

ÖSTERREICHISCHE WASSER- UND ABFALLWIRTSCHAFT

Schriftleitung: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Kastanek, Em. O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. S. Radler, Em. O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. H. Supersperg
Springer-Verlag/Wien · New York

Hochleistungsbiologie und Membrantrenntechnik zur Abwasserreinigung: Fallstudie Deponiesickerwasser

High-rate Biology and Membrane Separation for Water Purification — Case Study: Landfill Leachate

Von B. Mayr, S. Novak, P. Horvat, F. Gaisch, M. Narodoslowsky und A. Moser

Kurzfassung/Summary

Eine Pilotanlage, bestehend aus zwei Bioreaktoren (aerob and anoxisch) mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) während der stationären Betriebsphase von über 25 kg/m³, einer Mikrofiltration mit Keramikmembranen und einer nachgeschalteten Umkehrosmose, mit Wickelelementen bestückt, wurde zur Reinigung von zwei verschiedenen Deponiesickerwässern verwendet. Die Reinigung erfolgte bis zur Direkteinleitungsqualität, die in der 613. Emissionsverordnung des österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft vom 24. September 1992 festgelegt worden ist.

A pilot plant consisting of two bioreactors (aerobic and anoxic) with a dry solid matter content of more than 25 kg/m³ during the steady operating phase and of a ceramic-membrane microfiltration unit followed by a reversal osmosis unit equipped with bandage elements was used for purifying leachate water from two different landfills. Purification was continued until a quality suitable for direct discharge was reached as specified in Emission Order nr. 613 of 24 September 1992 issued by the Austrian Ministry of Agriculture and Forestry.

1. Einleitung

Das Konzept der „ökologischen Prozeßtechnik“ hat die Intention, die Technologie in die Biosphäre einzubetten, indem die gesamte Bandbreite der Artenvielfalt in einer gesamtheitlichen Sichtweise genutzt wird (Moser, 1992 und 1993; Narodoslowsky, 1993). Das Hauptanliegen dieses Konzeptes ist es, die Technologie inklusive den sogenannten „end-of-pipe“-Verfahren in einer Weise zu restrukturieren, daß sie als ökologisch nachhaltig angesehen werden können (Hell, 1993; Moser, 1993). Das Konzept der ökologischen Prozeßtechnik wurde zur Entwicklung eines neuen Reinigungsverfahrens für Deponiesickerwasser (SIWA) angewendet (Mayr, 1993). Die organische, aber auch anorganische Belastung des SIWA resultiert einerseits aus anaeroben mikrobiologischen Abbauvorgängen im Deponiekörper und andererseits aus der hohen mechanischen Müllverdichtung (Küster und Niese, 1986). Hohe Konzentrationen an CSB und NH₄-N stellen zumeist ein Charakteristikum der SIWAs dar (Küster und Niese, 1986; Mayr, 1993). Die organische Belastung im Abwasser, ausgedrückt als CSB, wird bereits seit dem Anfang dieses Jahrhunderts erfolgreich mit aeroben biologischen Verfahren reduziert (Verstraete, 1986). Die Entnahme von Ammonium und organischer Stickstoffverbindungen mit kombinierter aerober und anaerober (anoxischer) biologischer Behandlung (Nitrifikation/Denitrifikationsprozeß) wurde in den letzten Jahrzehnten entwickelt und bereits vielfach in die biologische Abwasserreinigung integriert (Mayr, 1993; Verstraete und van Vaerenbergh, 1986).

In dieser Studie wurde die biologische Abwasserbehandlung in zwei Bioreaktoren vollzogen (Abb. 1). Im Nitrifikationstank herrschen aerobe

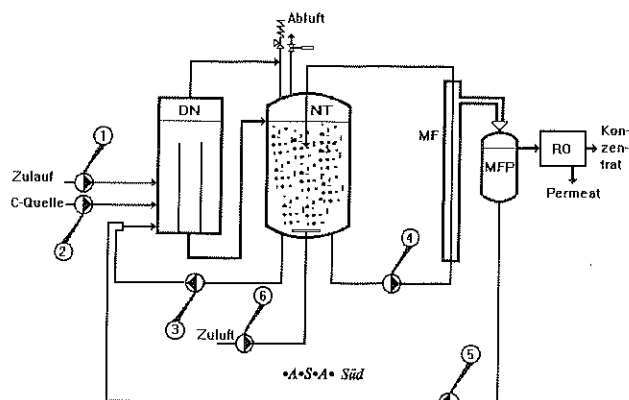
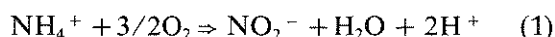


Abb. 1. Schema der Pilotanlage: Nitrifikationstank (NT), Denitrifikationstank (DN), Mikrofiltration (MF), Zwischenbehälter für das Permeat der Mikrofiltration (MFP) und Umkehrosmoseanlage (RO). Die Pfeile 1—5 bezeichnen die Pumpen für: SIWA Zulauf (1), externe Kohlenstoffquelle (2), Nitratrückführung aus NT in DN (3), Mikrofiltration (4), Rückführung von Permeat der Mikrofiltration in DN (5). Der Pfeil (6) markiert den Druckluftkompressor

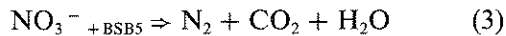
Bedingungen, einerseits zur Oxidation von Ammonium zu Nitrat und andererseits zur weitergehenden Oxidation der CSB-Verbindungen.

Vereinfacht läuft die Reaktion über zwei Arten von chemolithotrophen Mikroorganismen (Verstraete und van Vaerenbergh, 1986) ab



Der zweite Tank ist als anoxischer Pfropfenströmungsreaktor ausgebildet. Fakultativ anaerobe Mikroorganismen verwenden Nitratsauerstoff zur Oxidation von leicht abbaubaren organi-

schen Kohlenstoffverbindungen. Dabei wird Nitratstickstoff zu elementarem Stickstoff reduziert (Verstraete und van Vaerenbergh, 1986).



Eine gut adaptierte Mikroorganismenkultur kann organische Abwasserinhaltsstoffe als Elektronendonator (Gl. (3)) verwenden, falls jedoch ein zu niedriges Verhältnis C : N vorliegt, ist die Zugabe einer externen Kohlenstoffquelle zum weitgehenden Nitratabbau unumgänglich (Verstraete und van Vaerenbergh, 1986).

Da die nitrifizierenden Bakterien langsam wachsende chemolithotrophe Stämme sind, ist die Aufrechterhaltung einer hohen Biomassekonzentration essentiell zum Erreichen von hohen volumetrischen Abbauraten im kontinuierlichen Prozeß. Dies kann erzielt werden, indem die Bakterien immobilisiert in Festbett- (Atanasoff und Strohmeier, 1993; Strohmeier, 1994) oder Wirbelbett- (de Gooijer et al., 1993; Ødegaard und Busten, 1994; Bundgaard et al., 1994; Csikor et al., 1993; Zastrutzki et al., 1993) Bioreaktoren vorliegen oder indem die Biomasse durch Sedimentation (Verstraete und van Vaerenbergh, 1986) oder Ultrafiltration (Lang, 1992; Maté, 1993; Gaisch, 1993) vom Ablauf abgetrennt und in die Bioreaktoren rückgeführt wird.

Die Zielsetzung der in dieser Arbeit vorgestellten Pilotversuche zur SIWA-Aufbereitung lag in der Definition der relevanten Prozeßparameter und Kennzahlen für die Maßstabsvergrößerung und in der Erstellung eines Inbetriebnahmeprotokolls für das Anfahren der Großanlage. Weiters wurden die Bedingungen für einen kontinuierlichen Betrieb der Anlage ermittelt. Zur Biomasseabtrennung wurde erfolgreich eine keramische Mikrofiltration mit automatischer Rückspülung der Module anstelle einer organischen Ultrafiltrationsmembran eingesetzt. Die Mikrofiltration ersetzt also die in der kommunalen Abwassertechnik üblichen Nachklärbecken mit Schwerkraftsedimentation.

Zur erforderlichen Reinigung des partikel- und biomassefreien Mikrofiltrationspermeates bis auf Direkteinleitungsqualität wurde eine Umkehrosmoseanlage mit Wickelmodulen eingesetzt, um ionische bzw. biologisch nicht abbaubare molekulare Verunreinigungen abzutrennen. Das gewonnene Reinwasser wies in beiden Fällen eine Qualität auf, die sowohl die Direkteinleitung als auch die Nutzung dieses geruchlosen Wassers für Reinigungszwecke am Betriebsgelände gestattet.

2. Materialien und Methoden

2.1 Anlagentechnik

Für eine detaillierte Beschreibung wird auf eine bereits erschienene Arbeit verwiesen (Lang, 1992). Die wichtigsten Teile der Versuchsanlage (Abb. 1) sind:

- vorgeschalteter Denitrifikations- (DENI)-Tank:
ausgebildet als druckloser anoxischer Pfropfenströmungsbioreaktor mit einem Füllvolumen von 0,155 m³
- Nitrifikations- (NITRI)-Tank:
druckloser aerober Blasensäulenbioreaktor mit 0,470 m³ Füllvolumen, ausgestattet mit Tellerbelüftern
- Cross-Flow-Mikrofiltration zum Biomasserückhalt (Maté, 1993):
es werden Keramikmodule mit einem max. Porendurchmesser von 0,2 µm eingesetzt, die mit einer automatischen druckluftbetriebenen Rückspüleinrichtung versehen sind. Konzentratseitig weisen die Module einen offenen Kanaldurchmesser von 3,3 mm auf.

SIWA wird dem vorgeschalteten DENI-Tank (DN) zugeführt. Das im SIWA enthaltene Ammonium durchströmt den DENI-Tank weitgehend unverändert und erreicht den NITRI-Tank (NT). In diesem Bioreaktor wird Ammonium von chemolithotrophen Mikroorganismen zu Nitrat oxidiert (Gl. (1, 2)). Ein Teilstrom wird dem NITRI-Tank entnommen und in den DENI-Tank rückgeführt (Nitratrückführung). Bevor dieser Teilstrom in den DENI-Tank eintritt, wird er mit dem unbehandelten SIWA vermischt. Der im frischen SIWA enthaltene CSB wird zur Reduktion von Nitrat zu elementarem Stickstoff von fakultativ anaeroben Mikroorganismen verwendet (Gl. (3)).

Die Anlage ist mit mehreren Rezirkulationsleitungen bestückt:

- Der erste Kreislauf dient zur Rückführung von Nitrat und Mikroorganismen aus der Nitrifikation in die Denitrifikation.
- Der zweite an den NITRI-Tank angeschlossene Kreislauf dient der Mikrofiltration.

Während das Retentat der Mikrofiltration wieder in den NITRI-Tank rückgeführt wird, wird das gewonnene Permeat in einem Permeat-tank gespeichert. Im Falle, daß der Füllstand des Systems unterschritten oder aber die gewünschte Ablaufqualität nicht erreicht wird, kann ein Teil des Permeates wieder ins System rückgeführt werden. Das gewonnene Permeat der Mikrofiltration wird anschließend in einer Umkehrosmoseanlage weiter behandelt. Die Umkehrosmoseanlage ist mit Standortwickel-elementen ausgestattet, der maximale Betriebsdruck beträgt 60 bar.

Der NITRI-Tank wird permanent belüftet. Der Luftdurchsatz wird manuell über ein Schwabekörperdurchflußmeßgerät eingestellt. Die Versuche sind unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt worden.

2.2 Belebtschlamm

Zur Erstbefüllung der Anlage fand Belebtschlamm aus einer kommunalen Abwasserkläranlage Verwendung.

2.3 Hilfsstoffe

Grundsätzlich soll der Prozeß sowohl aus ökonomischen, aber auch aus ökologischen Gründen mit einer minimalen Chemikaliengabe ablaufen. Während der Inbetriebsetzungsphase wurde der pH-Wert der Biologie mit einer technischen 96%igen Schwefelsäure korrigiert, anschließend, d. h. im kontinuierlichen Betrieb, konnte auf eine Einstellung des pH-Wertes verzichtet werden.

Salze der Phosphorsäure wurden im Überschuß zugegeben, um eine Phosphor-Limitation auszuschließen. Das Entschäumungsmittel ACEPOL 83E der Carl Becker Chemie, Bilbrookdeich, Deutschland, wurde zur Schaumkontrolle eingesetzt. Falls nötig, wurde eine technische 20%ige Essigsäure als externe Kohlenstoffquelle zugegeben.

2.4 Analytik

Regelmäßig wurden Proben vom Rohsickerwasser, vom Permeat der Mikrofiltration und aus den Bioreaktoren entnommen. Die Leitfähigkeit wurde mit dem Meßgerät WTW LF 196 und der pH-Wert mit dem Gerät Orion 420A gemessen. Zur photometrischen Bestimmung von Ammonium, Nitrit und Nitrat wurden Spectroquant 14752, 14773 und 14776 von Merck benützt. Ebenso wurde der Parameter CSB photometrisch mit dem Röhrentest CSB 15000 und CSB 1500 von Macherey-Nagel nach einer zweistündigen Erhitzung bei 148 °C bestimmt. Die photometrischen Bestimmungen wurden mit einem Hewlett Packard 8352A Photometer durchgeführt. Die Phosphatkonzentration im Permeat der Mikrofiltration wurde mit dem Aquamerck 14661 semi-quantitativen Schnelltest überprüft.

Der Gehalt an Biomasse in beiden Bioreaktoren wurde indirekt über Ermittlung der Trockensubstanz (TS) und der organischen Trockensubstanz (oTS) der gesamten Probe quantifiziert. Zur Bestimmung der TS wurden 50 ml der gut homogenisierten Probe bei 110 °C so lange getrocknet, bis sich keine Gewichtsänderung mehr ergab. Die oTS ergibt sich, indem das Gewicht der Asche, die nach einer zwölfstündigen Behandlung bei 600 °C zurückbleibt, vom Gewicht der TS subtrahiert wird. Die oben erwähnten Analysen wurden im Labor der ASA Abfall Service Holding AG durchgeführt, während die restlichen durch ein autorisiertes Labor abgewickelt wurden.

3. Resultate und deren Diskussion

Zwei Deponiesickerwässer, benannt „A“ (Maté, 1993) und „B“ (Gaisch, 1993), wurden in dieser Arbeit untersucht. Sickerwasser A stammt von der Mülldeponie Halbenrain der ASA Abfall Service Holding AG und weist sowohl hohe Konzentrationen an organischen (z. B. CSB) als auch anorganischen (z. B. NH₄, Schwermetalle) Inhaltsstoffen auf. Um die Biozö-

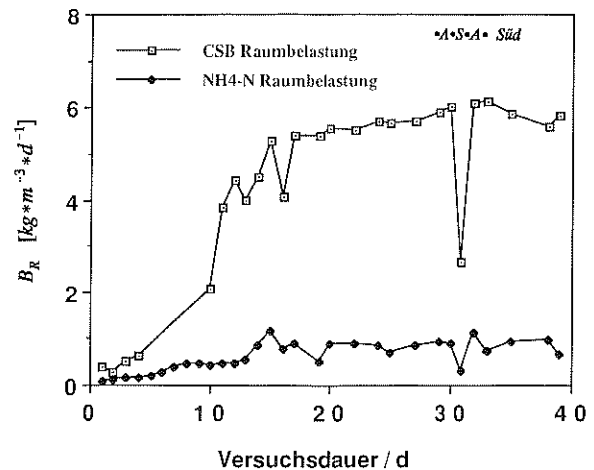


Abb. 2. CSB Raumbelastung und NH₄-N Raumbelastung während des Experiments mit SIWA A

nose an dieses stark belastete SIWA anzupassen, wurde der Bioprozeß mit einem sehr geringen SIWA-Zulauf und entsprechend mit einer kleinen Raumbelastung (Abb. 2) gestartet.

In den folgenden 17 Tagen wurde die Raumbelastung unter ständiger Überwachung stetig gesteigert. Dabei richtet sich das Hauptaugenmerk darauf, den langsam wachsenden autotrophen Nitrifikanten optimale Wachstumsbedingungen zu bieten. Stationäre Bedingungen stellten sich nach diesen ersten 17 Tagen ein und konnten während der folgenden 23 Tage konstant aufrechterhalten und protokolliert werden. Zwei Störfälle traten dabei auf, am 21. bis zum 22. Tag konnte die Belüftung aufgrund maschineller Probleme nicht aufrechterhalten werden. Am 29. und 30. Versuchstag fiel die Stromversorgung der Versuchsanlage aus, dies verursachte einen vollständigen Stillstand aller Systeme. In der stationären Betriebsphase bewegte sich die Ammonium-Stickstoff-Konzentration im Zulauf zwischen 5,5 und 6,2 g/l, die CSB-Konzentration zwischen 22 und 40 g/l. Der pH-Wert des Rohsickerwassers blieb unverändert und schwankte zwischen 8,1 und 8,8.

In der Versuchsanlage waren keine Wärmeaustauscher integriert, daher ergab sich eine direkte Abhängigkeit der Prozeßtemperatur von den klimatischen Bedingungen. Experiment A wurde in den Monaten Mai und Juni durchgeführt. Mehrere Pumpen und der Druckluftkompressor brachten permanent Wärme in das Medium ein, daher lag die Prozeßtemperatur immer höher als die Umgebungstemperatur. Als minimale Prozeßtemperatur wurden 30 °C registriert, das Maximum betrug 43 °C. Im Regelfall pendelte die Prozeßtemperatur zwischen 36 und 38 °C.

Die Belüftung des Nitrifikationstanks wurde graduell während der Inbetriebsetzungsperiode gesteigert und erreichte am 21. Tag den Maximalwert von 12 Nm³/h. Die Zuluftmenge wurde abhängig von der in situ gemessenen Konzentration an Gelöst-Sauerstoff erhöht. Während der

stationären Betriebsweise wurde der Prozeß meistens unter Sauerstofflimitation betrieben, d. h. bei Gelöst-Sauerstoff-Konzentrationen $< 0,5 \text{ mg/l}$. Das Verhältnis Zuluft zu SIWA lag in diesem Zeitraum im Bereich von 2,1 bis $2,7 \text{ m}^3$ (Zuluft)/1 (SIWA), dies weist auf eine schlechte Sauerstoffausnutzung des Belüftungssystems (Tellerbelüfter) im Nitrifikationstank hin.

Die Konzentration an aktiver Biomasse wurde indirekt für beide Tanks durch die Messung der Trockensubstanz (TS) und der organischen Trockensubstanz (oTS) ermittelt (Abb. 3).

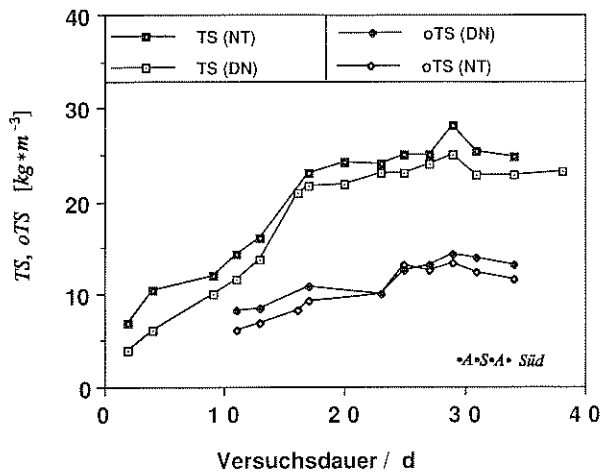


Abb. 3. TS- und oTS-Gehalte in der Nitrifikation (NT) und in der Denitrifikation (DN) während des Versuchs mit SIWA A

Zwei Phasen des Bioprozesses treten klar hervor: Die Inbetriebsetzungsphase mit einem deutlichen Wachstum und der stationäre Betrieb mit einer geringen bis vernachlässigbaren Zunahme an Biomasse. Die Wachstumsgeschwindigkeit betrug im ersten Zeitraum $0,53 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3\text{d})$ im Denitrifikationsreaktor und $0,45 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3\text{d})$ in der Nitrifikation bzw. $0,47 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3\text{d})$, bezogen auf das Gesamtvolumen. Auf eine Schlamm-entnahme konnte bemerkenswerterweise während

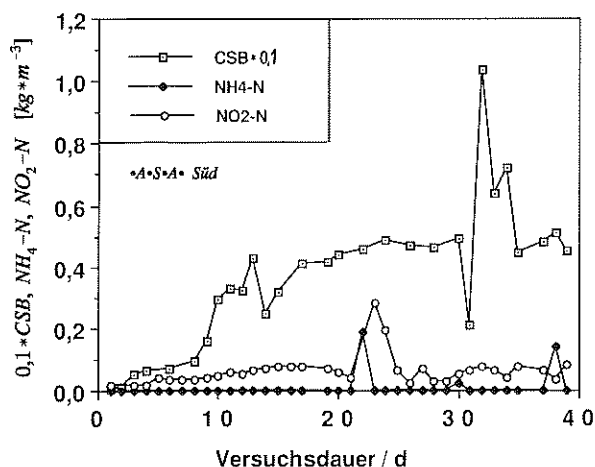


Abb. 4. Konzentration an Ammonium-Stickstoff, Nitrit-Stickstoff und CSB im Permeat der Mikrofiltration während des Experiments mit SIWA A

der gesamten Versuchsdauer verzichtet werden, daher müßte das Schlammalter theoretisch als unendlich quantifiziert werden.

In Abb. 4 sind die Konzentrationsverläufe von Ammonium-Stickstoff, Nitrit-Stickstoff und CSB im Permeat der Mikrofiltration dargestellt.

Nitrat-Stickstoff lag während der Versuchsdauer jeweils unter der Nachweisgrenze, auf eine Darstellung wurde daher verzichtet. Die Ammonium-Stickstoff-Konzentration im Permeat lag ebenfalls meistens unter dem Meßbereich der analytischen Methode, mit der Ausnahme der beiden bereits zuvor erwähnten Betriebsstörungen.

Am 22. Tag fiel nur der Kompressor des Belüftungssystems aus, während alle anderen Komponenten der Anlage einschließlich der SIWA-Dosierpumpe normal arbeiteten. Ohne Belüftung kam der Nitrifikationsprozeß zum Stillstand, und daher stieg die Ammonium-Konzentration infolge der weiterhin kontinuierlichen SIWA-Zugabe. Ammonium akkumulierte in der Anlage über einen Zeitraum von 15–20 Stunden. Nach der Wiederinbetriebnahme des Kompressors stellte sich eine korrespondierende Nitrit-Konzentrationsspitze ein. Der Bioprozeß benötigte zirka drei Tage, um sich wieder vollständig zu stabilisieren.

Am 29. Tag wurde die Stromversorgung der gesamten Anlage unterbrochen, daher kamen sämtliche Pumpen und der Kompressor zum Stillstand. Die Beeinträchtigung des Bioprozesses stellte sich als wesentlich geringer als am 22. Tag heraus, da aufgrund des Stillstands der SIWA-Dosierpumpe kein Ammonium der Anlage zugeführt wurde. Ein geringer Anstieg der Ammonium-Konzentration war trotzdem zu registrieren, als der Bedienungsmann den Zulauf wieder startete. Eine Desorption von angelagertem Ammonium aus dem Schlamm, verbunden mit einer kurzen neuerlichen Adaptionsphase der Biozönose, verursachte wahrscheinlich diese geringfügige Konzentrationssteigerung.

Es wurde bereits zuvor darauf hingewiesen, daß während der gesamten Versuchsdauer des Experiments A kein Nitrat nachgewiesen werden konnte, allerdings konnte Nitrit während des gesamten Zeitraumes quantifiziert werden.

Dies legt die Vermutung nahe, daß während der Adaptionszeit *Nitrosomonas* sp., die Ammonium zu Nitrit oxidieren (Gl. (1)), die *Nitrobacter* sp., verantwortlich für die Oxidation von Nitrit zu Nitrat (Gl. (2)), überwuchert bzw. verdrängt haben. Durch folgendes Experiment konnte diese Hypothese belegt werden: Eine kleine Menge der Kultur des Nitrifikationstanks wurde entnommen und weiterhin andauernd belüftet. In den folgenden 48 Stunden konnte weder eine Abnahme von Nitrit bzw. eine Bildung von Nitrat festgestellt werden.

Für den Fall, daß die Oxidation des Nitrits zum Nitrat vermieden wird, beträgt die notwendige Sauerstoffmenge zum Ammonium-Abbau — stöchiometrisch gesehen — nur 75%. Interessanterweise wurde kürzlich über einen Versuch

berichtet, den Nitrifikationsprozeß ohne den Nitrit-Oxidationsschritt in einem immobilisierten System durchzuführen, jedoch ohne Erfolg (Zastrutzki et al., 1993).

Die Biozönose im Denitrifikationstank adaptierte sich offensichtlich sehr gut zur Nitritreduktion, da Nitrit niemals im Ablauf des als Pfropfenströmungsreaktor ausgebildeten Tanks festgestellt werden konnte. Die Adaption an die im SIWA vorhandenen organischen Kohlenstoffverbindungen stellte sich ebenfalls als hervorragend heraus, daher konnte auf eine Zudosierung einer externen Kohlenstoffquelle während der gesamten Dauer des Experiments A verzichtet werden.

Die gemessenen CSB-Konzentrationen im Permeat der Mikrofiltration unterschritten die Erwartungen (Abb. 4). Der biologische Teil der Gesamtversuchsanlage, bestehend aus Denitrifikation, Nitrifikation und Mikrofiltration, baute den Großteil des Ammonium-Stickstoffs und der organischen Fracht (CSB) des SIWAs ab. Im stationären Betrieb betrug die Reinigungsleistung bezüglich Ammonium mehr als 95%, hinsichtlich des CSB-Abbaues 85% (Abb. 5).

In Tabelle 1 sind die Resultate einer Gesamtanalyse angeführt.

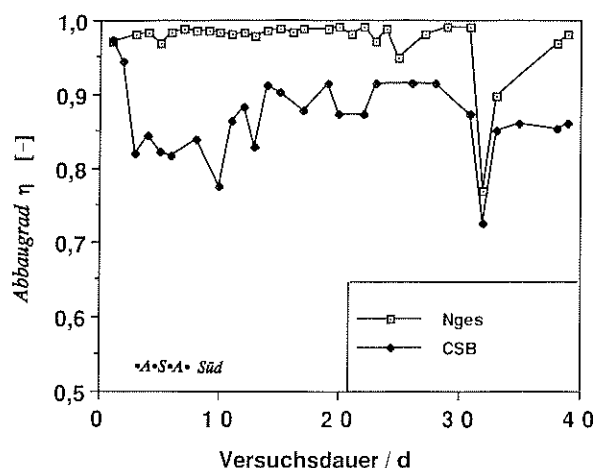


Abb. 5. Gesamtabbaugrad, bezogen auf Ammonium-Stickstoff ($\eta_{N/PL}$) und CSB ($\eta_{CS/PL}$) während des Experiments mit SIWA A

Im besonderen sind die Abbauarten des biologischen Prozesses hinsichtlich der Parameter Sulfid und AOX bemerkenswert. Die wesentlichen Einflußgrößen der biologischen SIWA-Reinigung sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 1. Analysenergebnisse des Experiments mit dem SIWA A

Parameter	Einheit	SIWA	Mikrofiltrationspermeat	Permeat der 1. Stufe Umkehrosiose
pH		8,6	8,4	6,8
Leitfähigkeit	mS m ⁻¹	3140	1450	4,7
CSB	kg m ⁻³	30,3	3,00	0,006
AOX (als Cl)	kg m ⁻³	18 · 10 ⁻³	1,4 · 10 ⁻³	0,02 · 10 ⁻³
Blei	kg m ⁻³	3,3 · 10 ⁻⁵	1,9 · 10 ⁻⁵	0,6 · 10 ⁻⁵
Chrom	kg m ⁻³	6,5 · 10 ⁻³	4,7 · 10 ⁻³	<0,05 · 10 ⁻³
Nickel	kg m ⁻³	8,4 · 10 ⁻³	4,9 · 10 ⁻³	1,3 · 10 ⁻³
Zink	kg m ⁻³	1,4 · 10 ⁻³	0,8 · 10 ⁻³	0,26 · 10 ⁻³
Ammonium-N	kg m ⁻³	6,150	0,007	<0,0001
Nitrat-N	kg m ⁻³	0,013	0,010	<0,0005
Nitrit-N	kg m ⁻³	0,001	0,130	<0,0003
Phosphat (ges.)	kg m ⁻³	0,215	0,120	<0,0001
Sulfid	kg m ⁻³	0,42	0,005	kP
Chlorid	kg m ⁻³	3,800	3,800	0,0005

kP = keine Probe

Tabelle 2. Kennzahlen der biologischen Reinigungsstufe mit SIWA A

Parameter	Einheit	Nitrifikationsbehälter	Denitrifikationsbehälter	Gesamtvolumen
TS	kg m ⁻³	≈ 26,0	≈ 24,0	≈ 25,5
oTS	kg m ⁻³	≈ 14,5	≈ 13,0	≈ 14,0
B_R, CSB	kg m ⁻³ · d ⁻¹	7,73	24,43	5,81
B_R, N_{ges} ^a	kg m ⁻³ · d ⁻¹	1,28	3,89	0,96
$B_{TS, CSB}$	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	0,31	1,062	0,237
$B_{oTS, CSB}$	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	0,600	2,036	0,422
$B_{TS, N_{ges}}$ ^a	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	0,512	0,169	0,039
$B_{oTS, N_{ges}}$ ^a	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	0,098	0,322	0,070
hydr. Verweilzeit	h	2,24	0,74	140
Stickstoff ^a				
Abbaugrad	%	—	—	95—98
CSB Abbaugrad	%	—	—	80—88

^a NH₄-N für NT und Gesamtvolumen NO_x-N für DN

Tabelle 3. Analysenergebnisse des Experiments mit dem SIWA B

Parameter	Einheit	SIWA	Mikrofiltrations-permeat	Permeat der 1. Stufe Umkehrosrose
pH	—	8,4	8,3	6,8
Leitfähigkeit	mS m ⁻¹	1740	855	4,7
CSB	kg m ⁻³	5,200	1,600	0,006
BSB ₅	kg m ⁻³	2,200	kP	kP
AOX (als Cl)	kg m ⁻³	13 · 10 ⁻³	6,3 · 10 ⁻³	0,64 · 10 ⁻³
Ammonium-N	kg m ⁻³	1,470	0,013	< 0,0005
Nitrat-N	kg m ⁻³	0,004	0,026	kP
Nitrit-N	kg m ⁻³	0,005	0,0226	kP
Phosphat (ges.)	kg m ⁻³	0,016	0,007	kP

kP = keine Probe

Tabelle 4. Kennzahlen der biologischen Reinigungsstufe mit SIWA B

Parameter	Einheit	Nitrifikations-behälter	Denitrifikations-behälter	Gesamtvolumen
TS	kg m ⁻³	≈ 22,8	≈ 20,2	≈ 22,0
oTS	kg m ⁻³	≈ 12,2	≈ 11,1	≈ 12,0
B _{R, CSB} ^a	kg m ⁻³ · d ⁻¹	4,83	14,63	3,63
B _{R, N_{ges}} ^b	kg m ⁻³ · d ⁻¹	1,01	3,05	0,75
B _{TS, CSB} ^a	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	—	—	0,190
B _{oTS, CSB} ^b	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	—	—	0,320
B _{TS, NH₄} ^a	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	—	—	0,040
B _{oTS, NH₄} ^b	kg kg ⁻¹ · d ⁻¹	—	—	0,067
hydr. Verweilzeit	h	1,47	0,48	50
Stickstoff ^b				
Abbaugrad	%	—	—	90—98
CSB ^a Abbaugrad	%	—	—	65—81

^a der CSB der externen Kohlenstoffquelle ist einbezogen^b NH₄-N für NT und Gesamtvolumen, NO_x-N für DN

Zur Aufbereitung des Mikrofiltrationspermeates bis auf Direkteinleitungsqualität gemäß der 613. österreichischen Emissionsverordnung für Deponien vom September 1992 wurde eine zweistufige Umkehrosroseanlage verwendet. Die Reinigungsleistung der ersten Stufe ist in Tabelle 1 angegeben.

Die größten Anforderungen ergeben sich bei den Parametern CSB und Nitrit bzw. Nitrat, jedoch können auch diese beiden Werte mit guter Sicherheit mit der untersuchten Anlagenkonfiguration erreicht werden. In beiden Umkehrosrosestufen finden Wickelmodule Verwendung. Eine befürchtete Verblockung der Module konnte auch nach mehreren Monaten Betrieb nicht festgestellt werden, sicherlich aufgrund des sehr gut vorgereinigten Permeates der Mikrofiltration der biologischen Stufe. Um Ausfällungen von Salzen auf der Membran zu verhindern, wurde der pH-Wert des UO-Zulaufs auf Werte < 6,5 gesenkt.

Im Falle des Versuchs B mit einem Sickerwasser einer zweiten Deponie wurde eine ähnliche experimentelle Strategie gewählt. Das SIWA B wies sowohl hinsichtlich Ammonium-Stickstoff als auch in bezug auf CSB niedrigere Konzentrationen auf (Tabelle 3).

In diesem Fall mußte aufgrund des niedrigen C:N-Verhältnisses und der schlechteren Abbaubarkeit der Kohlenstoffverbindungen eine externe Kohlenstoffquelle zudosiert werden, um

eine ausreichende Entnahme von Stickstoffverbindungen zu gewährleisten. Geringere Konzentrationen von Ammonium und CSB, verbunden mit hohen Abbauraten, gestatteten eine im Vergleich zu Experiment A wesentlich kürzere hydraulische Verweilzeit (Gaisch, 1993) (Tabelle 4).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit untersuchte biologisch-physikalische Sickerwasserreinigung stellte sich als ein sowohl ökologisch als auch ökonomisch effizientes Verfahren heraus. Zwei Pilotversuche wurden in einer Anlage, bestehend aus zwei Bioreaktoren (aerob und anoxisch), einer Mikrofiltration mit Keramikmembranen zum Biomasserückhalt und einer nachgeschalteten Umkehrosrose durchgeführt. Die Aufbereitung erfolgte bis zur Direkteinleitungsqualität gemäß der 613. Emissionsverordnung des österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft vom 24. September 1992, die erforderliche Schadstoffentnahme erreichte daher teilweise Werte bis 99,9%.

Die in dieser Arbeit präsentierten Pilotversuche bestimmten die relevanten Prozeßparameter und Kennzahlen für die Maßstabsvergrößerung, sie dienten aber auch zur Ermittlung eines Inbetriebnahmeprotokolls für die Großanlage.

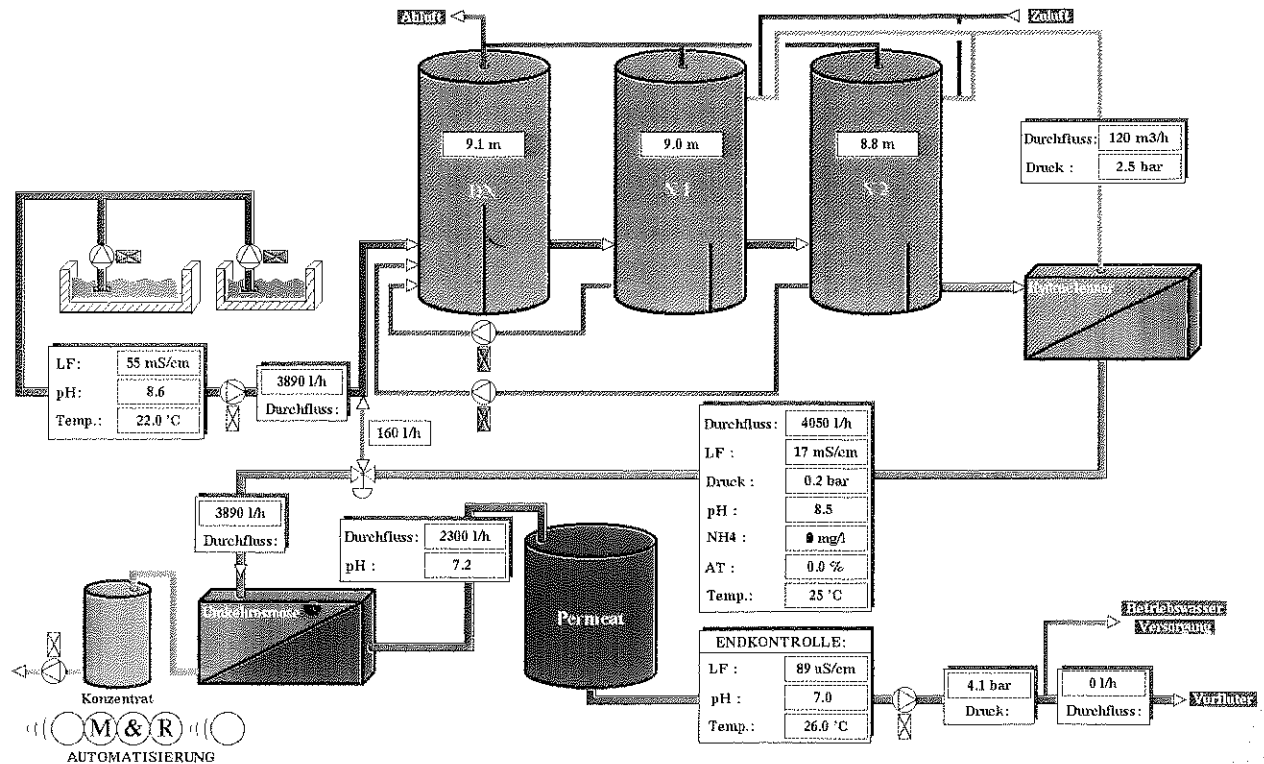


Abb. 6. Übersichtsblatt des Prozeßleitsystems

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen, wurde ab September 1993 die Großanlage BIO-JET®-RO auf der Deponie Halbenrain der ASA Abfall Service Holding AG errichtet und im April 1994 fertiggestellt. Zur Maßstabsvergrößerung wurden einerseits kürzlich präsentierte Konzepte (Mayr, 1993 und 1994) verwendet, aber auch mehrere physikalische und biologische Kenngrößen, wie z. B. der spezifische Sauerstoffbedarf, definiert. Verbesserungen hinsichtlich der optimalen Kombination von Mikrofiltration mit einer Injektorbelüftung und Schaumkontrolle fanden bei der Planung der Großanlage Berücksichtigung und wurden zum Patent angemeldet. Ein modernes Prozeßleitsystem kontrolliert die Gesamtanlage (Abb. 6).

In der Programmierung der Regelabläufe wurden die Erfahrungen des Versuchsbetriebes konsequent umgesetzt. Die Kapazität der Großanlage beträgt 100 m³ (SIWA)/d. Die Inbetriebsetzung der Anlage läuft seit April 1994, mit Vollbetrieb kann ab Juni 1994 gerechnet werden.

Abkürzungen

B_R	Raumbelastung	[kg · m ⁻³ · d ⁻¹]
B_{TS}	Schlammbelastung	[kg · kg ⁻¹ · d ⁻¹]
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf	[kg · m ⁻³]
TS	Trockensubstanz	[kg · m ⁻³]
η	Abbaugrad	[%]
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff	[kg · m ⁻³]
NO ₂ -N	Nitrit-Stickstoff	[kg · m ⁻³]
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff	[kg · m ⁻³]
oTS	organische Trockensubstanz	[kg · m ⁻³]

Q_{in}	SIWA-Zulauf	[m ³ · d ⁻¹]
V_{DN}	Flüssigvolumen des Denitrifikationstanks	[0,155 m ³]
V_{NT}	Flüssigvolumen des Nitrifikationstanks	[0,47 m ³]
V_{PL}	Flüssigvolumen der Anlage ($V_{DN} + V_{NT}$)	[m ³]

Indizes

CSB	bezogen auf CSB
DN	bezogen auf Denitrifikation
MFP	Mikrofiltrationspermeat
N	bezogen auf Stickstoff
NT	bezogen auf Nitrifikation
oTS	auf Basis der organischen Trockensubstanz
PL	bezogen auf Gesamtanlage
TS	auf Basis Trockensubstanz

Danksagung

Die ASA Abfall Service Holding AG unterstützte diese Arbeit in jeder Hinsicht großzügig und stellte das präsentierte Datenmaterial zur Verfügung.

Literatur

Atanasoff-Kardjalieff, K., Strohmeier, A. (1993): Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeit von modernen Festbettverfahren zur weitestgehenden Abwasserreinigung am Beispiel der biologisch aktivierten Filtration. Österr. Wasserversirtschaft 45 (3/4), 71.

Bundgaard, E., Andersen, V. R., Kern-Jespersen, J. P. (1994): Einsatzmöglichkeiten und großtechnische Erfahrungen mit der Biofiltration zur Nitrifikation und Denitrifikation. Wiener Mitt. 117, E-1.

- Csikor, Z., Mihaltz, P., Czako, L., Hollo, J. (1993): Fluidized bed nitrification-denitrification. In: Sixth European Congress on Biotechnology, Firenze, Abstracts MO185.
- Gaisch, F. (1993): Versuchsbericht zur Sickerwasseraufbereitung. ASA Abfall Service Holding AG, Graz.
- de Gooijer, C. D., Wijffels, R. H., Tramper, J. (1993): A dynamic model for the growth of immobilized nitrifying bacteria. In: Sixth European Congress on Biotechnology, Firenze, Abstracts MO181.
- Hell, F., Moser, A. (1993): The biological denitrification of drinking water as a case study of ecological process engineering. In: Sixth European Congress on Biotechnology, Firenze, Abstracts TH079.
- Küster, E., Niese, G. (1986): Dumping of refuse and sludges. In: Rehm, H.-J., Reed, G. (eds.), *Biotechnology* Vol. 8. VCH, Weinheim, 349–362.
- Lang, D. (1992): Deponiesickerwasser: Versuche zur biologischen Vorbehandlung. Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik, TU Graz.
- Maté, G. (1993): Membranverfahren bei der Aufbereitung von Deponiesickerwässern. Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik, TU Graz.
- Mayr, B. (1993): Die Sickerwasserproblematik auf Deponien: Versuch einer Lösung in Zusammenarbeit mit Forschung und Wissenschaft. In: *Handbuch der Umwelttechnik, 7. Internationale Kongreß-Messe für Umwelttechnik UTEC*, Wien, 114.
- Mayr, B., Nagy, E., Horvat, P., Moser, A. (1993): Modelling of mixing and simulation of its effect on glutamic acid fermentation. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 7, 31.
- Mayr, B., Nagy, E., Horvat, P., Moser, A. (1994): Scale-up on basis of structured mixing models: a new concept. *Biotechnol. Bioeng.* 43 (3) 195.
- Moser, A. (1992): Ecological biotechnology — a new dimension. *Acta Biotechnol.* 12, 69.
- Moser, A. (1993): Eco-principles for restructuring technology in direction of ecologic process engineering. In: Sixth European Congress on Biotechnology, Firenze, Abstracts TH074.
- Narodoslawsky, M. (1993): Ecologic process engineering — a new dimension of biotechnology. In: Sixth European Congress on Biotechnology, Firenze, Abstracts TH073.
- Ødegaard, H., Rusten, B. (1994): Das „Moving Bed Biofilm“-Verfahren. *Wiener Mitt.* 117, F-1.
- Strohmeier, A. (1994): Einsatzmöglichkeiten und großtechnische Erfahrungen mit der Biofiltration zur Stickstoff- und Phosphorentfernung. *Wiener Mitt.* 117, D-1.
- Verstraete, W., van Vaerenbergh, E. (1986): Aerobic activated sludge. In: Rehm, H.-J., Reed, G. (eds.), *Biotechnology* Vol. 8. VCH, Weinheim, 43–112.
- Zastrutzki, M., Feuerhake, E., Jördening, H.-J. (1993): High rate nitrification-denitrification with immobilized systems. In: Sixth European Congress on Biotechnology, Firenze, Abstracts MO 185.

Anschrift der Verfasser: Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Mayr, ASA Abfall Service Holding AG, Straßganger Straße 293, A-8053 Graz.