

Rapport

# Dimensionering van de Uniqfill chemische wasser met lamellen

Dick Starmans

November 2006



## **Colofon**

### **Uitgever**

Animal Sciences Group / Veehouderij  
Postbus 65, 8200 AB Lelystad  
Telefoon 0320 - 238238  
Fax 0320 - 238050  
E-mail [info.po.asg@wur.nl](mailto:info.po.asg@wur.nl)  
Internet <http://www.asg.wur.nl/po>

### **Redactie en fotografie**

Veehouderij

### **© Animal Sciences Group**

Het is verboden zonder schriftelijke toestemming van de uitgever deze uitgave of delen van deze uitgave te kopiëren, te vermenigvuldigen, digitaal om te zetten of op een andere wijze beschikbaar te stellen.

### **Aansprakelijkheid**

Animal Sciences Group aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen

### **Bestellen**

Losse nummers zijn schriftelijk, telefonisch, per E-mail of via de website te bestellen bij de uitgever.

## **Referaat**

Dick Starmans, (ASG-veehouderij)  
Dimensionering van de Uniqfill chemische wasser met lamellen (2006)  
Rapportnummer  
15 pagina's

## **Trefwoorden:**

Luchtwater, lamellen, kruisstroom

## Samenvatting

In dit rapport wordt een eerste aanzet gegeven tot de modellering van een kruisstroom chemische wasser met lamellen. Met behulp van bestaande metingen is de stofoverdrachtscoëfficiënt afgeschat, waarna scenario's voor nieuwe wassers doorgerekend konden worden.

Het berekende rendement van de wassers blijkt alleen afhankelijk van het oppervlak van de gebruikte lamellen, niet de specifieke lengte of hoogte van de wasser. Dit houdt in dat het model geen verbetering voorspeld als lamellen hoger en minder lang worden gemaakt (en het oppervlak netto hetzelfde blijft).

Het rendement van de wassers kan worden verhoogd door toename van het lameloppervlak of door afname van de aangeboden gasstroom.

# Inhoudsopgave

## Samenvatting

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Systeembeschrijving</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Modellering</b> .....	<b>2</b>
3.1	Modellering op lamellen-niveau .....	2
3.2	Modellering op celniveau .....	4
<b>4</b>	<b>Randvoorwaarden voor het model</b> .....	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Validatie van het model</b> .....	<b>7</b>
5.1	Zomermeting Juni / September 2004 .....	7
5.2	Wintermeting November / December 2004.....	8
<b>6</b>	<b>Voorspellingen met het model</b> .....	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Discussie</b> .....	<b>12</b>
<b>8</b>	<b>Literatuur</b> .....	<b>12</b>
<b>9</b>	<b>Bijlagen</b> .....	<b>13</b>
9.1	Model van een vallende waterfilm met uitwisseling met de langstromende gasfase.....	13

## 1 Inleiding

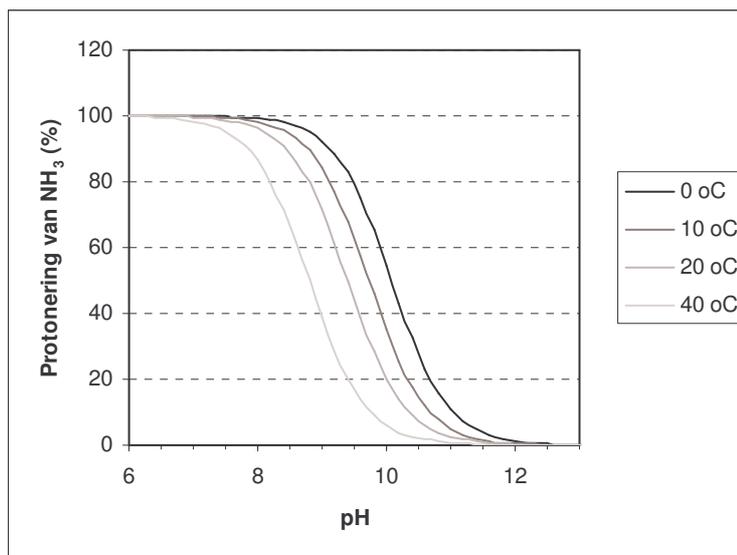
Uniqfill produceert luchtwassers met een lamellenpakket als uitwisselend oppervlak voor massatransport van de gasvormige naar de vloeibare fase. Bij de constructie van deze lamellenfilters werd het merendeel van alle dimensionale besluiten genomen op basis van beschikbaarheid van materiaal en constructietechnische randvoorwaarden. Het resultaat was een goed werkend systeem dat niet verder is geoptimaliseerd met betrekking op de voor stofoverdracht belangrijke constructieparameters.

Op aangeven van Uniqfill is er behoefte om de huidige dimensies van de lamellen (3 x 1 m) te wijzigen (1.5 x 2 m), waardoor bevochtiging van de lamellen kan verbeteren en de luchtweerstand over de luchtwasser kan afnemen. Hierdoor kan tegen een lager energieverbruik een hoger rendement behaald worden.

De hier beschreven haalbaarheidsstudie geeft wetenschappelijk inzicht in de veranderingen die optreden in de werking van de luchtwasser als gevolg van bovengenoemde aanpassing van de lamellenfilters.

## 2 Systeembeschrijving

De wassystemen van Uniqfill zijn gebaseerd op verticaal hangende lamellen die van bovenaf worden besproeid met zuur waswater. De natte lamellen vormen het uitwisselende oppervlak met horizontaal langsstromende lucht. Ammoniak dat aanwezig is in de lucht, wordt ingevangen in de zure waterfase, waar het wordt geprotoneerd tot ammonia. Figuur 1 geeft de protoneringsgraad weer van ammonia als functie van pH en temperatuur.



Figuur 1: Protoneringsgraad van ammonia als functie van de pH en temperatuur.

Duidelijk is dat de protoneringsgraad hoog is voor pH waarden kleiner dan 7. Een stijging in de temperatuur zorgt voor een verlaging van de protoneringsgraad. Dit wordt veroorzaakt doordat de moleculen sneller bewegen bij verhoogde temperatuur, waardoor het ammonia-ammoniak evenwicht verschuift naar de vorm met de meeste entropie (graad van wanorde). Dit is de gasvorm, waardoor er dus bij hoge temperatuur meer  $\text{NH}_3$  zal zijn, hetgeen neerkomt op een verlaagde protoneringsgraad.

In de praktijk wordt het waswater in het wassysteem aangezuurd met zwavelzuur tot  $\text{pH}=1-2$ . Door opname van ammoniak stijgt de pH van het waswater geleidelijk. Er wordt daarom zuur gedoseerd om de pH laag te houden. Tijdens het gebruik stijgt ook de geleidbaarheid van het waswater. Immers, er komen steeds meer ionen in oplossing. Om neerslag van zouten te voorkomen, wordt bij een vastgestelde waarde voor de geleidbaarheid het waswater geheel vervangen door vers aangezuurd water. Het gebruikte waswater wordt gespuid.

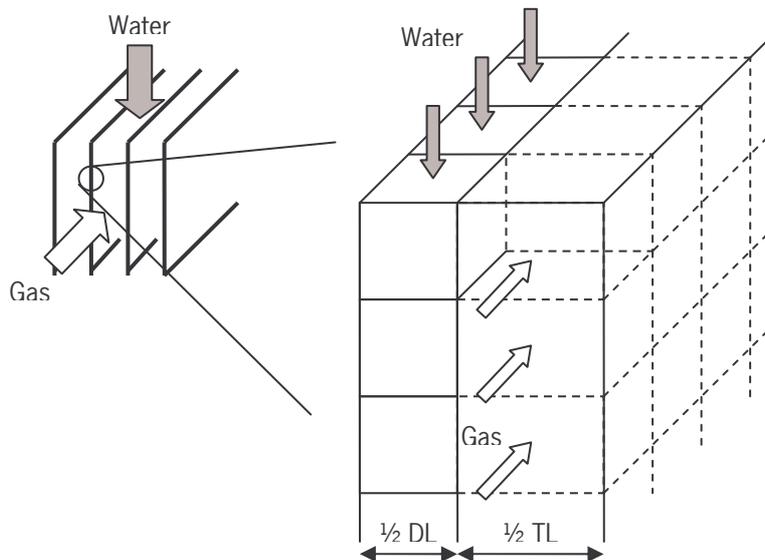
### 3 Modellinging

Het beschreven systeem is redelijk complex van aard. Er zijn veel parameters die tegelijkertijd veranderen. Zo zijn de pH, geleidbaarheid en ammonia concentraties van het waswater aan verandering onderhevig. Dit maakt het beschrijven van de werkelijkheid door een model moeilijk. Om toch uitspraken te kunnen doen over de prestatie van een wassysteem, wordt gebruik gemaakt van een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Deze vereenvoudigingen zijn vastgelegd in de vorm van randvoorwaarden. De randvoorwaarden worden zodanig gekozen dat het model de wasser beschrijft in zijn meest veeleisende omstandigheden: een relatief hoge pH en een hoge geleidbaarheid. Presteert de met deze randvoorwaarden gemodelleerde wasser onder deze condities nog voldoende, dan is het redelijk om aan te nemen dat een wasser in de praktijk betere of op zijn minst gelijkwaardige prestaties zal leveren.

Een verdere aanname is de vorm van het uitwisselende oppervlak. Een werkelijk lamellenfilter is van stof en heeft een pluizig (lees: groot) oppervlak. Dit is echter zeer lastig te omschrijven in een mathematisch model. Daarom wordt er uitgegaan van een vallende waterfilm langs een oppervlak. Het verhoogde transport als gevolg van het grote uitwisselende oppervlak van een werkelijk lamellenfilter wordt dan verdisconteerd in een aangepaste (grotere) massaoverdrachtscoëfficiënt ( $k_m$ ). Hiertoe wordt de massaoverdrachtscoëfficiënt bepaald door ijking van het model met meetgegevens van rendementsmetingen aan bestaande lamellenfilters.

#### 3.1 Modellinging op lamellen-niveau

Uitgaande van de afmetingen van een werkelijk lamellenfilter, kunnen de dimensies van één lamel-kant berekend worden. Deze lamel-kant wordt beschouwd als een vallende waterfilm waarlangs gas in kruisstroom wordt gestuurd. In figuur 2 is te zien hoe de waterfilm en gasstroom zijn opgedeeld in rekencellen. De afmetingen van deze cellen zijn afkomstig van de werkelijke dimensies van het filter.

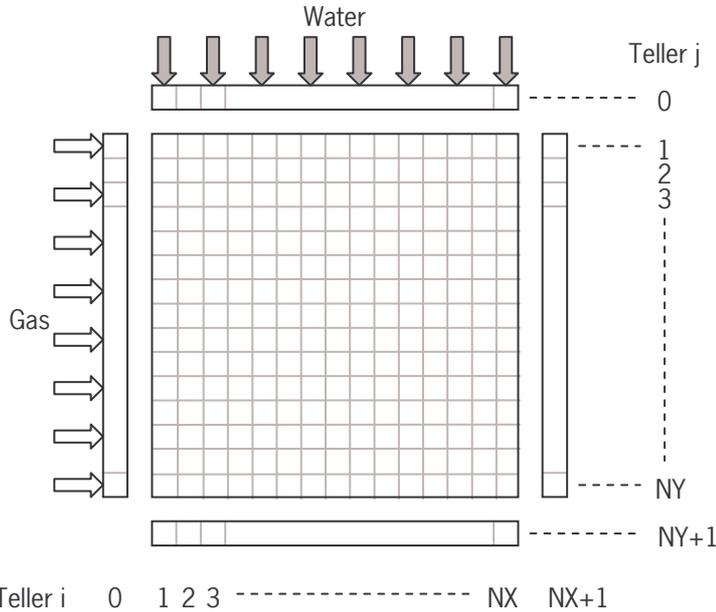


*Figuur 2: Opbouw van het model: links de lamellen zoals deze in een luchtwasser zitten, rechts de uitvergrootte en gemodelleerde weergave van 1 lamel-kant van deze werkelijkheid. Met  $DL$  = dikte lamel en  $TL$  = afstand tussen lamellen (zie tabel 1).*

Elke rekencel bestaat uit twee delen: een deel met de waterfase en een deel met de daar tegenoverstaande gasfase. De gehele lamel wordt opgedeeld in 100 bij 100 van deze rekencellen. Het model wordt flexibel gehouden door deze grootheden te definiëren als constanten  $NX$  en  $NY$ . Het overzicht van cellen voor de waterfase en de gasfase is weergegeven in figuur 3. Naast de matrix van  $NX$  bij  $NY$  worden er nog cellen gedefinieerd voor de in- en uitstroom van de waterfase en de gasfase. Door de instroomvelden te vullen met waarden, kunnen we de startcondities van de wasser beïnvloeden, waardoor meerdere simulaties met elk een

eigen setting achtereenvolgens gedraaid kunnen worden. Deze startcondities zijn ook in het model opgenomen als constanten, zodat deze gemakkelijk in het gehele model kunnen worden aangepast.

In figuur 3 zijn de cellen numeriek weergegeven. Het is een weergave van het gedraaide rechterdeel van figuur 2.



*Figuur 3: Overzicht numerieke definitie van cellen. De cellen met start en eind-condities zijn los weergegeven van het raster van NX bij NY dat de lamelkant modelleert.*

Voor het hele systeem worden een aantal constanten gedefinieerd en een aantal daarvan afgeleide waarden berekend. Deze zijn weergegeven in tabel 1.

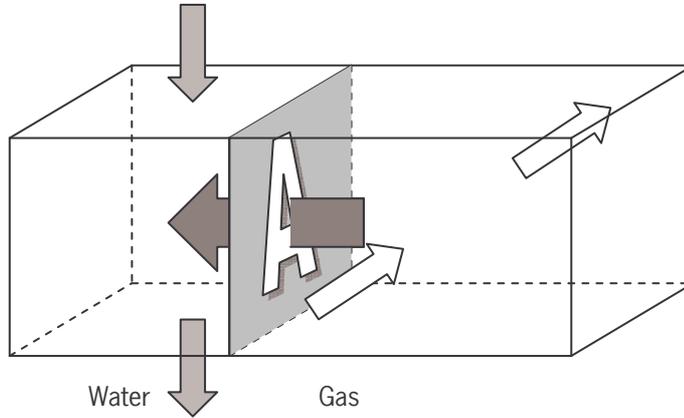
*Tabel 1: Definitie van constanten en afgeleide waarden die voor elke cel gelden.*

Constanten	Beschrijving	Afgeleide waarden	Formule	Beschrijving
TL=	Tussen-lamel afstand (m)	NLK=	NL * 2	Aantal lamelkanten(-)
NL=	Aantal lamellen (-)	WFLK=	WF/NLK	Waterflow per lamelkant (m <sup>3</sup> /sec)
HL=	Hoogte lamellen (m)	GFLK=	GF/NLK	Gasflow per lamelkant (m <sup>3</sup> /sec)
LL=	Lengte lamellen (m)			
DL=	Dikte lamellen (m)	H=	HL/NY	Cellhoogte
WF=	Waterflow (m <sup>3</sup> /sec)	L=	LL/NX	Cellengte
GF=	Gasflow (m <sup>3</sup> /sec)	A=	H * L	Uitwisselend-oppervlak cel (m <sup>2</sup> )
NY=	Aantal cellen hoog (-)			
NX=	Aantal cellen lang (-)	WFC=	WFLK/NX	Waterflow per cel (m <sup>3</sup> /sec)
GasIN=	[NH <sub>3</sub> ] <sub>gas,in</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	GFC=	GFLK/NY	Gasflow per cel (m <sup>3</sup> /sec)
pHinit=	pH instromend water	WCeIV=	DL * A/2	Volume cel waterdeel (m <sup>3</sup> )
Ka=	Zuurconstante NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mol/m <sup>3</sup> )	GCeIV=	TL * A/2	Volume cel gasdeel (m <sup>3</sup> )
Km=	Stofoverdrachtcoëff. (m/sec)			
Henry=	Henryconstante (-)	VW=	WFC * dt/WCeIV	Verversing cel, waterdeel (-)
dt=	Tijdstap (sec)	VG=	GFC * dt/GCeIV	Verversing cel, gasdeel (-)
N=	Aantal rekenstappen (-)			

Het model gaat uit van massatransport door convectie (stroming) gedurende een klein tijdsinterval dt. Er treedt convectie op in zowel de waterfase als de luchtfase. De concentratie van een cel wordt daartoe aangepast voor instroom van zijn "bovenwindse" buur en uitstroom naar zijn "benedenwindse" buur. Vervolgens treedt er instantane uitwisseling op tussen de gas- en waterfase van elke individuele cel. Daarom zijn er naast de globale constanten en afgeleide waarden ook celspecifieke grootheden nodig in het model. Deze komen aan het licht als de interactie tussen het waterdeel en het gasdeel van een cel nader worden bekeken.

### 3.2 Modelling op celniveau

In figuur 4 is een cel weergegeven met daarin een waterkant (links) en een gaskant (rechts). Beide kanten zijn met elkaar verbonden door een uitwisselend oppervlak met grootte A (m<sup>2</sup>). De waarde van A is gedefinieerd in tabel 1.



*Figuur 4: Weergave van 1 cel met daarin de beide fasen, de convectieve massastromen en het massatransport door uitwisselend oppervlak A.*

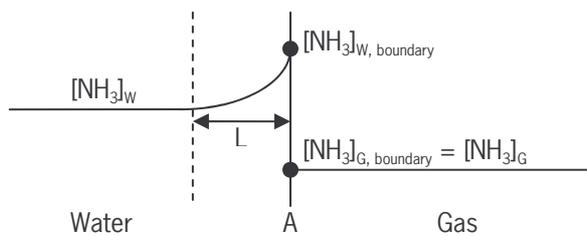
De grootheden die per cel veranderen als er gedurende dt seconden convectief transport optreedt, gevolgd door uitwisseling van ammoniak tussen de gasfase en de waterfase zijn de pH en de concentraties ammoniak en ammonia. Het beschreven model houdt geen rekening met de verdamping van water en de daarbij gepaard gaande hoeveelheid warmtetransport.

Het model houdt rekening met de weerstand van stofoverdracht tussen beide fasen. Deze treedt op aan het grensvlak tussen beide fasen van een cel. De concentratie ammoniak in de gasfase ( $[NH_3]_{B, boundary}$ ) correspondeert met een hogere concentratie ammoniak aan het grensvlak ( $[NH_3]_{W, boundary}$ ) volgens de wet van Henry (1).

$$\text{Henrycoëfficiënt} = H \equiv \frac{[NH_3]_{W, boundary}}{[NH_3]_{G, boundary}} \quad (1)$$

Hashimoto et al.<sup>1</sup> hebben de waarde voor H in het geval voor ammoniak beschreven als functie van de temperatuur. Hier wordt aangenomen dat de wasser werkt bij 20°C (H=1384 (-)).

Het concentratieprofiel voor ammoniak is weergegeven in figuur 5. De weerstand voor stoftransport doet zich voor als een non-lineair verloop in de ammoniakconcentratie aan het grensvlak in de vloeistoffase over een laagje met lengte L. Buiten dit laagje heerst de bulkconcentratie voor ammoniak in de vloeistoffase ( $[NH_3]_W$ ).



*Figure 5: Ammonia concentratie bij het uitwisselende oppervlak*

Het transport van ammoniak kan worden beschreven met behulp van formule 2.

$$\text{Mol getransporteerd} = D \cdot A \cdot \frac{[\text{NH}_3]_{W, \text{boundary}} - [\text{NH}_3]_W}{\text{weglengte } L} \cdot dt \quad (2)$$

Waarbij D/weglengte L gelijk is aan de stofoverdrachtscoëfficiënt  $K_m$  en  $[\text{NH}_3]_{W, \text{boundary}}$  herschreven kan worden met behulp van vergelijking 1 tot:

$$\text{Mol getransporteerd} = K_m \cdot A \cdot (H \cdot [\text{NH}_3]_G - [\text{NH}_3]_W) \cdot dt \quad (3)$$

Het aantal getransporteerde molen wordt numeriek overgebracht van de gasfase (afgeboekt) naar de vloeistoffase (bijgeboekt). De resulterende waarden voor ammoniak en ammonia dienen als uitgangspunt voor de daaropvolgende convectiestap.

Als afwisselend convectie en stoftransport voldoende worden uitgevoerd, dan ontstaat er een eindwaarde voor alle cellen in de matrix zoals weergegeven in figuur 3. Aan de hand van de sommatie van de uittredende concentraties ammonia en ammoniak over de diverse cellen, kan vervolgens het rendement van de luchtwasser worden berekend.

## 4 Randvoorwaarden voor het model

Het opgestelde model is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Zo wordt in de werkelijkheid het lamellen materiaal slechts een paar keer per uur besproeid met de wasvloeistof, terwijl in het model wordt aangenomen dat de waterfase langzaam van boven naar beneden stroomt. Gebruik van het model is daarom alleen indicatief. De inzetbaarheid wordt beperkt door de gemaakte aannames, welke aansluitend kort besproken zullen worden.

### Warmte transport en verdamping

Het model houdt geen rekening met de verdamping van water en het daarbij horende warmtetransport. De relatieve vochtigheid van de langs de lamellen stromende lucht zal in werkelijkheid groter worden. De warmte die nodig is voor verdamping van het water wordt daarbij voornamelijk onttrokken uit het resterende water.

### De waterfase

De weerstand tegen stoftransport in de waterfase maakt mede deel uit van de empirisch bepaalde stofoverdracht coëfficiënt  $k_m$ . Anders dan in  $k_m$ , is er geen rekening gehouden met het lamellen materiaal zelf en de oppervlakte vergroting als gevolg van de vezeligheid van het lamellen materiaal.

### De pH van de waterfase

De pH van de waterfase is constant gehouden. In werkelijkheid zal als gevolg van opname van ammonia, de pH geleidelijk stijgen. Om een reëel beeld van de werkelijkheid te krijgen is er gekozen voor een ongunstige pH. Deze komt overeen met de ingestelde pH waarde (setpoint) van het waswater waarboven er aangezuurd moet worden voor verder bedrijf.

In een later stadium kan de pH van het waswater worden meegenomen in de berekeningen voor de verdeling van de stikstof over beide fasen. Er moet dan voor elke cel en voor elk tijdstip een set van vier vergelijkingen met vier onbekenden worden opgelost. De vergelijkingen in kwestie zijn:

$$\text{Waterevenwicht waterfase:} \quad [H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14} \quad (4)$$

$$\text{Ladingsneutraliteit waterfase:} \quad [H^+] + [NH_4^+] = [OH^-] \quad (5)$$

$$\text{N-balans water- en gasfase:} \quad N_{\text{totaal in cel}} = [NH_3]_g + [NH_4^+]_w \quad \text{met aanname } [NH_3]_{\text{waterfase}} \approx 0 \quad (6)$$

$$\text{Ammonia evenwicht waterfase:} \quad K_a = \frac{[H^+] \cdot [NH_3]}{[NH_4^+]} \quad (7)$$

### De ionen in de waterfase

Bij normaal bedrijf wordt het waswater gespuid als de geleidbaarheid (ionenconcentratie) boven een van tevoren ingestelde waarde uitkomt. Het model betreft slechts de uitwisseling in de wasser, waarbij er geen rekening is gehouden met de invloed van instromende ionen. Uitbreiding van het model met een wateropslag (ideaal gemengd) en terugvoer van het water is in principe mogelijk.

### De gasfase

Er wordt uitgegaan dat er geen weerstand tegen stoftransport (concentratiegradiënt) aanwezig is in de gasfase als gevolg van de menging van deze fase. In werkelijkheid is het mogelijk dat deze weerstand wél zou kunnen optreden, als gevolg van gelaagde (laminaire) gasstroming tussen de lamellen.

### De gebruikte tijdstap $\Delta t$

Alle berekende uitkomsten hebben een bepaalde nauwkeurigheid. Narekenen van deze getallen met een kleinere tijdstap  $\Delta t$  levert nauwkeuriger eindwaarden voor bijvoorbeeld het wasserrendement. Het model wordt instabiel als  $\Delta t$  te groot wordt gekozen ten opzichte van de doorstromingsnelheden van gas (met name) en water. De verversingsgraad van een cel wordt dan groter dan 1, wat fysisch gezien niet mogelijk is. Controle hierop is essentieel. Het naar beneden bijstellen van de tijdstap  $\Delta t$  kan soelaas bieden bij hoge debieten, maar dit gaat wel ten koste van de rekensnelheid en het aantal benodigde stappen om tot een eindresultaat te komen.

## 5 Validatie van het model

Aan de hand van een tweetal duurmetingen aan een lamellenfilter wordt in dit hoofdstuk twee keer een correcte waarde voor de stofoverdrachtscoëfficiënt bepaald. Deze coëfficiënt is niet gelijk voor beide gevallen, omdat het metingen betreft in zomer en winter. De stofoverdrachtscoëfficiënt is namelijk afhankelijk van de temperatuur. Er wordt wel inzicht in de hanteerbaarheid en grootte van deze grootheid verkregen.

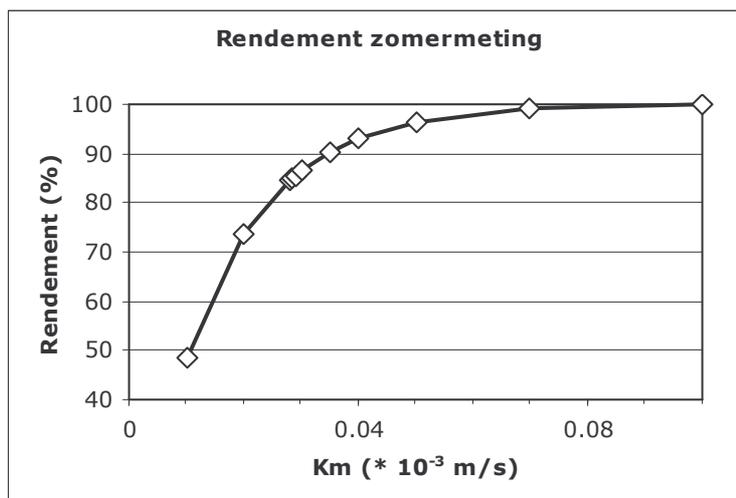
### 5.1 Zomermeting Juni / September 2004

Uit de beschrijving van de apparatuur in de meetrapporten worden de voor het model benodigde constanten gehaald. Een overzicht van de voor de zomermeting<sup>2</sup> gebruikte constanten is weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Constanten voor het systeem zoals deze golden bij de zomermeting aan de UniQFill Chemo.

Constanten	Beschrijving	Waarde
TL	Tussen-lamel afstand (m)	0.01
NL	Aantal lamellen (-)	200
HL	Hoogte lamellen (m)	2
LL	Lengte lamellen (m)	0.5
DL	Dikte lamellen (m)	0.005
WF	Waterflow (m <sup>3</sup> /sec)	36/24=1.5 m <sup>3</sup> /hr = 4.1667 * 10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /sec
GF	Gasflow (m <sup>3</sup> /sec)	8.3
NY	Aantal cellen hoog (-)	200
NX	Aantal cellen lang (-)	100
GasIN	[NH <sub>3</sub> ] <sub>gas,in</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	12.5 ppm = 5.20 * 10 <sup>-4</sup> mol/m <sup>3</sup>
pHinit	pH instromend water	4
T	Temperatuur (°C)	20
Ka	Zuurconstante NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mol/m <sup>3</sup> )	5.85 * 10 <sup>-7</sup>
Henry	Henryconstante (-)	1384
dt	Tijdstap (sec)	0.001
N	Aantal rekenstappen (-)	10000

Het gemeten wasserrendement bedroeg 85%. Met behulp van het model kan voor een reeks van waarden voor  $K_m$  het wasserrendement worden berekend. In figuur 6 zijn de berekende rendementen weergegeven als functie van  $K_m$  voor de wintermeting. Uit deze figuur blijkt dat de overall stofoverdrachtcoëfficiënt  $K_m$  voor deze metingen de waarde  $2.85 * 10^5$  m/sec heeft.



Figuur 6: Berekende resultaten voor het rendement van de UniQFill Chemo als functie van de stofoverdrachtcoëfficiënt. Constanten voor het model staan vermeld in tabel 2.

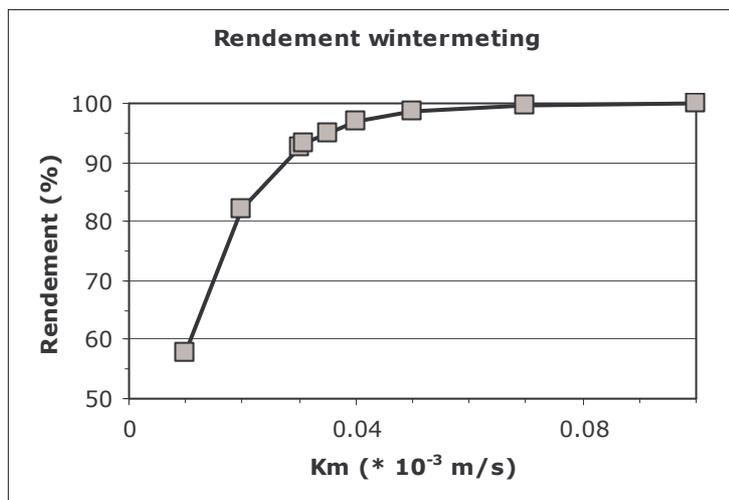
## 5.2 Wintermeting November / December 2004

Uit de beschrijving van de apparatuur in de meetrapporten worden de voor het model benodigde constanten gehaald. Een overzicht van de voor de wintermeting<sup>3</sup> gebruikte constanten is weergegeven in tabel 3.

Tabel 3: Constanten voor het systeem zoals deze golden bij de wintermeting aan de UniQFill Chemo.

Constanten	Beschrijving	Waarde
TL	Tussen-lamel afstand (m)	0.01
NL	Aantal lamellen (-)	200
HL	Hoogte lamellen (m)	2
LL	Lengte lamellen (m)	0.5
DL	Dikte lamellen (m)	0.005
WF	Waterflow (m <sup>3</sup> /sec)	36/24=1.5 m <sup>3</sup> /hr = 4.1667 * 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /sec
GF	Gasflow (m <sup>3</sup> /sec)	8.3
NY	Aantal cellen hoog (-)	200
NX	Aantal cellen lang (-)	100
GasIN	[NH <sub>3</sub> ] <sub>gas,in</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	21.9 ppm = 9.26 * 10 <sup>4</sup> mol/m <sup>3</sup>
pHinit	pH instromend water	4
T	Temperatuur (°C)	15
Ka	Zuurconstante NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mol/m <sup>3</sup> )	6.05 * 10 <sup>-7</sup> mol/ m <sup>3</sup>
Henry	Henryconstante (-)	1791.7 (-)
dt	Tijdstap (sec)	0.001
N	Aantal rekenstappen (-)	10000

Het gemeten wasserrendement bedroeg 93%. Met behulp van het model kan voor een reeks van waarden voor  $K_m$  het wasserrendement worden berekend. In figuur 7 zijn de berekende rendementen weergegeven als functie van  $K_m$  voor de wintermeting. Uit deze figuur blijkt dat de overall stofoverdrachtcoëfficiënt  $K_m$  voor deze metingen de waarde  $3.10 \cdot 10^5$  m/sec heeft.



Figuur 7: Berekende resultaten voor het rendement van de UniQFill Chemo als functie van de stofoverdrachtcoëfficiënt. Constanten voor het model staan vermeld in tabel 3.

## 6 Voorspellingen met het model

In dit hoofdstuk wordt een vergelijking tussen twee systemen gemaakt. Het verschil tussen beide systemen is de fysieke vorm van de lamellenconfiguratie. Er wordt een voorspelling van het rendement gedaan binnen de randvoorwaarden van het model.

Tabel 4: Constanten voor systeem A.

Constanten	Beschrijving	Waarde
TL	Tussen-lamel afstand (m)	0.009
NL	Aantal lamellen (-)	105
HL	Hoogte lamellen (m)	1
LL	Lengte lamellen (m)	1
DL	Dikte lamellen (m)	0.005
WF	Waterflow (m <sup>3</sup> /sec)	48/24=2 m <sup>3</sup> /hr = 5.555 * 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /sec
GF	Gasflow (m <sup>3</sup> /sec)	8.3
NY	Aantal cellen hoog (-)	100
NX	Aantal cellen lang (-)	100
GasIN	[NH <sub>3</sub> ] <sub>gas,in</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	21.9 ppm = 9.26 * 10 <sup>4</sup> mol/m <sup>3</sup>
pHinit	pH instromend water	4 en 3.5
T	Temperatuur (°C)	15
Ka	Zuurconstante NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mol/m <sup>3</sup> )	6.05 * 10 <sup>-7</sup> mol/ m <sup>3</sup>
Km	Stofoverdrachtsconstante (m/sec)	3.10 * 10 <sup>-5</sup> m/sec
Henry	Henryconstante (-)	1791.7 (-)
dt	Tijdstap (sec)	0.001
N	Aantal rekenstappen (-)	10000

Met de constanten zoals gegeven in Tabel 4 wordt met het model een rendement van 75.6547 procent berekend voor pH=4. Wordt de pH op 3,5 (strikter) gesteld, dan wordt hetzelfde rendement berekend. Dit komt doordat de protoneringsgraad nauwelijks verschilt bij deze twee pH's (zie figuur 1).

Tabel 5: Constanten voor systeem B.

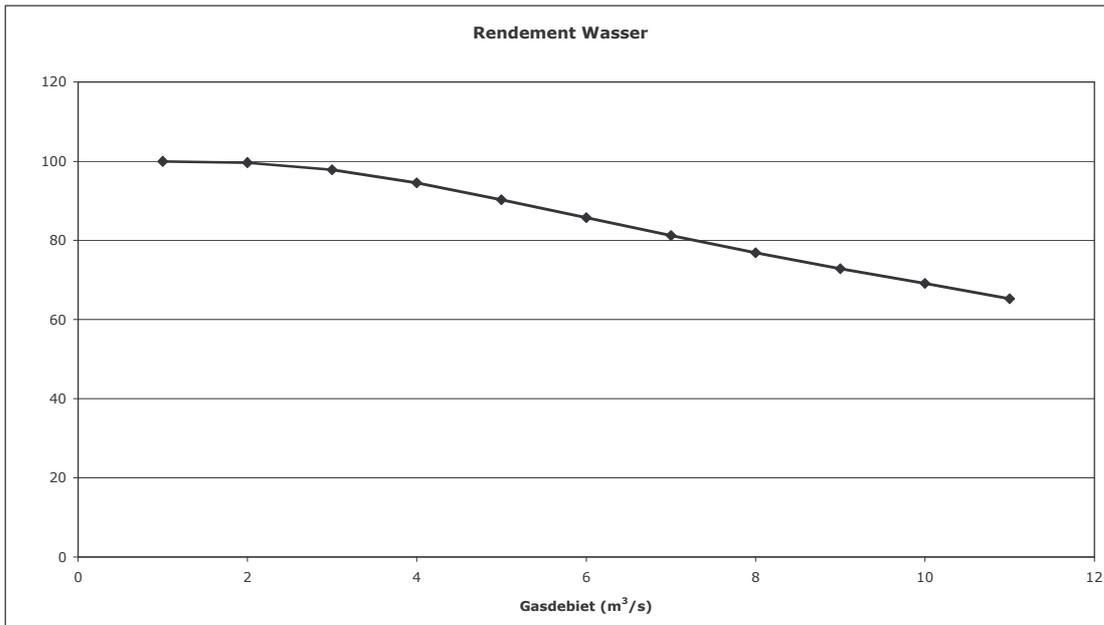
Constanten	Beschrijving	Waarde
TL	Tussen-lamel afstand (m)	0.009
NL	Aantal lamellen (-)	105
HL	Hoogte lamellen (m)	2
LL	Lengte lamellen (m)	0.5
DL	Dikte lamellen (m)	0.005
WF	Waterflow (m <sup>3</sup> /sec)	48/24=2 m <sup>3</sup> /hr = 5.555 * 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /sec
GF	Gasflow (m <sup>3</sup> /sec)	8.3
NY	Aantal cellen hoog (-)	200
NX	Aantal cellen lang (-)	100
GasIN	[NH <sub>3</sub> ] <sub>gas,in</sub> (mol/m <sup>3</sup> )	21.9 ppm = 9.26 * 10 <sup>4</sup> mol/m <sup>3</sup>
pHinit	pH instromend water	4 en 3.5
T	Temperatuur (°C)	15
Ka	Zuurconstante NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mol/m <sup>3</sup> )	6.05 * 10 <sup>-7</sup> mol/ m <sup>3</sup>
Km	Stofoverdrachtsconstante (m/sec)	3.10 * 10 <sup>-5</sup> m/sec
Henry	Henryconstante (-)	1791.7 (-)
dt	Tijdstap (sec)	0.001
N	Aantal rekenstappen (-)	10000

Met de constanten zoals gegeven in Tabel 5 wordt met het model eveneens een rendement van 75.6547 procent berekend. Het blijkt dat zelfs met HL= 10 m en LL= 0.1 m eenzelfde rendement verkregen wordt. De contacttijd tussen gasfase en vloeistoffase is in al deze gevallen gelijk, omdat de ingaande gasstroom over de gehele voorkant (dus hoogte HL keer breedte) wordt verdeeld. Alleen het lameloppervlak bepaalt in het model het uiteindelijk berekende rendement.

Uit het beeld van de ammonia concentratie in de individuele cellen van het model, blijkt dat er een groot verschil is in de stikstofinhoud tussen de gas- en vloeibare fase. Het gevolg hiervan is dat de concentratie ammonia in een pakketje water (figuur 3) dat de wasser 1 keer passeert nauwelijks zal toenemen. De stofoverdracht vanuit de

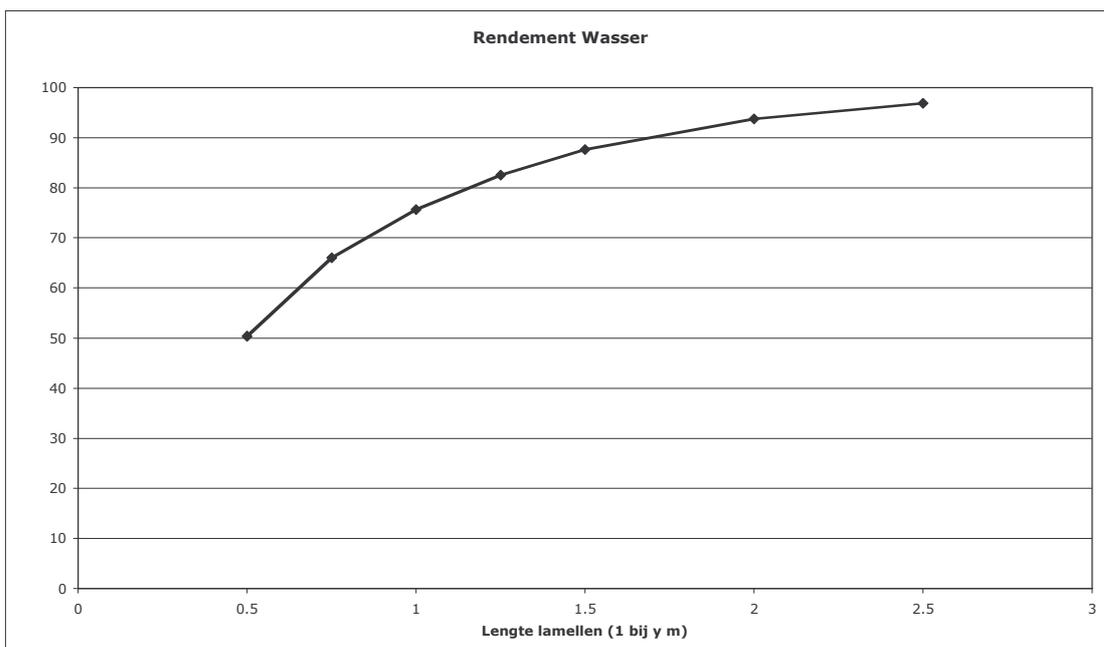
gasfase naar de vloeistoffase is daarom nagenoeg gelijk over een verticale lijn in de wasser. Het aantal van deze lijnen achter elkaar (de diepte van de wasser) is daarmee bij gelijkblijvende luchtstroom de belangrijkste parameter in de verwijdering van ammonia uit de gasfase. Vergroting van het rendement kan binnen de randvoorwaarden van het model alleen bereikt worden door een hogere contacttijd tussen de gas- en waterfase. Deze kan gerealiseerd worden door verlaging van het gasdebiet, door verlenging van de lamellen (grotere LL) bij gelijkblijvende hoogte (HL), of door verhoging van de lamellen bij gelijkblijvende lamel lengte. Deze drie opties zijn doorgerekend met de constanten zoals vermeld in tabel 4.

De invloed van de directe verlaging van de luchtstroom bij gelijkblijvende lamellendimensies op het rendement van de luchtwasser is weergegeven in figuur 8.



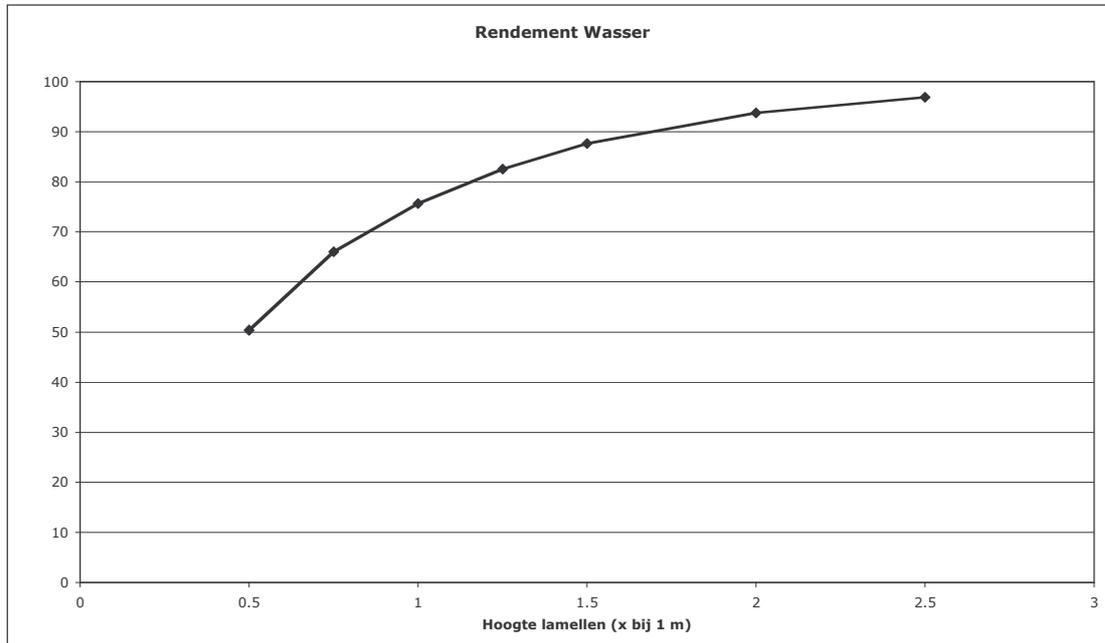
*Figuur 8: Rendement als functie van het gasdebiet bij gelijkblijvende lamellen dimensies (1x1 m).*

De invloed van de verlenging van de lamellen bij gelijkblijvende lamel hoogte op het rendement van de luchtwasser is weergegeven in figuur 9. In deze situatie wordt de verblijftijd verhoogd door de weglengte van de gasfase te verlengen. De 90% rendementslijn wordt gekruist net onder de 1.75 m lengte.



*Figuur 9: Rendement als functie van het gasdebiet bij toenemende lamellengte (1 bij y m).*

De invloed van de verhoging van de lamellen bij gelijkblijvende lamel lengte op het rendement van de luchtwasser is weergegeven in figuur 10. In deze variant wordt de luchtstroom over het lamel oppervlak verlaagd door te kiezen voor een groter aanstroomoppervlak. Vanwege de eerder bediscussieerde afhankelijkheid tussen het rendement en het oppervlak van de lamellen, is deze grafiek exact hetzelfde als figuur 9, met dien verstande dat nu de hoogte is uitgezet tegen het rendement.



*Figuur 10: Rendement als functie van het gasdebiet bij toenemende lamelhoogte (x bij 1 m).*

## 7 Discussie

De berekeningen die in dit verslag staan beschreven werden uitgevoerd om na te gaan of het opdelen en herschikken van lamellen in een chemische wasser zorgt voor een betere ammoniakverwijdering. Opdrachtgever UniqFill wilde de lengte van de lamellen reduceren en tegelijkertijd de hoogte vergroten, waarbij het totale lameloppervlak hetzelfde zou blijven. Doel hierbij was een verlaging van de drukval over de chemische wasser. Randvoorwaarde was een gelijkblijvend of hoger wasserrendement.

Binnen de randvoorwaarden van het model blijkt dat een dergelijke herverdeling van het bestaande wasseroppervlak geen invloed heeft op het wasserrendement. Wel is aangetoond dat de lamellenwassers betere resultaten bereiken als de verblijftijd van het langsstromende gas wordt verhoogd. Dit kan door het gasdebiet te verlagen of door het lamellenoppervlak te vergroten.

Het model is in beginsel geschikt voor uitbreidingen. Zo kan de pH in principe als celvariabele worden meegenomen. In hoeverre dit het eindresultaat zal beïnvloeden is nog onduidelijk, temeer omdat de protonering van ammoniak in het gebruikte pH en temperatuur regime hoog is (nabij 100%).

## 8 Literatuur

1. Hashimoto, A.G. and Ludington, D.C., *Ammonia desorption from concentrated chicken manure slurries.*, in *Livestock waste management and pollution abatement*. 1971, ASAE: St. Joseph, MI 49085. p. 117-121.
2. Ortlinghaus, O. and Zwoll, M., *Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen. UniQFill. Juni-September 2004*. 2004, Fachhochschule Münster: Münster. p. 26.
3. Ortlinghaus, O. and Zwoll, M., *Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen. UniQFill. November-December 2004*. 2004, Fachhochschule Münster: Münster. p. 26.

## 9 Bijlagen

### 9.1 Model van een vallende waterfilm met uitwisseling met de langstromende gasfase

```

program Wasser;
  uses
    FPCMacOSAll;

  const
    TL      = 0.01;           // Afstand tussen Lamellen (m)
    NL      = 200;           // Aantal Lamellen (-)
    HL      = 2;             // Hoogte Lamellen (m)
    LL      = 0.5;          // Lengte Lamellen (m)
    DL      = 0.005;        // Dikte Lamellen (m)
    WF      = 4.1667e-4;     // Waterflow (m3/sec)
    GF      = 8.3;          // Gasflow (m3/sec)
    NY      = 200;          // Aantal cellen hoog (-)
    NX      = 100;          // Aantal cellen lang (-)
    GasIN   = 9.26e-4;      // Concentratie NH3 instromend gas (mol/m3)
    pHinit  = 4;           // pH instromend water
    Temp    = 15;          // Temperatuur
    ka      = 6.05e-7;      // zuurconstante NH4plus bij 15 graden (mol/m3)
    km      = 0.000031;    // mass transfer constante (m/sec)
    Henry   = 1791.7;      // Henry constante volgens hashimoto et albij T=15 graden
    dt      = 0.001;       // Tijdstapje (sec)
    n       = 10000;       // Aantal berekeningen (-)

  var
    NLK     : integer;      // Aantal lamelkanten (-)
    WFLK    : real;        // Waterflow per lamelkant (m3/sec)
    GFLK    : real;        // Gasflow per lamelkant (m3/sec)

    H       : real;        // Celhoogte (m)
    L       : real;        // Cellengte (m)
    WCellV  : real;        // Celvolume waterkant (m3)
    GCellV  : real;        // Celvolume gaskant (m3)
    A       : real;        // Uitwisselend oppervlak per cel (m2)
    WFC     : real;        // Waterflow per cel (m3/sec)
    GFC     : real;        // Gasflow per cel (m3/sec)
    VW      : real;        // Verversingsfactor volumeflow/volume cel water (-)
    VG      : real;        // Verversingsfactor gasflow/volume cel gas (-)
    WNuit   : real;        // Uitflow van molen uit de wasser in de waterfase (mol)
    GNCuit  : real;        // Uitflow van NH3 uit de wasser in de gasfase (mol/m3)
    step,i,j : integers;   // tellers

    GNH3    : array[0..(NX+1), 0..(NY+1)] of double; // concentratie NH3 gasfase (mol/m3)
    WN      : array[0..(NX+1), 0..(NY+1)] of double; // molen N in de waterfase (mol)
    WNH3    : array[0..(NX+1), 0..(NY+1)] of double; // concentratie NH3 waterfase (mol/m3)
    WNH4    : array[0..(NX+1), 0..(NY+1)] of double; // concentratie NH4 waterfase (mol/m3)
    WHplus  : array[0..(NX+1), 0..(NY+1)] of double; // concentratie H+ waterfase (mol/m3)
    Transfer : array[0..NX, 0..NY] of double; // transferred ammonia per cel(mol)

begin
  // Per lamelkant basisgrootheden
  H := HL/NY;
  L := LL/NX;
  A := H*L;
  NLK := 2*NL;
  WFLK := WF/NLK;
  GFLK := GF/NLK;
  WFC := WFLK/NX;
  GFC := GFLK/NY;
  WCellV := 0.5*DL*A;
  GCellV := 0.5*TL*A;
  VW := (WFC*dt)/WCellV;

```

```

VG := (GFC*dt)/GCeIV;
writeln('Celhoogte   = ',H:8:8,' (m)');
writeln('Cellengte   = ',L:8:8,' (m)');
writeln('Uitw.oppervlak = ',A:8:8,' (m2)');
writeln('WCeIVolume   = ',WCeIV:8:8,' (m3)');
writeln('GCeIVolume   = ',GCeIV:8:8,' (m3)');
writeln('Waterflow Cel = ',WFC:8:8,' (m3/sec)');
writeln('Gasflow Cel   = ',GFC:8:8,' (m3/sec)');
writeln('Verversing water= ',VW:8:8,' (-)');
writeln('Verversing gas = ',VG:8:8,' (-)');

// Initieren van de gas en waterfase met lege waarden

for i:= 0 to NX+1 do
begin
for j:= 0 to NY+1 do
begin
GNH3[i,j]:=0;
WNH3[i,j]:=0;
WNH4[i,j]:=0;
WHplus[i,j]:=exp(-pHinit*ln(10))*1000;           // let op: x 1000, want mol/m3
end;
end;

// Initieren van de gas instroom
for j:= 1 to NY do
begin
GNH3[0,j] := GasIN;
end;

// Initieren van de waterstroom
for i:= 1 to NX do WNH4[i,0] := 0;

for i:=1 to NX do                               // bereken WN (mol) voor elke cel
begin
for j:=0 to (NY+1) do WN[i,j]:= ( WNH3[i,j]+WNH4[i,j] )*WCeIV;
end;
WNuit:=0;
GNCuit:=0;
writeln;

// MAIN calculation loop
// -----
for step:= 1 to n do
begin
// Print tussenresultaten

writeln('==== Step ',step,' ===== In: gas=',GasIN*GFLK,'mol/sec ===== Uit: water=',
WNuit*WFLK/(WCeIV*NX),' mol/sec gas=',GNCuit*GFLK,' mol/sec ===== Rendement=',
100-(GNCuit/GasIN*100):4:4,'% =====');
writeln('WNH4 [1, 0]=' WNH4[1,0], [20, 0]=' WNH4[20,0], [40, 0]=' WNH4[40,0], [60, 0]='
WNH4[60,0], [80, 0]=' WNH4[80,0], [100, 0]=' WNH4[100,0]);
writeln('WNH4 [1, 1]=' WNH4[1,1], [20, 1]=' WNH4[20,1], [40, 1]=' WNH4[40,1], [60, 1]='
WNH4[60,1], [80, 1]=' WNH4[80,1], [100, 1]=' WNH4[100,1]);
for j:= 1 to 5 do writeln('WNH4 [1, (j*20):3]=' WNH4[1,(j*20)], [20, (j*20):3]=' WNH4[20,(j*20)],
[40, (j*20):3]=' WNH4[40,(j*20)], [60, (j*20):3]=' WNH4[60,(j*20)], [80, (j*20):3]='
WNH4[80,(j*20)], [100, (j*20):3]=' WNH4[100,(j*20)]);
writeln("");
writeln('GNH3 [0, 0]=' GNH3[0,0], [1, 0]=' GNH3[1,0], [20, 0]=' GNH3[20,0], [40, 0]=' GNH3[40,0],
[60, 0]=' GNH3[60,0], [80, 0]=' GNH3[80,0], [100, 0]=' GNH3[100,0], [101, 0]='
GNH3[101,0]);
writeln('GNH3 [0, 1]=' GNH3[0,1], [1, 1]=' GNH3[1,1], [20, 1]=' GNH3[20,1], [40, 1]=' GNH3[40,1],
[60, 1]=' GNH3[60,1], [80, 1]=' GNH3[80,1], [100, 1]=' GNH3[100,1], [101, 1]='
GNH3[101,1]);
for j:= 1 to 5 do writeln('GNH3 [0, (j*20):3]=' GNH3[0,(j*20)], [1, (j*20):3]=' GNH3[1,(j*20)],

```

```

' [20,',(j*20):3,]=',GNH3[20,(j*20)],' [40,',(j*20):3,]=',GNH3[40,(j*20)],' [60,',(j*20):3,]=',
GNH3[60,(j*20)],' [80,',(j*20):3,]=',GNH3[80,(j*20)],' [100,',(j*20):3,]=',GNH3[100,(j*20)],
' [101,',(j*20):3,]=',GNH3[101,(j*20)];
writeln("");
writeln('WN [1, 1]=',wn[1,1],' [20, 1]=',wn[20,1],' [40, 1]=',wn[40,1],' [60, 1]=',wn[60,1],' [80, 1]=',
wn[80,1],' [100, 1]=',wn[100,1]);
for j:= 1 to 5 do writeln('WN [1,',(j*20):3,]=',wn[1,(j*20)],' [20,',(j*20):3,]=',wn[20,(j*20)],
' [40,',(j*20):3,]=',wn[40,(j*20)],' [60,',(j*20):3,]=',wn[60,(j*20)],' [80,',(j*20):3,]=',wn[80,(j*20)],
' [100,',(j*20):3,]=',wn[100,(j*20)]);
writeln('WN [1,101]=',wn[1,101],' [20,101]=',wn[20,101],' [40,101]=',wn[40,101],' [60,101]=',
wn[60,101],' [80,101]=',wn[80,101],' [100,101]=',wn[100,101]);
writeln("");

// transport water naar beneden met WNH3, WNH4 en WHplus nieuw uitrekenen

for i:=1 to NX do
begin
for j:= NY+1 downto 1 do
begin
WN[i,j]:=WN[i,j] - (VW*WN[i,j]) + (VW*WN[i,(j-1)]); // stikstof doorstroom
WHplus[i,j]:=WHplus[i,j] - (VW*WHplus[i,j]) + (VW*WHplus[i,(j-1)]); // Hplus doorstroom
WNH4[i,j]:= WN[i,j]/( WCeIV*(1 + (1/ (1+ (WHplus[i,j]/ka) )))); // herverdeling NH4
WNH3[i,j]:= (WN[i,j]/WCeIV) - WNH4[i,j]; // herverdeling NH3
end;
end;

// Calculatie water uitflow (mol waterfase)
WNuit:=0;
for i:=1 to nx do WNuit:=WNuit+WN[i,(ny+1)];

// Transport gas in gasrichting en bereken de nieuwe GNH3

for j:= 1 to NY do
begin
for i:= nx+1 downto 1 do GNH3[i,j]:=GNH3[i,j]-(VG*GNH3[i,j])+(VG*GNH3[i-1,j]);
end;

// Calculatie water uitflow (mol gasfase)

GNCuit:=0;
for j:=1 to NY do GNCuit:=GNCuit+GNH3[(NX+1),j];
GNCuit:=GNCuit/NY;

// Mass transfer uitrekenen en berekenen nieuwe gas en waterfase pH wordt constant genomen

for i:=1 to nx do
begin
for j:= 1 to ny do
begin
transfer[i,j]:=km*A*dt*( (Henry*GNH3[i,j]) - (ka*WNH4[i,j]/WHplus[i,j]) ); // aantal molen transfer
GNH3[i,j]:=GNH3[i,j]-(transfer[i,j]/GCeIV); // nieuwe gasconc.
WN[i,j]:=WN[i,j]+transfer[i,j]; // nieuwe totale N in waterkant cel
WNH4[i,j]:=WN[i,j]/WCeIV*(1- (ka/(WHplus[i,j]+ka))); // nieuwe verdeling NH3 NH4plus
WNH3[i,j]:= (WN[i,j]/WCeIV)-WNH4[i,j];
end;
end;

end; // Einde main loop van berekeningen

end. // Einde programma

```