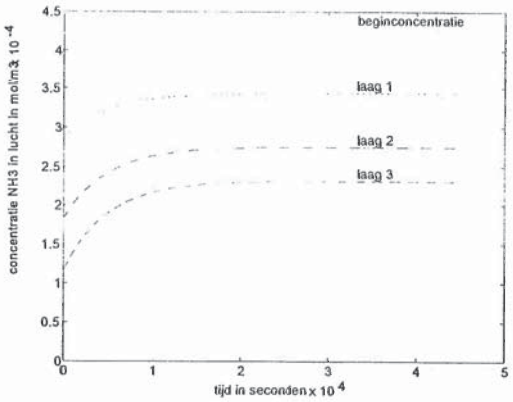
Tabel 6.2 *Gegevens van de bacteriën.*

parameter	waarde tijdens de eerste validatie	dimensie
$K_s^{Ns,0}$	0.04	mol N/m^3
$K_s^{Nb,0}$	0.287	mol N/m^3
m^{Ns}	$9.4 \cdot 10^{-4}$	mol N/kg biomassa·s
m^{Nb}	$2.2 \cdot 10^{-3}$	mol N/kg biomassa·s
K_{mo}^{Ns}	$10^{-6.96}$	mol/l
K_{mo}^{Nb}	$8.04 \cdot 10^{-9}$	mol/l
X^{Ns}	13	kg biomassa/m^3 biofilm
X^{Nb}	6.5	kg biomassa/m^3 biofilm
I_{et}	159	mol N/m^3
I_{at}	188	mol N/m^3
$D_{actieve\ biofilm}$	$300 \cdot 10^{-6}$	m

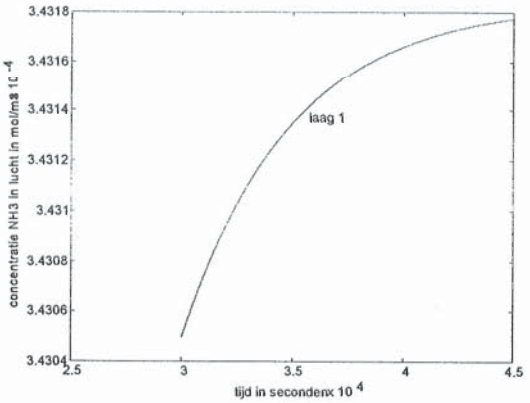
Het genomen aantal tijdstappen is 12000 en de tijdstap bedraagt 4 seconden. Deze tijdstap is niet gelijk aan 1/3 maal de kleinste tijdsconstante, maar een tijdstap die op grond van trial and error is bepaald. Het is namelijk bekend dat bij systemen met kleine en grote tijdsconstanten het simuleren met een te kleine tijdstap geen betrouwbare informatie geeft. Tevens is bekend dat de factor 1/3 maal de kleinste tijdsconstante alleen maar een orde van grootte voor de tijdstap aangeeft (Kettenis, 1990).

6.2 Resultaten van de validatie van het model BIOWAS

De resultaten van de eerste validatierun (validatie a) met de gegevens uit tabel 6.1 en 6.2 zijn te zien in de figuren 6.2 tot en met 6.11.

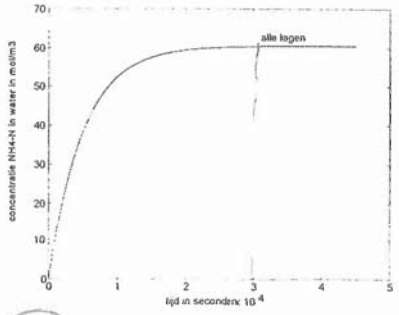


Figuur 6.2 Concentratie van NH3 in lucht tijdens validatie a

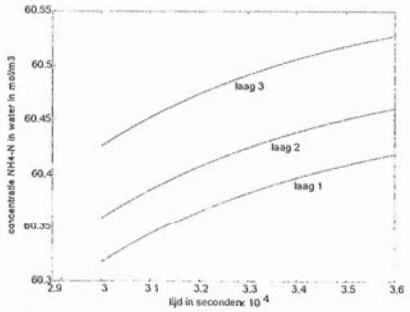


Figuur 6.3 Concentratie van NH3 in luchtlaag 1 tijdens validatie a van 30000 tot 45000 seconden

In figuur 6.2 is te zien dat de NH_3-concentratie in de uitgaande lucht, ofwel laag 3, in evenwicht gelijk is aan $2.32 \cdot 10^{-4}$ mol/m^3. Dit betekent dat de NH_3-reductie tijdens validatie a gelijk was aan 48.6%. In vergelijking met de in de praktijk gemeten NH_3-reductie van 74% is de schatting van het model BIOWAS dus te laag. Alhoewel het in figuur 6.2 lijkt alsof de lucht na circa 30000 seconden in evenwicht is, blijkt uit figuur 6.3 dat de NH_3-concentratie in de lucht nog steeds verandert. Na 12000 tijdstappen is het systeem dus nog niet in evenwicht, daarom is besloten om bij de volgende validatie gedurende 15000 tijdstappen te simuleren.

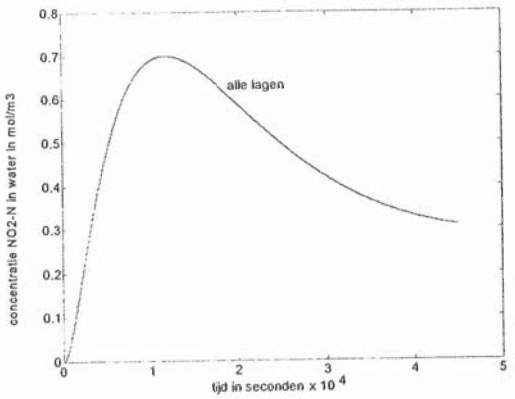


Figuur 6.4 Concentratie NH4-N in water tijdens validatie a

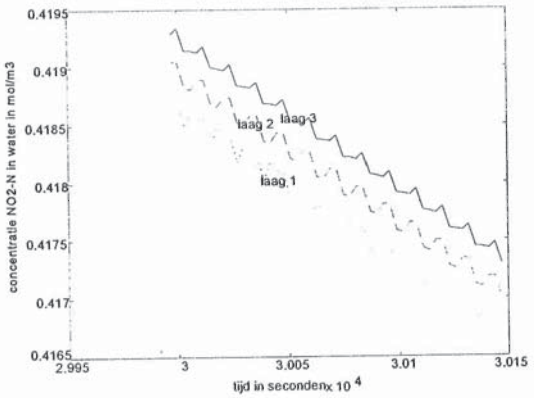


Figuur 6.5 Concentratie van NH4-N in de waterlagen 1, 2 en 3 tijdens validatie a van 30000 tot 36000 seconden

Uit figuur 6.4 blijkt dat de evenwichtsconcentratie van NH_4-N in het spuiwater gelijk is aan 60.4 mol N/m^3. De spuiwaterconcentratie is namelijk bijna gelijk aan de concentratie NH_4-N in waterlaag 3.

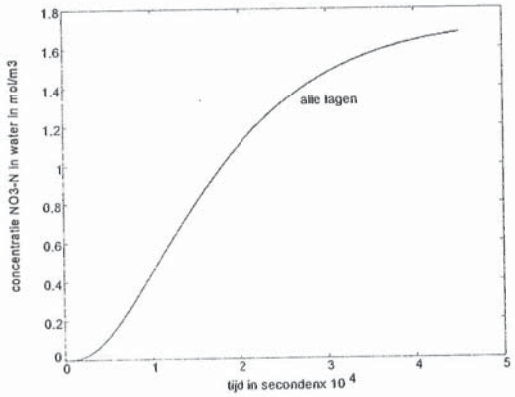


Figuur 6.6 Concentratie NO2-N in het water tijdens validatie a

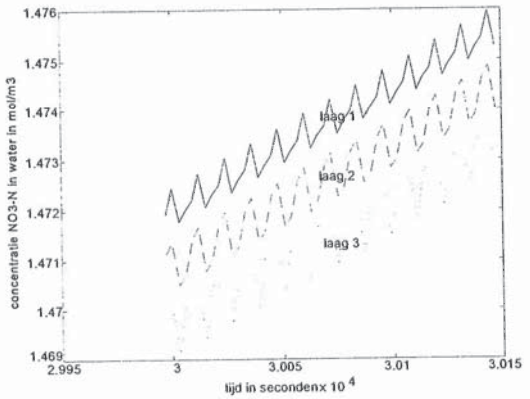


Figuur 6.7 Concentratie NO2-N in het water tijdens validatie a van 30000 tot 30150 seconden

De NO_2-N concentratie in het water stijgt eerst en dit komt onder andere doordat Nitrosomonas dan nog niet zijn maximale consumptiesnelheid heeft bereikt. In figuur 6.7 is te zien dat de concentratie NO_2-N van waarde verandert volgens een zaagtand. Dit komt doordat er telkens nitriet wordt aangevoerd en daarna afgebroken wordt.
De concentratie van NO_2-N in het spuiwater is gelijk aan 0.31 mol N/m^3 en dit is dus een veel lagere waarde dan tabel 6.1 geeft.

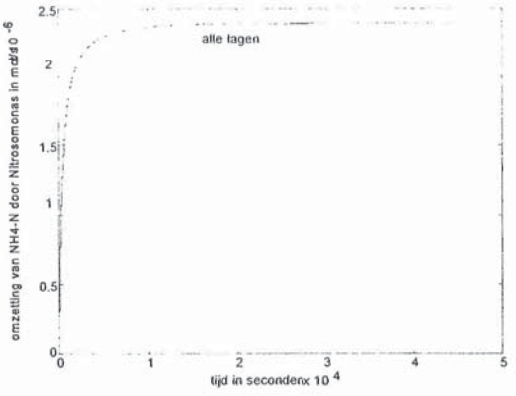


Figuur 6.8 Concentratie NO3-N in het water tijdens validatie a

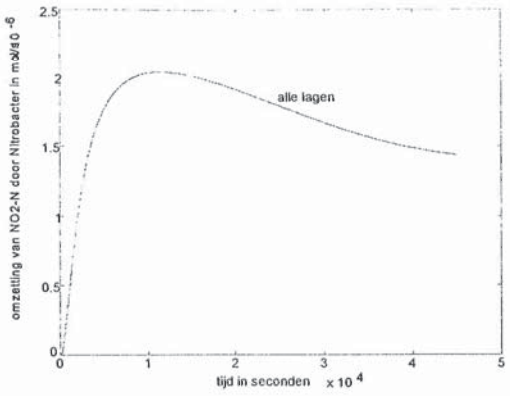


Figuur 6.9 Concentratie NO3-N in het water tijdens validatie a van 30000 tot 30150 seconden

De NO_3-N concentratie in het spuiwater is in de evenwichtssituatie gelijk aan 1.67 mol N/m^3. Deze concentratie is ook veel lager dan de waarde die gevonden werd in de praktijksituatie uit tabel 6.1. Op grond van de figuren 6.6 tot en met 6.9 kan dus geconcludeerd worden dat er tijdens validatie a bijna geen nitrificatie heeft plaatsgevonden.



Figuur 6.10 Omzetting van NH_4^+ door Nitrosomonas in het water



Figuur 6.11 Omzetting van NO_2^- door Nitrobacter in het water

In de evenwichtssituatie is uit figuur 6.10 en figuur 6.11 af te lezen dat de consumptiesnelheid door Nitrosomonas gelijk is aan $2.4 \cdot 10^{-6}$ mol N/s en door Nitrobacter gelijk is aan $1.5 \cdot 10^{-6}$ mol N/s. Demmers (1992) vond in zijn experimenten dat de maximale omzettingssnelheid in een biowasser gelijk is aan 25 mg N/m^2·hr. In de gegeven situatie is het pakkingsoppervlak gelijk aan 106 m^2, de maximale omzettingssnelheid die hier dus gerealiseerd kan worden is volgen Demmers (1992) dan gelijk aan $7.3 \cdot 10^{-4}$ mol N/s (Demmers, 1992). Uit deze gegevens blijkt dat tijdens validatie a de maximale omzettingssnelheid bij lange na niet gehaald wordt. Daarom is besloten om de concentratie biomassa in de wassectie te vergroten.
Tijdens validatie b is X^{Ns} gelijk aan 150 kg biomassa/m^3 biofilm en X^{Nb} gelijk aan 10 kg biomassa/m^3 biofilm gekozen. Tevens is het model BIOWAS nu gedurende 15000 tijdstappen gesimuleerd.
Uit validatie b bleek dat de NH_3-concentratie in de uitgaande lucht in evenwicht gelijk is aan $2.0 \cdot 10^{-4}$ mol/m^3. De NH_3-reductie is nu gelijk aan 55.6% en is dus toegenomen ten opzichte van de bereikte waarde in validatie a. De concentraties in het spuiwater zijn in de evenwichtssituatie gelijk aan:

C_{rswa} = 42.7 mol NH_4-N/m^3
C_{rset} = 18.6 mol NO_2-N/m^3
C_{rsat} = 3.5 mol NO_3-N/m^3

Als deze waarden worden vergeleken met de spuiwaterconcentraties uit tabel 6.1 dan blijkt dat validatie b de praktijksituatie beter benadert dan validatie a. De nitrietconcentratie is echter nog steeds aan de lage kant, evenals de bereikte NH_3-reductie. Dit komt misschien door een te lage overdracht van NH_3 van lucht naar water. Tijdens validatie c is daarom de waarde van k_{lu} tweemaal zo groot gekozen dan de waarde van k_{lu} uit validatie a en b. De stofoverdrachtscoëfficiënt k_{lu} is tijdens validatie c dus gelijk aan 0.0248 m/s. De andere gegevens die gebruikt worden tijdens validatie c zijn gelijk aan de gegevens die gebruikt zijn tijdens validatie b.
Tijdens validatie c is de in evenwicht bereikte NH_3-reductie gelijk aan 63.4% en deze waarde ligt dus nog dichter bij de in de praktijk gevonden waarde van 74%. De spuiwaterconcentraties zijn in de evenwichtssituatie gelijk aan:

C_{rswa} = 51.7 mol NH_4-N/m^3
C_{rset} = 19.1 mol NO_2-N/m^3
C_{rsat} = 3.5 mol NO_3-N/m^3

Hieruit blijkt dat validatie c de praktijksituatie het best benadert. Door te sleutelen aan de nitrificatie en de NH_3-overdracht van lucht naar water is het dus mogelijk om het model BIOWAS de praktijk-

situatie beter te laten benaderen. Er kan dus geconcludeerd worden dat het noodzakelijk is om te kijken naar de gevoeligheid van de uitkomst van het model BIOWAS voor bepaalde parameters. De gevoeligheid van het model BIOWAS wordt behandeld in hoofdstuk 7.
Uit de validaties blijkt dat het model BIOWAS in staat is om de werking van de biowasser te simuleren. De nauwkeurigheid waarmee dit gedaan wordt is afhankelijk van de betrouwbaarheid van de gebruikte parameters in het model BIOWAS. Het is dus belangrijk dat voor een nauwkeurige simulatie door het model BIOWAS de waarden van de gebruikte parameters betrouwbaar zijn.

7 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN HET MODEL BIOWAS

Uit de validatie van het model BIOWAS volgde dat het belangrijk is om te weten welke parameters de uitkomst van het model BIOWAS sterk beïnvloeden. In dit hoofdstuk is van een aantal parameters de gevoeligheid, ofwel de mate van beïnvloeding, bekeken. De gevoeligheid is getest door het gevolg te bepalen van een verandering van een parameter op de grootte van de NH_3-reductie. Omdat alleen naar de gevolgen voor de NH_3-reductie wordt gekeken hoeft alleen het overdrachtsproces van NH_3 van lucht naar NH_3 en NH_4^+ in water gesimuleerd te worden. De grootte van de concentraties NO_2^- en NO_3^- hebben namelijk geen invloed op de reductie van NH_3 uit de lucht, dus de nitrificatie wordt tijdens de gevoeligheidsanalyse gelijk aan nul gesteld. Alleen het wegnemen van NH_4^+ door nitrificatie heeft een invloed op de NH_3-reductie van de biowasser, maar dit kan gesimuleerd worden door de concentratie NH_4-N aan het begin van de wassectie te variëren.

De gevoeligheid van een parameter wordt pas bepaald als er een evenwicht heerst in de biowasser. De NH_3-reductie is gevoelig voor een parameter als bij een verandering van 100% in de waarde van de parameter de NH_3-reductie met minimaal 10% verandert.

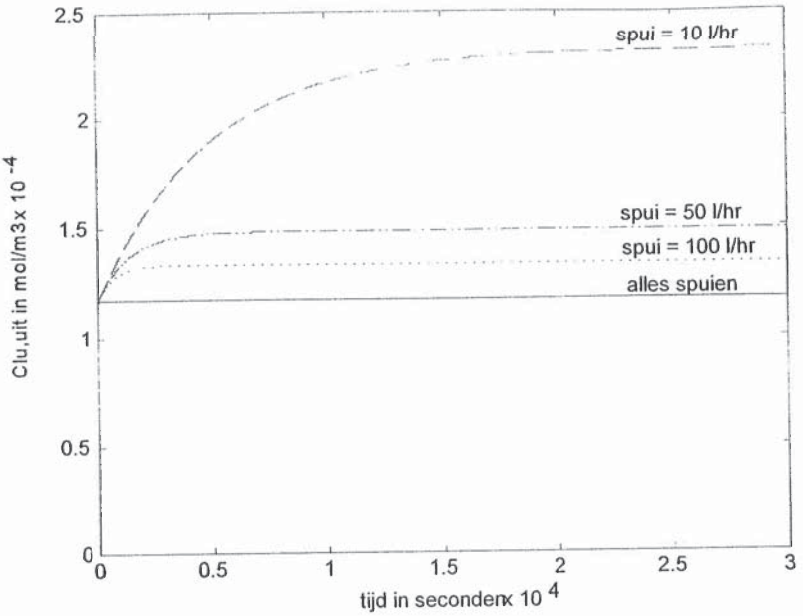
7.1 Gevoeligheid voor de concentraties NH_3 en NH_4^+ in het reservoir

Door het spuidebiet te variëren, veranderen ook de concentraties aan NH_3 en NH_4^+ in het reservoir en daarmee dus ook de aan de wassectie toegevoerde NH_3 en NH_4^+ . De hamvraag is nu of de NH_3-reductie beïnvloed wordt door de verschillende hoogten van deze concentraties. De gegevens uit tabel 6.1 zijn gebruikt voor de simulatie van het model BIOWAS. In tabel 7.1 staan de verschillende spuiwaterconcentraties in evenwicht vermeld met de bijbehorende spuidebieten.

Tabel 7.1 Spuiwaterconcentraties bij verschillende spuidebieten.

spuidebiet (l/hr)	C_{rswa} (mol NH_4-N/m^3)
10	60.43
50	16.72
100	8.78
alles spuien	0

Uit tabel 7.1 blijkt dat de spuiwaterconcentraties afnemen bij een toename van het spuidebiet. In figuur 7.1 is bij verschillende spuidebieten, ofwel verschillende spuiwaterconcentraties, het verloop van de uitgaande luchtconcentratie tegen de tijd uitgezet.



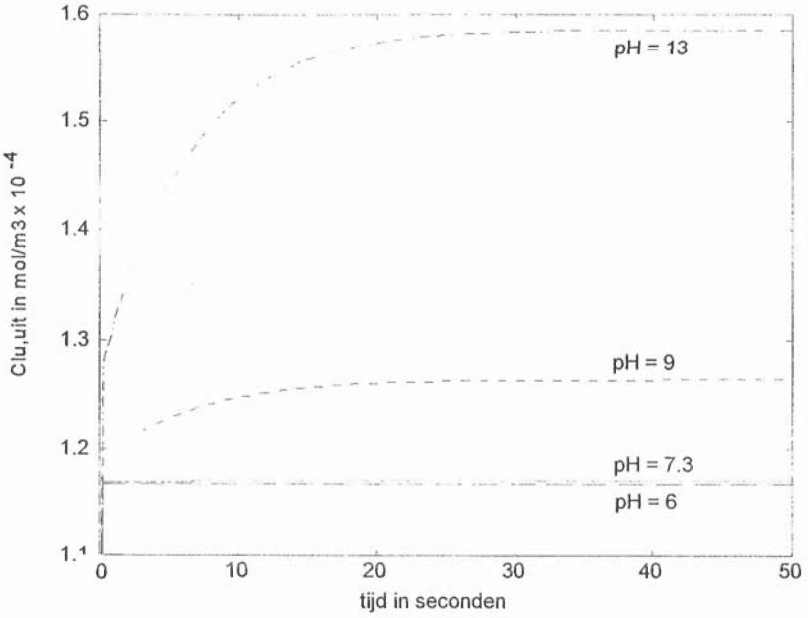
Figuur 7.1 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor het spuidebiet

Uit figuur 7.1 blijkt dat des te hoger het spuidebiet is, des te hoger de reductie van NH_3 is. Dit komt doordat bij hogere spuidebieten de aan de wassectie toegevoerde concentratie aan NH_3 en NH_4^+ lager is, hierdoor is de drijvende kracht voor overdracht van NH_3 vanuit lucht naar water groter. Ook is uit figuur 7.1 op te maken dat bij een hoger spuidebiet de evenwichtssituatie sneller wordt bereikt. Dit komt doordat de tijdsconstante $\tau_{2,spui}$ kleiner wordt.
Uit al deze feiten kan dus geconcludeerd worden dat de reductie van NH_3 gevoelig is voor de concentratie van NH_3 en NH_4^+ in het reservoir.

In het vervolg van dit hoofdstuk zal de gevoeligheid worden getest bij de situatie waarin al het water gespuid wordt en de concentratie NH_3 en NH_4^+ aan het begin van de wassectie dus gelijk aan nul is. De NH_3-reductie die dan onder de omstandigheden van tabel 6.1 wordt verkregen is 74% en dit wordt in het vervolg de standaardreductie onder standaardomstandigheden genoemd.

7.2 Gevoeligheid voor de pH

Door de pH te variëren verandert de fractie ammonium in het water. Bij een pH van 6 is alleen NH_4^+ aanwezig in het water, bij een pH van 13 is er alleen NH_3 aanwezig in het water. De standaardsituatie heeft een pH van 7.3. In figuur 7.2 is de uitgaande luchtconcentratie uitgezet tegen de tijd bij verschillende waarden van de pH.

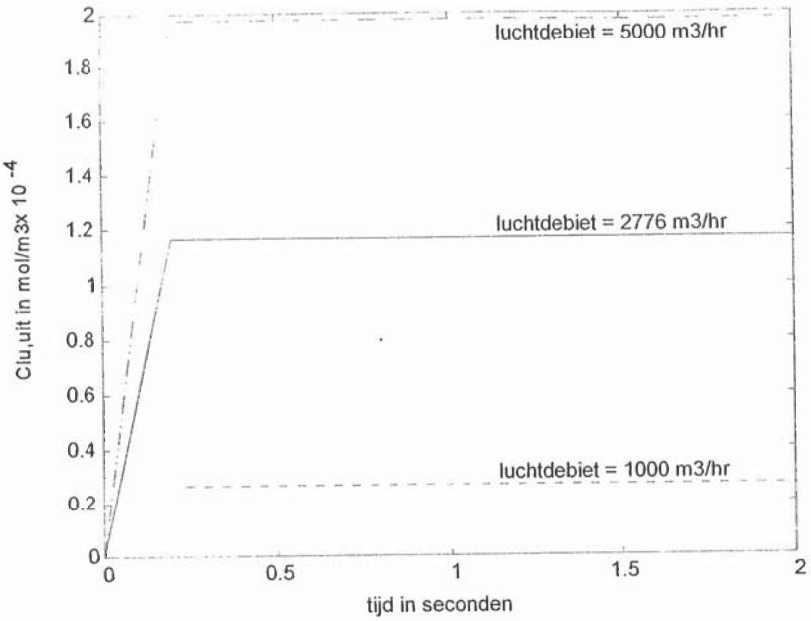


Figuur 7.2 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor de pH van het waswater

Uit figuur 7.2 blijkt dat de pH de NH_3-reductie beïnvloedt. Bij een pH van 6 wordt een reductie bereikt van 74.04% en hieruit blijkt dat bij een pH van 7.3 ook alleen maar NH_4^+ in het water aanwezig is. Bij een pH van 13 is de NH_3-reductie gelijk aan 64.7%. Als dus gekeken wordt naar de twee uiterste situaties, namelijk alleen NH_4^+ en alleen NH_3, dan blijkt dat als van de ene naar de andere situatie wordt gegaan de NH_3-reductie ongeveer met 10% afneemt. De NH_3-reductie is dus gevoelig voor een verandering in de pH.
Het is niet verrassend dat de NH_3-reductie wordt beïnvloedt door de pH, omdat de verdelingscoëfficiënt H_{aNtot} kleiner is als er meer NH_4^+ in het water is. Een kleinere verdelingscoëfficiënt geeft aan dat de drijvende kracht voor stofoverdracht groter wordt en de reductie dus toeneemt.

7.3 Gevoeligheid voor het luchtdebiet

Als het luchtdebiet varieert dan verandert de verblijftijd van de lucht in de biowasser. In figuur 7.3 is de uitgaande luchtconcentratie uitgezet tegen de tijd bij verschillende waarden van het luchtdebiet. Door het luchtdebiet te wijzigen verandert normaal gesproken ook de stofoverdrachtscoëfficiënt k_{lu}. Bij het testen van de gevoeligheid van de NH_3-reductie voor het luchtdebiet is k_{lu} telkens gelijk gesteld aan de standaardwaarde. De standaardwaarde van k_{lu} is, op grond van de gegevens van tabel 6.1, gelijk aan 0.0124 m/s.

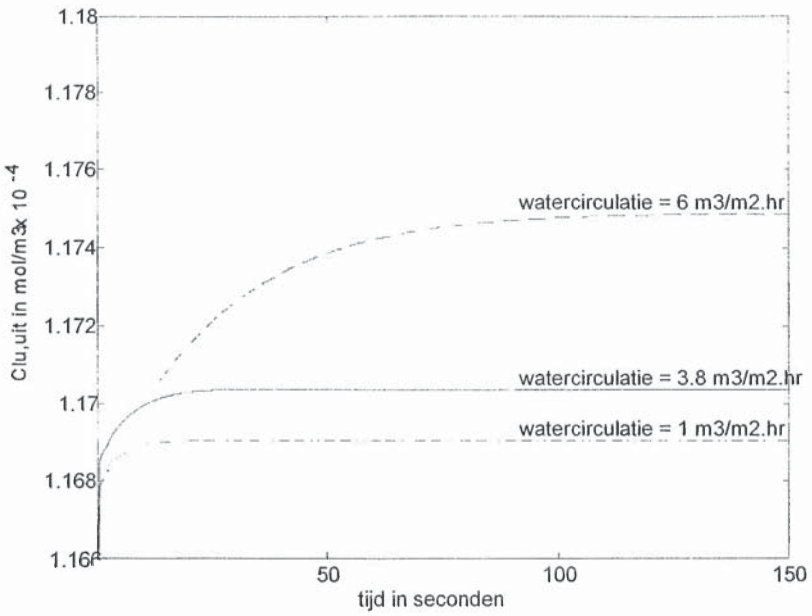


Figuur 7.3 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor het luchtdebiet

Uit figuur 7.3 blijkt dat het luchtdebiet de NH_3-reductie beïnvloedt. Dit is niet verrassend, doordat bij een kortere verblijftijd van de lucht in de wassectie er minder tijd is om stof over te dragen. De NH_3-reductie neemt als gevolg hiervan af.
Als het luchtdebiet 67% groter dan de standaardwaarde wordt gemaakt, dan neemt de NH_3-reductie af met 25%. Als het luchtdebiet 67% kleiner dan de standaardwaarde wordt gemaakt, dan neemt de NH_3-reductie toe met 25%. De NH_3-reductie is dus gevoelig voor het luchtdebiet.
Bij een luchtdebiet van 1000 m^3/hr is de verblijftijd van de lucht in deze wassectie gelijk aan 3 seconden. Bij een luchtdebiet van 2776 m^3/hr is de verblijftijd 1.1 seconden en bij een luchtdebiet van 5000 m^3/hr is deze 0.6 seconde. Voor het bereiken van een redelijke NH_3-reductie zal de verblijftijd van de lucht in de wassectie dus ongeveer 1 seconde moeten zijn. De NH_3-reductie is dus ook gevoelig voor een verandering van de verblijftijd van de lucht in de wassectie. Bij het veranderen van de hoogte van de wassectie verandert de NH_3-reductie dus ook doordat de verblijftijd van de lucht in de wassectie verandert.

7.4 Gevoeligheid voor de watercirculatie

In figuur 7.4 is te zien hoe de uitgaande luchtconcentratie verandert in de tijd bij verschillende watercirculaties. Door het variëren van de waarde van de watercirculatie (W.C.) verandert normaal gesproken ook de k_{wa}. Deze is tijdens het testen van deze gevoeligheid telkens gelijk gesteld aan de standaardwaarde, dus $k_{wa} = 6.48 \cdot 10^{-5}$ m/s.

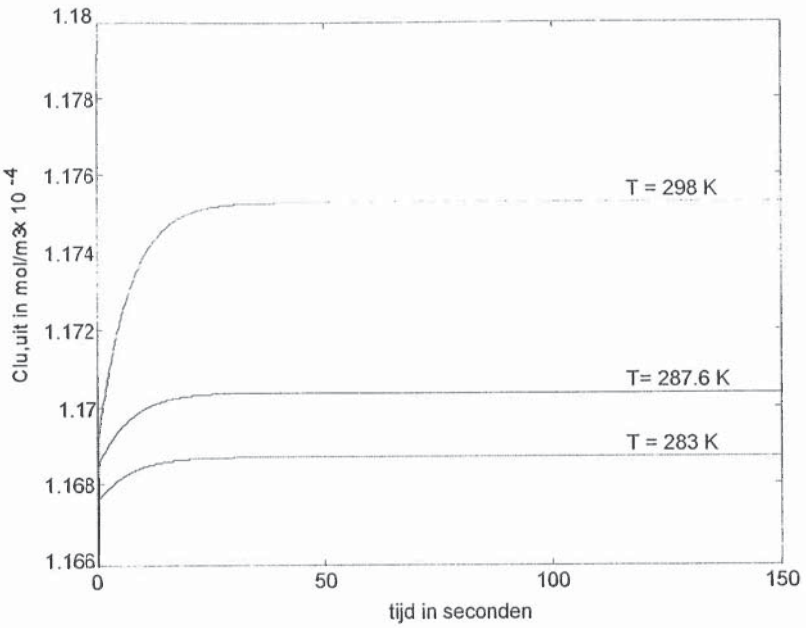


Figuur 7.4 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor de watercirculatie

Uit figuur 7.4 blijkt dat de NH_3-reductie niet gevoelig is voor de waarde van de watercirculatie binnen het gebied dat hier getest is. Hieruit valt op te maken dat de watercirculatie in deze range tussen het loading-punt en het flooding-punt inligt. Indien de watercirculatie buiten deze punten komt, dan zou de drukval te laag respectievelijk te hoog zijn om een goede stofoverdracht te kunnen bewerkstelligen. De NH_3-reductie zou daardoor sterk afnemen.

7.5 Gevoeligheid voor de temperatuur

In bepaalde literatuur wordt aangegeven dat bij de absorptie van NH_3 van lucht in water veel warmte vrijkomt. Daarom wordt gekeken of het absorptieproces gevoelig is voor de temperatuur. Door de temperatuur te variëren verandert de verdelingscoëfficiënt H_{aNtot}. In de biowasser heersen temperaturen die variëren van 10°C tot 25°C. Voor deze range is de gevoeligheid op de NH_3-reductie getest.
In figuur 7.5 is de uitgaande luchtconcentratie uitgezet tegen de tijd voor verschillende temperaturen.

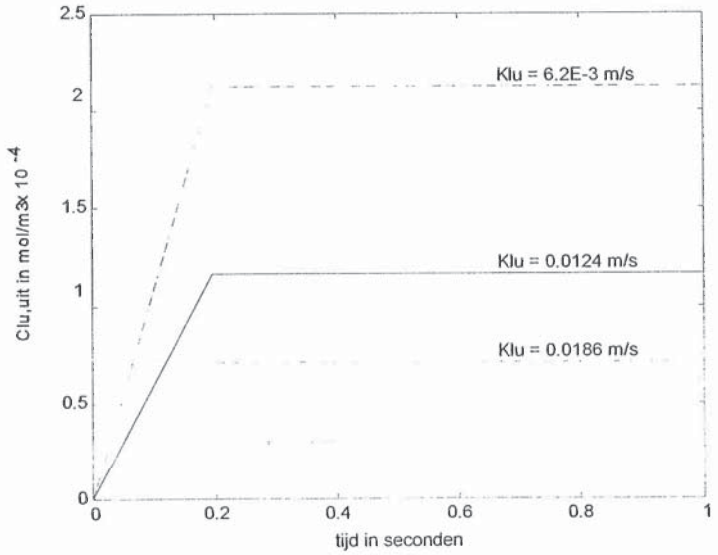


Figuur 7.5 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor de temperatuur van het waswater

Uit figuur 7.5 blijkt dat de NH_3-reductie niet gevoelig is voor de temperatuur als deze varieert van 10°C tot 25°C. Het is dus niet nodig om een warmtebalans op te nemen in het model BIOWAS.

7.6 Gevoeligheid voor de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in lucht, k_{lu}

In figuur 7.6 is de uitgaande luchtconcentratie uitgezet tegen de tijd bij verschillende waarden van k_{lu}.

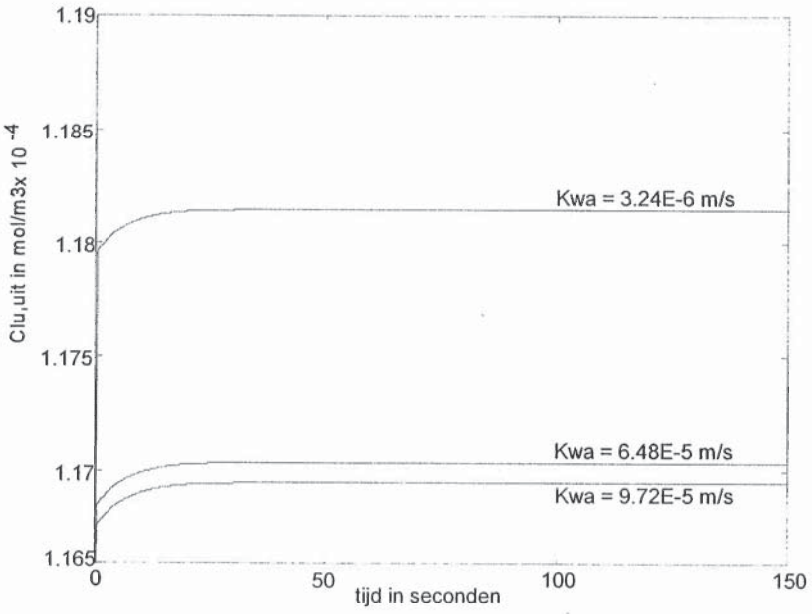


Figuur 7.6 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor k_{lu}

Uit figuur 7.6 blijkt dat als k_{lu} afneemt met 50% de NH_3-reductie afneemt met 30% ten opzichte van de standaard NH_3-reductie. Als de waarde van k_{lu} echter toeneemt met 50%, dan neemt de NH_3-reductie toe met 15% ten opzichte van de standaard NH_3-reductie. De NH_3-reductie is dus gevoelig voor een verandering in de parameter k_{lu}. Het effect op de NH_3-reductie is groter als de waarde van k_{lu} afneemt.

7.7 Gevoeligheid voor de stofoverdrachtscoëfficiënt van NH_3 in water, k_{wa}

In figuur 7.7 is te zien dat de NH_3-reductie niet gevoelig is voor een verandering van 50% in de waarde van k_{wa} ten opzichte van de standaardwaarde.

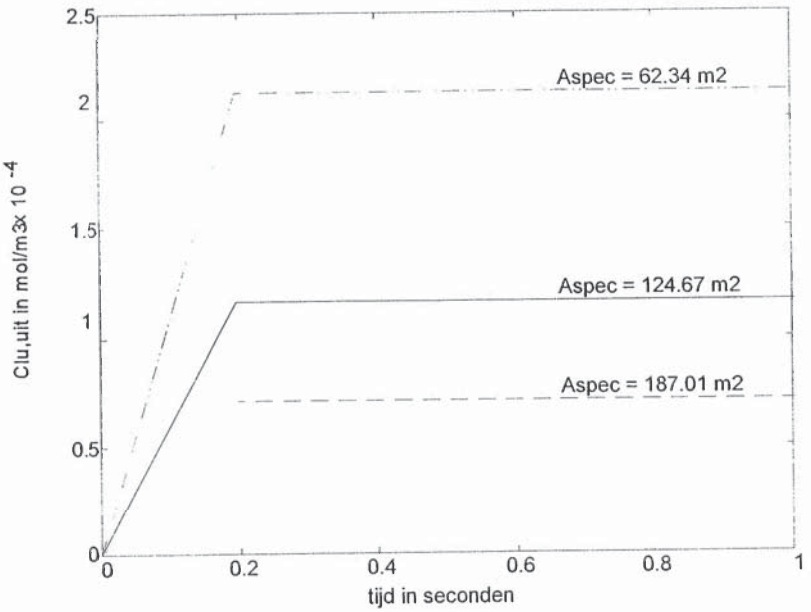


Figuur 7.7 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor k_{wa}

Deze conclusie komt niet uit de lucht vallen. Omdat uit hoofdstuk 2 bleek dat NH_3 een goed oplosbaar gas is in water, ligt de weerstand voor stofoverdracht geheel in de waterfase. De waarde van k_{wa} beïnvloedt de overdracht van NH_3 van lucht naar water dus niet.

7.8 Gevoeligheid voor het specifieke pakkingsoppervlak, A_{spec}

De gevoeligheid van A_{spec} op de NH_3-reductie is getest bij de standaardwaarden van k_{lu} en k_{wa}. De hypothese is dat als A_{spec} groter wordt de stofoverdracht toeneemt en de NH_3-reductie dus ook. In figuur 7.8 is de uitgaande luchtconcentratie uitgezet tegen de tijd bij verschillende specifieke pakkingsoppervlakken.



Figuur 7.8 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor het specifieke pakkingsoppervlak

Uit figuur 7.8 blijkt dat als A_{spec} afneemt met 50%, de NH_3-reductie afneemt met 30% ten opzichte van de standaardwaarde. Als A_{spec} toeneemt met 50%, dan neemt de NH_3-reductie toe met 15%. De NH_3-reductie is dus gevoelig voor de waarde van het specifieke pakkingsoppervlak. De NH_3-reductie reageert daarbij gevoeliger op een afname van het specifieke pakkingsoppervlak.

7.9 Gevoeligheid van de vrije ruimte voor lucht en water in de wassectie

Uit de simulaties met een ϵ_{lu} gelijk aan 0.91; 0.7 en 0.455 blijkt dat de luchtporositeit van de wassectie geen invloed uitoefent op de waarde van de NH_3-reductie. Bij het testen van deze gevoeligheid heeft de waterporositeit de waarde 0.02 gehouden.
Als voor de luchtporositeit de waarde 0.455 wordt aangehouden en ϵ_{wa} gelijk aan 0.02; 0.2 en 0.4 wordt genomen, dan blijkt dat de NH_3-reductie niet gevoelig hierop te reageren.
Het is verrassend dat blijkt dat de vrije ruimtes van zowel lucht als water de NH_3-reductie niet beïnvloeden. Waarschijnlijk komt dit doordat de vrije ruimtes de drukval die optreedt over de wassectie beïnvloeden en dus indirect zorgen voor een verlaging van de debieten in de wassectie. Zoals te zien was in paragraaf 7.3 is de NH_3-reductie wel gevoelig voor het luchtdebiet.

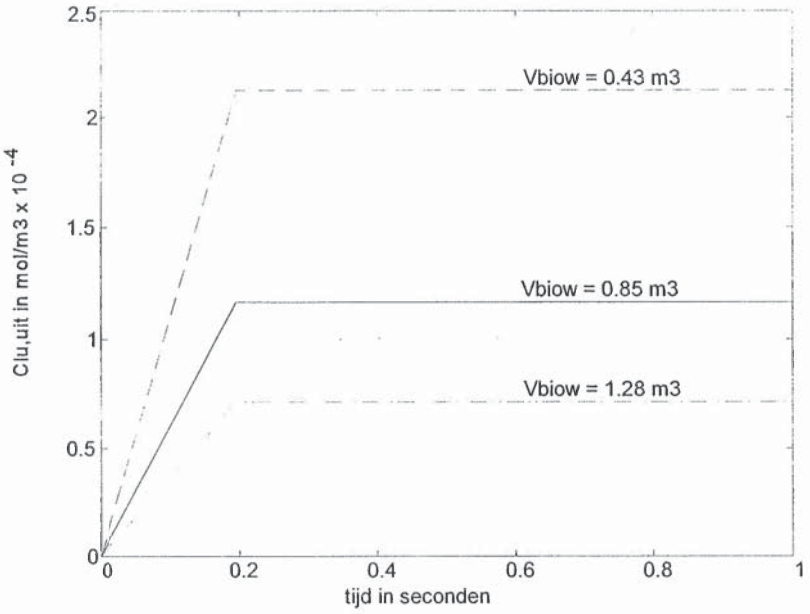
7.10 Gevoeligheid voor de beginconcentratie

Aangezien normaal gesproken de beginconcentratie van NH_3 in lucht niet constant is maar varieert, wordt het effect van deze parameter hier besproken. Het blijkt echter dat als de beginconcentratie met 50% verandert ten opzichte van de standaardwaarde, nog steeds dezelfde standaard NH_3-reductie wordt behaald. De NH_3-reductie is in deze range dus niet gevoelig voor een verandering in de beginconcentratie aan NH_3 in lucht.
Dit komt omdat er zulke lage concentraties van NH_3 aangeboden worden dat deze gemakkelijk kunnen oplossen in het water. Daardoor wordt bij lange na niet de verzadigingsoplosbaarheid

gehaald. Wel is het natuurlijk zo dat bij een hogere beginconcentratie dan de standaardwaarde, er meer stikstof in het waswater is te vinden bij een zelfde NH_3-reductie. Als er niet volledig gespuid wordt, zou dit op den duur remmend kunnen gaan werken, zie paragraaf 7.1. De beginconcentratie NH_3 in de lucht beïnvloedt wel de hoeveelheid substraat waarop de bacteriën kunnen groeien.

7.11 Gevoeligheid voor het dwarsoppervlak A van de wassectie

Als de hoogte van de wassectie constant gehouden wordt en het volume van de wassectie vergroot wordt, dan wordt het dwarsoppervlak van de wassectie groter. Volgens hoofdstuk 2 en 3 zou het dwarsoppervlak een parameter zijn die de NH_3-reductie sterk beïnvloedt.
In figuur 7.9 is de uitgaande luchtconcentratie uitgezet tegen de tijd bij verschillende waarden van het volume van de wassectie, ofwel het dwarsoppervlak.



Figuur 7.9 Gevoeligheid van de uitgaande luchtconcentratie voor het dwarsoppervlak van de wassectie

Uit figuur 7.9 blijkt dat als het dwarsoppervlak met 50% verandert ten opzichte van de standaardwaarde, de NH_3-reductie met minimaal 15% verandert. De NH_3-reductie reageert dus gevoelig op een verandering van het dwarsoppervlak van de wassectie. Uit deze gevoeligheid blijkt dat bij het ontwerpen van de wassectie het dwarsoppervlak gerust groter genomen mag worden, omdat dit de NH_3-reductie alleen maar verhoogt. Wel moet men er zorg voor dragen dat de minimale verblijftijd van de lucht in de wassectie 1 seconde blijft.

In tabel 7.2 zijn de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse samengevat. In deze tabel wordt met een gevoelige parameter bedoeld dat de NH_3-reductie gevoelig reageert op een verandering in deze parameter.

Tabel 7.2 Gevoeligheid van de NH3-reductie voor diverse parameters.

Gevoelige parameters	Niet-gevoelige parameters
pH	watercirculatie
luchtdebiet	T
k_{lu}	k_{wa}
A_{spec}	ϵ_{lu}
A_{biow}	ϵ_{wa}
	C_{begin}

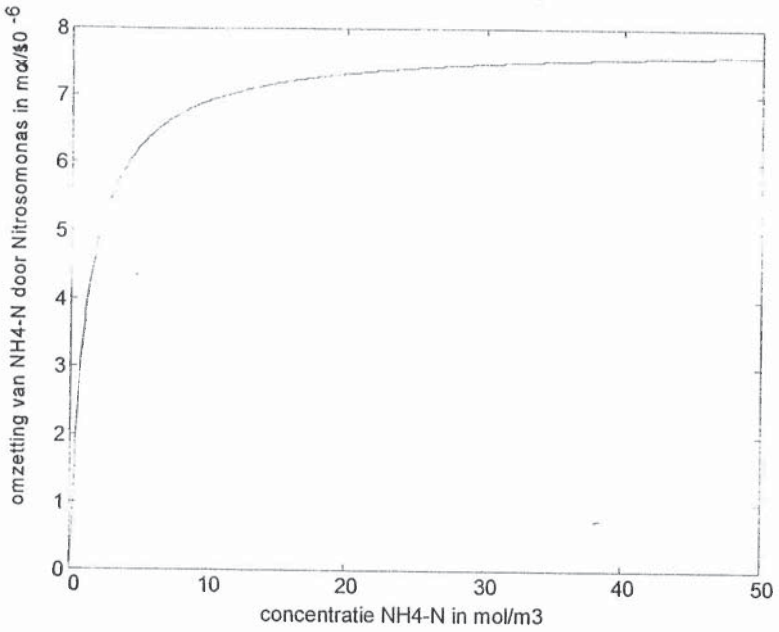
Uit tabel 7.2 blijkt dat voor een nauwkeurige simulatie van het model BIOWAS het nodig is om betrouwbare waarden te hebben van de gevoelige parameters.

7.12 Gevoeligheid van de omzetting op diverse parameters

Uit de validatie van het model BIOWAS blijkt dat het verloop van de nitrificatie de NH_3-reductie in belangrijke mate beïnvloedt. Dit komt doordat de nitrificatie NH_4^+ wegneemt uit het water, waardoor de drijvende kracht voor overdracht van NH_3 van lucht naar water groot blijft.
Het is dus interessant om te weten hoe de consumptiesnelheid van Nitrosomonas en Nitrobacter wordt beïnvloed door diverse parameters.
De consumptiesnelheid van Nitrosomonas en Nitrobacter werden in het model BIOWAS gegeven door formule 5.28 en 5.30. Uit deze relaties is op te maken dat de consumptiesnelheid van zowel Nitrosomonas als Nitrobacter lineair verandert met een verandering in de onderhoudsconstante (m_s^{Ns} en m_s^{Nb}), de concentratie biomassa (X^{Ns} en X^{Nb}) en het volume van de actieve biofilm. De invloed van pH, temperatuur en substraatconcentratie op de consumptiesnelheid is niet lineair. De gegevens die gebruikt worden bij het testen van de gevoeligheid van de consumptiesnelheid van Nitrosomonas en Nitrobacter zijn afkomstig uit tabel 6.1.

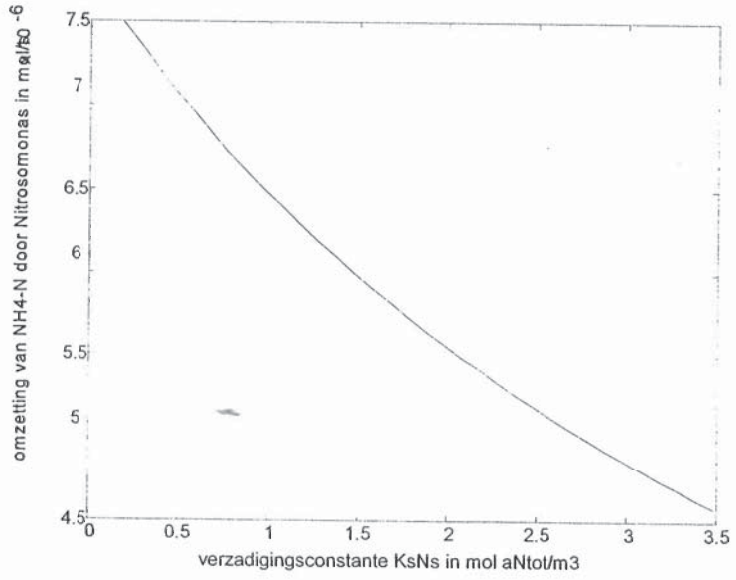
7.12.1 Consumptiesnelheid van Nitrosomonas

De consumptiesnelheid van Nitrosomonas is afhankelijk van de concentratie NH_4^+ in het water, danwel in de biofilm. In figuur 7.10 is de consumptiesnelheid uitgezet tegen verschillende concentraties van NH_4^+ in het water.



Figuur 7.10 Consumptiesnelheid van Nitrosomonas bij verschillende substraatconcentraties

Uit deze figuur blijkt dat als de concentratie aan NH_4^+ groter is dan de 45 mol N/m^3 de consumptiesnelheid niet langer toeneemt en dus zijn maximale waarde aanneemt. In de rest van deze paragraaf is daarom aangenomen dat de concentratie van NH_4^+ in het water gelijk aan 50 mol N/m^3. De pH beïnvloedt de activiteit van de Nitrosomonas, zoals ook al bleek uit hoofdstuk 2. In formule 5.22 komt dit tot uiting door een pH-afhankelijkheid van de verzadigingsconstante K_s^{Ns}. Als de pH verandert van 6.5 naar 8.5, dan verandert K_s^{Ns} van 3.6 naar 0.17 mol N/m^3. In figuur 7.11 is de invloed van de verandering van K_s^{Ns} uitgezet tegen de consumptiesnelheid bij een constante ammoniumconcentratie van 50 mol N/m^3.



Figuur 7.11 Consumptiesnelheid van Nitrosomonas bij verschillende verzadigingsconstanten

Uit figuur 7.11 blijkt dat de consumptiesnelheid afneemt als K_s^{Ns} groter wordt en de pH dus lager

wordt. Dit is in overeenstemming met de theorie uit hoofdstuk 2, waarin gezegd wordt dat Nitrosomonas optimaal functioneert bij een pH tussen 7 en 8 en slechter bij een pH ongelijk aan deze waarde.
De invloed van de temperatuur is getest door de waarden van de constanten bij 7 en 30°C te nemen die Hunik (1993) in zijn proefschrift gebruikt. Deze waarden zijn weergegeven in tabel 7.3.

Tabel 7.3 Waarden van constanten van Nitrosomonas bij 7 en 30 °C. Bron: Hunik, 1993.

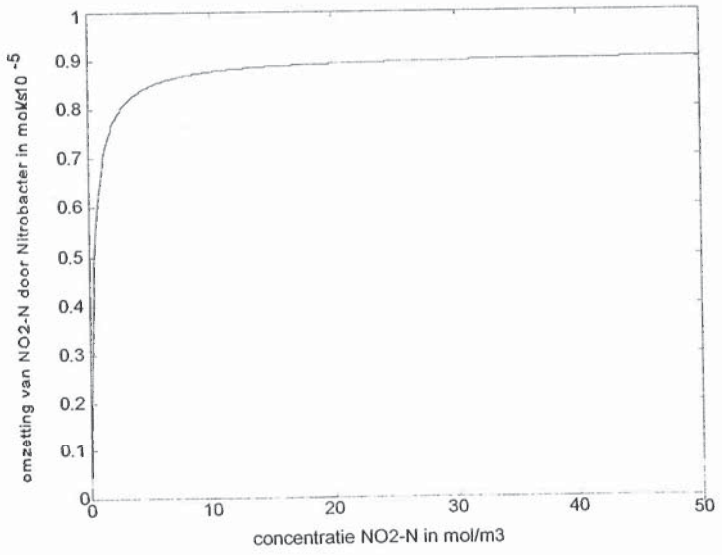
parameter	waarde (30°C)	waarde (7°C)	dimensie
m_s^{Ns}	$9.4 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	mol N/kg biomassa·s
K_s^{Ns}	1.25	$1.16 \cdot 10^{-1}$	mol N/m^3
X^{Ns}	13	13	kg biomassa/m^3 biofilm

Bij een ammoniumconcentratie van 50 mol N/m^3 geldt dan dat de consumptiesnelheid bij 30°C gelijk is aan $1.74 \cdot 10^{-6}$ mol N/s en bij 7°C gelijk is aan $6.2 \cdot 10^{-6}$ mol N/s.
De consumptiesnelheid neemt dus af bij een lagere temperatuur, dit was op grond van de theorie uit hoofdstuk 2 ook te verwachten.

Samenvattend kan dus gezegd worden dat de consumptiesnelheid van Nitrosomonas met betrekking tot onderhoud afneemt bij lagere pH's (ongeveer 6.5 - 7), lage concentraties aan NH_4^+ en lage temperaturen.

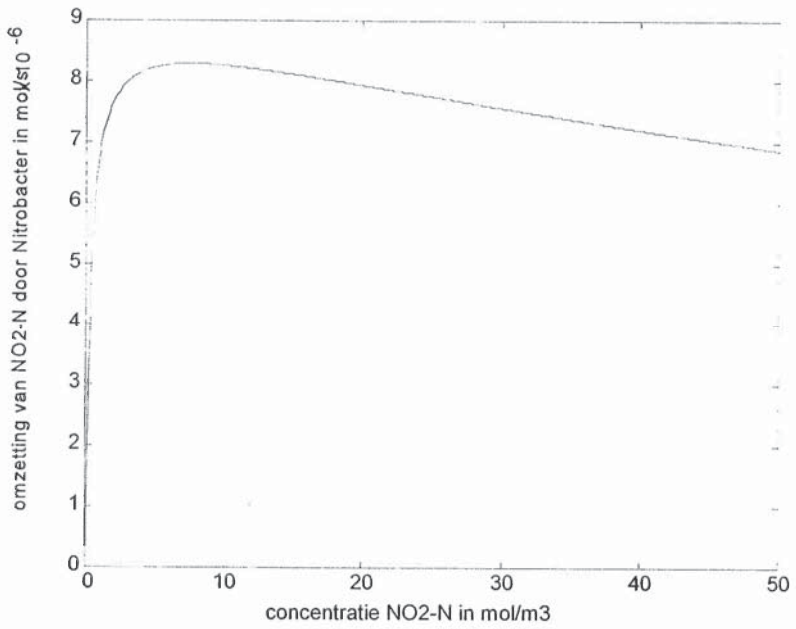
7.12.2 Consumptiesnelheid van Nitrobacter

De consumptiesnelheid van Nitrobacter is afhankelijk van de concentratie nitriet in het water, ofwel in de biofilm. Als aangenomen wordt dat er geen remming optreedt door nitriet en nitraat, dus K_I = 1, dan is in figuur 7.12 de consumptiesnelheid uitgezet tegen verschillende concentraties van nitriet.



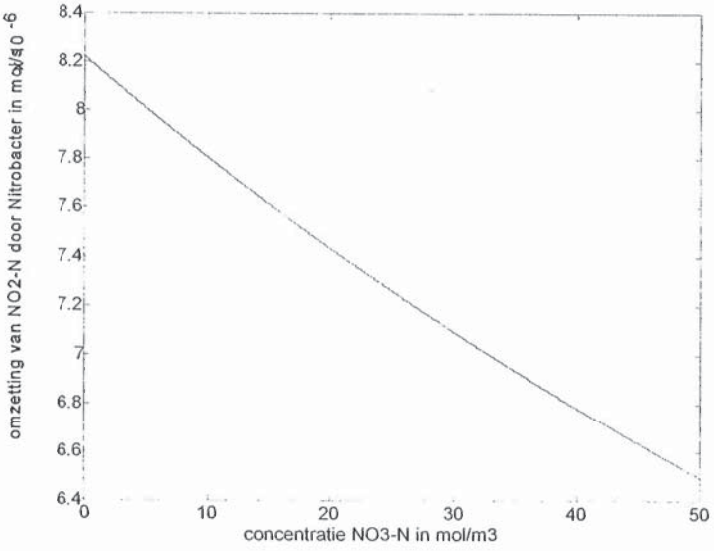
Figuur 7.12 Consumptiesnelheid van Nitrobacter bij verschillende substraatconcentraties

Uit figuur 7.12 blijkt dat bij een concentratie van NO_2^- hoger dan 25 mol N/m^3 de consumptiesnelheid zijn maximale waarde bereikt.
Als nu alleen de remming van de consumptiesnelheid door nitriet wordt meegenomen, door te veronderstellen dat er geen nitraat aanwezig is, dan wordt figuur 7.13 vekregen. In figuur 7.13 is de door nitriet geremde consumptiesnelheid van Nitrobacter uitgezet tegen verschillende concentraties van NO_2^-.



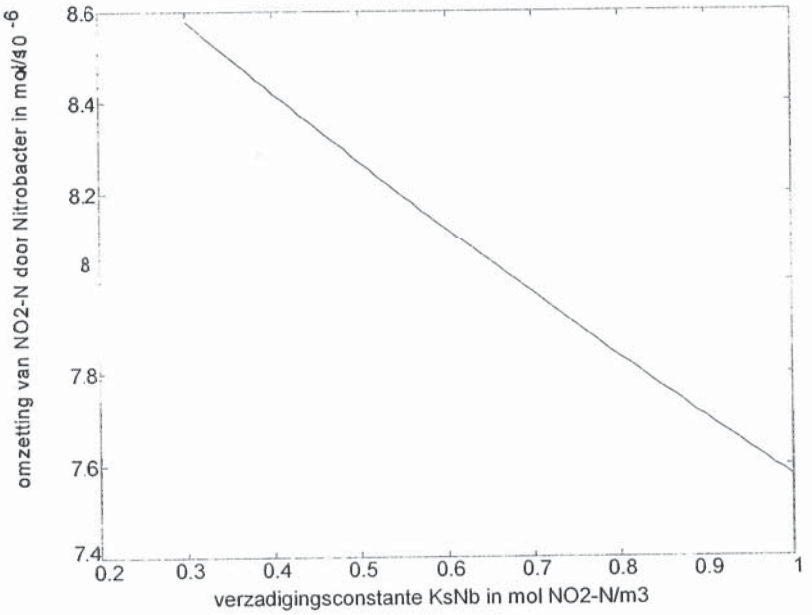
Figuur 7.13 Geremde consumptiesnelheid van Nitrobacter bij verschillende substraatconcentraties

In figuur 7.13 is te zien dat als de concentratie aan NO_2^- gelijk is aan 5 mol N/m^3 de maximale waarde van de door nitriet geremde consumptiesnelheid wordt gehaald. Bij deze concentratie van NO_2^- is de remming van nitraat op de consumptiesnelheid gemeten, dit is uitgezet in figuur 7.14.



Figuur 7.14 Geremde consumptiesnelheid van Nitrobacter bij verschillende nitraatconcentraties

Uit figuur 7.14 blijkt dat de door nitraat geremde consumptiesnelheid van Nitrobacter afneemt als de concentratie van NO_3^- in het water toeneemt. Hieruit blijkt dat het belangrijk is dat de concentraties NO_3^- in het water niet te hoog worden.
De pH beïnvloedt de consumptiesnelheid van Nitrobacter via de verzadigingsconstante K_s^{Nb}. Als de pH verandert van 6.5 naar 8.5 dan verandert de K_s^{Nb} van 0.29 naar 1.02 mol N/m^3. Als aangenomen wordt dat K_I gelijk is aan 1 en dat de NO_2^--concentratie gelijk is aan 5 mol N/m^3 dan is in figuur 7.15 de invloed te zien van een verandering in K_s^{Nb} op de consumptiesnelheid.



Figuur 7.15 Consumptiesnelheid van Nitrobacter bij verschillende verzadigingsconstanten KsNb

Uit deze figuur blijkt dat bij een toename van K_s^{Nb} de consumptiesnelheid van Nitrobacter afneemt. De consumptiesnelheid van Nitrobacter is dus groter bij een pH van 6.5.
De invloed van de temperatuur is getest door de waarden van de constanten te nemen bij 7 en 30°C volgens Hunik (1993). Deze waarden zijn gegeven in tabel 7.4.

Tabel 7.4 Waarden van constanten van Nitrobacter bij 7 en 30 °C. Bron: Hunik, 1993.

parameter	waarde (30°C)	waarde (7°C)	dimensie
m^{Nb}	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$6.4 \cdot 10^{-4}$	mol N/kg biomassa·s
K_s^{Nb}	$3.6 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	mol N/m^3
X^{Nb}	6.5	6.5	kg biomassa/m^3 biofilm

Bij een NO_2^--concentratie van 5 mol N/m^3 en een $K_I = 1$ is de consumptiesnelheid van Nitrobacter bij 7°C gelijk aan $2.63 \cdot 10^{-6}$ mol N/s en bij 30°C gelijk aan $8.48 \cdot 10^{-6}$ mol N/s. De consumptiesnelheid neemt dus af bij lagere temperaturen, hetgeen op grond van de theorie uit hoofdstuk 2 te verwachten was.

Samenvattend kan dus gezegd worden dat de consumptiesnelheid van Nitrobacter lager is bij een toenemende NO_2^-- en NO_3^--concentratie, een hogere pH (ongeveer 8 - 8.5) en een lage temperatuur.

8 BEOORDELINGSCRITERIA

Voordat de biowasser wettelijk geaccepteerd kan worden als ammoniakemissie-beperkende techniek, zal de werking van de biowasser als voldoende beoordeeld moeten worden. In dit verslag wordt gesteld dat de werking van de biowasser voldoende is als de NH_3-reductie door de biowasser minimaal 70% is.
De beoordeling van de werking van de biowasser valt uiteen in twee delen. Ten eerste zal beoordeeld moeten worden of het mogelijk is om met een gegeven installatie de door de fabrikant opgegeven NH_3-reductie te realiseren. Ten tweede moet gecontroleerd worden wat de NH_3-reductie van de biowasser is in een praktijksituatie.

8.1 Beoordelen van de potentiële NH_3-reductie van een biowasser

Met de behandelde ontwerptheorie uit hoofdstuk 3 kan de potentieel haalbare NH_3-reductiecapaciteit van een biowasser berekend worden. De voorwaarde hiervoor is dat een biowasser het uiterlijk van figuur 2.1 heeft. In tabel 8.1 staat vermeld welke parameters bekend moeten zijn voor het bepalen van de potentiële NH_3-reductie door de biowasser.

Tabel 8.1 Bekend veronderstelde parameters voor het berekenen van de potentiële NH_3-reductie door de biowasser.

parameter	dimensie
F_p (= pakkingsfactor)	m^2/m^3
d_{pak} (= diameter pakkingsmateriaal)	m
m_{aNtot} (= verdelingscoëfficiënt op molfractiebasis van NH_3 en NH_4^+ tussen lucht en water)	-
k_{lu}	m/s
k_{wa}	m/s
ϕ_{wa}	m^3/s
ϕ_{spui}	m^3/s
maximaal ϕ_{lu}	m^3/s
gemiddelde $C_{lu,in}$	mol N/m^3
opgegeven NH_3-reductie	%
ρ_{lu}	kg/m^3
ρ_{wa}	kg/m^3
μ_{lu}	Pa·s
μ_{wa}	Pa·s
pH	-
T	K

Als aangenomen wordt dat de ingaande waterconcentratie geen stikstof bevat dan kan het volume van de wassectie met de theorie uit hoofdstuk 3 bij de opgegeven NH_3-reductie geschat worden. Het volume van de wassectie wordt met deze theorie geschat door alleen het optreden van absorptie en dissociatie te veronderstellen. Door de invloed van het spuidebiet op de NH_3-reductie ook

nog mee te nemen, wordt het volume van de wassectie bepaald in de "worst case". De "worst case" is de situatie waarin alleen de processen absorptie en dissociatie optreden en het maximale ventilatiedebiet optreedt en het spuidebiet de laagst in te stellen waarde heeft.
Op dit moment is nog niet aan te geven wat de relatie is tussen het spuidebiet en het met de theorie uit hoofdstuk 3 geschatte volume van de wassectie.
Als het volume van de wassectie in de "worst case" is bepaald, dan kan dit vergeleken worden met het volume van de wassectie van de biowasser van de fabrikant. Als deze waarden redelijk met elkaar overeenstemmen dan kan gezegd worden dat de biowasser altijd de opgegeven NH_3-reductie haalt.
Door het optreden van nitrificatie in de wassectie neemt de NH_3-reductie in het geschatte volume van de wassectie alleen maar verder toe.
Het geschatte volume van de wassectie mag pas vergeleken worden met de praktijkwaarde als bekend is hoe nauwkeurig de schatting is. De nauwkeurigheid van het geschatte volume van de wassectie is afhankelijk van de juiste waarden van k_{lu} en m_{aNtot}.

8.2 Beoordelen van de NH_3-reductie van de biowasser in de praktijk

Tegenwoordig is bekend dat aangenomen kan worden dat in een vleesvarkensstal een ongeveer constante NH_3-concentratie heerst. De NH_3-emissie is wel afhankelijk van de leeftijd van de dieren (Scholtens, 1996). Met deze informatie en met het feit dat de NH_3-reductie niet noemenswaardig wordt beïnvloedt door verschillen in lage beginconcentraties, kan het model BIOWAS de NH_3-reductie voorspellen.
Het model BIOWAS kan alleen een nauwkeurige schatting geven van de NH_3-reductie als de processen in de biowasser in evenwicht zijn.
Het model BIOWAS kan de NH_3-reductie berekenen bij de maximale ventilatiecapaciteit, het ingestelde spuidebiet en het niet optreden van nitrificatie. Deze berekende NH_3-reductie is de ondergrens van de NH_3-reductie van de bekeken biowasser. In de praktijk wordt de NH_3-reductie door het optreden van nitrificatie alleen maar hoger dan deze berekende waarde.
Als de nitrificatie wel wordt meegenomen in de bekeken biowasser en er een evenwichtssituatie wordt gesimuleerd, dan geeft het model BIOWAS geeft als eindresultaat de concentraties van NH_3, NH_4^+, NO_2^- en NO_3^- in het spuiwater en de optredende NH_3-reductie. De berekende spuiwaterconcentraties kunnen in de praktijk gecontroleerd worden door een monster van het spuiwater te laten analyseren. Aan de hand hiervan kan de uitkomst van het model BIOWAS getoetst worden.
Door te veronderstellen dat een biowasser in evenwicht verkeert is de berekende NH_3-reductie gelijk aan de reële NH_3-reductie door de biowasser. De berekende NH_3-reductie kan gecontroleerd worden door zowel de in- als uitgaande concentratie van NH_3 in lucht te meten.
Door zowel het spuiwater te analyseren en de NH_3-concentratie in de in- en uitgaande lucht te meten kan gecontroleerd worden of de biowasser inderdaad in evenwicht was.

In tabel 8.2 is samengevat welke parameters bekend moeten zijn voor het berekenen van de minimale en de reële NH_3-reductie door de biowasser met het model BIOWAS. Tevens is aangegeven welke parameters gemeten moeten worden om de controles uit te kunnen voeren.

Tabel 8.2 ***Gegevens voor het rekenen met het model BIOWAS***

Berekening van:	Bekende parameters	Te meten parameters
minimale NH_3-reductie in %	H_{aNtot}, $k_{luHaNtot}$, k_{lu}, k_{wa}, $\phi_{lu,max}$, WC, V_{was}, H_{was}	$C_{lu,in}$
reële NH_3-reductie in %	H_{aNtot}, $k_{luHaNtot}$, k_{lu}, k_{wa}, $\phi_{lu,max}$, WC, V_{was}, H_{was}	$C_{lu,in}$, C_{rswa}, C_{rset}, C_{rsat}
evenwicht	H_{aNtot}, $k_{luHaNtot}$, k_{lu}, k_{wa}, $\phi_{lu,max}$, WC, V_{was}, H_{was}	$C_{lu,in}$, C_{rswa}, C_{rset}, C_{rsat}, $C_{lu,uit}$

Op grond van de resultaten uit hoofdstuk 7 blijkt dat vooral de pH, ϕ_{lu}, k_{lu}, A_{spec} en A_{biow} nauwkeurig bekend moeten zijn voor een goede voorspelling van de outputs door het model BIOWAS.

Samenvattend kan gezegd worden dat de minimale NH_3-reductie door een biowasser bepaald kan worden op twee manieren. Door het volume van de wassectie bij deze NH_3-reductie te berekenen kan dit vergeleken worden met de echte waarde. Op grond hiervan kan een uitspraak worden gedaan over de minimale NH_3-reductie door de wassectie. De tweede manier is om het model BIOWAS de "worst case" te laten simuleren, waaruit een bepaalde minimale NH_3-reductie volgt. In een wettelijk kader kan dan dus opgenomen worden dat deze biowasser altijd een NH_3-reductie heeft die gelijk is aan deze berekende minimale NH_3-reductie.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op grond van de resultaten van de enquête kan geconcludeerd worden dat de biowasser in de praktijk goed functioneert. Voor de boer is het niet moeilijk en kost het weinig tijd om de biowasser draaiende te houden. De grote nadelen aan de biowasser vindt hij de aanschafkosten en de kosten voor het afvoeren van de grote hoeveelheid spuiwater.
De aanschafkosten zouden gereduceerd kunnen worden door eens kritisch te kijken naar de materialen waarvan de biowasser is gemaakt. De kosten van het afvoeren van het spuiwater zouden nihil zijn als er een denitrificatiestap achter de biowasser geplaatst wordt, waardoor het een gesloten systeem zou worden. Dit is sowieso een interessante gedachte, omdat de milieubelasting dan heel erg laag is.
Ook is het toevoegen van een denitrificatiestap een logische gedachte als men bedenkt dat de biowasser in zijn eentje het probleem nog niet oplost. Hoewel de ammoniak-emissie wordt gereduceerd komt er nog steeds net zoveel stikstof terecht in de bodem en het grondwater. De directe effecten van NH_3 zijn dus opgelost, maar de indirecte effecten zoals verzuring van bodem nog niet. Door denitrificatie toe te passen komt er geen stikstof meer terecht in de bodem en het water en is het probleem volledig opgelost.
Hierbij dient een kritische kanttekening te worden geplaatst dat het wel mogelijk is dat de biowasser het ammoniakprobleem volledig oplost. Als het spuiwater van de biowasser geloosd wordt op het riool vindt er in het riool verdere nitrificatie en denitrificatie plaats.
Ondanks het feit dat de boeren redelijk tevreden zijn over de biowasser piekeren de meesten er niet over om nog een keer een biowasser te kopen. Dit komt doordat de biowasser alleen maar kosten met zich meebrengt en geen baten. Als de biowasser een erkende ammoniak-emissie beperkende maatregel zou zijn, dan zou het voor de boer interessanter worden om een biowasser aan te schaffen.
Uit hoofdstuk 8 blijkt dat bij betrouwbare waarden van k_{lu}, k_{wa} en H_{aNtot} het in principe mogelijk is om van een willekeurige biowasser de potentiële NH_3-reductie te berekenen of te controleren. Dit kan door gebruik te maken van de ontwerptheorie uit hoofdstuk 3 of met behulp van het model BIOWAS. Als het bekend zijn van de minimale NH_3-reductie door de biowasser voldoende is om de biowasser wettelijk te accepteren, dan is het niet nodig om de nitrificatie te modelleren in het model BIOWAS. Als de nitrificatie wel moet worden gemodelleerd, dan is het noodzakelijk dat er meer onderzoek gedaan wordt hoe de nitrificatie plaatsvindt in biowassers.
Ik denk dat het zeer interessant is om door te gaan met het onderzoek naar biowassers, zodat deze in een wettelijk kader opgenomen kunnen worden en dus gelden als een ammoniak-emissiebeperkende maatregel. In een eventueel vervolgonderzoek zijn er op grond van dit verslag nog diverse aandachtspunten te noemen.

- Naar aanleiding van de gevoeligheidsanalyse uit hoofdstuk 7 blijkt het noodzakelijk te zijn om de waarde van k_{lu} nauwkeurig te bepalen. Met deze nauwkeurig bepaalde waarde als input is de output van het model BIOWAS betrouwbaarder dan deze in dit verslag was.
- Tevens is het nodig om de waarde van H_{aNtot} nauwkeurig te bepalen voor een betrouwbaardere voorspelling van het model BIOWAS.
- Als de nitrificatie wordt opgenomen in het model BIOWAS dan is het noodzakelijk dat hier meer onderzoek naar gedaan wordt. Te denken valt dan aan onderzoek naar de plaats in de biowasser waar de nitrificatie optreedt, alleen in de biofilm of ook door gesuspendeerde bacteriën. Tevens zal meer informatie verkregen moeten worden over de omstandigheden waaronder nitrificatie plaatsvindt in de biowasser. Misschien dat op deze vraag een antwoord komt in het nog te publiceren proefschrift van Maarten Smits.
- Om het voor de boer interessant te maken om een biowasser aan te schaffen is het noodzakelijk dat er kritisch wordt gekeken naar de constructie van de biowasser. Hierbij kan bijvoor-

beeld gedacht worden aan het verbeteren van de slechte bereikbaarheid van de diverse onderdelen uit de biowasser, waardoor storingen lang onopgemerkt blijven. Ook vind ik het noodzakelijk dat er onderzocht wordt of het mogelijk is om de biowasser te maken van goedkopere materialen, zodat de aanschafprijs lager wordt.

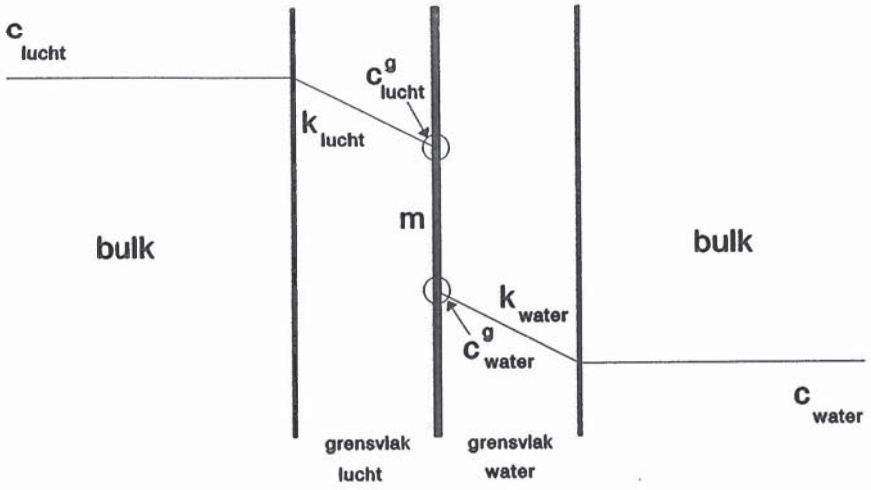
10 LITERATUURLIJST

- Anthonissen, A.C., R.C. Loehr, T.B.S. Prakasam en E.G. Srinath. 1976. *Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid.* Uit: Journal WPCF, Vol. 48, No. 5, blz. 835 - 852.
- Bartelds, J.F., E.P.W.A. Jansen en Th. H. Joostens. 1989. *Enquêteren. Het opstellen en gebruiken van vragenlijsten.* Groningen, Wolters-Noordhoff, 141 blz.
- Betterton, E.A. 1992. *Henry's law constants of soluble and moderately soluble organic gases: effects on aqueous phase chemistry.* In: Nriagu, J.O. Gaseous Pollutants: Characterization and cycling. blz. 1-50.
- Coulson, J.M., J.F. Richardson, J.R. Backhurst en J.H. Harker. 1993a. *Particle technology and separation processes.* Exeter, BPCC Wheatons Ltd., 979 blz., Chemical Engineering Volume 2.
- Coulson, J.M., J.F. Richardson, J.R. Backhurst en J.H. Harker. 1993b. *Fluid flow, heat transfer and mass transfer.* Exeter, BPCC Wheatons Ltd., 718 blz., Chemical Engineering Volume 1.
- Demmers, T.G.M. 1989. *Bestrijding van ammoniakemissies met behulp van luchtwassers.* Wageningen, IMAG-DLO, 13 blz.
- Demmers, T.G.M. 1992. *Onderzoek naar de optimalisatie van de nitrificatie in biowassers en de verwerking van het spuiwater door denitrificatie.* Wageningen, IMAG-DLO, 32 blz., conceptrapport.
- Diks, R.M. en S.P. Ottengraf. 1991. *Process engineering aspects of biological waste gas purification.* In: Proceedings van International symposium environmental biotechnology, april 1991. Oostende: s.n.
- Egeraat, A.W.S.M. van. 1991. *Inleiding in de microbiologie.* Wageningen, vakgroep microbiologie, 73 blz., collegedictaat.
- Focht, D.D. en W. Verstraete. 1977. *Biochemical ecology of nitrification and denitrification.* Advanced Microbial Ecology 1, blz. 135 - 214.
- Gaswassers. 1984. *Gaswassers.* In: Handboek modelvoorschriften luchtverontreiniging. Staatsuitgeverij, 29 blz.
- Geelen, M. van en K.W. van der Hoek. 1982. *Stankbestrijdingstechnieken voor stallen in de intensieve veehouderij.* Wageningen, IMAG-DLO, 64 blz., publikatie 167.
- Hashimoto, A.G. en D.C. Ludington, 1971. *Ammonia desorption from concentrated chicken manure slurries.* In Livestock Waste Management and Pollution Abatement, ASAE,: 117-121.
- Hunik, J.H. 1993. *Engineering aspects of nitrification with immobilized cells.* Wageningen, Sectie Proceskunde, 167 blz., proefschrift.
- Kettenis, D.L. 1990. *Simulatietechniek.* Leiden, Stenfert Kroese Uitgevers, 188 blz.
- Lekkerkerk, L.J.A., G.J. Heij en M.J.M. Hootsmans. 1995. *Ammoniak: de feiten.* Bilthoven, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 94 blz.
- Lydersen, A.L. 1983. *Mass transfer in engineering practice.* New York, John Wiley and Sons, 321 blz.
- McCabe, W.L. en J.C. Smith. 1967. *Unit operations of chemical engineering.* Tokyo, McGraw-Hill kogakusha, ltd., 1007 blz.
- Perry, R.H., D.W. Green en J.O. Maloney. 1985. *Perry's chemical engineer's handbook, sixth edition.* Singapore, McGraw-Hill book company.
- Postma, H.J.W. 1980. *Verwijdering en terugwinning van ammonium - stikstof uit afvalwater door toepassing van het Lucht - strip/absorptie - proces.* Wageningen, Vakgroep Waterzuivering, 83 blz.
- Sande-Schellekens, A.L.P. van de en G.B.C. Backus. 1993. *Ervaringen met biowassers op vleesvarkensbedrijven in PROPRO.* Rosmalen, Proefstation voor de Varkenshouderij, 56 blz.,

proefverslagnummer P 1.93.
- Scholtens, R. 1996. Persoonlijke mededeling.
- Sectie Proceskunde. 1990. *Inleiding in de proceskunde.* Wageningen, Sectie Proceskunde, 200 blz., collegediktaat.
- Sharma, B. en R.C. Ahlert. 1977. *Nitrification and nitrogen removal.* Uit: Water Research, Vol. 11, blz. 897-925.
- Sinnott, R.K. 1993. *Design.* Exeter, BPCC Wheatons Ltd., 954 blz., Chemical Engineering Volume 6.
- Smits, M. 1996. Persoonlijke mededeling.
- Srinath, E.G. en R.C. Loehr. 1974. *Ammonia desorption by diffused aeration.* Uit: Journal WPCF, vol. 46, no. 8, blz. 1939- 1957.
- Starkey, C.V. 1988. *Basic engineering design.* London, Edward Arnold, 165 blz.
- Stephanopoulos, G. 1984. *Chemical process control.* New Jersey, PTR Prentice Hall, 696 blz.
- Uenk, G.H., G.J. Monteny, T.G.M. Demmers en M.G. Hissink. 1993. *Vermindering ammoniak-emissie door gebruik van biowassers.* Wageningen, IMAG-DLO, 41 blz., rapport 93-27.
- Verein Deutscher Ingenieure. 1985. *Biologische abluftreinigung. Biowäscher.* In: VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Düsseldorf, 30 blz.
(Verein Deutscher Ingenieure, 1985)
- Wiesman, U. 1994. *Biological nitrogen removal from wastewater.* Uit: Advances in biochemical engineering biotechnology, Vol. 51, blz. 113-154.
- Wijffels, R.H., C.D. de Gooijer, S. Kortekaas en J. Tramper. 1991. *Growth and substrate consumption of Nitrobacter agilis cells immobilized in Carrageenan.* Uit: Biotechnology and bioengineering, Vol. 38, blz. 232-240.

Bijlage A **Theorie van de stofoverdracht aan het grensvlak met inachtname van de wet van Henry**

In figuur A1 is te zien hoe de stofoverdracht plaatsvindt van NH_3 in lucht en in water.



Figuur A1: Stofoverdracht van NH_3 aan het grensvlak lucht-water

Voor de stofstroomdichtheden in lucht geldt:

$$\Phi^{//}_{lu\rightarrow wa} = k_{lu} * (C_{lu} - C^{gr}_{lu}) \qquad \text{(A1)}$$

Voor de stofstroomdichtheid in water geldt:

$$\Phi^{//}_{lu\rightarrow wa} = k_{wa} \cdot (C^{gr}_{wa} - C_{wa}) \qquad \text{(A2)}$$

Volgens de wet van Henry geldt tussen de grensvlakconcentraties in lucht en water de volgende relatie:

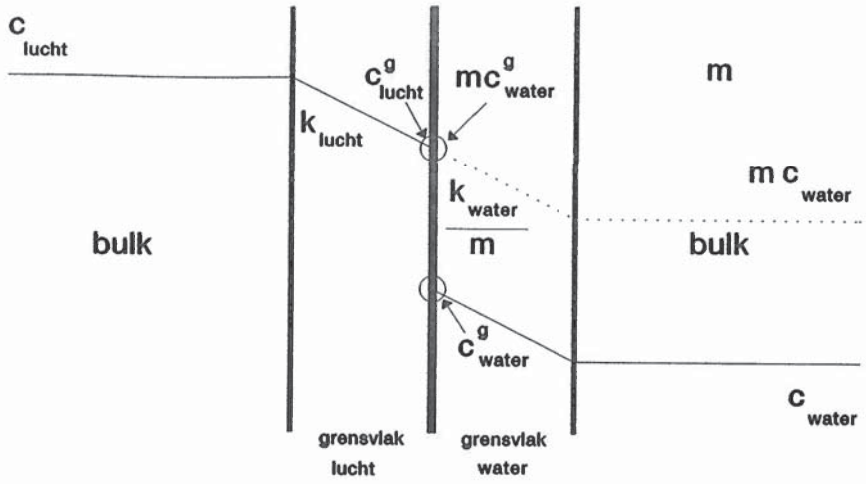
$$C^{gr}_{lu} = H_{am} \cdot C^{gr}_{wa} \qquad \text{(A3)}$$

Met H_{am} is de verdelingscoefficient van NH_3 tussen lucht en water.

Als de waterconcentraties gerelateerd worden aan de luchtconcentraties, dan geldt:

$$\Phi^{//}_{lu\rightarrow wa} = \frac{k_{wa}}{H_{am}} \cdot (H_{am} \cdot C^{gr}_{wa} - H_{am} \cdot C_{wa}) \qquad \text{(A4)}$$

In figuur B2 is te zien welke situatie nu verkregen is.



Figuur A2: Stofoverdracht van NH_3 aan het grensvlak lucht-water bij normering van de waterconcentraties

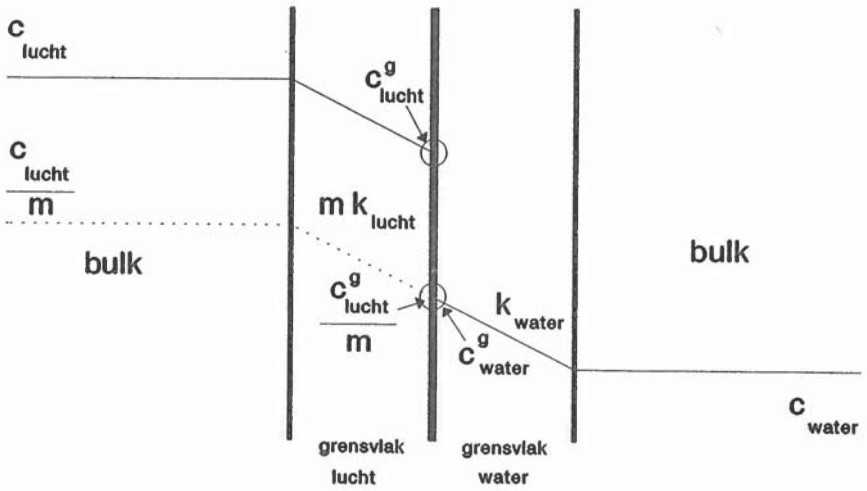
Afgeleid kan nu worden dat als de waterconcentratie gerelateerd worden aan de luchtconcentratie er geldt:

$$\Phi^{//}_{lu \to wa} = \left(\frac{H_{am}}{k_{wa}} + \frac{1}{k_{lu}}\right)^{-1} \cdot (C_{lu} - H_{am} \cdot C_{wa}) = k_{tot,lu} \cdot (C_{lu} - H_{am} \cdot C_{wa}) \qquad \text{(A5)}$$

Als de luchtconcentraties gerelateerd worden aan de waterconcentraties, dan geldt:

$$\Phi^{//}_{lu \to wa} = H_{am} \cdot k_{lu} \cdot \left(\frac{C_{lu}}{H_{am}} - \frac{C^{gr}_{lu}}{H_{am}}\right) \qquad \text{(A6)}$$

In figuur B3 is te zien welke situatie nu verkregen is.



Figuur A3: Stofoverdracht van NH_3 aan het grensvlak lucht-water bij normering van de luchtconcentraties

Dus als de luchtconcentraties genormeerd worden naar de waterconcentraties dan geldt voor de stofstroomdichtheid:

$$\Phi''_{lu-wa} = \left(\frac{1}{H_{am} \cdot k_{lu}} + \frac{1}{k_{wa}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{C_{lu}}{H_{am}} - C_{wa}\right) = k_{tot,wa} \cdot \left(\frac{C_{lu}}{H_{am}} - C_{wa}\right) \qquad \text{(A7)}$$

(Coulson et al., 1993a);(Perry et al., 1985)

$k_{tot,lu} = \frac{k_{tot,wa}}{H}$

$k_{tot,wa} = k_{tot,lu} \cdot H$

$K_{tot,wa} = k_{lu} \cdot H_{tot}$

Bijlage B Benaderingen voor de bepaling van de stofoverdrachtscoëfficient van een stof A in een vloeistof in een gepakte kolom

De gebruikte symbolen staan verklaard in de symbolenlijst aan het einde van deze appendix. De hiergenoemde relaties zijn alleen bruikbaar bij de overdracht van een stof A in een gepakte kolom. In de literatuur zijn verschillende relaties gepresenteerd:

$$k_{A,vl} = \alpha \cdot (305 \cdot \frac{L}{\mu_{vl}})^{(1-n)} \cdot (\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl} \cdot D_{A,vl}})^{\frac{1}{2}} \cdot (\frac{D_{A,vl}}{a_w}) \qquad \text{(B1)}$$

Deze relatie is afgeleid door Sherwood en Holloway (1940). De relatie is gevonden op basis van experimenten met de desorptie van O_2, H_2 en CO_2 uit water. α,n zijn constanten van het pakkingsmateriaal. In tabel B1 zijn deze constanten gegeven voor enkele pakkingsmaterialen (Perry et al., 1985).

Tabel B1 *α, n voor enkele pakkingsmaterialen. Bron: Perry et al., 1985.*

Pakkingsmateriaal	diameter (mm)	α	n
Raschig-ringen	12	920	0.35
	25	330	0.22
	38	295	0.22
	50	260	0.22
Berl-zadels	12	490	0.28
	25	560	0.28
	38	525	0.28
Tile	75	360	0.28

$$k_{A,vl} = 25.1 \cdot (\frac{D_p \cdot L}{\mu_{vl}})^{\frac{1}{2}} \cdot (\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl} \cdot D_{A,vl}})^{\frac{1}{2}} \cdot (\frac{D_{A,vl}}{D_p}) \qquad \text{(B2)}$$

Deze relatie is afgeleid door Shulman (1955). De relatie is geldig voor de pakkingsmaterialen Raschig-ringen en Berl-zadels (Perry et al., 1985).

$$k_{A,vl} = 0.021 \cdot (\frac{L}{A_{spec} \cdot \mu_{vl}})^{0.49} \cdot (\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl} \cdot D_{A,vl}})^{-\frac{1}{2}} \cdot (\frac{\rho_{vl}}{\mu_{vl} \cdot g})^{-\frac{1}{3}} \qquad \text{(B3)}$$

Deze relatie is afgeleid door Onda et al. (1959) (Perry et al., 1985).

$$k_{A,vl} = 0.0051 \cdot (\frac{L}{a_w \cdot \mu_{vl}})^{\frac{2}{3}} \cdot (\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl} \cdot D_{A,vl}})^{-\frac{1}{2}} \cdot (A_{spec} \cdot D_p)^{0.4} \cdot (\frac{\rho_{vl}}{\mu_{vl} \cdot g})^{-\frac{1}{3}} \qquad \text{(B4)}$$

Deze relatie is afgeleid door Onda et al. (1968), zij is gebaseerd op resultaten met organische vloeistoffen en water. De pakkingsmaterialen die gebruikt zijn tijdens deze experimenten zijn Raschig-ringen (6-50 mm), Berl-zadels (12-38 mm), Pall-ringen (12 en 25 mm) en bollen (12 en 25 mm) (Perry et al., 1985);(Sinnott, 1993).

$$k_{A,vl} = \beta \cdot \left(\frac{L}{\mu_{vl}}\right)^{n} \cdot \left(\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl} \cdot D_{A,vl}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_{A,vl}}{a_w}\right) \qquad \text{(B5)}$$

Met: ß ≈ 0.044 en n = 0.78 voor het pakkingsmateriaal Raschig-ringen
ß ≈ 0.086 en n = 0.72 voor het pakkingsmateriaal Berl-zadels

Deze relatie is afgeleid door Norman (1961). De relatie is geldig voor Raschig-ringen (10-50 mm) en Berl-zadels (13-38 mm) (Lydersen, 1983).

$$k_{A,vl} = C_{vl} \cdot \left(\frac{\rho_{vl}}{\mu_{vl}}\right)^{0.2} \cdot D_{A,vl}^{0.5} \cdot \left(\frac{L \cdot \rho_{vl}}{A_{spec}}\right)^{0.7} \qquad \text{(B6)}$$

Met: C_{vl} is een vloeistoffilm pakkingsfactor, voor water geldt $C_{wa} = 1000$.

Deze relatie is afgeleid door Morris en Jackson (1953) (Lydersen, 1983).

$$k_{A,vl} = \beta' \cdot \left(\frac{L \cdot D_p}{D_{A,vl}}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{\mu_{vl}}{\rho_{vl} \cdot D_{A,vl}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_{A,vl}}{D_p}\right) \qquad \text{(B7)}$$

Met: ß' = 0.32 voor Raschig-ringen
ß' = 0.25 voor Berl-zadels
Deze relatie is afgeleid door Semmelbauer (1967). Deze relatie mag alleen gebruikt worden als voldaan is aan de volgende twee voorwaarden:

a. $3 < Re_{vl} < 3000$
b. $0.01 \text{ m} < D_p < 0.05 \text{ m}$

(Coulson et al., 1993)

Voor de berekening van het fractie bevochtigd oppervlak kan de relatie gebruikt worden die is afgeleid door Onda (1968):

$$\frac{a_e}{A_{spec}} = 1 - \exp\left(-1.45 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{vl}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{L}{A_{spec} \cdot \mu_{vl}}\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{L^2 \cdot A_{spec}}{\rho_{vl} \cdot g}\right)^{-0.05} \cdot \left(\frac{L \cdot \sigma_{vl}}{\rho_{vl} \cdot \sigma_{vl} \cdot A_{spec}}\right)^{0.2}\right) \qquad \text{(B8)}$$

Met: σ_c is de kritieke oppervlaktespanning van het pakkingsmateriaal in N/m, zie tabel B2.

Tabel B2 *Kritieke oppervlaktespanningen van een aantal pakkingsmaterialen.*

Pakkingsmateriaal	σ_c in N/m
keramiek	$61 \cdot 10^{-3}$
metaal (staal)	$75 \cdot 10^{-3}$
plastic (poly-ethyleen)	$33 \cdot 10^{-3}$
koolstof	$56 \cdot 10^{-3}$

Om de geldigheid van de relaties B1 tot en met B7 te testen voor de absorptie van NH_3 in water, is voor elke relatie de stofoverdrachtscoefficient berekend onder standaardomstandigheden. Bij deze

standaardomstandigheden werd Telpac met een diameter van 70 mm als pakkingsmateriaal gebruikt. Telpac is gemaakt van poly-ethyleen en aangenomen wordt dat het vergelijkbaar is met het pakkingsmateriaal tile uit tabel B1. In tabel B3 zijn de gegevens over het pakkingsmateriaal Telpac opgenomen.

Tabel B3 *Gegevens van het pakkingsmateriaal Telpac.*

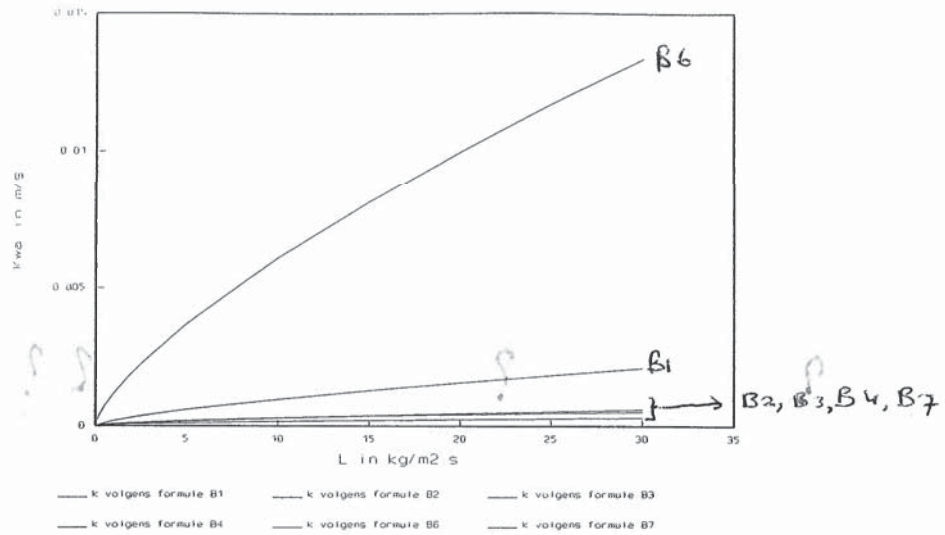
Parameters	Waarden
a_t in (m^2/m^3)	124.67
gewicht in (kg/m^3)	60
pakkingsfactor F_p in (m^2/m^3)	144
aantal stuks per m^3	7770
pakkingsoppervlak per eenheid (m^2)	0.016
D_p in (m)	0.143
ϵ (-)	0.93
α	360
n	0.28

De gegevens die de standaardomstandigheden aangeven staan vermeld in tabel B4.

Tabel B4 *Andere gegevens voor berekening stofoverdrachtscoefficienten.*

Parameters	Waarden
μ_{wa} in (Pa·s)	$0.98 \cdot 10^{-3}$
ρ_{wa} in (kg/m^3)	1000
g in (m/s^2)	9.8
D_{wa} in (m^2/s)	$2.01 \cdot 10^{-9}$
σ_c in (N/m)	$33 \cdot 10^{-3}$
σ_{wa} in (N/m)	$70 \cdot 10^{-3}$
C_{wa} (-)	1000

Voordat de stofoverdrachtscoefficienten worden berekend wordt eerst de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak berekend. Bij de gegeven omstandigheden blijkt dat $a_w/A_{spec} \approx 1$. Dit betekent dat het bevochtigd pakkingsoppervlak gelijk is aan het totaal beschikbare pakkingsoppervlak.
In figuur B1 zijn de benaderingen B1, B2, B3, B4, B6 en B7 voor de stofoverdrachtscoefficienten uitgezet tegen het vloeistofdebiet per dwarsoppervlak, L. Benadering B5 is niet weergegeven in deze figuur omdat het resultaat sterk afwijkend was van de overige benaderingen.
In figuur B1 is te zien dat drie benaderingen ongeveer dezelfde orde van grootte geven voor de stofoverdrachtscoefficiënt van NH_3 in water. Van deze drie benaderingen is de jongste benadering gekozen om mee verder te werken in dit verslag. Dit is relatie B4 van Onda et al. (1968).



Figuur B1 k_{wa} uitgezet tegen L

Symbolenlijst:

$k_{A,vl}$ is de stofoverdrachtscoefficiënt van stof A in de vloeistof in m/s
L is het massadebiet van de vloeistof per dwarsoppervlak in kg/m^2.s
μ_{vl} is de dynamische viscositeit van de vloeistof in Pa.s
ρ_{vl} is de dichtheid van de vloeistof in kg/m^3
$D_{A,vl}$ is de diffusiecoefficiënt van stof A in de vloeistof in m^2/s
a_w is het bevochtigde pakkingsoppervlak per volume-eenheid pakkingsmateriaal in m^2/m^3
D_p is de diameter van een bol die hetzelfde oppervlak heeft als een eenheid pakking in m
g is de gravitatieconstante in m/s^2
A_{spec} is het totale pakkingsoppervlak per volume-eenheid pakkingsmateriaal in m^2/m^3
σ_{vl} is de oppervlaktespanning van de vloeistof in N/m

Bijlage C Benaderingen voor de bepaling van de stofoverdrachtscoëfficient van een stof A in een gas in een gepakte kolom

De gebruikte symbolen staan verklaard in de symbolenlijst aan het einde van deze appendix.
In de literatuur zijn verschillende relaties gepresenteerd:

$$h_D = 0.99 \cdot \left(\frac{D_p \cdot G}{\mu_{ga}}\right)^{-0.41} \cdot \left(\frac{\mu_{ga}}{\rho_{ga} \cdot D_{A,ga}}\right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{G}{\rho_{ga} \cdot M_{ga}}\right) \qquad \text{(C1)}$$

Deze relatie is afgeleid door Gamson, Thodos en Hougen (1943) voor het gedrag in gepakte kolommen met bollen en zadels. Deze relatie mag gebruikt worden als Re > 350 (Perry et al., 1985).

$$h_D = 1.195 \cdot \left(\frac{D_p \cdot G}{\mu_{ga} \cdot (1-\epsilon)}\right)^{-0.36} \cdot \left(\frac{\mu_{ga}}{\rho_{ga} \cdot D_{A,ga}}\right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{G}{\rho_{ga} \cdot M_{ga}}\right) \qquad \text{(C2)}$$

Deze relatie is afgeleid door Shulman en Margolis (1957) en is gebaseerd op data van en naphtaleen-lucht systeem (Perry et al., 1985).

$$k_{A,ga} = K_5 \cdot \left(\frac{G}{A_{spec} \cdot \mu_{ga}}\right)^{0.7} \cdot \left(\frac{\mu_{ga}}{\rho_{ga} \cdot D_{ga}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot (A_{spec} \cdot D_p)^{-2.0} \cdot (A_{spec} \cdot D_{A,ga}) \qquad \text{(C3)}$$

Met: K_5 = 5.23 voor een pakkingsmateriaal met een maat > 15 mm
K_5 = 2.00 voor een pakkingsmateriaal met een maat < 15 mm

Deze relatie is afgeleid door Onda, Takeuchi en Okumoto (1968) en is gebaseerd op data van gasabsorptie en distillatie met diverse pakkingsmaterialen, zoals Pall-ringen en Berl-zadels (Sinnott, 1993) (Perry et al., 1985).

$$k_{A,ga} = \beta \cdot \left(\frac{D_p \cdot G}{\mu_{ga}}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{\mu_{ga}}{\rho_{ga} \cdot D_{A,ga}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{D_{A,ga}}{D_p}\right) \qquad \text{(C4)}$$

Met: β = 0.69 voor Raschig-ringen
β = 0.86 voor Berl-zadels

Deze relatie is afgeleid door Semmelbauer (1967) en is geldig voor $100 < Re_{ga} < 10000$ en voor $0.01m < D_p < 0.05m$ (Coulson et al., 1993).

De relatie tussen $k_{A,ga}$ en h_D ziet er als volgt uit:

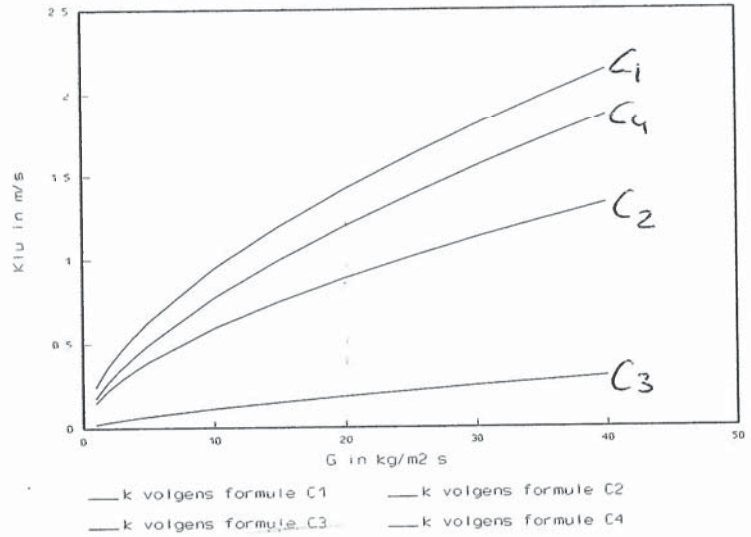
$$k_{A,ga} = h_D \cdot R \cdot T \qquad \text{(C5)}$$

Om de geldigheid van de relaties (C1) tot en met (C4) te testen voor de overdracht van NH_3 in lucht, is voor elke relatie de stofoverdrachtscoëfficiënt berekend onder standaardomstandigheden en een variërend massadebiet van het gas G. Bij deze standaardomstandigheden werd Telpac 2" als pakkingsmateriaal gebruikt, de gegevens hiervan staan in tabel B3 In tabel C1 staan de gegevens vermeld die de standaardomstandigheden van de test aangeven.

Tabel C1 *Gegevens van de standaardomstandigheden voor de berekening van de stofoverdrachtscoëfficiënt*

Parameters	Waarden
μ_{lu} (Pa.s)	$1.8 \cdot 10^{-5}$
ρ_{lu} (kg/m^3)	1.3
lD_{lu} (m^2/s)	$5.19 \cdot 10^{-4}$
ρ_{gf} (Pa)	$1 \cdot 10^5$
M_B (kg/kmol)	28
R (J/kmol.K)	8314
T (K)	293

In figuur C1 zijn de stofoverdrachtscoëfficiënten van NH_3 in lucht uitgezet tegen het massadebiet per dwarsoppervlak G.



Figuur C1 *k_{lu} uitgezet tegen G*

In figuur C1 is te zien dat drie benaderingen dezelfde orde van grootte geven. Er is gekozen voor één van deze benaderingen, te weten relatie (C4). Voor deze benadering is gekozen, omdat dit de jongste van de drie benaderingen is. In dit verslag wordt dus k_{lu} benaderd met relatie (C4) van Semmelbauer (1967).

Symbolenlijst:

h_D is de stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in het gas in kmol/s.m^2.Pa
$k_{A,ga}$ is de stofoverdrachtscoëfficiënt van stof A in het gas in m/s
D_p is de diameter van een bol die hetzelfde oppervlak heeft als een eenheid pakkingsmateriaal in m
G is het massadebiet van het gas per dwarsoppervlak in kg/s.m^2
μ_{ga} is de dynamische viscositeit van het gas in Pa.s
ρ_{ga} is de dichtheid van het gas in kg/m^3
$D_{A,ga}$ is de diffusiecoëfficiënt van stof A in het gas in m^2/s
ρ_{gf} is de druk van de inerte gedeelten van het gas in Pa
M_{ga} is het gemiddeld moleculair gewicht van de gasstroom in kg/kmol
ϵ is de porositeit van het pakkingsmateriaal (-)
A_{spec} is het totale pakkingsoppervlak per volume-eenheid pakkingsmateriaal in m^2/m^3

R is de gasconstante in J/kmol.K (= 8314 J/kmol.K)
T is de absolute temperatuur in K

$$\angle 5 \Rightarrow \quad k_{A,gas} = h_D \cdot R \cdot T$$

$$\frac{m}{s} = \frac{kmol}{m^2 \cdot s \cdot Pa} \cdot \frac{J}{kmol \cdot K} \cdot K$$

$$\frac{m}{s} = \frac{J}{m^2 \cdot s \cdot Pa} = \frac{J}{m^2 \cdot s \cdot \frac{N}{m^2}}$$

$$\& \quad \frac{m}{s} = \frac{J}{s \cdot N} = \frac{N \cdot m}{s \cdot N} = \frac{m}{s} \; !$$

Bijlage D Benaderingen voor de bepaling van diffusiecoëfficiënten

Als de diffusiecoëfficiënten niet experimenteel bepaald zijn dan moeten deze geschat worden. De diffusiecoëfficiënt voor de diffusie van een stof A in een gas B wordt gegeven door de volgende vergelijking:

$$lD_{AB} = lD_A = \frac{10^{-3} * T^{1.75} * [\frac{(M_A + M_B)}{M_A * M_B}]^{\frac{1}{2}}}{P * [(\Sigma v)_A^{\frac{1}{3}} + (\Sigma v)_B^{\frac{1}{3}}]^2}$$

Met: lD_A is de diffusiecoëfficiënt van stof A in gas B in cm^2/s
T is de absolute temperatuur van het gas B in K
M_A is de moleculaire massa van stof A in kg/kmol
M_B is de moleculaire massa van gas B in kg/kmol
P is de totale druk die heerst in atm
$(\sum v)_A$ is het atomaire diffusievolume van stof A (voor NH_3 geldt: $(\Sigma v) = 14.9$ (Perry et al., 1985))
$(\sum v)_B$ is het atomaire diffusievolume van stof B (voor lucht geldt: $(\Sigma v) = 20.1$ (Perry et al., 1985))

Deze vergelijking is afgeleid door Fuller, Schettler en Giddings (1965) en is geldig voor tenminste drukken tot 10 atm. Door de berekende diffusiecoëfficiënt te vermenigvuldigen met 10^{-4} wordt de diffusiecoëfficiënt in m^2/s verkregen (Perry et al., 1985).

De diffusiecoëfficiënt voor de diffusie van stof A in een vloeistof B wordt gegeven door de volgende vergelijking:

$$lD_{A,B} = lD_A = \frac{1.173 * 10^{-16} * \phi_B^{\frac{1}{2}} * M_B^{\frac{1}{2}} * T}{\mu_B * V_A^{0.6}}$$

Met: lD_A is de diffusiecoëfficiënt van stof A in de vloeistof B in m^2/sec
ϕ_B is een dimensieloze associatiefactor voor de vloeistof B (voor water geldt: $\phi = 2.26$ (Coulson et al., 1993b)
M_B is de moleculaire massa van de vloeistof B in kg/kmol
T is de absolute temperatuur in K
μ_B is de dynamische viscositeit van de vloeistof B in Pa.sec
V_A is het moleculaire volume van stof A in $m^3/kmol$ (voor NH_3 geldt: $V = 0.0258$ $m^3/kmol$ (Coulson et al., 1993b)

Deze vergelijking is afgeleid door Wilke en Chang (1955) en is geldig voor diffusie in verdunde vloeistoffen van niet-electrolyten (Coulson et al., 1993b).

Bijlage E Berekening van het verloop van de dissociatie in afhankelijkheid van de pH en de temperatuur

Srinath en Loehr (1974) geven aan dat het verloop van de dissociatie een functie is van de pH, de base- en de waterconstante van de reactie. De baseconstante K_b van de dissociatie van NH_3 is gelijk aan:

$$K_b = \frac{[NH_4^+][OH^-]}{[NH_3]} \qquad \text{(E1)}$$

Met: K_b is de baseconstante van de dissociatie van NH_3 in mol/l
[A] is de concentratie van stof A in mol/l

Tevens is bekend dat de waterconstante K_w van het waterevenwicht: $H_2O \rightleftarrows H^+ + OH^-$ gelijk is aan:

$$K_w = [H^+][OH^-] \qquad \text{(E2)}$$

Met: K_w is de waterconstante in mol^2/l^2

De verhouding tussen K_w en K_b is dan gelijk aan:

$$\frac{K_w}{K_b} = \frac{[H^+][NH_3]}{[NH_4^+]} \qquad \text{(E3)}$$

Het is bekend dat de volgende relatie geldt tussen $[H^+]$ en de pH:

$$pH = -\log[H^+] \Rightarrow [H^+] = 10^{-pH} \qquad \text{(E4)}$$

Als dit ingevuld wordt in vergelijking E3 dan geldt:

$$\frac{K_w}{K_b} 10^{pH} = \frac{[NH_3]}{[NH_4^+]} \qquad \text{(E5)}$$

De totale concentratie aan ammonia en ammonium in water, ofwel de ammoniaciale concentratie [aNtotaal], is te schrijven als:

$$[aNtotaal] = [NH_3] + [NH_4^+] \Leftrightarrow [NH_3] = [aNtotaal] - [NH_4^+] \qquad \text{(E6)}$$

De uitdrukking voor $[NH_3]$ uit formule E6 kan ingevuld worden in vergelijking E5, er geldt dan:

$$\frac{K_w}{K_b} 10^{pH} = \frac{[aNtotaal] - [NH_4^+]}{[NH_4^+]} \qquad \text{(E7)}$$

Voor de fractie $[NH_4^+]$, F_{amm}, kan geschreven worden:

$$F_{amm} = \frac{[NH_4^+]}{[aNtotaal]} \qquad \text{(E8)}$$

Als dit ingevuld wordt in vergelijking E7 dan volgt hieruit dat de fractie aan ammonium F_{amm} gelijk is aan:

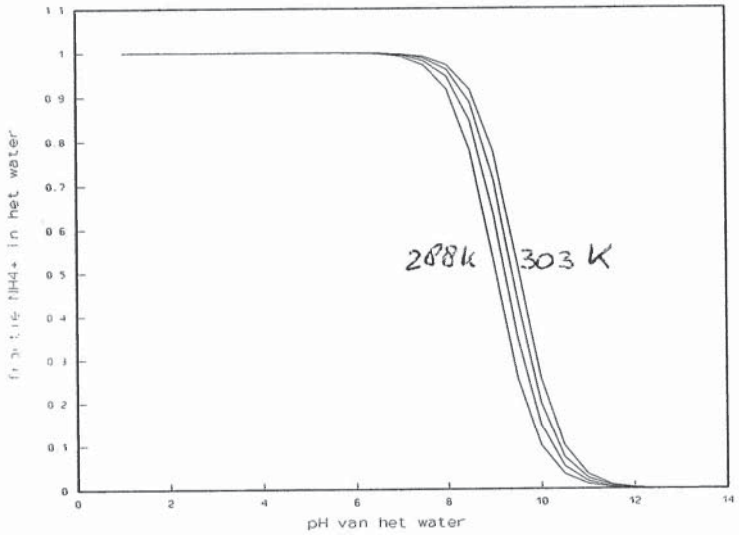
$$F_{amm} = \frac{1}{\frac{K_w}{K_b} 10^{pH} + 1} \qquad \text{(E9)}$$

De totale ammoniaciale concentratie wordt meestal gemeten, de concentratie aan ammonium kan dan met formule E9 berekend worden bij een bekende pH, K_b en K_w.
De verhouding tussen K_b en K_w kan berekend worden met de volgende relatie:

$$\frac{K_b}{K_w} = [-3.398 \ln(0.0241\,\theta)]\,10^9 \qquad \text{(E8)}$$

Met: θ is de temperatuur in °C

In figuur E1 is het effect van de pH en de temperatuur te zien op het verloop van de dissociatie.



Figuur E1 Verloop van de dissociatie bij verschillende pH's en temperaturen

Uit figuur D1 blijkt dat bij een pH lager dan 7 de dissociatie volledig verloopt en er dus alleen ammonium in het water aanwezig is. Als de pH hoger wordt dan 11 dan verloopt de dissociatie bijna niet meer (Srinath en Loehr, 1974).

Bijlage F **Namen en adressen van fabrikanten van biowassers**

In deze bijlage zijn de namen en adressen gegeven van de fabrikanten die benaderd zijn voor het meewerken aan dit onderzoek.

1. Matthëus Milieutechniek
   ter attentie van dhr. Matthëus
   Grebbedijk 15
   6702 DS WAGENINGEN

2. Bionet Milieutechniek bv
   ter attentie van dhr. van Banning
   Schouwrooy 24
   5281 RE BOXTEL

3. RIMU
   p/a dhr. C. Verhaegh
   Zandstraat 14
   5984 PA KONINGSLUST

4. Tauw Milieu
   ter attentie van dhr. R. Oosting
   Postbus 133
   7400 AC DEVENTER

5. Eurochemie, produktie en innovatie
   ter attentie van dhr. F.J.W. Kooiman
   Postbus 263
   7570 AG OLDENZAAL

Bijlage G **ENQUÊTE: BIOWASSERS IN NEDERLAND**

In het kader van mijn studie Landbouwtechniek, voer ik een 6-maands onderzoek uit bij de afdeling Mestbehandeling en Emissies van het IMAG-DLO. Dit onderzoek gaat over de kansen en de mogelijkheden om biowassers op de boerderij toe te passen. Een onderdeel van dit onderzoek is het houden van een mondelinge enquête onder bedrijven waar een biowasser is geplaatst.

In de komende 1,5 uur zal ik u een aantal vragen stellen. Het is de bedoeling dat u de vragen zo goed mogelijk probeert te beantwoorden en dat u niet te lang nadenkt over elke vraag.

Uw antwoorden zullen vertrouwelijk worden behandeld. Dit betekent dat bij de verwerking van de gegevens en de presentatie van de resultaten geen gebruik wordt gemaakt van uw naam en/of adres. Van het eindresultaat zult u ter zijner tijd een samenvatting ontvangen.

U wordt alvast bedankt voor uw medewerking.

Inge Satter
IMAG-DLO, afdeling Mestbehandeling en Emissies
Vakgroep Agrotechniek & -fysica

In deze enquête wordt met de term biowasser bedoeld:

Een biowasser is een koker of een bak met daarin contactmateriaal. Door dit contactmateriaal wordt de stallucht geblazen of gezogen met een ventilator. Tegelijkertijd wordt er water over het contactmateriaal gecirculeerd met een pomp. Dit water noemt men waswater. Door het contactmateriaal onstaat er een groot wateroppervlak dat zorgt voor een intensieve menging tussen water en lucht. Hierdoor kan de ammoniak uit de stallucht efficiënt opgenomen worden in het waswater.

In het waswater en op het contactmateriaal zitten bacteriën die ervoor kunnen zorgen dat ammoniak wordt omgezet naar nitraat. Om te voorkomen dat de waswaterconcentraties van onder andere ammoniak zo hoog worden dat de omzetting en de opname van ammoniak geremd wordt, wordt een gedeelte van het waswater afgevoerd. Dit noemt men spuiwater.

Een biowasser kan zorgen voor een reductie van de ammoniakemissie uit stal en opslag. Tevens kan de biowasser zorgen voor de reductie van geur uit stal en opslag.

Er volgen nu eerst een aantal algemene vragen over u en dit bedrijf.

1. Wat is uw functie binnen dit bedrijf?

   0 eigenaar van dit bedrijf
   0 werknemer van dit bedrijf
   0 anders, namelijk.....
   .....
   .....

2. Uit hoeveel stallen bestaat dit gehele bedrijf?

   uit ..... stallen

3. In hoeveel van deze stallen zijn er biowassers geplaatst?
   (Bij het beantwoorden van deze vraag maakt het niet uit hoeveel biowassers er in de stal zijn geplaatst en of de geplaatste biowassers nog werken of niet.)

   in ..... stal(len) zijn biowassers geplaatst

De volgende vragen gaan over de stal(len) waarin de biowassers zijn geplaatst.

4. Het is de bedoeling dat u nu een schets maakt van de stal(len) die u genoemd heeft bij vraag 3 op bladzijde 3. Wilt u in de schets aangeven:
   - waar de afdelingen in de stal geplaatst zijn;
   - wat de diersoort per afdeling of per stal is;
   - wat het aantal dierplaatsen per afdeling of per stal is;

   - waar de kruisstroomwassers zijn geplaatst (aangeven met kr);
   - waar de tegenstroomwassers zijn geplaatst (aangeven met tg);
   - wat het jaar van aanschaf is van de kruis- of tegenstroomwasser;
   - of de ventilator de lucht door de kruis- of tegenstroomwasser zuigt (aangeven met z-kr of z-tg) of blaast (aangeven met b-kr of b-tg);
   - wat de maximale ventilatiecapaciteit van de ventilator van de kruis- of tegenstroomwasser in m^3/uur is;
   - of er een denitrificatiestap na de kruis- of tegenstroomwasser aanwezig is (aangeven met den);
   - of er een pH-buffering in de kruis- of tegenstroomwasser aanwezig is (aangeven met pH);

Schets van stal 1

Schets van stal 2

Schets van stal 3

5. Beschrijf en / of schets het huisvestingssysteem waarvan u gebruik maakt in uw stal.
(Wilt u hierbij denken aan emissie-arme technieken in uw stal, groen-label, roosteraandeel, huisvesting op droge/natte mest, mestopslag, voer- en drinksysteem, etc.)

Huisvestingssysteem in stal 1:

Huisvestingssysteem in stal 2:

Huisvestingssysteem in stal 3:

Na deze vragen groepen maken van biowassers met gelijke kenmerken in stromingsprincipe, maximale ventilatiecapaciteit, diersoort, huisvestingssysteem, blazende of zuigende ventilator, denitrificatiestap, pH-buffering.

De volgende vragen gaan over een aantal algemene kenmerken van de biowasser, zoals electriciteitsverbruik, technische levensduur, etc.

Instructieblok a:
Het is de bedoeling dat u de vragen 1 tot en met 14 beantwoordt voor alle groepen biowassers, die aanwezig zijn op uw bedrijf.

1. Welke fabrikant heeft deze groep biowassers aan u geleverd?

   O Mattheus Milieutechniek
   O Bionet Milieutechniek
   O RIMU
   O Eurochemie, produktie en innovatie
   O Dorset Staltechniek (in samenwerking met Tauw Milieu)
   O anders, namelijk.....
   .....

2. Waarom heeft u deze groep biowassers aangeschaft?
   (Te denken valt aan hinderwet, medewerking verlenen aan onderzoek, etc.)

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

De technische levensduur van een produktiemiddel is de periode waarin het produktiemiddel de prestatie kan leveren waarvoor het werd geconstrueerd. De technische levensduur is afhankelijk van de omvang en aard van het gebruik, de mate van onderhoud, enzovoort.
Voorbeeld: U heeft een bietenrooier gekocht om de bieten te rooien. Na tien jaar is het technisch niet meer mogelijk om de bieten te rooien. De technische levensduur van de bietenrooier is dus tien jaar.

3. Wat is volgens u de gemiddelde technische levensduur van een biowasser van deze groep?

   . . . jaar

4. Wat is volgens de biowasserfabrikant de gemiddelde technische levensduur van een biowasser van deze groep?

   . . . jaar

De economische levensduur van een produktiemiddel is de periode waarin het produktiemiddel doelmatig in het bedrijf kan worden aangewend. Technische vooruitgang en wijziging van de marktomstandigheden of milieuwetten kunnen dus tot economische slijtage leiden.
Voorbeeld: U heeft een bietenrooier gekocht en deze kan twee rijen tegelijkertijd oogsten. Na 3 jaar komt er een nieuwe bietenrooier op de markt die vijf rijen tegelijertijd kan oogsten en deze kost u op jaarbasis minder dan de oude bietenrooier. De economische levensduur van de oude bietenrooier is dus drie jaar.

5. Wat is volgens u de gemiddelde economische levensduur van een biowasser van deze groep?

   . . . jaar

6. Wat is volgens de biowasserfabrikant de gemiddelde economische levensduur van een biowasser van deze groep?

   . . . jaar

7. Kunt u een schatting geven van het gemiddeld jaarlijks electriciteitsverbruik van een biowasser, inclusief de ventilator, van deze groep?

   gemiddeld . . . . kWh per jaar per biowasser

Indien achter de biowasser een denitrificatiestap staat opgesteld, wordt met spuiwater bedoeld, het water dat van de biowasser naar de denitrificatiestap gaat.

8. Kunt u een schatting geven van de gemiddelde hoeveelheid spuiwater die gespuid wordt door een biowasser van deze groep?

   gemiddeld . . . . liter spuiwater per biowasser per uur/dag*

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

De onderstaande vragen hebben betrekking op de opslag van het spuiwater binnen uw bedrijf. Ik verzoek u:

- bij vraag 9 aan te geven op welke plaats(en) u het spuiwater van een gemiddelde biowasser van deze groep opslaat binnen uw bedrijf.
  (Bij deze vraag mogen meerdere antwoordmogelijkheden worden aangekruist.)
- bij vraag 10 een schatting te geven van het percentage spuiwater dat u op een bepaalde plaats opslaat.
- bij vraag 11 een schatting te geven van de gemiddelde kosten van het opslaan van 1 m^3 spuiwater in deze opslagplaats.
  (Hierbij valt te denken aan de kosten van het bouwen van een nieuwe opslag, van het uitbreiden van de huidige opslag, etcetera.)

Vraag 9 Opslagplaats spuiwater:	*Vraag 10* Percentage spuiwater in bepaalde opslagplaats	*Vraag 11* Gemiddelde kosten per m^3 opgeslagen spuiwater
O de mestopslag	... % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 opgeslagen spuiwater
O een apart bassin	... % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 opgeslagen spuiwater
O de denitrificatiestap	... % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 opgeslagen spuiwater
O anders, namelijk.....	... % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 opgeslagen spuiwater

De onderstaande vragen hebben betrekking op de afvoer van het spuiwater van uw bedrijf.
Ik verzoek u:

- bij vraag 12 aan te geven naar welke plaats(en) het spuiwater van een gemiddelde biowasser van deze groep wordt afgevoerd.
  (Bij deze vraag mogen meerdere antwoordmogelijkheden worden aangekruist.)
- bij vraag 13 een schatting te geven van het percentage spuiwater dat naar die plaats wordt afgevoerd.
- bij vraag 14 een schatting te geven van de gemiddelde kosten van het afvoeren van 1 m^3 spuiwater naar deze plaats.

Vraag 12 Afvoerplaats spuiwater:	*Vraag 13* Percentage spuiwater naar afvoerplaats	*Vraag 14* Gemiddelde kosten voor het afvoeren van 1 m^3 spuiwater
O riool	. . . % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 afgevoerd spuiwater
O eigen land	. . . % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 afgevoerd spuiwater
O iemand anders zijn land	. . . % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 afgevoerd spuiwater
O mestbank	. . . % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 afgevoerd spuiwater
O zuiveringsinstallatie	. . . % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 afgevoerd spuiwater
O anders, namelijk.....	. . . % van de totale hoeveelheid spuiwater	..... gulden per m^3 afgevoerd spuiwater

De volgende vragen gaan over de installatie van een gemiddelde biowasser uit een bepaalde groep in een nieuwe stal. Voor dat de vragen gesteld gaan worden zal eerst een definitie van het begrip installatie en het begrip produktie gegeven worden.

Definitie begrip installatie biowasser:
De voorzieningen die gemaakt of aangebracht moeten worden om de biowasser te kunnen plaatsen en aansluiten op uw bedrijf. Na de installatie is de biowasser gebruiksklaar.

Definitie begrip produktie:
Als in deze enquete van produktie wordt gesproken wordt bedoeld het bedrijfsmatig houden van een bepaalde diersoort.

1. Zijn er op dit bedrijf ooit groepen biowassers geïnstalleerd in een nieuwe stal (nieuwbouwsituatie)?

   O ja
   O nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 14.

2. Bij welke groepen biowassers, is een gemiddelde biowasser van deze groep geïnstalleerd in een nieuwe stal?

   .....
   .....

Instructieblok b:
Het is de bedoeling dat u de vragen 3 tot en met 5 beantwoordt voor de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2.

3. Welke bouwkundige aanpassingen zijn er gedaan om een gemiddelde biowasser uit deze groep te kunnen installeren in een nieuwe stal?

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

4. Hoe lang duurde de totale installatie van deze gehele groep biowassers in een nieuwe stal?

   ..... uur / dagen / weken / maanden* voor de gehele groep biowassers

5. Kunt u een schatting geven van de kosten van aanschaf en installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een nieuwe stal? (all-in: arbeid, bouw, biowasser, etc.)

   ..... gulden per biowasser

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

De volgende vragen gaan over de installatie van biowassers in een bestaande stal.

1. Zijn er op dit bedrijf ooit groepen biowassers geïnstalleerd in een bestaande stal?

   O ja
   O nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 18.

2. Bij welke groepen biowassers, is een gemiddelde biowasser van deze groep geïnstalleerd in een bestaande stal?

   .....
   .....

Instructieblok c:
Het is de bedoeling dat u vragen 3 tot en met 6 beantwoordt voor de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2.

3. Welke bouwkundige aanpassingen zijn er gedaan om een gemiddelde biowasser uit deze groep te kunnen installeren in een bestaande stal?

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

4. Wanneer is een gemiddelde biowasser van deze groep geïnstalleerd in de bestaande stal?

   O begin van de mestronde
   O tijdens de mestronde, ofwel tijdens de produktiecyclus
   O einde van de mestronde
   O toen de stal leegstond
   O anders, namelijk.....
   .....

5. Hoe lang duurde de totale installatie van deze gehele groep biowassers in een bestaande stal?

   ..... uur / dagen / weken / maanden* voor de gehele groep biowassers

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

6. Kunt u een schatting geven van de kosten van aanschaf en installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal? (all-in: arbeid, bouw, biowasser, etc.)

   ..... gulden per biowasser

7. Heeft de produktie, door de installatie van een gemiddelde biowasser uit één van deze groepen in een bestaande stal, weleens volledig stilgelegen?

   0 ja
   0 nee

Zo nee, ga dan verder met *instructieblok e* op bladzijde 16.

8. Bij welke groepen biowassers heeft de produktie volledig stilgelegen, door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal?
   (Zie vraag 2 op bladzijde 14 voor de nummers van de groepen biowassers, die geïnstalleerd zijn in een bestaande stal.)

   .....
   .....

Instructieblok d:
Het is de bedoeling dat u de vragen 9 tot en met 11 eerst beantwoordt voor één van de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 8. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 9 tot en met 11 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 8. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met *instructieblok e* op bladzijde 16.

9. Was er van te voren gepland dat de produktie volledig stil zou liggen door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal?

   0 ja
   0 nee

Zo nee, ga dan verder met vraag 11.

10. Hoe lang was er gepland dat de produktie, door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal, volledig zou stilliggen?

    ..... uur / dagen / weken / maanden * per biowasser

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

11. Hoe lang heeft de produktie, door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal, in werkelijkheid volledig stilgelegen?

    ..... uur / dagen / weken / maanden * per biowasser

Ga terug naar *instructieblok d* op bladzijde 15.

Instructieblok e:
Het is de bedoeling dat u de vragen 12 tot en met 16 beantwoordt voor de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2 op bladzijde 14.

12. Heeft u weleens problemen gehad, door de installatie van een gemiddelde biowasser van één van deze groepen in een bestaande stal?

    O ja
    O nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 18.

13. Bij welke groepen biowassers zijn er problemen opgetreden, door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal, ?
    (Zie vraag 2 op bladzijde 14 voor de nummers van de groepen biowassers, die geïnstalleerd zijn in een bestaande stal.)

    .....
    .....

Instructieblok f:
Het is de bedoeling dat u de vragen 14 tot en met 16 eerst beantwoordt voor één van de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 13. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 14 tot en met 16 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 13. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 18.

14. Beschrijf de problemen die optraden door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal. Indien dit mogelijk is moet u de problemen kwantificeren.
    (Bij deze vraag mogen meerdere problemen worden genoemd, bv. biowasser functioneert niet, x varkens ziek, etc.)

    .....
    .....
    .....
    .....
    .....

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

Instructieblok g:
Het is de bedoeling dat u de vragen 15 en 16 beantwoordt voor één probleem dat u genoemd heeft bij vraag 14. Dit wordt herhaald totdat de vragen 15 en 16 beantwoord zijn voor alle problemen die u genoemd heeft bij vraag 14. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok f* op bladzijde 16.

15. Hoe lang duurde dit probleem, dat optrad door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal?

..... uur / dagen / weken / maanden*

16. Wat was de oorzaak voor dit probleem, dat optrad door de installatie van een gemiddelde biowasser van deze groep in een bestaande stal?
(U mag meerdere oorzaken noemen.)

.....
.....
.....
.....
.....

Ga terug naar *instructieblok g* op bladzijde 17.

De volgende vragen gaan over het periodiek onderhoud dat aan een gemiddelde biowasser uit een bepaalde groep wordt uitgevoerd. Periodiek onderhoud wil zeggen dat u in een bepaald tijdsbestek steeds dezelfde handelingen verricht. Het is een gepland onderhoud met handelingen die in een bepaalde tijd worden herhaald. Een voorbeeld van periodiek onderhoud is het tweewekelijks reinigen van het filter van de biowasser.
N.B. Een periodieke controle wordt niet gezien als een periodiek onderhoud!!!

Als eerste gaan de vragen over het verrichten van groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser uit een bepaalde groep. Groot periodiek onderhoud wordt niet frequenter uitgevoerd dan 1 keer per 2 maanden.

1. Wordt er weleens groot periodiek onderhoud verricht aan een gemiddelde biowasser uit één van de op uw bedrijf aanwezige groepen biowassers?

   O ja
   O nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 23.

2. Bij welke groepen biowassers wordt er groot periodiek onderhoud verricht aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

   .....
   .....

Instructieblok h:
Het is de bedoeling dat u de vragen 3 tot en met 18 beantwoordt voor één van de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 3 tot en met 18 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 23.

3. Welke soorten groot periodiek onderhoud worden er in het algemeen verricht aan een gemiddelde biowasser van deze groep?
   (Bv. reinigen vulmateriaal, reinigen filter, etc.)

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

Instructieblok i:
Het is de bedoeling dat u de vragen 4 tot en met 18 beantwoordt voor één van de soorten groot periodiek onderhoud die u genoemd heeft bij vraag 3. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 4 tot en met 18 beantwoord zijn voor alle soorten groot periodiek onderhoud die u genoemd heeft bij vraag 3. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok h* op bladzijde 18.

4. Hoe wordt dit soort groot periodiek onderhoud uitgevoerd aan een gemiddelde biowasser van deze groep?
(Beschrijving van de onderhoudsmethode.)

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

5. Hoeveel keer in een bepaalde tijd wordt dit soort groot periodiek onderhoud uitgevoerd aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

.....

6. Hoeveel keer in een bepaalde tijd wordt door de biowasserfabrikant geadviseerd dit soort groot periodiek onderhoud te verrichten aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

.....

7. Wanneer wordt dit soort groot periodiek onderhoud uitgevoerd aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

0 aan het begin van de mestronde
0 tijdens de mestronde, ofwel tijdens de produktiecyclus
0 aan het einde van de mestronde
0 als de afdeling of de stal leegstaat
0 anders, namelijk.....
.....
.....

8. Wanneer wordt er door de biowasserfabrikant geadviseerd dit soort groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep uit te voeren?

O geen advies
O aan het begin van de mestronde
O tijdens de mestronde, ofwel tijdens de produktiecyclus
O aan het einde van de mestronde
O als de afdeling of de stal leegstaat
O anders, namelijk.....
.....
.....

9. Wie voert dit soort groot periodiek onderhoud uit aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

O uzelf
O een werknemer
O biowasserfabrikant
O iemand anders, namelijk.....
.....
.....

10. Hoeveel tijd kost het verrichten van dit soort groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

.... minuten / uur* per biowasser

11. Hoe hoog schat u dat de kosten zijn van dit soort groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep? (Let op: uw eigen arbeid niet meetellen in de kosten!)

O ..... gulden per biowasser
O geen idee hoe hoog de kosten zijn

12. Functioneerde een gemiddelde biowasser van deze groep in het algemeen technisch beter na dit soort groot periodiek onderhoud?

O de gemiddelde biowasser van deze groep functioneerde technisch beter na dit soort groot periodiek onderhoud, ga nu verder met vraag 15 op bladzijde 21.
O de gemiddelde biowasser van deze groep functioneerde technisch hetzelfde na dit soort groot periodiek onderhoud, ga nu verder met vraag 15 op bladzijde 21.
O de gemiddelde biowasser van deze groep functioneerde technisch slechter na dit soort groot periodiek onderhoud, ga nu verder met vraag 13 op bladzijde 21.

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

13. Welke onderdelen van een gemiddelde biowasser van deze groep functioneerden er technisch slechter na dit soort groot periodiek onderhoud?

.....
.....
.....
.....

Instructieblok j:
Het is de bedoeling dat u vraag 14 beantwoordt voor de onderdelen van de biowasser die u genoemd heeft bij vraag 13.

14. Waarom functioneert dit onderdeel van een gemiddelde biowasser van deze groep technisch slechter na dit soort groot periodiek onderhoud?

.....
.....
.....
.....
.....

15. Heeft u door dit soort groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep weleens problemen gehad?

O ja
O nee

Zo nee, ga dan terug naar *instructieblok i* op bladzijde 19.

16. Welke problemen traden er op door dit soort groot periodiek onderhoud te verrichten aan een gemiddelde biowasser van deze groep? Indien dit mogelijk is moet u de problemen kwantificeren. (Bij deze vraag mogen meerdere problemen worden genoemd)

.....
.....
.....
.....
.....

Instructieblok k:
Het is de bedoeling dat u de vragen 17 en 18 beantwoordt voor één probleem dat u genoemd heeft bij vraag 16. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 17 en 18 beantwoord zijn voor alle problemen die u genoemd heeft bij vraag 16. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok i* op bladzijde 19.

17. Hoe lang duurde dit probleem dat optrad na dit soort groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

    ..... uur / dagen / weken / maanden*

18. Wat was de oorzaak voor dit probleem dat optrad na dit soort groot periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep?
    (U mag meerdere oorzaken noemen.)

    .....
    .....
    .....
    .....
    .....

Ga terug naar *instructieblok k* op bladzijde 21.

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

Als eerste gaan de vragen over het verrichten van klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser uit een bepaalde groep. Klein periodiek onderhoud wordt frequenter uitgevoerd dan 1 keer per 2 maanden.

1. Wordt er weleens klein periodiek onderhoud verricht aan een gemiddelde biowasser uit één van de op uw bedrijf aanwezige groepen biowassers?

   0 ja
   0 nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 28.

2. Bij welke groepen biowassers wordt er klein periodiek onderhoud verricht aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

   .....
   .....

Instructieblok l:
Het is de bedoeling dat u de vragen 3 tot en met 18 beantwoordt voor één van de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 3 tot en met 18 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 28.

3. Welke soorten klein periodiek onderhoud worden er in het algemeen verricht aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

Instructieblok m:
Het is de bedoeling dat u de vragen 4 tot en met 18 beantwoordt voor één van de soorten klein periodiek onderhoud die u genoemd heeft bij vraag 3. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 4 tot en met 18 beantwoord zijn voor alle soorten klein periodiek onderhoud die u genoemd heeft bij vraag 3. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok l* op bladzijde 23.

4. Hoe wordt dit soort klein periodiek onderhoud uitgevoerd aan een gemiddelde biowasser van deze groep? (Beschrijving van de onderhoudsmethode.)

.....
.....
.....
.....
.....

5. Hoeveel keer in een bepaalde tijd wordt dit soort klein periodiek onderhoud uitgevoerd aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

.....

6. Hoeveel keer in een bepaalde tijd wordt door de biowasserfabrikant geadviseerd dit soort klein periodiek onderhoud te verrichten aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

.....

7. Wanneer wordt dit soort klein periodiek onderhoud uitgevoerd aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

O aan het begin van de mestronde
O tijdens de mestronde, ofwel tijdens de produktiecyclus
O aan het einde van de mestronde
O als de afdeling of de stal leegstaat
O anders, namelijk.....
.....
.....

8. Wanneer wordt er door de biowasserfabrikant geadviseerd dit soort klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep uit te voeren?

O hij geeft geen advies
O aan het begin van de mestronde
O tijdens de mestronde, ofwel tijdens de produktiecyclus
O aan het einde van de mestronde
O als de afdeling of de stal leegstaat
O anders, namelijk.....
.....
.....

9. Wie voert dit soort klein periodiek onderhoud uit aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

   0 uzelf
   0 een werknemer
   0 wasserfabrikant
   0 iemand anders, namelijk.....
   .....
   .....

10. Hoeveel tijd kost het verrichten van dit soort klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

    .... minuten / uur* per biowasser

11. Hoe hoog schat u dat de kosten zijn van dit soort klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep? (Let op: uw eigen arbeid niet meenemen in de kosten!)

    0 ..... gulden per wasser
    0 geen idee hoe hoog de kosten zijn

12. Functioneerde een gemiddelde biowasser van deze groep in het algemeen technisch beter na dit soort klein periodiek onderhoud?

    0 de gemiddelde biowasser van deze groep functioneerde technisch beter na dit soort groot periodiek onderhoud, ga nu verder met vraag 15 op bladzijde 26.
    0 de gemiddelde biowasser van deze groep functioneerde technisch hetzelfde na dit soort groot periodiek onderhoud, ga nu verder met vraag 15 op bladzijde 26.
    0 de gemiddelde biowasser van deze groep functioneerde technisch slechter na dit soort groot periodiek onderhoud, ga nu verder met vraag 13 op bladzijde 25.

13. Welke onderdelen van een gemiddelde biowasser van deze groep functioneerden er technisch slechter na dit soort klein periodiek onderhoud?

    .....
    .....
    .....
    .....

Instructieblok n:
Het is de bedoeling dat u vraag 14 beantwoordt voor de onderdelen van de biowasser die u genoemd heeft bij vraag 13.

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

14. Waarom functioneert dit onderdeel van een gemiddelde biowasser van deze groep technisch slechter na dit soort klein periodiek onderhoud?

.....
.....
.....
.....
.....

15. Heeft u door dit soort klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep weleens problemen gehad?

O ja
O nee

Zo nee, ga dan terug naar *instructieblok m* op bladzijde 23.

16. Welke problemen traden er op door dit soort klein periodiek onderhoud te verrichten aan een gemiddelde biowasser van deze groep? Indien dit mogelijk is moet u de problemen kwantificeren. (Bij deze vraag mogen meerdere problemen worden genoemd.)

.....
.....
.....
.....
.....

Instructieblok o:
Het is de bedoeling dat u de vragen 17 en 18 beantwoordt voor één probleem dat u genoemd heeft bij vraag 16. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 17 en 18 beantwoord zijn voor alle problemen die u genoemd heeft bij vraag 16. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok m* op bladzijde 23.

17. Hoe lang duurde dit probleem dat optrad na dit soort klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep?

..... uur / dagen / weken / maanden*

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

18. Wat was de oorzaak voor dit probleem dat optrad na dit soort klein periodiek onderhoud aan een gemiddelde biowasser van deze groep?
(U mag meerdere oorzaken noemen.)

.....
.....
.....
.....
.....

Ga terug naar *instructieblok o* op bladzijde 26.

De volgende vragen gaan over de storingen die gemiddeld per jaar optreden bij een gemiddelde biowasser uit een bepaalde groep. Iets wordt een storing genoemd als er iets kapot of vervuild is op een moment dat je dit niet verwacht. Met twee voorbeelden zal de term storingen worden uitgelegd.

a) Stel je maakt voor klein onderhoud 1 keer in de 2 weken het filter schoon, tijdens het schoonmaken ontdek je dat het filter kapot is. Dit is dan een storing.

b) Via de computer wordt er alarm gegevens dat er niet genoeg geventileerd wordt, dit is ook een storing.

Instructieblok p:
Het is de bedoeling dat u de vragen 1 tot en met 13 eerst beantwoordt voor één groep biowassers. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 1 tot en met 13 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die aanwezig zijn op uw bedrijf. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 31.

1. Beschrijf de storingen die zijn opgetreden bij een gemiddelde biowasser van deze groep vanaf het moment dat u deze groep biowassers heeft aangeschaft.

.....
.....
.....
.....
.....

Instructieblok q:
Het is de bedoeling dat u de vragen 2 tot en met 13 beantwoordt voor één van de storingen die u genoemd heeft bij vraag 1. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 2 tot en met 13 beantwoord zijn voor alle storingen die genoemd zijn bij vraag 1. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok p* op bladzijde 28.

2. Hoe vaak op een bepaalde tijdsbasis trad deze storing op bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

.....

3. In welke periode trad deze storing op bij een gemiddelde biowasser van deze groep?
(Te denken valt aan seizoen, produktieperiode, etc.)

.....

4. Wat was de oorzaak van het optreden van deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep?
(U mag meerdere oorzaken noemen.)

.....
.....
.....
.....
.....

5. Hoe wordt deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep opgelost?

.....
.....
.....
.....
.....

De volgende vragen gaan over degene die deze storing oplost bij een gemiddelde biowasser van deze groep. Ik verzoek u:

- bij vraag 6 aan te geven wie deze storing heeft opgelost.
(U mag meerdere antwoordmogelijkheden aankruisen.)
- bij vraag 7 aan te geven hoeveel keer per jaar deze storing door deze persoon wordt opgelost.

Vraag 6 Storing opgelost door:	*Vraag 7* Aantal keer opgelost:
0 uzelf	..... keer per jaar
0 werknemer	..... keer per jaar
0 biowasserfabrikant	..... keer per jaar
0 iemand anders, namelijk.....	..... keer per jaar

8. Hoe lang duurt deze storing gemiddeld bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

.... minuten / uur / dagen / weken*

9. Hoe hoog schat u dat de kosten zijn van deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep? (Let op: Uw eigen arbeid niet meetellen in de kosten!)

..... gulden per biowasser

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

10. Zijn er door deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep problemen opgetreden?

O ja
O nee

Zo nee, ga dan terug naar *instructieblok q* op bladzijde 28.

11. Welke problemen traden er op door deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep? Indien dit mogelijk is moet u de problemen kwantificeren.
(Bij deze vraag mogen meerdere problemen worden genoemd.)

.....
.....
.....
.....
.....

Instructieblok r:
Het is de bedoeling dat u de vragen 12 en 13 beantwoordt voor één van de problemen die u genoemd heeft bij vraag 11. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 12 en 13 beantwoord zijn voor alle problemen die u genoemd heeft bij vraag 11. Als u dit heeft gedaan kunt u teruggaan naar *instructieblok q* op bladzijde 28.

12. Hoe lang duurde dit probleem, dat optrad na deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

..... uur / dagen / weken / maanden*

13. Wat was de oorzaak voor dit probleem, dat optrad na deze storing bij een gemiddelde biowasser van deze groep?
(U mag meerdere oorzaken noemen.)

.....
.....
.....
.....
.....

Ga terug naar *instructieblok r* op bladzijde 30.

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

De volgende vragen gaan over de controles die uitgevoerd worden om de werking van een biowasser te controleren. De controles kunnen gesplitst worden in het controleren van de technische werking van de biowasser en in het controleren van de biologische werking van de biowasser.

1. Hoeveel geld zou u in het algemeen willen besteden om te laten controleren wat de ammoniakreductie van uw biowasser is?

   .... gulden per biowasser

Instructieblok s:
Het is de bedoeling dat u de vragen 2 tot en met 14 eerst beantwoordt voor één groep biowassers. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 2 tot en met 14 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die aanwezig zijn op uw bedrijf. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 35.

2. Noem de controles die tot nu toe uitgevoerd zijn om de biologische en/of de technische werking van een gemiddelde biowasser van deze groep te controleren.
   (Te denken valt aan controle van de ammoniakreductie, de geurreductie, spuipomp, etc.)

   .....
   .....
   .....
   .....

Instructieblok t:
Het is de bedoeling dat u de vragen 3 tot en met 15 beantwoordt voor één van de controles die u genoemd heeft bij vraag 2. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 3 tot en met 15 beantwoord zijn voor alle controles die u genoemd heeft bij vraag 2. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok s* op bladzijde 31.

3. Op welke manier is deze controle uitgevoerd bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

4. Hoeveel tijd kost het verrichten van deze soort controle bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

   .....

5. Hoeveel keer op een bepaalde tijdsbasis is deze controle uitgevoerd bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

   .....

6. Hoeveel keer wordt door de biowasserfabrikant geadviseerd deze controle uit te voeren bij een gemiddelde biowasser van deze groep?

   ..... keer per jaar

De volgende vragen gaan over degene die deze controle heeft uitgevoerd bij een gemiddelde biowasser van deze groep. Ik verzoek u:

- bij vraag 7 aan te geven wie deze controle heeft uitgevoerd.
  (U mag meerdere antwoordmogelijkheden aankruisen.)
- bij vraag 8 aan te geven hoeveel keer per jaar deze controle door deze persoon wordt uitgevoerd.

Vraag 7 Controle uitgevoerd door:	*Vraag 8* Aantal keer uitgevoerd:
O uzelf	..... keer per jaar
O werknemer	..... keer per jaar
O biowasserfabrikant	..... keer per jaar
O gemeente	..... keer per jaar
O onafhankelijk instituut	..... keer per jaar
O iemand anders, namelijk.....	..... keer per jaar

De volgende vragen gaan over de opdrachtgever van deze controle bij een gemiddelde biowasser van deze groep. Ik verzoek u:

- bij vraag 9 aan te geven wie de opdrachtgever van deze controle was.
  (U mag meerdere antwoordmogelijkheden aankruisen.)
- bij vraag 10 aan te geven hoeveel keer per jaar deze persoon de opdrachtgever was voor deze controle.

Vraag 9 Opdrachtgever controle:	*Vraag 10* Aantal keer opdrachtgever:
0 uzelf	..... keer per jaar
0 werknemer	..... keer per jaar
0 biowasserfabrikant	..... keer per jaar
0 gemeente	..... keer per jaar
0 onafhankelijk instituut	..... keer per jaar
0 iemand anders, namelijk.....	..... keer per jaar

11. Hoe hoog schat u dat de kosten zijn van deze controle bij een gemiddelde biowasser van deze groep? (Let op: Uw eigen arbeid niet meetellen in de kosten!)

    .... gulden per biowasser

12. Wat was het resultaat van deze controle bij een gemiddelde biowasser van deze groep?
    (bv. ammoniakreductie is x %, spuipomp werkt wel of niet, etc.)

    .....
    .....
    .....
    .....

13. Zijn er na deze controle acties ondernomen om de biologische en/of technische werking van een gemiddelde biowasser van deze groep aan te passen?

    0 ja
    0 nee

Zo nee, ga dan terug naar *instructieblok t* op bladzijde 31.

14. Welke acties zijn er na deze controle ondernomen om de werking van een gemiddelde biowasser van deze groep aan te passen?
    (bv. intrekken hinderwet, biowasser opstarten, etc.)

    .....
    .....
    .....
    .....

15. Hoeveel keer na deze controle zijn deze acties uitgevoerd?

.....
.....

Ga terug naar *instructieblok t* op bladzijde 31.

Het is de bedoeling dat de volgende vragen informatie geven over de twee meest gebruikte methoden van opstarten bij een biowasser nadat deze een periode niet gefunctioneerd heeft (het opstarten na de installatie wordt hier dus ook mee bedoeld).

1. Beschrijf de twee meest gebruikte methoden voor het opstarten van een algemene biowasser.

   Methode 1.....
   .....
   .....
   .....
   .....

   Methode 2.....
   .....
   .....
   .....
   .....

2. Van welke groepen biowassers, wordt een gemiddelde biowasser van deze groep weleens opgestart met methode 1?

   .....
   .....

Instructieblok u:
Het is de bedoeling dat u de vragen 3 tot en met 10 beantwoordt voor één van de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 3 tot en met 10 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 2. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met vraag 11 op bladzijde 37.

3. Hoeveel keer wordt een gemiddelde biowasser van deze groep opgestart met methode 1?

   .....

4. Wanneer wordt een gemiddelde biowasser van deze groep opgestart met methode 1?

   .....

5. Hoe lang duurt het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 1?

   .... minuten / uur / dagen / weken / maanden*

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

6. Wie start een gemiddelde biowasser van deze groep op met methode 1?

   O uzelf
   O een werknemer
   O biowasserfabrikant
   O iemand anders, namelijk.....
   .....

7. Zijn er door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 1 nog problemen opgetreden?

   O ja
   O nee

Zo nee, ga dan terug naar *instructieblok u* op bladzijde 35.

8. Welke problemen traden er op door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 1? Indien dit mogelijk is moet u de problemen kwantificeren.
   (Bij deze vraag mogen meerdere problemen worden genoemd.)

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

Instructieblok v:
Het is de bedoeling dat u de vragen 9 en 10 beantwoordt voor één van de problemen die u genoemd heeft bij vraag 8. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 9 en 10 beantwoord zijn voor alle problemen die u genoemd heeft bij vraag 8. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok u* op bladzijde 35.

9. Hoe lang duurde dit probleem, dat optrad door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 1?

   ..... uur / dagen / weken / maanden*

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

10. Wat was de oorzaak van dit probleem, dat optrad door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 1?
(U mag meerdere oorzaken noemen.)

.....
.....
.....
.....

Ga terug naar *instructieblok u* op bladzijde 35.

11. Van welke groepen biowassers, wordt een gemiddelde biowasser van deze groep weleens opgestart met methode 2?

.....
.....

Instructieblok w:
Het is de bedoeling dat u de vragen 12 tot en met 19 beantwoordt voor één van de groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 11. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 12 tot en met 19 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die u genoemd heeft bij vraag 11. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 40.

12. Hoeveel keer wordt een gemiddelde biowasser van deze groep opgestart met methode 2?

.....

13. In welke periode wordt een gemiddelde biowasser van deze groep opgestart met methode 2? (Te denken valt aan seizoen, produktieperiode, na onderhoud, etc.)

.....

14. Hoe lang duurt het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 2?

.... minuten / uur / dagen / weken / maanden*

15. Wie start een gemiddelde biowasser van deze groep op met methode 2?

0 uzelf
0 een werknemer
0 biowasserfabrikant
0 iemand anders, namelijk.....
.....

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

16. Zijn er door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 2 nog problemen opgetreden?

O ja
O nee

Zo nee, ga dan terug naar *instructieblok w* op bladzijde 37.

17. Welke problemen traden er op door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 2? Indien dit mogelijk is moet u de problemen kwantificeren.
(Bij deze vraag mogen meerdere problemen worden genoemd.)

.....
.....
.....
.....
.....

Instructieblok x:
Het is de bedoeling dat u de vragen 18 en 19 beantwoordt voor één van de problemen die u genoemd heeft bij vraag 17. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 18 en 19 beantwoord zijn voor alle problemen die u genoemd heeft bij vraag 17. Als u dit gedaan heeft kunt u teruggaan naar *instructieblok w* op bladzijde 37.

18. Hoe lang duurde dit probleem, dat optrad door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 2?

..... uur / dagen / weken / maanden*

19. Wat was de oorzaak van dit probleem, dat optrad door het opstarten van een gemiddelde biowasser van deze groep met methode 2?
(U mag meerdere oorzaken noemen.)

.....
.....
.....
.....
.....

Ga terug naar *instructieblok x* op bladzijde 38.

* Doorhalen wat niet van toepassing is.

De volgende vragen gaan over het technisch functioneren van de wasser.

Onder goed technisch functioneren wordt verstaan dat de biowasser in gebruik is zonder dat er technische storingen optreden aan de technische onderdelen van de biowasser en dat de technische werking voldoet aan de opgave van de biowasserfabrikant.

Instructieblok y:
Het is de bedoeling dat u de vragen 1 tot en met 3 eerst beantwoordt voor één groep biowassers. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 1 tot en met 3 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die aanwezig zijn op uw bedrijf. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 41.

1. Hoe vindt u dat een gemiddelde biowasser van deze groep technisch functioneert?

   0 goed, ga dan terug naar *instructieblok y* op bladzijde 40.
   0 matig, ga dan verder met vraag 2.
   0 slecht, ga dan verder met vraag 3.

2. Waarom vindt u dat een gemiddelde biowasser van deze groep technisch matig functioneert?

   .....
   .....
   .....
   .....

Ga nu terug naar *instructieblok y* op bladzijde 40.

3. Waarom vindt u dat een gemiddelde biowasser van deze groep technisch slecht functioneert?

   .....
   .....
   .....
   .....

Ga nu terug naar *instructieblok y* op bladzijde 40.

De volgende vragen gaan over het biologisch functioneren van de biowasser, ofwel de reductie van de ammoniak-emissie uit stal en opslag door de biowasser.

Instructieblok z:
Het is de bedoeling dat u de vragen 1 tot en met 7 eerst beantwoordt voor één groep biowassers. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 1 tot en met 7 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die aanwezig zijn op uw bedrijf. Als u dit gedaan heeft kunt u de enquête vervolgen met de vragen op bladzijde 42.

1. Reduceert een gemiddelde biowasser van deze groep de ammoniak-emissie uit de stal en opslag?

   0 ja, ga dan verder met vraag 2 op bladzijde 40.
   0 nee, ga dan verder met vraag 3 op bladzijde 40.
   0 geen idee, ga dan verder met vraag 7 op bladzijde 41.

2. Hoe hoog is volgens u de reductie van de ammoniak-emissie uit stal en opslag van een gemiddelde biowasser van deze groep?

   ..... % ammoniakreductie

3. Hoe heeft u de informatie over deze reductie van de ammoniak-emissie uit stal en opslag verkregen? (U mag meerdere antwoordmogelijkheden aankruisen.)

   0 schatting door uzelf
   0 via eigen metingen
   0 via eigen metingen van de fabrikant van de wasser
   0 via metingen van een onafhankelijk instituut
   0 anders, namelijk.....
   .....

4. Vindt u de reductie van de ammoniak-emissie hoog genoeg, als u kijkt naar het doel waarvoor u een gemiddelde biowasser van deze groep heeft aangeschaft?

   0 ja, ga dan verder met vraag 5 op bladzijde 41.
   0 nee, ga dan verder met vraag 6 op bladzijde 41.

5. Waarom vindt u, als u kijkt naar het doel van aanschaf, de reductie van de ammoniak-emissie uit stal en opslag door een gemiddelde biowasser van deze groep hoog genoeg?

.....
.....
.....
.....

Ga terug naar *instructieblok z* op bladzijde 40.

6. Waarom vindt u, als u kijkt naar het doel van aanschaf, de reductie van de ammoniak-emissie uit stal en opslag door een gemiddelde biowasser van deze groep niet hoog genoeg?

.....
.....
.....
.....

7. Hoe hoog zou de reductie van de ammoniak-emissie uit stal en opslag moeten zijn, als u kijkt naar het doel waarvoor u een gemiddelde biowasser van deze groep heeft aangeschaft?

..... % ammoniakreductie

Ga terug naar *instructieblok z* op bladzijde 40.

De volgende vragen gaan over niet gebruiken van biowassers op uw bedrijf.

1. Heeft u, sinds u biowassers heeft aangeschaft, ooit een biowasser een bepaalde periode niet gebruikt (= niet laten functioneren)?

   0 ja
   0 nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 43.

De onderstaande vragen gaan over de niet gebruikte biowasser(s) op uw bedrijf.
Ik verzoek u:

- bij vraag 2 de nummers van de biowasser(s) te geven die u een bepaalde periode niet gebruikt heeft.
- bij vraag 3 aan te geven in welke periode u deze biowasser niet gebruikt heeft.
  (Aangeven in dd-mm-jj tot en met dd-mm-jj, de laatste datum mag ook de datum van vandaag zijn)
- bij vraag 4 aan te geven wat de reden(en) is (zijn) voor het niet gebruiken van deze biowasser.
  (Te denken valt aan ouderdom, nooit opgestart, versleten, teveel storing, onderdelen te duur, etc.)

Vraag 2 Nummer niet gebruikte biowasser:	*Vraag 3* Periode van niet gebruiken biowasser	*Vraag 4* Reden(en) voor niet gebruiken biowasser
.....	..... dd-mm-jj tot en met dd-mm-jj	....
.....	..... dd-mm-jj tot en met dd-mm-jj	....
.....	..... dd-mm-jj tot en met dd-mm-jj	....
.....	..... dd-mm-jj tot en met dd-mm-jj	....

De volgende vragen gaan over het geheel vervangen van biowassers op uw bedrijf.

1. Heeft u, sinds u de biowassers heeft aangeschaft, ooit een biowasser geheel vervangen?

   O ja
   O nee

Zo nee, ga dan verder met de vragen op bladzijde 44.

De onderstaande vragen gaan over de geheel vervangen biowasser(s) op uw bedrijf.
Ik verzoek u:

- bij vraag 2 de nummers van de biowasser(s) te geven die u geheel vervangen heeft.
- bij vraag 3 aan te geven op welk tijdstip u deze biowasser geheel vervangen heeft.
  (Aangeven in dd-mm-jj)
- bij vraag 4 aan te geven wat de reden(en) is (zijn) voor het geheel vervangen van deze biowasser.
  (Te denken valt aan ouderdom, nooit opgestart, versleten, teveel storing, onderdelen te duur, etc.)

Vraag 2 Nummer van de geheel vervangen biowasser:	*Vraag 3* Tijdstip waarop de biowasser geheel vervangen is:	*Vraag 4* Reden(en) voor het geheel vervangen van de biowasser
.....	..... dd - mm - jj	....
.....	..... dd - mm - jj	....
.....	..... dd - mm - jj	....
.....	..... dd - mm - jj	....

De volgende vragen gaan over de biowasser in zijn geheel.

Instructie zz:
Het is de bedoeling dat u de vragen 1 tot en met 4 eerst beantwoordt voor één groep biowassers. Deze procedure wordt herhaald totdat de vragen 1 tot en met 4 beantwoord zijn voor alle groepen biowassers die aanwezig zijn op uw bedrijf. Als u dit gedaan heeft is de enquête afgelopen.

1. Hoeveel uur zijn u en eventueel uw werknemers gemiddeld per jaar bezig om een gemiddelde biowasser van deze groep goed te laten functioneren?

   ... uur per jaar per biowasser

2. Wat zijn volgens u de voordelen van het toepassen van een gemiddelde biowasser van deze groep op uw bedrijf?

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

3. Wat zijn volgens u de nadelen van het toepassen van een gemiddelde biowasser van deze groep op uw bedrijf?

   .....
   .....
   .....
   .....
   .....
   .....

4. Als u een gemiddelde biowasser van deze groep moet beoordelen op zijn technische werking, wat voor cijfer zou u dan aan de biowasser geven?
   (U mag een cijfer geven tussen de 1 en de 10.)

   .....

5. Als u een gemiddelde biowasser van deze groep moet beoordelen op zijn biologische werking (= ammoniakreductie), wat voor cijfer zou u dan aan de biowasser geven?
   (U mag een cijfer geven tussen de 1 en de 10.)

   .....

6. Als u een gemiddelde biowasser van deze groep moet beoordelen op zijn kostenplaatje , wat voor cijfer zou u dan aan de biowasser geven?
(U mag een cijfer geven tussen de 1 en de 10.)

.....

Ga terug naar *instructieblok zz* op bladzijde 44.

Variabele	serie	1	2	3	4	5	6	7a	7b	8a	8b	9	10	11	12a	12b	13	14	15	16
1		1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1
2		2	10	4	5	2	2	3	3	13	13	4	2	3	4	4	1	6	2	1
3		1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4		2	2	1	1	1	2	5	1	3	4	1	6	1	3	3	3	3	1	24
5		3	2	3	2	3	1	3	5	6	7	3	1	4	1	1	1	1	3	1
6		58	100	74	560	48	750	50	48	750	400	670	80	3150	63	63	1200	110	378	120
7		1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2
8		2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2
9		1993	1992	1991	1995	1992	1992	1988	1988	1994	1994	1992	1983	1992	1990	1990	1992	1986	1991	1991
10		*	*	*	*	2	2	2	2	2	2	*	2	2	2	2	2	2	1	2
11		8000	8000	3000	50000	13000	46000	10000	10000	24000	8000	45000	8000	26000	6000	6000	8000	8000	55000	13000
12		2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13		1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2
14		4.2	2 1/2 5	8.3	2 1/2.5	8.3	2.5/3.0	4.2	2.5	0.4	0.3	4.2	2.5	1	2.5	2.5	2.5(?)	2.5	4.2	2.5
15		1	1	3	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
16		2	2	4	3	1	2	2	2	2	2	2	1	2	3	3	1	1	2	2
17		10	10	20	8	10	10	10	10	10	10	10	10	20	10	10	15	14	10-15	10
18		250	100	0	1200	0	onbekend	90	90	1100	280	500	240	550	180	180	500	240	1500	390
19	a	2	1	3	4	3	2	1	1	4	4	1	1	1	2	2	4	4	4	2
20	a	100	100	100		100	100	100	100	-	-	100	100	100	100	100	100	100	100	10
21	a	0	0	0		0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
20	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90
21	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
22	a	3	2		1		2	2	5	5	5	4	3	2	2	2	5	1	1	2
23	a	100	50		100		100	30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	10
24	a	4	4		0		0	3	10	0	0	8	10	0	0	0	0	0	0	0
22	b	-	3	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
23	b	-	50	-	-	-	-	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90
24	b	-	14	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
25		2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
26		-	1	-	-	4	-	2	1	-	-	-	3	4	-	-	-	-	2	2
27		-	1	-	-	8 uur	-	1	1	-	-	-	1	4 uur	-	-	-	-	3	2 uur
28		-	30000	-	-	15000	-	40000	40000	-	-	-	10000	26000	-	-	-	-	75000	20000
29		-	-	-	-	0	-	10000	10000	-	-	-	0	34000	-	-	-	-	bij var. 28	?
30		1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
31		6		1	5		5	-	-	3	5	2	-	-	4	3	2	3	-	-
32		2		2	2		4	-	-	4	4	2	-	-	2	2	4	2	-	-
33		7		2	14		3 dagen	-	-	2 dgn	1 dag	2 mnd	-	-	2	2	1	1	-	-
34		30000		onbekend	50000		50000	-	-	70000	35000	25000	-	-	0	0	40000	3333	-	-
35		*		onbekend	20000		6000	-	-	10000	0	15000	-	-	0	0	0	0	-	-
36		2		2	2		2	-	-	2	2	2	-	-	2	2	2	2	-	-
37		2		2	2		2	-	-	2	2	2	-	-	2	2	2	2	-	-
38		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
39		3	1	7	8	1	3	5	5	2	2	6	5	4	2	2	-	1	1	1
40		2	3	1x 2 5 jaar	1x 3 mnd	2-3	1x 3 mnd	2	2	2	1	1x 2 mnd	2	3	3	3	-	2	1	1x 4mnd
41		2	g.a	1x per jaar	*	2	1x 3 mnd	2	2	2	1	1x 6 mnd	2	g.a.	3	3	-	2	1	g.a.
42		2	5	2	2	2	2	2	2	4	4	2	4	2	5	5	-	2	5	4
43		1	1	2	3	1	4	3	3	1	1	3	1	1	1	1	-	1	dem var. 42	1
44		1	2	1	3	1	1	3	3	2,3	2,3	1	1	2	1	1	-	3	1	1
45		4	3.5	1.5	4-8	4-6	2	6	6	16	7	0.5	0.5	3.5	0.75	0.75	-	3	10	1.5
46		0	0	0	0	0	0	420 per jr	420 per jr	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
47		1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	-	2	2	1
48		1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2
49		1	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		0.5	-	-	-	-	-	3 dgn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51		2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
52		-	-	-	-	-	1	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53		-	-	-	-	-	3	-	-	2x mnd	1x mnd	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54		-	-	-	-	-	g.a.	-	-	2x mnd	1x mnd	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55		-	-	-	-	-	2	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56		-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57		-	-	-	-	-	1	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58		-	-	-	-	-	1 minuut	-	-	1	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59		-	-	-	-	-	0	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60		-	-	-	-	-	2	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61		-	-	-	-	-	2	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62		2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1
63	a	-	-	-	2	4	3	5	5	-	-	-	3	-	1	1	5	-	4	1

65	a																			
66	a				1	1	1	1	1				1		1	1	1		1	1
67	a				2	1	2	1	1				1		2	2	1		1	2
68	a				1	4	1	3	3				1		1	1	4		4	2
69	a				3	1	1	1,3	1,3				1		1	1	2		1	3
70	a				2 dagen	1 minuut	24 uur	1 week	1 week				0.5 uur		1 uur	1 uur	2 uur		2 dgn	1 wk
71	a				0	0	250	z.t.	z.t.				200		400	400	0		0	0 (garantie)
72	a				1	2	2	1	1				2		2	2	2		2	2
73	a				1			2	2											
74	a				4 uur			1 week	1 week											
63	b				2			1	1											
64	b				4			9	9				1				6			3
65	b				1x 2 mnd			2x per jaar	2x per jaar				1x s.a.				1x 1/2jr			1x s a
66	b				1			1	1				1				1			1
67	b				1			3	3.				2				1			1
68	b				4			5	5				1				4			2
69	b				2			1	1				1				2			3
70	b				5 min per ei			1 dag	1 dag				1 uur				2uur			17 wkn
71	b				0			0	0				1000				0			0
72	b				2			2	2				2				2			2
73	b																			
74	b																			
63	c																			
64	c																7			8
65	c																1x jr			1x s.a
66	c																1			1
67	c																2			4
68	c																1			3
69	c																2			3
70	c																4 uur			17 wkn
71	c																100			0
72	c																2			2
73	c																			
74	c																			
75	•																			
76	a	0	0	0	800	0	100	500	500	?	?	0	0	0	0	0	0	0	300-500	0
77	a	1	1	3	2	4	1	2	2	3	3	10	4	1	1	1	4	4	1	2
78	a	0 75	1	5 minuten	2.5	5 minuten	1	1 week	1 week	4 min mtpnt	4 min mtpnt	10 min	5 min	1.5	1/6	1/6	5 min	5 min	10 min	2 uur
79	a	1x per jaar	1x per jaar	1x per jaar	1x 3 mnd	1x 2mnd	2x per mnd	4xjr(2jr)	4xjr(2jr)	continu	continu	1x 2wkn	3x s.a.	1 jr. 1x mnd	2jr:1x2wk	2jr.1x2wk	1x jr	1jr. 2x	3x jr	2x s a
80	a	g.a	1x per jaar	1x per jaar	g.a.	g.a.	2x per jaar	g.a.	g.a.	g.a.	g.a.	g.a.	g.a.	g.a.	g.a.	g.a.	g.a	g a	g a	g a
81	a	5	5	3	3	1	3	5	5	2, compu	2, compu	1	4	3	3	3	1	1	1	5
82	a	1	4	3	3	1	3	1	1	2	2	1	4	3	3	3	1	1	1	3,1
83	a	100	275	0	0	0	0	1500	1500	?	?	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3000
84	a	85	87	98	93	geen stank	< 60	84	84	80	80		geurred.	78	70-90	70-90	geurred	geurred.	88	83,69
85	a	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2			2	1
86	a						1	2	1	3	3			1						4
76	b						3x s.a.	1 was	1 was	1xs.a.(alles)	1xs.a.(alles)			1x s.a.						1x s a
77	b	9	10	2	6	7	4	9	9	11	11		9	11	2	2		9	2	5
78	b	0	0 25	5 minuten	2 minuten	5 minuten	1 minuut	0.67	0.67	continu	continu		1 min	continue	0.5	0.5		1 min	2 uur	1 dag
79	b	elke dag	1x per week	1x per jaar	2x per dag	1x per mnd	3x per jaar	1x 2wkn	1x 2wkn	continu	continu		elke dag	continue	2jr:1x2wk	2jr:1x2wk		1x 2wkn	3mnd: 8x	1x s a
80	b	elke dag	g.a.	1x per jaar	g.a.	g.a.	g.a.	1x 2wkn	1x 2wkn	g.a.	g.a.		g.a.	g.a.	g.a.	g.a.		g.a.	g.a.	g.a
81	b	1	2	3	2	1	3	2	2	2	2		1	1	5	5		1	5	5
82	b	1	2	3	3	1	3	2	2	2	2		1	1	5	5		1	3	3
83	b	0	0	0	0	0	0	0	0	?	?		0	0	0	0		0	?	0
84	b				7.5-7.8	6.5-7.0	geen stank								60-80	60-80			81	geurred.
85	b						2	2	2						1	1			2	2
86	b														3	3				
76	c														1x s.a.	1x s.a.				
77	c	10		9	9	10	11								5	5			9	6
78	c	0 25		0	2 minuten	0.5	continu								1	1			1 min	2 min
79	c	elke maand		elke dag	2x per dag	1x per mnd	24 uur								3x s.a.	3x s.a.			elke dag	1x wk
80	c	g.a		elke dag	g.a.	g.a.									g.a.	g.a.			g.a.	g a
81	c	1		1	2	1									5	5			2	1,3
82	c	1		1	2	1									5	5			1	1,3
83	c	0		0	0	0									0	0			0	0
84	c														geurred	geurred				6 7-8.1
85	c														2	2				2
86	c																			
76	d														9	9				8

		C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
77	d														1 min	1 min				4 min
78	d														elke dag	elke dag				1x 6wkn
79	d														g.a.	g.a.				g.a.
80	d														1	1				1,3
81	d														1	1				1,3
82	d														0	0				
83	d																			
84	d																			
85	d																			
86	d																			
87	a	3	1	1	3	2	3	1	1	1	1	1	3	3	1	2	2	3	3	1	3
88	a	1	1,2	1	1	2	1,2	2	2	1	1	1	1	1	1,2	2	2	1	na stilst	1,2	1
89	a	1 maand	1 dag	2 weken	2-3 weken	1-2 dagen	7 dagen	0	0	8 wkn	8 wkn	0	14 dgn	0	10 dgn	10 dgn	3 wkn	5 dgn	2 wkn	14 dgn
90	a	3	2	1	3	1	3	2	2	2,3	2,3	2	3	2	1	1	1	3	1	3
91	a	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
92	a																			
93	a																			
94	a																			
87	b					3		3	3	2	2		1		3	3				2
88	b					1		1	1	2	2		2		1	1				2
89	b					2-4 weken		3 mnd	3 mdn	2 wkn	2 wkn		0		10 dgn	10 dgn				14 dgn
90	b					1		1,3	1,3	2	2		1		3	3				1
91	b					1		2	2	2	2		2		1	1				2
92	b					1									2	2				
93	b														6 mnd	6 mnd				
94	b					6 weken									4	4				
95		2	2	1	2	1,2,3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
96		1	1		2	1	1														
97		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1
98		85	87	98	93	75-90	60	84	84	80	80		80	78	70-80	70-80		?	80	75	
99		4	4	3	3	1	3	4	4	2	2		1, vlgs. fab.	3	3,4	3,4		1	4	3,4	
100		1	1	1	1	1	2	1	1	1	1		1	1	1	1		1	1	1	
101		1	1	1	1	1		1	1	1	1		2	1	2	2		2	1	1	
102							1														
103							70					65					n.v.t.				
104		2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2
105		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
106		24	25	1	85	20-25	40	50	50	60	15	8	3	16	4	4	10	1	12		26
107		1	1	5,6,9	8	6,7,4	1,6,7,12	2	2	14	14	3,10	10	6	16	16	13,11,12	6	6,7,8,15		7
108		1,2,3,8,13	1,2,3,5	6	1,3	2,7	1,2,3,7	1,8,9,5	1,8,9,5	1,2,8,7,13	1,2,8,7,13	1,2,3,8,4	2,3	11,1,2,3,8,4	17,13,2,3,8	13,2,3,8	2	14,15	1,2,3,8,13	16,17,10,12	1,2,3,8
109		8	7	9	8	7	7	6	6	7.5	7.5	9	7	8	7	8	8	7	9		6
110		8	9	9	10	8	5	8	8	8	8	?	7	8	7	7	6	?	10		7
111		1	3	9	5	6	5	2	2	5	5	?	1	6	n.v.t.	n.v.t.	8	n.v.t.	7,5		1

Bijlage I **Codetabel voor het analyseren van de antwoorden van de enquête**

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
1	vrg. 1 blz. 3	functie respondent: 1 = eigenaar 2 = werknemer
2	vrg. 2 blz. 3	aantal stallen in het gehele bedrijf
3	vrg. 3 blz. 3	aantal stallen op bedrijf met biowassers
4	-	aantal biowassers van deze groep
5	vrg. 4 blz. 4	diersoort per groep biowassers: 1 = vleesvarkens 2 = opfokzeugen 3 = biggenopfok/kraamzeugen/guste/dragende zeugen 4 = konijnen 5 = vleeskalveren 6 = kalkoenen 7 = slachtkuikenouderdieren
6	vrg. 4 blz. 4	gemiddeld aantal dierplaatsen per biowasser
7	vrg. 4 blz. 4	stromingsprincipe biowasser: 1 = kruisstroom 2 = tegenstroom
8	vrg. 4 blz. 4	plaats van biowasser in stal: 1 = centraal 2 = afdeling
9	vrg. 4 blz. 4	gemiddeld jaar van aanschaf biowasser
10	vrg. 4 blz. 4	plaats ventilator in biowasser: 1 = blazend 2 = zuigend
11	vrg. 4 blz. 4	maximale ventilatiecapaciteit biowasser in m^3/uur
12	vrg. 4 blz. 4	denitrificatiestap aanwezig: 1 = ja 2 = nee
13	vrg. 4 blz. 4	pH-buffering aanwezig: 1 = ja 2 = nee
14	vrg. 5 blz. 7	Emissiefactor op grond van huisvestingssysteem in kg NH_3 per dierplaats per jaar

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
15	vrg. 1 blz. 8	fabrikant biowasser: 1 = Mattheus Milieutechniek 2 = RIMU 3 = Eurochemie 4 = Dorset Staltechniek in samenwerking met Tauw Milieu
16	vrg. 2 blz. 8	reden aanschaf biowasser: 1= De biowasser is aangeschaft om de stank uit de stal te reduceren. De eis tot stankreductie kwam voort uit de hinderwet, geurhinderklachten of door woonhuizen die binnen de stankcirkel van de stal kwamen te liggen. 2 = De biowasser is aangeschaft om de NH_3-emissie uit de bestaande of nieuwe stal te reduceren door eisen vanuit de hinderwet. 3 = De biowasser is aangeschaft om medewerking te verlenen aan een onderzoeksproject en met het idee dat met de biowassers later emissie-arm gebouwd kan worden. 4 = De biowasser is aangeschaft om stof en stank af te vangen uit de stallucht omdat de stallucht gezondheidsproblemen bij de omwonenden veroorzaakte.
17	vrg. 3 blz. 8	technische levensduur biowasser volgens respondent in jaren
18	vrg. 8 blz. 9	gemiddelde hoeveelheid spuiwater in l/dag
19	vrg. 9 blz. 10	opslagplaats spuiwater: 1 = mestopslag 2 = eigen land 3 = denitrificatiestap 4 = direct afgevoerd
20	vrg. 10 blz. 10	percentage opgeslagen spuiwater in bepaalde opslagplaats in %
21	vrg. 11 blz. 10	kosten in gulden per m^3 spuiwater van een bepaalde opslagplaats
22	vrg. 12 blz. 11	afvoerplaats spuiwater: 1 = riool 2 = eigen land 3 = iemand anders zijn land 4 = mestbank 5 = zuiveringsinstallatie
23	vrg. 13 blz. 11	percentage afgevoerd spuiwater naar een bepaalde afvoerplaats in %
24	vrg. 14 blz. 11	kosten in gulden per m^3 spuiwater van een bepaalde afvoerplaats

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
25	vrg. 1 blz. 12	installatie biowasser in nieuwe stal: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 30
26	vrg. 3 blz. 12	bouwkundige voorzieningen: 1 = De biowasser is geplaatst op de zolder van de stal. Eventueel is de zolderconstructie verstevigd. 2 = De biowasser is geplaatst in de afdeling. Eventueel is de dakconstructie aangepast. 3 = De biowasser is buiten geplaatst. 4 = De biowasser is in een gebouwtje buiten de stal geplaatst. Standaard wordt de ventilatie naar de biowasser toegebracht en wordt er een electrische en wateraansluiting gemaakt.
27	vrg. 4 blz. 13	tijdsduur totale installatie in aantal dagen per biowasser
28	vrg. 5 blz. 13	kosten biowasser in gulden per biowasser excl. BTW
29	vrg. 5 blz. 13	kosten bouwkundige voorzieningen in gulden excl. BTW (prijzen zonder standaard)
30	vrg. 1 blz. 14	installatie biowasser in bestaande stal: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 38
31	vrg. 3 blz. 14	bouwkundige voorzieningen: 1 = De biowasser is geplaatst in een bestaand gebouw buiten de stal. Eventueel is het gebouw aangepast. 2 = De biowasser is in een nieuw gebouw buiten de stal geplaatst. 3 = De biowasser is geplaatst buiten de stal op een betonnen voet. 4 = De biowasser is in de afdeling/stal geplaatst. Eventueel is de dakconstructie verstevigd. 5 = De biowasser is in een tussenruimte van de stal geplaatst. Eventueel is de dakconstructie aangepast. 6 = De biowasser is op zolder geplaatst. Eventueel is de zolderconstructie verstevigd. Standaard wordt de ventilatie naar de biowasser gebracht en wordt er een electriciteits- en wateraansluiting gemaakt.
32	vrg. 4 blz. 14	wanneer is de biowasser geïnstalleerd: 1 = begin van de mestronde 2 = tijdens de mestronde/produktiecyclus 3 = einde van de mestronde 4 = toen de stal/afdeling leegstond
33	vrg. 5 blz. 14	tijdsduur installatie in aantal dagen per biowasser
34	vrg. 6 blz. 15	kosten biowasser in gulden per biowasser excl. BTW

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
35	vrg. 6 blz. 15	kosten bouwkundige voorzieningen in gulden excl. BTW (zonder standaard)
36	vrg. 7 blz. 15	produktie door installatie biowasser extra stilgelegen: 1 = ja 2 = nee
37	vrg. 12 blz. 16	problemen door installatie biowasser: 1 = ja 2 = nee
38	vrg. 1 blz. 18	groot periodiek onderhoud aan biowasser: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 51
39	vrg. 3 blz. 18	soorten groot periodiek onderhoud biowasser: 1 = De biowasser wordt stopgezet. Vulmateriaal eruithalen en reinigen met hogedrukspuit. De rest van de biowasser met hogedrukspuit zoveel mogelijk reinigen (zoals opvangbak, ventilator, etc.). Vulmateriaal terugplaatsen. Biowasser aanzetten. 2 = De biowasser wordt stopgezet. Vulmateriaal eruithalen en spoelen plus weken met spuiwater. De rest van de biowasser zoveelmogelijk schoonspoelen. Vulmateriaal terugplaatsen. Biowasser aanzetten. 3 = Vulmateriaal uit de biowasser halen, met hogedrukspuit reinigen en weer terugplaatsen. Biowasser blijft aanstaan. 4 = De biowasser wordt stopgezet. Vulmateriaal wordt vervangen door reservepakket. Biowasser plus ventilator reinigen met hogedrukspuit. De opvangbak wordt niet gereinigd. Biowasser wordt aangezet. Het vervuilde vulmateriaal een tijd laten drogen, daarna uitkloppen en evt. schoonspuiten met hogedrukspuit. 5 = De biowasser wordt stopgezet. Vulmateriaal in biowasser reinigen met hogedrukspuit. Biowasser aanzetten. 6 = Vulmateriaal in biowasser reinigen met hogedrukspuit. Biowasser blijft aanstaan. 7 = Vochtvanger schoonmaken door te spoelen. Biowasser wordt stopgezet. 8 = Stofafvang omhoogklappen en zo reinigen met hogedrukspuit, daarna omlaagklappen. Biowasser blijft aanstaan.
40	vrg. 5 blz. 19	aantal keer per jaar van het plegen van dit groot periodiek onderhoud per biowasser
41	vrg. 6 blz. 19	aantal keer per jaar op advies van fabrikant dit groot periodiek onderhoud per biowasser uitvoeren

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
42	vrg. 7 blz. 19	wanneer groot periodiek onderhoud uitvoeren: 1 = begin van de mestronde 2 = tijdens de mestronde/produktiecyclus 3 = einde van de mestronde 4 = toen de afdeling/stal leegstond
43	vrg. 8 blz. 20	wanneer volgens fabrikant uitvoeren: 1 = geen advies 2 = begin van de mestronde 3 = tijdens de mestronde/produktiecyclus 4 = einde van de mestronde 5 = toen de afdeling/stal leegstond
44	vrg. 9 blz. 20	persoon die groot periodiek onderhoud uitvoert: 1 = respondent 2 = werknemer 3 = fabrikant
45	vrg. 10 blz. 20	benodigd aantal uren per biowasser om groot periodiek onderhoud uit te voeren
46	vrg. 11 blz. 20	kosten (behalve arbeid) van groot periodiek onderhoud in gulden per biowasser
47	vrg. 12 blz. 20	technisch functioneren na groot periodiek onderhoud: 1 = beter 2 = hetzelfde 3 = slechter
48	vrg. 15 blz. 21	problemen door groot periodiek onderhoud: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 51
49	vrg. 16 blz. 21	soort probleem plus gevolg door groot periodiek onderhoud: 1 = aantal dieren dood door drinken spoelwater 2 = aantal dieren ziek door drinken spoelwater
50	vrg. 17 blz. 22	aantal uren dat een bepaald probleem heeft geduurd
51	vrg. 1 blz. 23	klein periodiek onderhoud aan biowasser: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 62
52	vrg. 3 blz. 23 vrg. 4 blz. 24	soort klein periodiek onderhoud: 1 = Zeefje schoonmaken dat voor de circulatiepomp zit. Zeefje eruit halen, schoonkloppen, zeefje erin. 2 = De biowasser stopzetten. Luchtgeleidingsschotten reinigen met hogedrukspuit. Biowasser aanzetten.
53	vrg. 5 blz. 24	aantal keer plegen van klein periodiek onderhoud in een week per biowasser

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
54	vrg. 6 blz. 24	aantal keer klein periodiek onderhoud uitvoeren op advies van fabrikant (g.a. = geen advies)
55	vrg. 7 blz. 24	wanneer klein periodiek onderhoud uitvoeren: 1 = begin van de mestronde 2 = tijdens de mestronde/produktiecyclus 3 = einde van de mestronde 4 = toen de afdeling/stal leegstond
56	vrg. 8 blz. 24	wanneer op advies fabrikant uitvoeren van klein periodiek onderhoud: 1 = geen advies 2 = begin van de mestronde 3 = tijdens de mestronde/produktiecyclus 4 = einde van de mestronde 5 = toen de afdeling/stal leegstond
57	vrg. 9 blz. 25	persoon die het klein periodiek onderhoud uitvoert: 1 = respondent 2 = werknemer 3 = fabrikant
58	vrg. 10 blz. 25	benodigd aantal uren om klein periodiek onderhoud uit te voeren per biowasser
59	vrg. 11 blz. 25	kosten (zonder arbeid) voor het uitvoeren van klein periodiek onderhoud in gulden per biowasser
60	vrg. 12 blz. 25	technisch functioneren na klein periodiek onderhoud: 1 = beter 2 = hetzelfde 3 = slechter
61	vrg. 15 blz. 26	problemen door klein periodiek onderhoud: 1 = ja 2 = nee
62	vrg. 1 blz. 28	storingen aan biowasser: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 75
63	vrg. 1 blz. 28	soort storingen: 1 = ventilator kapot 2 = ventilator nat 3 = circulatiepomp kapot 4 = enkele sproeiers van het totale aantal zijn verstopt 5 = spuiafvoer verstopt 6 = vlotter functioneert niet 7 = verwarmingselementen biowasser kapot 8 = vulmateriaal is moeilijk te reinigen 9 = schuimen van spuiwater

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
64	vrg. 2 blz. 28	aantal keer optreden van storing (eenheid vermelden)
65	vrg. 3 blz. 28	storing trad op, op: 1 = een willekeurig moment
66	vrg. 4 blz. 29	oorzaak van de storing: 1 = vuil (stof, vulmateriaal, bacteriën, etc.) uit biowasser 2 = agressiviteit van het water uit de biowasser 3 = te hoge pH van het water uit de biowasser
67	vrg. 5 blz. 29	oplossing van de storing: 1 = kapot element vervangen 2 = kapot element vervangen en op andere plaats gezet 3 = constructie biowasser aangepast 4 = schoonmaken van element 5 = slaolie toevoegen
68	vrg. 6 blz. 29	storing is opgelost door: 1 = respondent 2 = werknemer 3 = fabrikant
69	vrg. 8 blz. 29	duur van de storing (eenheid vermelden)
70	vrg. 9 blz. 29	kosten (zonder eigen arbeid) van de storing in gulden per storing
71	vrg. 10 blz. 30	problemen door storing: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabel 75
72	vrg. 11 blz. 30	welke problemen: 1 = aantal dieren dood 2 = aantal dieren dood en aantal dieren ziek
73	vrg. 12 blz. 30	tijdsduur probleem (eenheid vermelden)
74	vrg. 13 blz. 30	oorzaak van probleem: 1 = drinken water uit biowasser 2 = stikken door geen ventilatie
75	vrg. 1 blz. 31	beschikbaar geld voor controle NH_3-reductie in gulden per biowasser

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
76	vrg. 2 blz. 31 vrg. 3 blz. 31	uitgevoerde controles plus de methode van uitvoering: 1 = NH_3-reductie met drägerbuisjes 2 = NH_3-reductie met nat-chemische methode 3 = NH_3-reductie met speciale ammoniakmeter 4 = geurreductie door zelf te ruiken 5 = geurreductie door geurpanel 6 = pH waswater met pH-meter 7 = pH waswater met lakmoespapier 8 = hoeveelheid ammonium/nitriet/nitraat met lakmoespapier 9 = technische werking controleren door aan de buitenkant te kijken of alles nog functioneert en luisteren of het water nog stroomt 10 = technische werking controleren door in de biowasser te kijken of het water nog stroomt en het vulmateriaal nog schoon is. 11 = technische werking controleren door computeralarm voor ventilator, circulatiepomp en spuipomp
77	vrg. 4 blz. 32	tijdsduur verrichten controle (zonder analyse) in uren per biowassercontrole
78	vrg. 5 blz. 32	hoeveel keer is de controle uitgevoerd (eenheid vermelden)
79	vrg. 6 blz. 32	hoeveel keer is de controle uitgevoerd op advies van fabrikant (eenheid vermelden) (g.a. = geen advies)
80	vrg. 7 blz. 32	controle is uitgevoerd door: 1 = respondent 2 = werknemer 3 = fabrikant 4 = gemeente 5 = onafhankelijk instituut of bedrijf
81	vrg. 9 blz. 32	opdrachtgever controle: 1 = respondent 2 = werknemer 3 = fabrikant 4 = gemeente 5 = onafhankelijk instituut of bedrijf
82	vrg. 11 blz. 33	kosten (zonder eigen arbeid) controle in gulden per controle excl. BTW
83	vrg. 12 blz. 33	resultaat controle (alleen bij NH_3-reductie) in %
84	vrg. 13 blz. 33	acties ondernomen op grond van resultaat controle: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 87

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
85	vrg. 14 blz. 33	welke acties: 1 = biowasser enten met bacterieslib 2 = toevoegen van kalk aan water biowasser 3 = vergroten van volume vulmateriaal
86	vrg. 15 blz. 34	hoeveel acties (eenheid vermelden)
87	vrg. 1 blz. 35	methode van opstarten 1 = opstarten met alleen leidingwater 2 = opstarten met deel waswater 3 = opstarten door te enten met bacteriemateriaal
88	vrg. 4 blz. 35	wanneer opstarten: 1 = na installatie 2 = na het stoppen van de biowasser bij onderhoud
89	vrg. 5 blz. 35	verstreken tijdsduur totdat biowasser biologisch weer functioneerd in weken
90	vrg. 6 blz. 36	opgestart door: 1 = respondent 2 = werknemer 3 = fabrikant
91	vrg. 7 blz. 36	problemen door opstarten: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 95
92	vrg. 8 blz. 36	welke problemen door opstarten: 1 = te lage NH_3-reductie 2 = te lage ventilatie
93	vrg. 9 blz. 36	tijdsduur van probleem (eenheid vermelden)
94	vrg. 10 blz. 36	oorzaak van het probleem: 1 = schuimvorming waswater 2 = teveel spuiwater 3 = te weinig NH_3 aangeboden 4 = vulmateriaal nog te vervuild
95	vrg. 1 blz. 39	tevredenheid technisch functioneren: 1 = goed, ga naar variabele 97 2 = matig 3 = slecht
96	vrg. 2 blz. 39	waarom niet tevreden: 1 = maximaal ventilatiedebiet wordt niet bereikt 2 = beginfaseproblemen door prototype 3 = meer onderhoud nodig bij veel stof, dit was niet bekend

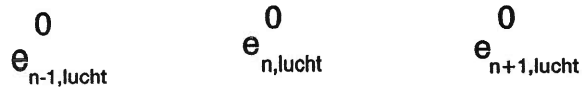
Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
97	vrg. 1 blz. 40	Reduceert de biowasser NH_3: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 99 3 = geen idee, ga naar variabele 103
98	vrg. 2 blz. 40	NH_3-reductiepercentage
99	vrg. 3 blz. 40	informatiebron NH_3-reductiepercentage: 1 = schatting door respondent 2 = meting door respondent 3 = meting door fabrikant 4 = meting door onafhankelijk instituut of bedrijf
100	vrg. 4 blz. 40	tevreden over NH_3-reductie: 1 = ja 2 = nee, ga naar variabele 102
101	vrg. 5 blz. 41	reden tevredenheid: 1 = eisen voor NH_3-reductie worden gehaald 2 = geen eisen gesteld voor NH_3-reductie
102	vrg. 6 blz. 41	reden ontevredenheid: 1 = voldoet niet aan de eisen voor de NH_3-reductie
103	vrg. 7 blz. 41	percentage NH_3-reductie voor tevredenheid
104	vrg.1 blz. 42	bepaalde periode niet gebruiken biowasser 1 = ja 2 = nee
105	vrg. 1 blz. 43	biowasser ooit geheel vervangen: 1 = ja 2 = nee
106	vrg. 1 blz. 44	totale arbeid in uren per biowasser per jaar

Variabelenummer:	Vraag in enquete:	Mogelijke antwoorden:
107	vrg. 2 blz. 44	voordelen gebruik biowasser: 1 = aantal stuks vee kunnen behouden 2 = aantal stuks vee kunnen uitbreiden 3 = verkrijgen van hinderwet 4 = snellere en soepelere verkrijging hinderwet 5 = geen stof in uitgestoten lucht 6 = geen NH_3 in uitgestoten lucht 7 = geen stank in uitgestoten lucht 8 = stalconstructie hoeft niet veranderd te worden 9 = geen gezondheidsproblemen meer bij omwonenden 10 = beter milieu 11 = biowasser is een zelfverzorgend systeem 12 = biowasser is de goedkoopste oplossing van de aanwezige technieken 13 = biowasser is een eenvoudig systeem 14 = nu is er beter onderzoek te verrichten 15 = de biowasser zelf verslijt niet 16 = er zijn geen voordelen
108	vrg. 3 blz. 44	nadelen gebruik biowasser: 1 = hoge aanschafskosten 2 = hoge electriciteitskosten 3 = hoge kosten voor afvoeren spuiwater 4 = geen baten 5 = matige ventilatie door biowasser 6 = er zijn geen nadelen 7 = extra arbeid door biowasser 8 = kosten voor onderhoud 9 = nitriet in water is gevaarlijk voor mens en dier 10 = condensvorming 11 = biowasser is een verplichting 12 = afkoeling stalklimaat bij nieuwe biggen 13 = veel spuiwater 14 = biowasser is niet zo'n mooi gezicht 15 = biowassers bezetten grond 16 = veel storingen 17 = biowasser staat in de afdeling
109	vrg. 4 blz. 44	cijfer voor technisch functioneren
110	vrg. 5 blz. 44	cijfer voor biologisch functioneren
111	vrg. 6 blz. 45	cijfer voor kosten

Bijlage J **NH_3-overdracht in bondgrafen**

Met behulp van een bondgraaf is eenvoudig te zien hoe het proces plaatsvindt in het lucht- en het waterdeel.

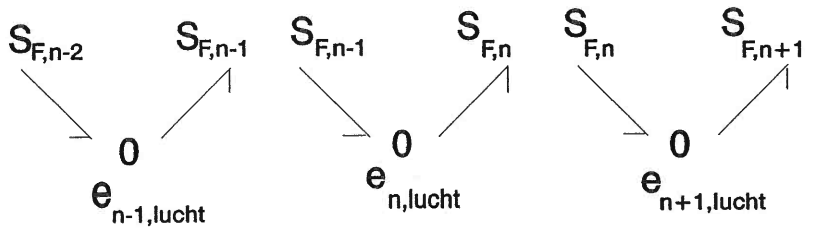
Als eerste wordt de bondgraaf opgesteld die de stroming van lucht in een volume-element van een biowasser weergeeft. De stroming van lucht in dit volume-element kan maar één kant opgaan ,het is dus een opgelegde stroming. De effort-variabele in deze bondgraaf is de concentratie NH_3 (in mol/m^3), de flow-variabele is het lucht-debiet (in m^3/s). Aangenomen wordt dat de flow-variabele een constante waarde heeft in de biowasser. In figuur J1 wordt voor de volume-elementen n-1, n, n+1 de effortvariabele genoteerd.



Figuur J1: De effort-variabelen van de stroming van lucht door de biowasser

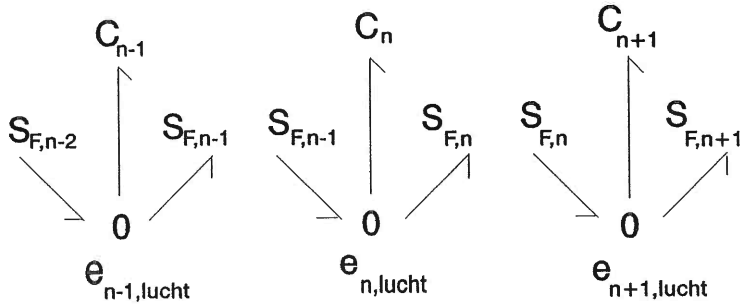
In figuur J2 wordt de opgelegde stroming van de lucht in de volume-elementen met behulp van flow-bronnen weergegeven. Er geldt:

$$S_{Fn} = \phi_{lucht} * e_{n,lucht}$$



Figuur J2: Weergave van de opgelegde luchtstroming in de biowasser

In figuur J3 wordt aangegeven dat er in elk volume-element lucht een bepaalde hoeveelheid lucht met NH_3 wordt opgeslagen.

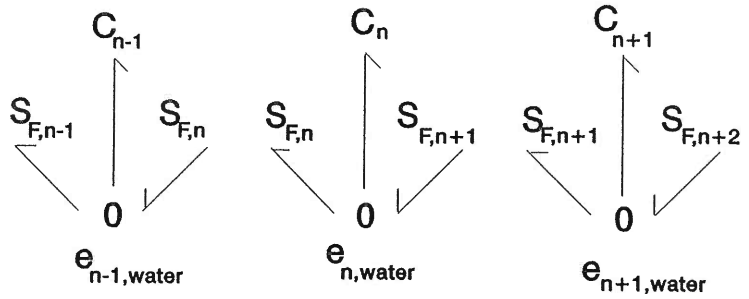


Figuur J3: Bondgraaf die de stroming van lucht in volume-elementen van een biowasser beschrijft

De bondgraaf die bij figuur J3 verkregen is beschrijft de stroming van lucht met een bepaalde hoeveelheid NH_3 in een volume-element (n-1, n of n+1) van de biowasser.

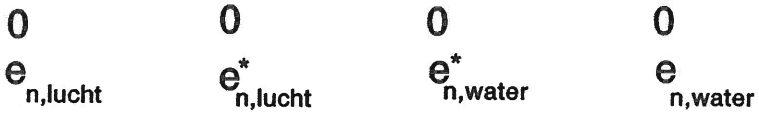
Op dezelfde manier kan de bondgraaf opgesteld worden die de stroming van het water in een volume-element van de biowasser weergeeft. Het verschil met de bondgraaf die de stroming van lucht aangeeft is dat de stroming van water een tegengestelde richting heeft. De effort-variabele is de concentratie NH_3 in de waterlaag (in mol/m^3) en de flow-variabele is het waterdebiet (in m^3/s). De

bondgraaf die de stroming van water in een volume-element (n+1, n of n-1) weergeeft is te zien in figuur J4.



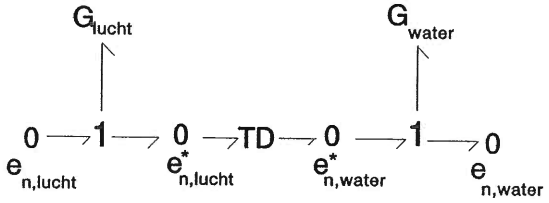
Figuur J4: Bondgraaf die de stroming van water in volume-elementen van de biowasser beschrijft

De derde bondgraaf die opgesteld wordt geeft de NH_3-overdracht van water naar lucht weer. In figuur J5 wordt aangegeven welke effort-variabelen bij deze overdracht van belang zijn. In deze bondgraaf is e^* de concentratie NH_3 aan het contactoppervlak tussen lucht en water.



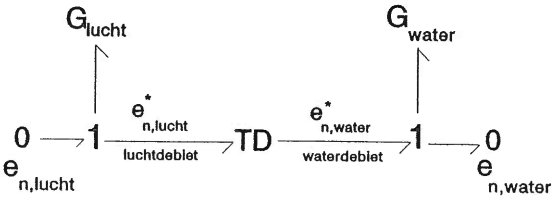
Figuur J5: De effort-variabelen van de NH_3-overdracht van lucht naar water

In figuur J6 wordt met behulp van geleidingen G aangegeven dat er een stroming van NH_3 van lucht naar water en andersom kan optreden. De geleiding G in de lucht is gelijk aan $1/(k_{lu} \cdot A_{contact})$. De geleiding in water is gelijk aan $1/(k_{wa} \cdot A_{contact})$. Tevens wordt in deze figuur aangegeven dat er tussen de grensvlakconcentraties een verhouding m heerst. Dit wordt aangegeven door de transducer (=TD).



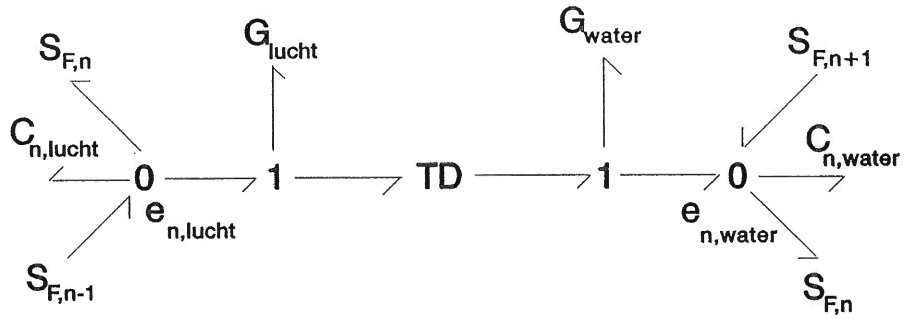
Figuur J6: Weergave van de NH_3-overdracht tussen lucht en water

In figuur J7 worden de overtollige 0-juncties uit figuur J6 weggelaten. De bondgraaf uit figuur J7 beschrijft de overdracht van NH_3 tussen lucht en water.



Figuur J7: Bondgraaf die de NH_3-overdracht tussen lucht en water beschrijft

De bondgraaf die de stroming van lucht en water en de NH_3-overdracht tussen lucht en water in een volume-element van de biowasser beschrijft is weergegeven in figuur J8.



Figuur J8: Bondgraaf van de stroming van lucht en water en NH_3-overdracht tussen lucht en water in een volume-element van een biowasser

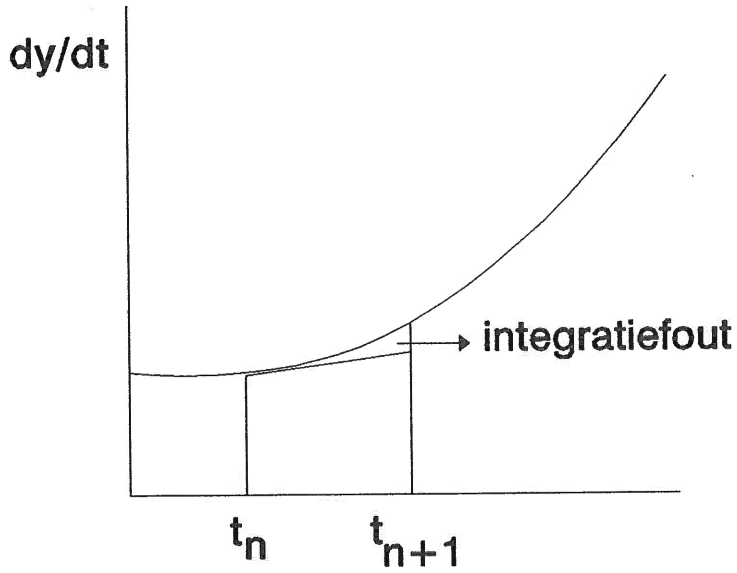
Door het opstellen van de bondgrafen is nu duidelijk hoe de NH_3-overdracht wiskundig gemodelleerd kan worden.

Bijlage K Discretiseren van differentiaalvergelijkingen met Euler-Forward

Het oplossen van een differentiaalvergelijking kan door deze numeriek te benaderen met een integratiemethode. Stel dat de volgende differentiaalvergelijking geldt:

$$\frac{dy}{dt} = c \cdot y \qquad \text{(K1)}$$

Het rechterlid uit VI.1 is onbekend als y niet bekend is, dus dy/dt is dan ook onbekend. Deze differentiaalvergelijking kan numeriek benaderd worden door dy/dt te berekenen op basis van de waarde van y op tijdstip t_n. In het interval t_n - t_{n+1} wordt verondersteld dat y constant is. Dit proces is weergegeven in figuur K1.



Figuur K1 Schematische weergave van Euler-Forward

Als het interval t_n - t_{n+1} maar klein genoeg wordt gekozen dan zal de fout die ontstaat door dy/dt te benaderen klein zijn.
Euler-Forward maakt gebruik van deze benaderingsmethode, door uit de waarde van y op t_n, y_n, de waarde van y op tijdstip t_{n+1}, y_n, te berekenen, volgens:

$$y_{n+1} = \Delta t \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t=t_n} + y_n \qquad \text{(K2)}$$

Met Δt is de t_{n+1} - t_n.

De tijdstap die genomen moet worden wil Euler-Forward een goede uitspraak doen over de waarde van y, moet 1/3 maal de kleinste tijdsconstante van de differentiaalvergelijking genomen worden.

Bijlage L **Implementatie van het model BIOWAS in Matlab**

```
% Constante gegevens van het model voor NH3-overdracht tussen lucht en water
Hbiow   =   0.75;     % Hoogte vulmateriaal (m)
AL      =   3;        % Aantal lagen in model (-)
Vbiow   =   0.85;     % Totale volume pakket vulmateriaal (m3)
WC      =   3.8;      % Watercirculatie per totaal oppervlak biowasser in m3/m2.hr
Dbluh   =   2776;     % luchtdebiet in m3/hr
Rhowa   =   1000;     % Dichtheid water in kg/m3
dviswa  =   0.98E-3;  % Dynamische viscositeit water in Pa.sec
phiwa   =   2.26;     % Dimensieloze associatiefactor voor water
Mwa     =   18;       % Moleculaire massa van water in kg/kmol
R       =   8.314;    % Gasconstante in J/mol.K
T       =   287.6;    % Temperatuur in Kelvin
Mvolam  =   0.0258;   % Moleculaire volume van NH3 in m3/kmol
g       =   9.81;     % Gravitatieconstante in m/s2
Dp      =   0.143;    % Diameter equivalente bol in m
dvislu  =   1.8E-5;   % Dynamische viscositeit lucht in Pa.s
Rholu   =   1.3;      % Dichtheid lucht in kg/m3
Atvollu =   20.1;     % Atomair diffusievolume lucht
Atvolam =   14.9;     % Atomair diffusievolume ammonia
Mlu     =   28.1;     % Moleculaire massa van lucht in kg/kmol
Mam     =   17;       % Moleculaire massa van ammonia in kg/kmol
P       =   1;        % Druk in biowasser, gelijk aan buitenluchtdruk in atm
Aspec   =   124.67;   % Specifiek contactoppervlak in m2/m3
prlu    =   0.91;     % Porositeit lucht in volume-element
prwa    =   0.02;     % Porositeit water in volume-element
Clubg   =   4.5E-4;   % Beginconcentratie NH3 in lucht (mol/m3)
Cwabg   =   0;        % Beginconcentratie NH3 in water (mol/m3)
AT      =   7000;     % Aantal tijdstappen van de simulatie (-)
Kw      =   1E-14;    % waterconstante in mol^2/l^2
pH      =   7.3;      % pH die in het water heerst
Dfilm   =   300E-6;   % Dikte van de totale biofilm in m
RhoNs   =   13;       % Dichtheid van Nitrosomonas in totale biofilm in kg/m^3
mNs     =   9.4E-4;   % Onderhoudsconstante in mol N/kg D.S. s
KbNs    =   0.04;     % Verzadigingsconstante in mol NH4/m^3
KmoNs   =   10^(-6.96); % Zuur-base-evenwichtsconstante van de m.o. in mol/l
RhoNb   =   6.5;      % Dichtheid van Nitrobacter in totale biowfilm in kg/m^3
mNb     =   2.2E-3;   % Onderhoudsconstante van in mol N/kg D.S. s
KbNb    =   0.287;    % Verzadigingsconstante in mol NO2/m^3
KmoNb   =   8.04E-9;  % zuur-base-evenwichtsconstante van de m.o. in mol/l
Iet     =   159;      % Remmingsconstante door nitriet in mol/m^3
Iat     =   188;      % Remmingsconstante door nitraat in mol/m^3
Dbspui  =   2.78E-5;  % Spuidebiet in m^3/s

% Bepaling van de hoogte van het volume-element uit de biowasser waarover gemodelleerd wordt
    Hvol = Hbiow/AL;

% Berekening van het volume van een volume-element van de biowasser
    Vvol = Vbiow/AL;
```

```
% Berekening van het volume lucht in een volume-element van de biowasser
      Vlu = 0.91*Vvol;

% Berekening van het volume water in een volume-element van de biowasser
      Vwa = 0.02*Vvol;

% Berekening van het loodrechte oppervlak van een volume-element waar water en lucht doorstro
  men
      Avol = Vvol/Hvol;

% Berekening van de watercirculatie in m3/m2.s
      WCsec = WC/3600;

% Berekening van het waterdebiet in het volume-element water
      Dbwa = WCsec*Avol;

% Berekening van het massadebiet in water in kg/m2.s
      L = (Dbwa*Rhowa)/Avol;

% Berekening van het luchtdebiet in m3/s
      Dblu = Dbluh/3600;

% Berekening van het massadebiet in lucht in kg/m2.s
      G = (Dblu*Rholu)/Avol;

% Berekening van de diffusiecoëfficiënt van NH3 in water
      Difwa = (1.173*10^(-16)*phiwa^(0.5)*Mwa^(0.5)*T)/(dviswa*Mvolam^(0.6));

% Berekening van de NH3-overdrachtscoefficient Kwa in water
Kwa = 0.0051*(L/(Aspec*dviswa))^(2/3)*(dviswa/(Rhowa*Difwa))^(-0.5)*(Aspec*Dp)^(0.4)*(Rhowa/(dviswa*g))^(-1/3);

% Berekening van de diffusiecoëfficiënt van NH3 in lucht
Diflu = (10^(-7)*T^(1.75)*((Mlu+Mam)/(Mlu*Mam))^(1/2))/(P*((Atvollu)^(1/3)*(Atvolam)^(1/3))^(2));

% Berekening van de NH3-overdrachtscoefficient Klu in lucht
Klu = 0.69*((Dp*G)/dvislu)^(0.59)*(dvislu/(Rholu*Diflu))^(1/3)*(Diflu/Dp);

% Berekening van Ham voor de verdeling van NH3 tussen lucht en water in (mol/m3)/(mol/m3)
      Ham = (1.013*10^2)/(R*T*exp((4092/T)-9.7));

% Berekening van Kb in mol/l, NB. log is de natuurlijke logaritme, dus ln
      Kb = [-3.398*log(0.0241*(T-273))]*10^9*Kw;

% Berekening van H voor de verdeling van NH3 in lucht en NH3 en NH4+ in water
      H = Ham*(1+Kb*10^(14-pH))^(-1);

% Berekening van de totale overdrachtscoefficient Ktot
      Ktot = (1/(H*Klu)+1/(Kwa))^(-1);

% Bepaling van dt door gelijk te nemen aan 1/3 van de kleinste tijdsconstante
      taua = prwa/(Aspec*Ktot);          % RC-tijd voor water
      taub = Vwa/Dbwa;                   % Debiettijd voor water
```

```
tauc = (H*prlu)/(Aspec*Ktot);          % RC-tijd voor lucht
Tau = [taua taub tauc];
dt = (1/3)*min(Tau);

% Berekening van coefficient Rlua
Rlua = Dblu/(Dblu+(Aspec*Vvol*Ktot)/H);

% Berekening van de coefficient Zlua
Zlua = (Aspec*Vvol*Ktot)/(Dblu+(Aspec*Vvol*Ktot)/H);

% Berekening van coefficient Swa
Swa = 1 - (Dbwa*dt)/Vwa-(Aspec*Ktot*dt)/(prwa);

% Berekening van coefficient Rwa
Rwa = (Dbwa*dt)/Vwa;

% Berekening van de coefficient Zwa
Zwa = (Aspec*Ktot*dt)/(H*prwa);

% Berekening van de coefficient Rnit
Rnit = (Dbwa*dt)/Vwa;

% Berekening van de coefficient Snit
Snit = (1-Rnit);

% Beginvector lucht voor de simulatie (beginconcentratie, conc. in laag 1, laag 2, laag 3)
Clu(:,1) = [Clubg;zeros(AL,1)];

% Beginvector water voor de simulatie (beginconcentratie, conc. in laag 3, laag 2, laag 1)
Cwa(:,1) = [zeros(AL+1,1)];

% Beginvector ammonium, nitriet en nitraat
Cet(:,1) = [zeros(AL+1,1)];
Cat(:,1) = [zeros(AL+1,1)];
Cam(:,1) = [zeros(AL+1,1)];

% Berekening van de beginreservoirconcentraties van water, nitriet en nitraat
Crswa(:,1) = [zeros(AL+1,1)];
Crset(:,1) = [zeros(AL+1,1)];
Crsat(:,1) = [zeros(AL+1,1)];

% Aanwezige Nitrosomonas in kg D.S.
XNs = RhoNs;

% Berekening verzadigingsconstante in afhankelijkheid van de pH
KsNs = KbNs*(1/(1+(10^(-pH)/KmoNs)))*(1+(Kb*10^(-pH)/Kw));

% Aanwezige Nitrobacter in kg D.S.
XNb = RhoNb;

% Berekening verzadigingsconstante in afhankelijkheid van de pH
KsNb = KbNb*(1+KmoNb*10^(pH));
```

```
% Berekening van het volume van de biofilm in de biowasser
    Vfilm = Dfilm*Aspec*Vwa;

for k = 1:1:AT
% Berekening van de oxidatie van ammonium in mol/m^3 water.s
    for j = 1:1:3
        Qam(j+1,k) = (mNs*XNs*Cam(j+1,k))/(KsNs+Cam(j+1,k))*Vfilm/Vwa;
    end;
    Qam(:,k) = [0;Qam(2,k);Qam(3,k);Qam(4,k)];

% Berekening van de waterconcentraties in waswater
    Cwa(1,k+1) = Crswa(k);      % beginconcentratie water
    Cwa(2,k+1) = Rwa*Cwa(1,k)+Swa*Cwa(2,k)+Zwa*Clu(4,k)-Qam(2,k)*dt; % laag 3
    Cwa(3,k+1) = Rwa*Cwa(2,k)+Swa*Cwa(3,k)+Zwa*Clu(3,k)-Qam(3,k)*dt; % laag 2
    Cwa(4,k+1) = Rwa*Cwa(3,k)+Swa*Cwa(4,k)+Zwa*Clu(2,k)-Qam(4,k)*dt; % laag 1

% Berekening van de luchtconcentraties
    Clu(1,k+1) = Clu(1,k);      % beginconcentratie lucht
    Clu(2,k+1) = Rlua*Clu(1,k+1)+Zlua*Cwa(4,k+1);  % laag 1
    Clu(3,k+1) = Rlua*Clu(2,k+1)+Zlua*Cwa(3,k+1);  % laag 2
    Clu(4,k+1) = Rlua*Clu(3,k+1)+Zlua*Cwa(2,k+1);  % laag 3

% Berekening van de oxidatie van nitriet in mol/m^3 water.s
    for i = 1:1:3
        Ki = (1+Cet(i+1,k)/Iet)*(1+Cat(i+1,k)/Iat);
        Qet(i+1,k) = (mNb*XNb*Cet(i+1,k))/((KsNb+Cet(i+1,k))*Ki)*Vfilm/Vwa;
    end;
    Qet(:,k) = [0;Qet(2,k);Qet(3,k);Qet(4,k)];

% Berekening nitrietconcentraties in waswater
    Cet(1,k+1) = Crset(k);      % beginconcentratie nitriet
    Cet(2,k+1) = Cet(1,k)*Rnit+Cet(2,k)*Snit+Qam(k)*dt-Qet(k)*dt; % laag 3
    Cet(3,k+1) = Cet(2,k)*Rnit+Cet(3,k)*Snit+Qam(k)*dt-Qet(k)*dt; % laag 2
    Cet(4,k+1) = Cet(3,k)*Rnit+Cet(4,k)*Snit+Qam(k)*dt-Qet(k)*dt; % laag 1

% Berekening nitraatconcentraties in waswater
    Cat(1,k+1) = Crsat(k);      % beginconcentratie nitraat
    Cat(2,k+1) = Cat(1,k)*Rnit+Cat(2,k)*Snit+Qet(k)*dt; % laag 3
    Cat(3,k+1) = Cat(2,k)*Rnit+Cat(3,k)*Snit+Qet(k)*dt; % laag 2
    Cat(4,k+1) = Cat(3,k)*Rnit+Cat(4,k)*Snit+Qet(k)*dt; % laag 1

% Berekening spuiwaterconcentraties NH4-N, NO2-N en NO3-N
    Crswa(k+1) = (Dbwa/(Dbwa+Dbspui))*Cwa(4,k+1);
    Crset(k+1) = (Dbwa/(Dbwa+Dbspui))*Cet(4,k+1);
    Crsat(k+1) = (Dbwa/(Dbwa+Dbspui))*Cat(4,k+1);

% Berekening van de concentraties ammonium in water
    Cam(:,k+1) = 1/((Kw*10^(pH))/Kb +1)*Cwa(:,k+1);
end;
% Tijdsvector maken
Tijd=[0:AT];
t=Tijd*dt;
```

SYMBOLENLIJST B

F_{bp}	is de fractie bevochtigd pakkingsoppervlak	[-]
A_{spec}	is het specifieke pakkingsoppervlak	$[m^2/m^3]$
d	is de diameter van het pakkingsmateriaal	[m]
X	is een karakteristieke lengte van het pakkingsmateriaal	[m]
D_p	is de diameter van een bol die hetzelfde oppervlak heeft als een eenheid pakkingsmateriaal	[m]
F_p	is de pakkingsfactor	$[m^2/m^3]$
A_{dwars}	is het dwarsoppervlak van de wassectie	$[m^2]$
D_{was}	is de diameter van de dwarsdoorsnede van de wassectie	[m]
r_{was}	is de straal van de dwarsdoorsnede van de wassectie	[m]
Z	is de totale hoogte van de wassectie	[m]
ΔP	is de drukval die optreedt over de wassectie	[Pa]
Sh	is het dimensieloze getal van Sherwood	[-]
Re	is het dimensieloze getal van Reynolds	[-]
Sc	is het dimensieloze getal van Schmidt	[-]
τ	is de tijdsconstante	[s]
g	is de gravitatieconstante	$[m/s^2]$
R	is de gasconstante	[J/mol·K]
T	is de temperatuur	[K]
K_b	is de baseconstante van het NH_3/NH_4^+-evenwicht	[mol/l]
pH	is de pH	[-]
L_w	is de bevochtigingshoeveelheid	$[m^2/s]$
δy	is de dikte van de film	[m]
$A_{contact}$	is het contactoppervlak tussen twee media	$[m^2]$
n	is het aantal celdelingen tijdens de exponentiële fase	[-]
g	is de generatietijd van de bacterie	$[hr^{-1}]$
μ^m	is de specifieke groeisnelheid	$[hr^{-1}]$
S^i	is de concentratie van substraat i	$[mol/m^3]$
$K_s^{i,m}$	is de verzadigingsconstante van bacterie m voor substraat i	$[mol/m^3]$
X^m	is de concentratie van bacterie m in de biofilm	[kg biomassa/m^3]
m_s^m	is de onderhoudsconstante van bacterie m	[mol N/kg biomassa]
K_I	is de remmingsconstante	$[mol/m^3]$
Y^m	is de opbrengstcoëfficiënt van bacterie m	[kg biomassa/kg substraat]
$q^{i,m}$	is de consumptiesnelheid van substraat i door bacterie m	[mol/m^3 biofilm]
K_{mo}^m	is een constante die het zuur-base evenwicht aangeeft van bacterie m	[mol/l]
$V_{biofilm}$	is het volume van de actieve biofilm	$[m^3]$

Superscripten:

m Ns voor Nitrosomonas, Nb voor Nitrobacter

i NH_4^+, NO_2^-