

GEURBESTRIJDING BIJ DE BIOLOGISCHE AFVALWATERZUIVERING

H. VERACHTERT,
B. WECKHUYSEN*

K.U. Leuven
Faculteit Landbouwwetenschappen
Laboratorium voor Industriële
Microbiologie en Biochemie
L. VRIENS
Seghers Engineering

ODOR CONTROL AROUND BIOLOGICAL WASTE WATER TREATMENT PLANTS

Waste water treatment plants are solving a primary environmental problem. However secondary environmental effects such as odor nuisance may occur. Different techniques can be used for the abatement of odor nuisance. Biological methods are favoured because of their high elimination efficiencies, relatively low cost and simple operational conditions.

In this study, experiments were performed using biological purification systems. Different odor compounds such as butanal, butyric acid and ammonia were removed from synthetic waste gas by lab-scale wood bark biofilters. Different parameters must be

controlled to achieve high removal efficiencies: humidity of the filter material, nutrient supply, buffering salts in the filter material and loading of the odour compound. It was shown that high and stable elimination efficiency and capacity were obtained by nutrient supplementation. High elimination efficiencies are necessary for the odor control, and for high elimination capacity, low biofilter surface should be realized.

In this study the development of a new concept of biological purification is also described and designed as a biotrickling filter-biofilter system. This concept is evaluated from lab-scale over pilot-scale to a real full scale installation. The main advantages of this concept are high elimination efficiencies, high versatility, compactness and low operational costs.

1. INLEIDING

Het aantal klachten over geurhinder is de laatste tientallen jaren sterk toegenomen. Ongeveer één milieuklacht op 5 in Vlaanderen heeft betrekking op geurhinder (1). Hiervoor kunnen verschillende oorzaken worden genoemd. In de eerste plaats zijn door de sterke industrialisatie, de woon- en industriegebieden steeds dichters naar elkaar toegroeid. De stanklucht wordt door het transport over kleine afstand onvoldoende verdund, zodat in de nabijgelegen woongebieden geuroverlast kan optreden. Een tweede belangrijke oorzaak is ongetwijfeld, dat de mens zelf kritischer geworden is voor elke vorm van milieuvuiling. Terwijl men vroeger alle hinder en verontreiniging aanzag als een noodzakelijk kwaad, komt men nu steeds meer op voor een schoon leefmilieu.

Belangrijke sectoren zoals de chemische industrie, de levensmiddelenindustrie en de intensieve veeteelt zijn verantwoordelijk

voor deze geurhinder. Ook bij de afvalwaterzuivering kan er geurhinder ontstaan, dit maakt ongeveer 14 % van alle klachten over geurhinder in Vlaanderen uit (1). Deze geurhinder is wel een vorm van secundaire milieuverontreiniging aangezien een afvalwaterzuiveringsinstallatie (AWZI) een primair milieuprobleem, nl. het zuiveren van verontreinigd oppervlaktewater wil oplossen. Omwille van zijn relatief grote milieu-impact is er de laatste jaren heel wat onderzoek gedaan om technieken voor geurbestrijding te ontwikkelen en te verbeteren.

2. GEURHINDER ROND AFVALWATERZUIVERINGSINSTALLATIES

2.1. Ontstaan van geurhinder

Geurhinder ontstaat wanneer geurverbindingen uit het water aan de omgevingslucht worden vrijgesteld. De emissie van geurcomponenten kan het gevolg zijn van verbindingen die, ofwel reeds aanwezig zijn in het afvalwater ofwel gevormd worden tijdens het transport of in het zuiveringsproces. De rechtstreekse vrijstelling van geurcomponenten kan belangrijker worden als er naast huishoudelijk ook industrieel afvalwater behandeld wordt. De emissie van geurverbindingen uit het water kan gebeu-

ren juist voor het beluchten zoals bij opslag in buffertanks, maar ook bij hoge belasting in het beluchtingsbekken (2). Anaerobe afvalwaterzuivering en slibverwerking kunnen ook aanleiding geven tot geuroverlast. Verschillende verbindingen kunnen verantwoordelijk zijn voor geurhinder, doch al deze stoffen bezitten één welbepaald kenmerk: een lage geurdrempelwaarde! De geurdrempelwaarde geeft de laagste concentratie van een geurcomponent weer, die nog juist door 50 % van een geurpaneel kan waargenomen worden. Bij huishoudelijke afvalwaters kunnen er zowel organische als anorganische geurverbindingen gevormd worden. De meest typische anorganische geurverbinding is wel waterstofsulfide (3). Deze verbinding ontstaat uit sulfaat en uit organische S (in eiwitten). Zodra het afvalwater zuurstofloos wordt, hoopt zich het uit de organische stof gevormde sulfide op. Wanneer het afvalwater een zekere mate aan rotting heeft, m.a.w. als naast zuurstof ook nitraat opgebruikt is, wordt uit sulfaat waterstofsulfide gevormd. Naast anorganische verbindingen worden er eveneens organische verbindingen vrijgesteld, nl. vetzuren, aldehyden, ketonen, enz. (4,5). Deze verbindingen komen hoofdzakelijk vrij bij anaerobe waterzuivering, bij overbelaste aerobe AWZI en bij de thermische behandeling van slib. Voor industriële lozingen is

* Bert Weckhuysen is laureaat van de Studieprijs 'Water' 1991-1992 en dankt het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek (N.F.W.O.) voor een mandaat als Aspirant.

Tabel 1. Overzicht van de verschillende zuiveringstechnieken om geurhinder rond AWZI op te lossen.

Zuiveringstechnieken	
Fysische methoden	Adsorptie : verwijdering van geurcomponent door adsorptie op een vaste fase (adsorbens), meestal actieve kool; vergt regeneratie van het adsorbens.
	Absorptie : verwijdering van geurcomponent door opname in een vloeistof bvb. HCl; vergt nazuivering van de beladen wasvloeistof.
	Geurmaskering : neutralisatie van een hinderlijke geur door toevoeging van een aangename geur m.a.w. eigenlijk geen zuivering.
Chemische methoden	Oxydatie met Ozon : oxydatieve verwijdering van geurcomponent; O ₃ is relatief duur en toxisch voor mens en dier.
	Verbranding : bij hoge temperatuur (hoge kostprijs) maar de verbrandings-temperatuur kan verlaagd worden door gebruik van een katalysator.
Biologische methoden	Biofilter : microbiologische afbraak van geurcomponent tot CO ₂ , H ₂ O en mineralen; enkel voor afvalgassen bij lage temperatuur (T < 40 °C).
	Biowasser : microbiologische afbraak van geurcomponent tot CO ₂ , H ₂ O en mineralen
	Biowasfilter : microbiologische afbraak van geurcomponent tot CO ₂ , H ₂ O en mineralen

Tabel 2. Onderscheid tussen de verschillende biologische zuiveringstechnieken.

Microbiële flora	Waterige fase	
	Mobiel	Stationair
gesuspendeerd	biowasser	-
geïmmobiliseerd	biowasfilter	biofilter

het scala aan geurcomponenten groter maar ook typischer (meer overheersend).

2.2. Preventie en Bestrijding van Geurhinder

Om geurhinder rond AWZI op te lossen, kan men zowel preventief als curatief te werk gaan (6). De preventie voor geurhinder situeert zich op twee niveaus, nl. bij de bouw en bij de exploitatie van een AWZI. Bij de constructie moet men de produktie van geurcomponenten vermijden door bvb. de verblijftijd in transportleidingen zo kort mogelijk te houden (anaerobe condities vermijden). Indien er dan toch geurcomponenten gevormd worden, moet men de emissie hiervan verminderen door het kontaktoppervlak lucht-water te verkleinen. Daarnaast moet men bij de bouw oordeelkundig de plaats van een AWZI kiezen, d.w.z. indien mogelijk op voldoende afstand van woongebieden. Tijdens de exploitatie van een AWZI kunnen verschillende maatregelen genomen worden, zoals (1) het beperken van de overgang van geurcomponenten van water naar de lucht door pH-correctie en turbulentievermindering; (2) het neerslaan of oxyderen van geurcomponenten in het transportsysteem en (3) het tegengaan van zuurstofloosheid in transportleidingen door nitraattoevoeging of zuurstofinjectie.

Wanneer preventieve maatregelen onvoldoende blijken te zijn, kan men delen van een AWZI overkappen en de stanklucht zuiveren m.b.v. bepaalde technieken. Deze technieken kan men indelen in drie grote groepen : chemische, fysische en biologische methoden. In tabel 1 wordt een overzicht van de verschillende zuiveringstechnieken gegeven. Daar het meestal gaat om grote volumes te behandelen lucht, waarbij de concentratie aan geurcomponenten laag is, bieden biologische methoden een goed alternatief voor chemische en fysische technieken. Biologische methoden werken met een hoge efficiëntie, zijn relatief goedkoop en vragen meestal om een eenvoudige procesvoering. Het belangrijkste onderdeel is ongetwijfeld dat de geurcomponenten niet aangerijkt worden in een andere fase zoals bij chemische methoden (gaswassing) en fysische methoden (adsorptie op actieve kool). Omwille van deze redenen beperken we ons hier tot de biologische technieken. Voor een algemeen overzicht van de mogelijke zuiveringstechnieken verwijzen we de geïnteresseerde lezer naar een werk van Ottengraf (7).

3. BIOLOGISCHE LUCHTZUIVERINGSTECHNIKEN

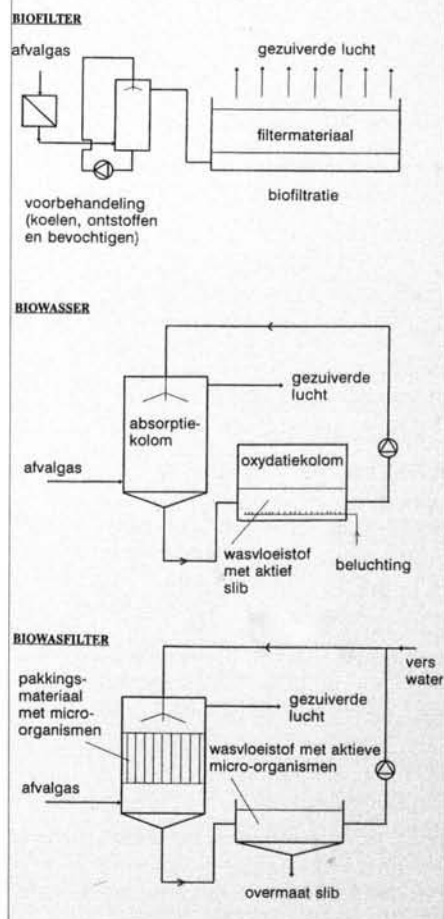
Bij de biologische methoden worden de geurcomponenten afgebroken door micro-

organismen. De afbraak van deze molekulen levert de energie voor het microbiële metabolisme en de bouwstoffen voor de aanmaak van nieuwe biomassa. De geurcomponenten leiden dus tot de vorming van biomassa, koolstofdioxide, water en mineralen. In de literatuur worden er drie biologische luchtzuiveringssystemen besproken: biofilters, biowassers en biowasfilters. Deze drie technieken onderscheiden zich door het gedrag van de vloeistof-fase (bewegend of niet) en van de micro-organismen (gesuspendeerd of geïmmobiliseerd) (8). Dit wordt verduidelijkt in tabel 2. In figuur 1 wordt een schematische voorstelling gegeven van deze drie technieken.

3.1. Biofilter

In een biofilter wordt de stanklucht, eventueel na voorbehandeling, door een filterbed gestuurd. De geurcomponenten absorberen op het filtermateriaal waar ze door micro-organismen worden afgebroken. In de literatuur worden er een groot aantal filtermaterialen beschreven (9). In tabel 3 wordt hiervan een overzicht gegeven. De eerste biofilters bestonden uit bodemmateriaal. Deze hadden het belangrijke nadeel dat ze een geringe luchtpermeabiliteit bezitten. Naast een goede luchtpermeabiliteit dient het filtermateriaal ook drager te zijn van micro-organismen en mineralen. Huisvuilkompost voldoet aan deze voorwaarden

Fig. 1. Schematische voorstelling van de biologische luchtzuiveringstechnieken.



Tabel 3. Overzicht van de gebruikte filtermaterialen.

Filtermaterialen
Bodemmaterialen (mengsels van zand, leem, klei en een beperkte fractie van organisch materiaal); huisvuilcompost; fasertorf (nevenproduct van de turfwinning); houtcompost; boomschors; turf; heidekruid; geperst actief slib; actieve kool; synthetische dragers uit kunststoffen.

maar slibt gemakkelijk dicht, zodat er grote drukverliezen zijn. Naast het gebruik van natuurlijke materialen wordt ook gebruik gemaakt van polystyreen en polypropyleen om het filtermateriaal luchtig te maken en de luchtporositeit te garanderen.

Naargelang de constructiewijze onderscheidt men vier biofiltertypes : de grindbedfilter; de drukkamerfilter; de biofiltermodule en de etagefilter (9). Bij een grindbedfilter wordt de afvallucht onder het filterbed verdeeld door een systeem van geperforeerde buizen. Deze buizen liggen in een laag van keien, die zorgt voor een goede verdeling van de lucht over het filtermateriaal. Bij de drukkamerfilter ligt het filtermateriaal op betonnen roosters. Onder deze rooster bevindt zich een ruimte, die dienst doet als drukkamer en als verdeelsysteem. Deze constructies zijn eerder klassiek te noemen. Het zijn open systemen, waardoor het filtermateriaal sterk onderhevig is aan de weersomstandigheden (bv. uitdrogen in de zomer). Meer recente uitvoeringen zijn gesloten biofiltersystemen zoals de biofiltermodule en de etagefilter. Een biofiltermodule bezit standaardafmetingen en kan een paar duizend m³ lucht per uur behandelen. Bij een etagefilter gaat men verschillende biofilters boven elkaar construeren, waardoor men een meertrapsbehandeling van de afvallucht bekomt. Hierdoor wordt er ruimte bespaard.

3.2. Biowasser

In een gaswasser wordt het afvalgas doorheen een kolom geleid, waarbij gelijktijdig continu een vloeistof wordt gespreid. Bij contact tussen beide fasen gaan de oplosbare geurcomponenten over naar de vloeistoffase. Een biowasser werkt volgens hetzelfde principe (7). De wasvloeistof bevat biomassa, die de geabsorbeerde geurcomponenten afbreekt tot water, koolstofdioxide en minerale zouten. Dit laatste gebeurt meestal in een aparte oxydatiekolom. Men kan als wasvloeistoffen ofwel water met actief slib ofwel een waterige emulsie van een vloeibare koolwaterstof met actief slib gebruiken (10). De keuze is afhankelijk van de te reinigen lucht. Voor goed wateroplosbare, weinig toxische componenten met een vrij constante aanvoer wordt een biowasser met een water-actief slib mengsel gebruikt. Voor alle andere toepassingen hanteert men best een water-oplosmiddel emulsie.

3.3. Biowasfilter

Een biowasfilter kan men beschouwen als een combinatie van een biofilter en een biowasser (7). De biofilter heeft het nadeel dat de door microbiële activiteit gevormde zuren (of toxische intermediairen) in het filterbed ophopen. De afbraak wordt hierdoor geremd of zelfs volledig stopgezet. Door

invoering van een tweede bewegende fase in het systeem kunnen deze inhiberende verbindingen verwijderd worden met het sproeiwater. Dit wordt gerealiseerd in een biowasfilter. De te behandelen luchtstroom wordt doorheen een gepakt bed van inert materiaal gestuurd. Dit wordt voortdurend bevochtigd met behulp van een sproeiinstallatie. Het gepakt bed zorgt voor een goede stofoverdracht tussen de gas- en waterfase en dient als vasthechtingspunt voor micro-organismen, die de geabsorbeerde geurcomponenten afbreken.

In tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste voor- en nadelen van de verschillende biologische zuiveringstechnieken.

4. ONDERZOEKSRESULTATEN

De onderzoeksactiviteiten doorgevoerd op het Laboratorium voor Industriële Microbiologie en Biochemie m.b.t. biologische luchtzuivering vallen uiteen in twee delen. In een eerste gedeelte werd het gedrag van biofilters bestudeerd m.b.v. een aantal modelgeurcomponenten : butanal, boterzuur en ammoniak. In een tweede gedeelte werd een zuiveringsconcept bedacht, bruikbaar voor het behandelen van stanklucht rond AWZI, nl. een biowasfilter-biofilter combinatie. We zullen deze onderzoeksactiviteiten nu meer in detail bespreken.

4.1. Het gedrag van biofilters

Om het gedrag van biofilters te bestuderen hebben we gebruik gemaakt van biofilters op laboratoriumschaal, waarvan een schematische voorstelling gegeven is in figuur 2. Een illustratie van deze biofilter wordt getoond in figuur 3. De biofilter be-

Tabel 4. Overzicht van de belangrijkste voor- en nadelen van biologische zuiveringstechnieken.

Zuiveringstechniek	Voor- en nadelen
Biofilter	<p>Voordelen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lage constructie- en operationele kosten - geschikt voor hydrofiële en hydrofobe geurcomponenten - geen slibafscheiding nodig - ongevoelig voor niet-belaste perioden <p>Nadelen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - groot oppervlak nodig - lage belasting - microbiologische afbraak van filtermateriaal : heeft tot gevolg : (1) hogere energiekosten door verminderde luchtporositeit en (2) beperkte gebruikstijd (tussen 2 à 5 jaar) - moeilijke pH-controle - trage adaptatie bij veranderende gassamenstelling - geen lange zuivering van toxische verbindingen - emissie van bacteriën en schimmelsporen
Biowasser	<p>Voordelen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - eenvoudige constructie - snelle microbiële adaptatie bij veranderende gassamenstelling - eenvoudige sturing van pH, mineralen, etc. <p>Nadelen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - schuimvorming - extra beluchting van de vloeistoffase - minder geschikt voor slecht wateroplosbare verbindingen
Biowasfilter	<p>Voordelen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - compact, hoge flexibiliteit en buffercapaciteit - snelle microbiële adaptatie bij veranderende gassamenstelling - eenvoudige sturing van het microbiële proces : pH, mineralen, etc. - hoge belastingen <p>Nadelen :</p> <ul style="list-style-type: none"> - hogere constructie en operationele kosten - verstopping van pakkingsmateriaal mogelijk - minder geschikt voor hydrofobe geurverbindingen

Fig. 2: Schematische voorstelling van de biofilteropstelling : (1) luchtinlaat; (2) luchtbevochtiger (wasfles and borrelkolom met water in serie); (3) wasfles met de geurverbinding; (4)-(6) drie biofiltercompartimenten gevuld met boomschors; (7)-(10) meetpunten op 0, 0,33, 0,66 en 0,99 m filterhoogte; (11) luchtuitlaat; (12) bevochtigde lucht; (13) lucht verzadigd met geurcomponent en (14) lucht verontreinigd met geurverbinding.

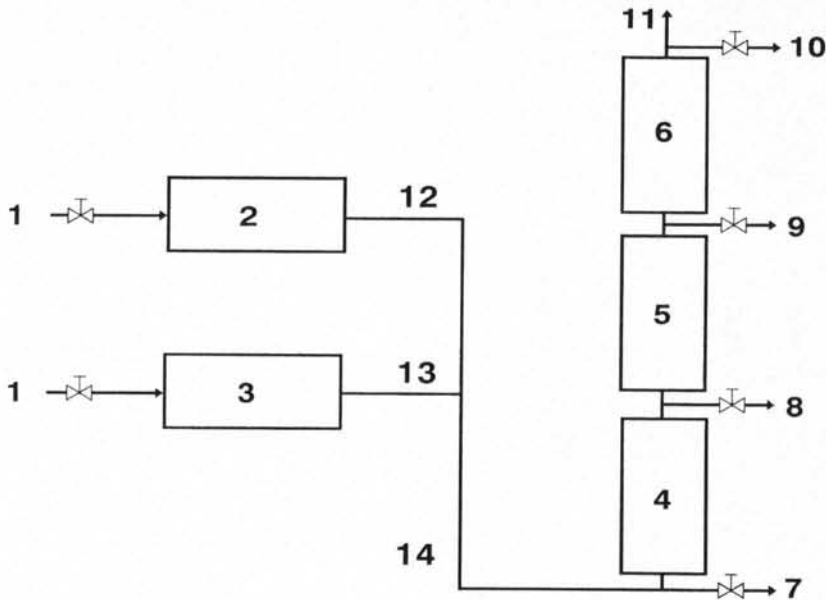
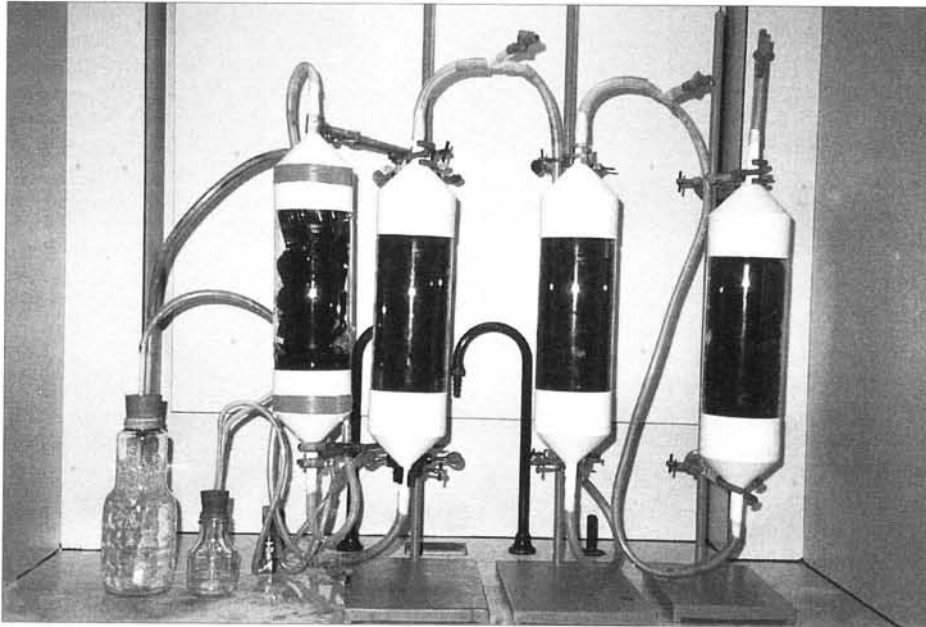


Fig. 3: Foto van een biofilter op laboratoriumschaal.



staat uit drie compartimenten gevuld met filtermateriaal. Deze compartimenten zijn met elkaar verbonden en vormen samen een filterbed van 0,99 m hoogte. Boomschors werd als filtermateriaal gekozen omwille van zijn goede filterkarakteristieken (11). De lucht wordt eerst bevochtigd in een luchtbevochtiger om uitdrogen van het filtermateriaal te vermijden. Deze luchtstroom wordt vermengd met een gedoseerde luchtstroom van een geurcomponent. Als modelgeurcomponenten hebben we butanal, boterzuur en ammoniak gebruikt. Butanal bezit een lage geurdrempel van ongeveer 14 ppb (12) en komt voor in de emissies van afvalwaters van vilbeluiken en destructiebedrijven (13). Al-

dehyden, zoals butanal kunnen gevormd worden bij de oxydatie van vetten en bij de Streckerdegradatie van aminozuren. Boterzuur kan in vele emissies voorkomen, vooral bij de anaëroobe afvalwaterzuivering en in transportleidingen van een AWZI. Boterzuur heeft een zeer lage geurdrempelwaarde van 1 ppb, terwijl ammoniak een hoge waarde van 3,8 ppm bezit (12). Ammoniak komt o.a. voor in de emissies rond AWZI waar eiwitrijke afvalwaters worden behandeld. Ongetwijfeld is het één van de belangrijkste geurverbindingen in de emissies afkomstig van de intensieve veeteelt. Ammoniakemissies zijn o.a. verantwoordelijk voor de verzuring van de bodem (14).

4.1.1. Invloed van het vochtgehalte van het filtermateriaal

Om de invloed van het vochtgehalte van de biofilter op de eliminatie-efficiëntie te bepalen werd de biofilter achtereenvolgens gevuld met boomschors met een vochtgehalte van 15,2; 32,9; 47,8 en 57,4 %. De hoogte van het filterbed werd beperkt tot 0,2 m en de biofilter werd beladen met 10 ppm (v/v) butanal aan een volumetrisch debiet van $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. De butanalconcentraties werden bepaald na 8 h, 1 en 3 dagen voor en na de filter. De resultaten zijn weergegeven in tabel 5 en worden uitgedrukt in eliminatie-efficiënties, berekend volgens :

$$\alpha = \frac{(C_o - C_i)}{C_o} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

met: α = de eliminatie-efficiëntie; C_i = de concentratie van de geurcomponent gemeten op hoogte i in de biofilter; C_o de butanal ingangconcentratie. De resultaten in tabel 5 tonen aan dat er een minimum vochtgehalte is voor het biofiltratieproces. Een vochtgehalte van 32,9 % en lager geeft geen permanente butanalverwijdering. Met een vochtgehalte van 47,8 % werd een constante eliminatie-efficiëntie bereikt na 1 dag werking. Dit geeft aan dat het minimum vochtgehalte gelegen is tussen 32,9 en 47,8 %. Deze waarde is hoger dan de in de literatuur geciteerde waarden (15), maar het minimum vochtgehalte hangt ongetwijfeld af van de samenstelling van het filtermateriaal. Bij aanvang treedt er enkel een adsorptie en/of absorptiefenomeen op. Evidentie voor deze hypothese kan gevonden worden in de metingen bij een vochtgehalte van 32,9 %.

Na 8 h was de eliminatie-efficiëntie slechts 3 %, terwijl na 1 dag er totaal geen butanal verwijderd was. Dit suggereert dat er geen regeneratie is van de adsorptie en/of absorptie plaatsen op de boomschors door micro-organismen. In tegenstelling hiermee was er na 3 dagen wel een goede verwijdering van butanal bij een vochtgehalte van 47,8 %. De eliminatie-efficiëntie stijgt met het vochtgehalte, maar een groter vochtgehalte resulteert in een lagere luchtpermeabiliteit en bijgevolg ook hogere werkingskosten. Dit veronderstelt een optimaal vochtgehalte van het filtermateriaal. Omwille van de goede karakteristieken voor luchtpermeabiliteit en afbraakcapaciteiten werd in de hierna beschreven experimenten een vochtgehalte van 57 % gebruikt.

4.1.2. Invloed van nutriënttoevoeging

De invloed van nutriënttoevoeging werd onderzocht via twee identische biofilters beladen met butanal (10 ppm (v/v)) aan een volumetrisch debiet van $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (16). Aan de eerste biofilter (biofilter 1) werd dagelijks gedurende 14 dagen, daarna wekelijks 30 ml van een nutriëntoplossing toegevoegd. De samenstelling van deze oplossing is weergegeven in

Tabel 5. Invloed van het vochtgehalte van het filtermateriaal op het verwijderingsrendement.

Vochtgehalte van het filtermateriaal (%)	Eliminatie-efficiëntie (%) na		
	8 uur	1 dag	3 dagen
15,2	0	0	0
32,9	3	0	0
47,8	30	19	19
57,4	48	40	43

Tabel 6. Samenstelling van de nutriëntoplossing.

Chemische verbinding	Concentratie (g/l)
Na_2HPO_4	0,8
NaH_2PO_4	0,2
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	0,05
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,5
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1,0
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,01

Tabel 7. Effect van belasting van butanal op het biofiltratieproces.

	Biofilter 1	Biofilter 2
Kritische belasting ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)	120,0	90,0
Maximale eliminatiecapaciteit ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)	90,4	74,5
Butanal verwijdering ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	2,2	1,8
Koolstofverwijdering ($\text{kg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	1,6	1,2

tabel 6. Aan de andere biofilter (biofilter 2) werden tijdens de werking geen nutriënten toegevoegd. De biofilters werden volledig gevuld met boomschors met pH van 6.5 en een vochtgehalte van 57.4. De bu-

tanalconcentraties werden gemeten op 4 biofilterhoogten (0.0; 0.33; 0.66 en 0.99 m). De eliminatie-efficiënties bij de verschillende hoogten werden berekend m.b.v. formule (1). De eliminatie-efficiën-

tie voor biofilter 1 is weergegeven in figuur 4A. Abstractie makend van de fluctuaties kunnen we twee grote perioden onderscheiden. In een eerste periode van 21 dagen stijgt het verwijderingsrendement naar een maximum toe. Dit wijst op een adaptatie van de micro-organismen aan het substraat. Tijdens de tweede periode zijn de eliminatie-efficiënties voor de verschillende filtersecties verschillend. Het meeste van de butanal wordt verwijderd in de eerste sectie. Na 84 dagen werking werd een totaal verwijderingsrendement van 97 % bekomen. De fluctuaties in deze waarde zijn waarschijnlijk te wijten aan de veranderingen in tegendruk (11). In figuur 4B worden de eliminatie-efficiënties vergeleken van beide biofilters. Het blijkt dat de biofilter met nutriënttoevoeging beter functioneert dan deze zonder nutriënttoevoeging (met uitzondering van dag 35 en 56). Tijdens de ganse werking werd een gemiddelde eliminatie-efficiëntie van 97 % bereikt voor biofilter 1 en 86 % voor biofilter 2.

4.1.3. Invloed van de belasting aan geurcomponenten

De invloed van de belasting aan geurcomponenten op de filterefficiëntie werd nagegaan m.b.v. de twee biofilters beladen met butanal met of zonder nutriënttoevoeging. Verschillende butanal belastingen werden gebruikt om de eliminatiecapaciteit van beide biofilters te bepalen. In figuur 5 wordt een typische curve getoond voor elke biofilter. Bij een bepaalde kritische belasting (L_c) zal de zogenaamde maximale eliminatiecapaciteit (EC_{max}) bereikt zijn. De resultaten van dit experiment worden samengevat in tabel 7. Het blijkt dat een hogere kritische belasting, maximale eliminatiecapaciteit, butanal verwijdering en koolstof verwijdering bereikt worden na nutriënttoevoeging.

Fig. 4. Invloed van nutriënttoevoeging op het verwijderingsrendement van een biofilter : A. Eliminatie efficiëntie (%) van de 3 biofiltersecties van de biofilter met nutriënttoevoeging (biofilter 1); B. Vergelijking van het globale verwijderingsrendement tussen de biofilter met nutriënttoevoeging (biofilter 1) en zonder nutriënttoevoeging (biofilter 2).

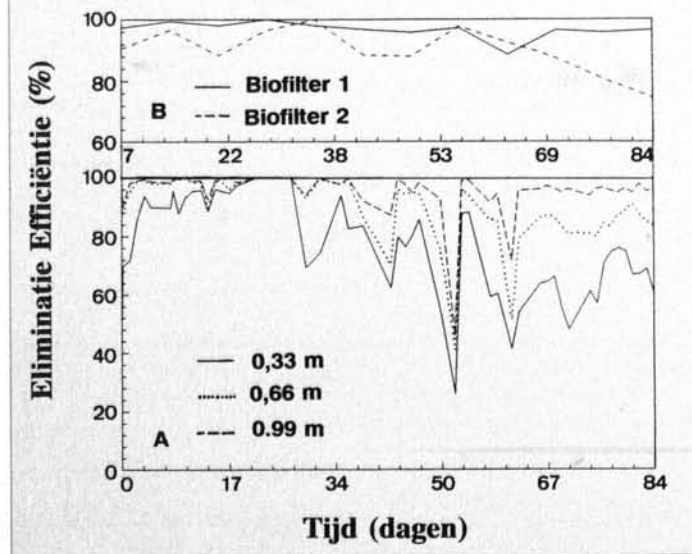
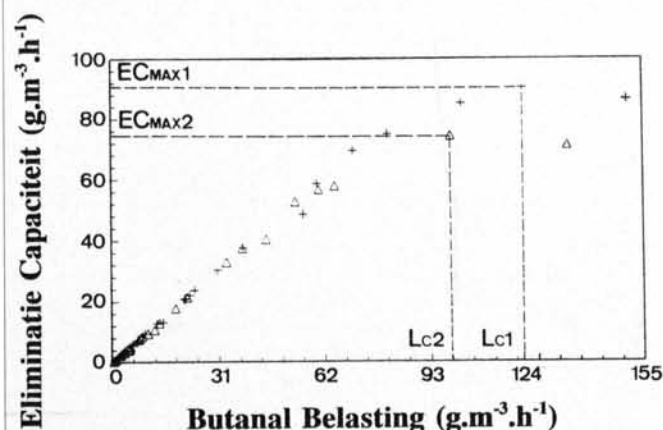


Fig. 5. Invloed van de filterbelasting aan butanal op het verwijderingsrendement van een biofilter met nutriënttoevoeging (+) en zonder nutriënttoevoeging (Δ); EC_{max1} en EC_{max2} zijn de maximale eliminatiecapaciteit van respectievelijk de biofilter met en zonder nutriënt toevoeging met $Lc1$ en $Lc2$ de bijhorende kritische belastingen



4.1.4. Invloed van buffering van het filtermateriaal

Bij hoge belasting van butanal werd door de biofilter zonder nutriënttoevoeging boterzuur vrijgesteld. Bijgevolg zouden de fosfaten aanwezig in de nutriëntoplossing een bufferende rol kunnen spelen. Een bufferingscapaciteit kan ook verkregen worden door toevoeging van kalk aan het filtermateriaal. Daarom werden twee biofilters gevuld met filtermateriaal, waarvan één gemengd met kalk. Hierdoor steeg de pH van de boomschors van 6.5 tot 7.2. Bij boterzuurvoeding werd een ingangconcentratie van 6 ppm (v/v) boterzuur en een volumetrisch debiet van 100 m³.m⁻².h⁻¹ gebruikt. Beide biofilters werden 84 dagen lang gevolgd, wat betreft de verwijdering van boterzuur. Na deze periode werd een gemiddelde eliminatie-efficiëntie van 80 % met kalktoevoeging en 72 % zonder kalktoevoeging gevonden. Dit resulteert in een klein maar positief effect, na kalktoevoeging aan het biofiltermateriaal.

4.1.5. Kolonizatie van het filtermateriaal

Gedurende de biofiltratie-experimenten met butanal werd een film van micro-organismen gevormd op het filtermateriaal. Deze micro-organismen werden van de boomschors geschrapt en gesuspenderd in een Ringeroplossing. Daarna werden ze uitgeplaat op een Nutrient Agar. Verschillende bacteriële stammen, gisten en schimmels waren aanwezig. Om na te gaan of deze micro-organismen butanal kunnen afbreken, werden de afgeschrapte micro-organismen geïnculeerd in een nutriëntmedium met butanal als enige koolstofbron. Zowel bacteriën, gisten als schimmels konden de butanal afbreken, maar ze werden niet verder gedifferentieerd. De resultaten van de microbiële tellingen zijn weergegeven in tabel 8. Een vergelijking van de twee gebruikte media leert ons dat slechts een deel van de micro-organismen, geïsoleerd op de boomschors butanal gebruiken als koolstofbron voor hun metabolisme, hetgeen logisch is.

4.1.6. Nitrificatieproces in een biofilter gevoed met ammoniak

Om het nitrificatieproces in een biofilter beter te begrijpen werd een biofilteropstelling gevuld met kalk gemengde boomschors. Deze reaktor werd beladen met 4 ppm tot 16,5 ppm (v/v) ammoniak aan een volumetrisch debiet van 100 m³.m⁻².h⁻¹. Gedurende 7 weken werden de ammoniakconcentraties gemeten na 0, 0,33, 0,66 en 0,99 m doorgang door het filtermateriaal. Na deze periode werd een gemiddelde, totale eliminatie-efficiëntie van 83 % gemeten. Er waren wel gedurende het experiment grote schommelingen in het verwijderingsrendement. Om een beter inzicht te hebben in het verwijderingsmechanisme werd op drie tijdstippen een percolaat genomen van het filtermateriaal en dit percolaat werd onderzocht op nitraat, nitriet, ammoniak en pH. In tabel 9 wordt een overzicht gegeven van deze metingen samen

Tabel 8. Kolonizatie van het filtermateriaal.

Groei van	Nutrient Agar medium (cfu.cm ⁻²)	Butanal medium (cfu.cm ⁻²)
Bacteriën	± 10 ⁸	± 10 ⁷
Schimmels en gisten	± 10 ⁷	± 10 ⁶

met de verwijderingsrendementen op het tijdstip van de percolatieanalyse. In een publicatie van Anthonissen et al. wordt een gedetailleerde studie beschreven van de inhibitie van het nitrificatieproces door ammoniak en salpeterigzuur (17). Het blijkt dat de vrije ammoniak (FA, free ammonia) en het vrije salpeterigzuur (FNA, free nitrous acid) verantwoordelijk zijn voor de remming van het nitrificatieproces. Deze FA- en FNA-concentraties kunnen berekend worden als functie van de pH, met de volgende formules :

$$FA (ppm) = \frac{17}{14} \times \frac{\text{totaal } N-NH_4^+ \times 10^{pH}}{K_b + 10^{pH}} \text{ met } \frac{K_b}{K_w} = e^{-\left(\frac{9.244}{273+t}\right)} \quad (2)$$

$$FNA (ppm) = \frac{46}{14} \times \frac{NO_2^- - N}{K_a \times 10^{pH}} \text{ met } K_a = e^{-\left(\frac{2300}{273+t}\right)} \quad (3)$$

met : FA = de vrije ammoniak concentratie; FNA = de vrije salpeterigzuur concentratie; t = de temperatuur in °C.

Indien we aannemen dat een analoge interpretatie mogelijk is voor onze resultaten, dan kunnen we met behulp van formules (2) en (3) en t = 20°C de FA- en FNA-waarden berekenen. Deze waarden zijn weergegeven in tabel 9. Volgens Anthonissen et al. bevond het nitrificatieproces zich in de zogenoemde zone 2; dit betekent dat er een remming is van *Nitrobacter* soorten.

Deze *Nitrobacter* soorten zijn verantwoordelijk voor de omzetting van nitriet naar nitraat in het nitrificatieproces. Bijgevolg zal een remming van *Nitrobacter* resulteren in een verlaagde productie van nitraat uit nitriet en dus een ophoping van nitriet. Een hogere FA-concentratie geeft een hogere nitriet-concentratie (hogere *Nitrobacter* inhibitie), zoals blijkt uit tabel 9 voor het percolaat na 1104 h. In dit geval was de eliminatie-efficiëntie laag. In tegenstelling hiermee was na 408 en 768 h de eliminatie-efficiëntie hoger dan 95 % en dus de nitrificatierekking laag (lage FA- en nitriet concentratie).

4.2. Bouw van en experimenten met een Biowasfilter-Biofilter-combinatie

Om de voordelen van biofilters en biowasfilters (zie tabel 4) in één opstelling te verenigen werd een nieuw zuiveringsconcept, nl. een biowasfilter-biofilter combinatie ontwikkeld. Alzo wordt een compact en efficiënt biologisch luchtzuiveringssysteem bekomen, dat eenvoudig naast een AWZI kan geplaatst worden. Deze opstelling werd eerst op laboratoriumschaal getest, waarna een installatie op pilotschaal werd gebouwd. Met deze pilootopstelling werden een aantal preliminaire experimenten uitgevoerd.

Tenslotte volgde de bouw op industriële schaal, nl. als container.

Fig. 6: Schematische voorstelling van de biowasfilter-biofilter reaktor : (1) luchtinlaat; (2) luchtbevochtiger (twee waslussen in serie); (3) wasles met geurverbinding; (4) biowasfilter : wasles gevuld met nutriëntoplossing, geënt met micro-organismen; (5) biofilter, gevuld met boomschors; (6)-(8) meetpunten; (9) luchtuitlaat; (10) bevochtigde lucht; (11) lucht verzadigd met geurverbinding.

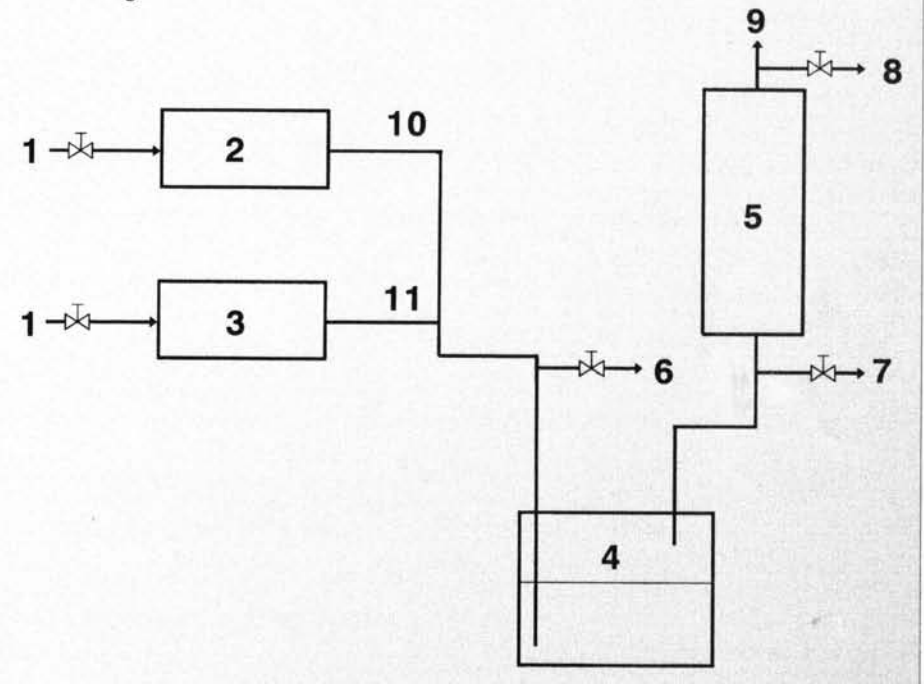
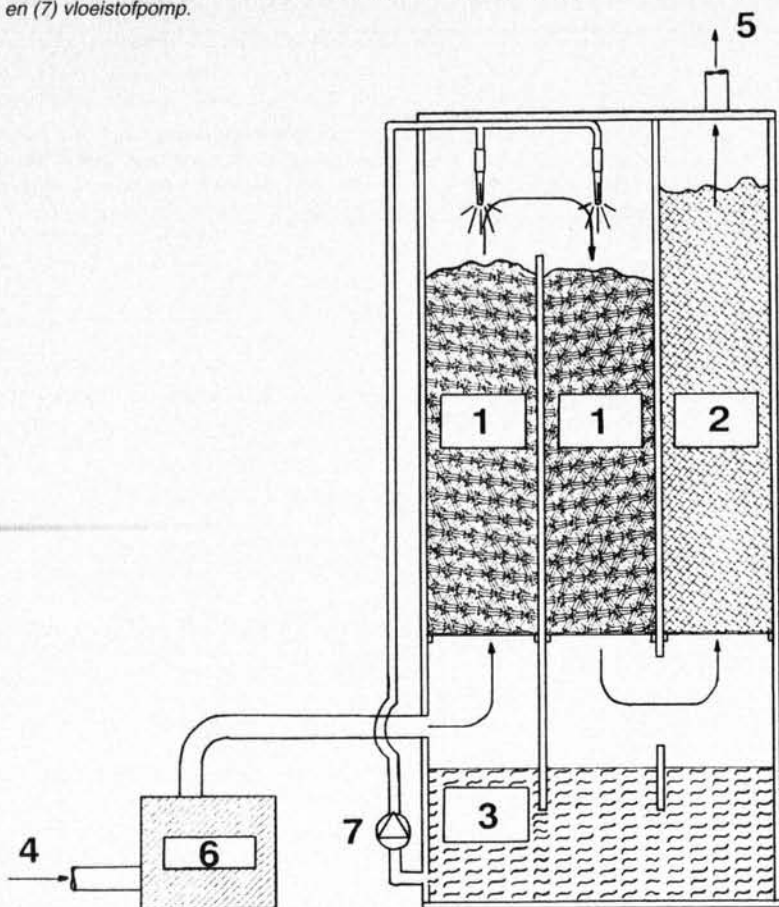


Fig. 7: Schematische voorstelling van de pilootopstelling : (1) biowasfilter : pakkingsmateriaal, waarop micro-organismen groeien; (2) biofilter : boomschors gemengd met plastieken ringen als filtermateriaal; (3) wasvloeistof met biomassa; (4) afvalgassen; (5) gezuiverde lucht; (6) ventilator en (7) vloeistofpomp.



4.2.1. Laboratoriumschaal

In figuur 6 wordt een schematische voorstelling van de laboratoriumreactor weergegeven. De lucht wordt eerst bevochtigd in een serie wasflessen en daarna gemengd met een gedoseerde hoeveelheid geurcomponent. Vervolgens wordt dit mengsel gestuurd door een wasfles (1 liter wasvloeistof) en een biofilter (0.5 m lengte). Deze reactor kon met een gemiddelde ingangconcentratie van 27 ppm (v/v) aan butanal en een volumetrisch debiet van $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 80 % zuiveren. Om een optimale werking te bekomen is het belangrijk om de pH van de biowasfilter en de biofilter binnen welbepaalde grenzen te houden (18).

4.2.2. Piloot- en Industriële schaal

In figuur 7 wordt de pilootopstelling getoond. De afvalgassen van een AWZI worden aangezogen door een ventilator en onderaan in de opstelling gebracht. De reac-

tor is opgebouwd uit drie compartimenten. In het eerste compartiment worden de afvalgassen doorheen een gepakt bed gestuurd van plastieken ringen waarop micro-organismen kunnen groeien. Tegelijkertijd wordt het besproeid met water met gesuspenderde biomassa. In een tweede compartiment wordt het afgas door een tweede identisch gepakt bed gestuurd maar nu besproeid in gelijkstroom. Het laatste compartiment is gevuld met biofiltermateriaal (boomschors en plastieken ringen) en dient om de laatste restjes geur uit de lucht te verwijderen. Het water-actief slib mengsel wordt met behulp van een pomp teruggebracht naar de sproeikoppen. Een foto van deze pilootopstelling wordt getoond in figuur 8.

Preliminare experimenten toonden aan dat deze installatie zeer geschikt is om stanklucht van diverse chemische aard te zuiveren en een commercialisatie van dit concept drong zich op. In figuur 9 wordt een

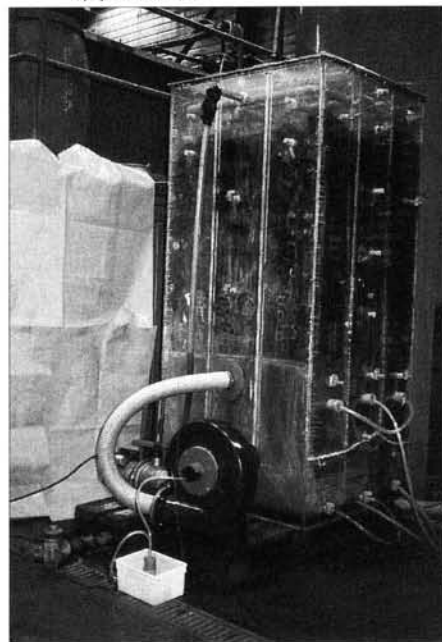
industriële realisatie weergegeven. Het bestaat uit een container, opgedeeld in drie compartimenten: twee biowasfiltersecties en één biofilter, geplaatst in serie. Momenteel wordt de biofilter-biowasfilter combinatie Seghobioclean[®] genaamd, als een module naast een AWZI geplaatst zoals geïllustreerd in figuur 10. Het verwijderingsrendement van de gehele installatie is 95 à 100 %. Verder is het zeer compact en kostvriendelijk.

5. DISCUSSIE

Uit deze experimenten blijkt dat verschillende afvalgassen efficiënt kunnen gezuiverd worden door biofilters. Het blijkt duidelijk dat een voldoende hoog vochtgehalte van het filtermateriaal, een goede dosering van nutriënten en kalk en een goede keuze van de belasting aan geurverbindingen noodzakelijk zijn voor hoge verwijderingsrendementen. Hoge verwijderingsrendementen zijn namelijk gewenst in geurbestrijding.

Volgens de Weber-Fechner psychofysische machtenwet (19) zijn de geurintensiteit en de concentratie van een geurcomponent met elkaar gerelateerd, volgens :

Fig. 8: Foto van het biowasfilter-biofilter-concept op pilotschaal.



$$I_1 = \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^n \quad (4)$$

met : I_1, I_2 = de geurintensiteit van een geurverbinding; C_1, C_2 = de concentratie

Tabel 9: pH, nitraat-, nitriet-, ammonium-, FA- en FNA-concentraties in de percolatiewaters na een bepaalde tijd (x), samen met de bijhorende eliminatie-efficiënties in de biofilter

Percolaat na x (h)	pH	N-NO ₃ - (ppm)	N-NO ₂ - (ppm)	N-NH ₃ (ppm)	FA (ppm)	FNA (ppm)	El.Ef. (%)
408	7.9	9.0	0.4	121.3	4.5	4.4 x 10 ⁻⁵	97.0
768	7.8	9.4	0.4	125.9	3.7	5.1 x 10 ⁻⁵	96.7
1104	8.1	15.9	3.1	130.9	7.5	2.1 x 10 ⁻⁴	70.0